

Die Elektrotechnik  
und die  
elektromotorischen Antriebe  
von  
Wilhelm Lehmann

# Die Elektrotechnik und die elektromotorischen Antriebe

Ein elementares Lehrbuch  
für technische Lehranstalten und zum Selbstunterricht

von

Dipl.-Ing. **Wilhelm Lehmann**

Mit 520 Textabbildungen  
und 116 Beispielen



Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH 1922

ISBN 978-3-662-36109-2

ISBN 978-3-662-36939-5 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-662-36939-5

Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung  
in fremde Sprachen vorbehalten.

Copyright 1922 by Springer-Verlag Berlin Heidelberg  
Ursprünglich erschienen bei Julius Springer in Berlin 1922  
Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1922

## **Vorwort.**

Die Aufgaben, welche sich heute der überwiegenden Mehrzahl aller Techniker, die auf elektrotechnischem Gebiete arbeiten, darbieten, liegen nicht auf dem Gebiete der Konstruktion elektrischer Maschinen, auch nicht auf dem der Erzeugung elektrischer Energie, sondern vielmehr auf dem Verwendungsgebiet der elektrotechnischen Erzeugnisse. Diesen Technikern sowie den Schülern der technischen Mittelschulen will das vorliegende Buch eine Hilfe bieten, indem es mit ganz elementaren Mitteln hauptsächlich Wirkungsweise und Verhalten der elektrischen Maschinen und Apparate behandelt und dabei das Konstruktive ganz zurückstellt. Bei den Erklärungen ist die Anschaulichkeit der wissenschaftlichen Strenge übergeordnet. Da das wichtigste Anwendungsgebiet die elektromotorischen Antriebe sind, haben dieselben eine besonders eingehende Behandlung erfahren. Ich hoffe damit auch den Maschinen-Ingenieuren einen Dienst erwiesen zu haben.

Frankfurt a. M., im Dezember 1921.

**Wilhelm Lehmann.**

# Inhaltsverzeichnis.

|   | Seite |
|---|-------|
| I. Der Magnetismus . . . . .  | 1     |
| II. Die Elektrizität und ihre Anwendungen . . . . .                                 | 4     |
| A. Die Wirkungen des elektrischen Stromes . . . . .                                 | 4     |
| B. Das Ohmsche Gesetz . . . . .   | 4     |
| C. Die Wärmewirkungen des elektrischen Stromes . . . . .                            | 14    |
| D. Die chemischen Wirkungen des elektrischen Stromes. . . . .                       | 19    |
| E. Die magnetischen Wirkungen des elektrischen Stromes . . . . .                    | 27    |
| F. Die elektrische Induktion . . . . .  | 39    |
| G. Die Selbstinduktion. . . . .   | 46    |
| H. Der elektrische Kondensator . . . . .  | 48    |
| I. Die Thermo-Elektrizität . . . . .  | 49    |
| K. Die elektrischen Meßinstrumente . . . . .  | 50    |
| III. Die Gleichstrommaschinen . . . . .   | 58    |
| A. Die Spannungserzeugung . . . . .   | 58    |
| B. Die Erregung der Gleichstromerzeuger . . . . .                                   | 62    |
| C. Der Aufbau der Gleichstromerzeuger . . . . .                                     | 66    |
| D. Die Gleichstrommotoren. . . . .  | 78    |
| E. Die Ankerrückwirkung und die Kommutation der Gleichstrom-<br>maschinen . . . . . | 85    |
| F. Die Verluste der Gleichstrommaschinen . . . . .                                  | 92    |
| G. Das Verhalten der Gleichstromerzeuger . . . . .                                  | 97    |
| H. Das Verhalten der Gleichstrommotoren . . . . .                                   | 102   |
| I. Die Regelung der Umlaufzahl der Gleichstrommotoren . . . . .                     | 107   |
| K. Die elektrische Bremsung mittels Gleichstrommotoren . . . . .                    | 113   |
| IV. Der Wechselstrom und die Wechselstrommaschinen . . . . .                        | 116   |
| A. Die Erzeugung und Messung des Wechselstroms . . . . .                            | 116   |
| B. Die Darstellung der Sinuslinien durch Vektoren . . . . .                         | 119   |
| C. Die Beziehung zwischen Strom und Spannung im Wechselstrom-<br>kreis. . . . .     | 120   |
| D. Die Leistung des Wechselstromes. . . . .   | 129   |
| E. Die Drosselspule . . . . .   | 131   |
| F. Der Wechselstromerzeuger . . . . .   | 136   |
| V. Der Drehstrom und die Drehstrommaschinen . . . . .                               | 140   |
| A. Die Drehstromerzeugung. . . . .  | 140   |
| B. Die Drehstromleistung. . . . .   | 147   |
| C. Der Drehstromerzeuger . . . . .  | 149   |
| VI. Die Umformung elektrischer Energie . . . . .                                    | 155   |
| Die Transformatoren . . . . .   | 156   |
| VII. Die Wechsel- und Drehstrommotoren . . . . .                                    | 172   |
| A. Die Synchronmotoren . . . . .  | 172   |
| B. Die Asynchronmotoren . . . . .   | 174   |
| C. Die Kommutatormotoren für Wechsel- und Drehstrom . . . . .                       | 198   |

|   | Seite |
|---|-------|
| VIII. Die Erzeugungsstätten elektrischer Energie . . . . .  | 207   |
| A. Der Antrieb . . . . .  | 207   |
| B. Die Wahl der Spannung . . . . .  | 208   |
| C. Die Maschinengröße. . . . .  | 209   |
| D. Das Parallelschalten von Stromerzeugern . . . . .  | 210   |
| E. Die Schaltanlage . . . . .   | 214   |
| F. Der Verkauf der elektrischen Energie. . . . .  | 215   |
| IX. Die Übertragung und Verteilung der elektrischen Energie   | 216   |
| A. Die Fernleitung. . . . .   | 218   |
| B. Die Energieverteilung. . . . .   | 225   |
| X. Die elektrischen Beleuchtungsanlagen . . . . .   | 247   |
| A. Der Lichtbedarf . . . . .  | 247   |
| B. Die Anordnung der Beleuchtung . . . . .  | 248   |
| C. Die Leitungen und Hilfsapparate. . . . .   | 251   |
| D. Die Legung der Leitungen. . . . .  | 254   |
| XI. Der elektromotorische Antrieb. . . . .  | 258   |
| A. Die Vorzüge des elektromotorischen Antriebs . . . . .  | 258   |
| B. Die Wechselwirkung zwischen Antriebsmotor und Arbeitsmaschine  | 260   |
| C. Der Ausgleich von Belastungsstößen . . . . .   | 271   |
| D. Der Schutz der elektrischen Ausrüstung gegen schädigende äußere<br>Einflüsse und die Kühlung der Motoren . . . . . | 273   |
| E. Der aussetzende Betrieb. . . . .   | 277   |
| F. Die Auswahl des Motors . . . . .   | 284   |
| G. Motorenübersicht . . . . .   | 293   |
| H. Die Erzielung unveränderlicher Umlaufzahl . . . . .  | 294   |
| I. Die Auswahl des Anlassers . . . . .  | 296   |
| K. Der Schutz des Motors gegen Überströme. . . . .  | 306   |
| L. Die Grenzschaltungen . . . . .   | 310   |
| M. Die Leitungen und Hilfsapparate. . . . .   | 315   |
| N. Die Legung der Leitungen. . . . .  | 317   |
| O. Die Stromzufuhr bewegter Maschinen. . . . .  | 324   |
| XII. Wichtige elektrische Antriebe . . . . .  | 327   |
| A. Der elektrische Antrieb von Hebezeugen . . . . .   | 327   |
| B. Der elektrische Antrieb von Fahrzeugen . . . . .   | 351   |
| C. Der elektrische Antrieb in Bergwerken, Hütten und Stahlwerken  | 358   |
| D. Der elektrische Antrieb der Werkzeugmaschinen . . . . .  | 391   |
| E. Der elektrische Antrieb in der Zement- und chemischen Industrie  | 406   |
| F. Der elektrische Antrieb in der Textilindustrie . . . . .   | 413   |
| G. Der elektrische Antrieb in Papierfabriken und Druckereien . . . . .  | 418   |
| H. Übersicht über die wichtigsten elektromotorischen Antriebe. . . . .  | 420   |
| I. Der Einbau der elektrischen Ausrüstung . . . . .   | 423   |
| K. Die Prüfung und Instandhaltung der elektrischen Antriebe. . . . .  | 427   |
| L. Die Störungen an elektrischen Antrieben und das Aufsuchen der<br>Fehlerquelle . . . . .                            | 430   |
| XIII. Schaltlehre in Beispielen . . . . .   | 434   |
| Sachverzeichnis . . . . .   | 449   |

## I. Der Magnetismus.

Ein Stahlmagnet vermag mit seinen beiden *Polen*, die gewöhnlich an den Enden des Magneten liegen, kleine Eisenteilchen anzuziehen. Den einen der Pole nennt man *Nordpol*, den anderen *Südpol*. Die Richtung der magnetischen Anziehungskräfte läßt sich sehr schön dadurch darstellen, daß man einen Magneten, z. B. den Hufeisenmagneten nach Abb. 1 unter eine Glasplatte legt und diese mit Eisenfeilspänen bestreut. Die Späne ordnen sich dann in regelmäßigen Linien an, die von einem Pol zum anderen verlaufen, und die man *magnetische Kraftlinien* nennt. Obwohl diese Linien gar nicht zählbar sind, drückt man die Stärke eines Magneten dennoch durch ihre Zahl aus. Die Gesamtzahl der Kraftlinien, welche aus einem Pol austritt, nennt man den *Kraftfluß*, er sei mit  $\mathfrak{S}$  bezeichnet. Die Kraftlinienzahl hingegen, welche durch ein  $\text{cm}^2$  des Magnetquerschnitts  $F$  hindurchgeht, heißt *Kraftliniendichte* oder *magnetische Induktion* und wird mit  $\mathfrak{H}$  bezeichnet. Es besteht also die Beziehung:

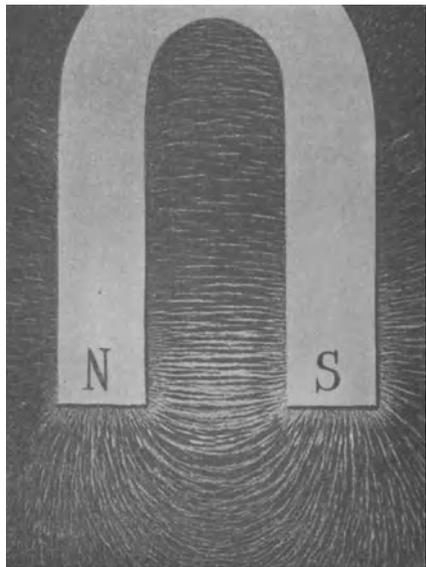


Abb. 1. Kraftlinienbild eines Hufeisenmagneten.

$$\mathfrak{S} = F \cdot \mathfrak{H} \dots \dots \dots 1$$

Mit einem Magneten kann man durch Bestreichen zahllose neue Magnete herstellen, ohne daß der eine Magnet dadurch schwächer wird. Man denkt sich nämlich, daß die kleinsten Teilchen eines jeden Eisens, die Moleküle, bereits kleine Magnete sind, und daß dieselben im unmagnetischen Eisen nur wirr durcheinander liegen, während sie im magnetisierten Eisen geordnet sind, so daß ihre Wirkungen sich addieren. So erklärt es sich auch, warum harter Stahl viel schwerer zu magnetisieren ist als weiches Eisen. Die geringere Beweglichkeit der Stahlmoleküle

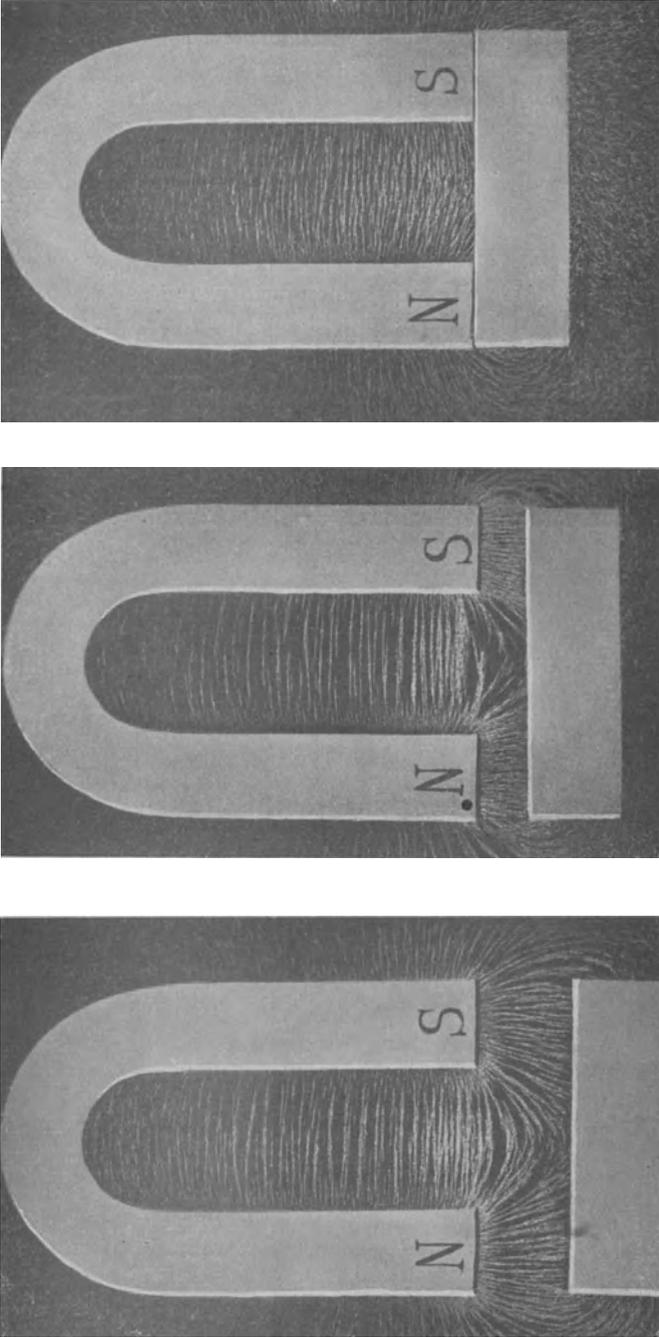


Abb. 2. Kraftlinienbild eines Hufeisenmagneten mit vorgelagertem Eisenstückchen.

verhindert aber auch, daß der Magnetismus bei Erschütterungen ver-  
schwindet. Wenn alle Eisenmoleküle geordnet sind, ist das Höchstmaß  
an Magnetismus erreicht. Man sagt dann, das Eisen ist magnetisch  
*gesättigt*. Die Sättigungsgrenze ist je nach der Eisensorte verschieden  
hoch. Bei Schmiedeeisen werden 20000 Kraftlinien je cm<sup>2</sup>, bei Stahl  
etwa 18000 Kraftlinien je cm<sup>2</sup> erreicht, während bei Gußeisen kaum  
eine Kraftliniendichte von 10000 Kraftlinien je cm<sup>2</sup> überschritten wird.  
Um einen Begriff von diesen Magnetstärken zu bekommen, merke  
man sich, daß bei einer Dichte von *einer* Kraftlinie je cm<sup>2</sup>, diese Kraft-  
linie eine Zugkraft von 0,04 Milligramm ausübt.

Ein mit Kraftlinien erfüllter Raum heißt ein *magnetisches Feld*.  
Die Kraftlinien verlaufen stets von einem Pol zum anderen, wobei wir  
festsetzen, daß sie am Nordpol in die Luft eintreten und am Südpol  
wieder in das Eisen zurücktreten. Wir nehmen aber weiter an, daß die  
Kraftlinien innerhalb des Magneten zum Nordpol zurückverlaufen,  
daß sie also geschlossene Linien sind.

Man kann die Kraftlinien mit geschlossenen, gespannten Gummifäden ver-  
gleichen. Ebenso wie diese, sind auch die Kraftlinien bestrebt:

1. sich zu verkürzen. Sie üben in der Längsrichtung eine Zugkraft  
aus.
2. Bei der Verkürzung werden die Fäden dicker, sie üben also in  
der Querrichtung eine Druckkraft aus.

Vermöge dieser Eigenschaft suchen sich die Kraftlinien immer den bequemsten  
Weg, um vom Nordpol zum Südpol zu gelangen. Wo der Polabstand am geringsten  
ist, verlaufen die meisten Kraftlinien. Da das hier auftretende Gedränge aber den  
Übertritt erschwert, ziehen es viele Kraftlinien vor, in geringerer Zahl auf bogen-  
förmigen Umwegen zu laufen. Aus den Kraftlinieneigenschaften erklärt sich auch  
die Anziehungskraft zwischen ungleichnamigen Polen und die ab-  
stoßende Kraft zwischen gleichnamigen Polen. Ein Stückchen weiches  
Eisen, welches nach Abb. 2 vor einem Magneten liegt, veranlaßt die Magnetkraft-  
linien in um so größerer Zahl, durch es hindurchzugehen, je näher es den Polen  
liegt. Man muß hieraus schließen, daß der Weg durch das Eisen für die Kraft-  
linien viel bequemer ist, als der durch die Luft.

Die Zugkraft einer Kraftlinie bei einer Dicke von 1 cm<sup>2</sup> ist 0,04 mg.  
Bei 2 Kraftlinien je cm<sup>2</sup> hat jede nur den halben Que schnitt, die Span-  
nung jeder derselben muß also doppelt so groß, nämlich 2 · 0,04 mg sein.  
Die Zugkraft von beiden Kraftlinien zusammen beträgt demnach  
2 · 2 · 0,04 mg. Bei  $\mathfrak{B}$  Kraftlinien je cm<sup>2</sup> ist die Spannkraft jeder Kraft-  
linie 0,04 ·  $\mathfrak{B}$  und aller Kraftlinien in 1 cm<sup>2</sup> zusammen 0,04 ·  $\mathfrak{B}^2$ . Ist  
die ganze tragende Fläche des Magneten F cm<sup>2</sup> groß, so ist demnach  
die Gesamttragkraft in kg:

$$P = \frac{0,04 \cdot \mathfrak{B}^2 \cdot F}{1000000} \dots \dots \dots 2$$

**Beispiel:** Ein Hufeisenmagnet nach Abb. 1 habe einen Schenkelquerschnitt  
von 10 mal 25 mm und vermöge 0,8 kg zu tragen. Wie groß ist seine Kraftliniendichte  
und sein Kraftfluß?

Nach Gleichung 2 ist:

$$\mathfrak{B} = \sqrt{\frac{1000000 \cdot P}{0,04 \cdot F}} = \sqrt{\frac{1000000 \cdot 0,8}{0,04 \cdot 5}} = 2000 \text{ Kr./cm}^2.$$

Der Kraftfluß ist nach Gleichung 1:

$$\mathfrak{C} = 2000 \cdot 2,5 = 5000 \text{ Kraftlinien.}$$

## II. Die Elektrizität und ihre Anwendungen.

### A. Die Wirkungen des elektrischen Stromes.

An eine elektrische Stromquelle  $E$  wollen wir nach Abb. 3 mittels metallischer Drähte einen dünnen Draht  $a-b$ , ferner zwei Platinbleche  $c-d$ , die in blaue Kupfervitriollösung eintauchen, anschließen. Sobald wir das letzte Drahtstück festklemmen, fängt der dünne Draht  $a-b$  an zu glühen, ferner scheidet sich auf dem Platinblech  $d$  eine dünne Kupferschicht ab, und weiter wird die Magnetnadel  $N-S$ , die in geringer Entfernung von dem Draht aufgestellt ist, aus ihrer Nord-Süd-Ruהלage abgelenkt. Diese verschiedenen Erscheinungen werden durch den *elektrischen Strom* verursacht. Derselbe übt demnach 1. *Wärmewirkungen*, 2. *chemische Wirkungen* und 3. *magnetische Wirkungen* aus. Die Wirkungen bleiben aus, wenn man statt der metallischen Drähte Bindfäden,

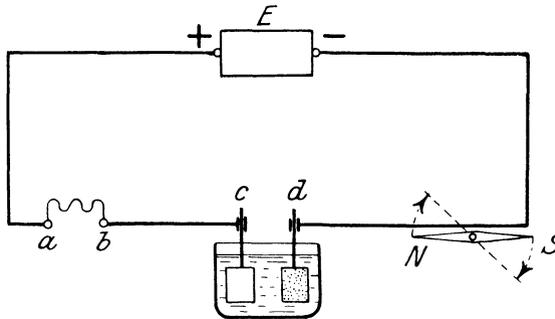


Abb. 3. Die drei Wirkungen des elektrischen Stromes.

Holz oder dgl. verwendet. Diese Stoffe heißen deshalb *Nichtleiter* der Elektrizität, während die Metalle und manche Flüssigkeiten *Leiter* sind. Wir wollen nun unsere Stromquelle *umpolen*, d. h. wir wollen die Drähte an der  $+$  Klemme und an der  $-$  Klemme der Stromquelle miteinander vertauschen. Der Draht  $a-b$  glüht dann wie früher, aber die Kupferabscheidung erfolgt jetzt am Blech  $c$  und die Magnetnadel wird nach der entgegengesetzten Richtung abgelenkt. Der elektrische Strom muß also eine Richtung haben, er fließt in dem Leiter, und wir setzen fest, daß er von der Plusklemme durch den Leiter zur Minusklemme fließe. Statt der Kupfervitriollösung hätten wir natürlich auch irgend eine andere Salzlösung nehmen können. Aus einer Höllesteinlösung (Silbernitrat) hätte der Strom z. B. Silber abgeschieden. Die Menge des abgeschiedenen Metalls steht immer in unabänderlichem Verhältnis zur Stärke des elektrischen Stromes.

### B. Das Ohmsche Gesetz.

Wenn wir bei dem Versuch nach Abb. 3 einen dickeren Draht  $a-b$  verwenden, wird derselbe auch noch warm; er kommt aber nicht mehr

zum Glühen. Es sieht also so aus, als ob der Strom in einem dünnen Leiter einen größeren Widerstand fände, ähnlich wie sich einem Wasserstrom in einer engen Rohrleitung ein großer Reibungswiderstand bietet. Wegen dieses Widerstandes der Leitungsdrähte fließt der elektrische Strom nicht von selbst, sondern er muß durch eine elektrische Kraft, die in der Stromquelle ihren Sitz hat und *Spannung* genannt wird, getrieben werden. Wir können also sagen: Die Spannung der Stromquelle treibt einen elektrischen Strom durch die Widerstände der Leiter.

In Abb. 4 ist ein dreifacher Versuch dargestellt. An Stromquellen,

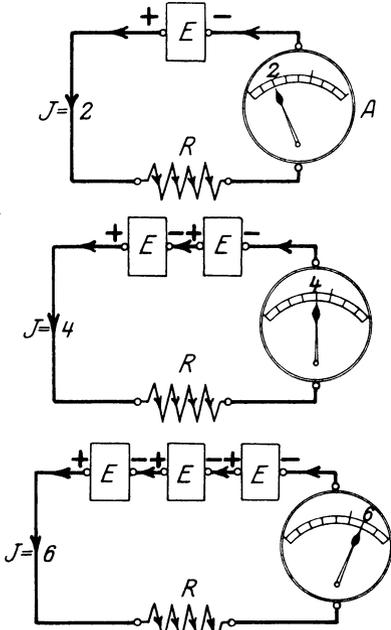


Abb. 4. Der Strom ist um so größer, je größer die treibende Spannung ist.

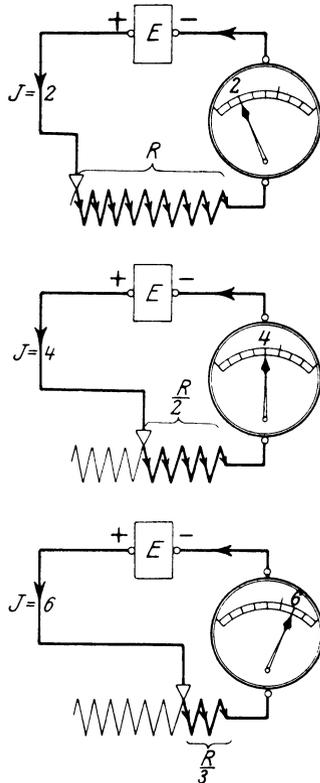


Abb. 5. Der Strom ist um so größer, je kleiner der Widerstand ist.

deren jede eine Spannung  $E$  hat, ist ein langer Draht  $R$ , welcher der Bequemlichkeit halber aufgewickelt ist, angeschlossen, und ein zwischengeschalteter Strommesser  $A$  zeigt die Stärke des fließenden Stromes  $I$  an. Man erkennt, daß bei gleichem Widerstand  $R$  des langen Drahtes der Strom  $I$  um so größer ist, je größer die an dem Draht wirkende elektrische Spannung  $E$  ist. Aus dem ganz ähnlichen Versuch nach Abb. 5 geht hervor, daß der Strom  $I$  bei gleicher Spannung  $E$  um so größer ist, je geringer die eingeschaltete Drahtlänge, je kleiner also der Widerstand  $R$  ist. Diese Ergebnisse faßt das Ohmsche Gesetz zusammen, welches lautet:

Der in einem Leiter fließende elektrische Strom  $I$  ist um so größer, je größer die Spannung  $E$  an demselben und je kleiner sein Leitungswiderstand  $R$  ist. Mathematisch ausgedrückt:

$$I = \frac{E}{R} \dots\dots\dots 3$$

Die Einheiten der drei elektrischen Größen. Die Einheit der Stromstärke ist ein Ampere (abgekürzt 1 A); das ist diejenige Stromstärke welche in einer Sekunde aus einer Kupfervitriollösung 0,329 mg Kupfer, oder aus einer Höllesteinlösung 1,118 mg Silber ausscheidet.

Die Einheit des elektrischen Widerstandes ist ein Ohm (1  $\Omega$ ); das ist der Widerstand, welchen ein Quecksilberfaden von 1,063 m Länge und 1 mm<sup>2</sup> Querschnitt dem Strom entgegensetzt.

Die Einheit der Spannung ist ein Volt (1 V); das ist diejenige Spannung, die durch einen Widerstand von einem Ohm, gerade einen Strom von einem Ampere treibt.

Ströme und Spannungen lassen sich durch Strommesser bzw. Spannungsmesser messen.

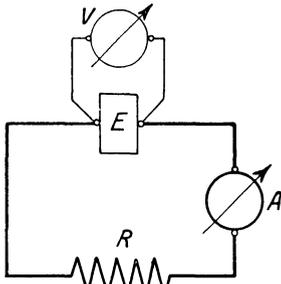


Abb. 6. Der Widerstand  $R$  läßt sich berechnen, wenn Strom und Spannung gemessen werden.

Es sei z. B. festgestellt worden, daß ein langer, dünner Draht dem elektrischen Strom einen 8mal größeren Widerstand bietet, als ein Quecksilberfaden von 1,063 m Länge und 1 mm<sup>2</sup> Querschnitt. Dann hat dieser Draht also 8 Ohm Widerstand, und wenn man ihn an die Klemmen einer Stromquelle von 120 V Spannung anschließt, so fließt ein Strom hindurch von:

$$I = \frac{120 \text{ Volt}}{8 \text{ Ohm}} = 15 \text{ Ampere.}$$

Würde man hingegen diesen Leiter von  $R = 8$  Ohm Widerstand an eine andere Stromquelle anschließen und an einem eingeschalteten Strommesser A (wie Abb. 4) eine Stromstärke von  $I = 10$  A ablesen, so müßte die Spannung  $E$  dieser Stromquelle sich aus dem Ohmschen Gesetz berechnen zu:

$$E = I \cdot R \dots\dots\dots 4$$

also mit unseren Werten

$$E = 10 \text{ Ampere mal } 8 \text{ Ohm} = 80 \text{ Volt.}$$

Auch die Größe des Widerstandes eines Leiters läßt sich mittels des Ohmschen Gesetzes bestimmen, wenn ein Strommesser und ein Spannungsmesser zur Verfügung stehen. In Abb. 6 stellt A wieder den eingeschalteten Strommesser, V hingegen einen Spannungsmesser dar. Letzterer wird mit seinen Klemmen immer mit den beiden Punkten verbunden, zwischen denen die Spannung gemessen werden soll. Stelle  $R$  den oben betrachteten Draht dar, so durchfließe denselben ein Strom von 10 Ampere, während der Spannungsmesser eine Spannung von 80 Volt an der Stromquelle anzeigt. Das Ohmsche Gesetz gibt uns dann den Widerstand des Drahtes zu:

$$R = \frac{E}{I} \dots\dots\dots 5$$

also mit den vorstehenden Zahlenwerten:

$$R = \frac{80 \text{ Volt}}{10 \text{ Ampere}} = 8 \text{ Ohm.}$$

**Beispiel:** An eine Stromquelle wurde wie in Abb. 4 ein Normalwiderstand von 10 Ohm angeschlossen, wobei der Strommesser 1,6 A anzeigte. Ersetzte man diesen Normalwiderstand durch einen unbekanntem Widerstand  $R$ , so floß nur noch ein Strom von 1 A. Wieviel Ohm hat der unbekannte Widerstand?

**Der elektrische Widerstand.**

Die Nichtleiter, wie Glas, Porzellan, Glimmer und Hartgummi leiten den elektrischen Strom gar nicht, aber auch die Leiter zeigen eine stark verschiedene Leitfähigkeit. Wenn man nach Abb. 7 eine Kette, deren Glieder abwechselnd aus gleich starken Kupfer- und Eisengliedern besteht, an eine Stromquelle anschließt, so erglühn die Eisenglieder, während die Kupferglieder noch kühl bleiben. Es geht hieraus hervor, daß Kupfer ein wesentlich besserer Leiter als Eisen ist. Um einen Vergleich der Metalle zu ermöglichen, legt man einen Einheitsdraht von 1 m Länge und 1 mm<sup>2</sup> Querschnitt zugrunde.

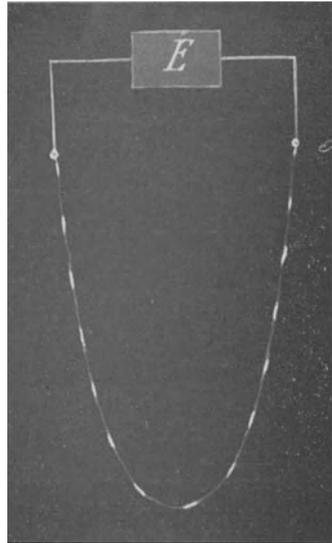


Abb. 7. Die Eisenglieder der Kette glühn, während die Kupferglieder kalt bleiben.

**Der spezifische Widerstand und die Berechnung von Leiterwiderständen.** Man versteht unter dem spezifischen Widerstand eines Stoffes denjenigen Widerstand in Ohm, den ein Draht von 1 mm<sup>2</sup> Querschnitt und 1 m Länge dem elektrischen Strom entgegengesetzt. Die Größe dieses mit  $c$  bezeichneten spezifischen Widerstandes ist in der nachstehenden Tabelle für einige Stoffe angegeben. Um den Widerstand eines beliebigen Drahtes von  $q$  mm<sup>2</sup> Querschnitt und  $l$  m Länge zu berechnen, muß man bedenken, daß bei  $l$ -facher Länge der Widerstand  $l$  mal so groß ist, daß aber bei  $q$  mm<sup>2</sup> Querschnitt der Widerstand sich auf den  $q$ -Teil vermindert. Der Widerstand  $R$  eines solchen Drahtes ist also:

$$R = \frac{c \cdot l}{q} \dots \dots \dots 6$$

Hierin ist die Leiterlänge in  $m$ , der Querschnitt in mm<sup>2</sup> einzusetzen.

**Beispiel:** Wie groß ist der Widerstand eines Kupferdrahtes von 4 mm<sup>2</sup> Querschnitt und 250 m Länge?

Den spezifischen Widerstand des Kupfers gibt die Tabelle im Mittel zu  $c = 0,0175$  an. Bei einer Länge von  $l = 250$  m und  $q = 4$  mm<sup>2</sup> ist nach obiger Beziehung:

$$R = \frac{0,0175 \cdot 250}{4} = 1,09 \text{ Ohm.}$$

Würde man mit diesem Kupferdraht die + Klemme einer Stromquelle mit der - Klemme verbinden, so würde bei einer Spannung der Stromquelle von 4 Volt ein Strom von:

$$I = \frac{E}{R} = \frac{4 \text{ Volt}}{1,09 \text{ Ohm}} = 3,65 \text{ Ampere} \quad \text{fließen.}$$

**Die Leitfähigkeit.** Man rechnet vielfach lieber mit dem umgekehrten Wert des spezifischen Widerstandes, den man die *Leitfähigkeit*  $k$  nennt. Diese ist also  $k = 1 : c$ . Führt man diesen Wert in Gleichung 6 ein, so ergibt sich:

$$R = \frac{l}{k \cdot q} \dots \dots \dots 7$$

Auch die Leitfähigkeit  $k$  kann der nachstehenden Tabelle entnommen werden. Als Zuleitungen zu Motoren oder Lampen kommen natürlich nur die guten Leiter, wie Kupfer und Aluminium in Frage, während die zuletzt angegebenen Legierungen gewählt werden, wenn man einen hohen Widerstand wünscht, also z. B. bei Heizwiderständen.

**Tabelle der spezifischen Widerstände und Leitfähigkeiten.**

| Stoff                  | Spez. Widerst. $c$ | Leitfähigkeit $k$ |
|------------------------|--------------------|-------------------|
| Aluminium . . . . .    | 0,03               | 33                |
| Blei . . . . .         | 0,22               | 4,5               |
| Eisen . . . . .        | 0,12—0,14          | 7—8,5             |
| Kupfer . . . . .       | 0,0168—0,018       | 56—60             |
| Nickel . . . . .       | 0,12               | 8,3               |
| Platin . . . . .       | 0,094              | 10,6              |
| Quecksilber . . . . .  | 0,95               | 1,05              |
| Silber . . . . .       | 0,017              | 59                |
| Zink . . . . .         | 0,06               | 16,5              |
| Zinn . . . . .         | 0,13               | 7,7               |
| Kohle . . . . .        | 100—1000           | 0,001—0,01        |
| Messing (Cu, Zn) . .   | 0,07—0,08          | 12,5—14           |
| Nickelin (Cu, Ni) . .  | 0,4—0,44           | 2,3—2,5           |
| Neusilber (Cu, Ni, Zn) | 0,2—0,5            | 2—5               |
| Konstantan (Cu, Ni) .  | 0,5                | 2                 |
| Manganin (Cu, Mn) .    | 0,42               | 2,4               |

**Die Veränderlichkeit des Widerstandes.** Der Widerstand der Metalle nimmt mit steigender Temperatur um ein geringes zu, während derjenige von Kohle und Flüssigkeiten eine Ausnahme macht und abnimmt. Da nun die Leiter einer elektrischen Maschine infolge des Stromflusses sich stets erwärmen, muß man mit der dadurch auftretenden Widerstandsänderung rechnen. Da ferner auch für solche Wicklungen wegen der isolierenden Baumwolle eine Höchsttemperatur von etwa  $85^{\circ}$  vorgeschrieben ist, und weil eine Messung mit dem Thermometer nicht einwandfrei ist, muß die Temperaturzunahme einer Wicklung aus der Widerstandszunahme berechnet werden. Dies kann man, wenn man zugrunde legt, daß einer Temperaturerhöhung um  $1^{\circ}$  eine Widerstandszunahme von 0.4% bei Kupfer entspricht.

**Beispiel:** Die Kupferdrahtwicklung einer Maschine liege an einer konstanten Spannung von 220 Volt. Bei Betriebsbeginn werde sie von einem Strom von 2 Ampere durchflossen. Da sich aber die Wicklung unter dem Stromfluß immer mehr erwärmt, wächst ihr Widerstand und die Spannung von 220 V vermag nach

eigenen Stunden nur noch einen Strom von 1,69 Ampere hindurchzutreiben. Um wieviel Grad hat sich dann die Temperatur der Wicklung über diejenige der Umgebung erhöht?

Im kalten Zustand bei Betriebsbeginn ist der Widerstand der Wicklung nach dem Ohmschen Gesetz:

$$R_{\text{kalt}} = \frac{E}{I} = \frac{220 \text{ Volt}}{2 \text{ Ampere}} = 110 \text{ Ohm,}$$

später hingegen:

$$R_{\text{warm}} = \frac{220 \text{ Volt}}{1,69 \text{ Ampere}} = 130 \text{ Ohm.}$$

Der ursprüngliche Widerstand von 110  $\Omega$  hat sich also um 20  $\Omega$  erhöht, d. s. 18,2%. Wenn nun 0,4% Widerstandszunahme einer Temperaturerhöhung von 1° entsprechen, so entsprechen 18,2% einer Temperaturerhöhung von 18,2:0,4  $\approx$  45°.

**Das Ohmsche Gesetz gilt auch für Teile eines Stromkreises.** Wenn von den drei Größen Spannung, Strom, Widerstand zwei gegeben sind, läßt sich die dritte nach dem Ohmschen Gesetz immer berechnen. Man muß dabei nur peinlich genau darauf achten, daß auch wirklich die Spannung, die zwischen Anfang und Ende des Leiters liegt, und der Strom, der durch diesen Widerstand hindurchgeht, eingesetzt wird.

**Beispiele:** 1. Die Widerstände in Abb. 8 betragen:  $R_1 = 4 \Omega$ ,  $R_2 = 8 \Omega$  und  $R_3 = 3 \Omega$ . Der Strommesser zeige 3 A. Wie groß sind die Spannungen an den drei Widerständen, und welche Spannung hat die Stromquelle?

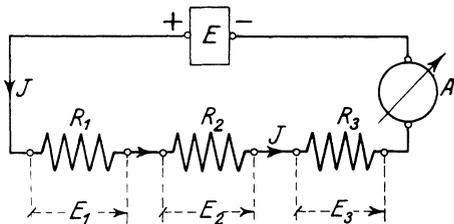


Abb. 8. Das Ohmsche Gesetz gilt für jeden der drei Widerstände.

Es ist:

$$\begin{aligned} E_1 &= I \cdot R_1 = 3 \cdot 4 = 12 \text{ V} \\ E_2 &= I \cdot R_2 = 3 \cdot 8 = 24 \text{ V} \\ E_3 &= I \cdot R_3 = 3 \cdot 3 = 9 \text{ V} \end{aligned}$$

$$E = 45 \text{ V} = \text{Spannung der Stromquelle.}$$

2. An eine Stromquelle seien zwei Widerstände wie in Abb. 9 angeschlossen. Der Spannungsmesser, welcher an den Klemmen der Stromquelle liegt, zeigt  $E = 120 \text{ V}$ . Wie groß muß der Widerstand  $R_2$  sein, wenn Widerstand  $R_1$  mit  $10 \Omega$  bekannt und  $I = 5 \text{ Amp.}$  ist? Man suche den Widerstand, von dem zwei Größen des Ohmschen Gesetzes bekannt sind, und berechne die dritte. Dies ist bei  $R_1$  der Fall. Man berechne also  $E_1$  zu:

$$E_1 = I \cdot R_1 = 5 \cdot 10 = 50 \text{ V.}$$

Nun ist aber:

$$E_2 = E - E_1 = 120 - 50 = 70 \text{ V,}$$

nun läßt sich  $R_2$  berechnen zu:

$$R_2 = \frac{E_2}{I} = \frac{70}{5} = 14 \Omega.$$

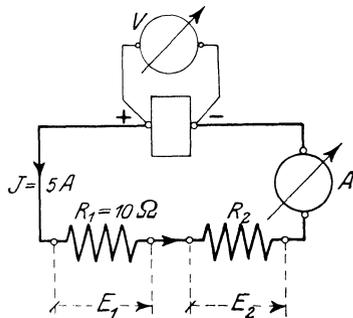


Abb. 9.

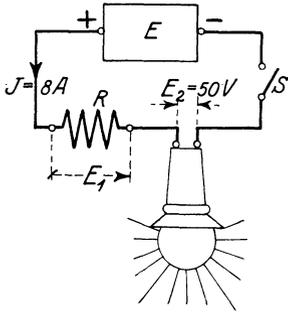


Abb. 10. Der Vorschaltwiderstand  $R$  verbraucht die überschüssige Spannung.

3. Eine Bogenlampe brenne mit 8 A Strom und 50 V Spannung zwischen ihren Klemmen normal. Sie soll jedoch an eine vorhandene Stromquelle mit 65 Volt Spannung angeschlossen werden, wie es Abb. 10 darstellt. Wieviel Ohm muß der dann erforderliche Vorschaltwiderstand haben?

Wenn die Lampe 50 V braucht und 65 V zur Verfügung stehen, sind 15 V übrig. Diese 15 V müssen also, wenn auch nutzlos, verbraucht werden, um den Strom durch den Vorschaltwiderstand  $R$  zu treiben. Nach dem Ohmschen Gesetz ist also:

$$R = \frac{E_1}{I} = \frac{15}{8} = 1,88 \Omega.$$

4. Ein Motor  $M$ , welcher 25 A Strom verbraucht, hat seinen Standort 200 m von der Stromquelle entfernt. Die Spannung der Stromquelle beträgt  $E = 230$  V. Welchen Querschnitt

müßten die Zuleitungen aus Kupfer haben, wenn die Spannung am Motor höchstens 5% geringer als die Stromquellenspannung sein soll?

Abb. 11 zeigt die Schaltung. Jede der beiden 200 m langen Zuleitungen stellt einen Widerstand dar, und es wird eine Spannung  $E_1$  benötigt, um den Strom von 25 A durch die Hinleitung zu treiben. Das gleiche gilt für die Herleitung. Soll

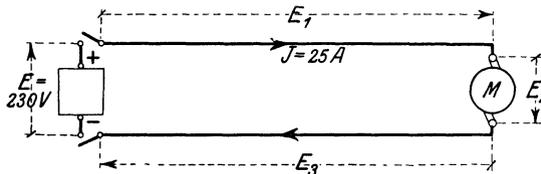


Abb. 11. Die Spannung  $E_2$  am Motor ist kleiner als  $E$ , weil in den Widerständen der Zuleitungen Spannung verbraucht wird.

die Motorspannung nur 5% geringer sein als 230 V, so muß sie also mindestens 218,5 V sein, während die Differenz von 11,5 V in der Hin- und Rückleitung verbraucht werden. Zwischen Anfang und Ende der Hinleitung herrscht also eine Spannung von  $11,5 : 2 = 5,75$  V =  $E_1$ . Der Widerstand der Hinleitung ist demnach:

$$R = \frac{E_1}{I} = \frac{5,75}{25} = 0,23 \Omega.$$

Nun steht aber der Widerstand zu den Leiterabmessungen in der Beziehung:

$$R = \frac{l}{k \cdot q},$$

woraus folgt:

$$q = \frac{l}{k \cdot R} = \frac{200}{57 \cdot 0,23} = 15,3 \text{ mm}^2,$$

worin die Leitfähigkeit mit  $k = 57$  eingesetzt ist. Ein solches Kabel kann man jedoch nicht kaufen, man muß vielmehr den Querschnitt auf  $16 \text{ mm}^2$ , einen Normalquerschnitt aufrunden (s. Tab. auf S. 228).

Im Kriege hat man vielfach Leitungen aus Eisen verwenden müssen. Man berechne, welcher Leitungsquerschnitt dann in Frage käme.

Wir hatten den Widerstand in Abb. 10 „Vorschaltwiderstand“ genannt. Damit soll aber keineswegs gesagt sein, daß derselbe

unbedingt an der gezeichneten Stelle *vor* der Bogenlampe liegen muß, er würde vielmehr genau den gleichen Zweck erfüllen, wenn er an irgend einer anderen Stelle des Stromkreises eingeschaltet wäre. S stellt einen Schalter dar, mit Hilfe dessen die letzte metallische Verbindung des Stromkreises hergestellt werden kann. Mit ihm kann also der Strom leicht ein- und ausgeschaltet werden.

### Die Stromverzweigung.

Für jeden Stromverzweigungspunkt gilt das Gesetz: Die Summe der zufließenden Ströme muß gleich der Summe der abfließenden Ströme sein. Für den Punkt A der Abb. 12 gilt also:  $I = i_1 + i_2$ , für Punkt B in gleicher Weise:  $i_1 + i_2 = i_3 + i_4 + i_5$ . Im Punkt C vereinigen sich die drei letzteren Ströme wieder zum Strome I.

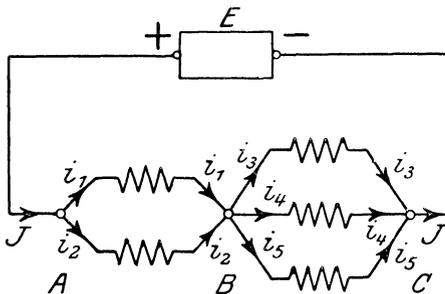


Abb. 12. An jedem Zweigpunkt fließt ebenso viel Strom zu wie ab.

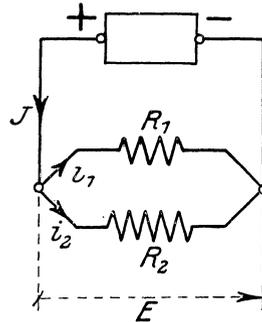


Abb. 13. Parallelschaltung. Beide Widerstände liegen an der gleichen Spannung.

In Abb. 13 sind zwei Widerstände nebeneinander an eine Stromquelle angeschlossen. Eine solche Schaltung nennt man eine *Parallelschaltung* oder auch *Nebeneinanderschaltung*. Das Kennzeichen einer Parallelschaltung ist also, daß die Widerstände an der gleichen Spannung liegen. Nach dem Ohmschen Gesetz ist:

$$i_1 = E : R_1 \text{ und } i_2 = E : R_2$$

woraus hervorgeht, daß durch einen Zweig um so mehr Strom fließt, je kleiner dessen Widerstand ist.

Die Schaltung nach Abb. 8 nennt man eine *Hintereinanderschaltung* oder *Reihenschaltung*. Die Hintereinanderschaltung ist dadurch gekennzeichnet, daß alle Widerstände von demselben Strom durchflossen sind. Statt der drei Widerstände der Schaltung kann man auch einen Ersatzwiderstand setzen, welcher gleich deren Summe ist.

**Beispiele:** 1. In Abb. 14 sind zwei Widerstände  $R_2$  und  $R_3$  parallel geschaltet und mit einem dritten Widerstand  $R_1$  hintereinander geschaltet. Gegeben, bzw. gemessen sind: Die Spannung der Stromquelle zu 120 V, der Strom  $I = 12$  A,  $R_1 = 3 \Omega$ ,  $R_2 = 12 \Omega$ . Wie groß muß der Widerstand  $R_3$  sein?

$R_1$  ist auch von 12 A durchflossen, also ist nach dem Ohmschen Gesetz:

$$E_1 = I \cdot R_1 = 12 \cdot 3 = 36 \text{ V,}$$

dann ist:

$$E_2 = E - E_1 = 120 - 36 = 84 \text{ V}$$

$$i_1 = \frac{E_2}{R_2} = \frac{84}{12} = 7 \text{ A}$$

$$i_2 = I - i_1 = 12 - 7 = 5 \text{ A}$$

$$R_3 = \frac{E_2}{i_2} = \frac{84}{5} = 16,8 \Omega.$$

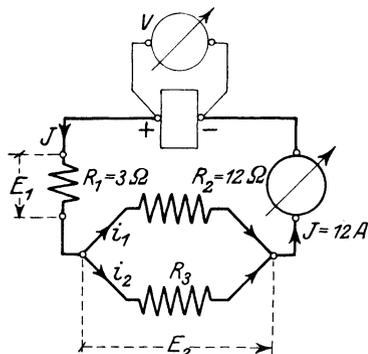


Abb. 14.

daß jeder Widerstand nur einen Strom von höchstens 25 A verträgt. Wie müßten die Widerstände geschaltet werden?

Schließt man einen Widerstand an die Klemmen der Maschine an, so fließt ein Strom  $i = 500 : 11 = 45,5 \text{ A}$ . Da der Widerstand nur 25 A verträgt, müßte er bei 45,5 A durchbrennen. Wir schalten also zwei Widerstände hintereinander, die dann zusammen  $22 \Omega$  haben. Dieselben durchfließt dann ein Strom:

$$i = 500 : 22 = 22,7 \text{ A, also zulässig!}$$

Um nun aber 90 A aus der Maschine zu entnehmen, müssen vier solcher Doppelwiderstände parallel geschaltet werden. Dann ist der Gesamtstrom

$$I = 4 \cdot 22,7 = 91 \text{ A.}$$

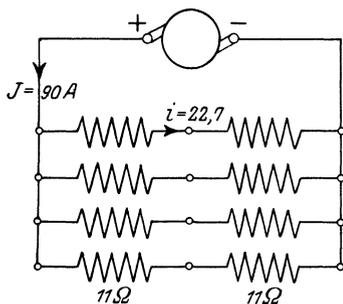


Abb. 15.

Abb. 15 zeigt das Schaltungsschema dieser Widerstände.

Legt man an eine Stromquelle einen größeren Widerstand wie es in Abb. 16 dargestellt ist, so fließt durch denselben ein Strom  $I = E : R$ , also bei einer Spannung der Stromquelle von 100 V und  $R = 100 \Omega$  ist  $I = 100 : 100 = 1 \text{ A}$ .

Legt man nun einen Spannungsmesser zwischen die Punkte a und b des Widerstandes, so zeigt derselbe natürlich nicht 100 V, sondern weniger. Beträgt beispielsweise das Widerstandsstück zwischen a und b 40 Ohm, dann muß zwischen a und b eine Spannung von  $I \cdot r_1 = 1 \cdot 40 = 40 \text{ V}$  herrschen, und diese Spannung zeigt der Spannungsmesser  $V_1$  auch an. Der gezeichnete zweite Spannungsmesser  $V_2$  überspannt ein Widerstandsstück von 70 Ohm, er muß demnach eine Spannung von  $I \cdot r_2 = 1 \cdot 70 = 70 \text{ V}$  zeigen. Er würde erst dann die ganze Spannung von 100 V der Stromquelle zeigen, wenn man den verschiebbaren Kontakt von c nach d rücken würde. Ebenso würde die Spannung am ersten Spannungsmesser  $V_1$  bis auf 0 abnehmen, wenn man den Schiebekontakt von b bis zum Punkte a verschieben würde. Man erkennt

hieraus, daß es an einem solchen Widerstand möglich ist, eine jede Spannung abzugreifen und zwar von Null an bis zum Betrage der Batteriespannung.

Man kann diese Tatsache zur Konstruktion eines Spannungsreglers oder Spannungsteilers benutzen, dessen Schaltung Abb. 17 zeigt. Statt des Schiebekontaktes ist hier eine drehbare Kurbel benutzt worden, welche über im Kreise angeordnete Kontakte schleift, die mit dem Widerstand verbunden sind. Steht die Kurbel bei a, so zeigt der

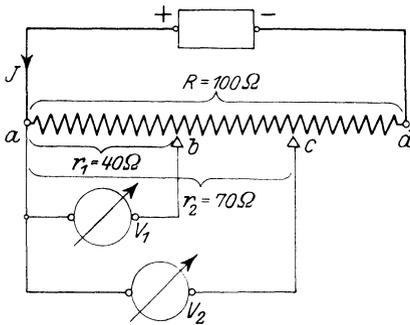


Abb. 16. An dem Widerstand läßt sich jede Spannung von Null bis zur vollen Spannung der Stromquelle abgreifen. Spannungsregler oder Spannungsteiler.

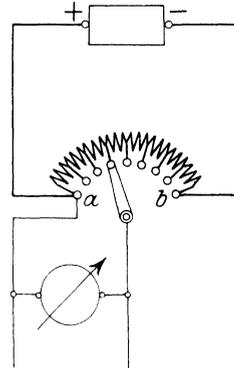


Abb. 17. Spannungsregler oder Spannungsteiler.

Spannungsmesser keine Spannung, dieselbe steigt bei Rechtsdrehung aber an und erreicht bei b den vollen Betrag der Stromquellen-spannung.

**Die Wheatstonesche Brücke.** In Abb. 18 seien nun zwei Widerstände a—b—d und a—c—d als Spannungsteiler an eine Stromquelle angeschlossen. Die Größe ihrer Widerstände kann verschieden sein. Wenn man auf dem oberen Widerstand irgend eine Spannung abgreift, z. B.  $E_1$  zwischen a und b, so muß sich auf dem unteren Widerstand ein Punkt c finden lassen, welcher von a aus gemessen eine Spannung  $E_3$  hat, die mit  $E_1$  übereinstimmt.

Ein empfindliches Instrument (ein Galvanometer), welches man, wie in Abb. 18, zwischen die Punkte b und c legte, dürfte überhaupt keine Spannungs-differenz zwischen diesen Punkten anzeigen. Das Instrument schlägt aber sofort aus, wenn man etwa den verschiebbaren Kontakt etwas nach links verstellt, ebenso wie es nach der entgegengesetzten Seite ausschlägt, wenn der Schiebekontakt nach rechts verrückt wird. Die Stromlosigkeit der Brücke b—c gibt uns also an, daß die Spannung  $E_1$  gleich der Spannung  $E_3$ , und natürlich auch  $E_2$  gleich  $E_4$  ist. Beachtet man, daß dann  $R_1$  und  $R_2$  vom gleichen Strom durchfließen sind, so sind die Spannungen nach dem Ohmschen Gesetz:

$$E_1 = i_1 \cdot R_1 \text{ und } E_2 = i_1 \cdot R_2,$$

ebenso ist:

$$E_3 = i_2 \cdot R_3 \text{ und } E_4 = i_2 \cdot R_4.$$

Setzt man jetzt diese Werte für  $E_1$  und  $E_3$  einander gleich, ebenso die Werte von  $E_2$  und  $E_4$ , so folgt:

$$i_1 \cdot R_1 = i_2 \cdot R_3 \text{ und } i_1 \cdot R_2 = i_2 \cdot R_4.$$

Dividiert man die linken Seiten dieser beiden Gleichungen durcheinander, ebenso die rechten Seiten, so erhält man:

$$\frac{i_1 \cdot R_1}{i_1 \cdot R_2} = \frac{i_2 \cdot R_3}{i_2 \cdot R_4}$$

und hieraus:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \dots \dots \dots 8$$

d. h. die an die Stromquelle angeschlossenen beiden Widerstände müssen im gleichen Verhältnis geteilt werden, wenn in der Brücke zwischen den Teilpunkten kein Strom fließen soll.

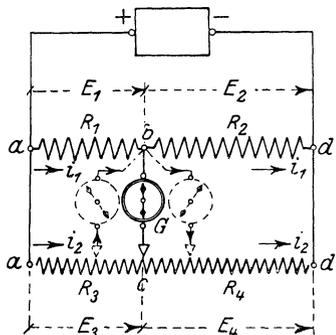


Abb. 18. Wenn das Galvanometer G stromlos ist, verhält sich  $R_1 : R_2 = R_3 : R_4$ .

gestreckten Draht gewählt, auf dem ein Schiebekontakt gleitet. Statt der Widerstände können dann in Gleichung 8 einfach die abgemessenen Drahtlängen eingesetzt werden.

### C. Die Wärmewirkungen des elektrischen Stromes.

**Die Energie.** In der Mechanik nennt man das Produkt: Kraft mal zurückgelegter Weg die mechanische Arbeit. Hebt man ein Gewicht von 10 kg auf eine Höhe von 2 m, so hat man eine Arbeit von  $10 \cdot 2 = 20$  mkg getan. Man kann nun das Gewicht an einer Schnur langsam wieder zu Boden sinken lassen, so daß der alte Zustand damit wieder erreicht ist. Beim Niedersinken hat aber die gleitende Schnur Wärme entwickelt, und zwar um so mehr, je mehr Arbeit vorher zur Hebung des Gewichtes getan werden mußte. Diese Wärme ist aus der mechanischen Arbeit entstanden. Wärme und mechanische Arbeit sind also im Grunde dasselbe, sie sind nur verschiedene Formen einer Größe, die wir *Energie* nennen. Außer diesen beiden Formen gibt es noch weitere, z. B. elektrische und chemische Energie. Wenn Kohle verbrennt und Wärme entwickelt, setzt sich die in der Kohle ausgespeicherte chemische Energie in Wärmeenergie um. Wenn der elektrische Strom einen dünnen Draht durchfließt, wird elektrische Energie in Wärme umgesetzt. Der erste Hauptsatz der Wärmelehre besagt, daß Energie nie verloren gehen kann, daß sie sich vielmehr nur in andere Energieformen umsetzen kann, wobei das Umsetzungsverhältnis ein ganz bestimmtes ist. Die Mechanik lehrt, daß eine mechanische Arbeit von 427 mkg immer bei der Umsetzung in Wärme genau 1 Kilokalorie ergibt, wobei unter einer Kilokalorie (1 kcal) diejenige Wärmemenge verstanden ist, welche zur Erwärmung von 1 kg Wasser um  $1^{\circ}$  benötigt wird.

Es soll nun unsere Aufgabe sein, festzustellen, wie sich die elektrische Energie ausdrücken läßt, und in welchem Umsetzungsverhältnis sie zur Wärme steht.

**Die Umwandlung elektrischer Energie in Wärme.** In den drei Gefäßen der Abb. 19 befinden sich gleiche Wassermengen und gleiche Widerstände. Schickt man durch den ersten Widerstand 1 A, durch den zweiten 2 A und durch den dritten 3 A, so stellt man nach einiger Zeit fest, daß die Temperatursteigerung im zweiten Gefäß viermal und im dritten Gefäß neunmal so groß ist als im ersten. Die von dem Strom in einem Widerstand R entwickelte Wärmemenge Q ist also dem Quadrate der Stromstärke proportional. Durch einfache Überlegung finden wir ferner, daß die Wärmemenge Q auch um so größer sein muß, je größer der Widerstand R ist; denn wenn man in einem der Gefäße einen zweiten Widerstand mit dem vorhandenen hintereinander schaltete, so müßte

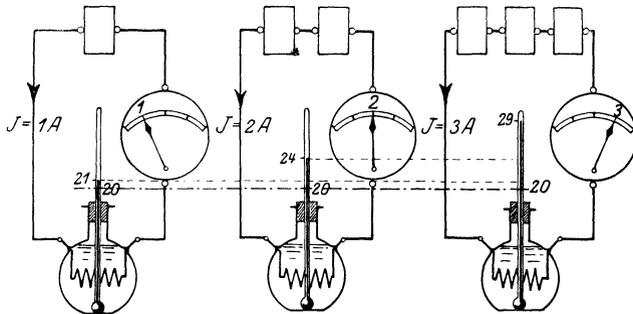


Abb. 19. Die entwickelte Wärme ist dem Quadrate der Stromstärke proportional.

doch doppelt so viel Wärme entwickelt werden. Schließlich ist auch die Wärmemenge Q noch der Zeit t proportional. Also:

$$Q \text{ proportional } I^2 \cdot R \cdot t.$$

In dieser Beziehung stellt die linke Seite die entwickelte Wärmeenergie dar, und es ist anzunehmen, daß die rechte Seite auch eine Energieform darstellt, nämlich die *elektrische Energie*. Diese ist also:

$$A = I^2 \cdot R \cdot t \dots \dots \dots 9$$

Diese elektrische Arbeit A läßt sich auch noch anders ausdrücken, wenn man statt R den Wert  $E : I$  einsetzt, dann ist:

$$A = I \cdot E \cdot t \dots \dots \dots 10$$

**Die elektrische Leistung.** Unter der Leistung oder dem Effekt versteht man allgemein die in einer Sekunde verrichtete Arbeit. Die Leistung ist also:  $\mathcal{E} = A : t$ . Setzt man hierin die Werte von A aus Gleichung 9 und 10 ein, so erhält man entweder:

$$\mathcal{E} = I^2 \cdot R \dots \dots \dots 11$$

oder

$$\mathcal{E} = I \cdot E \dots \dots \dots 12$$

**Die Einheiten von Arbeit und Leistung.** Da sich die elektrische Leistung durch das Produkt: Strom mal Spannung darstellt, liegt es nahe,

als Einheit des Effekts 1 Ampere mal 1 Volt zu nehmen. Man nennt diese neue Einheit ein *Watt*.

$$1 \text{ Watt} = 1 \text{ Ampere mal } 1 \text{ Volt.}$$

Handelt es sich um größere Leistungen, so rechnet man in Kilowatt, wobei

$$1 \text{ Kilowatt} = 1000 \text{ Watt.}$$

$$1 \text{ Pferdestärke} = 736 \text{ Watt.}$$

Die Abkürzungen von Watt und Kilowatt sind W bzw. kW.

Da die elektrische Arbeit gleich Leistung mal Zeit ist, wird man als Arbeitseinheit ein Watt mal 1 Sekunde, also 1 *Wattsekunde* (1 Joule) verwenden. Bei größeren Arbeiten rechnet man in Wattstunden oder in Kilowattstunden. Es ist also:

$$1 \text{ Wattstunde (Wh)} = 1 \text{ Watt eine Stunde lang,}$$

$$1 \text{ Kilowattstunde (kWh)} = 1000 \text{ Watt eine Stunde lang.}$$

**Beispiele:** Die gewöhnlichen Zimmerglühlampen verbrauchen etwa 1 Watt für jede Kerze. Was kostet demnach eine Brennstunde einer normalen 32kerzigen Birne, wenn die elektrische Energie 50 Pf. für die kWh kostet?

Die Lampe von 32 Kerzen verbraucht 32 W, also während einer Stunde 32 Wh = 0,032 kWh.

$$1 \text{ kWh kostet } 50 \text{ Pf.,}$$

$$\text{also } 0,032 \text{ kWh kosten } 1,6 \text{ Pf.}$$

2. Ein Motor leistet 10 PS und liegt an einer Stromquelle von 220 V Spannung. Welchen Strom muß er aufnehmen?

$$10 \text{ PS} = 10 \cdot 736 = 7360 \text{ W.}$$

Es ist also

$$E \cdot I = 7360$$

$$I = 7360 : E = 7360 : 220 = 33,5 \text{ A.}$$

Diese Rechnung ist aber nur unter der Voraussetzung richtig, daß der Motor verlustlos arbeitet.

Um den Umwandlungsfaktor zwischen elektrischer Energie und Wärmeenergie zu finden, bestimmt man die durch einen bekannten Strom in einem gegebenen Widerstand entwickelte Wärmemenge und findet:

$$1 \text{ Kilowattstunde} = 860 \text{ Kilokalorien.}$$

**Beispiel:** Der Heizwiderstand eines Kochtopfs habe einen Widerstand von 52,5 Ohm und sei für 220 V bestimmt. Um wieviel Grad wird sich 1 Liter Wasser in 10 Minuten erwärmen, wenn 40% der entwickelten Wärme verloren gehen?

Der durchfließende Strom ist:

$$I = E : R = 220 : 52,5 = 4,2 \text{ A.}$$

Die verbrauchten kWh in  $\frac{1}{6}$  Stunden demnach:

$$\frac{E \cdot I \cdot t}{1000} = \frac{220 \cdot 4,2 \cdot \frac{1}{6}}{1000} = 0,154 \text{ kWh.}$$

Da 1 kWh = 860 kcal ist, sind 0,154 kWh = 860 · 0,154 = 133 kcal. Hiervon gehen 40% verloren, so daß also nur 80 kcal nutzbar sind. Da eine kcal die Wassermenge 1 kg um 1° zu erwärmen vermag, wird durch 80 kcal eine Temperaturzunahme von 80° eintreten.

**Die Anwendung der Wärmewirkung des elektrischen Stromes.**

a) Die Koch- und Heizapparate. Der Vorteil derselben, anderen Heizvorrichtungen gegenüber, besteht darin, daß die Wärmeerzeugung in außerordentlich bequemer und reinlicher Weise erfolgt, und daß man die Wärme gerade an dem Punkt entwickeln kann, wo man sie braucht. Es treten deshalb nur sehr geringe Wärmeverluste auf. Bei den elektrischen Kochtöpfen wird meistens in einem Doppelboden eine flache Heizspirale, die mit einem feuerbeständigen Isoliermaterial, wie Glimmer oder Ton isoliert ist, untergebracht. Hierbei ist es wegen des Wärmeübertritts notwendig, daß nur eine ganz dünne Isolierschicht

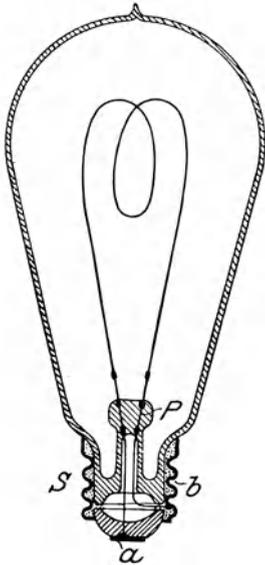


Abb. 20.  
Kohlenfadenlampe.

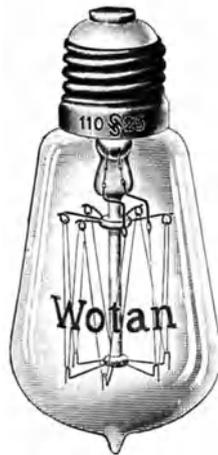


Abb. 21.  
Metalldrahtlampe.

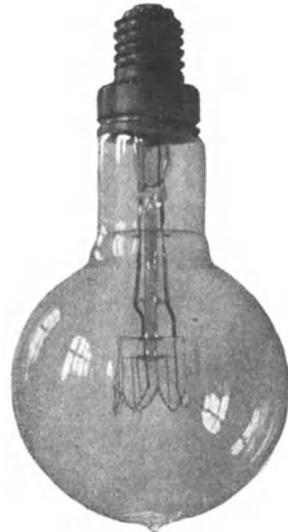


Abb. 22.  
Halbwattlampe (gasgefüllt).

die Spirale von dem Topfboden trennt. Durch Anordnung zweier Spiralen lassen sich verschieden starke Heizwirkungen einschalten. Elektrische Zimmeröfen müssen so gebaut sein, daß die Zimmerluft bequem hindurchtreten und die Wärme abführen kann.

b) Die elektrischen Glühlampen. In den Glühlampen wird ein dünner Heizfaden durch den Strom zur Weißglut gebracht, so daß er helles Licht aussendet. Damit der Faden nicht oxydiert, muß die Glasbirne luftleer sein. Abb. 20 zeigt die ältere Kohlenfadenlampe im Schnitt. Die Durchführung der Drähte durch das Glas geschieht wegen der gleichen Wärmedehnung mittels Platinstückchen P oder billigeren Legierungen, welche die gleiche Wärmedehnung wie Glas haben. Die Stromzuleitung besorgt der Lampensockel S mit dem Gewindekontakt b und dem davon isolierten Kontaktplättchen a. Für den Leuchtfaden kommen nur Stoffe mit sehr hohem Schmelz-

punkt in Frage. Anfänglich hielt man deshalb die Kohle für am besten geeignet. Ihr hoher Widerstand erlaubte geringe Fadenlängen zu nehmen. Der Wattverbrauch der Kohlenfadenlampen war jedoch sehr hoch, denn er betrug 3,5 Watt je Kerze. Durch eine größere Stromstärke hätte man zwar ein kräftigeres Glühen und damit eine höhere Lichtausbeute erzielen können, wenn nicht dadurch eine Zerstäubung des Kohlenfadens einträte, welche den Faden immer dünner und das Glas immer lichtundurchlässiger machte. Man ging deshalb zu den weniger zerstäubbaren Metallen Wolfram, Osmium und Tantal über. In den Metalldrahtlampen mußte der dünne Metalldraht wegen seiner großen Länge auf ein besonderes Traggestell aufgespannt werden, wie Abb. 21 zeigt. Ihr Wattverbrauch beträgt nur noch etwa 1 Watt je Kerze. Durch eine weitere Steigerung der Fadentemperatur könnte die Lichtausbeute noch weiter gesteigert werden. Aber dann würde auch

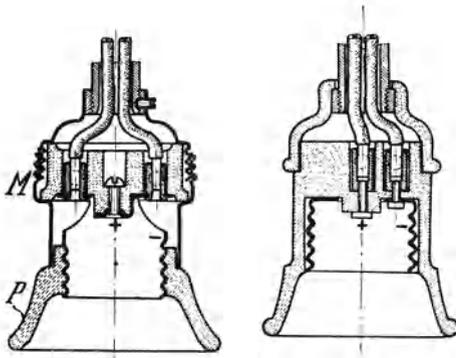


Abb. 23. Lampenfassungen, links aus Metall, rechts aus Isoliermaterial.

(Entnommen aus Preger-Lehmann, Grundzüge der Unfallverhütungs-Technik.)

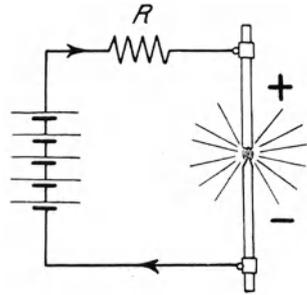


Abb. 24. Zwischen den sich trennenden Kohlen entsteht ein Lichtbogen.

bei den Metallen die Zerstäubung unerträglich groß. Um diese zu vermindern, werden neuerdings größere Lampen mit Stickstoff- oder Argongas gefüllt. Da infolge der Gasfüllung aber eine starke Kühlwirkung eintritt, muß die abkühlende Oberfläche des Leuchtdrahtes durch Aufwickeln zu einer engen Spirale vermindert werden. Diese sog. *Halbwattlampen* haben einen wesentlich günstigeren Verbrauch. Abb. 22 stellt eine solche Lampe mit dem üblichen Großgewinde dar. Die Lichtausstrahlung der Glühlampen ist nach den einzelnen Richtungen verschieden. Die gewöhnliche Metalldrahtlampe sendet senkrecht zur Lampenachse am meisten Licht aus, weshalb diese Lichtstärke meist angegeben wird. Da die großen Halbwattlampen hauptsächlich zur Bodenbeleuchtung von Plätzen und Räumen dienen, ist die nach unten ausgestrahlte Lichtmenge wichtiger. Man gibt deshalb bei ihnen die mittlere Lichtstärke der unteren Halbkugel an (mittlere hemisphärische Lichtstärke).

Die Lichtstärke jeder Lampe nimmt mit der Zeit ab, weil das Glas bestäubt. Gleichzeitig sinkt auch der Wattverbrauch, während der

Verbrauch je Kerze steigt. Als *Brenndauer* bezeichnet man diejenige Anzahl Brennstunden, in welchen die Lichtstärke um 20% sinkt. Dieselbe beträgt etwa 800—1000 Stunden. Die *Lebensdauer* einer Lampe kann mehrere tausend Stunden betragen.

Glühlampen werden nur in Normalgrößen und nur für Spannungen bis 250 V hergestellt. Große Lampen und neuerdings auch kleinere werden durch ihren Wattverbrauch gekennzeichnet. Die Lampenspannung muß konstant gehalten werden, weil jede Spannungssteigerung die Brenndauer vermindert. Der Anschluß einer Glühlampe an die Leitung geschieht durch Einschrauben in eine Fassung (Abb. 23).

c) Der elektrische Lichtbogen. Nähert man zwei Kohlenstäbe, die nach Abb. 24 über einen Widerstand R an eine Stromquelle von 40 bis 50 V Spannung angeschlossen sind, einander, so fließt erst dann ein Strom, wenn sich die Kohlen berühren.

Zieht man dann die Stäbe etwas auseinander, so ist der Strom nicht unterbrochen, sondern er bildet zwischen den Kohlenspitzen eine leuchtende Feuererscheinung, den *Lichtbogen*. Die Temperatur des Lichtbogens ist außerordentlich hoch, z. B. hat die an den Pluspol angeschlossene Kohle etwa 3000 bis 4000°, die negative Kohle etwa 1000° weniger. Beide Kohlen brennen allmählich ab, und zwar die positive mehr als die negative. Abb. 25 gibt ein Bild eines Lichtbogens.

Wegen der hohen Temperatur des Lichtbogens und seiner starken Lichtwirkung wird derselbe sowohl zur Beleuchtung, als auch zum Heizen benutzt. Damit der Lichtbogen einer *Bogenlampe* nicht durch den Abbrand erlischt, muß jede Bogenlampe eine selbsttätige Nachschubvorrichtung haben.

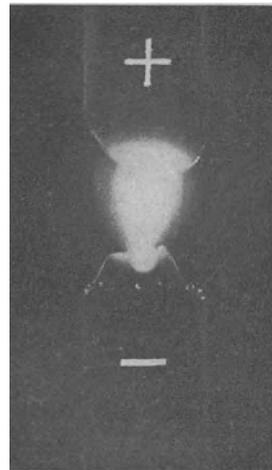


Abb. 25.  
Elektrischer Lichtbogen.

d) Die Abschmelzsicherungen. Jeder Leiter erwärmt sich infolge des Stromflusses. Damit nun die Zuleitungen zu Motoren oder Lampen niemals gefährlich warm werden können, darf nur ein bestimmter Höchststrom für jeden Leitungsquerschnitt zugelassen werden. Damit dieser nicht überschritten werden kann, baut man Abschmelzsicherungen ein; dies sind meist dünne Silberdrähte, welche bei Überschreitung der zulässigen Stromstärke durchschmelzen und den gefährdeten Leiter dadurch abschalten.

## D. Die chemischen Wirkungen des elektrischen Stromes.

Wenn der elektrische Strom aus einer Metallsalzlösung ein Metall abscheidet, so hat nicht der elektrische Strom die Zersetzung bewirkt. Denn in jeder verdünnten Salzlösung zerfallen ganz von selbst viele Moleküle in das Metall und den Salzrest. Die Tätigkeit des Stromes,

welche *Elektrolyse* genannt wird, besteht vielmehr nur darin, daß er die Metallatome in seiner Richtung mitnimmt und an dem negativen Blech abscheidet, während er den Salzrest an das positive Blech befördert. Auch angesäuertes Wasser wird auf diese Weise in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt, wobei der Wasserstoff wie ein Metall zum negativen Pol geht.

Die abgeschiedene Stoffmenge ist jederzeit genau der Stromstärke und der Zeit proportional, was uns ja Veranlassung gab, die Stromstärken-einheit durch die Gewichtsmenge einer Metallabscheidung festzulegen. Die Apparate, welche durch Wägung einer abgeschiedenen Stoffmenge eine Messung des Stromes ermöglichen, heißen *Voltmeter*.

### Das elektrische Element.

Wir haben bisher stets Stromquellen verwendet, haben uns aber noch nicht überlegt, wie diese denn aussehen. Dies wollen wir nun nachholen.

Bringt man in ein Gefäß mit verdünnter Schwefelsäure getrennt voneinander ein Kupfer- und ein Zinkblech, wie es Abb. 26 darstellt, so beobachtet man an dem angeschlossenen Spannungsmesser einen Ausschlag. Eine solche Zelle kann man daher in der bisher betrachteten Weise als Stromquelle benutzen, und man nennt sie ein *elektrisches Element*. Verwendet man statt Kupfer und Zink andere Leiterstoffe, so wird ebenfalls eine Spannung angezeigt, die größer oder kleiner sein kann. Nur in einem Falle ist die Spannung Null, nämlich, wenn zwei Bleche gleichen Stoffes eingetaucht werden. Bedeutsam ist ferner noch, daß ein solches Element stets die gleiche Spannung liefert, wenn es in gleicher Weise zusammengesetzt ist. Ein Element mit kleinen Blechen hat demnach dieselbe Spannung wie ein großes von gleicher Bauart.

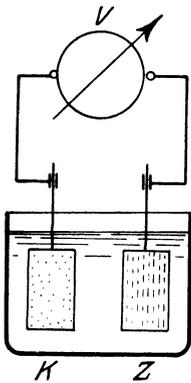


Abb. 26.  
Die Kupfer- und die Zinkplatte in verdünnter Schwefelsäure bilden ein elektrisches Element.

Nach dem Früheren trat der elektrische Strom an der Plusklemme aus der Stromquelle heraus. Dies ist bei dem Kupfer-Zinkelement das Kupferblech. Innerhalb des Elementes fließt der Strom natürlich vom Zink zum Kupfer, wobei er eine Abscheidung von Wasserstoff am Kupfer und des Säurerestes am Zinkpol hervorruft. Der Säurerest verbindet sich dabei mit dem Zink und löst es auf. Die Zinkplatte eines Elementes darf deshalb nicht zu klein sein, wenn man ihm längere Zeit Strom entnehmen will. Der an dem Kupferblech abgeschiedene Wasserstoff haftet teilweise an demselben und entzieht die Platte ihrer Wirksamkeit. Die beschriebenen Kupfer-Zinkelemente lassen deshalb bald in der Spannung nach. Elemente konstanter Spannung sind z. B. das *Daniellelement* (Kupfer in Kupfervitriollösung und Zink in verdünnter Schwefelsäure, beide Flüssigkeiten durch einen porösen Tonzylinder getrennt) und das *Beutelement* (Zink und ein Gemisch von Kohle und Braunstein, das in

einen Beutel eingenäht ist, alles in Salmiaklösung). Das Daniell-element hat ungefähr 1.1 Volt, das Beutelement etwa 1,4 V Spannung. Die vorstehend beschriebenen *nassen* Elemente lassen sich nach längerem Gebrauch stets wieder erneuern. Dies ist kaum möglich bei den sog. *Trockenelementen*, welche statt der Flüssigkeit getränkte Sägespäne oder dgl. haben. Dieselben eignen sich besonders für transportable Apparate.

**Das Verhalten der Elemente.** Wir wollen nun nach Abb. 27 einen Widerstand R an die Klemmen + und - des Elementes anschließen. Der dann fließende Strom I hat dann einen geschlossenen Kreis, durchfließt den äußeren Widerstand R und dann die Flüssigkeit des Elementes. Diese Flüssigkeit bietet dem Durchfluß des Stromes aber genau wie jeder andere Leiter einen gewissen Widerstand. Diesen inneren Widerstand des Elementes wollen wir mit r bezeichnen. Um den Strom I durch diesen inneren Widerstand r hindurchzutreiben, braucht man nach dem Ohmschen Gesetz eine Spannung von  $I \cdot r$  Volt. Wenn nun die erzeugte Spannung des Elementes E Volt beträgt und im Inneren bereits  $I \cdot r$  verbraucht werden, so muß zwischen den Klemmen, also auch am äußeren Widerstand eine um diesen Spannungsverlust  $I \cdot r$  kleinere Spannung herrschen, die wir die *Klemmenspannung* des Elementes nennen wollen.

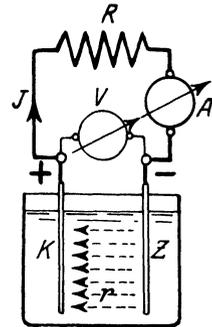


Abb. 27.  
Der geschlossene Stromkreis eines Elementes.

Es ist also:

*Klemmenspannung* = erzeugte Spannung - Spannungsverlust.

$$e = E - I \cdot r \dots \dots \dots 13$$

Um den Strom I berechnen zu können, wenn der innere und äußere Widerstand sowohl, als auch die erzeugte Spannung bekannt sind, muß man bedenken, daß diese beiden Widerstände r und R hintereinandergeschaltet sind, und daß die erzeugte Spannung allein die den Strom treibende elektrische Kraft ist, daß also nach dem Ohmschen Gesetz

$$I = \frac{E}{R + r} \text{ ist.}$$

Die vorletzte Beziehung besagt, daß die *Klemmenspannung* des Elementes immer um den inneren Spannungsverlust kleiner ist als die erzeugte Spannung. Dieser innere Spannungsverlust  $I \cdot r$  hängt nun aber von der Größe des dem Element entnommenen Stromes ab. Bei großem Strom I ist  $I \cdot r$  groß und es bleibt von der konstant erzeugten Spannung E nur noch ein geringer Teil an den Klemmen zur Verfügung. Umgekehrt wird bei geringer Stromentnahme die *Klemmenspannung* nahezu gleich der erzeugten Spannung sein, weil  $I \cdot r$  klein ist. Entnimmt man nun schließlich gar keinen Strom, d. h. sind die Klemmen + und - überhaupt nicht miteinander verbunden, so muß an den Elementklemmen die volle erzeugte Spannung herrschen, weil kein innerer Spannungsverlust auftritt. Am stromlosen Element kann man demnach die erzeugte Spannung messen.

Der zweite Grenzfall tritt nun ein, wenn man den äußeren Widerstand  $R$  gleich Null macht, wenn also die beiden Klemmen durch einen dicken Draht von geringer Länge miteinander verbunden werden. Dann liegt in dem ganzen Stromkreis nur noch der innere Widerstand  $r$  und da die erzeugte Spannung stets unverändert bleibt, muß der Strom

$$I = \frac{E}{r} \text{ sein.}$$

Dies ist der größte Strom, den das Element überhaupt hergeben kann. Man nennt diesen Fall, bei welchem die Pole  $+$  und  $-$  einer Stromquelle

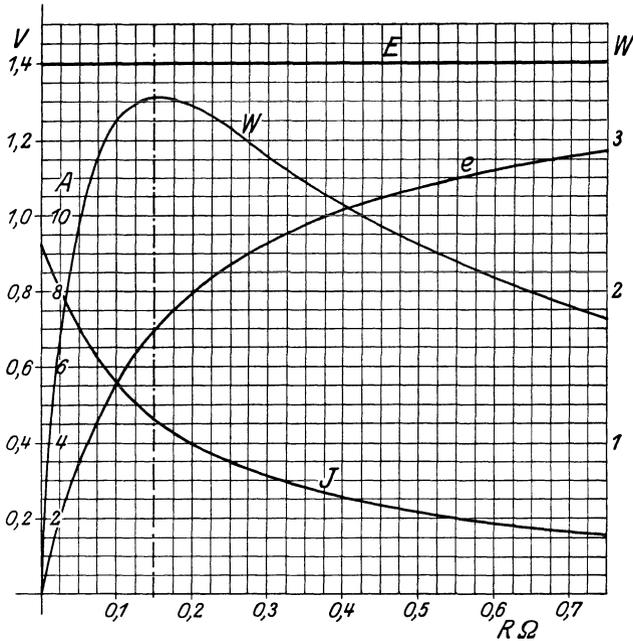


Abb. 28.  $e$  = Klemmspannung,  $J$  = Stromstärke,  $W$  = abgegebener Effekt bei verschiedenen an das Element gelegten Widerständen.

durch einen widerstandslosen, dicken Leiter miteinander verbunden sind, einen *Kurzschluß* und den dabei fließenden größten Strom den *Kurzschlußstrom*. Durch den großen Kurzschlußstrom leiden die Elemente, besonders die Trockenelemente, und man muß deshalb sehr darauf achten, daß ein Element nicht kurzgeschlossen wird. Noch viel vorsichtiger muß man aber sein, wenn es sich um eine ganze Batterie von Elementen handelt, die hintereinander geschaltet, eine hohe Spannung ergeben, ferner natürlich auch bei anderen Stromquellen mit höherer Spannung, weil bei einem Kurzschluß derselben die Stromstärke so groß werden kann, daß bei ungenügendem Schutz durch Abschmelzsicherungen Erwärnungen der Leiter auftreten, welche sogar zu Bränden Veranlassung geben können.

**Beispiel:** Die erzeugte Spannung eines Elementes betrage  $E = 1,4 \text{ V}$  und sein innerer Widerstand  $r = 0,15 \Omega$ . Wie groß werden Strom  $I$  und Klemmenspannung  $e$  sein, wenn ein äußerer Widerstand  $R = 0,3 \Omega$  angeschlossen wird?

Es ist:

$$I = \frac{E}{R + r} = \frac{1,4}{0,3 + 0,15} = \frac{1,4}{0,45} = 3,1 \text{ A.}$$

Ferner muß die Klemmenspannung sein:

$$e = E - I \cdot r = 1,4 - 3,1 \cdot 0,15 = 0,93 \text{ V.}$$

Selbstverständlich muß auch

$$e = I \cdot R = 3,1 \cdot 0,3 = 0,93 \text{ V sein.}$$

An Leistung gibt das Element nach außen ab:

$$\mathcal{E} = I^2 \cdot R = I \cdot e = 3,1 \cdot 0,93 = 2,9 \text{ W.}$$

Führt man die vorstehende Berechnung nacheinander für verschiedene äußere Widerstände durch, und trägt man sich die Ergebnisse in Abhängigkeit von denselben zeichnerisch auf, so erhält man Abb. 28. Bei  $R = 0$  fließt der Kurzschlußstrom, welcher 9 A übersteigt. Der abgegebene Effekt erreicht seinen Höchstwert, wenn der äußere Widerstand gleich dem inneren ist. Da bei einem größeren inneren Widerstand die Klemmenspannung viel rascher abfallen würde, ist es nötig, denselben durch große Platten und geringen Abstand klein zu halten.

**Die Schaltung der Elemente.** Ebenso wie früher Widerstände, können auch Elemente hintereinander geschaltet werden. Bei letzteren ist es

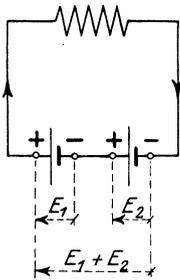


Abb. 29.  
Gleichsinnig hintereinander geschaltete Elemente.

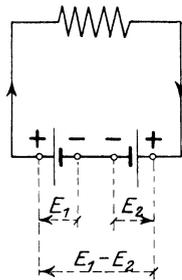


Abb. 30.  
Gegensinnig hintereinander geschaltete Elemente.

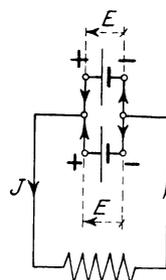


Abb. 31.  
Parallel geschaltete Elemente.

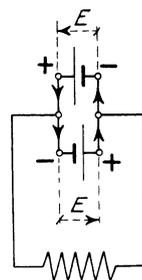


Abb. 32.  
Falsch parallel geschaltete Elemente.

aber nicht gleichgültig, welche Pole miteinander verbunden werden. In Abb. 29 ist so geschaltet, daß der Pluspol des einen Elementes mit dem Minuspol des anderen Elementes verbunden ist, daß also beide Elemente in der gleichen Richtung einen Strom treiben wollen. Dann ist die Gesamtspannung gleich der Summe der Einzelspannungen. Schaltet man aber nach Abb. 30 die Elemente gegeneinander, so ist die Gesamtspannung gleich der Differenz der Einzelspannungen. Die Schaltung nach Abb. 29 wird man immer dann anwenden müssen, wenn man eine höhere Spannung zur Verfügung haben will.

Um Elemente parallel zu schalten, verbindet man nach Abb. 31 die Pluspole miteinander und ebenso die Minuspole. Die Spannung ist dabei nicht vergrößert worden, sondern gleich derjenigen eines einzigen Elementes. Aber der Strom  $I$  wird jetzt von jedem der beiden Elemente

nur zum Teil gedeckt. Elemente schaltet man also parallel, wenn man bei geringer Spannung einen großen Strom braucht. Es leuchtet ferner ein, daß man nur Elemente gleicher Spannung parallel schalten darf, weil sonst innerhalb der beiden Elemente ein Ausgleichsstrom fließen würde. Unter gar keinen Umständen darf man aber Elemente nach Abb. 32 parallel schalten, weil die Elemente dabei aufeinander kurzgeschlossen sind und einen unzulässig hohen Kurzschlußstrom wie eingezeichnet erzeugen.

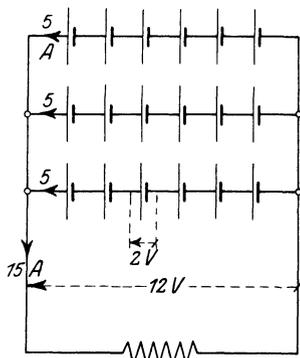


Abb. 33. Gruppenschaltung von Elementen.

**Beispiel:** Für eine Schwachstromanlage sei eine Spannung von 12 V erforderlich und es werde ein Strom bis zu 15 A gebraucht. Es steht nun eine größere Anzahl Elemente von je 2 V zur Verfügung, von denen jedes aber nur mit höchstens 5 A belastet werden darf. Wie sind die Elemente zu schalten?

Da 12 V benötigt werden, müssen 6 Elemente hintereinander geschaltet werden. Da aber ferner dreimal soviel Strom benötigt wird, als ein Element hergeben kann, müssen drei solcher Sechserreihen parallel gelegt werden. Abb. 33 zeigt die Schaltung.

### Die elektrischen Akkumulatoren.

In den Elementen wurde die elektrische Energie aus der chemischen Energie der zersetzten Stoffe gewonnen. Diese Erzeugungart ist sehr teuer und deshalb für größere Energiemengen ungeeignet. Trotzdem findet eine ähnliche Umwandlung von chemischer in elektrische Energie häufig Anwendung, wenn es sich um die Aufspeicherung von Energie handelt.

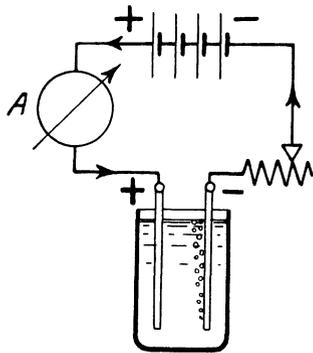


Abb. 34. Ladung einer Bleizelle.

Zwei Bleiplatten, die nach Abb. 34 in einem Gefäß mit verdünnter Schwefelsäure stehen, sind kein Element. Wenn wir aber mittels einer fremden Stromquelle einen Ladestrom durch die Zelle schicken, zeigt nachher ein angelegter Spannungsmesser eine Spannung von 2 V an der Zelle an, und wir können dann einen entgegengesetzt gerichteten Entladestrom entnehmen. Durch die Ladung ist die Bleizelle also zu einem Element geworden.

Es kommt dies daher, daß der Ladestrom an der Bleiplatte, welche an den Pluspol angeschlossen ist, Sauerstoff abscheidet, welcher das Blei in Bleidioxid ( $\text{PbO}_2$ ) überführt, so daß nachher nicht mehr zwei gleiche Platten, sondern eine mit braunem Bleidioxidüberzug und eine reine Platte in der verdünnten Schwefelsäure stehen. Bei der Entladung verschwindet der Bleidioxidüberzug allmählich wieder. Wir erkennen, daß die elektrische Ladenergie in chemische Energie übergeführt wird, die bei Bedarf durch Entladung

wieder in elektrische Energie zurückverwandelt werden kann. Es findet also eine Aufspeicherung von Energie statt, und wir nennen solche Zellen deshalb *Akkumulatoren*.

**Der Bau der Akkumulatoren.** Die Aufnahmefähigkeit oder *Kapazität* eines Akkumulators ist um so größer, je größer die Plattenoberfläche ist. Um diese zu vergrößern, und um einen möglichst großen Teil des Bleis an der Umsetzung in braunes Bleidioxid teilnehmen zu lassen, versieht man die positive Platte meistens mit zahllosen Rippen, so daß sie ein Aus-

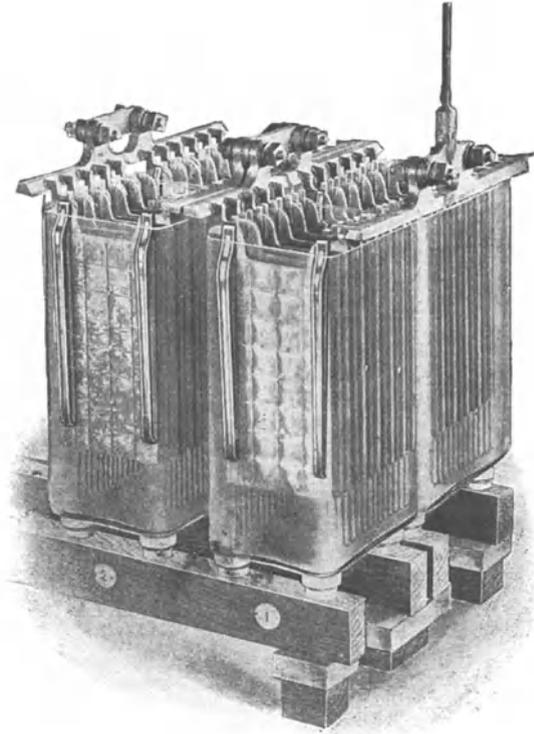


Abb. 35. Akkumulatorenzellen.

sehen bekommt, wie ein Pilz auf der Unterseite. Die negative Platte wird meist einfacher als Kastenplatte hergestellt, welche siebartig durchbrochen ist und mit Bleioxid gefüllt wird. Bei der ersten Ladung geht durch den abgeschiedenen Wasserstoff das Oxyd in reines Blei über, welches in schwammiger Form der Flüssigkeit auch einen guten Zutritt gewährt. Je größer die Stromstärke ist, die man einem Akkumulator entnehmen will, um so größer müssen die Platten sein. Da sich nun eine große Platte zu leicht verziehen würde, zerteilt man sie und hängt die Teilplatten an Nasen in das Gefäß, wobei abwechselnd auf eine positive immer eine negative Platte folgt. Abb. 35 zeigt zwei Zellen. Unterhalb

der Platten bleibt ein Raum, damit sich der von denselben in geringer Menge abfallende Bleischlamm ansammeln kann, ohne die Platten miteinander kurzzuschließen. Damit sich dieselben nicht berühren können, werden entweder Glasröhren oder Holzbrettchen zwischengeschoben. Die einzelnen Zellen, deren jede etwa 2 V Spannung hat, werden zur Erreichung höherer Spannung hintereinander geschaltet, wobei die einzelnen Gefäße nochmals durch untergelegte Porzellanisolatoren isoliert werden.

**Das Verhalten der Akkumulatoren.** Das bei der Ladung an der Plusplatte gebildete braune Bleidioxid verschwindet bei der Entladung wieder, wobei auf beiden Platten zusammen mit der Schwefelsäure Bleisulfat entsteht. Es wird also bei der Entladung der Flüssigkeit

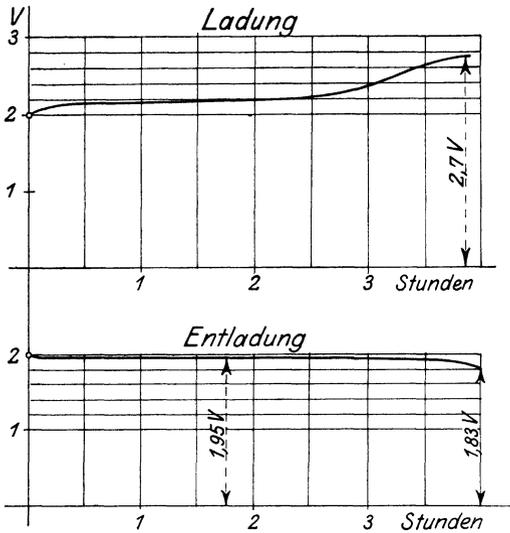


Abb. 36. Spannungsänderung einer Zelle bei Ladung und Entladung.

welche zur Aufladung einer Zelle nötig ist, steigt nach Abb. 36 mit zunehmender Ladung an und erreicht am Ende 2,7 V. Während eine Batterie von 100 Zellen nur eine Spannung von  $100 \cdot 2 = 200$  V besitzt, ist zu ihrer Aufladung eine Spannung von  $100 \cdot 2,7 = 270$  V nötig. Dieser Mehrbetrag an Ladespannung wird zuweilen dadurch erhalten, daß die Spannung der Lademaschine steigerbar ist, oder dadurch, daß der Lademaschine eine Zusatzlademaschine, welche die zusätzliche Spannung liefert, vorgeschaltet wird. Die Entladespannung ist nach Abb. 36 im Mittel 1,95 V. Die Entladung muß unterbrochen werden, wenn 1,83 V erreicht sind. Die niedrigste Spannung kommt natürlich für die Bestimmung der Zellenzahl in Frage.

Die Kapazität eines Akkumulators wird in Amperestunden ausgedrückt. Bei einer Kapazität von 300 Ah können also während 3 Stunden 100 A entnommen werden. Bei kleinen Entladeströmen ist die Kapazität

Schwefelsäure entnommen, wodurch jene verdünnter wird. Bei der Ladung hingegen wird das Sulfat wieder aufgelöst, wodurch die Säure konzentrierter wird. Man kann deshalb mittels eingetauchter Aräometer (gläserne Schwimmkörper, die um so mehr eintauchen, je leichter eine Flüssigkeit ist) den Ladegrad ablesen. Das Bleisulfat des entladenen Akkumulators geht im Laufe der Zeit in eine unlösliche Form über, wodurch die Aufnahmefähigkeit der Zelle stark sinkt. Akkumulatoren müssen deshalb immer voll geladen sein, wenn sie unbenutzt stehen sollen. Die Spannung,

meist etwas größer. Unter dem Wirkungsgrad  $\eta$  eines Akkumulators versteht man:

$$\eta = \frac{\text{Entladeleistung}}{\text{Ladeleistung}}.$$

Derselbe beträgt etwa 0,75, d. h. von den in den Akkumulator geladenen kWh bekommt man nur 75% zurück.

Das Laden einer Akkumulatorenbatterie wird so lange fortgesetzt, bis die Zellen kochen, d. h. bis die abgeschiedenen Gase keine Verbindung mehr eingehen, sondern entweichen. Kocht eine Zelle nicht mit, so ist sie nicht in Ordnung und muß genau nachgesehen werden. Da die Entlade-spannung von 2 V bis auf 1,83 V sinkt, muß bei Batterien für Lichtnetze, die doch wegen der Lampen konstante Spannung verlangen, die Zellenzahl mittels eines *Zellenschalters* (Abb. 37) veränderlich sein.

**Beispiel:** Welche Kapazität und wieviel Zellen muß eine Lichtbatterie haben, die 6 Tage lang je zwei Stunden 100 Metall-drahtlampen von je 50 Kerzen, 220 V speisen kann?

Die Lampen verbrauchen:  $100 \cdot 50 = 5000 \text{ W}$ ,  $I = 5000 : 220 = 22,7 \text{ A}$ . Bei 12 Entladestunden ist also die Kapazität:  $12 \cdot 22,7 = 273 \text{ Ah}$ .

Die Zellenzahl ist:  $220 : 1,83 = 120 \text{ Zellen}$ . Da im geladenen Zustand jedoch nur  $220 : 2 = 110 \text{ Zellen}$  eingeschaltet werden dürfen, müssen mittels Zellenschalters 10 Zellen abschaltbar sein. Man zeichne sich nun das Schaltungsschema dieser Anlage auf.

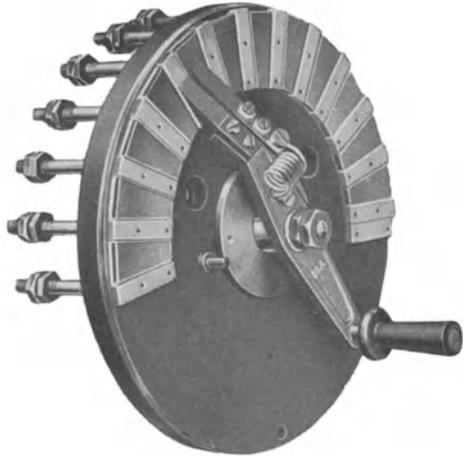


Abb. 37. Zellenschalter.

## E. Die magnetischen Wirkungen des elektrischen Stromes.

**Das magnetische Feld des elektrischen Stromes.** Unser anfänglicher Versuch lehrt, daß jeder stromdurchflossene Leiter um sich herum ein magnetisches Feld hat. Um ein Kraftlinienbild dieses Feldes zu bekommen, stecken wir nach Abb. 38 einen Leiter durch ein Kartonblatt P und streuen nach Schließung des elektrischen Stromes Eisenfeilspäne auf. Wir erkennen, daß die Kraftlinien in geschlossenen Linien kreisförmig um den Leiter verlaufen, und daß sie in der Nähe des Leiters, wo also der kürzeste Weg ist, am dichtesten sind. Bringt man eine kleine Magnetnadel in die Leiternähe, so kann man auch die Richtung der Kraftlinien feststellen, und man findet: Blickt man in Richtung des elektrischen Stromes, so verlaufen die magnetischen Kraftlinien im Uhrzeigersinn um den Leiter. Um die Stromrichtung im Leiterquer-

schnitt anzudeuten, wollen wir uns in Zukunft der in Abb. 39 dargestellten Bezeichnung bedienen. Das magnetische Feld eines geraden Stromleiters

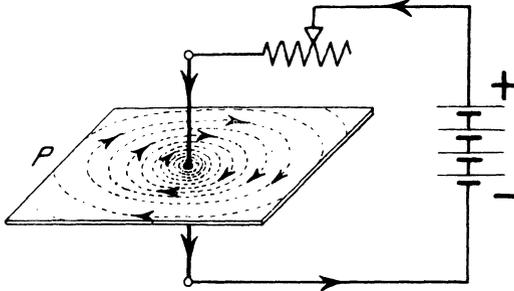


Abb. 38. Kraftlinienbild des stromdurchflossenen Leiters.

dehnt sich nach allen Seiten unendlich weit aus, und es ist infolgedessen wenig stark. Wenn man nach Abb. 40 den Leiter zu einer Schleife



Abb. 39. Stromrichtungszeichen.

biegt, so müssen sich die Kraftlinien beider Leiterseiten A und B in den Raum zwischen denselben teilen, so daß eine Zusammendrängung

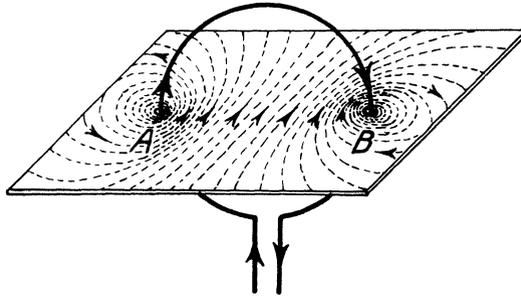


Abb. 40. Kraftlinienbild der Leiterschleife.

der Kraftlinien im Schleifenhohlraum entsteht. Eine noch viel stärkere Übereinanderlagerung der Kraftlinien erhält man, wenn man nach

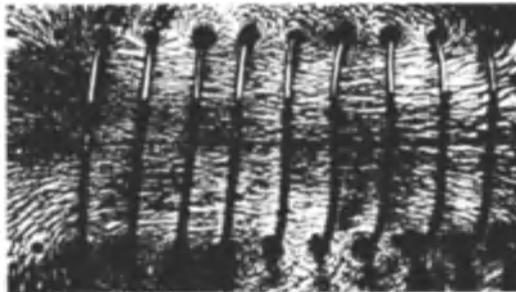


Abb. 41. Kraftlinienbild der stromdurchflossenen Spirale

Abb. 41 mehrere Schleifen, also eine Spirale vom Strom durchfließen läßt. Das Kraftlinienbild der Spirale lehrt, daß nur wenige Kraftlinien

noch direkt den einzelnen Leiter umkreisen können, daß die überwiegende Anzahl aller Kraftlinien als geschlossenes Bündel durch den ganzen Spulenhohlraum geht. Würde man die Abstände zwischen den einzelnen Windungen  $a, b, \dots$  noch geringer wählen, würde man also eine richtige Spule wickeln, so könnten noch weniger Kraftlinien ihren Weg um den Einzelleiter nehmen. Wie man sieht, stimmt das Kraftlinienbild einer Spule mit demjenigen eines Stabmagneten überein. Das Spulende, an dem die Kraftlinien austreten, ist ein Nordpol, das andere der Südpol. Kehrt man die Stromrichtung in der Spule um, so kehrt sich natürlich auch die Polarität des Magnetismus um. Eine stromdurchflossene Spule verhält sich auch genau wie ein Stabmagnet. Sie zieht Eisen an und wirkt auf einen anderen Magneten je nach der Polarität anziehend oder abstoßend.

**Der Elektromagnet.** Die stromdurchflossene Spule hat dem früher betrachteten Dauermagneten gegenüber wesentliche Vorzüge. In der Magnetspule kann man nicht nur den Magnetismus durch Verstärkung des Stromes beliebig vergrößern, sondern man kann ihn durch Ausschalten des



Abb. 42. Ringspule mit kreisförmig laufendem Kraftfluß.

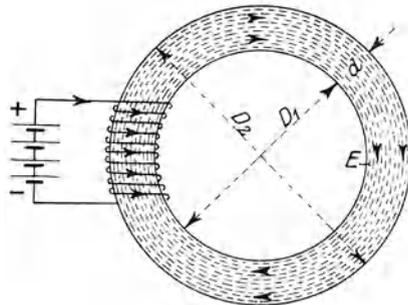


Abb. 43. Der magnetische Kraftfluß folgt dem Eisenweg.

Stromes auch verschwinden und durch Umpolen des Stromes auch in entgegengesetzter Richtung entstehen lassen.

Der Kraftfluß einer Stromspule bildet nach Abb. 41 nur so weit ein geschlossenes, paralleles Bündel wie die Spule reicht. Will man dem Kraftfluß überall einen bestimmten Weg vorschreiben, was in elektrischen Maschinen immer notwendig ist, so kann man dies dadurch machen, daß man die Spulen über den ganzen Kraftlinienweg verteilt, wie dies in Abb. 42 bei dem ringförmigen Kraftfluß geschehen ist. Die Kraftlinien können hier nirgends frei austreten. Es gibt noch eine andere Möglichkeit, um die Kraftlinien auf einem bestimmten Weg zu halten, nämlich die, daß man den Kraftlinienweg nach Abb. 43 mit dem magnetisch gut leitenden Eisen ausfüllt. Die Kraftlinien ziehen dann diesen Weg vor, und man braucht die Spule nicht mehr über den ganzen Ringumfang zu wickeln. Der eisenlose und der eisenerfüllte Magnet unterscheiden sich wesentlich voneinander. Der Magnetismus des eisen-

losen Magneten steigt proportional mit dem elektrischen Strom, ein doppelter oder dreifacher Strom ruft auch eine doppelte bzw. dreifache Feldstärke hervor. Der Eisenmagnet hingegen zeigt Sättigungserscheinungen. Sein Magnetismus ist aber schon bei ganz geringen Strömen

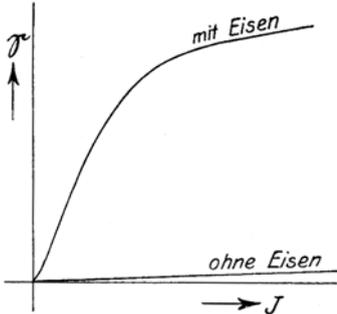


Abb. 44. Vergleich zwischen der eisenlosen und eisenerfüllten Spule.

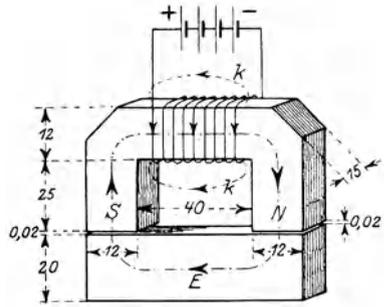


Abb. 45. Elektromagnet.  
k = Streukraftlinien.

vielmals größer als im eisenlosen Magneten, er steigt aber nach Erreichung einer gewissen Stärke kaum noch. Abb. 44 stellt einen Vergleich der Kraftlinienzahlen beider Spulen dar.

In Abb. 45 ist ein hufeisenförmiger Elektromagnet dargestellt, welcher ein Stück Eisen E trägt. Einige wenige Kraftlinien  $k$  nehmen nicht den vorgeschriebenen Lauf. Man nennt sie *Streukraftlinien*.

**Die Berechnung des eisenlosen Magneten.** In Abb. 46 ist dem Kraftfluß eine kreisförmige Bahn durch den eisenlosen Ring (Holz, Pappe oder dgl.) vorgeschrieben. Wir denken uns nun den ganzen Kraftlinienweg in cm eingeteilt und nehmen auf jedem dieser cm vor-

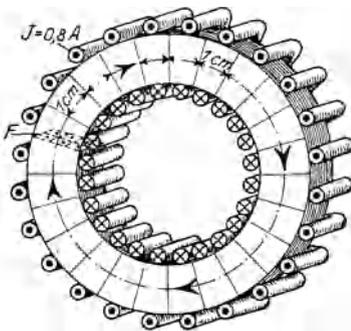


Abb. 46. Ein Strom von 0,8 A erzeugt eine Kraftlinie durch jedes cm.

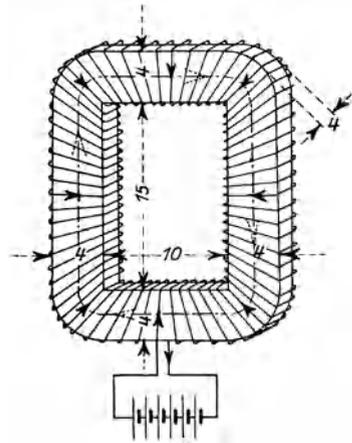


Abb. 47. Ringspule ohne Eisen.

läufig eine Windung an. Dann muß man durch jede dieser Windungen einen Strom von 0,8 A schicken, damit durch jedes  $cm^2$  des Ringquerschnitts F

gerade eine Kraftlinie geht. Es ist dabei ganz gleichgültig, wie groß die Fläche  $F$  ist. Denkt man sich nun auf jedes cm des Ringumfangs 2 Windungen mit 0,4 A oder 4 Windungen mit 0,2 A gelegt, so entsteht genau die gleiche Feldstärke. Es kommt also sowohl auf den Strom, als auch auf die Windungszahl an, und da 1 Windung mal 0,8 A gerade so stark wie 2 Windungen mal 0,4 A magnetisiert, ist eben das Produkt Ampere mal Windungszahl, die sog. *Amperewindungszahl* maßgebend. Man kann demnach auch sagen: Damit in unmagnetischem Stoff eine Kraftlinie je  $\text{cm}^2$  entsteht, müssen auf jedem cm des Kraftlinienweges 0,8 Amperewindungen (AW) liegen. Zur Erzeugung von  $\mathfrak{B}$  Kraftlinien je  $\text{cm}^2$  sind für den ganzen Kraftlinienweg von  $l$  cm Länge  $\mathfrak{B} \cdot l$  mal so viel Amperewindungen erforderlich, also:

$$AW = 0,8 \cdot \mathfrak{B} \cdot l \dots \dots \dots 14$$

In Abb. 46 ist  $l$  der mittlere Ringumfang in cm.

**Beispiel:** Auf dem eisenfreien Ring der Abb. 47 seien 2000 Windungen aufgewickelt. Welchen Strom muß man durch diese Wicklung schicken, damit durch jedes  $\text{cm}^2$  des Ringquerschnittes eine Kraftlinienzahl von 500 Kraftlinien geht?

Die mittlere Kraftlinienlänge beträgt:

$$l = 15 + 15 + 10 + 10 + 4 \cdot 3,14 = 62,5 \text{ cm.}$$

Die nötige Amperewindungszahl AW ist also:

$$AW = 0,8 \cdot 500 \cdot 62,5 = 25000.$$

Nun ist aber:

$$AW = \text{Strom} \cdot \text{Windungszahl} = I \cdot z = 25000$$

also: der erforderliche Strom:

$$I = AW : z = 25000 : 2000 = 12,5 \text{ A.}$$

Der Kraftfluß  $\mathfrak{S}$  beträgt, da der Ringquerschnitt  $F = 4 \cdot 4 = 16 \text{ cm}^2$  ist:

$$\mathfrak{S} = \mathfrak{B} \cdot F = 500 \cdot 16 = 8000 \text{ Kraftlinien.}$$

**Die Berechnung des eisernen Elektromagneten.** Sobald eine Spule Eisen enthält, wächst der Magnetismus nicht mehr proportional mit der Stromstärke, weil das Eisen bald gesättigt ist und trotz aller Stromsteigerung nur noch wenig stärker magnetisch wird. Da sich außerdem die einzelnen Eisensorten noch ganz und gar verschieden verhalten, bleibt gar nichts anderes übrig, als durch einen Versuch festzustellen, wieviel AW auf jedem cm Kraftlinienweg im Eisen liegen müssen, damit eine bestimmte Feldstärke  $\mathfrak{B}$  entsteht. Die Ergebnisse solcher Versuche sind in den **Magnetisierungslinien** der Abb. 48 für drei verschiedene Durchschnittssorten zeichnerisch dargestellt. Man sieht, daß Gußeisen am geringwertigsten ist. Um darin 10000 Kraftlinien je  $\text{cm}^2$  zu erzeugen, braucht man nach Abb. 48 auf jedem cm Kraftlinienweg 130 AW. Für Ankerblech brauchte man nur 4 AW/cm.

**Beispiel:** Abb. 43 stelle einen Eisenring aus Stahlguß dar. Es ist  $D_1 = 15 \text{ cm}$ ,  $D_2 = 20 \text{ cm}$  und der Durchmesser des kreisförmigen Ringquerschnitts  $d = 2,5 \text{ cm}$ . Die Spule hat 200 Windungen. Wie groß muß der elektrische Strom sein, damit im Ring ein Kraftfluß von 80000 Kraftlinien entsteht?

Der Querschnitt des Eisenringes ist gleich  $2,5^2 \cdot 3,14 : 4 = 4,9 \text{ cm}^2$ . Folglich ist die Kraftliniendichte:

$$\mathfrak{B} = \mathfrak{S} : F = 80000 : 4,9 = 16300 \text{ Kraftl. auf } 1 \text{ cm}^2.$$

Nach der Magnetisierungslinie sind für  $\mathfrak{B} = 16300$  Kraftlinien in Stahlguß 50 Amperewindungen für jedes cm des Kraftlinienwegs erforderlich. Nun beträgt der Kraftlinienweg hier bei dem mittleren Ringdurchmesser von 17,5 cm

gleich  $17,5 \cdot 3,14 = 55$  cm, demnach ist die Amperewindungszahl, welche notwendig ist, um den geforderten Kraftfluß durch den ganzen Ring zu treiben

$$AW = 50 \cdot 55 = 2750.$$

Nun ist  $AW = I \cdot z = 2750$ , also der Strom  $I = 2750 : 200 = 13,75$  A.

Wenn sich ein magnetischer Kreis aus verschiedenen Stoffen zu sammensetzt, oder in einzelnen Teilen desselben verschiedene magnetische

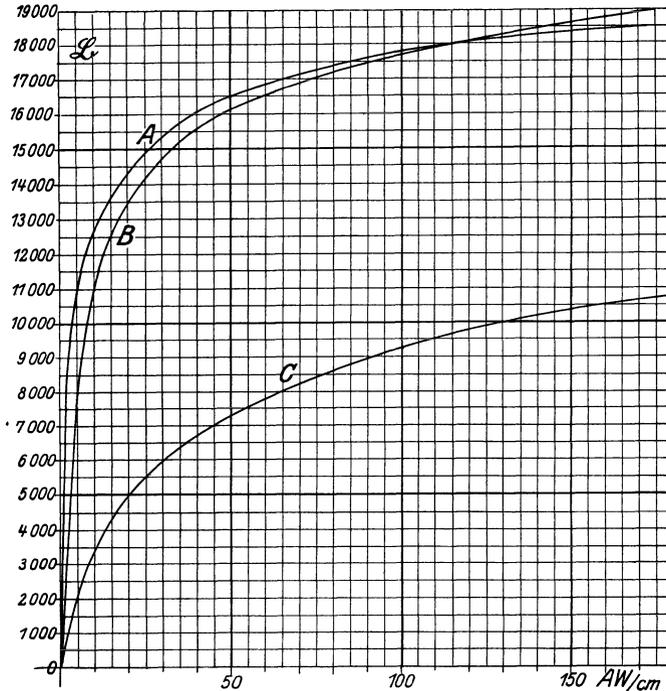


Abb. 48. Magnetisierungslinien. A für Ankerblech, B für Stahlguß, C für Gußeisen.

Dichten herrschen, so ist die Amperewindungszahl für jeden dieser Teile getrennt zu berechnen.

**Beispiel:** Ein Stahlgußmagnet nach Abb. 45 soll einen Kraftfluß von 3 000 000 Kraftlinien führen und ein Gußeisenstück E tragen. Die Windungszahl der Erregerspule beträgt  $z = 2000$  Windungen. Welcher Strom muß hindurchgeschickt werden, und wie groß ist die Tragkraft des Elektromagneten, wenn infolge Verschmutzung und schlechter Bearbeitung ein Luftspalt von 0,2 mm zwischen Magnet und gußeisernem Anker E anzunehmen ist?

Die Kraftliniendichte in den drei verschiedenen Teilen ist:

$$\begin{aligned} \text{im Stahlguß } \mathfrak{B}_s &= 3\,000\,000 : 12 \cdot 15 = 16\,700 \text{ Kraftl./1 cm}^2 \\ \text{in Luft } \mathfrak{B}_l &= 3\,000\,000 : 12 \cdot 15 = 16\,700 \text{ Kraftl./1 cm}^2 \\ \text{im Gußeisen } \mathfrak{B}_g &= 3\,000\,000 : 20 \cdot 15 = 10\,000 \text{ Kraftl./1 cm}^2. \end{aligned}$$

Die Kraftlinienwege in den drei Teilen sind:

$$\begin{aligned} \text{im Stahlguß } l_s &= 40 + 25 + 25 + 6 \cdot 3,14 = 109 \text{ cm} \\ \text{in Luft } l_l &= 2 \cdot 0,02 = 0,04 \text{ cm} \\ \text{im Gußeisen } l_g &= 40 + 6 \cdot 3,14 = 59 \text{ cm}. \end{aligned}$$

Für jedes cm Kraftlinienweg sind erforderlich:

im Stahlguß nach Abb. 48  $AW/cm = 62$   
 in Luft  $AW/cm = 0,8 \cdot \mathfrak{B} = 0,8 \cdot 16700 = 13350$   
 im Gußeisen nach Abb. 48  $AW/cm = 130$ .

Die AW für den ganzen Kraftlinienweg sind also:

im Stahlguß  $AW_s = 109 \cdot 62 = 6750$   
 in Luft  $AW_l = 0,04 \cdot 13350 = 535$   
 im Gußeisen  $AW_g = 59 \cdot 130 = 7700$

zusammen  $AW = 14985$ .

Bei 2000 Windungen beträgt also der Strom:

$$I = 14985 : 2000 = 7,5 \text{ A.}$$

Die Feldstärke im Luftspalt ist  $\mathfrak{B} = 16700$  Kraftl./cm<sup>2</sup>. Die tragende Fläche beträgt  $2 \cdot 12 \cdot 15 = 360$  cm<sup>2</sup>. Nach Seite 3 beträgt die Zugkraft von einem cm<sup>2</sup>  $16700 \cdot 16700 \cdot 0,04 = 11,2$  kg.

Die gesamte Tragkraft ist also:

$$P = 360 \cdot 11,2 = 4000 \text{ kg.}$$

Das vorstehende Beispiel lehrt uns wieder, daß die Luft den Kraftlinien einen ganz erheblichen Widerstand entgegensetzt, denn für den kleinen Luftweg von 0,04 cm sind 535 AW erforderlich, für den großen Weg im Stahlguß aber nur 6750. Der Widerstand der Luft ist demnach in diesem Beispiel 215mal größer als derjenige des Stahlgusses. Um mit wenig AW, d. h. mit kleiner Spule auszukommen, muß man also immer bestrebt sein, den Luftweg so klein wie nur möglich zu machen. Ist der Luftspalt größer als in Abb. 45, so breiten sich die Kraftlinien aus, so daß mit einem größeren Luftquerschnitt  $F$  gerechnet werden muß. Die notwendigen AW werden dadurch geringer.

**Die magnetische Hysterisis.** Wenn man ein Stück Eisen erstmals magnetisiert, so erhält man die in Abb. 49 dargestellte Magnetisierungslinie  $O-a$ , welche die *anfängliche Linie* genannt wird.

Durch eine darauf folgende Schwächung des magnetisierenden Stromes wird auch der Magnetismus geringer, aber nicht viel, und wenn der Strom Null geworden ist, ist noch eine Feldstärke  $O-b$  in dem Eisen vorhanden, die sog. *Remanenz*. Um diese zu vernichten, muß man einen umgekehrten Strom durch die Spule schicken. Sobald die umgekehrten AW gleich  $O-c$  sind, ist der Magnetismus Null. Eine weitere Steigerung der AW bis  $O-g$  ruft

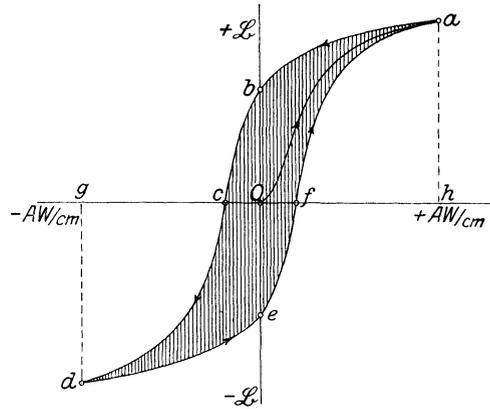


Abb. 49. Hysterisischleife.  
 $O-a$  = anfängliche Linie.

die entgegengesetzte Feldstärke  $g-d$  hervor. Diese Erscheinung, daß der Magnetismus stets hinter dem magnetisierenden Strom zurückbleibt, nennt man *Hysterisis*. Die zeichnerische Darstellung einer vollen Ummagnetisierung ergibt die *Hysterisischleife*, Abb. 49. Die Hysterisis spielt bei Wechselstrommagneten, die in steter Folge ummagnetisiert werden, eine große Rolle. Es hat sich nämlich ergeben, daß sich das Eisen durch die Ummagnetisierung erwärmt, und daß dieser

Verlust um so größer ist, je größer die Fläche der Hysteresisschleife ist. Um diese klein zu halten darf man nur ganz weiches Eisen für Wechselstrommagnete verwenden, auch darf man nicht zu stark magnetisieren. Der Verlust wächst natürlich auch mit der Zahl der Ummagnetisierungen.

**Bau und Herstellung der Elektromagnete.** Die Form des *Eisenkörpers* eines Elektromagneten richtet sich ganz nach dem Verwendungszweck. Da durch die Leistung die Größe des Kraftflusses meist gegeben ist, kann nach Annahme der Kraftliniendichte der Magnetquerschnitt bestimmt werden. Da die magnetisch hochwertigen Eisensorten im allgemeinen auch teuer sind, wird man zuweilen auch zu Gußeisen greifen. Nur den Kern der Spulen wird man stets aus gutem Eisen herstellen, damit die teure Spule möglichst klein wird. Das Leitermaterial für die *Wicklung* muß hohe Leitfähigkeit haben. Ferner muß die Drahtisolation so dünn wie möglich sein, damit die in der Spule durch den Strom entwickelte Wärme leichter nach außen abströmen kann. Für Maschinenwicklungen kommt fast ausschließlich die Baumwollbespinnung in Frage, und zwar bei Spannungen bis etwa 100 V die einfache Bespinnung, bei welcher der Drahtdurchmesser nur etwa 0,2 mm durch die Isolation dicker wird, und bei normalen Spannungen die zweifache Baumwollbespinnung. Höhere Spannungen verlangen noch eine Umklöppelung. Aluminiumdrähte werden zuweilen auch dadurch isoliert, daß sie mit einer dünnen, nicht leitenden Oxydschicht versehen werden. Das Aufwickeln der Spulen geschieht auf drehbankähnlichen Maschinen, die ein Zählwerk haben müssen und leicht ein- und ausrückbar sind. Der Draht wird von einer Drahttrommel abgewickelt, die, mit Bremsen versehen, den auflaufenden Draht stets gespannt hält. Damit die Spule beim Wickeln einen Halt hat, kann man entweder einen passenden Spulenkasten verwenden (bei kleinen Spulen Pappe, sonst Metall, aber kein Eisen), auf welchem die Spule dauernd bleibt, oder man verwendet eine Holzschablone, von welcher die Spule nach Fertigstellung abgezogen wird, worauf sie mit Leinenband allseitig fest umwickelt wird. Die fertige Spule muß gut getrocknet und durch einen dichten Lacküberzug gegen die Luftfeuchtigkeit geschützt werden. Häufig werden auch die Spulen in ein heißes Lackbad getaucht, während solche für hohe Spannungen unter Luftleere mit Lack durchtränkt werden.

Zur Bestimmung der Spulenabmessungen kann man nach Aufzeichnung des Magnetgestells zunächst einmal den mittleren Durchmesser der Spule annehmen. Die mittlere Windungslänge  $l_m$  läßt sich dann berechnen und demnach auch der Spulenwiderstand. Er ist:

$$R = \frac{l_m \cdot z}{k \cdot q}$$

Multipliziert man beide Seiten mit dem Strom  $I$ , so erhält man:

$$I \cdot R = \frac{l_m \cdot I \cdot z}{k \cdot q}$$

Hierin ist aber  $I \cdot R$  die Spannung  $e$  an der Spule und  $I \cdot z$  ist gleich  $AW$ . Folglich ergibt sich der Drahtquerschnitt  $q$  zu:

$$q = \frac{l_m \cdot AW}{k \cdot e} \dots \dots \dots 15$$

Man nimmt nun vorläufig einmal einen Strom  $I$  an, und zwar nicht mehr als  $1-2$  A je  $\text{mm}^2$ , worauf die Windungszahl bestimmt werden kann. Damit die Spule im Betrieb keinesfalls die von den Verbandsvorschriften bestimmte Temperaturgrenze überschreitet, muß sie eine genügende abkühlende Oberfläche haben, und zwar sind bei offenen Spulen für jedes in Wärme umgewandelte Watt etwa  $10 \text{ cm}^2$  Oberfläche nötig, bei gekapselten Spulen etwa das Doppelte.

**Anwendungen des Elektromagnetismus.** Abb. 50 stellt schematisch ein elektromagnetisches *Aufspannfutter* dar, welches zum leichten Festhalten von Arbeitsstücken auf Werkzeugmaschinen dient. Die Pole  $N$  und  $S$  sind durch eine schmale unmagnetische Schicht  $L$  voneinander getrennt.  $W$  ist das angezogene Werkstück. Der Strom wird dem drehenden Futter durch zwei Schleifringe  $R$  zugeführt.

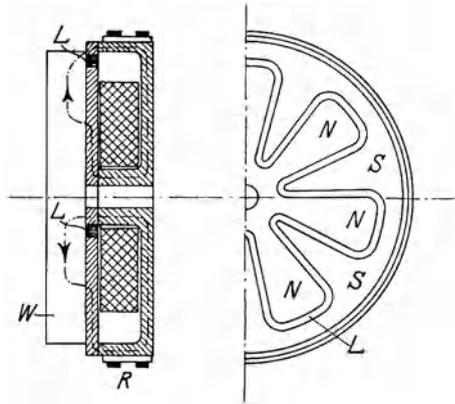


Abb. 50. Elektromagnetisches Aufspannfutter.

In ganz ähnlicher Weise werden auch *elektromagnetische Kupplungen* gebaut, welche zur leichten, vorübergehenden Kuppelung zweier Wellen dienen.

Der in Abb. 45 dargestellte *Lastmagnet* zeigt beträchtliche Streukraftlinien, auch werden seine Spulen durch Anstoßen leicht beschädigt. Lastmagnete werden deshalb meist glockenförmig hergestellt, wie Abb. 51 im Schnitt zeigt. Der innere Kern und der

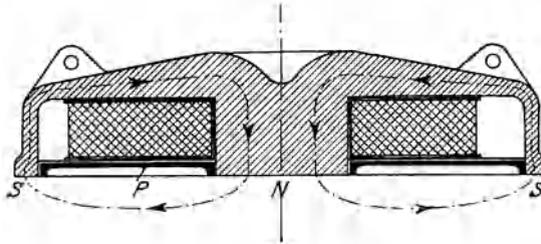


Abb. 51. Glockenförmiger Lastmagnet.

äußere Rand sind die beiden Pole. Die Abdeckplatte  $P$  muß aus unmagnetischem Material (Manganstahl) bestehen. Abb. 52 zeigt einen Magneten mit Last. Lastmagnete eignen sich besonders zum Tragen schwerer Einzelstücke. Loses Material wie Späne oder Schrott werden nur in geringer Menge angezogen, weil die Kraftlinien nicht tief gehen.

Bei der bekannten *elektrischen Klingel* wird der Elektromagnetismus zur Erzeugung einer Bewegung benutzt. Schließt man in der Schaltung



Abb. 52. Lastmagnet mit Last.

linienweg kürzer als der Hub ist.

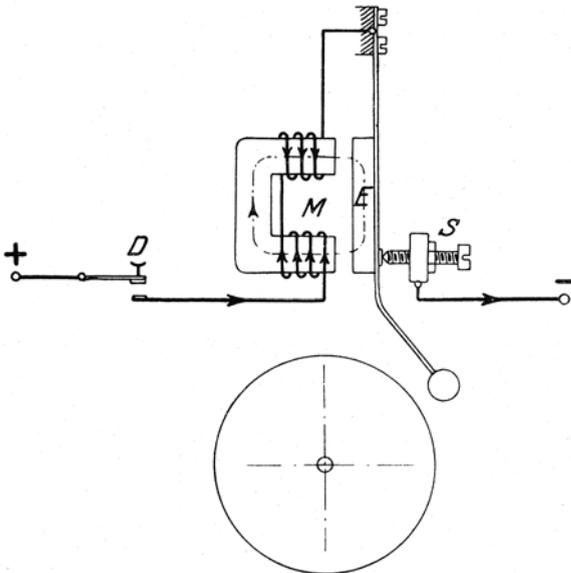


Abb. 53. Elektrische Klingel.

Abb. 53 durch Drücken des Knopfes D den Stromkreis, so zieht der durch den Strom erregte Magnet M seinen beweglichen Eisenanker E an, öffnet dabei aber den Stromkreis an der Kontaktschraube S. Infolgedessen geht der Anker E wieder in seine alte Lage zurück, wodurch der Strom von neuem geschlossen wird. Die Geschwindigkeit, mit welcher der Anker hin- und hergeht, hängt von der Anziehungskraft, von der Federstärke und vom Ankergewicht ab.

Zum Lüften von Bremsen und zum Betätigen von Schaltern dienen die *Zugmagnete*. Abb. 54 stellt einen solchen im Schnitt dar. Sobald die Spule S Strom bekommt, wird der Eisenkern K kräftig in die Spule hineingezogen. Der Kern ist oben abgeschrägt, damit der Kraftlinienweg kürzer als der Hub ist. Eine unmagnetische Führungsbüchse B verhindert, daß sich der Kern durch einseitiges Anziehen klemmt. Damit derselbe nach dem Ausschalten sofort abfällt, muß immer noch ein

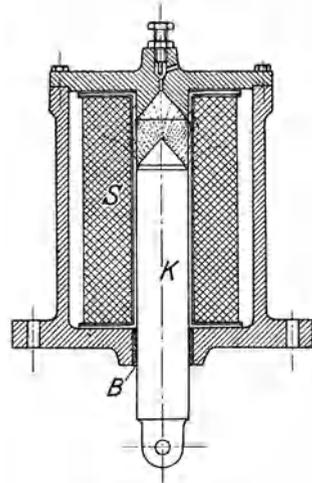


Abb. 54. Zugmagnet.

kleiner Luftspalt bleiben, den man durch Auflage einer unmagnetischen Schicht auf den Kern dauernd sichert. Die Zugkraft eines solchen Magneten wächst, je höher der Kern angezogen ist. Es ist deshalb nötig, daß der am Hubende auftretende Stoß durch einen Luftpuffer aufgenommen wird. Nachdem ein solcher Magnet einmal angezogen ist, genügt schon eine geringe Stromstärke, um ihn angezogen zu halten

**Der stromdurchflossene Leiter im magnetischen Feld.**

Der elektrische Strom erzeugt um einen Leiter ein magnetisches Feld. Wenn man nun einen solchen stromdurchflossenen Leiter in das magnetische Feld eines Magneten bringt, ist eine gegenseitige Einwirkung der beiden Felder aufeinander zu erwarten. Abb. 55 stellt einen

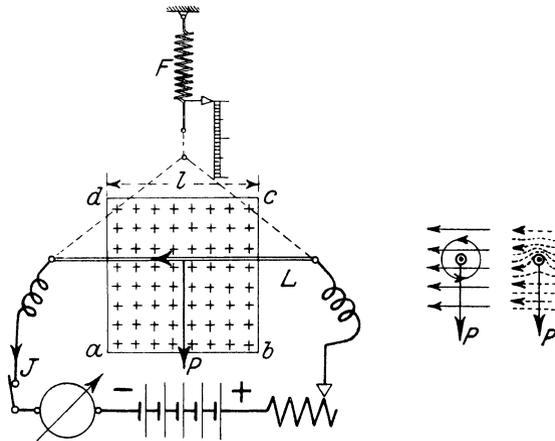


Abb. 55. Die Kraft P ist um so größer, je größer die Feldstärke  $\mathfrak{B}$ , je größer der durchgeleitete Strom I und je größer die Leiterlänge l ist.

derartigen Versuch dar. a—b—c—d ist die Stirnfläche eines Magnetpoles, dessen Kraftlinien durch die Kreuze angedeutet sind. In diesem magnetischen Feld befindet sich der stromdurchflossene Leiter L. Bei Stromschluß sehen wir den Leiter eine Bewegung nach abwärts ausführen, wobei er die Feder F mit einer Kraft P spannt. Der Versuch lehrt, daß die Kraft P, welche der Leiter auszuüben vermag, um so größer ist, je größer die Feldstärke  $\mathfrak{B}$  des magnetischen Feldes und um so größer die Stromstärke I im Leiter ist. Ferner lehrt die Überlegung, daß auch die Kraft P mit der Leiterlänge l wächst. Man kann also sagen:

Kraft P proportional  $\mathfrak{B} \cdot I \cdot l$ .

Damit man die Kraft P in kg bekommt, ist noch ein konstanter Zahlenfaktor hinzuzufügen:

$$P = \frac{\mathfrak{B} \cdot I \cdot l}{9810000} \dots \dots \dots 16$$

Hierin ist l natürlich nur die im magnetischen Feld liegende Länge des Leiters, und zwar in cm.

Bei dem beschriebenen Versuch treten drei Richtungsgrößen auf: *Bewegungsrichtung*, *Feldrichtung* und *Stromrichtung*. Wie man sieht, stehen diese drei Richtungen aufeinander senkrecht.

Die Bewegungsrichtung des Leiters in Abb. 55 läßt sich aber auch umkehren, so daß er sich nach oben bewegen will. Wir brauchen zu diesem Zwecke nur den Leiterstrom  $I$  oder die Feldrichtung des Magneten umzukehren. Kehren wir beide gleichzeitig um, so ändert sich die Bewegungsrichtung des Leiters nicht.

Eine Erklärung für das Verhalten des Stromleiters im magnetischen Felde findet man, wenn man sich, wie es in Abb. 55 in der Seitenansicht geschehen ist, die beiden magnetischen Felder aufzeichnet. Das Hauptfeld besteht aus parallelen Kraftlinien, während die Stromkraftlinien Kreisform haben. Beide Felder können nicht getrennt bestehen, sondern setzen sich zu einem resultierenden Feld zusammen, wie es

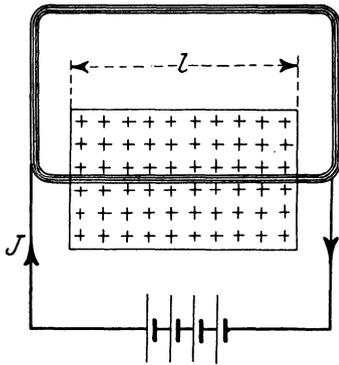


Abb. 56.

**Beispiel:** Eine Spule mit  $z = 100$  Windungen werde von einem Strome  $I = 5$  A durchflossen und liege nach Abb. 56 mit einer Spulenseite auf  $l = 25$  cm Länge in einem magnetischen Feld von  $\mathfrak{B} = 10000$  Kraftlinien auf ein  $\text{cm}^2$ . Wie groß ist die Kraft, die auf die Spule bewegend wirkt?

Die auf einen Leiter wirkende Kraft ist:

$$\frac{\mathfrak{B} \cdot I \cdot l}{9810000} = \frac{10000 \cdot 5 \cdot 25}{9810000} = 0,128 \text{ kg.}$$

Da die Spule 100 Windungen hat, liegen 100 Leiter, die alle von 5 A durchflossen sind, nebeneinander und die Gesamtkraft beträgt:

$$P = 100 \cdot 0,128 = 12,8 \text{ kg.}$$

**Anwendungen.** Die Kraftwirkung des stromdurchflossenen Leiters im magnetischen Feld ist von außerordentlicher Wichtigkeit. Sie ist die Grundlage für alle *Elektromotoren*. Zu einem Motor gehört demnach ein Magnet und Leiter, durch die man aus einer äußeren Stromquelle einen elektrischen Strom schickt. Abb. 57 stellt schematisch einen Elektromotor dar. Sp ist die Magnetisierungsspule, auch *Erregerwicklung* genannt, welche das magnetische Feld erzeugt. Zwischen den Polen N und S liegt der Eisenanker A, auf dessen Umfang die Leiterstäbe angebracht sind. Man erkennt leicht, daß die Stromrichtung auf der oberen Ankerhälfte umgekehrt wie unten sein muß, damit alle Leiter im gleichen

Sinne drehen. Es muß deshalb noch eine Vorrichtung  $K$ , die man Kommutator oder Kollektor nennt, vorhanden sein, die den Leiterstrom im geeigneten Augenblick umpolt. Aus dem Früheren geht hervor, daß man die Drehrichtung eines Elektromotors entweder dadurch umkehren kann, daß man den Ankerstrom umkehrt, oder dadurch, daß man den das Magnetfeld erzeugenden Erregerstrom der Spule  $Sp$  umpolt.

Den Elektromotoren sehr ähnlich ist das in Abb. 58 dargestellte *Drehspul-Meßinstrument* zur Messung von Strömen. Zwischen den Polen eines Dauermagneten  $M$  liegt eine feine, drehbare Spule  $D$ , durch

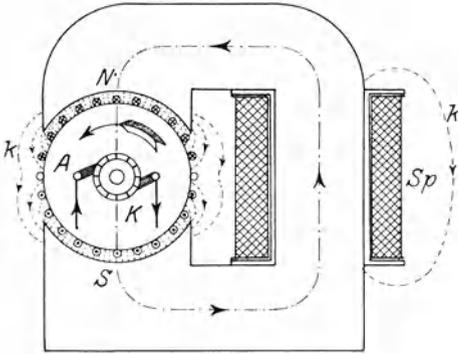


Abb. 57. Elektromotor. Durch die im magnetischen Feld liegenden Ankerleiter wird ein Strom geschickt.

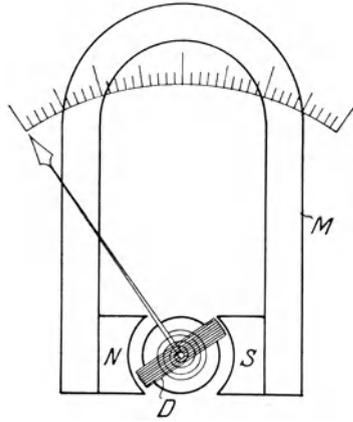


Abb. 58. Drehspulinstrument zur Messung von Strömen.

welche der zu messende Strom geleitet wird, und welche einen Zeiger trägt. Je größer der Strom ist, um so mehr wird durch die Kraftwirkung des Stromes die entgegenwirkende Spiralfeder gespannt, um so größer ist also auch der Ausschlag. Ähnlich wie bei den Motoren ist auch hier den Kraftlinien der Weg vom Nord- zum Südpol durch einen Eisenanker erleichtert worden.

## F. Die elektrische Induktion.

Wir haben bereits früher gehört, daß die Erzeugung von elektrischen Strömen mittels Elementen für große elektrische Anlagen nicht in Frage kommen kann, weil dabei die elektrische Energie durch den Verbrauch wertvoller Metalle gewonnen wird. In den Dynamomaschinen hingegen wird mechanische Arbeit, die wir aus der Wärme der Kohlenfeuerung erhalten, in elektrische Energie umgesetzt. Diese überaus wichtige Art, elektrischen Strom zu erzeugen, wollen wir im folgenden näher betrachten.

Wir wollen einen Leiterstab von der Länge  $l$  nehmen und an seine Enden nichts weiter als ein Galvanometer  $G$  anschließen, wie dies Abb. 59 darstellt. Bewegt man dann diesen Leiter in der Pfeilrichtung durch

ein magnetisches Feld, so zeigt das Galvanometer einen Ausschlag. Durch die Bewegung des Leiters ist also in demselben eine Spannung erzeugt worden. Man beachte wohl, daß die Spannung nur so lange entsteht, als der Leiter bewegt wird.

Bewegt man den Leiter umgekehrt, also in der Richtung des punktierten Pfeiles, so entsteht ein umgekehrter Ausschlag, also eine entgegengesetzte Spannung. Um das Gesetz der Spannungserzeugung aufzufinden, müssen wir bei verschiedenen bekannten Feldstärken den Leiter bewegen. Wir finden dann, daß die erzeugte Spannung der Feldstärke  $\mathfrak{B}$  proportional ist. Ebenso finden wir, daß wir die doppelte und dreifache Spannung bekommen, wenn wir bei gleichem Feld den Leiter mit doppelter bzw. dreifacher Geschwindigkeit bewegen. Die Überlegung lehrt ferner, daß auch die erzeugte Spannung um so größer

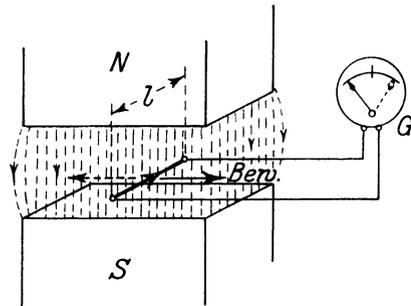


Abb. 59. Durch die Bewegung eines Leiters im magnetischen Feld wird eine Spannung erzeugt.

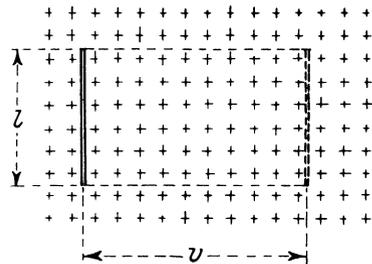


Abb. 60. Der Leiter überstreicht in einer Sekunde die Fläche  $v \cdot l$  und schneidet dabei  $\mathfrak{B} \cdot v \cdot l$  Kraftlinien.

sein muß, je länger der bewegte Leiter ist. Nennt man die Geschwindigkeit  $v$ , so läßt sich also schreiben:

$$E = \text{proportional } \mathfrak{B} \cdot v \cdot l.$$

Auch hier kann man den konstanten Proportionalitätsfaktor aus den Ergebnissen eines Versuches berechnen, damit man  $E$  in Volt erhält. Die Gleichung lautet dann:

$$E = \frac{\mathfrak{B} \cdot v \cdot l}{100000000} \dots \dots \dots 17$$

Die Länge  $l$  ist hierin in cm, die Geschwindigkeit  $v$  in cm/Sek. einzusetzen.

Das vorstehende Gesetz setzt voraus, daß der Leiter senkrecht zur Kraftlinienrichtung und senkrecht zum Leiter bewegt wird. Bewegen wir den Leiter aber unter Beibehaltung der horizontalen Lage auf und ab, also in Richtung der Kraftlinien, so entsteht keine Spannung. Ebenso schlägt das Galvanometer nicht aus, wenn wir den Leiter in dessen Richtung von vorn nach hinten verschieben. Man erkennt hieraus, daß nur dann durch die Bewegung eine Spannung in dem Leiter erzeugt wird, wenn der Leiter Kraftlinien schneidet. Weil nun also das Kraftlinienschneiden die Ursache der Spannungserzeugung ist, wollen wir auch das Gesetz hierdurch ausdrücken. In Abb. 60 ist ein

Feld, in der Kraftlinienrichtung gesehen, dargestellt. Bewegt sich der Leiter mit der Geschwindigkeit  $v$ , so kommt er nach Ablauf einer Sekunde und Zurücklegung eines Weges von  $v$  cm in die punktierte Lage. Er überstreicht demnach in einer Sekunde eine Fläche  $v \cdot l$ . Da jedes  $\text{cm}^2$  dieser Fläche von  $\mathfrak{B}$  Kraftlinien durchsetzt wird, beträgt die Zahl der von dem Leiter in einer Sekunde geschnittenen Kraftlinien  $\mathfrak{B} \cdot v \cdot l$ . Dies ist aber nichts anderes als der Ausdruck unseres früheren Gesetzes, welcher durch 100 Millionen dividiert die erzeugte Spannung gibt. Man kann das Induktionsgesetz demnach wie folgt aussprechen. *Bewegt man einen Leiter durch ein magnetisches Feld, so wird in ihm eine Spannung erzeugt, welche gleich der sekundlich geschnittenen Kraftlinienzahl ist, dividiert durch 100 000 000.* Bezeichnen wir den in  $t$  Sekunden geschnittenen Kraftfluß mit  $\mathfrak{C}$ , so ist die erzeugte Spannung:

$$E = \frac{\mathfrak{C}}{t \cdot 100000000} \dots \dots \dots 18$$

wenn wir voraussetzen, daß das Feld überall gleichmäßig stark ist. Bei nicht gleichmäßig starkem Feld entsteht eine Spannung von wechselnder Größe. Dieselbe ist in einem bestimmten Augenblick gleich der Kraftlinienzahl, die sekundlich geschnitten würde, wenn das Feld so stark, wie in dem angenommenen Augenblick bliebe.

**Die Richtung der erzeugten Spannung.** Die Erzeugung einer elektrischen Spannung durch Kraftlinienschnitten findet in allen Dynamomaschinen Anwendung. Der Bau derselben stimmt genau mit dem eines Motors nach Abb. 57 überein. Die auf dem Anker  $A$  angeordneten Leiter drehen sich jetzt natürlich nicht von selbst, sondern der Anker wird durch eine Antriebsmaschine (Dampfmaschine, Gasmotor) in Drehung versetzt. Die Schaltung der einzelnen Leiterstäbe ist im allgemeinen so, daß dieselben zur Erhöhung der Spannung hintereinander geschaltet werden. Die beiden Ankerhälften hingegen liegen parallel zueinander.

Man könnte nun leicht auf den Gedanken kommen, daß zum Antrieb eines riesig großen Stromerzeugers, der eine ganze Stadt mit elektrischem Strom versorgen kann, eine kleine Antriebsmaschine ausreichen könnte, weil doch nur die magnetischen Kraftlinien geschnitten zu werden brauchen, damit die notwendige Spannung entsteht. Dies trifft aber ganz und gar nicht zu. Schon eine oberflächliche Überlegung sagt uns, daß einem Erzeuger mindestens ebensoviel mechanische Energie zugeführt werden muß, als er elektrische Energie abgeben soll. Den inneren Grund wollen wir an Abb. 59 erkennen. Bewegt man einen offenen Leiterstab durch das Feld, so entsteht in ihm eine Spannung, deren Größe wir berechnen lernten, aber kein Strom. Nun wollen wir Anfang und Ende des Leiters durch einen Draht verbinden, so daß ein geschlossener Stromkreis entsteht. Die bei der Bewegung erzeugte Spannung wird in diesem Kreis jetzt einen Strom erzeugen, dessen Größe durch das Ohmsche Gesetz bestimmt ist. Man merkt aber auch jetzt einen Unterschied, wenn man die Leiterbewegung von Hand vornimmt, indem der geschlossene Leiter sich viel schwerer durch das Feld bewegen läßt, als der offene Leiterstab. Der geschlossene Leiter widersetzt sich also der Bewegung. Die Ursache dieses Widerstandes kann nur der erzeugte Strom sein.

Diese Tatsache drückt das *Lenz'sche Gesetz* aus, welches sagt: *Der erzeugte Strom ist immer so gerichtet, daß er die Leiterbewegung im magnetischen Feld zu hemmen sucht.* Diese Hemmung durch den erzeugten

Strom ist keine andere, als die auf Seite 37 beschriebene, die hemmende Kraft ist also gleich  $\mathfrak{B} \cdot I \cdot l : 9810000$ . Der oben erwähnte große Erzeuger kann also im Leerlauf, d. h. so lange er keinen Strom an die Stadt liefert, von einer verhältnismäßig schwachen Antriebsmaschine gedreht werden. Er erzeugt dabei die volle Spannung. Sobald die Maschine aber einen Strom liefert, widersetzen sich alle Leiter des Ankers, die ja von diesem Strom durchflossen sind, der Bewegung, so daß nur eine sehr starke Antriebsmaschine den Erzeuger in Bewegung halten kann.

Zur Ermittlung der Stromrichtung zeichnen wir uns die Richtung der hemmenden Kraft in Abb. 59 entgegen der Bewegung ein (punktierter Pfeil). Ein Strom, welcher den Leiter nach dieser Seite bewegen möchte, muß also auf der linken Leiterseite eine Feldschwächung hervorrufen. Dies kann nur ein Strom im Leiter, der von vorn nach hinten fließt. Wer mechanische Regeln mehr liebt, kann sich auch die *Rechtehand-Regel* merken. Man benutzt die drei ersten Finger der *rechten Hand* in demselben Sinne wie auf Seite 38.

**Beispiel:** Auf dem Anker einer Dynamo (s. Abb. 57) seien 390 Leiter untergebracht. Der Ankerdurchmesser betrage 20 cm, und die Ankerlänge 25 cm. Jeder Pol nimmt  $120^\circ$  des Umfangs ein, jedoch ist wegen der Kraftlinienausbreitung mit einem  $10\%$  größeren Bogen zu rechnen. Die Leiterstäbe der beiden Ankerhälften sind einander parallel geschaltet. Welche Spannung liefert die Maschine, wenn sie mit  $n = 600$  minutlichen Umdrehungen angetrieben wird und die Feldstärke  $10000$  Kraftl./cm<sup>2</sup> beträgt? Die Umfangsgeschwindigkeit des Ankers ist:

$$v = \frac{20 \cdot 3,14 \cdot 600}{60} = 628 \text{ cm/Sek.}$$

In einem Leiter, welcher sich im magnetischen Felde befindet, wird dann nach Gleichung 17 eine Spannung erzeugt:

$$\frac{10000 \cdot 25 \cdot 628}{100000000} = 1,57 \text{ V.}$$

Die volle Spannung wird in einer Ankerhälfte erzeugt, auf welcher 195 Leiter liegen. Da der Pol nur  $120^\circ + 10\% = 132^\circ$  überdeckt, liegen

$$195 \cdot \frac{132^\circ}{180^\circ} = 143 \text{ Leiter}$$

gleichzeitig im magnetischen Feld. Die Maschinenspannung ist also:

$$E = 1,57 \cdot 143 = 225 \text{ V.}$$

**Die bewegte Leiterschleife im magnetischen Feld.** Bewegt man die Leiterschleife der Abb. 61 durch ein gleichförmiges Magnetfeld, so schneiden nur die Leiter a—b und c—d Kraftlinien. Die dadurch entstehenden Spannungen heben sich aber auf, so daß die Gesamtspannung Null ist. Eine Spannung würde nur dann in der Spule entstehen, wenn der eine Leiter mehr oder weniger Kraftlinien schneiden würde als der andere, wenn also die Zahl der von der Spule umschlossenen Kraftlinienzahl zu- oder abnähme. In einer Leiterschleife entsteht demnach nur durch eine Änderung der umschlossenen Kraftlinienzahl eine Spannung. Da für die Größe dieser Spannung nur die Kraftlinienzahl in Frage kommt, welche von dem einen Leiter mehr oder weniger geschnitten werden als von den anderen, nämlich die Kraftlinienänderung in der Schleife, kann man nach dem Früheren sagen: *In jeder Leiterschleife entsteht durch jede Änderung der umschlossenen Kraft-*

linienzahl eine Spannung, welche gleich der sekundlichen Kraftlinienänderung, geteilt durch 100000000 ist. Nehmen wir nun noch an, daß wir statt der Schleife eine Spule mit  $z$  Windungen haben, so ist die durch eine Kraftlinienänderung  $\mathcal{E}$  in  $t$  Sekunden erzeugte Spannung:

$$E = \frac{\mathcal{E} \cdot z}{t \cdot 100000000} \dots \dots \dots 19$$

Wenn man in Abb. 61 annimmt, daß die eine Leiterseite mehr Kraftlinien als die andere schneidet, so läßt sich nach der früheren Regel die Richtung des erzeugten Stromes leicht feststellen. Man findet dann, daß bei einer Zunahme der umschlossenen Kraftlinienzahl der erzeugte Strom so gerichtet ist, daß seine Kraftlinien den Hauptkraftlinien entgegen-

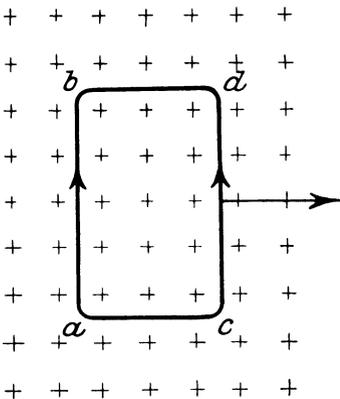


Abb. 61. In der bewegten Schleife entsteht kein Strom.

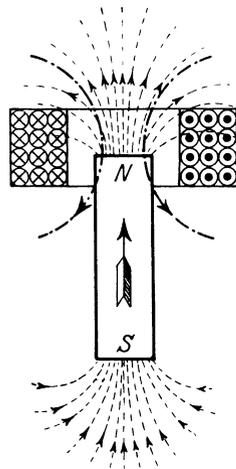


Abb. 62. Beim Hineinstecken des Magneten in die Spule entsteht in derselben der eingezeichnete Strom.

wirken, während bei einer Kraftlinienabnahme die Stromkraftlinien gerade so gerichtet sind, wie die verschwindenden Kraftlinien. Man kann das Lenzsche Gesetz für Spulen deshalb wie folgt ausdrücken: *Der durch eine Kraftlinienänderung in einer Spule erzeugte Strom ist immer so gerichtet, daß seine Kraftlinien die Kraftlinienänderung zu verhindern suchen.*

Eine Kraftlinienänderung in einer Spule läßt sich auf sehr verschiedene Art erzielen. In Abb. 62 wird ein Dauermagnet in eine Spule hineingesteckt. Durch diese Kraftlinienzunahme entsteht in der Spule ein Strom, der entgegengerichtete Kraftlinien erzeugt, wie durch zwei Linien angedeutet ist. Noch besser kann man den

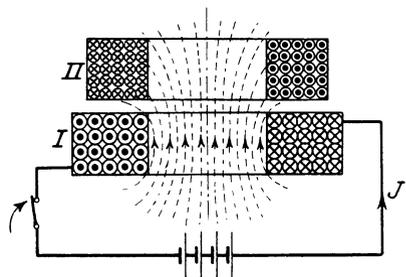


Abb. 63. Beim Ein- und Ausschalten des Stromes in Spule I entsteht in Spule II eine Spannung.

Versuch machen, wenn man statt des Dauermagneten einen starken Elektromagneten nimmt. Beim Herausziehen des Magneten entsteht natürlich ein umgekehrter Strom. Am allereinfachsten aber läßt sich nach Abb. 63 die Kraftlinienzahl in einer Spule II dadurch ändern, daß

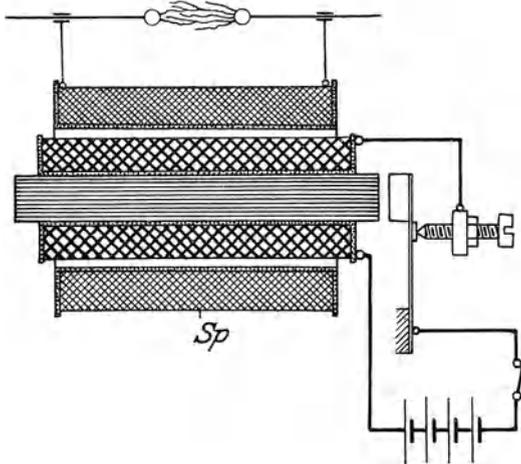


Abb. 64. Induktionsapparat mit Hammerunterbrecher zur Erzeugung hoher Spannungen.

man ihr gegenüber eine Elektromagnetspule I aufstellt, deren Strom ein- und ausgeschaltet werden kann. Beim Schließen des Magnetstromes tritt eine Kraftlinienzunahme in Spule II ein, wodurch der eingezeichnete Strom entsteht. Beim Öffnen des Stromkreises ist der erzeugte Stromstoß umgekehrt gerichtet.

Um in der Spule rasch aufeinander folgende Spannungen zu erzeugen, kann man den Strom des Elektromagneten nach Abb. 64 mittels eines Wagnerschen Hammers, wie wir ihn bei

der elektrischen Klingel kennen gelernt haben, in schneller Folge unterbrechen. Sorgt man noch dafür, daß die Induktionsspule Sp sehr viele Windungen hat, so kann die in ihr erzeugte Spannung so hoch sein, daß sie zwischen den Spulenden die Luft in Form eines leuchtenden Funkens durchbricht. Derartige Induktionsapparate wurden in der drahtlosen Telegraphie häufig benutzt.

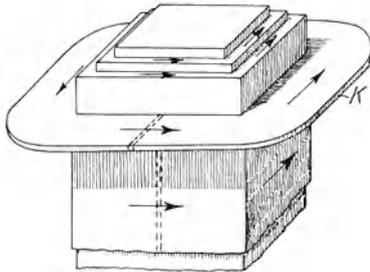


Abb. 65. Jede Kraftlinienänderung ruft auch in dem geschlossenen Spulenkasten einen Strom hervor.

verschwindenden gerichtet sind. Infolgedessen nimmt also der Kraftfluß nur langsam ab. Durch Schlitzung des Kastens K kann man den Strom darin zwar vermeiden, aber dennoch verschwindet der Kraftfluß nicht plötzlich. Denken wir uns nämlich einmal den massiven Eisenkern, wie gezeichnet, in viereckige Röhren zerlegt, so bilden auch diese geschlossene Windungen, in denen beim Verschwinden der inneren Kraft-

Bei großen Elektromagneten aus Eisen verschwindet der Magnetismus beim Ausschalten des Stromes meist nur langsam. Um dies zu verstehen wollen wir Abb. 65 betrachten, in welcher ein Eisenkern von einem metallischen Spulenkasten K umschlossen ist. Wenn beim Ausschalten des Spulenstromes der Magnetismus aus dem Kern verschwindet, tritt in dem Spulenkasten K als geschlossener Leiterschleife eine Spannung und ein Strom auf, der selbst Kraftlinien erzeugt, die wie die

linien ebenfalls Ströme entstehen. Man nennt diese Ströme *Wirbelströme*. Dieselben werden besonders bei Wechselstrommagneten unangenehm, weil sie dort wegen der ständigen Kraftlinienänderung dauernd fließen und eine starke Erwärmung des Eisens verursachen. Der Eisenkörper von Wechselstrommagneten wird deshalb aus einzelnen mit Papier voneinander isolierten Blechen zusammengesetzt.

**Beispiele:** 1. Eine Spule II nach Abb. 63 habe 1000 Windungen. In der Magnetspule I werde ein Strom allmählich so gesteigert, daß der Kraftfluß, welcher auch die Spule II durchsetzt, innerhalb 2 Sekunden ganz gleichmäßig von Null auf 1 Million Kraftlinien anwächst. Wie groß ist die Spannung, die in Spule II entsteht?

Da der Kraftfluß gleichmäßig wachsen soll, wird in jedem Augenblick die gleiche Spannung erzeugt. Dieselbe ist:

$$E = \frac{z \cdot \mathcal{C}}{t \cdot 1000000000} = \frac{1000 \cdot 1000000}{2 \cdot 1000000000} = 5 \text{ V.}$$

2. Eine Spule II nach Abb. 63 habe 150 Windungen. Der Kraftfluß, welcher dieselbe durchsetzt, soll sich aber nicht mehr gleichmäßig ändern, sondern nach der Linie A—B—C der Abb. 66 ( $\mathcal{C}$  in Millionen Kraftlinien). Welche verschiedenen Spannungen entstehen dann in der Spule?

Man sieht, daß der Kraftfluß im Punkt A stark ansteigt, im Punkt B schon weniger stark und bei C überhaupt nicht mehr. Wenn der Kraftfluß so, wie in dem Punkte A weiter ansteigen würde, also nach der als Tangente im Punkte A gezeichneten geraden Linie, dann würde er nach Ablauf von 0,01 Sek. auf den Betrag von 1,57 Millionen Kraftlinien angewachsen sein. Die dadurch erzeugte Spannung ist:

$$E = \frac{z \cdot \mathcal{C}}{t \cdot 1000000000} = \frac{150 \cdot 1570000}{0,01 \cdot 1000000000} = 235 \text{ V.}$$

Dies ist die Spannung, die erzeugt würde, wenn der Kraftfluß so wie im Punkt A gleichmäßig ansteige, es ist also auch der Wert, der im Augenblick A erzeugten Spannung. Im Augenblick B ist die Kraftlinienänderung schwächer. Würde der Kraftfluß dauernd wie in diesem Augenblick ansteigen, so würde derselbe innerhalb 0,01 Sekunden von 0,25 Mill. auf 1,2 Mill. steigen. Die im Augenblick B erzeugte Spannung ist demnach:

$$E = \frac{z \cdot \mathcal{C}}{t \cdot 1000000000} = \frac{150 \cdot 950000}{0,01 \cdot 1000000000} = 142 \text{ V.}$$

Im Augenblick C entsteht überhaupt keine Spannung, weil dann der Kraftfluß überhaupt nicht steigt. Später nimmt der Kraftfluß ab, und die entstehende Spannung ist umgekehrt gerichtet. In Abb. 66 sind unten die verschiedenen Spannungswerte zeichnerisch dargestellt, die entstehen, wenn der Kraftfluß den durch die obere Linie dargestellten Verlauf nimmt.

**Die Anwendungen der elektrischen Induktion.** Als wichtigste Anwendung haben wir bereits die *Dynamomaschinen* kennen gelernt. Da wir für

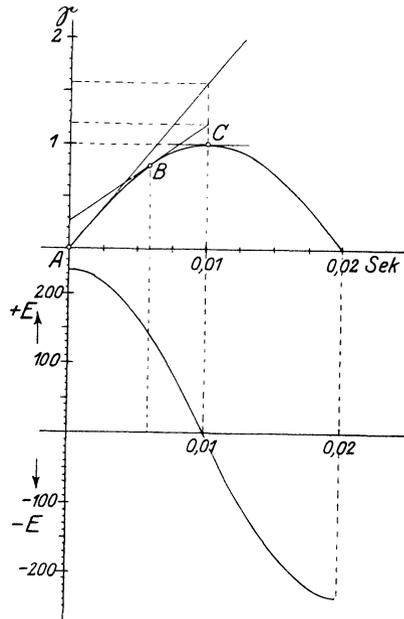


Abb. 66. Der wechselnde Kraftfluß erzeugt eine ständig wechselnde Spannung (Wechselspannung).

sie die gleichen Stücke wie für die Elektromotoren brauchen, stimmt ihr Bau mit dem der Elektromotoren nach Abb. 57 vollkommen überein.

Einen ganz ähnlichen Bau haben die *Zündapparate* der Verbrennungskraftmaschinen. Durch die rasche Umdrehung eines vieldräftigen Ankers im Feld eines Dauermagneten wird eine so hohe Spannung erzeugt, daß an der Zündkerze im Maschinenzylinder ein Funke überspringt und das Brennstoff-Luftgemisch zur Explosion bringt.

Ebenfalls kleine Dynamomaschinen sind die von Hand angetriebenen *Kurbelinduktoren*, die entweder zur Erzeugung des Weckerstromes von Telephonen, oder auch zum Nachprüfen von Leitungsanlagen und Maschinen auf guten Isolationszustand dienen.

## G. Die Selbstinduktion.

Eine Kraftlinienänderung ruft nach dem Früheren in einer Spule immer eine Spannung hervor. Wenn wir nun nach Abb. 67 eine Magnet-spule einschalten, so enthält diese Spule vor dem Einschalten keine Kraftlinien, nachher aber eine große Zahl. Es hat also beim Einschalten eine Kraftlinienzunahme stattgefunden, und es muß deshalb auch in der Spule selbst eine Spannung entstanden sein. Diese in der Spule selbst erzeugte Spannung nennen wir *Selbstinduktionsspannung*. Ihre Größe muß sich natürlich auch nach Gleichung 19 berechnen. Da die erzeugte

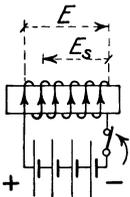


Abb. 67. Beim Einschalten entsteht eine Selbstinduktionsspannung, die dem Strom entgegenwirkt.

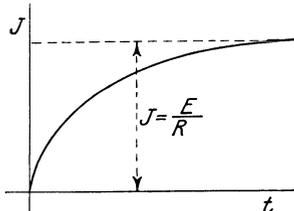


Abb. 68. Wegen der Selbstinduktion steigt der Strom in einer Spule beim Einschalten nicht plötzlich auf seinen Wert  $I = E : R$  an.

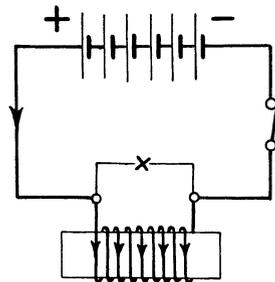


Abb. 69. Die Lampe leuchtet beim Ausschalten kurz hell auf.

Spannung nach dem Lenzschen Gesetz immer die Kraftlinienänderung zu verhindern strebt, muß die Selbstinduktionsspannung  $E_s$  beim Einschalten des Stromes der zugeführten Spannung entgegenwirken. Die Folge davon ist, daß der Strom nicht plötzlich, sondern nach Abb. 68 allmählich auf seinen Wert  $I = E : R$  ansteigt. Die Anstiegszeit beträgt gewöhnlich nur Bruchteile einer Sekunde, sie kann jedoch bei hohen Kraftflüssen und vielen Windungen auch mehrere Sekunden dauern. Beim Ausschalten einer Spule verschwinden die Kraftlinien, und es entsteht dadurch wieder eine Selbstinduktionsspannung, die diesmal gerade so gerichtet ist, wie der verschwindende Strom. Diese Ausschalt-Selbstinduktionsspannung kann durch die große sekundliche Kraftlinienänderung bei plötzlicher Unterbrechung des Stromes so groß werden, daß sie die Isolation der Wicklung gefährdet.

**Beispiel:** Ein Lastmagnet mit 5000 Windungen führe einen Kraftfluß von 20 Mill. Kraftlinien. Der Magnet werde ausgeschaltet und der Unterbrechungsvorgang dauere 0,1 Sekunde. Wie groß ist die dabei entstehende Selbstinduktionsspannung, wenn einmal angenommen wird, daß die Kraftlinien gleichmäßig verschwinden?

Es ist nach Gleichung 19:

$$E_s = \frac{5000 \cdot 20000000}{0,1 \cdot 100000000} = 10000 \text{ V.}$$

Um die Gefahr eines Durchschlags der Magnetwicklung zu vermeiden, sollte man große Magnete niemals plötzlich ausschalten, sondern

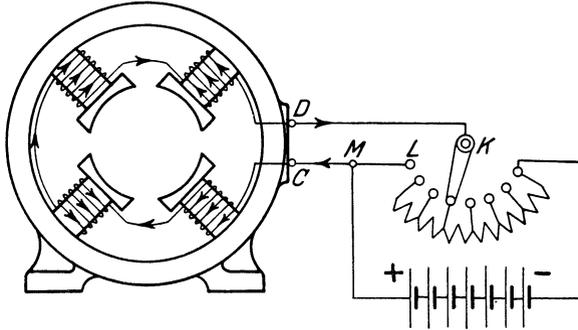


Abb. 70. Maschinengestell mit Magnetregler.

den Lichtbogen, den die Selbstinduktionsspannung zwischen den sich öffnenden Schalterkontakten erzeugt, ruhig langsam ausziehen. Einen guten Schutz gewährt auch eine nach Abb. 69 der Magnetwicklung parallel geschaltete Lampe oder sonst ein Widerstand. Diese Lampe leuchtet beim Ausschalten kurz auf, weil die Selbstinduktionsspannung einen überstarken Strom durch dieselbe treibt. Maschinenwicklungen schließt man beim Ausschalten meist in sich kurz, wie Abb. 70 darstellt. Der Magnetregler hat in seiner Nullstellung einen Kontakt L, durch welchen nach dem Ausschalten die Wicklung kurzgeschlossen ist. Wenn die Kurbel auf L steht, besteht der geschlossene Stromkreis K—L—M—C—D—K. Bei einer im Augenblick des Abschaltens kurzgeschlossenen Spule wird wegen der entstehenden Selbstinduktionsspannung der Strom nicht plötzlich verschwinden, sondern allmählich nach der in Abb. 71 dargestellten Linie abnehmen.

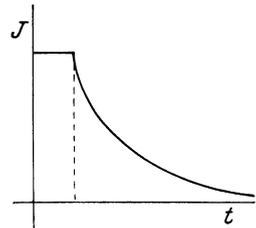


Abb. 71.  
Beim Ausschalten einer Spule nimmt der Strom allmählich ab.

Einen guten Einblick in die Selbstinduktionserscheinung bekommt man auch, wenn man sich vorstellt, daß der magnetisierende Strom beim Einschalten alle die zahllosen Kraftlinien des Magnetfeldes, die wir früher mit Gummifäden verglichen hatten, spannen muß. Es wird hierzu der Stromquelle ein gewisser Energiebetrag entnommen, der in den gespannten Kraftlinien des Feldes so lange aufgespeichert bleibt, wie der Strom fließt. Wird dieser ausgeschaltet, so entspannen sich die Kraftlinien und ihre Energie muß entweichen.

### H. Der elektrische Kondensator.

Elektrische Energie läßt sich nicht nur in dem magnetischen Feld einer Spule, sondern auch in einem sog. *Kondensator* aufspeichern. Ein solcher besteht nur aus zwei Metallplatten, die sich in geringer Entfernung voneinander gegenüberstehen, wie Abb. 72 zeigt. Außer den magnetischen Kraftlinien gibt es nämlich auch elektrische Kraftlinien, die sich immer zwischen zwei Leitern, zwischen denen eine Spannung herrscht, spannen. Die elektrischen Kraftlinien beeinflussen einen Magneten gar nicht, aber sonst üben sie genau dieselben Zug- und Druckkräfte wie die magnetischen Kraftlinien aus. Wenn wir nun in Abb. 72

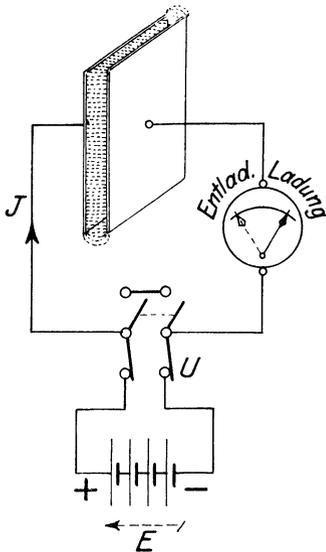


Abb. 72. Elektrischer Kondensator.

den Umschalter U nach unten legen, so sind die beiden Metallplatten des Kondensators mit der Stromquelle verbunden, und es herrscht also deren Spannung zwischen denselben. Diese Spannung erzeugt nun zwischen den Platten ein elektrisches Feld, welches um so stärker ist, je näher sich die Platten stehen und je größer sie sind, ferner ist das Feld um so stärker, je besser die Isolierschicht zwischen den Platten die elektrischen Kraftlinien leitet. Glas, Glimmer und Öl leiten z. B. 5—8 mal so gut als Luft. Da das elektrische Feld im Augenblick des Anlegens der Stromquelle gebildet wird und ebenso wie ein magnetisches Feld zum Spannen der Kraftlinien Energie benötigt, muß in diesem Augenblick ein kurzer Stromstoß auf die Platten fließen, den das eingeschaltete Galvanometer anzeigt. Legt man dann den Umschalter U nach oben, so sind die beiden Platten miteinander verbunden, und das

Galvanometer zeigt einen kurzen Entladestromstoß an. Die Ladung Q, welche ein Kondensator aufnimmt, drückt man in Amperesekunden aus. Also:

$$Q = I \cdot t \dots\dots\dots 20$$

Ein Versuch lehrt ferner, daß die Ladung Q auch um so größer ist, je größer die angelegte Spannung E ist, also:

$$Q = C \cdot E \dots\dots\dots 21$$

C ist ein Faktor, der um so größer ist, je größer die Platten sind, je kleiner ihr Abstand und je größer die Leitfähigkeit des Isolierstoffs ist. Man nennt ihn die *Kapazität* des Kondensators. Die Einheit der Kapazität ist ein Farad (1 F). Ein Kondensator hat eine Kapazität von einem Farad, wenn er bei Anlegung einer Spannung von 1 Volt eine Ladung von 1 Amperesekunde

aufnimmt. Diese Einheit ist sehr groß und man rechnet deshalb meist mit dem millionsten Teil davon, einem Mikrofarad ( $1 \mu F$ ).

Man führt Kondensatoren meist in der Weise aus, daß man dünne Glimmerplatten oder paraffiniertes Papier beiderseits mit Stanniol beklebt und diese Blätter zu Paketen aufeinander schichtet.

**Beispiel:** Ein Kondensator von  $50 \mu F$  werde an eine Spannung von  $500 V$  angelegt. Welche Ladung und welche Energie nimmt er auf? Die Ladung ist:  $Q = C \cdot E = 0,000050 \cdot 500 = 0,025$  Amp.-Sek. Um die Ladeenergie zu bestimmen, denken wir uns, daß die Spannung während der Ladezeit  $t$  ganz gleichförmig von  $0$  bis  $500 V$  gesteigert werde. Dann fließt während dieser Zeit ein ganz konstanter Ladestrom  $I$  auf den Kondensator. Da die mittlere Spannung während der Ladung  $E : 2$  ist, berechnet sich die Ladeenergie zu:

$$A = \frac{E}{2} \cdot I \cdot t.$$

Aus Gleichung 20 und 21 ergibt sich aber, daß  $I \cdot t = C \cdot E$  ist. Setzt man dies in vorstehende Beziehung ein, so ergibt sich:

$$A = \frac{C \cdot E^2}{2} \dots \dots \dots 22$$

$$A = 0,000050 \cdot 500^2 : 2 = 3,75 \text{ Watt-Sek.}$$

Der berechnete Kondensator ist schon ein sehr großer. Es lassen sich demnach nur geringe Energiemengen auf diese Weise aufspeichern.

### I. Die Thermoelektrizität.

Wir gewinnen die elektrische Energie in unseren Dynamomaschinen dadurch, daß wir die Wärmeenergie der Kesselfeuerung mittels des Dampfes den Turbinen zuleiten und in diesen in mechanische Energie umwandeln. Diese wird dann den Stromerzeugern zugeführt. Es fragt sich nun, ob man nicht diesen Umweg vermeiden und direkt elektrische Energie aus Wärme erzeugen kann.

Abb. 73 stellt zwei Drähte  $K$  und  $E$  verschiedenen Materials dar, die miteinander verlötet sind. Erwärmt man die Lötstelle, so zeigt das angelegte Galvanometer einen Ausschlag. Hier wird also Wärme direkt in Elektrizität verwandelt. Leider kann man kaum an eine praktische Verwendung denken, weil selbst bei Erwärmung um  $100^0$  die erzeugte Spannung nur wenige Millivolt beträgt. Man könnte zwar eine große Zahl solcher Thermoelemente hintereinander schalten, um auf die üblichen Spannungen zu kommen, aber dann wäre der innere Widerstand dieser Batterie so groß, daß man keinen nennenswerten Strom entnehmen könnte.

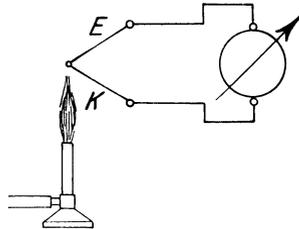


Abb. 73. Bei Erwärmung der Lötstelle entsteht eine elektrische Spannung.

Die erzeugte Thermospannung ist der Temperaturerhöhung der Lötstelle genau proportional. Man benutzt deshalb solche Thermolemente zur Messung von Temperaturen, besonders sehr hoher und sehr tiefer. Das anzeigende Galvanometer kann dabei an beliebiger Stelle angebracht werden, auch kann es die wechselnden Temperaturen aufschreiben.

## K. Die elektrischen Meßinstrumente.

**1. Die Strommesser.** Wir wissen bereits von früher, daß Strommesser immer so zu schalten sind, daß sie von dem Strom, der gemessen werden soll, durchflossen werden. Es ergibt sich hieraus ganz von selbst eine wichtige Bedingung, die jeder Strommesser erfüllen muß, nämlich, daß der Widerstand desselben so gering wie möglich ist. Wäre der Widerstand hoch, so würde einerseits in dem Strommesser eine starke Wärmeentwicklung auftreten, was doch einen Energieverlust bedeuten würde, und andererseits würden durch das Einschalten eines Strommessers mit hohem Widerstand ja die ganzen Stromverhältnisse geändert. Je nach der Bauart unterscheidet man:

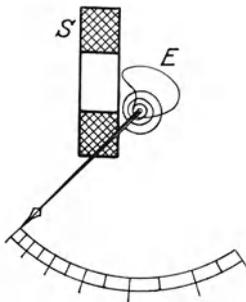


Abb. 74.  
Elektromagnetisches  
Instrument.

a) Weicheisen- oder elektromagnetische Instrumente. Dieselben beruhen auf der schon früher erwähnten magnetischen Wirkung des elektrischen Stromes, und zwar wird entweder ein Blechstückchen weichen Eisens E je nach der Größe des eine Spule S durchfließenden Stromes mehr oder weniger angezogen (Abb. 74), oder es ist mit dem Zeiger ein Eisenblechstreifen verbunden, dem ein fester Blechstreifen gegenübersteht. Fließt der zu messende Strom durch die Spule, so werden je nach dessen Größe die beiden Blechstreifen mehr oder weniger stark magnetisiert. Beide haben also am einen Spulende ihren Nordpol, am anderen Ende ihren Südpol. Die einander gegenüberstehenden gleichnamigen Pole der beiden Bleche stoßen sich dann ab und drehen den Zeiger. In jedem Falle ist eine feine Spiralfeder angebracht,

welche als Gegenkraft der magnetischen Kraft dient und den Zeiger immer wieder in die Nullage zurückführt. Abb. 75 zeigt ein Weicheisen-Schalttafelinstrument, welches genau wie dasjenige der Abb. 74 wirkt. Die elektromagnetischen Instrumente haben den Vorteil, daß sie auch zur Messung von Wechselströmen benutzt werden können, weil weiches Eisen von einer stromdurchflossenen Spule bei jeder Stromrichtung angezogen wird. Hingegen haben sie den Nachteil, daß sie geringe Genauigkeit

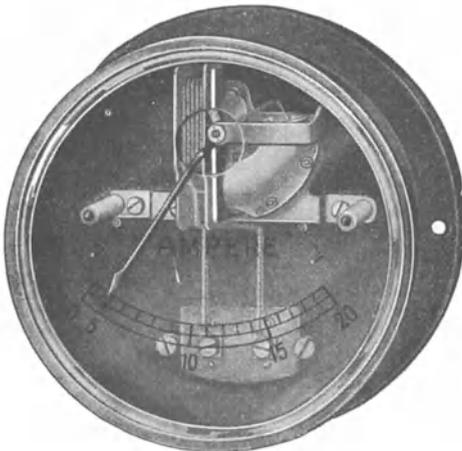


Abb. 75. Elektromagnetisches Schalttafelinstrument.

besitzen, weil noch so weiches Eisen doch immer Spuren remanenten Magnetismus bewahrt, welche Meßfehler hervorrufen. Ein weiterer Nachteil ist die ungleichmäßige Teilung der Skala. Zur Herstellung derselben muß das Instrument geeicht werden, d. h. es müssen seine Angaben mit denjenigen eines ihm hintereinander geschalteten, richtig zeigenden Normalinstrumentes verglichen werden.

b) Drehspul-Instrumente. Die Wirkungsweise dieser Instrumente haben wir bereits auf S. 39 beschrieben und durch Abb. 58 dargestellt. Die an der Drehspule drehende Kraft ist um so größer, je größer das Feld des Dauermagneten und je größer der Strom ist, welcher die Drehspule durchfließt. Sorgt man dafür, daß jenes Feld überall gleich stark ist, so muß der Ausschlag des Zeigers dem Strome proportional sein. Die Skaleneinteilung wird sich also ganz gleichmäßig ergeben. Der wichtigste Vorteil der Drehspulinstrumente ist jedoch ihre große Genauigkeit, wodurch sie als die besten aller Instrumente bekannt sind. Ein Nachteil der Drehspulinstrumente ist hingegen, daß sie nur für Gleichstrom verwendbar sind. Eine Umkehr der Stromrichtung würde auch eine Umkehr des Ausschlages bedingen.

c) Die elektrodynamometrischen Instrumente. Dieselben haben auch eine Drehspule. Während sich aber bei den vorigen

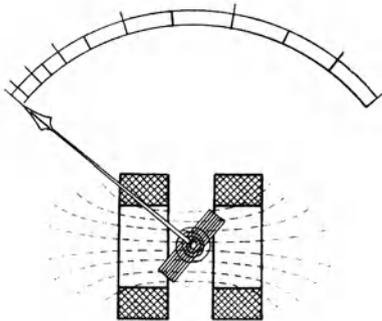


Abb. 76. Elektrodynamometrisches Instrument.



Abb. 77. Elektrodynamometrisches Schalttafelinstrument.

Drehspulinstrumenten die Drehspule im Felde eines Dauermagneten dreht, wird hier das Feld durch eine zweite, feststehende Spule erzeugt (Abb. 76). Der Ausschlag  $a$  eines dynamometrischen Instrumentes wird also um so größer sein, je größer der Strom in der festen Spule und je größer derselbe in der Drehspule ist. Seien diese Ströme mit  $I_1$  und  $I_2$  benannt, so ist also:

$$a = c \cdot I_1 \cdot I_2,$$

worin  $c$  ein konstanter Proportionalitätsfaktor ist. Die Ströme in den beiden Spulen werden gleich, wenn wir sie hintereinander schalten. Dann ist:

$$a = c \cdot I^2.$$

Der Ausschlag ist dem Quadrat des Stromes proportional, woraus hervorgeht, daß die Skala ungleichmäßig geteilt sein muß. Ein weiterer

Nachteil ist noch, daß äußere in der Nähe befindliche Magnete die Angaben des Instrumentes leicht beeinflussen. Wechselt der Strom seine Richtung, so wird der Ausschlag nicht umgekehrt, weil doch in beiden Spulen die Stromrichtung sich ändert. Abb. 77 zeigt ein elektrodynamisches Instrument. Die Drehspule ist nicht sichtbar, weil sie sich im Hohlraum der festen Spule befindet. In Abb. 83 ist dieselbe jedoch zu sehen.

d) **Hitzdrahtinstrumente.** In diesen Instrumenten ist ein dünner Draht gespannt, durch welchen der zu messende Strom geschickt wird. Dieser Hitzdraht *H* (Abb. 78) erhitzt und dehnt sich um so mehr, je größer der durchfließende Strom ist. Die Dehnung wird mittels Drähten

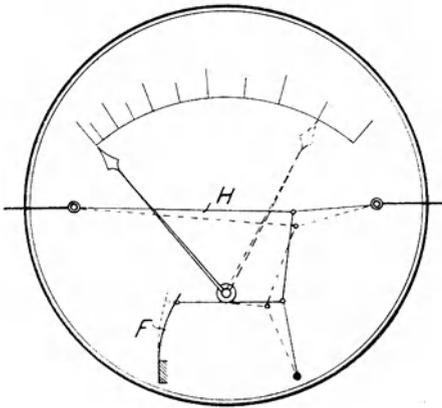


Abb. 78. Hitzdrahtinstrument.



Abb. 79. Hitzdrahtinstrument mit abgenommenem Gehäuse.

und einer kleinen Rolle auf einen Zeiger übertragen, während eine Feder *F* das ganze System gespannt hält. Da nach dem Früheren die Erwärmung eines Leiters dem Quadrate des Stromes proportional ist, muß auch der Ausschlag im gleichen Verhältnis stehen, also

$$a = c \cdot I^2.$$

Die Skala der Hitzdrahtinstrumente ist also auch ungleich geteilt, dafür haben sie aber den Vorteil, daß sie für Gleich- und Wechselstrom verwendbar sind. Durch Abb. 79 ist ein Hitzdrahtinstrument mit abgenommenem Gehäuse und ohne Skala dargestellt.

Die gebräuchlichsten Instrumentenarten sind die elektromagnetischen und Drehspulinstrumente, weil sie die billigsten sind. Besonders die erstere Art wird immer benutzt, wenn es nicht auf genaue Werte ankommt. Hitzdrahtinstrumente, besonders aber elektrodynamische Instrumente, sind wesentlich teurer.

**Die Erweiterung des Meßbereichs von Strommessern.** Durch die Spule eines elektromagnetischen Instrumentes kann man schon einen kräftigen Strom hindurchschicken, ebenso läßt sich auch die feste Spule eines elektrodynamischen Instrumentes mit so dicken Drähten wickeln, daß große Ströme hindurchfließen können. Hingegen ist es unmöglich, die feine, leicht bewegliche Drehspule oder den dünnen

Hitzdraht eines Hitzdrahtinstrumentes mit mehr als Bruchteilen eines Ampere zu belasten.

Was machen wir nun, wenn größere Ströme mit diesen Instrumenten gemessen werden sollen?

Wir lassen nach Abb. 80 einfach nur einen kleinen Teil  $i_2$  des zu messenden Stromes  $I$  durch das Instrument gehen, während wir den größeren Teil  $i_1$  durch einen *Nebenschluß*  $N$  am Strommesser vorbeileiten. Damit man trotzdem richtig mißt, muß aber der Widerstand des Instrumentes  $R_2$  zu dem Widerstand  $R_1$  des Nebenschlusses in einem ganz bestimmten konstanten Verhältnis stehen.

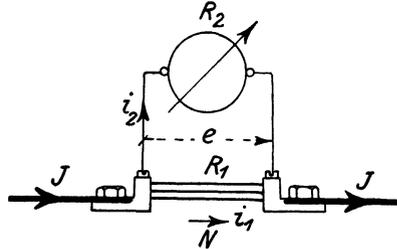


Abb. 80. Strommesser mit Nebenschluß.

Nehmen wir einmal an, daß der Strommesser 0,01 A bei vollem Ausschlag anzeige und einen Widerstand  $R_2 = 100 \Omega$  habe. Welchen Widerstand muß dann der Nebenschluß haben, wenn der zu messende Strom  $I = 50$  A ist? Wenn 0,01 A durch den Instrumentwiderstand fließen sollen, brauchen wir dazu eine Spannung  $e$  an den Klemmen desselben:

$$e = i_2 \cdot R_2 = 0,01 \cdot 100 = 1 \text{ V.}$$

Diese Spannung liegt auch am Nebenschluß, durch den  $50 - 0,01 = 49,99$  A fließen sollen. Dessen Widerstand muß demnach den Wert

$$R_1 = e : i_1 = 1 : 49,99 = 0,020004 \Omega \text{ haben.}$$

Mit diesem Nebenschluß gestattet also das Instrument die Messung von Strömen bis 50 Ampere. Will man noch höhere Ströme damit messen, so ist ein anderer Nebenschluß von geringerem Widerstand zu benutzen. Durch Beigabe einer Reihe von Nebenschlüssen kann somit ein Instrument mit beliebigem Meßbereich versehen werden. Bei Schalttafelinstrumenten ist der Nebenschluß zuweilen im Instrumentengehäuse eingebaut, manchmal wird er auch getrennt davon hinter der Schalttafel angebracht. In letzterem Falle hat man wohl zu beachten, daß die Leitungsschnüre, welche zur Verbindung des Instrumentes mit dem Nebenschluß mitgeliefert wurden, nicht etwa gekürzt werden dürfen, weil sie bei der Eichung doch mit eingeschaltet waren und einen Teil des Widerstandes  $R_2$  bilden.

Wie man erkennt, muß der Strom bei Verwendung eines Nebenschlusses immer erst berechnet werden. In obigem Beispiel, wo das Instrument 0,01 Ampere anzeigt, wenn der zu messende Strom 50 A beträgt, müßten also die Instrumentablesungen stets mit 5000 multipliziert werden. Man kann sich nun, wenn nur ein Nebenschluß vorhanden ist, die Sache dadurch erleichtern, daß man die Instrumentenskala nicht mit den Stromwerten des wirklich durch das Instrument gehenden Stromes beschreibt, sondern gleich mit dem Gesamtstrom.

**2. Die Spannungsmesser.** Wenn wir die Spannung  $E$  der Batterie in Abb. 81 messen sollen, können wir einen Strommesser verwenden und ihm einen bekannten Widerstand  $R$  vorschalten. Angenommen der Strommesser zeige bei vollem Ausschlag 0,3 A und sein Widerstand sei  $r = 1 \Omega$ .

Der vorgeschaltete Widerstand sei  $R = 999 \Omega$ . Dann würde bei einer Batteriespannung von  $E = 300 \text{ V}$  der durchfließende Strom  $I$  gleich sein:

$$I = E : (r + R) = 300 : 1000 = 0,3 \text{ A,}$$

d. h. der Strommesser wird voll ausgeschlagen und 0,3 A zeigen. Würde man eine Batterie mit 200 V anlegen, so würde der Strommesser den dann fließenden Strom von 0,2 A anzeigen.

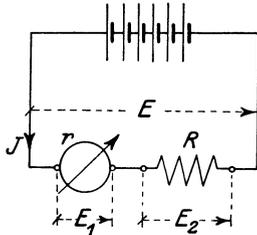


Abb. 81.

Schreibt man nun einfach statt der Zahl 0,3 die Zahl 300 auf die Skala des Strommessers, statt 0,2 aber 200 usw., so hat man jetzt einen Spannungsmesser. Da der Widerstand  $R$  ohnehin doch immer mitbenutzt werden muß, baut man ihn am besten gleich in das Instrumentengehäuse ein. *Ein Spannungsmesser ist demnach nichts weiter, als ein Strommesser mit hohem Widerstand.* Derselbe muß hoch

sein, damit der Verlust, den der Spannungsmesser verursacht, möglichst klein ist, denn es leuchtet doch ein, daß der Strom, welcher durch den Spannungsmesser fließt, ein verlorener Strom ist, den man nicht größer wünscht, als er zur Drehung des Zeigers gerade sein muß.

**Die Erweiterung des Meßbereichs.** Wenn wir in Abb. 81 noch einen weiteren Widerstand von  $1000 \Omega$  vorschalten und das Ganze an 300 V anlegen, so fließt ein Strom von 0,15 A und unser Zeiger zeigt der früheren Umänderung entsprechend 150 Volt. Wir müssen also die Ablesung mit 2 multiplizieren, um auf die richtige Spannung von 300 V zu kommen, weil wir den Gesamtwiderstand des Stromkreises verdoppelt haben. Durch Vorschaltung eines Widerstandes läßt sich demnach der Meßbereich eines Spannungsmessers erhöhen und es müssen die Ablesungen mit einer Konstanten multipliziert werden, die sich ergibt, wenn man den Widerstand des Spannungsmesserstromkreises einschließlich Vorschaltwiderstand durch den Widerstand desselben ohne Vorschaltwiderstand dividiert, also mit:

$$\frac{R + r}{r}$$

Trotzdem der Widerstand der Strommesser sehr klein ist, muß man doch bei sehr genauen Messungen den Spannungsverlust, den ein Strommesser hervorruft, berücksichtigen. Ebenso muß in solchen Fällen der sehr kleine Strom eines Spannungsmessers in Rechnung gestellt werden.

**3. Die Leistungsmesser (Wattmeter).** Der von irgend einem Verbrauchsapparat, z. B. einem Motor aufgenommene Effekt ist:

$$\mathcal{G} = E \cdot I.$$

Man kann denselben durch eine Strom- und Spannungsmessung bestimmen. Einfacher ist es jedoch, wenn man ein einziges Instrument verwenden kann, ein Wattmeter. Man verwendet dazu meist elektrodynamische Instrumente, die so zu schalten sind, daß die feste Spule wie ein Strommesser vom Hauptstrom durchflossen wird, während die bewegliche Drehspule wie ein Spannungsmesser an die dem Ver-

brauchsapparat zugeführte Spannung gelegt wird. Schaltung 82 läßt den Anschluß erkennen, und zwar ist A die feste Spule (Stromspule) und B ist die an der Spannung liegende Drehspule (Spannungsspule). Nach S. 51 ist der Ausschlag eines dynamometrischen Instrumentes:

$$a = c \cdot I \cdot i,$$

wenn I und i die Ströme in den beiden Spulen sind. Nun ist aber in Abb. 82

$$i = \frac{E}{r},$$

da r der Widerstand der Drehspule ist. Setzt man diesen Wert für i oben ein, so folgt:

$$a = \frac{c \cdot I \cdot E}{r}.$$

Da der Widerstand r eine konstante Zahl ist,

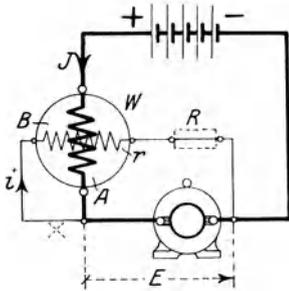


Abb. 82.  
Schaltung eines Wattmeters.

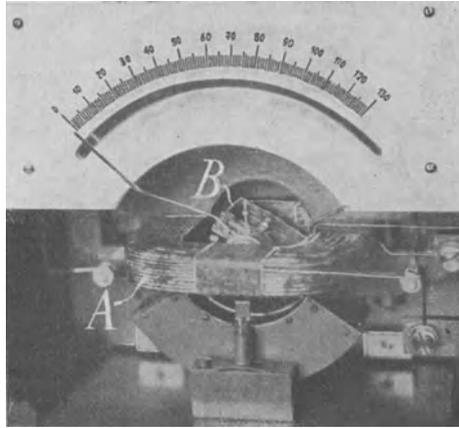


Abb. 83.  
Das Innere eines Wattmeters.

kann man ihn mit c zu einer neuen Konstante C zusammenfassen und schreiben:

$$a = C \cdot I \cdot E,$$

d. h. der Ausschlag unseres Wattmeters ist dem Wattverbrauch proportional. Abb. 83 zeigt das Innere eines Wattmeters. Die Buchstaben stimmen mit denen der Abb. 82 überein.

**Die Erweiterung des Meßbereichs.** Um ein Wattmeter für höhere Spannungen verwenden zu können, geht man genau wie bei einem Spannungsmesser vor, indem man der Spannungsspule einen Widerstand R (in Abb. 82 punktiert) vorschaltet.

Auch hier ist dann die Wattmeterablesung mit dem Widerstandsverhältnis

$$\frac{R + r}{r}$$

zu multiplizieren.

An welcher Stelle der Vorschaltwiderstand R im Stromkreis der Spannungsspule liegt, ist für die Messung einerlei. Es ist jedoch besser, ihn bei höheren Span-

nungen nicht an die angekreuzte Stelle zu legen, weil die Stromspule dann direkt am Pluspol, die Spannungsspule hingegen direkt an dem Minuspol läge, so daß zwischen diesen beiden Spulen die volle Spannung herrschen würde. Die Isolation läßt sich nämlich für höhere Spannungen nicht genügend stark machen.

Zur Erreichung einer hohen Empfindlichkeit ist bei allen Meßinstrumenten hoher Wert auf die Lagerung der Drehachsen zu legen. Dieselben werden allgemein in harten Steinen gelagert. Damit die Lagerstellen durch Stöße nicht leiden, ist das bewegliche System so leicht wie nur irgend möglich zu machen. Um Pendelungen zu vermeiden und zu erreichen, daß sich der Zeiger bei Einschalten sogleich auf seinen richtigen Wert einstellt, braucht jedes Instrument eine Dämpfung. Dieselbe kann eine Luftdämpfung oder eine elektromagnetische sein. In Abb. 77 sowie 83 ist der Zeiger rückwärts verlängert und trägt einen Windflügel, welcher sich in einem geschlossenen Kasten bewegt. Durch die Bewegung der Luft wird die Zeigerbewegung gedämpft. In Abb. 79 ist mit dem Zeiger ein Aluminiumblech verbunden, welches sich durch das Feld eines kleinen Magneten bewegt. Die bei der Bewegung geschnittenen Kraftlinien erzeugen Spannungen und Ströme im Blech, welche nach dem Lenzschen Gesetz die Bewegung hemmen. Bei dem Drehspulinstrument besteht auch eine elektromagnetische Dämpfung dadurch, daß die Drehspule auf ein Aluminiumrähmchen gewickelt ist. Bei der Bewegung schneidet dieses die Kraftlinien, wodurch in ihm als geschlossener Windung hemmende Ströme entstehen.

**4. Die Energiemesser (Elektrizitätszähler).** Nach S. 15 verstehen wir unter elektrischer Arbeit oder Energie:

$$A = E \cdot I \cdot t,$$

also Watt mal Zeit. Ein Instrument, welches diese Energie anzeigt, könnte also durch die Verbindung eines Wattmeters mit einer Uhr gewonnen werden. Derartige Zähler nennt man Wattstundenzähler. Ist die Spannung  $E$  konstant, wie dies in Lichtnetzen ja immer der Fall ist, so genügt es, wenn man nur die Amperestunden mißt, die dann noch mit der bekannten, konstanten Spannung zu multiplizieren sind um Wattstunden zu bekommen. Man unterscheidet also:

a) Amperestundenzähler. Ein höchst einfacher Zähler dieser Art ist der *elektrolytische Zähler*. Er beruht darauf, daß der zu messende Strom aus einer Quecksilbersalzlösung Quecksilber ausscheidet und ist nur für Gleichstrom zu gebrauchen.

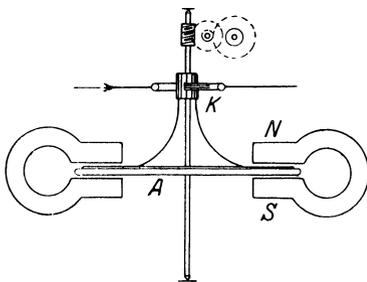


Abb. 84. Motor-Amperestundenzähler.

Sehr verbreitet sind die *Motorzähler*, welche in ihrer Wirkungsweise genau mit dem früher beschriebenen Elektromotor übereinstimmen. Abb. 84 stellt einen Motor-Amperestundenzähler schematisch dar. Auf einer Aluminiumscheibe  $A$  ist eine scheibenförmige Ankerwicklung aufgebracht, welche im magnetischen Feld von Dauermagneten liegt. Auf der Achse

sitzt ferner ein Kommutator  $K$ , welcher ebenso wie bei dem Elektromotor den Leiterstrom so umkehren muß, daß die Drehkraft immer nach der gleichen Seite wirkt. Die Zahl der Umdrehungen wird durch ein Zählwerk registriert. Ebenso wie bei den Strom- und Spannungsmessern muß auch hier eine Gegenkraft vorhanden sein,

welche mit zunehmender Geschwindigkeit wächst und bezweckt, daß ein größerer Strom im Scheibenanker auch eine größere Umlaufzahl bewirkt. Diese Gegenkraft entsteht durch die Bewegung der Aluminiumscheibe im magnetischen Feld, wobei Kraftlinien geschnitten werden und Wirbelströme, die der Bewegung entgegenwirken, entstehen. Die von dem Anker ausgeübte Drehkraft ist natürlich um so größer, je größer der Ankerstrom ist.

Für Wechselstrom ist der beschriebene Motorzähler nicht verwendbar.

b) Wattstundenzähler. Auch bei dieser Zählergattung ist der *Motorzähler* der gebräuchlichste. Abb. 85 stellt ein schematisches Bild desselben dar. Im Gegensatz zum Amperestundenzähler wird hier das magnetische Feld, in dem sich der Anker A dreht, nicht durch Dauermagnete, sondern durch die Spulen M erzeugt, welche vom Hauptstrom durchflossen sind. Der Anker liegt unter Vorschaltung der kleinen Spule F und des Widerstandes R an der Spannung. Die Drehkraft ist demnach genau wie bei einem Wattmeter um so größer, je größer die durchgehenden Watt sind. Die unvermeidlichen Reibungswiderstände würden bewirken, daß in den Spulen bereits ein kleiner Strom fließen könnte, ohne daß der Zähler sich dreht.

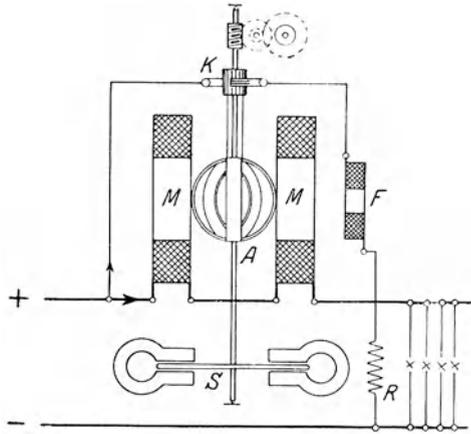


Abb. 85. Motor-Wattstundenzähler.

Um dies zu vermeiden ist die Spule F vorhanden, welche ein konstantes, schwaches Feld erzeugt, so daß bei geringster Stromentnahme im Netz der Zähler sofort läuft. Als Gegenkraft dient die hemmende Kraft der in der Scheibe S erzeugten Wirbelströme. Der Kommutator der Motorzähler gibt leider oft zu Meßfehlern Veranlassung, und man war deshalb bestrebt, ohne ihn auszukommen. Dies ist bei den *oszillierenden Zählern* erreicht, die im Bau mit den Motorzählern übereinstimmen, nur macht der Anker lediglich einen Teil einer Umdrehung, kehrt dann seine Bewegungsrichtung um usw. Am Ende jeder Ankerschwingung polt sich der Strom um.

Von einem brauchbaren Zähler muß man neben großer Genauigkeit auch verlangen, daß er schon bei ganz kleinen Stromwerten von  $\frac{1}{2}\%$  bis  $1\%$  des Normalen anzeigt. Er muß ferner auch bei schwacher Belastung noch angenähert richtig gehen, außerdem Überlastungen ohne Schaden vertragen und gegen Temperaturwechsel unempfindlich sein.

### III. Die Gleichstrommaschinen.

Wir nennen einen Strom, welcher stets die gleiche Richtung hat, *Gleichstrom* im Gegensatz zu dem *Wechselstrom*, dessen Richtung in steter Folge wechselt. Drehstrom ist mehrfacher Wechselstrom.

#### A. Die Spannungserzeugung.

Durch Abb. 86 a ist ein einfacher Stromerzeuger dargestellt, dessen Anker A eine Spule mit den Spulenseiten I und II trägt. Die Enden der

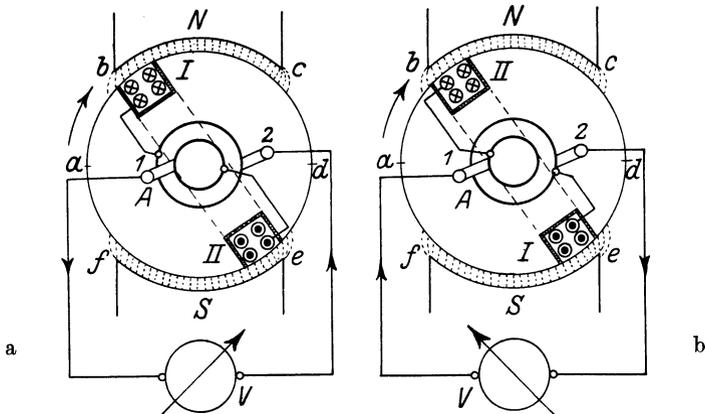


Abb. 86. Die Maschine liefert Wechselstrom.

Spule sind mit zwei Schleifringen verbunden, von denen die Bürsten 1 und 2 den Strom abnehmen. Die Leiter schneiden bei ihrer Drehung nur Kraftlinien, solange sie sich unter den Polen befinden, in der *neutralen*

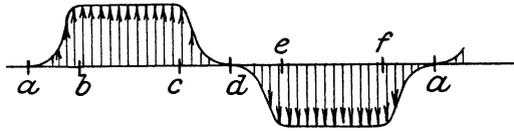


Abb. 87. Spannungslinie der Maschine (Abb. 86).

Zone a—d wird keine Spannung erzeugt. Abb. 86 b zeigt den Anker nach einer halben Umdrehung, und man sieht, daß die Spannung im äußeren Stromkreis jetzt umgekehrt ist. Wir wollen uns nun den Ankerumfang abgewickelt denken und tragen in jeder Stellung die dort erzeugte Spannung auf, wie Abb. 87 zeigt. Wir erkennen, daß diese Maschine eine Wechselstrommaschine ist, und daß es der Umkehrung der negativen Spannung d—e—f—a bedarf, um eine Gleichstrommaschine zu bekommen. Man erreicht dies in einfacher Weise dadurch, daß man statt der Schleifringe zwei voneinander isolierte Halbringsegmente nimmt,

wie Abb. 88 darstellt, so daß nun die Spulenden nicht dauernd an denselben Bürsten liegen, sondern abwechselnd an die eine und dann an die andere gelegt werden. Jetzt herrscht im äußeren Stromkreis

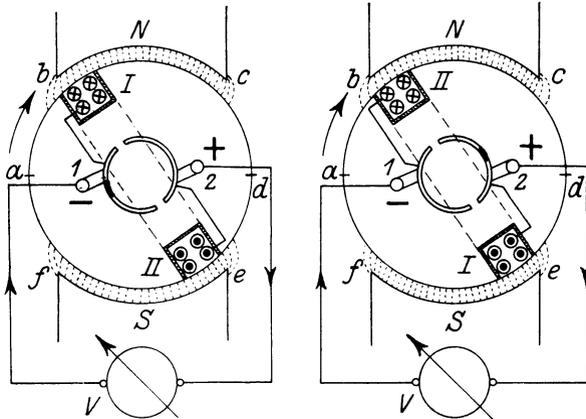


Abb. 88. Die Maschine liefert Gleichstrom.

immer die gleiche Stromrichtung und es ergibt sich die Spannungslinie Abb. 89.

Den bisher betrachteten Anker nennt man *Trommelanker*. Bei ihm

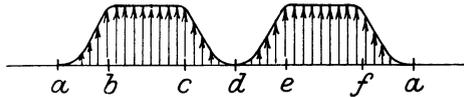


Abb. 89. Spannungslinie der Maschine (Abb. 88).

wird die Wicklung wie Abb. 90 veranschaulicht, um den äußeren Umfang gewickelt. Bei dem seltener vorkommenden *Ringanker*, den Abb. 91 darstellt, wird die Wicklung durch den Hohlraum des Ringes gewickelt.

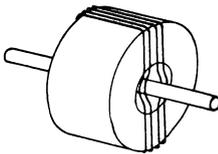


Abb. 90. Trommelanker.

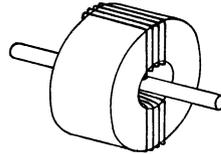


Abb. 91. Ringanker.

Die Spannung der oben betrachteten Maschine ist zwar eine Gleichspannung, aber sie schwankt zwischen Null und dem Höchstwert. Da dies unerwünscht ist, versehen wir den Anker mit mehreren Spulen. Abb. 92 stellt beispielsweise einen Ringanker mit 6 Ankerspulen dar. Die Vorrichtung, welche den Strom in der neutralen Zone umwendet, die wir *Kommutator* oder *Kollektor* nennen, muß jetzt natürlich aus sechs voneinander

isolierten Segmenten bestehen. Man erkennt, daß das Ende jeder Spule mit dem Anfang der nächsten verbunden ist, so daß die Wicklung ein geschlossener Kreis ist. Wir dürfen aber ja nicht glauben, daß die Spannungen  $E_1$  bis  $E_6$  der sechs Spulen sich addieren. Abb. 92 zeigt

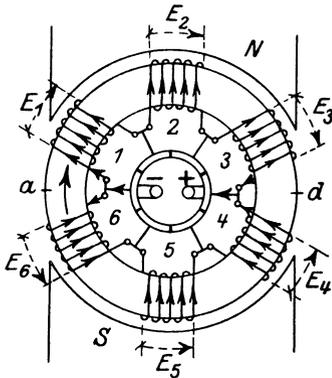


Abb. 92. Sechsspuliger Ringanker.

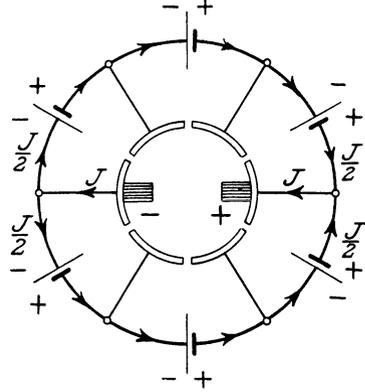


Abb. 93. Elemente in gleicher Schaltung, wie die Spulen in Abb. 92.

deutlich, daß der an der Plusbürste herauskommende Strom sich aus dem Strom der oberen und der unteren Ankerhälfte zusammensetzt, daß also diese beiden Ankerhälften parallel zueinander geschaltet sind. Die 6 Ankerspulen sind also wie die Elemente der Abb. 93 geschaltet. Die Bürstenspannung der Maschine ist demnach  $E = E_1 + E_2 + E_3$  oder auch  $E = E_4 + E_5 + E_6$ .

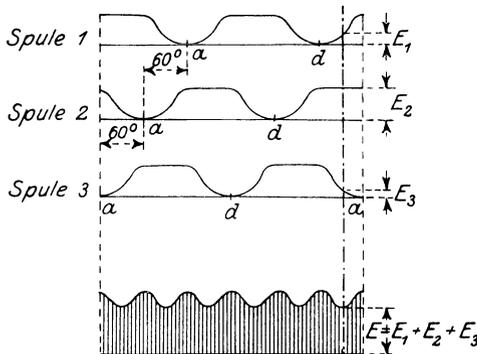


Abb. 94. Die Summe der drei Einzelspannungen ergibt die Maschinenspannung.

Zur richtigen Durchführung dieser Addition muß man aber bedenken, daß die Spulen zu verschiedenen Zeiten ihren Spannungsnullwert und Höchstwert erreichen. Abb. 94 stellt deshalb die Spannungen  $E_1$ ,  $E_2$  und  $E_3$  um  $60^\circ$  verschoben gegeneinander dar, weil die Spulen auch um so viel verschoben sind. Addiert man nun die übereinanderliegenden Werte, so erhält man die Maschinenspannung  $E$ , die nur noch wenig schwankt.

Die Zahl der Ankerspulen ist nun so groß zu wählen, daß die Spannungsschwankungen nicht mehr an den angeschlossenen Lampen bemerkbar sind. Ferner darf erfahrungsgemäß die Spannung zwischen zwei Kollektorsegmenten nicht mehr als etwa 15 V betragen. Der 6spulige Anker der Abb. 92 dürfte also höchstens zur Erzeugung von  $3 \cdot 15 = 45$  V benutzt werden.

**Die Größe der erzeugten Spannung.** Nach dem allgemeinen Induktionsgesetz muß die Spannung einer Maschine um so größer sein, je stärker ihr magnetisches Feld und je größer ihre Geschwindigkeit, also die Umlaufzahl ist. Man kann also vereinfacht schreiben:

$$E = c \cdot \mathcal{E} \cdot n \dots \dots \dots 23$$

worin  $\mathcal{E}$  der Kraftfluß und  $n$  die Drehzahl ist.  $c$  stellt eine von der Windungszahl und Leiterlänge abhängende konstante Zahl dar.

Wir konnten früher die Richtung der erzeugten Spannung entweder durch eine Umkehr der Bewegungsrichtung, oder durch Umkehr der Feldrichtung ändern. Bei unserer Maschine müßten wir demnach entweder im entgegengesetzten Sinne antreiben oder einfacher den Erregerstrom des Magnetfeldes umpolen.

**Die Klemmenspannung der Gleichstrommaschine.** Auf S. 21 haben wir gesehen, daß bei einem Element an den Klemmen eine Spannung  $e$  herrscht, welche kleiner ist als die erzeugte Spannung  $E$ , wenn dem Element ein Strom entnommen wird. Bei unserer Maschine ist dies genau ebenso. Auch sie hat im Inneren, also in den Ankerspulen einen inneren Widerstand  $r$ . Um den Strom  $I$  durch diesen Maschinenwiderstand zu treiben, braucht man eine Spannung  $I \cdot r$ , um welchen Betrag die Klemmenspannung  $e$  kleiner als die erzeugte Spannung  $E$  sein muß. Also:

$$e = E - I \cdot r \dots \dots \dots 24$$

Im Leerlauf, wenn der Maschine kein Strom entnommen wird, ist  $I = 0$ , es tritt also kein Spannungsverlust  $I \cdot r$  auf, so daß an den Klemmen der Maschine die ganze erzeugte Spannung vorhanden ist. Ganz ebenso wie bei dem Element würde die Maschine ihren größten Strom hergeben, wenn dieselbe kurzgeschlossen würde. Ein solcher Kurzschluß ist aber bei Maschinen mit höherer Spannung eine gefährliche Sache, weil durch den großen Kurzschlußstrom die Maschine gefährdet ist. Die Klemmenspannung ist bei Kurzschluß natürlich gleich Null.

**Der prozentuale Spannungsabfall  $I \cdot r$  im Anker** ist bei größeren Maschinen kleiner als bei kleinen, er beträgt bei normaler Belastung etwa:

|               |                |      |              |
|---------------|----------------|------|--------------|
| bei 1 bis     | 5 kW-Maschinen | 8–5% | der Spannung |
| „ 5 „         | 20 kW          | 5–3% | „ „          |
| „ 20 „        | 100 kW         | 3–2% | „ „          |
| „ über 100 kW | „              | 2–1% | „ „          |

**Beispiel:** Eine Gleichstrommaschine von 50 kW Leistung und 500 V hat einen Spannungsverlust von 3% im Anker. Wie groß ist ihr Ankerwiderstand  $r$ ?

3% von 500 V ist gleich 15 V Spannungsverlust.

Der normale Strom ist:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{E} = \frac{50000}{500} = 100 \text{ A.}$$

$$I \cdot r = 15$$

$$r = \frac{15}{100} = 0,15 \Omega.$$

Wie aus vorstehendem Beispiel hervorgeht, ist der Ankerwiderstand meist sehr klein. Es ist dies auch notwendig, weil einmal in einem großen

Ankerwiderstand ein erheblich größerer Teil der erzeugten Spannung vernichtet würde, und weil andererseits im Ankerwiderstand, wie in jedem Widerstand doch nutzlos Wärme entwickelt wird. Diesen Wattverlust nennen wir, weil er im Kupfer der Maschine auftritt, *Kupferverlust*.

In obigem Beispiel würde dieser Verlust sich ergeben zu:

$$I^2 \cdot r = 100^2 \cdot 0,15 = 1500 \text{ W.}$$

Im Leerlauf ist der Kupferverlust Null, weil kein Strom im Anker fließt.

## B. Die Erregung der Gleichstromerzeuger.

Bei ganz kleinen Stromerzeugern, wie z. B. den Kurbel-Induktoren kann das magnetische Feld durch Dauermagnete gebildet werden, nicht hingegen bei Maschinen, denen man eine nennenswerte Leistung

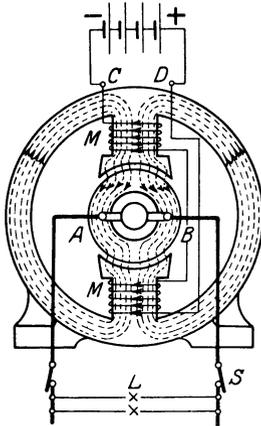


Abb. 95. Fremderregte zweipolige Gleichstrommaschine.

entnehmen will, weil die Feldstärke von Dauermagneten nur sehr gering ist. Maschinen haben also immer ein durch eine Magnetwicklung (Erregerwicklung) erzeugtes magnetisches Feld. Nach unseren früheren Erfahrungen wird diese Erregerwicklung dann möglichst klein und billig werden, wenn wir dem Kraftfluß, den die Wicklung erzeugen soll, überall einen möglichst geringen Widerstand bieten, wenn wir also vor allem längere Wege durch Luft vermeiden. Aus diesem Grunde erhalten alle Maschinen einen magnetischen Kreis aus Eisen, der nur durch den unumgänglich notwendigen Luftspalt zwischen Anker und Pol unterbrochen ist. Abb. 95 stellt den Kraftfluß deutlich dar. M sind die Erregerwicklungen, die ihn erzeugen. Die im Anker A—B erzeugte Spannung wird Lampen L zugeführt, und es wird also der Maschine ein um so größerer Strom entnommen, je mehr Lampen im Netz

(in den Wohnungen) eingeschaltet werden. Angenommen eine Maschine von 50 kW Normalleistung erzeuge eine konstante Spannung von 230 Volt, die den Lampen zugeführt werden, so dürften, da nach dem Früheren eine mittlere Lampe von 50 NK etwa 50 Watt verbraucht,  $50000 : 50 = 1000$  Lampen eingeschaltet werden. Würden die Bewohner mehr Licht verbrauchen, so wäre die Maschine überlastet, sie würde dies einige Zeit anstandslos vertragen, dann aber würde sie so warm, daß die Isolation (Baumwolle usw.) gefährdet wäre. Wir sehen also hier schon, daß die Leistungsfähigkeit einer Maschine durch die Erwärmung begrenzt ist.

Es entsteht nun die weitere wichtige Frage: Wer liefert den Erregerstrom für die Magnetwicklungen? Die einfachste Lösung wäre diejenige nach Abb. 95, bei welcher eine fremde Stromquelle zur Stromlieferung herangezogen würde. Wir nennen eine solche Maschine eine *fremderregte Maschine*.

Da man mit Rücksicht auf den guten Wirkungsgrad einer Maschine nur einen geringen Wattverbrauch in der Erregerwicklung zuläßt, braucht eine zur Speisung der Magnetwicklung dienende Batterie nicht groß zu sein. Der Verbrauch in der Erregerwicklung beträgt z. B.

|           |                |      |                       |
|-----------|----------------|------|-----------------------|
| bei 1 bis | 5 kW-Maschinen | 5—3% | der Maschinenleistung |
| „ 5 „     | 20 kW          | 3—2% | „ „                   |
| „ 20 „    | 100 kW         | 2—1% | „ „                   |
| „ über    | 100 kW         | —1%  | „ „                   |

Wir müssen nun aber weiter fragen, ob denn nicht die Maschine selbst diesen geringen Strombedarf decken kann. Dies kann die Maschine zweifellos, und Werner v. Siemens hat uns zuerst gezeigt, wie dies möglich ist. Betrachten wir hierzu die Abb. 96, bei welcher die Enden der Erregerwicklung C—D je an die Bürsten A—B des Ankers angeschlossen sind. Die in Drehung versetzte Maschine zeigt zunächst nur eine winzige Spannung von 2—5% desjenigen Wertes, den sie normal erzeugt, weil in dem Eisen des Magnetgestells von früheren Magnetisierungen ein geringer Dauermagnetismus verblieben ist. Diese kleine Spannung liegt aber auch an der Magnetwicklung C—D, so daß ein sehr kleiner Strom  $I_n$  durch dieselbe fließt und im Eisen eine Verstärkung des Dauermagnetismus bewirkt. Jetzt schneiden die Ankerleiter also schon mehr Kraftlinien, wodurch eine etwas größere Bürstenspannung entsteht, die nun einen größeren Erregerstrom  $I_n$  durch die Wicklung treibt. Es folgt hieraus eine abermalige Verstärkung des Magnetismus, welche wieder eine neue Erhöhung der Spannung zur Folge hat usw. Wir erkennen, daß die Maschine sich in dieser Schaltung selbst erregt, und wir nennen sie deshalb eine *selbsterregende Maschine*.

Selbstverständlich steigert sich aber die Spannung nicht unbegrenzt weiter, sondern nur bis zur Erreichung der Eisensättigung. Es könnte aber auch sehr wohl sein, daß sich die Maschine nicht selbst erregt. Wäre z. B. das Wicklungsende C mit der Bürste B und das Ende D mit Bürste A verbunden, so würde der erste winzige Strom  $I_n$  die Erregerwicklung in entgegengesetzter Richtung durchfließen und nicht eine Verstärkung, sondern eine Schwächung des Dauermagnetismus bewirken. Die Maschine kommt also dann nicht auf Spannung. Man kann diese verkehrte Schaltung nicht äußerlich an der Maschine erkennen, und es bleibt deshalb nichts weiter übrig, als einfach zu probieren, ob sich die Maschine erregt und wenn sie es nicht tut, die Magnetwicklung C—D umzupolen.

Würde sich auch dann noch keine Selbsterregung einstellen, so sind, vorausgesetzt, daß alle Bürsten und Klemmen guten Kontakt haben, noch folgende Ursachen denkbar: Entweder besitzt die Maschine gar keinen Dauermagnetismus, und es ist durch vorübergehendes Anlegen einiger Elemente an C—D etwas Magnetismus zu schaffen, oder die Maschine kann kurzgeschlossen sein, d. h. der Plus-

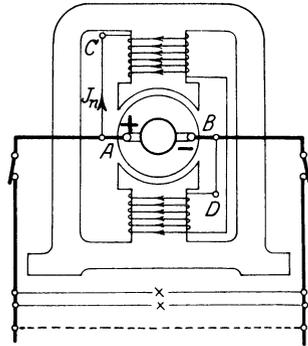


Abb. 96. Zwei-polige Gleichstrommaschine mit Selbst-erregung.

leiter ist mit dem Minusleiter, wie punktiert angedeutet, verbunden, was auch schon dann angenähert der Fall ist, wenn im Netz sehr viele Lampen eingeschaltet sind. Dann stehen dem aus der Bürste A herauskommenden kleinen Strom nämlich zwei Wege offen um zur negativen Bürste B zu gelangen. Der eine Weg ist der punktiert angedeutete von sehr kleinem Widerstand, während der andere Weg durch die Erregerwicklung einen beträchtlichen Widerstand bietet. Es leuchtet ein, daß unter diesen Umständen der Strom fast restlos durch den Kurzschluß geht und keine Selbsterregung erfolgt. Man beseitige also den Kurzschluß.

Je nach der Schaltungsart der Erregerwicklung unterscheidet man drei Arten selbsterregender Gleichstrommaschinen, nämlich:

1. *Hauptschlußmaschinen,*
2. *Nebenschlußmaschinen,*
3. *Doppelschlußmaschinen.*

**1. Die Hauptschlußmaschine.** Durch den Namen dieser drei Maschinenarten soll ausgedrückt werden, wie die Erregerwicklung zum Anker geschaltet ist. Bei der in Abb. 97 dargestellten Hauptschlußmaschine fließt der Hauptstrom in voller Stärke durch die Magnetwicklung E—F.

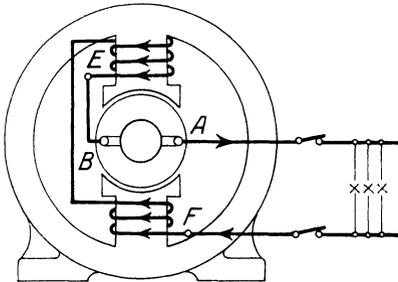


Abb. 97. Zweipolige Hauptschlußmaschine.

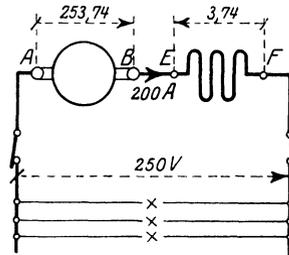


Abb. 98. Schema der Hauptschlußmaschine.

Es ergibt sich hieraus, daß der Widerstand dieser Wicklung notwendig sehr klein sein muß, damit keine unnötigen Verluste entstehen. Die Wicklung ist deshalb aus Leitern herzustellen, die um so dicker sind, je größer der Maschinenstrom ist. Es genügen bei so großem Strom in der Wicklung natürlich schon wenige Windungen für die Erzeugung des Kraftflusses. Wir erkennen aber ferner jetzt schon, daß die Maschine stark erregt ist und eine hohe Spannung liefert, wenn im Netz viel Strom verbraucht wird, daß ferner bei geringer Entnahme nur wenig Spannung erzeugt wird, während im Leerlauf die Hauptschlußmaschine nicht erregt ist. Dieselbe kann sich also im Gegensatz zur früheren Maschine nur dann erregen, wenn die Bürsten durch geringen Widerstand miteinander verbunden oder ganz kurzgeschlossen sind. Wir wollen in Zukunft die Maschinen immer schematisch darstellen, wie es Abb. 98 zeigt. In einem solchen Schema kommt es uns nur darauf an, darzustellen, wie die Wicklungen und Leitungen miteinander verbunden sind, die Lage derselben zueinander braucht mit der Wirklichkeit nicht übereinzustimmen.

**Beispiel:** Eine 50 kW-Hauptschlußmaschine soll einen Verlust von 1,5% der Leistung in der Erregerwicklung aufweisen. Wie groß darf der Widerstand dieser Wicklung sein, wenn die Klemmenspannung der Maschine 250 V beträgt?

1,5% von 50000 Watt ist 750 W. Der Hauptstrom der Maschine ist:

$$I = \frac{50000}{250} = 200 \text{ A.}$$

Der Wattverlust in der Erregerwicklung beträgt:

$$I^2 \cdot r = 750$$

$$r = \frac{750}{I^2} = \frac{750}{200^2} = 0,0187 \ \Omega.$$

Würde man, wie dies mit Rücksicht auf die Erwärmung üblich ist, eine Stromdichte von etwa 1,5 A/mm<sup>2</sup> zulassen, so brauchte man einen Leiterquerschnitt von:

$$q = \frac{I}{1,5} = \frac{200}{1,5} = 133 \text{ mm}^2.$$

Dieser Querschnitt entspräche einem Drahtdurchmesser von 13 mm. Vorteilhafter ist es indessen Vierkantkupfer zur Wicklung zu verwenden.

Von der erzeugten Spannung wird ein kleiner Teil verbraucht, um den Hauptstrom durch die Erregerwicklung zu treiben, dieser Spannungsverlust beträgt:

$$I \cdot r = 200 \cdot 0,0187 = 3,74 \text{ V (s. Abb. 98).}$$

**2. Die Nebenschlußmaschine.** Deren Bau und Schaltung ist bereits durch Abb. 96 angegeben. Die Magnetwicklung, auch Nebenschlußwicklung genannt, liegt mit ihren Enden C—D direkt an den Bürsten A—B, also an der vollen Maschinenspannung. Es leuchtet ein, daß der Widerstand der Erregerwicklung ein hoher sein muß, wenn nur ein kleiner Bruchteil des Maschinenstromes durch die Magnetwicklung fließen soll. Bei dem kleinen Erregerstrom brauchen wir natürlich viele Windungen, um genügend AW zur Kraftflußerzeugung zu haben. Abb. 99 stellt das Schaltungsschema der Nebenschlußmaschine dar; die Bezeichnungen stimmen mit denjenigen der Abb. 96 überein. Die angenommenen Buchstaben wollen wir in Zukunft immer anwenden, wir bezeichnen also:

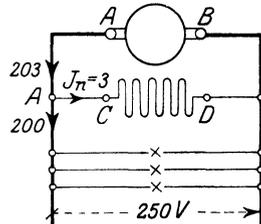


Abb. 99. Schema der Nebenschlußmaschine.

- Anker mit . . . . . A—B
- Nebenschlußwicklung mit . . . C—D
- Hauptschlußwicklung mit . . . E—F.

**Beispiel:** Die Angaben des vorigen Beispiels sollen sich nun auf eine Nebenschlußmaschine beziehen. Wie groß ist dann der Widerstand der Erregerwicklung? Es ist

$$I_n \cdot E = 750 \text{ Watt.}$$

$$I_n = \frac{750}{250} = 3 \text{ A,}$$

demnach der erforderliche Widerstand der Wicklung:

$$R = \frac{250}{3} = 83,3 \ \Omega.$$

Bei dem kleinen Erregerstrom von 3 A genügt unter Annahme einer Stromdichte von 1,5 A/mm<sup>2</sup> ein Querschnitt des Drahtes von 2 mm<sup>2</sup>, also von 1,6 mm Durchmesser (nackt gemessen).

**3. Die Doppelschlußmaschine.** Diese Maschine ist die Vereinigung einer Nebenschluß- und einer Hauptschlußmaschine. Sie besitzt also zwei Wicklungen, nämlich eine Nebenschluß- und eine Hauptschlußwicklung. Beide Wicklungen unterstützen sich im allgemeinen und sind zusammen

so stark, daß sie den vorgeschriebenen Kraftfluß erzeugen. Bei den meisten Maschinen hat die Nebenschlußwicklung den größten Anteil an der Erregung, während die Hauptschlußwicklung nur aus wenigen Windungen besteht. Abb. 100 zeigt eine Doppelschlußmaschine. Die Bezeichnungen stimmen wieder mit den oben vorgeschriebenen überein, ebenso mit denjenigen

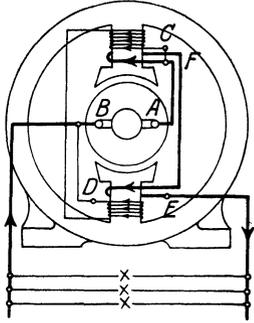


Abb. 100. Doppelschlußmaschine.

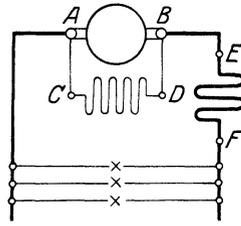


Abb. 101. Schema der Doppelschlußmaschine.

des Schaltungsschemas in Abb. 101. Will man die Richtung der erzeugten Spannung bei einer Doppelschlußmaschine umkehren, muß man bedenken, daß beide Wicklungen, die Hauptschluß- und die Nebenschlußwicklung umzupolen sind.

### C. Der Aufbau der Gleichstromerzeuger.

Wir unterscheiden bei jeder Gleichstrommaschine bekanntlich drei Hauptteile, nämlich: *Magnetgestell*, *Anker* und *Kommutator*, und wir wollen diese Teile einzeln betrachten.

**1. Das Magnetgestell.** Eine Maschine für bestimmte Spannung und Leistung verlangt einen bestimmten Kraftfluß. Diesen wollen wir im

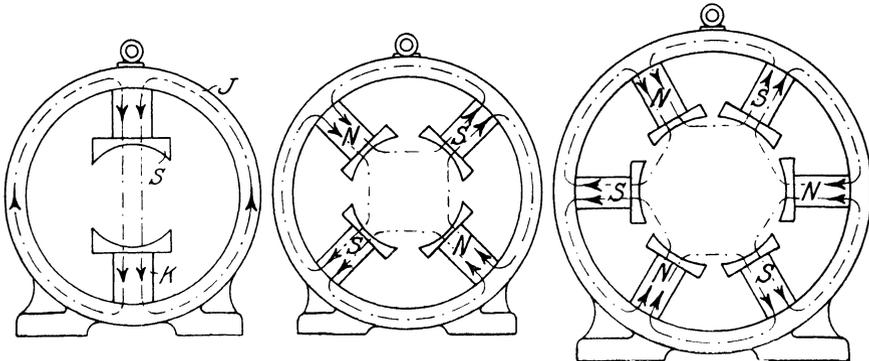


Abb. 102. Zweipoliges, vierpoliges und sechspoliges Magnetgestell.

Magnetgestell unter Aufwand möglichst wenig Materials, also möglichst billig erzeugen. Das Magnetgestell setzt sich (s. Abb. 102) aus den Pol-

kernen K, den Polschuhen S, dem Joch J und den Erregerwicklungen, welche die Kerne K umschlingen, zusammen. Die zur Erzeugung des notwendigen Kraftflusses nötigen AW kann man nach S. 32 berechnen. Die Größe der Wicklung ist damit bestimmt, wenn der Querschnitt des Polkernes festliegt. Damit die Wicklung möglichst klein wird, muß man bestrebt sein, den Kernquerschnitt möglichst klein zu machen, was durch Verwendung magnetisch hochwertigen Eisens möglich ist. Beim Joch, welches den gleichen Kraftfluß führt (auf jeder Seite die Hälfte) ist diese Rücksicht nicht geboten. Hier können wir das magnetisch schlechtere Gußeisen verwenden, welches schon bei 10000 Kraftlinien durch ein  $\text{cm}^2$  gesättigt ist, weil es im allgemeinen nichts ausmacht, wenn der Jochquerschnitt etwas größer ausfällt. Nur Maschinen, welche hohe mechanische Beanspruchungen auszuhalten haben oder sehr leicht sein sollen, erhalten ein Joch aus Stahlguß oder Schmiedeeisen. Die Polschuhe S sind nichts weiter als eine Verbreiterung des Kernquerschnitts. Da an ihnen die Kraftlinien durch die magnetisch so schlecht leitende Luft treten müssen, ist dem Kraftfluß ein großer Übertrittsquerschnitt zu bieten. Dies tun die Polschuhe.

Maschinen für größere Leistungen und niedrige Umlaufzahl kann man billiger und leichter ausführen, wenn man das Magnetgestell nicht zweipolig, sondern mehrpolig ausführt. Abb. 102 zeigt auch ein vierpoliges und ein sechspoliges Magnetgestell.

Die einzelnen Magnetspulen werden im allgemeinen hintereinander geschaltet. Man hat dann eine größere Sicherheit, daß auch wirklich alle Spulen vom Erregerstrom durchflossen sind und nicht eine derselben, etwa durch Drahtbruch, stromlos ist. Bei hintereinander geschalteten Spulen wäre indessen der seltenere Fall denkbar, daß eine Spule kurz geschlossen, daß also Anfang und Ende miteinander verbunden wäre. Starke Unterschiede in der Magnetisierung lassen sich schon durch das Gefühl bei Annäherung eines Eisenstabes an die Polschuhe der ruhenden Maschine feststellen; auch kann man aus der geringeren Erwärmung einer Spule schließen, daß dieselbe stromlos ist, oder daß einzelne Windungen gegeneinander Schluß haben. Wir wollen an Abb. 92 betrachten, welche Folgen eine ungleiche Magnetisierung hätte. Angenommen, die den oberen Pol umschließende Erregerspule sei stromlos, während die untere allein magnetisiert. Dann wird der untere Pol notwendig einen stärkeren Kraftfluß führen als der obere, so daß auf der unteren Ankerhälfte eine höhere Spannung erzeugt wird als auf der oberen. Es tritt dann eine ungleichmäßige Belastung des Ankers ein, welche zu unzulässiger Erwärmung des Ankers Veranlassung gibt. Ungleiche Magnetisierung wird auch dann eintreten, wenn eine der Spulen in verkehrtem Sinne vom Strom durchflossen ist, so daß nicht, wie es sein muß, immer ungleichnamige Pole aufeinander folgen. Um die Polarität der Pole zu prüfen, bleibt nur die Möglichkeit, jedem Pol vorsichtig eine leicht drehbare Magnetnadel zu nähern. Es muß dann jeder folgende Pol das andere Nadelende anziehen.

Damit die Feldspulen auf einer Wickelbank hergestellt und nachträglich auf die Polkerne aufgeschoben werden können, dürfen Kerne, Joch und Polschuhe nicht aus einem Stück sein. Zur Vermeidung von Wirbelströmen ist eine Unterteilung des Polschuheisens angebracht, und man führt dann den Kern, bei welchem dies zwar nicht nötig wäre, auch so aus. Man hat dann die Gewähr, daß dieser wichtige Eisenteil auch überall den richtigen Querschnitt hat, was bei gegossenen Kernen infolge vom Gußblasen zuweilen nicht der Fall ist. Wegen der einfacheren Herstellung macht man die Bearbeitungsflächen meist zu Zylinderflächen.

Zur Aufstellung und Befestigung des Magnetgestells erhält dasselbe noch Füße. Die Lagerung der Welle erfolgt bei kleineren und mittleren Maschinen in Lagerschilden, welche unter Benutzung von Zentrierfugen an das Magnetgestell angepaßt sind. Größere Maschinen erhalten freistehende Lagerböcke auf einer gemeinsamen Grundplatte. Die Lager sind entweder Ringschmierlager oder bei kleineren Maschinen zur Verminderung der Reibungsverluste zuweilen auch Kugellager.

**2. Der Anker.** Man unterscheidet *Ringanker* und *Trommelanker*. Die letzteren nach Abb. 90 sind heute allgemein üblich. Wir wissen, daß nur derjenige Teil der Ankerwicklung Kraftlinien schneidet, welcher auf dem äußeren Ankerumfang liegt. Alles andere ist totes Kupfer. Ringanker haben nun, wie man leicht sieht, mehr totes Kupfer als Trommelanker. Sie lassen sich ferner nicht so leicht wickeln wie Trommelanker, auch müssen die Ankerdurchmesser bei kleinen Maschinen oft größer ausgeführt werden, damit in dem Ringhohlraum die Wicklung Platz hat.

Der Trommelanker wird fast ausnahmslos als Nutenanker ausgeführt, bei welchem die Ankerdrähte in Nuten eingebettet sind. Man tut dies, um die Erregerwicklung kleiner und billiger zu bekommen, weil der genutete Anker einen viel kleineren Luftabstand zwischen Pol und Anker gestattet.

Die **Wicklungen**, von denen wir nur die Trommelwicklungen betrachten wollen, sind alle geschlossene Wicklungen, d. h. sie bilden ebenso wie die Ringwicklung nach Abb. 92 einen in sich geschlossenen Stromkreis.

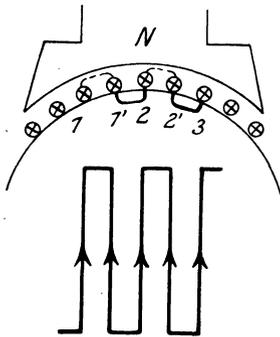


Abb. 103. Falsche Wicklung.

Um bei einer Wicklung das tote Kupfer der Stirnverbindung der Leiter zu sparen, könnte man versucht sein, die Hintereinanderschaltung nach Abb. 103 vorzunehmen. Dies wäre aber falsch, weil sich die Spannungen benachbarter Leiter entgegenwirken. Die Schaltung wird nur dann richtig, wenn der Rückdraht 1' zu einem Hindraht 1 unter einem entgegengesetzten Pol gesucht wird, und zwar möglichst an gleichliegender Stelle. Eine Wicklung hat also zwei Bedingungen zu erfüllen: Sie muß geschlossen sein und Hin- und Rückdrähte einer Ankerspule müssen unter verschiedenen Polen liegen.

Man erkennt hieraus, daß die Weite einer Ankerspule etwa gleich einer Polteilung sein muß.

a) Die Schleifenwicklung (Schraubenwicklung). Eine solche Wicklung mit 17 Ankerspulen stellt Abb. 104 dar. Nachdem man sich 17 Hindrähte und 17 Herdrähte abwechselnd auf dem Umfang verteilt hat, beginnt man mit dem Hindraht 1. Der zugehörige Herdraht 1' wird unter dem folgenden Südpol möglichst gleichliegend gewählt. Zwischen 1 und 1' wird nun die Windungszahl der ersten Ankerspule fertiggewickelt. Nachdem man dann zu einem Kommutatorsegment gegangen ist, sucht man den zweiten Hindraht 2 neben dem Hindraht 1. Zwischen 1 und 1' befinden sich 7 Lücken, dieser Wicklungsschritt muß stets eingehalten

werden, ebenso der Schritt zum Anfang der nächsten Spule. Nach unseren früheren Überlegungen müssen die Bürsten so gestellt werden, daß sie mit den Leitern der neutralen Zone zwischen den Polen in Verbindung stehen. Dies wären in Abb. 104 die Leiter 16, 3, 4' und 8'. Am einfachsten findet man die Bürstenstellung, wenn man nach Abb. 105 die Leiter der Reihe nach nebeneinander zeichnet und ihre Spannungsrichtung einträgt. Beim Durchlaufen findet man, daß die Pfeile an vier Stellen ihre Richtung wechseln. Dort müssen die Bürsten stehen. Bei der Schleifenwicklung stimmt also die Bürstenzahl mit der Polzahl überein, und es ist bei der Ausführung darauf zu achten, daß die Bürsten genau um den Winkel der Polteilung gegeneinander verschoben sind. Einen guten Überblick gewährt auch die Abb. 106, bei welcher die 17 Spulen durch Elemente

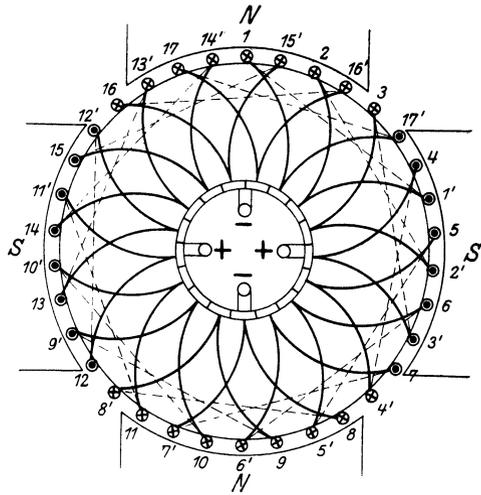


Abb. 104. Vierpolige Schleifenwicklung mit 17 Spulen.

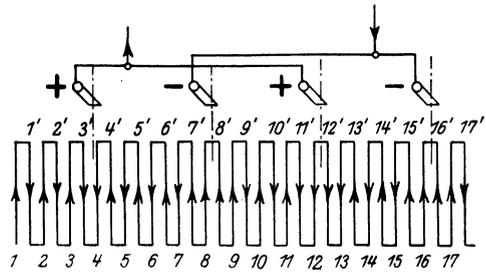


Abb. 105. Ausgestreckte Wicklung nach Abb. 104.

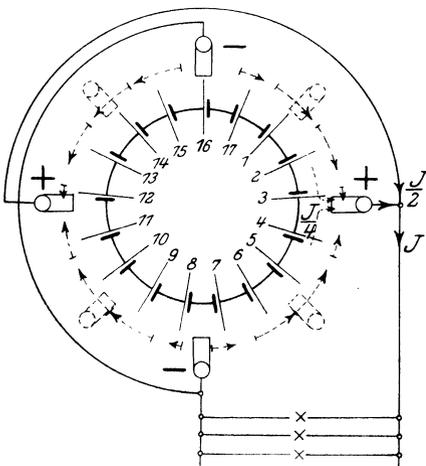


Abb. 106. Die Spulen der Wicklung (Abb. 104) sind durch Elemente ersetzt gedacht.

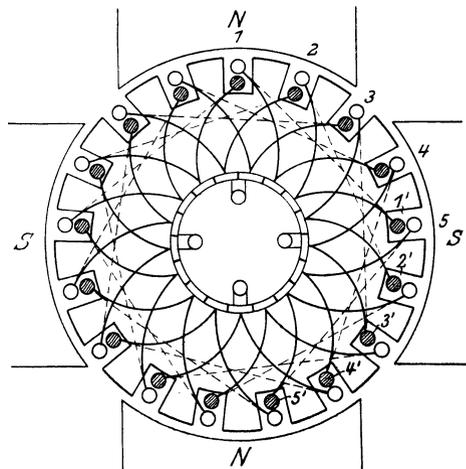


Abb. 107. 17spulige Schleifenwicklung in Nuten.

ersetzt gedacht sind. Man sieht deutlich, daß die vier Viertel der Ankerwicklung einander parallel geschaltet sind, denn man kann auf vier verschiedenen Wegen von + nach - kommen. Würde man die Bürsten in die um  $45^\circ$  verschobene, punktiert gezeichnete Lage bringen, so würden sich die Spannungen zwischen den Bürsten aufheben. Die Maschine lieferte dann überhaupt keine Spannung. Um die richtige Bürstenlage an einer ausgeführten Maschine festzustellen, kann man demnach auch so verfahren, daß man die Bürsten so lange verstellt, bis ein angeschlossener Spannungsmesser die höchste Spannung zeigt. Der Kommutator kann gegen die Wicklung beliebig verdreht sein, so daß die Bürsten zu den Polen beliebig stehen können.

Um die Wicklung in Nuten unterzubringen, legt man eine Hin-Spulenseite mit der benachbarten Her-Spulenseite in eine Nute, wie Abb. 107 zeigt.

b) Die Wellenwicklung. Abb. 108 zeigt eine vierpolige Wellenwicklung mit 15 Ankerspulen. Wir beginnen wieder bei 1 und wickeln

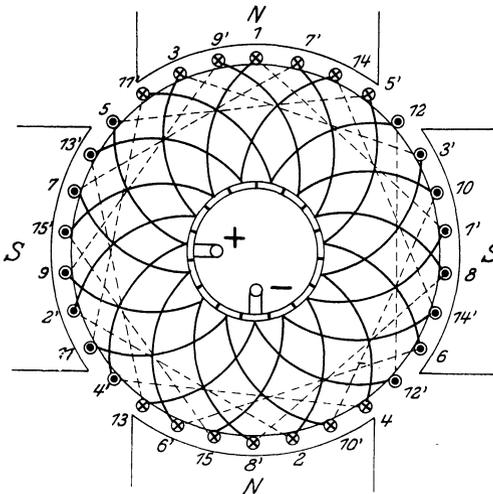


Abb. 108. Vierpolige Wellenwicklung mit 15 Spulen.

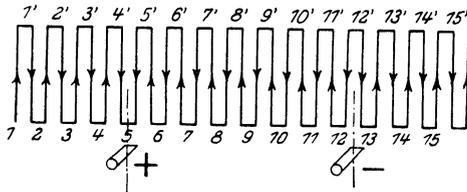


Abb. 109. Ausgestreckte Wellenwicklung nach Abb. 108.

zwischen 1 und 1' die erste Spule. Den Hindraht 2 zur zweiten Spule suchen wir aber nicht unter dem ersten Pol wie bei der Schleifenwicklung, sondern unter dem folgenden Nordpol usw. Abb. 109 läßt wieder erkennen, wo Bürsten anzuordnen sind. Man sieht, daß trotz der vier Pole nur zwei Bürsten notwendig sind. Dieser scheinbare Vorteil spielt allerdings bei größeren Maschinen keine Rolle, weil die Bürstenzahl vor allem von der Größe der abzuleitenden Stromstärke abhängt. Bei gekapselten Kran- und Bahnmotoren indessen kann die Anordnung von nur zwei Bürsten vorteilhaft sein, weil dann eine kleine Öffnung zum Nachsehen der Bürsten ausreicht.

Sehr häufig findet man auch auf einem Anker mehrere völlig voneinander getrennte Wicklungen, welche durch die Bürsten parallel

zueinander geschaltet sind. Eine dreifache Wicklung mit je 15 Spulen müßte dann  $3 \cdot 15 = 45$  Kommutatorsegmente haben und jede Bürste

muß stets mindestens drei Segmente bedecken. Durch diese mehrfache Parallelschaltung ist der Strom in jedem der Leiter nur klein, auch geht die Kommutation leichter vor sich.

c) Die Ausführung der Wicklung. Die Herstellung von Ankerwicklungen erfolgt nur bei ganz kleinen Ankern durch direktes Aufwickeln des Drahtes auf den Ankerkörper. Bei diesen Ankern können die Nuten halb geschlossen ausgeführt werden, wodurch die Wicklung gegen die Wirkung der Schleuderkraft gut geschützt ist. Alle mittleren und größeren Anker erhalten Ankerspulen, welche getrennt vom Anker hergestellt und fertig in die Nuten eingelegt werden. Abb. 110 zeigt einen Schnitt durch eine offene Nute. Da in jedem Falle der Draht nur eine schwache

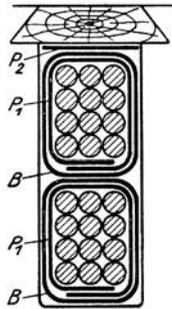


Abb. 110.

Offene Ankernte.

B = Bandbewicklung

P<sub>1</sub> = Preßspanhülle

(0,3—0,4 mm)

P<sub>2</sub> = Preßspanstreifen.

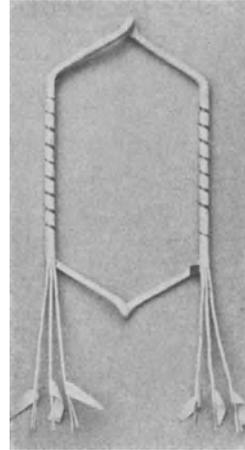


Abb. 111. Ankerspule.

Baumwollisolation hat, ist es notwendig, ihn gegen das Ankereisen nochmals zu isolieren. Dies geschieht durch eine Preßspanbeilage. Da man wegen der Erwärmung durch jedes mm<sup>2</sup> eines Ankerleiters nur etwa

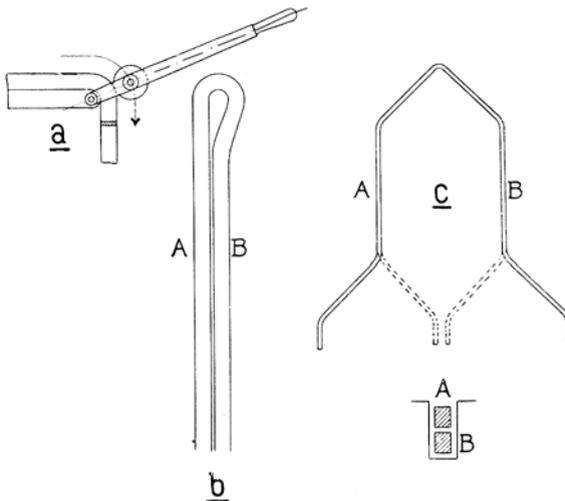


Abb. 112. Formspule aus Flachkupfer. a = Biegen, b = fertig gebogen, c = auseinandergezogen (bei Schleifenwicklungen wie punktiert!).

2–5 Ampere hindurchlassen kann, ist nur bei geringeren Stromstärken mit rundem Draht auszukommen. Ergeben sich Drahtdurchmesser von mehr als 3–4 mm, so nimmt man mehrere Drähte parallel, während bei noch größeren Stromstärken Flachkupfer verwandt wird. Damit die Leiter sich auf den Stirnseiten des Ankers nicht gegenseitig stören, ist eine Abkröpfung der Form nötig. Abb. 111 zeigt eine aus Draht hergestellte, fertige Ankerspule. Bei mittleren und großen Ankern haben

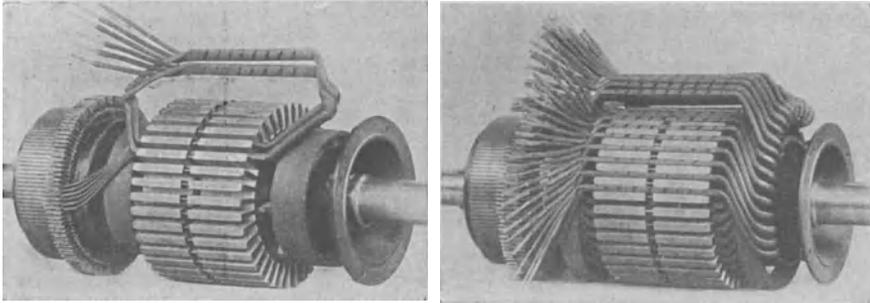


Abb. 113. Das Einlegen der Ankerspulen.

die Spulen meist nur eine Windung, so daß die Herstellung derselben aus Flachkupfer keine Schwierigkeit bietet. Abb. 112 zeigt eine Formspule aus Flachkupfer und ihre Herstellung. Die freien Enden werden ebenso wie die freien Drahtenden der Abb. 111 in den Kommutator eingelötet. Das Einlegen der Ankerspulen in die Nuten zeigt Abb. 113.

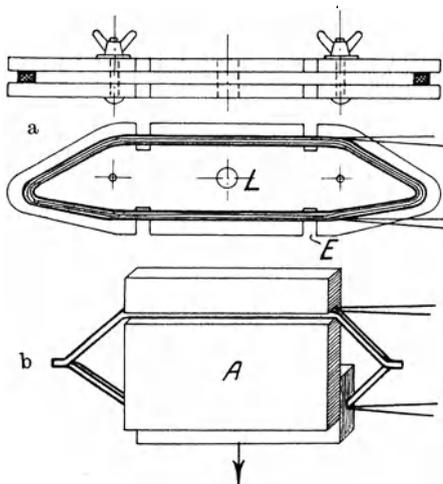


Abb. 114. Schablone zur Herstellung von Ankerspulen.

Spule abgehoben und mit Leinenband sie mit dem Ausziehholz A der Abb. 114 b auf ihre endgültige Form ausgezogen.

d) Die Herstellung der Ankerspulen erfolgt meistens durch Aufwinden oder Biegen über eine Schablone. In Abb. 114 a ist eine derartige Schablone dargestellt. Die Führungsstücke müssen leicht abnehmbar sein, damit die fertiggestellte Spule ohne Mühe herausgenommen werden kann. Die Einschnitte E dienen zum Durchziehen eines die Spule haltenden Drahtes oder Bandes. Das Loch L braucht man zum Aufspannen auf die Bank. Nachdem die vollständig bewickelt ist, wird

e) Die Umwicklung einer Maschine für andere Spannung. Zuweilen ist es notwendig, eine Maschine für eine andere Spannung umzuwickeln. Dies ist in den meisten Fällen leicht möglich, jedoch bleibt die Leistung der Maschine natürlich unverändert, weil bei größerer Leistung auch die Verluste in der Maschine größer sein würden, wodurch sich eine unzulässige Erwärmung einstellen würde. Wenn wir eine Maschine mit einer Ankerwicklung nach Abb. 104 betrachten, die für eine bestimmte Spannung gewickelt ist, so wird in jedem Ankerviertel der vier parallel geschalteten Ankerteile die volle Spannung erzeugt. Wir brauchen jetzt nur eine Wellenwicklung aufbringen um mit der Maschine die doppelte Spannung zu erzeugen, wobei der Drahtquerschnitt und die Windungszahl unverändert bliebe. Denn bei der letzteren Wicklung sind nur zwei Ankerhälften parallel geschaltet. Wir können natürlich auch bei gleicher Wicklungsart die Spannung dadurch verändern, daß wir die Windungszahl ändern. Eine Verminderung der Leiterzahl auf die Hälfte würde bei gleicher Umlaufzahl die halbe Spannung ergeben, jedoch müßte der Drahtquerschnitt wegen des bei gleicher Leistung herrschenden Stromes von doppelter Größe auch doppelt so groß sein.

f) Der Eisenkörper. Zur Herstellung des Ankers wird ausnahmslos Schmiedeeisen verwandt, dabei ist es aber unzulässig, denselben aus einem Stück herzustellen, weil (wie auf S. 44 beschrieben) Wirbelströme im Eisen auftreten würden. Denken wir uns den Eisenkörper des Ankers der Abb. 115 in einzelne Stäbe zerlegt, welche den Leiterstäben parallel laufen, so werden dieselben bei der Drehung ebenfalls Kraftlinien schneiden. Die dadurch erzeugten Spannungen treiben *Wirbelströme* in der gezeichneten Weise durch den Ankerkörper, welche denselben nicht nur erwärmen, sondern auch einen Energieverlust bedeuten, den sog. *Wirbelstromverlust*. Wir können diesem Übelstand nur dadurch entgegenarbeiten, daß wir den Wirbelströmen den Weg versperren oder erschweren. Dies können wir durch Unterteilung des Eisenkörpers in Bleche, die auf einer Seite mit einer dünnen Papierschiicht beklebt sind. Abb. 116 zeigt ein zum Aufbau von Anker dienendes Ankerblech. Die vollen Blechtafeln werden einseitig mit dünnem Papier beklebt, dann rund ausgeschnitten und schließlich gestanzt. Zur Ersparung teurer Werkzeuge werden die Nuten einzeln ausgestanzt. Das Blechpaket, welches aus Abb. 113 zu erkennen ist, wird durch seitliche Druckplatten fest zusammen-

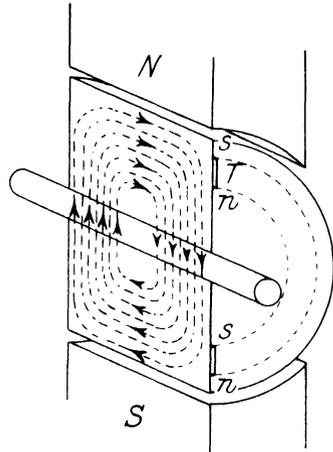


Abb. 115. In einem massiven Anker würden starke Wirbelströme entstehen.

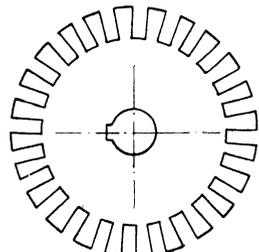


Abb. 116. Ankerblech.

gehalten und durch einen Keil gegen Drehung gesichert. Stärkere Blechpakete erfordern eine Unterteilung unter Belassung von Luftschlitzten, damit die Abkühlung des Ankereisens ausreichend ist. Abb. 117 stellt einen Schnitt durch einen Anker dar. Damit die Wicklung gegen Herausfliegen gesichert ist, sind Drahtbänder an verschiedenen Stellen des Ankers anzuordnen, welche durch eine Isolierschicht vom Ankereisen isoliert, unter Zug aufgewickelt und verlötet werden.

Die Unteilung des Ankereisens treibt man gewöhnlich nicht weiter als bis zu einer Blechstärke von 0,5 mm, allerhöchstens 0,3 mm, weil sehr dünne Bleche die Herstellung verteuern. Damit sind aber die Wirbelströme und die durch sie bedingten Verluste noch nicht ganz beseitigt, weil in den dünnen Blechquerschnitten auch noch schwache Wirbelströme auftreten können. Dieselben müssen in Kauf genommen werden. Eine weitere Verminderung der Wirbelstromverluste läßt sich noch

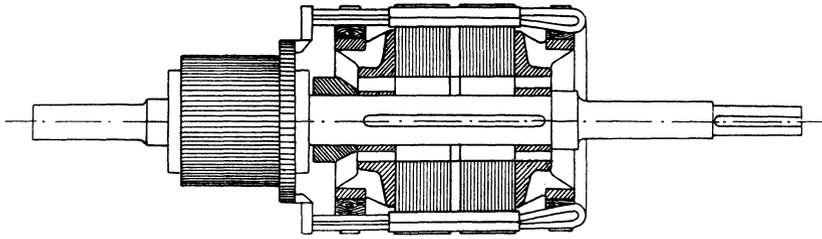


Abb. 117. Schnitt durch einen Anker.

dadurch erreichen, daß man sog. *legierte Bleche* verwendet. Es ist dies ein Eisen, welches ein guter magnetischer Leiter, aber ein schlechter elektrischer Leiter ist und so den Wirbelströmen den Weg erschwert. Die Größe des Wirbelstromverlustes wird bei einer ausgeführten Maschine von der Stärke des magnetischen Kraftflusses und von der Geschwindigkeit, also der Umlaufzahl, abhängen. Je größer diese Größen sind, um so größer ist auch der Wirbelstromverlust, weil mehr Kraftlinien geschnitten werden.

Außer den Wirbelstromverlusten tritt im Ankereisen noch ein weiterer Energieverlust auf, der sich auch durch eine Erwärmung des Eisens bemerkbar macht. Betrachten wir das beliebige Eisenteilchen T in Abb. 115. In der gezeichneten Lage ist es durch die Kraftlinien der Magnetpole so magnetisiert, daß oben ein Südpol und unten ein Nordpol ist. Nach einer halben Umdrehung sind die Pole noch immer so, das Stäbchen hat sich aber um  $180^\circ$  gedreht, es ist also ummagnetisiert worden. Bei einer ganzen Umdrehung hat es wieder den gleichen Magnetismus wie anfänglich. Jede Ummagnetisierung bedingt aber nach S. 33 einen *Hysteresisverlust*, der um so größer ist, je stärker das magnetische Feld ist und je öfter ummagnetisiert wird, d. h. je größer die Umlaufzahl ist. Hysteresisverlust und Wirbelstromverlust nennt man zusammen die *Eisenverluste* der Maschine.

**3. Der Kommutator (Kollektor) und die Stromabnahme.** Derselbe besteht aus einer großen Anzahl voneinander isolierter Segmente. Es erschiene am einfachsten, einen Zylinder aus Isolierstoff zu nehmen und die nötige Zahl Segmente einzeln aufzuschrauben. Dies geht aber nicht, denn einmal sind dieselben sehr schmal und ferner müssen sie in radialer Richtung ziemlich dick sein, damit sie einen jahrelangen Verschleiß ermöglichen. Derselbe ist nicht unbeträchtlich, weil trotz der starken Bürstenreibung eine Schmierung nicht vorgenommen werden darf (nur ein Hauch Vaseline darf aufgebracht werden), und weil ein unrund gelaufener Kollektor auch abgedreht werden muß. Man versieht die Kollektorsegmente deshalb mit einer schwalbenschwanzförmigen Aussparung, wie das Segment der Abb. 118 zeigt, mit deren Hilfe alle Segmente gemeinsam gehalten werden. Eine Fahne F dient zum Einlöten des Wicklungsdrahtes. In Abb. 119 ist ein Schnitt durch einen Kollektor dargestellt. Eine auf der Welle aufgekeilte Büchse B greift in die Aussparungen der Segmente. Zwischengefügte Isohermanschetten M

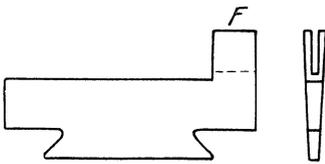


Abb. 118. Kollektorsegment.

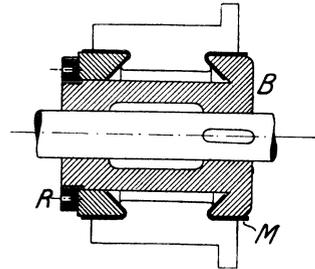


Abb. 119. Kollektor im Schnitt.

aus Mika sorgen für die Isolation voneinander. Der vordere Druckring wird durch eine Mutter R angepreßt. Als Isolierung zwischen den einzelnen Segmenten dient eine dünne Mikascheibe, welche die gleiche Form wie das Segment hat. Zu beachten ist noch, daß jeder Kommutator von der Welle abgezogen und ausgewechselt werden kann, ohne daß die Segmente auseinanderfallen. Die Verbindung des Kommutators mit der Wicklung erfolgt fast ausnahmslos durch Lötung. Dieselbe darf nicht mit Säure vorgenommen werden, sondern mit säurefreiem Kolophonium.

Das Feuern der auf dem Kollektor schleifenden Bürsten ist zuweilen auf Mängel am Kommutator zurückzuführen. Besonders oft trifft man Verunreinigungen durch Metallstaub oder zu starke Schmierung. Letzterer Übelstand kann auch dadurch entstehen, daß die Lager nicht in Ordnung sind, wodurch das Öl herausgeschleudert wird und auf den Kollektor gelangt. Auch zu harte Isolation zwischen den Segmenten gibt zum Feuern Veranlassung, weil sich dieselbe dann schwächer abnutzt als die Kupfersegmente, so daß sie etwas vorsteht. Dieselbe ist vorsichtig abzuschmiegeln oder wenn dies nichts hilft, mit einem Stückchen einer Metallsäge leicht auszufeilen. Unrunde Kollektoren verursachen ganz besonders feuernde Bürsten. Ist die Ungleichheit stark, so muß der Kollektor abgedreht werden. Dies geschieht bei kleinen und mittleren Anker auf einer Drehbank, bei großen Anker an der Maschine selbst mittels eines Abdrehapparats. Nach Beendigung der Arbeit ist der Kollektor zu polieren und von dem Grad zu befreien, welcher sich zwischen die Segmente gesetzt hat. Bei Kurzschlüssen der Maschine oder sonstiger starker Stromentnahme bilden sich Brandstellen auf dem Kollektor, die sofort durch Abschmiegeln des umlaufenden Kommutators zu beseitigen sind, weil sonst durch sie neue Brandstellen entstehen. Nach dem trockenen Abschmiegeln muß der Kupferstaub sorgfältig abgesaugt werden.

**Die Stromabnahme.** Dieselbe ist durch Abb. 120 schematisch dargestellt und besteht aus den Bürsten K, den Bürstenhaltern H, den Bürstenstiften S und der Bürstenbrücke B.

**Die Bürsten** wurden früher vielfach aus Kupfer oder Messinggeweben, die in prismatische Formen gepreßt wurden, hergestellt. Seit man weiß, daß für eine gute Kommutation eine schlecht leitende Bürste besser ist, verwendet man fast ausschließlich Kohlenbürsten. Die Zahl der Bürsten und ihr Querschnitt richtet sich nach der Größe der abzunehmenden Stromstärke. Es folgt daraus, daß Maschinen für große Stromstärken viele Bürsten auf einem Bürstenstift haben müssen, daß also auch der Kollektor sehr lang sein muß. Damit sich derselbe überall gleichmäßig abnutzt ist es ratsam, die Bürsten gegeneinander zu versetzen. Zwei Bürsten sollten immer auf jedem Bürstenstift sein, damit man bei Bedarf eine derselben auswechseln kann, ohne die Maschine still zu setzen.

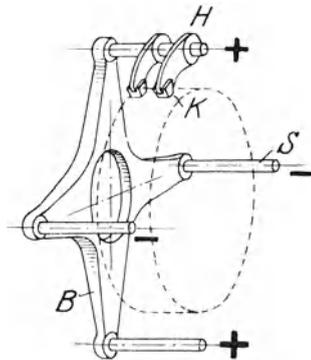


Abb. 120. Schematische Darstellung einer Stromabnahme vom Kollektor.

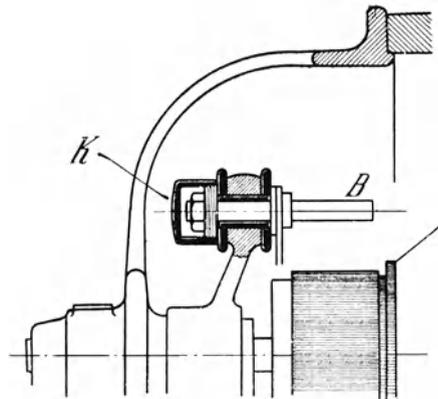


Abb. 121. Isolierung eines Bürstenbolzens. (Aus Preger-Lehmann, Unfallverhütungs-Technik.)

Für einen funkenfreien Lauf ist ein guter Kontakt zwischen Bürste und Kollektor unbedingt erforderlich. Die Bürsten sind deshalb vor der Inbetriebnahme einzuschleifen. Zu diesem Zweck zieht man einen Streifen Schmirgelleinen, mit der glatten Seite dem Kollektor zugewandt, unter der Bürste her. Meist wird die einfache prismatische Form für die Kohlen bevorzugt, damit sie nahezu restlos aufgebraucht werden können. An der dem Kollektor abgekehrten Seite wird die Kohle verkupfert oder durch Gewinde ein guter Kontakt hergestellt.

**Die Bürstenhalter** sollen die Bürsten halten und mit angemessenem Druck gegen den Kollektor drücken. Der Federdruck muß sich entweder durch Verstellung des Halters auf dem Bürstenstift oder durch Spannen einer Feder regeln lassen. Die Konstruktion der Halter kann außerordentlich verschieden sein.

**Die Bürstenbolzen**, deren Zahl bei Schleifenwicklungen mit der Polzahl übereinstimmt, sind in die Bürstenbrücke mittels Isolierbüchse und Scheibe eingesetzt. Abb. 121 zeigt diese Konstruktion. B ist der

Bürstenbolzen, an dem auch die abgehende Leitung angeschlossen ist. Hinten ist der Bolzen zuweilen durch eine Isolierkappe K gegen Berührung geschützt. Alle + Bolzen sind verbunden, ebenso die - Bolzen.

Die Bürstenbrücke hat soviel Arme als Bürstenbolzen vorhanden sind und ist verdrehbar, so daß die Bürsten in die neutrale Zone eingestellt werden können. Bei großen Maschinen erfolgt die Verstellung mittels Schnecke und Handrad.

Einige Fragen allgemeiner Natur seien zum Schluß noch betrachtet: Zuweilen wird versucht, einen Anker abzudrehen, weil er vielleicht etwas schlägt. Wir vergrößern dadurch den Luftspalt und verringern den Kraftfluß, so daß bei gleicher Umlaufzahl und Erregung eine niedrigere Spannung erzeugt wird. Tritt bei einer Maschine starker Lagerverschleiß ein oder schlägt der Anker, so ist dadurch der Kraftfluß ungleich auf die Pole verteilt, so daß verschiedene Spannungen in den parallel geschalteten Anker-

teilen erzeugt werden können, wodurch deren Belastung verschieden ausfällt. Zuweilen funkt ein Kommutator auch, weil äußere Erschütterungen den guten Kontakt der Bürsten verhindern, wie z. B. eine zitternde Unterlage, ein Schlag oder Stoß im Getriebe oder auch eine Nähstelle im Riemen. Starkes Feuer an einer Kollektorlamelle tritt auch ein, wenn die Ankerwicklung an einer Stelle eine Unterbrechung hat (Drahtbruch, Auslötung am Kollektor).

Läßt sich der Schaden nicht ohne weiteres beheben, so kann man die Maschine vorübergehend dadurch in Betrieb halten, daß man die beiden Kollektorsegmente miteinander verbindet, zwischen denen sich die Unterbrechung bemerkbar macht. Wir haben durch diese Verbindung allerdings eine Ankerspule ausgeschaltet, also die Ankerzweige ungleich belastet. Eine ebensolche ungleiche Belastung würde eintreten, wenn eine Spule Windungsschluß bekäme, also wenn die Windungen durch eine Beschädigung der Isolation Kontakt miteinander hätten, oder wenn Grat zwei Segmente überbrückte, oder auch wenn durch nachlässige Lötung an den Fahnen Verbindung entstanden wäre.

Um bei einem Anker festzustellen, welche Ankerspule beschädigt ist, kann man wie folgt verfahren: Angenommen, der in Abb. 122 dargestellte Anker habe Erdschluß, das Kupfer des Ankers habe also Verbindung mit dem Ankereisen bekommen. Wir können dann mit einer schwachen Stromquelle einen Strom durch den ruhenden Anker schicken und ein Galvanometer G, wie gezeichnet, anschließen. Man erkennt, daß der Galvanometerausschlag Null werden muß, wenn man mit dem beweglichen Anschlußdraht des Galvanometers gerade das Kommutator-

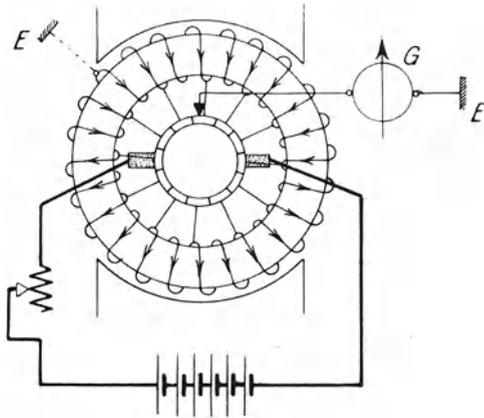


Abb. 122. Prüfung eines Ankers auf Erdschluß.

segment berührt, dessen Spule Schluß hat, weil dann das Galvanometer kurzgeschlossen ist. In Abb. 123 ist angenommen, daß eine Ankerspule durch schadhafte Isolation oder durch den Kollektor kurzgeschlossen sei. Man kann nun die beiden Ankerhälften mit dem zwischengeschalteten Galvanometer als Wheatstonesche Brücke auffassen, und es dürfte bei unverletztem Anker das Galvanometer nicht ausschlagen, wenn es nach Abb. 123 an den Kommutator angelegt ist. Durch den Schluß einer Ankerspule tritt aber nun eine Verschiebung ein, und man muß den einen Galvanometerkontakt etwas verschieben, damit das Galvanometer wieder auf Null geht. Die Zahl der Segmente zwischen den Galvanometerkontakten stimmt also jetzt auf beiden Seiten nicht mehr überein, und man kann von vornherein sagen, daß die schadhafte Spule auf der Seite liegt, auf welcher die Segmentzahl überwiegt. Durch Drehen des Ankers und gleichzeitige Beobachtung des Galvanometers kann man dann weiter feststellen, wann die schadhafte Spule von der einen Ankerseite auf die andere übertritt. Windungsschluß läßt sich bei einfachen Wicklungen auch feststellen, wenn man so wie

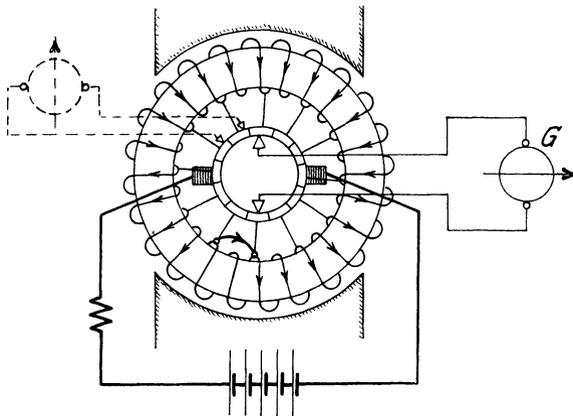


Abb. 123. Prüfung eines Ankers auf Windungsschluß.

Abb. 123 punktiert angibt, ein Galvanometer oder ein Voltmeter für geringe Spannung an zwei aufeinander folgende Segmente legt. Der Ausschlag wird überall gleich sein, nur bei der beschädigten Spule schlägt das Galvanometer weniger oder gar nicht aus. Einen Windungsschluß im Anker merkt man auch, wenn man den stromlosen Anker bei voller Erregung von Hand dreht. Man spürt einen Widerstand sobald die verletzte Spule in das Feld kommt.

#### D. Die Gleichstrommotoren.

Der grundsätzliche Aufbau des Elektromotors ist uns bereits auf S. 39 bekannt geworden. Nach Abb. 55 haben wir weiter nichts als ein magnetisches Feld, in welchem ein Leiter liegt, durch den wir einen Strom schicken. Dann sucht sich dieser Leiter zu bewegen mit einer Kraft:

$$P = \frac{\mathfrak{B} \cdot I \cdot l}{9810000}$$

Der ausgeführte Elektromotor hat zur Erhöhung der Kraftwirkung viele derartige Leiter auf einem Anker, auch brauchen wir, wie dies schon an Abb. 57 erläutert wurde, einen Kommutator, um stets die richtige Stromrichtung in den Ankerabteilen zu haben. Es besteht also im Bau gar kein Unterschied zwischen einem Stromerzeuger und

einem Elektromotor. Man kann jederzeit einen Elektromotor auch als Stromerzeuger benutzen und umgekehrt, ja, es kommt sogar vor, daß eine Maschine in kurzzeitigem Wechsel einmal als Motor und dann wieder als Erzeuger wirkt. Betrachten wir jedoch zunächst noch einmal das allgemeine Schema der Wirkungsweise des Elektromotors, wie es Abb. 124 darstellt. Ein Leiter von der Länge  $l$  liegt im magnetischen Feld von der Stärke  $\mathfrak{B}$  Kraftlinien durch ein  $\text{cm}^2$  und wird von einem Strom  $I$  durchflossen, den eine fremde Stromquelle liefert. Dann will sich der Leiter bewegen und vermag ein Gewicht  $P$  zu heben, dessen Größe sich aus obiger Gleichung berechnen läßt. Bei dem wirklichen Elektromotor haben wir viele solcher Leiter im Felde liegen, deren Zugkräfte sich alle addieren. Sei der Widerstand derselben  $r$ , und sei ferner die Spannung der angelegten Stromquelle  $e$ , so fließt durch die Leiter ein Strom:

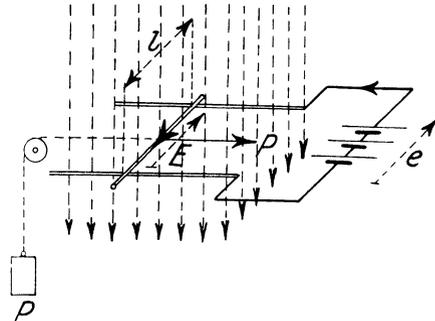


Abb. 124. Wirkungsweise des Elektromotors.

aber nur, wenn wir die Leiter durch Festhalten verhindern, eine Bewegung zu machen. Lassen wir hingegen die Leiter sich bewegen, so schneiden sie ja Kraftlinien, wodurch natürlich in ihnen eine Spannung erzeugt wird. Stellen wir nach unserer früheren Regel die Richtung der erzeugten Spannung fest, so finden wir, daß dieselbe der Spannung der Stromquelle entgegenwirkt. Wir nennen deshalb diese im Motor erzeugte Spannung Gegenspannung. Sie hat das Bestreben, das Fließen des Stromes zu verhindern. Es versteht sich von selbst, daß diese erzeugte Gegenspannung nie größer sein kann als die Spannung der Stromquelle, weil ja dann die Gegenspannung einen umgekehrten Strom erzeugen würde. Die in dem Stromkreis herrschende Spannung ist also bei bewegtem Leiter nur noch  $e - E$ , wo  $E$  die Größe der Gegenspannung bedeutet. Im bewegten Anker fließt demnach der kleinere Strom:

$$I = \frac{e}{r},$$

Im bewegten Anker fließt demnach der kleinere Strom:

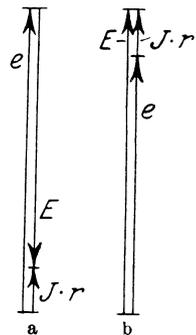


Abb. 125. a Spannungen im Motor, b im Stromerzeuger.

$$I = \frac{e - E}{r} \dots \dots \dots 25$$

Diese Gleichung können wir auch schreiben:

$$I \cdot r = e - E,$$

woraus hervorgeht, daß die erzeugte Gegenspannung immer um den Ohmschen Spannungsverlust  $I \cdot r$  des Ankers kleiner ist als die zugeführte Klemmenspannung. In Abb. 125 a sind die einzelnen Span-

nungsgrößen durch Strecken dargestellt. Bei dem Stromerzeuger haben wir seinerzeit auch zwei Spannungen, die erzeugte Spannung  $E$  und die Klemmenspannung  $e$  unterschieden. Dort war aber die Klemmenspannung ein Teil der erzeugten Spannung, also ebenso wie diese gerichtet, nur um den Spannungsabfall  $I \cdot r$  geringer. Abb. 125 b stellt die Spannungsgrößen eines Erzeugers dar.

**Beispiel:** Ein 10pferdiger Gleichstrommotor für 220 V habe einen Wirkungsgrad  $\eta = 0,85$  und einen Ankerwiderstand  $r = 0,28 \Omega$ . Wie groß ist die erzeugte Gegenspannung bei normaler Belastung?

Der Motor leistet 10 PS =  $10 \cdot 736 = 7360$  W.

Die zugeführte Leistung muß größer sein, also beträgt dieselbe:

$$\frac{7360}{\eta} = \frac{7360}{0,85} = 8650 \text{ W.}$$

Folglich nimmt der Motor einen Strom

$$I = \frac{8650}{e} = \frac{8650}{220} = 39,4 \text{ A auf.}$$

Der Spannungsverlust im Anker beträgt also:

$$I \cdot r = 39,4 \cdot 0,28 = 10,7 \text{ V.}$$

Die erzeugte Gegenspannung ist also:

$$E = e - I \cdot r = 220 - 10,7 = 209,3 \text{ V.}$$

Würde bei vorstehendem Beispiel der Motor nur 5 PS zu leisten haben, so würde die aufgenommene Leistung auch nur fast halb so groß sein, und der Strom des Motors betrüge etwa 20 A. Die weitere Rechnung würde dann ergeben, daß die erzeugte Gegenspannung größer ist und etwa 215 V beträgt. Im Leerlauf des Motors, wenn er nur einen sehr kleinen Strom aufnimmt, ist die Gegenspannung ziemlich gleich der Klemmenspannung.

Für die Gegenspannung gilt natürlich auch Gleichung 23:

$$E = c \cdot \mathfrak{C} \cdot n.$$

Die Zugkraft eines Motors setzt sich aus den Zugkräften aller Leiterstäbe, die im magnetischen Feld liegen, zusammen. Wir können demnach bei einem ausgeführten Motor sagen, daß die Zugkraft dem Kraftfluß und dem Ankerstrom proportional ist, also:

$$P = c \cdot I \cdot \mathfrak{C} \dots \dots \dots 26$$

Unter dem Drehmoment versteht man bekanntlich das Produkt: Zugkraft mal Ankerradius =  $P \cdot r$ , das Drehmoment des Motors ist demnach:

$$M = P \cdot r = c \cdot r \cdot I \cdot \mathfrak{C}.$$

Faßt man die Konstanten  $c$  und  $r$  zu einer neuen Konstanten  $C$  zusammen, so ist:

$$M = C \cdot I \cdot \mathfrak{C} \dots \dots \dots 27$$

Das Motordrehmoment ist also auch der Stromstärke und dem Feld proportional.

Alles was wir früher über den Aufbau und die Behandlung der Gleichstromerzeuger gesagt haben, gilt auch für die Motoren. Insbesondere können auch bei diesen ungleiche Belastungen der Ankerzweige eintreten, wenn die Lager verschlissen sind, wenn ein Pol nicht erregt oder verkehrt geschaltet ist, wenn eine Unterbrechung oder ein Windungsschluß im Anker ist. Denn ebenso wie bei dem Stromerzeuger wird auch bei dem Motor dann in einem Ankerzweig eine geringere Gegenspannung erzeugt, so daß ein größerer Strom als normal hindurchfließt.

Während Stromerzeuger immer in besonderen Betriebsräumen Aufstellung finden, werden Motoren stets dort aufgestellt, wo sie gerade nötig sind. Der Elektromotor muß sich deshalb den örtlichen Verhältnissen anpassen, und es gibt deshalb eine ganze Reihe verschiedener Ausführungsarten, die wir auf Seite 273 näher betrachten werden.

**Die Größe der Umlaufzahl.** Da sich die Klemmenspannung  $e$ , die wir einem Motor zuführen, nur um den geringen Spannungsabfall  $I \cdot r$  von der erzeugten Gegenspannung  $E = c \cdot \mathfrak{C} \cdot n$  unterscheidet, kann man für eine oberflächliche Betrachtung ruhig einmal Klemmenspannung und Gegenspannung gleichsetzen, dann ist also:

$$e \cong c \cdot \mathfrak{C} \cdot n$$

und hieraus:

$$n \cong \frac{e}{c \cdot \mathfrak{C}} \dots \dots \dots 28$$

d. h. wenn wir einem ausgeführten Motor eine andere Spannung  $e$  zuführen, so steigt oder fällt die Umlaufzahl in demselben Verhältnis wie die Spannung steigt oder fällt, vorausgesetzt, daß der Kraftfluß, also die Erregung dabei unverändert bleibt. Verstärken wir aber den Kraftfluß  $\mathfrak{C}$  durch eine größere Erregung, so verringert sich die Umlaufzahl, während durch eine Feldschwächung dieselbe erhöht wird.

Nach der allgemeinen Gleichung 17 ist die in  $z$  Leitern erzeugte Gegenspannung  $E = z \cdot \mathfrak{B} \cdot l \cdot v : 100\,000\,000$ , die also der Klemmenspannung ungefähr gleich ist. Wir können danach für jede beliebige Geschwindigkeit einen Motor bauen, wenn wir nur die Drahtzahl und Länge entsprechend wählen. Um einen Motor für die doppelte Umlaufzahl bei gleicher Spannung zu bauen, müßte nach vorstehender Gleichung die Drahtzahl oder Leiterlänge nur halb so groß sein, wenn die Feldstärke  $\mathfrak{B}$  unverändert bleibt. Der schnellaufende Motor baut sich also kleiner. Umgekehrt verlangt ein langsam laufender Motor eine große Drahtlänge, also einen großen Anker. Diese Erscheinung trifft man nicht nur bei elektrischen Maschinen, sondern überall. Die mechanische Leistung ist doch bekanntlich gleich Kraft mal Geschwindigkeit. Macht man die letztere groß, so wird bei gleicher Leistung die Kraft und damit die Maschine klein. Es wäre danach ratsam, Elektromotoren nur für möglichst hohe Umlaufzahlen zu bauen. Aber wir müssen bedenken, daß dann ja die Wirbelstrom- und Hysteresisverluste im Ankereisen ebenfalls groß werden, und daß auch die Reibungsverluste wachsen. Ferner kommt hinzu, daß die angetriebenen Maschinen meistens eine geringere Umlaufzahl verlangen, daß also durch energieverzehrende Übersetzungen die Umlaufzahl wieder erniedrigt werden muß. Unter Beachtung all dieser Umstände bauen die Elektrizitätsfirmen normale Motoren mit ungefähr den in folgender Tabelle genannten Umlaufzahlen:

| Leistung in kW | Umläufe/Min. |
|----------------|--------------|
| 1 . . . . .    | 1400         |
| 5 . . . . .    | 1000         |
| 10 . . . . .   | 900          |
| 25 . . . . .   | 750          |
| 50 . . . . .   | 600          |
| 100 . . . . .  | 500          |

Es sind jedoch auch Motoren erhältlich, bei welchen die genannten Umlaufzahlen bis 100% überschritten oder bis 60% unterschritten werden.

**Die Erregung der Gleichstrommotoren.** Wir unterscheiden auch hier:

*Nebenschlußmotoren,*  
*Hauptschlußmotoren und*  
*Doppelschlußmotoren.*

Abb. 126, 127 und 128 stellen die Schaltungsschemen dieser drei Motoren dar. Den Erregerstrom liefert natürlich in jedem Falle die Stromquelle.

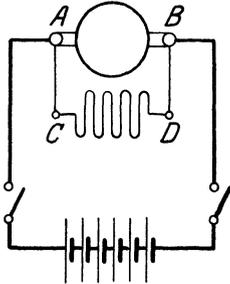


Abb. 126. Schema des Nebenschlußmotors.

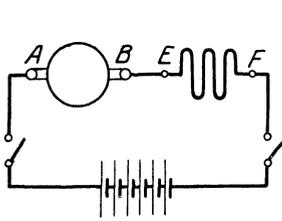


Abb. 127. Schema des Hauptschlußmotors.

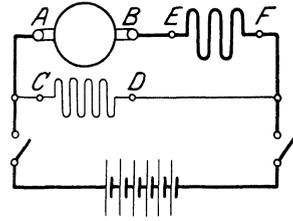


Abb. 128. Schema des Doppelschlußmotors.

**Das Anlassen der Gleichstrommotoren.** Wenn wir den in dem Beispiel auf S. 80 betrachteten Motor in Betrieb nehmen wollen und ihn ohne weitere Hilfsmittel nur mit einem Schalthebel einschalten, so fließt ein Strom, welcher nach dem Ohmschen Gesetz gleich  $I = 220 : 0,28 = 786 \text{ A}$  ist. Der Ankerstrom bei voller Belastung war nur  $39,4 \text{ A}$ . Wäre nicht der Motor durch Sicherungen gegen eine so hohe Stromstärke geschützt, so würde der Kollektor verschmoren, die Lötstellen würden sich lösen, und die Isolation würde verkohlen. Warum fließt denn bei normalem Betrieb kein so großer Strom durch den Motor? Weil der laufende Motor eine Gegenspannung erzeugt, die nur wenig kleiner ist als die zugeführte Spannung, und weil der ruhende Motor beim Einschalten diese Gegenspannung natürlich noch nicht erzeugt. Um den Motor ordnungsmäßig in Betrieb nehmen zu können brauchen wir einen **Anlaßwiderstand**. Derselbe muß so groß sein, daß er nur gerade so viel Strom hindurchläßt, als zum Anlauf des Motors erforderlich ist.

**Beispiel:** Wie groß muß der Anlaßwiderstand für den Nebenschlußmotor des Beispiels auf Seite 80 sein, wenn der Motor auf dem ersten Kontakt mit normalem Drehmoment anlaufen soll?

Wenn der Motor sein normales Drehmoment entwickeln soll, muß er auch seinen normalen Strom von  $39,4 \text{ A}$  aufnehmen. Der Widerstand des Stromkreises muß demnach gleich:

$$\frac{e}{I} = \frac{220}{39,4} = 5,58 \ \Omega \text{ sein.}$$

Da hiervon  $0,28 \ \Omega$  auf den Anker entfallen, muß der Anlasser noch  $5,3 \ \Omega$  haben.

Wenn der Motor des vorigen Beispiels  $39,4 \text{ A}$  zur Entwicklung des normalen Drehmomentes braucht, wird er auf dem ersten Kontakt sich gerade eben drehen. Wir schalten dann einen Teil des Anlaßwiderstandes ab, dadurch wird der Strom, weil der noch fast ruhende Anker keine Gegenspannung erzeugt, plötzlich an-

steigen. Gestatten wir einen Anstieg auf 50 A, so müßte der Gesamtwiderstand auf dem 2. Kontakt noch sein:

$$\frac{220}{50} = 4,4 \Omega.$$

Die 1. Widerstandsstufe muß also  $5,58 - 4,4 = 1,18 \Omega$  sein. Durch diesen großen Strom von 50 A wird der Anker nun kräftig gedreht, wodurch eine Gegenspannung  $E$  im Anker erzeugt wird. Bleibt aber das Drehmoment, welches vom Motor verlangt wird, beim Anlauf das gleiche, wie z. B. bei einem Aufzugsmotor, der eine konstante Last hebt, so wird sich nach einigen Augenblicken wieder der frühere Strom von 39,4 A eingestellt haben, der zur Hebung der Last hinreicht. Der Mehrbedarf von 50 A war vorübergehend zur Beschleunigung der Massen nötig. Nach Erreichung des kleinen Stromes wird in dem noch eingeschalteten Widerstand von  $4,4 \Omega$  eine Spannung von  $4,4 \cdot 39,4 = 173 \text{ V}$  verbraucht. Die vom Motor entwickelte Gegenspannung muß also gleich  $E = 220 - 173 = 47 \text{ V}$  sein. Nun schalten wir auf den 3. Kontakt und wollen wieder einen Stromanstieg auf 50 A gestatten. (Bei einem Hauptschlußmotor würde der Stromanstieg eine Vergrößerung der Gegenspannung zur Folge haben.) Da jetzt schon eine Gegenspannung von 47 V wirkt, bleibt von 220 V nur  $220 - 47 = 173 \text{ V}$  für die Widerstände übrig. Diese müßten also auf dem 3. Kontakt noch sein:

$$\frac{173}{50} = 3,46 \Omega.$$

Die 2. Widerstandsstufe muß demnach  $4,4 - 3,46 = 0,94 \Omega$  sein. Nachdem der Strom wieder auf den für das Drehmoment notwendigen Wert von 39,4 A gesunken ist, werden in den  $3,46 \Omega$  jetzt 136 V vernichtet, so daß  $E = 84 \text{ V}$  ist, entsprechend der noch höheren Umlaufzahl usf. Bei Abschaltung jeder neuen Stufe lassen wir den Strom vorübergehend auf 50 A steigen, wodurch der Motor beschleunigend wirkt und die Umlaufzahl ein Stück weiter erhöht. Dann sinkt der Strom wieder auf den normalen Wert von 39,4 A zurück. Wir sehen übrigens, daß die Größe der Anlasserstufen nicht gleich ist. Die zuerst abgeschalteten Stufen sind groß, während die letzten sehr klein sind. Setzt man die obige Rechnung fort, so erhält man 13 Stufen von folgender Größe  $1,18 + 0,94 + 0,74 + 0,58 + 0,46 + 0,36 + 0,28 + 0,22 + 0,175 + 0,135 + 0,11 + 0,084 + 0,036 = 5,3 \Omega$ . Anlasser für Dauerbetriebsmotoren haben oft noch mehr Stufen. Im allgemeinen findet man bei ihnen je nach der Größe 8 bis 20. Wünscht man ganz wenig Stufen, wie dies bei Kran- und Hüttenbetrieben immer der Fall ist, so muß man größere Stromsprünge zulassen. Dadurch, daß man im obigen Beispiel den Strom statt auf 50 A auf 80 A bei Abschaltung einer jeden Stufe ansteigen ließe, würde man die 1. Stufe zu  $2,83 \Omega$ , die 2. zu  $1,4 \Omega$  usf. bekommen. Der Widerstand wäre also in wenigen Absätzen abgeschaltet. In Lichtnetzen sind jedoch solch starke Stromstöße nicht zulässig. Aus dem gleichen Grunde ist es auch oft nicht angängig, auf der ersten Stufe gleich den ganzen Normalstrom des Motors einzuschalten. Man legt dann vor den eigentlichen Anlaßwiderstand noch einige Vorstufen, auf denen der vollbelastete Motor allerdings noch nicht anläuft. Um in einfachen, praktischen Fällen die Stufeneinteilung eines Anlaßwiderstandes rasch angenähert zu haben, kann man im Verhältnis der Skaleneinteilung eines Rechenschiebers teilen.

Es versteht sich von selbst, daß beim Anlassen auf jeder Stufe so lange gewartet werden muß, bis der Motor seine Beschleunigungsperiode vollendet hat, was man einmal an dem Summen des Motors hört, besonders gut aber an dem Rückgang der Stromstärke an einem Strommesser erkennt. Würde man rasch einschalten, so hätte der Motor ja so schnell nicht die nötige Gegenspannung, und die Sicherungen würden infolge der zu hohen Stromstärke durchbrennen. *Also langsam anlassen!* Dies gilt ganz besonders für solche Antriebe, welche schwere bewegte Massen haben, wie Zentrifugen, Schwungradmaschinen. Bei ihnen braucht der Motor auf jeder Stufe mehr Zeit zur Beschleunigung. Ganz kleine Motoren bis etwa 0,5 kW kann man wegen ihres verhältnismäßig hohen

Ankerwiderstandes ohne Anlasser, direkt durch einen Schalter einschalten. Aber auch große Motoren werden zuweilen nur mit einer Stufe angelassen, wie z. B. bei Hebetischen und Rollgängen in Stahlwerken, weil bei diesem rohen Betrieb die Forderung flotten Betriebes die Rücksichten auf das elektrische Material überwiegt.

Die Anlaßschaltung eines Nebenschlußmotors zeigt Abb. 129. Nachdem man sich überzeugt hat, daß der Anlasser in seiner Nullstellung steht, legt man den doppelpoligen Schalter H ein. S sind die Sicherungen. Dann beginnt man mit dem Abschalten der Anlasserstufen. Die Erregerwicklung bekommt bereits auf dem ersten Kontakt volle Spannung, wie man aus dem Schema erkennt. Eine Anlaßschaltung, bei welcher die Erregerwicklung wie punktiert angeschlossen wäre, würde nicht richtig sein, weil die Nebenschlußwicklung parallel am Anker zuerst nur eine ganz kleine Spannung bekäme, wie auch obiges Beispiel zeigt, so daß der schwach erregte Motor kein zum Anlauf hinreichendes Drehmoment entwickeln würde. Das Stillsetzen des Motors kann in umgekehrter Reihenfolge wie das Anlassen erfolgen, es kann aber auch dadurch geschehen, daß man den Schalter H herausnimmt. Nur darf man dann hinterher

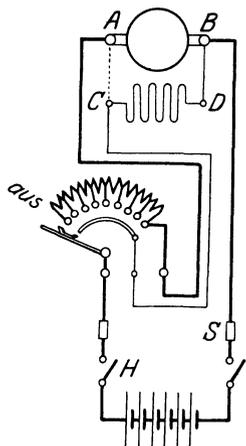


Abb. 129. Anlaßschaltung eines Nebenschlußmotors.

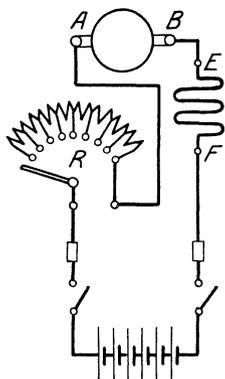


Abb. 130. Anlaßschaltung eines Hauptschlußmotors.

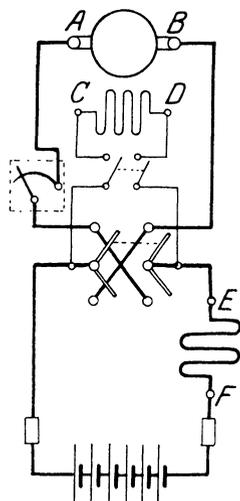


Abb. 131. Umkehrschaltung des Doppelschlußmotors.

nicht vergessen, den Anlasser auf Null zu stellen, weil man sonst beim Wiederanlassen sicherlich einen Kurzschluß macht. Die Anlaßschaltung eines Hauptschlußmotors zeigt Abb. 130, diejenige eines Doppelschlußmotors ergibt sich aus der Vereinigung von Abb. 129 und Abb. 130. Das Anlassen und Stillsetzen erfolgt genau wie bei dem Nebenschlußmotor.

**Die Umkehr der Drehrichtung.** Wie wir die Drehrichtung eines Motors umkehren können, hörten wir bereits auf S. 39. Es ist also entweder das Feld oder der Anker umzupolen. Bei dem Doppelschlußmotor nach Abb. 131 ist zu beachten, daß bei Umpolung des Ankers die Hauptschlußwicklung E—F nicht mit umgepolt wird, weil sonst die beiden Erregerwicklungen entgegenwirken. Wo ungeschulte

Leute derartige Anlasser bedienen, baut man Umschalter und Anlasser zusammen, damit keine fehlerhafte Bedienung möglich ist.

### E. Die Ankerrückwirkung und die Kommutation der Gleichstrommaschinen.

Wenn man eine leerlaufende Gleichstrommaschine erregt, so entsteht ein magnetisches Feld, welches nach Abb. 132 a vollständig symmetrisch zur Achse der Pole verläuft. Die neutrale Zone liegt senkrecht zur Achse der Pole. An dieser Stelle müssen also auch die Bürsten stehen.

Es ist aber nun anzunehmen, daß dieses sog. Hauptfeld Veränderungen erleidet, sobald die Maschine Strom liefert, sobald also der Anker von einem Strom durchflossen ist. Um die Sache recht einfach zu machen, wollen wir zuerst einmal eine ruhende, nicht erregte Maschine betrachten, in deren Anker wir mittels einer fremden Stromquelle einen Strom schicken, der gerade so gerichtet ist, wie ihn die laufende und erregte Maschine selbst erzeugen würde. Der eingeleitete Strom durchfließt die beiden parallel geschalteten Ankerwicklungen, wie dies Abb. 132 b zeigt und erzeugt ein magnetisches Feld. Wir nennen dies von den Ankerwicklungen erzeugte magnetische Feld das Ankerfeld oder das Querfeld, weil seine Richtung quer zum Hauptfeld ist. Man beachte wohl, daß die Windungen der beiden Ankerhälften nicht in gleichem Sinne wirken wie etwa diejenigen der Abb. 42. Dieses Ankerfeld entsteht natürlich in genau gleicher Weise, wenn die Maschine läuft und selbst einen Strom erzeugt. Dann sind aber die beiden Felder,

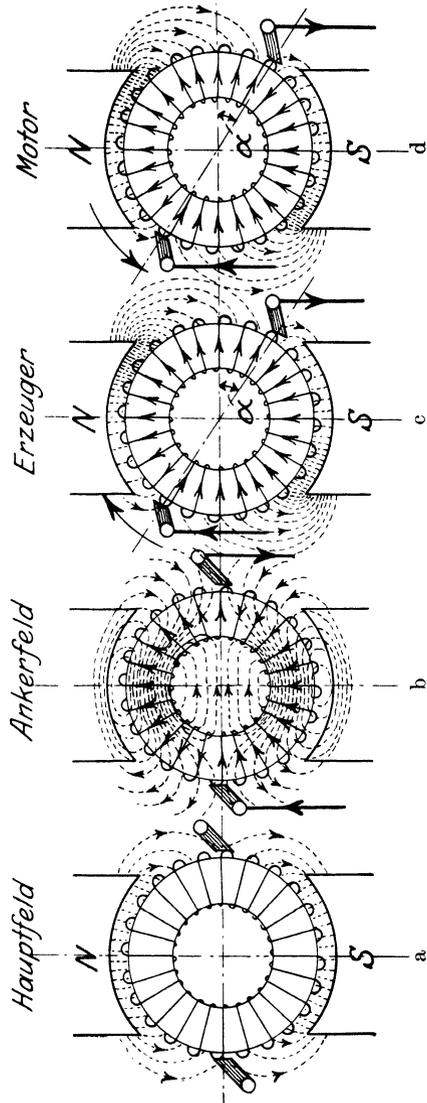


Abb. 132. a = Hauptfeld, b = Ankerfeld, c = resultierendes Feld des Stromerzeugers, d = resultierendes Feld des Motors.

nämlich Hauptfeld und Ankerfeld, gleichzeitig vorhanden und setzen sich zu einem resultierenden Feld zusammen. Welchen Verlauf dieses resultierende Feld nimmt, ersehen wir aus Abb. 132 c. Auf der linken Seite des oberen Pols wirken sich die Kraftlinien der beiden Felder entgegen, es entsteht also an dieser Stelle eine Schwächung des Feldes. Auf der rechten Seite hingegen sind die Kraftlinien des Haupt- und Ankerfeldes gleichsinnig, so daß eine Feldverstärkung eintritt. Diese Einwirkung des Ankerstromes auf das magnetische Feld der Maschine bezeichnen wir als *Ankerrückwirkung*. Dieselbe hat einige uns wenig angenehme Wirkungen zur Folge. Zunächst zeigt uns die Abb. 132 c, daß die neutrale Zone eine Verschiebung erfahren hat, daß also auch die Bürsten, welche doch in der neutralen Zone stehen müssen, ebenfalls zu verschieben sind. Hierbei hat man sich als Regel zu merken, daß der Stromerzeuger eine Verschiebung der Bürsten im Drehsinn verlangt. Diese Verschiebung wäre ja nicht weiter unangenehm, wenn es sich um einen bestimmten Winkel handelte. Dies ist aber gar nicht der Fall. Wäre die Maschine z. B. nur halb belastet, so wäre ihr Anker auch nur von der Hälfte des normalen Stromes durchflossen, und das schwache Ankerfeld, welches dieser Ankerstrom erzeugte, würde natürlich nur eine geringe Verschiebung der neutralen Zone bewirken. Im Leerlauf schließlich, wenn der Anker von gar keinem Strom durchflossen ist, bleibt das Hauptfeld unverändert, wie es Abb. 132 a zeigt. Die Bürstenstellung wechselt also mit der Belastung. Je größer diese ist, um so größer muß auch der Bürstenverschiebungswinkel sein. Ob die Bürstenstellung richtig ist, erkennt man an dem funkenfreien Lauf der Bürsten. Es ist natürlich nicht notwendig, fortgesetzt bei einer Maschine die Bürstenstellung zu ändern, weil meistens die Einstellung auf eine mittlere Bürstenverschiebung genügt, wenn die Belastung nicht allzusehr schwankt.

Eine weitere Folge der Ankerrückwirkung ist eine Schwächung des Hauptfeldes. Das Eisen der leerlaufenden Maschine ist nämlich schon magnetisch gesättigt. Nun haben die Amperewindungen des stromdurchflossenen Ankers das Bestreben, nach Abb. 132 c die linke obere Polseite zu schwächen, die rechte hingegen stärker zu magnetisieren. Eine Schwächung ist natürlich beliebig möglich. Die Verstärkung hingegen ist wegen der Sättigung nur noch in ganz geringem Maße möglich. Im ganzen genommen wird sich also die Gesamtzahl der Kraftlinien, die dem Pol entströmen, vermindern. Eine weitere Feldschwächung entsteht dadurch, daß durch die Bürstenverdrehung die Ankerspulen dem Hauptkraftfluß etwas entgegenwirken. Bei gleichem Erregerstrom hat demnach die belastete Maschine einen geringeren Kraftfluß und damit auch eine geringere erzeugte Spannung als die leerlaufende. Damit wir die alte Spannung wieder bekommen, bleibt uns nichts anderes übrig, als den Erregerstrom zu vergrößern.

Auch bei den Gleichstrommotoren tritt eine Ankerrückwirkung auf, sobald der Motor belastet wird. Tragen wir uns in Abb. 132 d die Stromrichtung wieder in der gleichen Weise wie in Abb. 132 c ein, so würde nach unserer früheren Richtungsregel der Motoranker entgegengesetzt dem Uhrzeiger umlaufen. Wir erkennen also die Regel: Bei dem Gleichstrommotor verlangt die Ankerrückwirkung eine Bürstenverschie-

bung entgegen dem Drehsinn. Daneben tritt natürlich auch bei dem Motor eine Schwächung des Gesamtfeldes ein.

**Die Kommutierung.** In Abb. 133 ist ein Gleichstromerzeuger schematisch dargestellt. Die Ankerspule A befindet sich gerade in der neutralen Zone, dabei sind die beiden Kommutatorsegmente, an die ihre Enden angeschlossen sind, durch die Bürste miteinander verbunden. Ehe die Spule A in diese Stellung kam, befand sie sich unterhalb in den Kraftlinien des Südpols und war von einem Strom  $+I$  durchflossen. Nach dem Durchgang durch die neutrale Zone ist die Stromrichtung entgegengesetzt, also  $-I$ . Abb. 134 stellt die Verhältnisse noch klarer dar. Die Spulen mit den Kommutatorsegmenten K sind gerade ausgestreckt gezeichnet und B stellt eine Bürste dar. Die Spule A kommt in der Pfeilrichtung heran. Ehe das Segment K die Bürste B berührt,

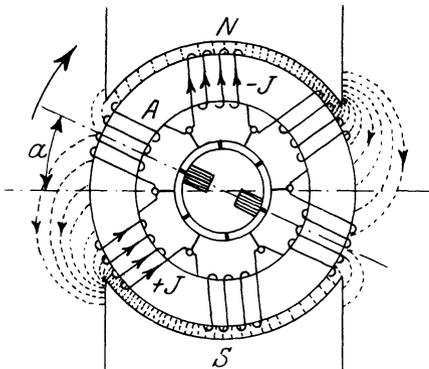


Abb. 133. Die Stromrichtung in einer Ankerspule kehrt sich beim Durchgang durch die neutrale Zone um.

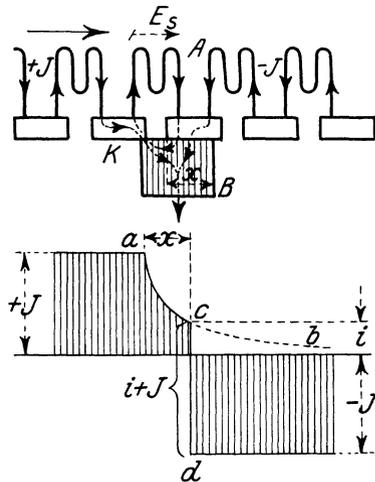


Abb. 134. Kommutierungsvorgang.

ist die Spule von dem Strom  $+I$  durchflossen, im gezeichneten Augenblick aber fängt die Bürste gerade an, beide Segmente zu berühren, an welche Spule A angeschlossen ist. Der aus den Wicklungen links und rechts kommende Strom braucht jetzt gar nicht durch die Spule A hindurch, um zur Bürste B zu gelangen, wie dies die punktierten Stromwege andeuten. Man sollte also annehmen, daß die Spule A während der Zeit, in der sie durch die Bürste kurz geschlossen ist, stromlos sei. Das trifft aber nicht zu, weil die Ankerspule eine gewisse Selbstinduktion besitzt. Wir wissen von S. 47, daß in einer Spule eine Selbstinduktionsspannung entsteht, sobald man den Strom ausschaltet, die das Bestreben hat, den Strom weiterhin aufrecht zu erhalten. Schließt man eine Spule im Augenblick des Ausschaltens kurz, so erzeugt die Selbstinduktionsspannung einen allmählich abnehmenden Strom nach Abb. 71. In dem in Abb. 134 gezeichneten Augenblick wird der Strom  $+I$ , der vorher durch die Spule A floß, vorbeigeleitet, es entsteht also in A eine Selbstinduktionsspannung, welche die eingetragene Richtung hat, und die ebenfalls einen abnehmenden Strom nach der Linie  $a-b$  erzeugt. Dieser

Selbstinduktionsstrom würde nach einiger Zeit wohl bis auf Null abnehmen, hier bleibt ihm aber die dazu nötige Zeit nicht. Denn wenn sich der Anker um die Strecke  $x$  weiterbewegt hat, verläßt die Bürste schon das rechte Segment von A, und von diesem Augenblick an muß unbedingt der ganze Strom  $-I$  durch A hindurchfließen. Bis zu diesem Augenblick ist der Selbstinduktionsstrom in der Spule A bis auf den Betrag  $i$  gesunken. Die Stromänderung in dem Augenblick, in dem die Bürste das Segment verläßt, ist also gleich  $+i + I$ , also sehr groß, und erfolgt in außerordentlich kurzer Zeit. Die Selbstinduktionsspannung, welche durch eine Stromänderung und damit eine Kraftflußänderung in einer Spule entsteht, ist aber durch Gleichung 19 bestimmt, woraus wir ersehen, daß bei sehr kleiner Zeit  $t$  eine sehr große Selbstinduktionsspannung entstehen muß. Diese macht sich wie bei jedem Ausschalten einer Spule dadurch bemerkbar, daß ein Ausschaltlichtbogen entsteht, der hier also an der ablaufenden Bürstenkante auftreten muß. Die Größe der in der Ankerspule entstehenden Selbstinduktionsspannung und damit des Bürstenfeuers hängt in erster Linie von der Belastung

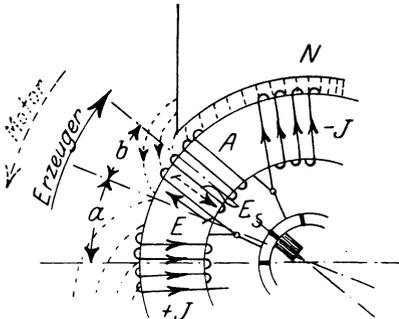


Abb. 135. Durch die Bürstenverschiebung  $b$  entsteht in der kurzgeschlossenen Spule eine Spannung, welche die Selbstinduktionsspannung aufhebt.

ab. Je größer der Strom ist, der in der Ankerwicklung fließt und kommutiert werden muß, um so größer ist auch der Stromsprung  $c-d$  in Abb. 134 und damit die Selbstinduktionsspannung. Kurzschlüsse der Maschine können sogar zu einem Feuer Veranlassung geben, welches sich über den ganzen Kollektor erstreckt und Rundfeuer genannt wird.

Die Zerstörungen, welche heftiges Bürstenfeuer am Kollektor anrichten kann, zwingen uns zu Gegenmaßregeln. Schon bei den Elementen lernten wir kennen, daß wir eine Spannung immer durch Gegenschaltung einer anderen Spannung aufheben können. Dies wollen wir auch hier tun. Wir bringen in den Spulenstromkreis eine Spannung, welche der Selbstinduktionsspannung gleich und entgegengesetzt ist und sie deshalb unwirksam macht. Diese Gegenspannung kann man nun am einfachsten dadurch erzeugen, daß man die Bürsten nicht in die neutrale Zone stellt, sondern nach Abb. 135 um einen Winkel  $b$  in das magnetische Feld verrückt, und zwar bei dem Stromerzeuger wieder im Drehsinn. Dann schneiden die Spulenleiter in dem Augenblick, in dem sie von der Bürste kurz geschlossen werden. Kraftlinien, wodurch eine Spannung  $E$  in der Spule erzeugt wird, welche die eingezeichnete Richtung hat. Die Selbstinduktionsspannung  $E_s$  ist umgekehrt gerichtet, denn sie muß in ihrer Richtung mit dem vorher fließenden Strom übereinstimmen. Da nun das magnetische Feld immer stärker wird, je näher man dem Pol kommt, ist es leicht möglich den Verschiebungswinkel  $b$  so zu bemessen, daß sich die erzeugte Spulen-

spannung mit der Selbstinduktionsspannung aufhebt. Wechselnde Belastung verlangt natürlich auch hier einen verschiedenen Verschiebungswinkel.

Bei dem Gleichstrommotor ist bei gleichen Stromrichtungen die Drehrichtung umgekehrt, wie Abb. 135 darstellt. Jetzt ist also die Spule vor der Stromwendung von einem entgegengerichteten Strom  $-I$  durchflossen. Die entstehende Selbstinduktionsspannung ist also auch entgegengesetzt gerichtet, und es ist demgemäß zur Aufhebung derselben auch eine umgekehrte Gegenspannung zu erzeugen. Diese umgekehrte Spannung wird aber schon richtig erzeugt, wenn wir die Bürsten in der beim Erzeuger um  $a + b$  verschobenen Lage stehen lassen, weil jetzt doch der Drehsinn umgekehrt ist.

Wir brauchen demnach beim *Stromerzeuger*:

Eine Bürstenverschiebung  $a$  im Drehsinn wegen der Ankerückwirkung, und ferner eine Verschiebung  $b$  ebenfalls im Drehsinn wegen der Spulenselbstinduktion.

Der *Motor* hingegen verlangt:

Eine Bürstenverschiebung  $a$  entgegen dem Drehsinn, und eine Verschiebung  $b$  ebenfalls entgegen dem Drehsinn.

Motoren, deren Drehsinn wechselt, verlangen also eigentlich immer eine Umstellung der Bürsten, da dies praktisch nicht durchführbar ist, stellt man sie in die Mittellage.

**Die Wendepole.** Die Beseitigung der Funkenbildung durch Bürstenverschiebung ist keine gute Lösung der Kommutierung. Sie genügte infolgedessen nicht mehr, als die Anforderungen an Maschinen und Motoren wuchsen und man gezwungen war, dieselben so knapp wie nur möglich zu bemessen. Eine günstigere Lösung wurde durch die *Wendepole* oder *Folgepole* gefunden, dies sind kleine *Hilfspole*, welche man zwischen den Hauptpolen anordnet, wie dies Abb. 136 andeutet. Man erreicht durch sie das gleiche wie durch eine Bürstenverschiebung, nämlich, daß die von der Bürste kurzgeschlossene Ankerspule Kraftlinien schneidet, so daß in ihr eine der Selbstinduktionsspannung entgegengerichtete Spannung entsteht. Die Bürsten bleiben in der neutralen Zone, in welcher auch die Wendepole angeordnet sind, stehen. Damit eine der Selbstinduktionsspannung entgegengerichtete Spannung  $E$  entsteht, wenn die Ankerspule die Kraftlinien des Wendepols schneidet, muß dieser in Abb. 136 links ein Nordpol sein. Wir haben uns also als Regel zu merken:

Bei dem Stromerzeuger muß auf jeden Hauptpol in der Drehrichtung ein entgegengesetzter Wendepol folgen.

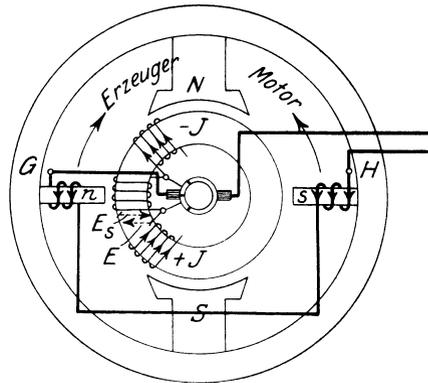


Abb. 136. Wendepole.

Bei einem Motor folgt auf einen Hauptpol in der Drehrichtung ein gleichnamiger Wendepol.

Durch die Anordnung von Wendepolen hat man aber erst viel gewonnen, wenn man dieselben vom Ankerstrom erregen läßt, wozu wenige Windungen starken Drahtes genügen. Dann wird nämlich der Kraftfluß des Wendepols bei großer Belastung, wenn also der Ankerstrom groß ist, auch groß sein, so daß eine große Gegenspannung in der kurzgeschlossenen Ankerspule erzeugt wird. Nimmt hingegen bei geringerer Belastung der Ankerstrom ab, so erzeugt derselbe einen kleineren Wendepolkraftfluß und damit eine geringere Gegenspannung. Im Leerlauf schließlich sind die Wendepole unerregt, so daß überhaupt keine Gegenspannung in der kurzgeschlossenen Ankerspule erzeugt wird. Wir sehen also, daß bei jeder Belastung die erzeugte Gegenspannung der Selbstinduktionsspannung gleich ist. Nur bei Kurzschlüssen kann man natürlich nicht erwarten, daß der sehr große Ankerstrom auch einen entsprechend großen Wendepolkraftfluß erzeugt, weil das Eisen magnetisch gesättigt ist. In solchen Ausnahmefällen ist deshalb ein Feuern nicht zu vermeiden.

Nach dem Früheren müssen die Wendepole bestimmte Polarität haben. Um diese festzustellen, muß man die Bürsten der belasteten Maschine beobachten. Im Notfall kann auch mit einer Magnetnadel (Kompaß) die Polarität der einzelnen Pole festgestellt werden. Man darf aber keineswegs jedes Feuern auf falsche Schaltung der Wendepole zurückführen. Auch der Kommutator kann die Ursache sein, wie bereits auf Seite 75 betrachtet wurde. Ferner wird auch eine ungleiche Belastung der Ankerzweige ein Feuern veranlassen. Besonders achtgeben muß man bei Umkehr der Drehrichtung. Erreicht man diese durch Umkehr des Ankerstromes, so darf man nicht vergessen, die Wendepole mit umzupolen. Als Bezeichnung der Wendepole wollen wir G—H beibehalten.

Wir wollen nun Abb. 134 noch einmal betrachten. In der kurzgeschlossenen Ankerspule nimmt der Selbstinduktionsstrom nach der Linie a—b ab. Würde der Widerstand des Spulenkreises größer sein, so würde die Linie schneller abfallen. Da wir den Spulenwiderstand mit Rücksicht auf einen guten Wirkungsgrad nicht vergrößern dürfen, bringen wir dadurch einen größeren Widerstand in den Kreis hinein, daß wir statt Kupferbürsten Kohlenbürsten verwenden. Wir können ferner die Gefahr des Funkens dadurch vermindern, daß wir den Kurzschluß durch die Bürste länger aufrecht erhalten, daß wir also länger warten, bis der Selbstinduktionsstrom auf einen geringeren Betrag i herabgesunken ist. Dies ist bei langsam laufenden Maschinen der Fall. Eine Erhöhung der Umlaufzahl wird also die funkenfreie Kommutierung erschweren. Vor allem wird aber die Funkenbildung durch die Selbstinduktion der Ankerspule beeinflußt. Ist diese groß, hat also die Ankerspule viele Windungen, und können die Kraftlinien um den Ankerleiter leicht verlaufen, so wird eine hohe Selbstinduktionsspannung in der Ankerspule bei der Stromwendung entstehen, welche uns Schwierigkeiten machen kann. Wir werden also im Interesse eines funkenfreien Laufes bestrebt sein müssen, die Windungszahl so klein wie möglich zu halten und offene Ankernuten zu nehmen, weil dann die Ankerkraftlinien nicht so leicht um die Ankerleiter herum verlaufen können. Maschinen für hohe Spannungen, die ja zur Erzeugung der hohen Spannung viele Ankerleiter erfordern, werden also leicht Kommutierungsschwierigkeiten bereiten.

Wendepole wird man also immer nötig haben bei Maschinen für hohe Spannungen, bei Maschinen, die starken Belastungsschwankungen ausgesetzt sind und ferner bei Motoren, mit denen man hohe Umlaufzahlen erreichen will.

**Die Kompensationswicklungen.** Es gibt Maschinen, bei denen selbst eine Windung in jeder Ankerspule noch zu viel ist, um so mehr, wenn es

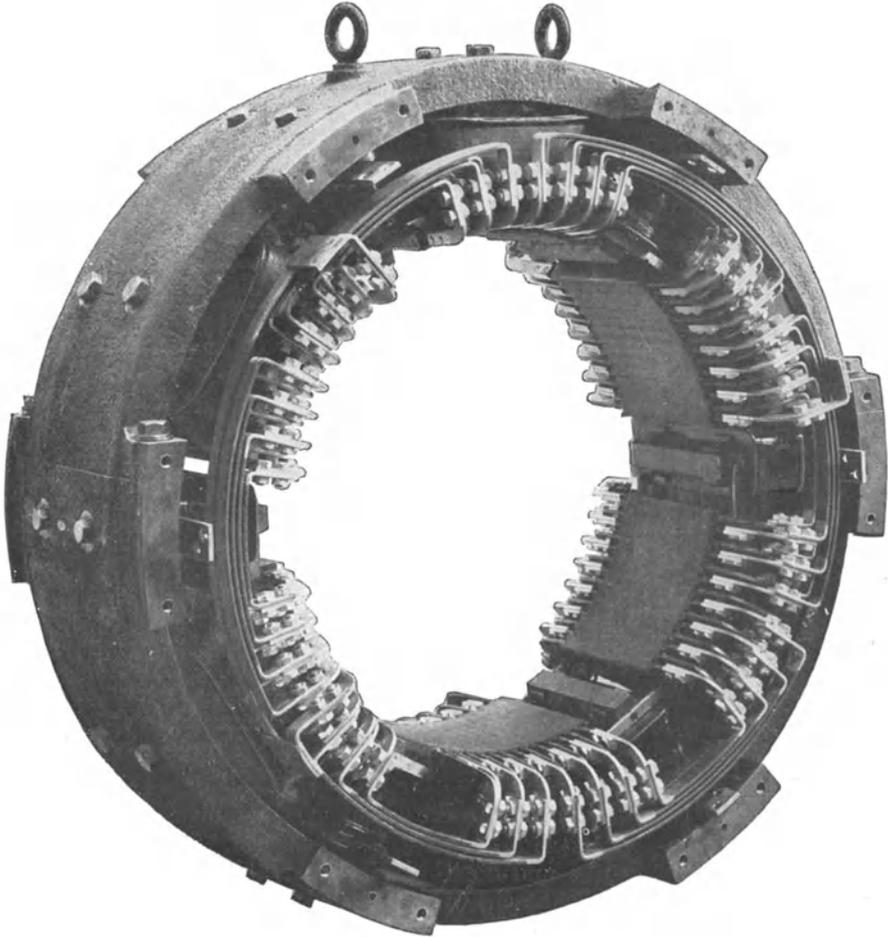


Abb. 137. Magnetgestell einer Gleichstrom-Turbomaschine mit Kompensationswicklung.

sich um durch Dampfturbinen angetriebene, schnelllaufende Maschinen handelt, sog. *Turbomaschinen*. Bei diesen Maschinen hilft man sich dadurch, daß man das Ankerfeld an der Entstehung verhindert und erreicht dies durch sog. *Kompensationswicklungen*, welche im Magnetgehäuse untergebracht sind, und deren Achse in die neutrale Zone fällt. Dieselben sind vom Ankerstrom durchflossen und heben also das Anker-

feld bei jeder Belastung vollständig auf. Abb. 137 zeigt ein Magnetgehäuse einer Gleichstrom-Turbomaschine mit Wendepolen und Kompensationswicklung. Durch diese letztere Wicklung wird zwar die Stromwendung nicht direkt verbessert, man erreicht aber, daß das Hauptfeld bei allen Belastungen ziemlich symmetrisch bleibt, wodurch sich die Spannung viel gleichmäßiger über die verschiedenen Segmente verteilt. Überschlüge zwischen den Segmenten und Rundfeuer können also nicht auftreten.

## F. Die Verluste der Gleichstrommaschinen.

Die Leistungsfähigkeit einer elektrischen Maschine ist durch die Erwärmung begrenzt. Die Erwärmung entsteht durch die Verluste, welche in jeder Maschine unvermeidlich sind. Wir hörten schon, daß wir die Verluste zwar nach Belieben klein halten können, aber dann würden sich so teure Maschinen ergeben, daß ihr Bau unausführbar wäre. Der Konstrukteur einer elektrischen Maschine muß deshalb einen Mittelweg gehen und so bauen, daß bei mäßigen Verlusten eine preiswürdige Maschine entsteht.

Die in einer elektrischen Maschine auftretenden Verluste sind:

1. Kupferverluste im Anker =  $\mathfrak{G}_a$ ,
2. Kupferverluste in der Erregerwicklung =  $\mathfrak{G}_e$ ,
3. Wirbelstromverluste im Eisen =  $\mathfrak{G}_w$ ,
4. Hysteresisverluste im Eisen =  $\mathfrak{G}_h$ ,
5. Reibungsverluste =  $\mathfrak{G}_r$ .

Die *Kupferverluste* entstehen in dem Widerstand  $r$  der Ankerwicklung, die von dem Strome  $I$  durchflossen ist und betragen

$$\mathfrak{G}_a = I^2 \cdot r.$$

Die Verluste in der Erregerwicklung kann man bei Hauptschlußmaschinen gleich mit den Kupferverlusten des Ankers zusammenfassen, indem man unter dem Widerstand  $r$  in diesem Falle die Summe von Ankerwiderstand und Erregerwicklungswiderstand versteht. Beide sind ja bekanntlich von dem Hauptstrom durchflossen. Bei der Nebenschlußmaschine beträgt der Kupferverlust in der Erregerwicklung:

$$\mathfrak{G}_e = I_n \cdot e,$$

worin  $I_n$  der Erregerstrom und  $e$  die Klemmenspannung ist.

Die *Wirbelstromverluste* im Ankereisen sind nach S. 73 um so größer, je größer die Feldstärke und die Umlaufzahl ist. Sei der Wirbelstrom im Eisen  $I_w$  und der elektrische Widerstand des Ankereisens  $R$ , so ist der Wirbelstromverlust

$$\mathfrak{G}_w = I_w^2 \cdot R$$

oder unter Berücksichtigung des Ohmschen Gesetzes:

$$\mathfrak{G}_w = \frac{E^2}{R^2} \cdot R.$$

Da aber nach Gleichung 23 auch  $E = c \cdot n \cdot \mathfrak{C}$  ist, folgt:

$$\mathfrak{G}_w = \frac{c^2 \cdot n^2 \cdot \mathfrak{C}^2}{R},$$

oder wenn man die Konstanten zusammenfaßt:

$$\mathcal{G}_w = C \cdot n^2 \cdot \mathcal{E}^2.$$

Die Wirbelstromverluste wachsen also im quadratischen Verhältnis mit der Umlaufzahl und der Feldstärke.

Die *Hysteresisverluste* müssen nach S. 74 der Umlaufzahl direkt proportional sein. Nach Versuchsergebnissen wachsen sie ferner mit der 1,6. Potenz der Feldstärke. Man kann also schreiben:

$$\mathcal{G}_h = c \cdot n \cdot \mathcal{E}^{1,6}.$$

Die *Reibungsverluste* setzen sich aus Lager-, Bürsten- und Luftreibung zusammen und sind im allgemeinen der Umlaufzahl direkt proportional, also:

$$\mathcal{G}_r = c \cdot n.$$

**Der Wirkungsgrad.** Unter demselben versteht man das Verhältnis

$$\eta = \frac{\text{abgegebene Leistung}}{\text{zugeführte Leistung}}.$$

Da wegen der Verluste die zugeführte Leistung immer größer als die abgegebene sein muß, ist der Wirkungsgrad immer eine Zahl kleiner als 1.

Bei einem Stromerzeuger ist die abgegebene Leistung  $e \cdot I$ , die von der Antriebsmaschine gelieferte muß um die Verluste größer sein, also gleich

$$e \cdot I + \mathcal{G}_a + \mathcal{G}_e + \mathcal{G}_w + \mathcal{G}_h + \mathcal{G}_r.$$

Der Wirkungsgrad des Stromerzeugers ist demnach:

$$\eta = \frac{e \cdot I}{e \cdot I + \mathcal{G}_a + \mathcal{G}_e + \mathcal{G}_w + \mathcal{G}_h + \mathcal{G}_r} \dots \dots \dots 29$$

Bei einem Elektromotor hingegen beträgt die aufgenommene Leistung  $e \cdot I$  und die abgegebene ist um die Verluste kleiner. Der Wirkungsgrad des Elektromotors ist also:

$$\eta = \frac{e \cdot I - \mathcal{G}_a - \mathcal{G}_e - \mathcal{G}_w - \mathcal{G}_h - \mathcal{G}_r}{e \cdot I} \dots \dots \dots 30$$

**Die Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Maschinengröße.**

Große Maschinen gestatten eine wesentlich bessere Ausnützung des Baumaterials, infolgedessen können bei ihnen die Verluste im Verhältnis niedriger gehalten werden. Z. B. nimmt bei kleinen Maschinen schon die Baumwollisolation der Drähte einen verhältnismäßig viel größeren Raum ein als bei großen Maschinen. Die Folge davon ist, daß große Maschinen mit hohem Wirkungsgrad arbeiten, kleine Maschinen hingegen mit niedrigem. Die durchschnittlich üblichen Wirkungsgrade bei Maschinen verschiedener Größe gehen aus folgender Tabelle hervor:

|                 |                |
|-----------------|----------------|
| 1 kW . . . .    | $\eta = 0,75$  |
| 5 kW . . . .    | $\eta = 0,85$  |
| 10 kW . . . .   | $\eta = 0,88$  |
| 20 kW . . . .   | $\eta = 0,90$  |
| 50 kW . . . .   | $\eta = 0,915$ |
| 100 kW . . . .  | $\eta = 0,93$  |
| 1000 kW . . . . | $\eta = 0,95.$ |

Hierin ist vorausgesetzt, daß die Maschinen normale Umlaufzahlen haben. Bei Langsamläufern oder Schnellläufern ist der Wirkungsgrad niedriger. Wir ersehen aus der Tabelle, daß es nicht ratsam ist, mehrere kleinere Maschinen statt einer großen aufzustellen. Allerdings muß die große Maschine voll belastet sein, denn unterbelastet hat sie nicht den oben angegebenen hohen Wirkungsgrad.

**Der Wirkungsgrad bei veränderter Belastung.** Da die Verluste eines Erzeugers oder eines Motors sich mit wechselnder Belastung ändern, kann auch der Wirkungsgrad nicht konstant bleiben. Betrachten wir zunächst einmal einen *Nebenschlußmotor* bei veränderlicher Belastung. Wie wir wissen, ändert sich dessen Umlaufzahl bei unveränderter Erregung und bei wechselnder Last nur unwesentlich. Wir können daraus schließen, daß die Reibungsverluste sowohl, als auch die Eisenverluste  $\mathcal{E}_f$  durch Wirbelströme und Hysteresis bei allen Belastungen nahezu unverändert sind. Wir sehen dabei von den geringen Feldstärkenänderungen durch Ankerrückwirkung ab. In Abb. 138 haben wir diese Verluste in

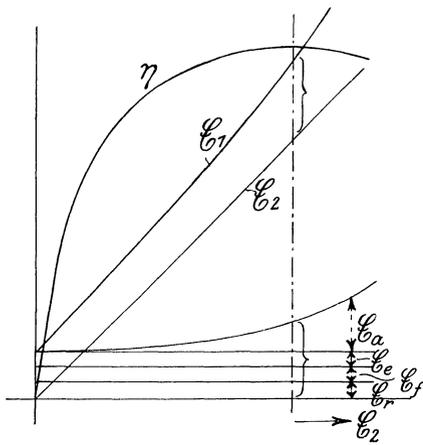


Abb. 138. Verluste und Wirkungsgrad eines Nebenschlußmotors bei wechselnder Belastung.

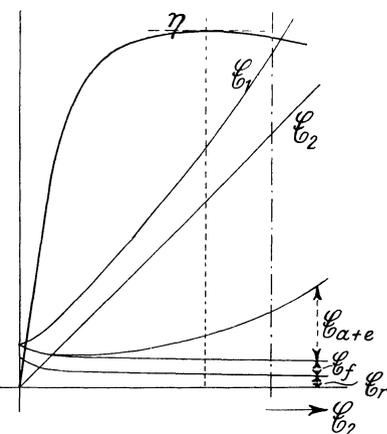


Abb. 139. Verluste und Wirkungsgrad eines Hauptschlußmotors bei wechselnder Belastung.

Abhängigkeit von der abgegebenen Belastung  $\mathcal{E}_2$  aufgetragen, ebenso ist der Verlust in der Erregerwicklung  $\mathcal{E}_e$  aufgetragen. Auch dieser ist konstant, weil sich die Spannung nicht ändert. Nicht konstant ist hingegen der Kupferverlust im Anker. Derselbe wächst mit dem Quadrat des Belastungsstromes  $I$ . Hat man in der Darstellung horizontal und vertikal den gleichen Leistungsmaßstab genommen, so braucht man jetzt nur eine Linie unter  $45^\circ$  zu ziehen. Dieselbe stellt dann die abgegebene Leistung  $\mathcal{E}_2$  dar, und zu ihr addieren wir nun alle Verluste, um damit die Linie  $\mathcal{E}_1$  der aufgenommenen Leistung zu bekommen. Das Verhältnis  $\mathcal{E}_2 : \mathcal{E}_1$ , welches wir dann für verschiedene Belastungen bilden können, liefert uns dann die Linie des Wirkungsgrades  $\eta$ . Wir ersehen, daß der Wirkungsgrad bei mittleren Belastungen, sowie auch bei Überlastungen auf hohen Werten bleibt und erst bei schwacher Belastung

und im Leerlauf schlecht wird. Dies ist ein wichtiger Vorzug des Elektromotors anderen Antriebsmaschinen gegenüber.

In Abb. 139 ist die gleiche Darstellung für einen *Hauptschlußmotor* durchgeführt. Auch bei ihm ändern sich die Eisenverluste nicht sehr, weil bei schwacher Belastung die Umlaufzahl steigt, dafür aber das Magnetfeld, wegen der niedrigeren Erregung durch den Hauptstrom, schwächer wird. Die Reibungsverluste sind bei schwacher Belastung und hoher Umlaufzahl groß. Die Kupferverluste im Anker und in der Erregerwicklung jedoch steigen wieder im quadratischen Verhältnis. Die Wirkungsgradlinie ergibt einen etwas flacheren Verlauf als bei dem Nebenschlußmotor, weil bei letzterem die Verluste auch bei schwachen Belastungen einen höheren Wert behalten. Der Hauptstrommotor arbeitet also bei Unterbelastung wirtschaftlicher.

Der *Doppelschlußmotor* liegt zwischen diesen beiden Motoren und nähert sich dem einen oder anderen, je nachdem seine Nebenschlußwicklung oder Hauptschlußwicklung überwiegt.

Für manche Zwecke ist es wünschenswert, schnell zu wissen, wie groß der Wirkungsgrad bei irgend einer Belastung ist, wenn derselbe für normale Belastung gegeben ist. Um eine annähernde Berechnung zu finden, wollen wir annehmen, daß sich die Verluste aus einem für alle Belastungen konstanten Betrag  $k$  und einem mit der Belastung quadratisch wachsenden, also veränderlichen Betrag  $v$  zusammensetzen. Das Verhältnis der konstanten Verluste zu den veränderlichen bei normaler Belastung sei mit  $a$  bezeichnet, also

$$a = \frac{k}{v}.$$

Der Verlustfaktor  $a$  hängt von der Maschinenart ab. Bei langsam laufenden Hauptschlußmotoren kann  $a = 0,5$ , bei schnell laufenden bis 1 angenommen werden. Bei Nebenschlußmotoren ist  $a = 1$  und bei Schnellläufern bis 2. Doppelschlußmotoren liegen je nach ihrem Wicklungsverhältnis zwischen den genannten Zahlen.

Bei Normallast kann man sich also die Verluste zerlegt denken in den konstanten Teil  $k$  und den mit der Belastung wechselnden Teil  $v = k : a$ . Beträgt die Belastung das  $x$  fache der normalen, so sind die veränderlichen Verluste das  $x^2$  fache geworden. Die gesamten Verluste bei  $x$  facher Belastung sind demnach

$$k + \left(\frac{k}{a}\right) x^2.$$

Der Wirkungsgrad kann nunmehr leicht berechnet werden.

**Beispiel:** Ein 10 kW-Nebenschlußmotor habe bei Normallast den Wirkungsgrad 0,88. Wie groß ist sein Wirkungsgrad bei halber Last? Die abgegebene Leistung ist 10000 W, die aufgenommene hingegen 10000 : 0,88 = 11360 W. Die normalen Verluste betragen also 11360 - 10000 = 1360 W. Unter Annahme eines Verlustfaktors  $a = 1$  ist bei Normallast

$$k + \frac{k}{a} = 1360$$

folglich  $k = 680$  W. Die veränderlichen Verluste betragen bei Normallast ebenfalls  $v = k : a = 680$  W. Bei  $x = 0,5$  facher Belastung hingegen betragen sie

$$680 \cdot 0,5^2 = 170 \text{ W.}$$

Die ganzen Verluste bei halber Last betragen also

$$k + v_x = 680 + 170 = 850 \text{ W.}$$

Da die abgegebene Leistung 5000 W beträgt, ergibt sich der Wirkungsgrad zu

$$\eta_x = \frac{5000}{5000 + 850} = 0,855.$$

Ein jeder Motor hat bei einer gewissen Belastung  $x$  den Höchstwert seines Wirkungsgrades. Man kann nun finden, daß

$$x = \sqrt{a} \text{ ist.}$$

Ein Motor hat demnach den Verlustfaktor 1, wenn er bei normaler Belastung ( $x = 1$ ) den Höchstwert seines Wirkungsgrades zeigt.

**Beispiel:** Ein Motor hat die in Abb. 139 dargestellte Wirkungsgradlinie. Wie groß ist der Verlustfaktor  $a$ ?

Die strichpunktierte Belastung ist die normale. Durch Abmessen findet man, daß der Höchstwert des Wirkungsgrads bei 73 % Belastung liegt, also  $x = 0,73$ . Folglich

$$a = x^2 = 0,73^2 = 0,53.$$

**Die Messung des Wirkungsgrades.** Die Bestimmung kann entweder mit einem Bremsbaum oder durch Messung der Verluste erfolgen. Im ersteren Fall bringen wir bei normaler Drehzahl des Motors den Hebel nach Abb. 140 ins Gleichgewicht. Die abgegebene Leistung in kW ist dann nach den Regeln der Mechanik  $\frac{G \cdot 2 \cdot l \cdot \pi \cdot n}{102 \cdot 60}$ , dieselbe muß aber auch gleich der zugeführten Leistung in kW mal dem Wirkungsgrad sein. Also:

$$\frac{G \cdot 2 \cdot l \cdot \pi \cdot n}{102 \cdot 60} = \frac{e \cdot I}{1000} \cdot \eta \cdot 31$$

Hieraus kann  $\eta$  berechnet werden.  $l$  ist in Metern einzusetzen.

Bei der Wirkungsgradbestimmung durch Verlustmessung läßt man die Maschine, einerlei ob es ein Erzeuger oder ein Motor ist, als Motor

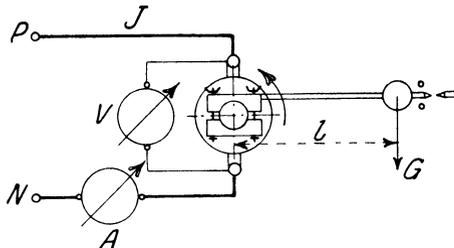


Abb. 140. Bremsung eines Motors.

leer laufen und mißt die zugeführte Leistung, die ja vollständig zur Deckung der Verluste dient. Zieht man von diesen Leerlaufverlusten die Kupferverluste im Anker und in der Erregung ab, so verbleiben die Reibungs- und Eisenverluste. Dieselben stimmen mit denen bei Belastung überein, wenn man dafür gesorgt hat, daß bei dem Leerlaufversuch sowohl die Umlaufzahl, als auch die erzeugte Spannung mit den Werten der belasteten Maschine übereinstimmt. Die Kupferverluste im Anker und in der Erregerwicklung lassen sich nach einer Messung der Widerstände von Anker und Feldwicklung leicht berechnen, so daß dann nichts mehr im Wege steht, den Wirkungsgrad aus Gleichung 29 oder Gleichung 30 zu berechnen.

**Beispiel:** Ein Nebenschlußmotor wurde mit einem Bremsbaum nach Abb. 140 abgebremst. Er nahm dabei, an 220 V liegend, 60 A auf und machte 850 minutliche Umläufe. Wie groß ist der Motorwirkungsgrad, wenn das Bremsgewicht von 16 kg, bei einem Hebelarm von 0,83 m im Gleichgewicht war?

Nach Gleichung 31 ist:

$$\eta = \frac{1000 \cdot G \cdot 2 \cdot I \cdot \pi \cdot n}{102 \cdot 60 \cdot e \cdot I} = \frac{1000 \cdot 16 \cdot 2 \cdot 0,83 \cdot 3,14 \cdot 850}{102 \cdot 60 \cdot 220 \cdot 60} = 0,88.$$

### G. Das Verhalten der Gleichstromerzeuger.

1. Die fremd erregte Maschine. a) *Im Leerlauf.* Eine leerlaufende Maschine liefert keinen Strom, ein Spannungsverlust  $I \cdot r$  tritt also nicht im Anker auf, so daß an den Klemmen die volle erzeugte Spannung  $E$  herrscht.

Wie ändert sich die erzeugte Spannung mit zunehmendem Erregerstrom  $I_n$ , wenn die Umlaufzahl konstant gehalten wird?

Abb. 141 stellt das Schaltungsschema dar. Wir wissen nach S. 32, daß der Kraftfluß der Maschine nach der Magnetisierungslinie ansteigt, wenn wir den Erregerstrom  $I_n$  mit Hilfe des Magnetreglers  $M$  immer mehr verstärken. Nach Gleichung 23 ist  $E = c \cdot n \cdot \mathfrak{S}$ . Da aber hier  $n$  konstant gehalten wird, können wir  $n$  mit der anderen Konstanten  $c$  zu einer neuen Konstanten  $C$  zusammenfassen und schreiben:

$$E = C \cdot \mathfrak{S},$$

d. h., die erzeugte Spannung ändert sich gerade so wie der Kraftfluß, und da dieser sich nach der Magnetisierungslinie ändert, muß sich auch die Spannung nach dieser Linie ändern. Abb. 142 stellt diese Abhängigkeit dar. Die Linie beginnt etwas über dem Nullpunkt, weil der remanente

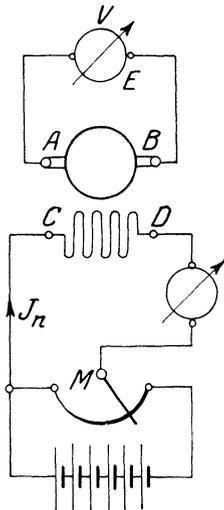


Abb. 141. Die fremd erregte Maschine im Leerlauf.

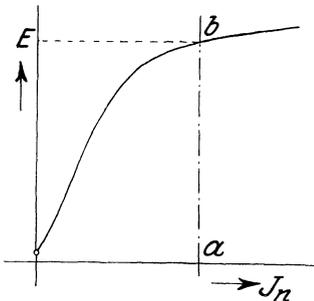


Abb. 142. Die Leerlaufspannung steigt bei wachsender Erregung nach der Magnetisierungslinie an.

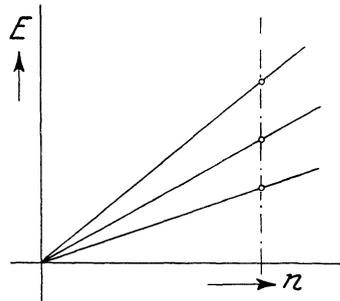


Abb. 143. Die Leerlaufspannung wächst proportional mit der Drehzahl.

Magnetismus bereits eine Spannung von 2—4% erzeugt. Wir bezeichnen diese Schaulinie als die *Leerlaufskennlinie* der Maschine.

Wie ändert sich die erzeugte Spannung, wenn wir bei konstantem Erregerstrom  $I_n$  die Umlaufzahl verändern?

In der Beziehung  $E = c \cdot n \cdot \mathfrak{S}$  ist in diesem Falle der Kraftfluß konstant, weil der Erregerstrom unverändert bleibt. Wir können deshalb die Konstanten wieder zusammenfassen und schreiben:

$$E = C \cdot n,$$

d. h. die erzeugte Spannung ist der Umlaufzahl proportional. Eine Erhöhung derselben auf das Doppelte bringt auch eine doppelt so große Spannung mit sich. Eine Schaulinie, welche diese Abhängigkeit darstellt, muß notwendig eine gerade Linie sein. Abb. 143 stellt den Verlauf dar, und zwar die untere Gerade, wenn ein kleiner Erregerstrom konstant gehalten wird, die oberen Linien hingegen entstehen bei höherer Erregung. Legt man wie gezeichnet einen Schnitt durch die Linienschar, so ist für alle Schnittpunkte die Umlaufzahl die gleiche. Trägt man sich die dadurch sich ergebenden zusammengehörigen Werte von  $E$  und  $I_n$  als Schaulinie auf, so erhält man die Leerlaufkennlinie.

b) *Bei Belastung.* Wie ändert sich mit zunehmender Belastung die Klemmenspannung, wenn die Umlaufzahl und Erregung konstant bleibt?

Bei normaler Erregung und Umlaufzahl erzeugt die Maschine im Leerlauf die in Abb. 142 angegebene Spannung  $a-b$ . In unserer neuen Darstellung in Abb. 144 muß also für den Leerlauf, also  $I = 0$ , die gleiche Spannung  $E$  aufgetragen werden. Wenn wir aber dann nach Schaltung 145 der Maschine einen Strom entnehmen, dadurch, daß wir Lampen einschalten, dann wird die erzeugte Spannung nicht mehr in der alten

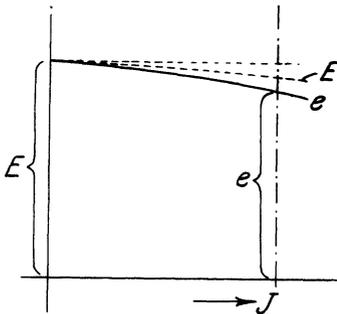


Abb. 144. Die Klemmenspannung der fremd erregten Maschine sinkt etwas mit zunehmender Belastung.

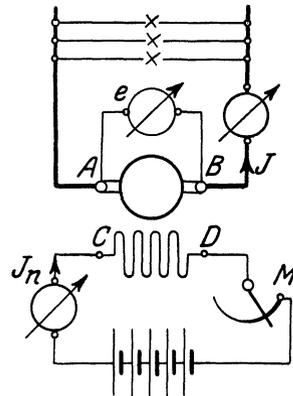


Abb. 145. Die fremd erregte Maschine bei Belastung.

Größe vorhanden sein, wie es die punktierte Linie in Abb. 144 angibt, sondern die erzeugte Spannung  $E$  nimmt mit zunehmender Belastung etwas ab, weil doch durch die Ankerrückwirkung (s. S. 85) eine Feldschwächung eintritt, die um so größer ist, je größer der Belastungsstrom ist. Aber auch diese Spannung zeigt der Spannungsmesser am Anker nicht, weil infolge des Ankerwiderstandes noch ein Ohmscher Spannungsverlust  $I \cdot r$  entsteht, dessen Größe auch mit zunehmender Belastung wächst, und der noch von der erzeugten Spannung  $E$  abziehen ist. Erst dann ergibt sich die Linie der Klemmenspannung  $e$ . Der Unterschied zwischen der Klemmenspannung der vollbelasteten

Maschine und der Leerlaufspannung ist nicht sehr groß, er beträgt je nach der Maschinengröße 5—10%.

Da wir fast immer aber die Spannung in einer elektrischen Zentrale konstant halten müssen, bleibt uns nichts übrig, als durch Verstärkung des Erregerstromes  $I_n$  die Spannung  $e$  auf den Leerlaufwert  $E$  hinaufzuregeln.

Aber auch noch aus anderem Grunde brauchen wir den Magnetregler  $M$ . Bei längerem Betriebe erwärmt sich die Magnetwicklung, wodurch ihr Widerstand zunimmt (s. S. 8). Durch Abschaltung von Vorschaltwiderstand muß dann der gesunkene Erregerstrom wieder auf den früheren Wert gebracht werden.

**2. Die Nebenschlußmaschine.** a) *Im Leerlauf.* Wie ändert sich die erzeugte Spannung bei wachsendem Erregerstrom, wenn die Umlaufzahl konstant gehalten wird?

Bei der Nebenschlußmaschine hat die Maschine selbst ihren Erregerstrom zu liefern. Dieselbe ist deshalb eigentlich nie leerlaufend. Da aber der Erregerstrom nur 1—5% des Maschinenstroms beträgt, kann man die Maschine praktisch als leerlaufend betrachten. Die Leerlaufskennlinie, die wir nach Schaltung 146 aufnehmen, zeigt also genau genommen

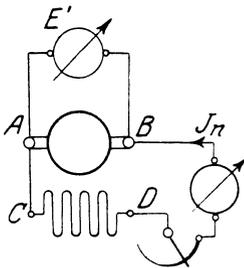


Abb. 146. Leerlaufschaltung der Nebenschlußmaschine.

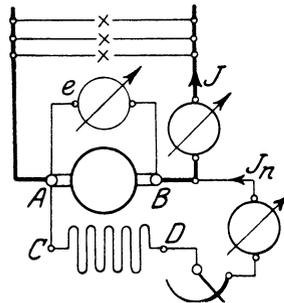


Abb. 147. Die belastete Nebenschlußmaschine.

nicht die erzeugte Spannung, wir müssen vielmehr noch einen winzigen Spannungsbetrag hinzuaddieren, nämlich den Spannungsverlust, den der kleine Erregerstrom im Anker hervorruft. Da derselbe praktisch belanglos ist, gilt auch hier Abb. 142.

b) *Bei Belastung.* Wie ändert sich die Klemmenspannung  $e$  mit zunehmender Belastung, wenn die Umlaufzahl konstant und der Magnetregler in seiner Stellung belassen wird?

Würde die Maschine fremd erregt sein, so würde sich mit zunehmender Belastung die Spannung nach der Linie  $e$  der Abb. 144 ändern. Nun liegt aber die Erregerwicklung in der normalen Schaltung 147 der Nebenschlußmaschine an dieser Spannung, die infolge der Belastung gesunken ist. Es fließt deshalb auch ein geringerer Erregerstrom, wodurch die Klemmenspannung  $e$  noch tiefer sinkt. Der Unterschied zwischen Leerlaufspannung und Klemmenspannung bei Vollbelastung ist demnach bei der Nebenschlußmaschine größer als bei der fremd erregten Maschine und beträgt etwa 10—20% je nach der Größe.

**3. Die Hauptschlußmaschine.** a) *Im Leerlauf.* Wie kann man die Leerlaufkennlinie einer Hauptschlußmaschine aufnehmen?

Damit eine Hauptschlußmaschine erregt ist, muß der Hauptstrom fließen, die Maschine ist also nur im belasteten Zustand erregt. Es ist daher unmöglich, in der normalen Schaltung eine Leerlaufkennlinie aufzunehmen. Da wir aber von jeder Maschine die Leerlaufkennlinie zu ihrer Beurteilung brauchen, erregen wir die Maschine fremd. Wir nehmen dazu eine Batterie von geringer Spannung, die aber mindestens einen Strom gleich dem Normalstrom der Maschine hergeben kann. Die aufgenommene Spannungslinie stimmt genau mit Abb. 142 überein.

b) *Bei Belastung.* Wie ändert sich die Klemmenspannung der Hauptschlußmaschine mit zunehmender Belastung, wenn die Umlaufzahl konstant ist?

Da der Belastungsstrom bei der Hauptschlußmaschine nach Schaltung 148 gleichzeitig Erregerstrom ist, wird die leerlaufende Maschine

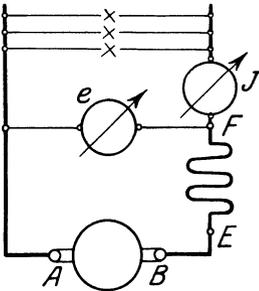


Abb. 148. Die belastete Hauptschlußmaschine.

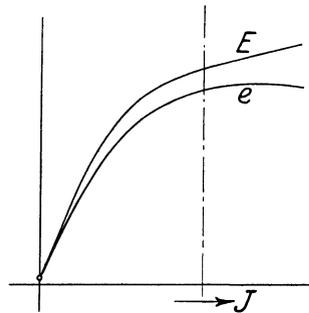


Abb. 149. Die Spannung der Hauptschlußmaschine steigt mit zunehmender Belastung.

unerregt keine Spannung geben. Schaltet man aber Lampen oder sonstige Verbrauchsapparate ein, so erregt sich die Maschine, und zwar um so mehr, je mehr Strom wir aus derselben entnehmen. Die Spannung  $e$  an den Klemmen steigt also mit zunehmender Belastung an, bis die Eisensättigung erreicht ist, wie dies Abb. 149 darstellt. Trägt man in diese Abbildung die Leerlaufkennlinie von Abb. 142 ein, so liegt eine Spannungsdifferenz zwischen den beiden Linien, welche durch die Ankerückwirkung und durch den Widerstand des Ankers und der Erregerwicklung entstanden ist. Bei Überlastung sinkt die Klemmenspannung wieder, weil die Spannungsdifferenz mit zunehmendem Strom immer größer wird.

Wir sehen aus vorstehendem, daß eine Hauptschlußmaschine zur Speisung eines Lichtnetzes ungeeignet ist, weil die Spannung erheblich schwankt. Sind wenig Lampen eingeschaltet, so brennen dieselben dunkel, weil die Maschine bei der geringen Belastung untererregt ist, sind hingegen sehr viel Lampen eingeschaltet, so können sie infolge der erzeugten hohen Spannung durchbrennen. Die Nebenschlußmaschine ist als Lichtmaschine viel besser geeignet, weil ihre Spannung im Leerlauf sich nur um wenige Prozente von derjenigen bei Belastung unterscheidet und weil die Regelung viel einfacher ist.

**4. Die Doppelschlußmaschine.** a) *Im Leerlauf.* Wie ändert sich die erzeugte Spannung mit wachsendem Erregerstrom, wenn die Umlaufzahl konstant bleibt?

Da im Leerlauf die Hauptstromwicklung stromlos ist, stimmt die Schaltung vollständig mit derjenigen einer Nebenschlußmaschine überein. Die Leerlaufskennlinie derselben nach Abb. 142 gilt also auch hier.

b) *Bei Belastung.* Wie ändert sich die Klemmenspannung der Doppelschlußmaschine mit zunehmender Belastung, wenn die Umlaufzahl konstant ist?

Die notwendige Schaltung zeigt Abb. 150. Wir wollen einmal annehmen, die Maschine sei voll belastet, die Hauptschlußwicklung E—F sei indessen durch eine Kurzschlußleitung wie punktiert überbrückt. Wir haben es dann also mit einer reinen Nebenschlußmaschine zu tun,

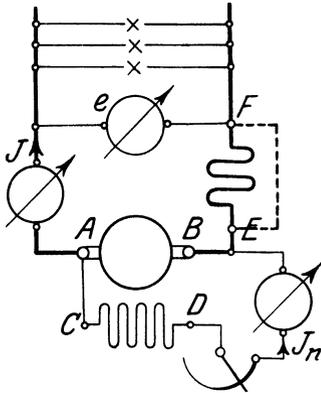


Abb. 150. Die belastete Doppelschlußmaschine.

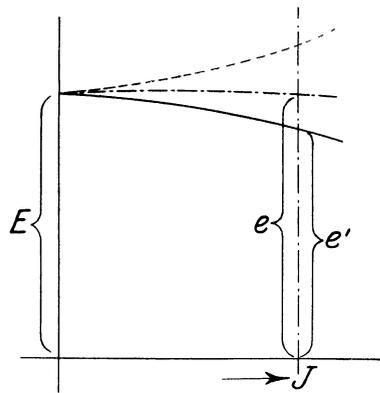


Abb. 151. Die Doppelschlußmaschine kann bei allen Belastungen konstante Spannung erzeugen.

deren Spannung mit zunehmender Belastung etwas abfällt, die also nach Abb. 151 bei Vollast die Klemmenspannung  $e'$  hat. Nun wollen wir plötzlich den punktierten Kurzschluß fortnehmen. Dann muß der Hauptstrom  $I$  die Hauptstromwindungen durchfließen, die so geschaltet sind, daß sie die Erregung der Nebenschlußwicklung unterstützen. Es tritt also nun eine stärkere Erregung ein, die eine Erhöhung der Spannung zur Folge hat. Nun kann man der Hauptschlußwicklung soviel Windungen geben, daß die Spannung gerade auf den Wert  $e$  steigt, der mit der Spannung im Leerlauf übereinstimmt. Die Doppelschlußmaschine ermöglicht also eine konstante Spannung bei allen Belastungen, wie dies die strichpunktierte Linie andeutet. Man könnte nun annehmen, daß man in elektrischen Zentralen keine anderen Maschinen als Doppelschlußmaschinen verwenden würde. Man findet jedoch ebenso oft Nebenschlußmaschinen, weil man wegen der Erwärmung der Magnetwicklung ja doch den Erregerstrom regeln muß.

In Abb. 151 ist punktiert auch die Spannungslinie einer Doppelschlußmaschine mit Spannungserhöhung dargestellt, bei welcher also die Hauptschlußwicklung noch stärker ist. Man erreicht dadurch, daß

der Spannungsverlust, der in den Zuleitungen zum Netz auftritt, ausgeglichen wird, so daß im Netz selbst die Spannung bei verschiedenen Belastungen gleich bleibt.

## H. Das Verhalten der Gleichstrommotoren.

**1. Der Nebenschlußmotor.** *Wie ändert sich die Umlaufzahl des leerlaufenden Motors, wenn die zugeführte Spannung geändert wird, der Erregerstrom aber konstant bleibt?*

Der leerlaufende Motor verbraucht nur einen kleinen Strom, der Ohmsche Spannungsabfall im Anker ist also vernachlässigbar klein, so daß die erzeugte Gegenspannung  $E$  der zugeführten Spannung  $e$  gleichgesetzt werden kann. Da der Erregerstrom konstant ist, bleibt auch der Kraftfluß  $\mathfrak{S}$  konstant, und wir können die konstanten Zahlen in Gleichung 28 wieder zusammenfassen und schreiben:

$$n = C \cdot e.$$

Die Umlaufzahl wächst demnach proportional mit der Klemmenspannung und ergibt zeichnerisch aufgetragen nach Abb. 152 eine gerade Linie. Würde man einen anderen Erregerstrom konstant halten, so bekäme man eine neue Gerade, die bei größerem Erregerstrom tiefer, bei kleinerem Erregerstrom höher läge. Die Ver-

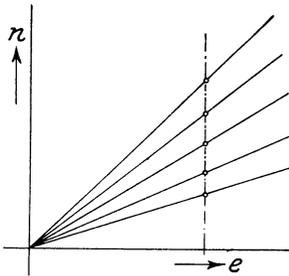


Abb. 152. Die Umlaufzahl des Nebenschlußmotors wächst mit zunehmender Spannung.

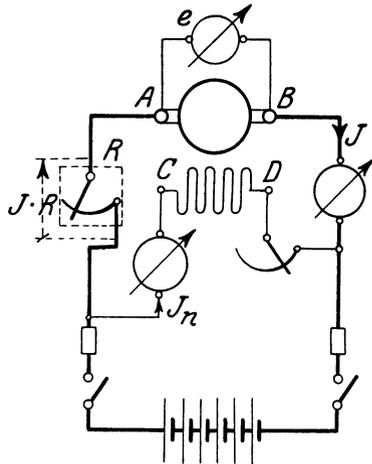


Abb. 153. Versuchsschaltung des Nebenschlußmotors.

änderung der Spannung kann in verschiedener Weise erfolgen. In Abb. 153 wird ein veränderlicher Vorschaltwiderstand verwendet, in dem ein mehr oder minder großer Teil  $I \cdot R$  der Stromquellenspannung verbraucht wird.

*Wie ändert sich die Umlaufzahl, wenn bei konstanter Klemmenspannung der Erregerstrom des leerlaufenden Motors verändert wird?*

Aus Gleichung 28 folgt, daß bei konstanter Spannung  $e$  die Umlaufzahl nur von dem Kraftfluß  $\mathfrak{S}$  abhängt. Dieser wächst, wenn wir den Erregerstrom vergrößern. Die Umlaufzahl muß dann aber abnehmen, weil  $\mathfrak{S}$  im Nenner der Gleichung steht. Einer Verstärkung des

Erregerstromes entspricht also eine Abnahme der Umlaufzahl, einer Feldschwächung eine Steigerung derselben, wie dies die Schaulinien in Abb. 154 für zwei konstante Spannungen darstellen. Man kann sich dies sonderbare Verhalten so vorstellen, daß der Motor bei geschwächtem Feld schneller laufen muß, um die zur Erzeugung der ziemlich konstanten Gegenspannung nötigen Kraftlinien zu schneiden. Machen wir den gleichen Versuch mit einer höheren, aber konstanten Klemmenspannung, so erhalten wir eine ähnlich verlaufende,

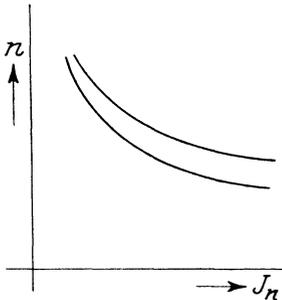


Abb. 154. Die Drehzahl steigt, wenn man den Erregerstrom schwächt.

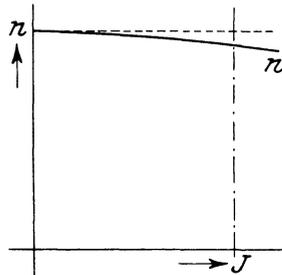


Abb. 155. Die Umlaufzahl des Nebenschlußmotors ist bei allen Belastungen nahezu konstant.

nur höher liegende Linie. Ein Ausschalten des Erregerstroms würde ein Durchgehen des Motors und Schmelzen der Sicherungen zur Folge haben.

Wie ändert sich bei konstanter Klemmenspannung die Umlaufzahl, wenn wir den Motor mehr und mehr belasten?

Jetzt wollen wir den Ohmschen Spannungsverlust im Anker nicht mehr vernachlässigen. Es ist also:

$$E = e - I \cdot r.$$

ferner ist:

$$E = c \cdot n \cdot \mathfrak{S}.$$

Wir setzen diese beiden Beziehungen einander gleich:

$$c \cdot n \cdot \mathfrak{S} = e - I \cdot r$$

und rechnen n aus:

$$n = \frac{e - I \cdot r}{c \cdot \mathfrak{S}} \dots \dots \dots 32$$

Wir ersehen hieraus, daß die Umlaufzahl ganz konstant bleiben würde, wenn der Spannungsverlust  $I \cdot r$  nicht da wäre. Nun beträgt  $I \cdot r$  aber bei voller Belastung nur wenige Prozente von  $e$  (s. S. 61), so daß der Zähler der obigen Gleichung 32 mit zunehmender Belastung (größeres  $I$ ) nur wenig kleiner wird. Die Umlaufzahl des Nebenschlußmotors muß deshalb bei wachsender Belastung um ein geringes sinken, wie Abb. 155 zeigt. Dieser Abfall der Umdrehungszahl beträgt bei Vollast etwa:

|                   |       |      |
|-------------------|-------|------|
| bei 1 kW Leistung | ..... | 8-5% |
| „ 5 kW „          | ..... | 5-3% |
| „ 20 kW „         | ..... | 2-1% |
| „ 50 kW „         | ..... | -1%  |

Motoren mit Wendepolen haben einen Geschwindigkeitsabfall von oft mehr als dem Doppelten der vorstehenden Zahlen, weil die Bürsten in der Leerlaufslage stehen bleiben, während doch das Feld nach Abb. 132d eine Verdrehung erleidet. Bei der vorstehenden Betrachtung hatten wir überhaupt stillschweigend vorausgesetzt, daß das Feld  $\mathcal{E}$  konstant bleibe. Dies ist nicht genau der Fall, weil die Ankerrückwirkung schwächend auf das Feld wirkt, wodurch der Abfall der Umlaufzahl etwas weniger groß wird.

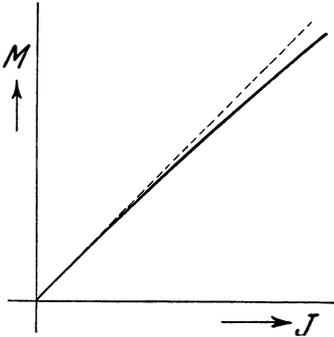
Praktisch genommen ist der Abfall der Umlaufzahl des Nebenschlußmotors so klein, daß er fast immer als Motor mit konstanter Umdrehungszahl angesehen wird. Er findet demgemäß überall dort Anwendung, wo konstante Geschwindigkeit verlangt wird, wie z. B. zum Antrieb von Transmissionen, von Werkzeugmaschinen.

*Wie ändert sich das Drehmoment (Zugkraft) des Nebenschlußmotors bei wachsendem Ankerstrom, wenn die Spannung konstant gehalten wird?*

Nach Gleichung 27 ist das Drehmoment

$$M = C \cdot I \cdot \mathcal{E}.$$

Abb. 156. Das Drehmoment des Nebenschlußmotors wächst proportional mit dem Strom.



Da wir den Erregerstrom und damit das Feld  $\mathcal{E}$  konstant halten wollen, ist das Drehmoment nur dem Ankerstrom  $I$  proportional. Dasselbe wird also nach Abb. 156 durch eine Gerade dargestellt.

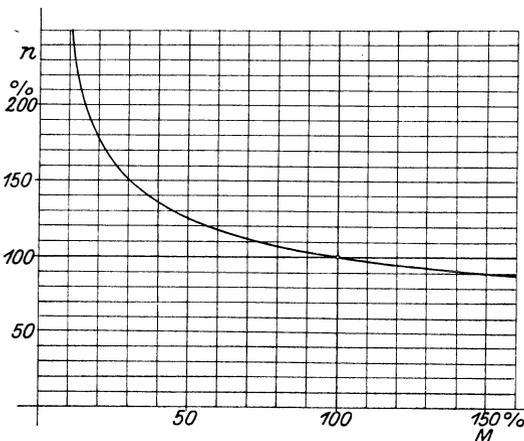


Abb. 157. Der Hauptschlußmotor läuft bei geringer Last schnell, bei großer Last langsam.

Nun wissen wir aber, daß das Feld bei starken Strömen eine Schwächung durch Ankerrückwirkung erfährt, so daß genau genommen das Drehmoment um ein geringes niedriger bleibt.

**2. Der Hauptschlußmotor.** Das Schaltungs-schema desselben zeigt Abb. 130.

*Wie ändert sich bei konstanter Klemmenspannung die Umlaufzahl, wenn wir den Motor mehr und mehr belasten?*

Die obige Gleichung 32 gilt natürlich auch für einen Hauptstrommotor. Während sich bei dem Nebenschlußmotor eine nahezu konstante Umlaufzahl ergab, ergibt sich bei dem Hauptschlußmotor ein ganz

anderes Verhalten, weil bei verringerter Belastung das Feld  $\mathcal{C}$  schwächer wird, wegen des kleineren Stromes, so daß eine Erhöhung der Umlaufzahl eintritt. Umgekehrt wird durch eine Mehrbelastung der Motor stärker erregt und damit die Umlaufzahl vermindert. Hierbei ist jedoch zu beachten, daß eine Feldverstärkung nur in geringem Maße möglich ist, weil bei Vollast das Eisen schon ziemlich gesättigt ist. Wir erhalten somit einen Geschwindigkeitsverlauf, wie ihn Abb. 157 darstellt. Würden wir den Motor leer laufen lassen, so würde der dann benötigte schwache Strom den Motor so ungenügend erregen, daß die Umdrehungszahl eine außerordentliche Höhe erreichte. Also: **Der Hauptschlußmotor geht im Leerlauf durch.** (Der Anker fliegt auseinander.) Hauptschlußmotoren dürfen deshalb nie bei solchen Antrieben verwandt werden, bei denen ein Leerlauf denkbar ist, wie z. B. bei Riemenantrieb.

*Wie ändert sich das Drehmoment (Zugkraft) des Hauptstrommotors mit zunehmendem Belastungsstrom?*

Das Drehmoment ist  $M = c \cdot I \cdot \mathcal{C}$ . Im Gegensatz zum Nebenschlußmotor ist hier das Feld  $\mathcal{C}$  veränderlich. Bei kleiner Belastung ist auch das Feld klein, so daß sich ein kleineres Drehmoment als beim Nebenschlußmotor ergibt. Abb. 158 zeigt den Verlauf, darin ist auch die Drehmomentlinie des Nebenschlußmotors punktiert eingetragen. Bei Überlastungen hingegen sehen wir das Moment des Hauptstrommotors größer werden, weil der große Ankerstrom die Magnete stark erregt, während beim Nebenschlußmotor die Ankerrückwirkung ungehindert das Feld schwächen kann.

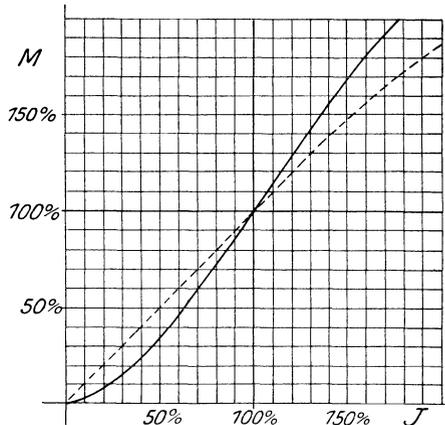


Abb. 158. Das Drehmoment des Hauptschlußmotors ist bei Unterlast kleiner, bei Überlast größer als dasjenige des Nebenschlußmotors.

Die Hauptmerkmale des Hauptstrommotors sind also wechselnde Umlaufzahl bei veränderlicher Belastung und großes Drehmoment bei Überlastungen. Derselbe eignet sich deshalb vor allem zum Antrieb von Hebezeugen und Bahnen, weil man bei diesen bei geringer Belastung eine große, und bei großer Belastung eine geringe Umlaufzahl wünscht, und weil auch das Drehmoment beim Anfahren ein sehr hohes sein muß.

**3. Der Doppelschlußmotor.** Das Schema dieses Motors stellte Abb. 131 dar.

*Wie verhält sich die Umlaufzahl des Doppelschlußmotors bei veränderlicher Belastung?*

Es sind hier zwei Fälle möglich.

1. Die Haupt- und Nebenschlußwicklung unterstützen sich gegenseitig, oder
2. Die Haupt- und Nebenschlußwicklung wirken sich entgegen.

Der erste Fall ist der wichtigere, den wir auch zunächst betrachten wollen. Der Motor sei normal belastet. Die Amperewindungen, die den Kraftfluß erzeugen, setzen sich aus zwei Teilen zusammen, erstens aus den bei allen Belastungen konstanten AW der Nebenschlußwicklung und zweitens aus den veränderlichen AW der Hauptschlußwicklung. Erhöhen wir jetzt die Motorbelastung, so erhöhen sich auch die letztgenannten AW der Hauptschlußwicklung, so daß der Motor stärker erregt ist als ein Nebenschlußmotor und infolgedessen langsamer läuft. Bei Entlastung des Motors verschwinden die Hauptschluß-AW beinahe ganz. Der Motor wird demnach seine Umlaufzahl erhöhen, aber durchgehen kann er nicht, weil ja doch immer die konstante Erregung durch die Nebenschlußwicklung bleibt. Der Verlauf wird natürlich in hohem

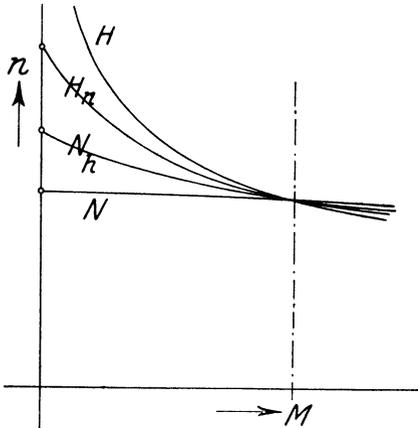


Abb. 159.  $H$  = Hauptschlußmotor,  $H_n$  = Doppelschlußmotor mit überwiegender Hauptschlußwicklung,  $N_h$  = Doppelschlußmotor mit überwiegender Nebenschlußwicklung,  $N$  = Nebenschlußmotor.

Maße von dem Stärkeverhältnis der beiden Wicklungen zueinander abhängen. Denn es ist doch anzunehmen, daß ein Motor mit starker Nebenschlußwicklung und nur einigen Hauptstromwindungen auch in seinem Verhalten einem Nebenschlußmotor ähnelt wird. Abb. 159 zeigt uns durch Linie  $N_h$  dessen Verlauf der Umlaufzahl, während  $N$  derjenige des Nebenschlußmotors ist. Ein Motor mit starker Hauptschluß- und kleiner Nebenschlußwicklung hat die Linie  $H_n$ , die nur etwas weniger steil als diejenige des Hauptstrommotors  $H$  ist.

Der Verlauf der betrachteten Linien ist bestimmend für die Verwendung der Doppelschlußmotoren. Ein Motor mit großer Hauptschlußwicklung und zusätzlicher Nebenschlußwicklung ähnelt dem Hauptstrommotor mit dem einen Unterschied, daß er im Leerlauf nicht durchgeht. Einen solchen Motor können wir also bei Hebezeugen verwenden, wenn wir eine größere Sicherheit gegen zu große Geschwindigkeit haben wollen. Ein Nebenschlußmotor mit Zusatzhauptschlußwindungen unterscheidet sich nur durch den etwas steileren Abfall der Umlaufzahl vom Nebenschlußmotor. Er wird bei Antrieben mit Schwungrädern benötigt, also bei Walzwerken, Pressen usw., denn die Arbeitswucht eines Schwungrades kann sich nur dann entladen, wenn die Umlaufzahl sinken kann. Bei einem Motor mit konstanter Drehzahl würde ein Belastungsstoß durch den Motor bewältigt werden müssen, während das dafür bestimmte Schwungrad unbeeinflusst weiter lief.

Der zweite Fall, bei welchem Hauptschluß- und Nebenschlußwicklung sich entgegenwirken, wird sehr selten angewandt, weil er nicht ungefährlich ist. Durch eine kleine zusätzliche entgegenwirkende Hauptschlußwicklung könnte man zwar erreichen, daß die Umlaufzahl bei Belastung nicht sinken würde, aber es bestände die Gefahr, daß ein starker Belastungsstoß das Feld zu stark schwächte, wodurch der Motor versagen würde.

## I. Die Regelung der Umlaufzahl der Gleichstrommotoren.

Die Gleichung 28:

$$n = \frac{e}{c \cdot \mathfrak{E}}$$

gilt für alle Gleichstrommotoren. Wir ersehen aus ihr, daß es zwei Wege zur Änderung der Umlaufzahl gibt: Entweder durch Änderung der zugeführten Spannung  $e$  oder durch Änderung des Kraftflusses  $\mathfrak{E}$ , also durch Regelung des Erregerstromes.

**1. Spannungsregelung.** Wir wissen von S. 102, daß die Umlaufzahl eines Gleichstrommotors um so größer ist, je größer die zugeführte Spannung ist. In den allermeisten Fällen steht uns aber in einem Netz nur eine konstante Spannung zur Verfügung, und nur ganz ausnahmsweise hat man im Netz mehrere Spannungen (Mehrleiternetze), durch deren abwechselnde Benutzung verschiedene Umdrehungszahlen eingestellt werden können.

Wir wollen nun die verschiedenen Möglichkeiten betrachten, wie aus einem Netz konstanter Spannung eine veränderliche Spannung entnommen werden kann.

a) Die Hauptstromregelung. Betrachten wir beispielsweise einen Nebenschlußmotor nach Abb. 153. Von der Spannung der Stromquelle wird in dem Vorschaltwiderstand  $R$  ein Betrag  $I \cdot R$  verbraucht, so daß für den Anker nur die Spannung  $e$  übrig bleibt. Der im Widerstand verbrauchte Teil der Spannung ist um so größer, je größer der Motorstrom  $I$  ist. Die Spannung am Motor und damit dessen Umlaufzahl muß also mit zunehmender Belastung (Drehmoment  $M$ ) stark sinken. Abb. 160 stellt durch Linie a den Verlauf der Umlaufzahl ohne Vorschaltwiderstand dar,

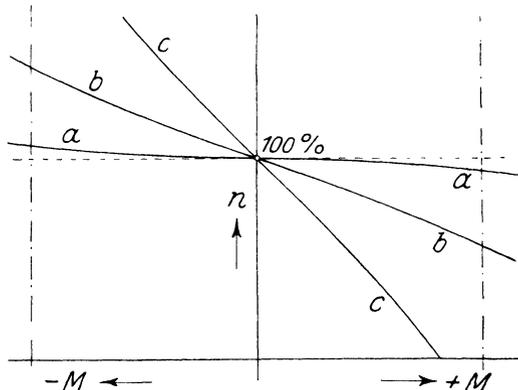


Abb. 160. Nebenschlußmotor: a) ohne Vorschaltwiderstand, b) mit kleinem und c) mit großem Vorschaltwiderstand.

Linie b hingegen mit konstantem Vorschaltwiderstand. Es ergibt sich hieraus, daß die Umlaufzahl des Nebenschlußmotors bei wechselnder Last stark veränderlich geworden ist, obwohl der Vorschaltwiderstand unverändert auf dem gleichen Kontakt bleibt. Dies ist aber für sehr viele Antriebe ein wesentlicher Nachteil der Hauptstromregelung. Ein weiterer ist der sehr große Energieverlust im Regelwiderstand. Wenn wir die Umlaufzahl des Nebenschlußmotors um 50% vermindern wollen, müssen wir auch 50% der Stromquellenspannung im Vorschaltwiderstand abdrosseln. Dadurch wird in demselben ebensoviele Energie nutzlos in Wärme umgesetzt, als der Motor überhaupt verbraucht.

Wird bei einem Nebenschlußmotor das Drehmoment negativ, wird er also schneller angetrieben als seine Leerlaufumdrehungszahl, so arbeitet er als Stromerzeuger. Wir ersehen aus Abb. 160, daß die Umlaufzahl desselben mit Vorschaltwiderstand (Linie b) wesentlich höher ansteigt als ohne denselben. In den Stromkreis eines Nebenschlußmotors, der beispielsweise als Stromerzeuger bremsend auf eine sinkende Last wirkt, darf deshalb kein zu großer Widerstand geschaltet werden.

Von den beiden Nachteilen der Hauptstromregelung bleibt nur einer, wenn wir sie bei Hauptschlußmotoren verwenden. Denn bei diesen wechselt die Umlaufzahl schon ohnehin mit der Belastung. Auch der zweite Nachteil, die Energievergeudung ist hier nicht so schwerwiegend, weil Kran- und Bahnmotoren meistens nur kurzzeitig eingeschaltet werden. Wir finden aus diesem Grunde die Hauptstromregulierung bei Hauptschlußmotoren fast ausschließlich.

b) Die Regelung durch Anker-Parallelwiderstände. Da dieselbe hauptsächlich bei Hauptschlußmotoren Anwendung findet, wollen wir nur diesen Fall betrachten. Der Motor erhält nach Abb. 161 außer

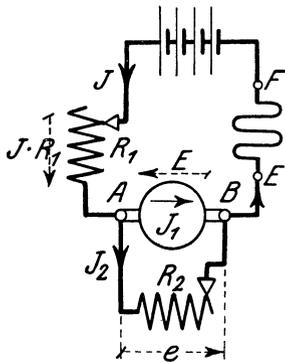


Abb. 161. Hauptschlußmotor mit Ankerparallelwiderstand.

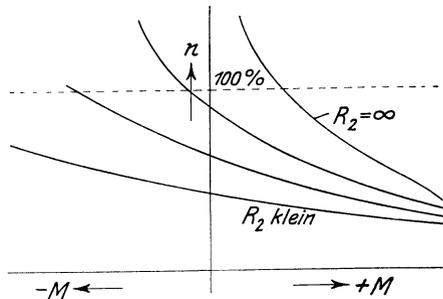


Abb. 162. Verhalten des Hauptschlußmotors nach Abb. 161.

dem Vorschaltwiderstand noch einen Ankerparallelwiderstand  $R_2$ , so daß der die Erregerwicklung durchfließende Strom  $I$  sich aus dem Ankerstrom  $I_1$  und dem Parallelstrom  $I_2$  zusammensetzt. Der Motor ist dadurch stark erregt und läuft langsamer als normal. Bei völliger Entlastung des Motors wird der Ankerstrom nahezu Null. Dabei geht der Motor aber nicht durch, weil doch die Erregerwicklung immer noch von dem Parallelstrom  $I_2$  durchflossen ist. Der Motor kann sogar mit negativen Momenten, also mit Bremsmomenten belastet werden, ohne daß er seine Drehzahl sehr steigert. Abb. 162 zeigt das Verhalten bei verschiedenen Ankerparallelwiderständen. Ein Nachteil dieser Schaltung ist der sehr hohe Stromverbrauch.

c) Die Regelung durch Zu- und Gegenschaltung. Diese Art der Regelung der zugeführten Spannung geht aus Abb. 163 hervor. Der Antriebsmotor  $M$  ist ein Nebenschlußmotor. Ihm ist statt eines Regelwiderstandes der Anker einer Dynamo  $D$  vorgeschaltet, welche von einem anderen Motor dauernd mit konstanter Umlaufzahl angetrieben wird. Die Erregung der Dynamo  $D$  kann nun weitgehend verändert werden. Mit Hilfe eines Umschalters  $U$  kann sogar der

Erregerstrom umgekehrt werden, so daß die Dynamo eine umgekehrte Spannung liefert. Angenommen die Netzspannung sei  $e$  und die Dynamo  $D$  erzeuge bei voller Erregung auch  $e$ , so wird man, um den Motor  $M$  anzulassen, die Dynamo so erregen, daß sie volle Spannung  $e$ , aber entgegen der Netzspannung gibt. Die beiden Spannungen heben sich dann auf. Verringert man hierauf den Erregerstrom  $I_n'$ , so überwiegt die Netzspannung, und am Motor  $M$  liegt jetzt die Differenz der beiden Spannungen. Ist der Erregerstrom  $I_n'$  schließlich bis auf Null geschwächt worden, so gibt die Dynamo keine Spannung und am Motor herrscht die Netzspannung  $e$ . Durch Umlegen des Umschalters  $U$  und Erregung kann man hierauf eine

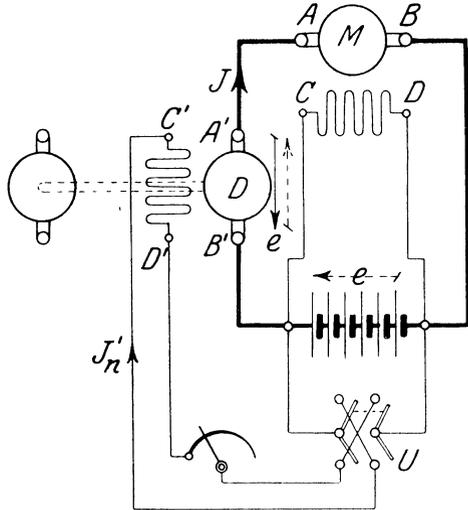


Abb. 163. Zu- und Gegenschaltung.

mit der Netzspannung gleichgerichtete Spannung erzeugen, so daß schließlich die Spannung  $2e$  am Motor liegt. Der große Vorteil dieser Schaltung liegt nun einmal darin, daß lediglich durch Regelung des doch sehr kleinen Erregerstromes  $I_n'$  die Umlaufzahl des Motors  $M$  beliebig feinstufig geändert werden kann, wobei wegen des kleinen Erregerstromes auch nur kleine Energieverluste in den Widerständen entstehen, und ferner haben wir den Vorteil, daß die einmal eingestellte Umlaufzahl nahezu unverändert bleibt, selbst wenn das Drehmoment zwischen positiven und negativen Werten wechselt, da doch der Nebenschlußmotor nach der durch Linie  $a$ , Abb. 160, dargestellten Linie seine Umlaufzahl bei wechselnder

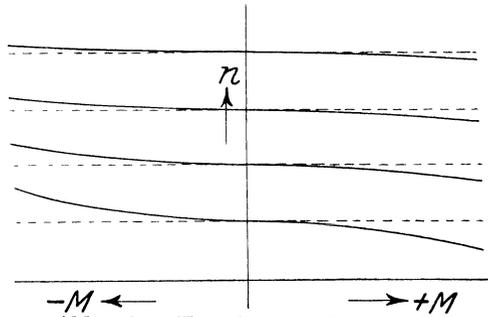


Abb. 164. Verhalten des Motors  $M$  in Schaltung 163.

Last verändert. Wenn wir nun mittels unserer Regeldynamo dem Motor verschiedene konstante Spannungen zuführen, werden wir verschieden hoch liegende Geschwindigkeitslinien bekommen, wie dies Abb. 164 zeigt. Wir erkennen also, daß der Motor mit nahezu gleicher Umlaufzahl auch bremsend wirken kann (negative Drehmomente), und dabei liefert er die erzeugte Energie in das Netz zurück.

Ein Nachteil dieser Schaltung ist der hohe Anlagepreis. Die beiden außer dem Motor benötigten Maschinen können nämlich nicht beliebig

klein sein. Wenn wir mit ganz geringer Umlaufzahl, aber vollem Drehmoment fahren wollen, muß der Erzeuger  $D$  die Spannung  $e$  erzeugen und wird vom vollen Motorstrom durchflossen. Die Leistung der Dynamo ist also  $e \cdot I$ . Die Leistung des die Dynamo antreibenden Motors muß um die Verluste der Dynamo größer sein als  $e \cdot I$ . Die aufgenommene Leistung des Antriebsmotors hingegen beträgt  $2e \cdot I$ , weil er bei vollem Betrieb die doppelte Netzspannung bekommt. Die Hilfsmaschinen müssen also ungefähr halb so groß wie die Antriebsmaschine sein.

d) Die Leonardschaltung. Auch bei dieser durch Abb. 165 dargestellten Schaltung wird eine mittels Motors dauernd angetriebene Hilfsdynamo benutzt. Der Antriebsmotor liegt aber überhaupt nicht mehr an der Stromquelle, sondern empfängt seine ganze Energie von dem Erzeuger  $D$ . Indem wir letzteren verschieden stark erregen, können wir jede Spannung an den Motor  $M$  legen, so daß sich bei konstanter

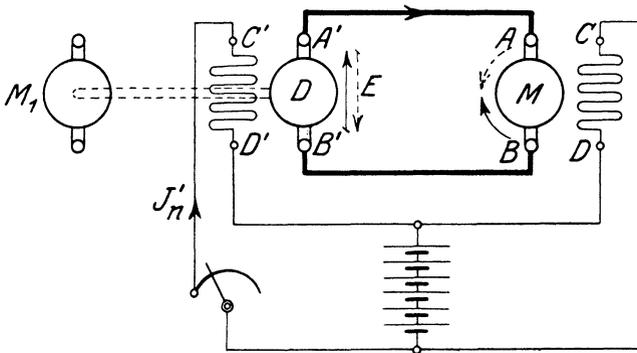


Abb. 165. Leonardschaltung.

Erregung desselben eine entsprechende Umlaufzahl einstellt. Durch Umkehrung des Erregerstromes  $I_n'$  können wir die Spannung  $E$  und damit auch die Drehrichtung des Motors  $M$  umkehren. Auch bei Bremsmomenten verhält sich der Motor in dieser Schaltung genau wie in der früheren. Die Linien der Abb. 164 gelten also auch hier. Die Leistung der Hilfsmaschinen in Leonardschaltung muß jedoch mindestens so groß sein, wie diejenige des Antriebsmotors. Trotzdem wird die Leonardschaltung häufig angewandt, weil sie auch in Wechsel- und Drehstromnetzen, wo es andere gute Regelmethode nicht gibt, Verwendung finden kann. Der Motor  $M_1$  muß dann ein Wechsel- oder Drehstrommotor sein.

e) Die Reihen-Parallelschaltung. Dieselbe ist eine Abart der einfachen Hauptstromregelung, welche angewandt werden kann, wenn mehrere Antriebsmotoren gleichzeitig benutzt werden, wie dies beim Antrieb von Straßenbahnwagen zutrifft. Abb. 166 stellt die zwei Hauptregulierstufen bei Benutzung zweier Motoren dar. Zuerst liegen die Motoren in Hintereinanderschaltung und die Umlaufzahl kann mittels des Regelwiderstandes von Null bis zur Hälfte der normalen gesteigert werden. Dann werden die Motoren in Parallelschaltung umgeschaltet unter gleichzeitiger Vorschaltung des Widerstandes, worauf dann eine

Steigerung der Umlaufzahl bis zur vollen Höhe erfolgen kann (siehe auch Abb. 441).

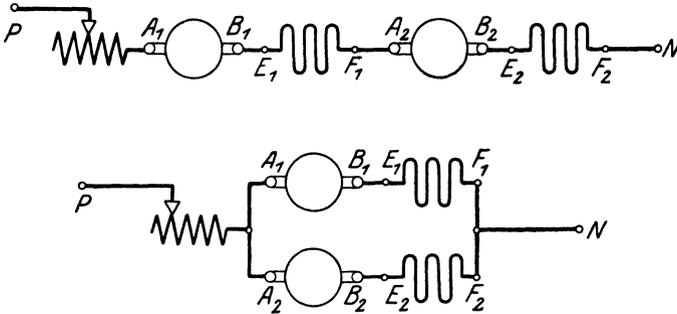


Abb. 166. Reihen-Parallelschaltung.

**Beispiel:** Ein für 220 V und  $n = 800$  minutliche Umdrehungen gewickelter Nebenschlußmotor soll an ein 110 V-Netz angeschlossen werden. Welche Umdrehungszahl wird derselbe dann bei gleichem Drehmoment machen?

Nach Gleichung 28 ruft die Verminderung der Ankerspannung auf die Hälfte eine ebenso große Erniedrigung der Drehzahl hervor. Da aber nach Abb. 142 dem auf die Hälfte gesunkenen Erregerstrom etwa ein Feld von 0,75 des normalen entspricht, ergibt sich angenähert die Drehzahl zu

$$800 \cdot \frac{1}{2 \cdot 0,75} = 530.$$

**Beispiel:** Wie groß würde die Drehzahl im vorstehenden Beispiel sein, wenn es sich um einen Hauptschlußmotor handelte?

Bei gleichem Drehmoment muß der Motor auch den gleichen Strom aufnehmen. Er ist also bei 110 V ebenso stark erregt wie bei 220 V. Die Drehzahl ist demnach gleich 400.

**2. Die Feldregelung.** Die Regelung der Umlaufzahl durch Änderung des Erregerstromes hat hauptsächlich nur bei dem Nebenschlußmotor große Verbreitung gefunden, weil sie bei dem Hauptschlußmotor nicht in gleich einfacher Weise durchführbar ist. Da der normallaufende Motor fast gesättigtes Eisen hat, ist eine Verstärkung des Feldes und damit eine Verminderung der Umlaufzahl auf diese Weise kaum noch möglich. Die Feldregelung beschränkt sich deshalb auf die Steigerung der Umlaufzahl von dem Normalwert aufwärts. Abb. 167 zeigt den Verlauf der Umdrehungszahl bei drei verschiedenen, konstant gehaltenen Erregerströmen. Die obere Linie entspricht natürlich dem kleinsten Erregerstrom. Es sind dies genau die gleichen Linien wie a in Abb. 160. Der Vorteil der Feldregelung stimmt mit demjenigen der Leonardschaltung überein. Auch hier wird nur der schwache Erregerstrom durch Widerstände ge-

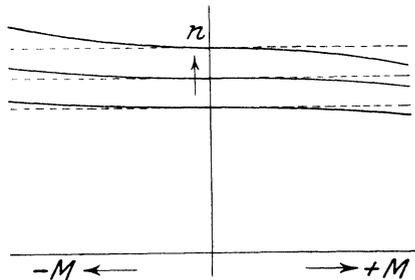


Abb. 167. Verhalten des Nebenschlußmotors (Regelmotors) bei verschiedenen Erregerströmen.

drei verschiedenen, konstant gehaltenen Erregerströmen. Die obere Linie entspricht natürlich dem kleinsten Erregerstrom. Es sind dies genau die gleichen Linien wie a in Abb. 160. Der Vorteil der Feldregelung stimmt mit demjenigen der Leonardschaltung überein. Auch hier wird nur der schwache Erregerstrom durch Widerstände ge-

regelt, so daß nennenswerte Verluste nicht entstehen. Ferner bleibt nach Abb. 167 bei einer bestimmten Einstellung des Erregerstromes bei allen Drehmomenten  $M$  die Umlaufzahl nahezu dieselbe. Die Leonardschaltung hat allerdings noch den Vorzug, daß die Umlaufzahl auch unterhalb der normalen in dieser Weise geregelt werden kann.

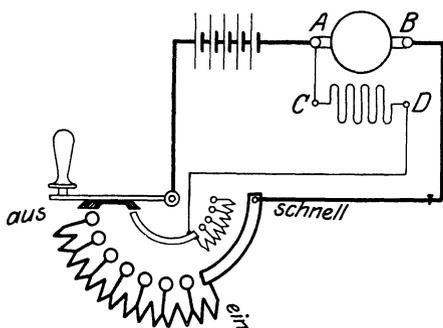


Abb. 168. Hauptstromregelwiderstand und Feldschwächungswiderstand.

Um mit einem Regelapparat die Umlaufzahl eines Nebenschlußmotors sowohl vermindern, als auch steigern zu können, muß ein Hauptstromregelwiderstand und ein Feldschwächwiderstand zusammengebaut werden, wie dies Abb. 168 zeigt. Die ersten Stufen mit starken Kontakten dienen zur Regelung im Hauptstrom, womit die Umlaufzahl bis zur normalen gesteigert werden kann. Bei einem Weiterdrehen der Kurbel wird dann der Erregerwicklung

Widerstand vorgeschaltet, so daß durch die Feldschwächung eine Erhöhung der Umlaufzahl über die normale hinaus eintritt.

Auch bei Hauptstrommotoren wird zuweilen die Feldschwächung zur Regelung der Umlaufzahl benutzt. Dann ist der Erregerwicklung ein Widerstand parallel zu schalten. Derselbe ist natürlich sehr klein und muß einen großen Strom durchlassen. Besser ist es jedoch, stufenweise Windungen der Erregerwicklung abzuschalten (s. Abb. 441).

Die Grenzen der Regelung der Umlaufzahl. Unterhalb der normalen gibt es selbstverständlich keine Grenze für die Umlaufzahl. Zu beachten ist nur, daß Motoren, deren Umlaufzahl ständig stark vermindert ist, leicht zu warm werden, weil die Ventilation fehlt. Aus dem gleichen Grunde ist es auch unzulässig, die Erregung eines ruhenden Nebenschlußmotors eingeschaltet zu lassen.

Eine Steigerung der Umlaufzahl kann nicht beliebig weit getrieben werden, weil sowohl mechanisch, als auch elektrisch Grenzen gezogen sind. Ein Motor, der nicht für Geschwindigkeitssteigerung bestellt und gebaut ist, darf höchstens eine Steigerung der Umlaufzahl von 15% erfahren, da man sich sonst der Gefahr aussetzt, daß sich die Ankerbänder infolge der Schleuderkraft lösen. Bei Motoren, welche hinreichende mechanische Festigkeit haben, setzt die Kommutierung eine Grenze.

Motoren *ohne* Wendepole gestatten folgende Steigerungen:

|                              |          |
|------------------------------|----------|
| bei 110 V Spannung . . . . . | etwa 60% |
| „ 220 V „ . . . . .          | „ 35%    |
| „ 500 V „ . . . . .          | „ 15%.   |

Diese Angaben beziehen sich nur auf kleinere und mittlere Motoren. Bei höheren Spannungen sinkt die Steigerungsfähigkeit, weil solche Motoren wegen der höheren Leiterzahl höhere Selbstinduktion der

Ankerspulen besitzen, die schon früh zum Feuern Veranlassung gibt. Motoren mit Wendepolen erlauben eine höhere Steigerung. Dieselbe kann etwa betragen, wenn  $n$  die normale Drehzahl ist:

bei 5 kW Leistung . . . . . bis  $5 \cdot n$   
 „ 10 kW „ . . . . . „  $4 \cdot n$   
 über 10 kW „ . . . . . „  $3 \cdot n$ .

Sehr starke Steigerungen der Umlaufzahl durch Feldschwächung sind unwirtschaftlich, weil das Eisen bei der hohen Umlaufzahl gar nicht ausgenutzt ist (die Feldstärke ist sehr klein). Die Motoren für starke Drehzahländerung fallen deshalb verhältnismäßig groß aus und laufen mit schlechtem Wirkungsgrad. Werden höhere Steigerungen der Umlaufzahl verlangt, so können Motoren mit zwei Ankerwicklungen und zwei Kollektoren verwandt werden, die nach Art der Reihen-Parallelschaltung zu schalten sind, oder es ist die Zu- und Gegenschaltung oder die Leonardschaltung mit gleichzeitiger Feldschwächung des Antriebmotors in Anwendung zu bringen.

### K. Die elektrische Bremsung mittels Gleichstrommotoren.

Es liegt nahe mit Gegenstrom zu bremsen. Dabei würde aber die im Motor erzeugte Gegenspannung in demselben Sinne, wie die zugeführte Spannung gerichtet sein, so daß selbst bei Benutzung der Vorschaltwiderstände noch unzulässig große Ströme entstehen könnten. Man schaltet deshalb allgemein den Motor zur Bremsung als Stromerzeuger, wobei sich nach dem Lenzschen Gesetz ja die Ankerleiter der Bewegung widersetzen.

1. Die Senkbremsung. a) Mit Nebenschlußmotor. Wenn wir einen Nebenschlußmotor nach Abb. 169 im Senksinne treibend ein-

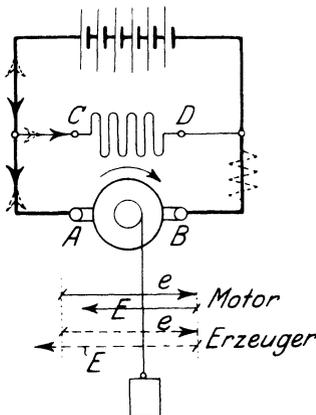


Abb. 169. Senkbremsung mit Nebenschlußmotor.

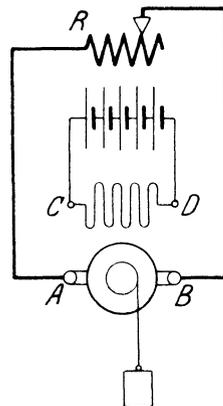


Abb. 170. Senkbremsung mit Nebenschlußmotor.

schalten, so wird die zunächst kleine Gegenspannung  $E$  mit der Drehzahl immer größer werden, und schließlich die zugeführte Spannung  $e$  über-

steigen. Dann ist der Motor zum Erzeuger geworden, der einen umgekehrten Strom in das Netz zurückliefert. Die Bremsenergie wird also zurückgewonnen. In Abb. 160 sind die Bremsmomente als negative Momente nach links aufgetragen und Linie a zeigt, daß die Drehzahl nur wenig größer wird als im Leerlauf. Linie c würde sich hingegen ergeben, wenn man einen Vorschaltwiderstand, wie punktiert gezeichnet, einschalten würde.

Um mit dem Nebenschlußmotor auch bei Drehzahlen unterhalb der normalen bremsen zu können, bleibt nur übrig, nach Abb. 170 zu schalten. Die Bremsenergie wird dabei in dem Widerstand R in Wärme verwandelt. Die Senkgeschwindigkeit ist um so kleiner, je kleiner der Bremswiderstand R ist.

b) Mit dem Hauptschlußmotor. Bei demselben ist eine Rückgewinnung der Bremsenergie nicht möglich. Abb. 171 zeigt links den Motor in Hubschaltung und rechts daneben in Senkschaltung. In letzterer muß sich der Motor selbst erregen, was er bekanntlich nur bei richtiger Schaltung kann. Beim Heben ist die im Motor erzeugte Gegenspannung E nach links gezeichnet. Bei der umgekehrten Senk-Drehrichtung wird demnach im remanenten Feld eine kleine, umgekehrte Spannung E erzeugt, die nach Abb. 171 einen Strom durch die Erregerwicklung treibt, der gerade so gerichtet ist, wie der frühere Hubstrom.

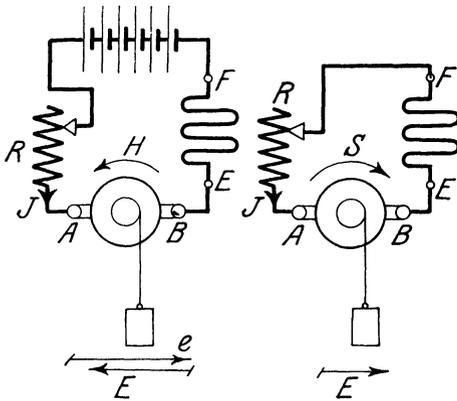


Abb. 171. Hauptschlußmotor, links hebend, rechts senkend.

Die Maschine erregt sich also. Die Senkgeschwindigkeit ist bei kurzgeschlossenem Motor wieder am kleinsten.

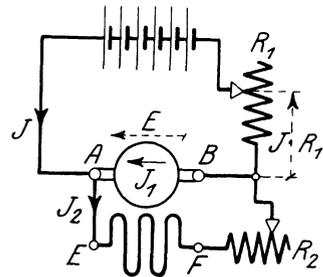


Abb. 172. Bremschaltung des Hauptschlußmotors mit Ankerparallelwiderstand.

Eine sehr kräftige Bremsung läßt sich auch mit Ankerparallelwiderständen erzielen. Ein nach Abb. 161 geschalteter Motor zeigt das in Abb. 162 dargestellte Verhalten. Er kann also in gleicher Schaltung sowohl treibend, als auch bremsend wirken, wobei seine Drehzahl nicht sehr schwankt. In der verbesserten Schaltung, Abb. 172, ist die Bremswirkung noch kräftiger, weil der Ankerstrom noch die Erregung unterstützt. Ein Nachteil dieser Schaltungen ist, daß neben der Bremsenergie noch Netzenergie in den Bremswiderständen in Wärme verwandelt wird.

**2. Die Nachlaufbremsung.** a) Mit Nebenschlußmotor. Bei der Nachlaufbremsung soll mit Drehzahlen unterhalb der normalen gebremst

werden. Es kommt deshalb hauptsächlich die Widerstandsschaltung nach Abb. 170 in Frage. Will man hingegen mit Energierückgewinnung nach Abb. 169 arbeiten, so muß ein Regelmotor verwandt werden, der normal mit geschwächtem Feld und damit hoher Umlaufzahl läuft. Zur Bremsung wird dann das Feld auf seinen Höchstwert verstärkt, wodurch sich die Drehzahl vermindert. Damit die Bremsung wirksam genug ist, muß die Umlaufzahl bei Vollerregung niedrig gewählt werden, was aber große und teure Motoren zur Folge hat.

b) Mit dem Hauptschlußmotor. Bei demselben benutzt man fast ausschließlich die oben erwähnte Widerstandsschaltung. Abb. 173 a stellt den Motor treibend dar. Schließt man nach Abb. 173 b den im gleichen Sinne weiterlaufenden Motor als Erzeuger auf Widerstände, so sieht man, daß die im remanenten Feld erzeugte Spannung  $E$  einen verkehrten Erregerstrom durch die Wicklung treibt. Damit sich die Maschine

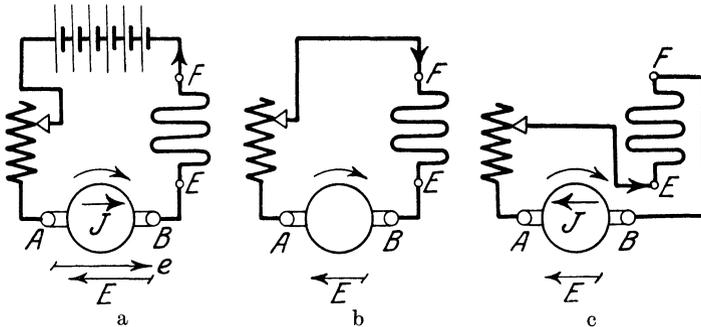


Abb. 173. Nachlaufbremsung mit Hauptschlußmotor. a = treibend, b = falsche Bremschaltung, c = richtige Bremschaltung.

selbst erregt, müssen wir deshalb nach Abb. 173 c schalten. Bei der Nachlaufbremsung ist also eine Umpolung des Ankers oder des Feldes gegenüber der Motorfahrtschaltung notwendig.

**Beispiel:** Ein Kran-Hubmotor von 15 kW Leistung hebt die Höchstlast von 10 t mit 6 m minutlicher Geschwindigkeit. Wie groß muß der Bremswiderstand sein, wenn die gleiche Last mit gleicher Geschwindigkeit abgesenkt werden soll? (Abb. 171). Der Getriebewirkungsgrad ist zu 0,65 anzunehmen, der des Motors zu 0,88. Die Spannung ist 500 V.

Die zum Heben benötigte Leistung ist nach Gleichung 65:

$$\frac{10000 \cdot 0,1}{102 \cdot 0,65} = 15 \text{ kW};$$

hierin ist 0,1 die sekundliche Hubgeschwindigkeit. Nennen wir das beim Heben wirksame Motordrehmoment  $M$ , so ist das Lastmoment  $M \cdot \dot{u} \cdot \eta$  ( $\dot{u}$  = Übersetzungsverhältnis). Das gleiche Lastmoment wirkt beim Senken. Das Motordrehmoment ohne die Reibung wäre  $M \cdot \eta$ . Für die Reibung wendet der Motor also ein Moment  $M - M \cdot \eta$  auf. Beim Senken ist das Lastmoment  $M \cdot \dot{u} \cdot \eta$ , das Motormoment ohne die Reibung also  $M \cdot \eta$ . Das wirkliche Senkmoment des Motors ist um die Reibung kleiner und beträgt also:  $M \cdot \eta - (M - M \cdot \eta) = (2 \cdot \eta - 1) \cdot M = (2 \cdot 0,65 - 1) \cdot M = 0,3 \cdot M$ . Nach Abb. 158 entspricht diesem Moment ein Strom von etwa 45% des normalen. Der Normalstrom beträgt  $15000 : 500 \cdot 0,88 = 34$  A, der Bremsstrom also:  $0,45 \cdot 34 = 15,5$  A. Die Bremsleistung des Motors ist auch das 0,3 fache der Hubleistung, also  $0,3 \cdot 15 = 4,5$  kW. Hiervon werden im Bremswiderstand in Wärme verwandelt:  $4500 \cdot 0,88 = 3900 \text{ W} = I^2 \cdot R = 15,5^2 \cdot R$ . Folglich:  $R = 3900 : 15,5^2 = 16 \Omega$ .

## IV. Der Wechselstrom und die Wechselstrommaschinen.

### A. Die Erzeugung und Messung des Wechselstroms.

Durch Drehung einer Spule im magnetischen Feld können wir nach S. 58 eine Wechselspannung erzeugen. Dieselbe wird mittels zweier Schleifringe von dem drehenden Anker abgenommen. Durch entsprechende Formung der Polschuhe strebt man bei Wechselstrommaschinen jedoch aus verschiedenen Gründen eine weniger eckige Form der Spannungslinie an, wie sie durch Abb. 175 dargestellt ist. Diese Linie nennt man in der Geometrie eine *Sinuslinie*, sie ist auch weiter nichts als die Projektion der bekannten Schraubenlinie. Die Spannung von  $a$  bis  $d$  wird während einer halben Umdrehung erzeugt. Man nennt sie einen **Wechsel** der Wechselspannung. Die Spannung von  $a$  bis wieder  $a$  nennt man hingegen eine **Welle** oder **Periode**. Zu ihrer Erzeugung ist bei der zweipoligen Maschine eine ganze Umdrehung erforderlich. Schnellaufende Maschinen werden sekundlich eine große Zahl solcher Wechselspannungswellen erzeugen. Diese

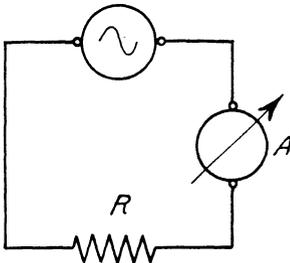


Abb. 174.

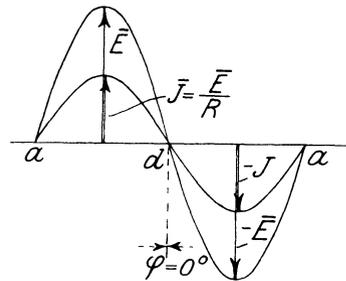


Abb. 175. Die Wechselspannung treibt durch einen Widerstand einen Wechselstrom, welcher mit der Spannung in Phase liegt.

Zahl, welche wir mit  $\nu$  bezeichnen wollen, wird in den Wechselstromzentralen ebenso wie die Spannung völlig konstant gehalten. In den allermeisten Wechselstromwerken werden 50 Wellen in der Sekunde erzeugt. Die aufgestellten Wechselstromerzeuger müßten also, wenn sie zweipolig wären, in der Sekunde 50 Umdrehungen machen, das sind  $50 \cdot 60 = 3000$  Umdrehungen in der Minute. Nun baut man aber Wechselstrommaschinen ebenso wie Gleichstrommaschinen sehr häufig mehrpolig. Bei einer vierpoligen Maschine würde schon bei einer halben Umdrehung eine volle Welle erzeugt. Eine Maschine, welche 50 sekundliche Wellen erzeugen soll, brauchte also nur  $50 \cdot 60 : 2 = 1500$  Umdrehungen in der Minute zu machen, eine sechspolige Maschine  $50 \cdot 60 : 3 = 1000$ . Allgemein, wenn mit  $p$  die Zahl der Polpaare bezeichnet wird:  $n = 60 \cdot \nu : p$ . Wir sehen also schon hier, daß wir eine Wechselstrommaschine keineswegs für beliebige Umlaufzahlen bauen können, weil dieselbe durch die Wellenzahl und Polzahl vorgeschrieben ist. Hiernach hat sich natürlich auch die Antriebsmaschine zu richten.

Wir wollen nun an die Schleifringe unserer Wechselstrommaschine einen Widerstand  $R$  legen, wie dies Abb. 174 schematisch darstellt. Durch diesen Widerstand fließt zeitweise Strom, zeitweise aber auch nicht. Im Augenblick  $a$  der Abb. 175 fließt kein Strom, weil in diesem Augenblick keine Spannung vorhanden ist. Wenn aber die Spannung ihren Höchstwert  $\bar{E}$  erreicht hat, fließt ein Höchststrom  $\bar{I} = \bar{E} : R$ . Die Richtung des Stromes kehrt sich um, wenn sich die Spannungsrichtung umkehrt. Rechnen wir uns in jedem Augenblick die Größe des fließenden Stromes aus und tragen uns diese Werte ebenfalls auf, so erhalten wir in Abb. 175 eine weitere Sinuslinie, welche den Stromverlauf darstellt. Wir sehen, daß eine Wechselspannung einen Wechselstrom erzeugt. Strom- und Spannungswelle gehen im gleichen Augenblick durch Null. Wir sagen dann: Die Stromwelle liegt in Phase mit der Spannungswelle.

**Die Messung des Wechselstromes.** Wir wollen nun untersuchen, was unser Strommesser in Abb. 174 anzeigt, wenn ein Wechselstrom hindurchfließt. Selbstverständlich müssen wir ein Instrument verwenden, welches bei wechselnder Stromrichtung doch immer nach der gleichen Seite ausschlägt, wie z. B. ein Hitzdrahtinstrument. Es liegt auf der Hand, daß der Zeiger dem Wechsel des Stromes nicht folgen kann, weil die Stromänderung bei 50 Wellen in einer Sekunde viel zu rasch ist. Der Zeiger wird sich vielmehr auf einen mittleren Wert des Stromes einstellen. Wenn wir nun bei der Stromwelle in gleichen Abständen vertikale Linien ziehen und das arithmetische Mittel aller derselben suchen, bekommen wir einen Mittelwert

$$I_m = \frac{2}{\pi} \cdot \bar{I} = 0,636 \cdot \bar{I}.$$

Diesen Mittelwert des Stromes zeigt unser Strommesser **nicht** an. Es zeigt einen anderen, etwas höheren Wert, den wir jetzt suchen wollen.

Wir wissen von S. 52, daß der Ausschlag eines Hitzdrahtinstrumentes nur von der im Hitzdraht entwickelten Wärme abhängt, Wärme, welche aus elektrischer Energie entstanden ist. Wieviel Watt in dem Hitzdraht, dessen Widerstand  $r$  sei, in Wärme verwandelt werden, können wir aber leicht feststellen. Wir bilden in jedem Augenblick den Ausdruck  $J^2 \cdot r$  oder was das gleiche ergibt:  $J \cdot e$ , wo  $e$  die Spannung am Hitzdraht ist. In Abb. 176 ist

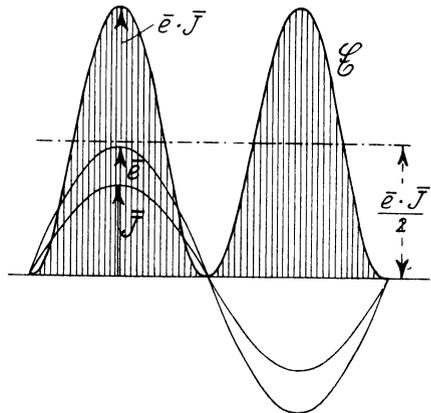


Abb. 176. Bestimmung des mittleren Wattverbrauchs in einem Widerstand.

die Welle des Stromes  $J$ , welche durch den Hitzdraht fließt, und der Spannung  $e$ , welche an demselben liegt, gezeichnet, auch ist in jedem Augenblick das Produkt  $e \cdot J$  gebildet und aufgetragen.  $\mathcal{E}$  stellt diese

Wattlinie dar. Bei der Aufzeichnung ist wohl zu beachten, daß bei dem zweiten Wechsel, bei welchem Strom und Spannung negativ sind, der Effekt  $\mathcal{E}$  doch positiv sein muß, weil  $-e$  mal  $-J$  doch  $+e \cdot J$  gibt. Von dieser Wattlinie ist leicht das Mittel zu bilden, es ist einfach gleich dem halben Höchstwert, also:

$$\mathcal{E}_m = \frac{\bar{e} \cdot \bar{I}}{2}$$

Soviel Watt werden im Mittel durch den Wechselstrom im Hitzdraht in Wärme umgesetzt. Wir wollen jetzt fragen: Welcher dauernd konstant fließende Gleichstrom  $I$  erzeugt in dem Hitzdraht genau ebensoviel Wärme wie der Wechselstrom und ruft damit den gleichen Ausschlag hervor?

Die von diesem Gleichstrom in Wärme verwandelten Watt betragen

$$\mathcal{E} = I^2 \cdot r$$

und müssen mit den durch den Wechselstrom in Wärme verwandelten Watt übereinstimmen, also:

$$\begin{aligned} \mathcal{E} &= \mathcal{E}_m \\ I^2 \cdot r &= \frac{\bar{e} \cdot \bar{I}}{2} \\ I^2 &= \frac{\bar{e} \cdot \bar{I}}{2 \cdot r} = \frac{(\bar{I} \cdot r) \cdot \bar{I}}{2 \cdot r} = \frac{\bar{I}^2}{2} \\ I &= \frac{\bar{I}}{\sqrt{2}} = 0,707 \cdot \bar{I} \dots \dots \dots 33 \end{aligned}$$

d. h. der Gleichstrom, welcher ebensoviel Watt in Wärme verwandelt wie der veränderliche Wechselstrom, ist das 0,707fache des Höchstwertes vom Wechselstrom. Soviel wird unser Hitzdrahtinstrument also auch anzeigen, wenn es von einem Wechselstrom durchflossen ist. Diesen mittleren Wert des Wechselstromes, den die Meßinstrumente anzeigen, nennen wir den *Effektivwert* desselben. *Wir verstehen demnach unter dem Effektivwert eines Wechselstromes denjenigen mittleren Stromwert, der als konstanter Strom in einem Widerstand die gleiche Wärme entwickelt, wie der veränderliche Wechselstrom.*

Wenn man von Wechselströmen spricht, meint man immer diesen Effektivwert, den die Meßinstrumente anzeigen, weil nur dieser für den Wechselstromeffekt maßgebend ist. Der Effekt, welcher in einem Widerstand  $R$ , welcher von einem Wechselstrom durchflossen ist, in Wärme umgesetzt wird, ist demnach:

$$\mathcal{E} = I^2 \cdot R \dots \dots \dots 34$$

worin  $I$  der Effektivwert des Wechselstromes ist.

Die gleiche Überlegung könnten wir nun für die Spannung mit einem Hitzdrahtspannungsmesser anstellen. Auch dieser würde einen Mittelwert anzeigen, den wir den Effektivwert der Spannung nennen, und welcher durch die Beziehung gegeben ist:

$$e = \frac{\bar{e}}{\sqrt{2}} = 0,707 \cdot \bar{e} \dots \dots \dots 35$$

## B. Die Darstellung der Sinuslinien durch Vektoren.

Um eine Sinuslinie zu zeichnen, dreht man bekanntlich einen *Strahl* oder *Vektor* wie es Abb. 177 andeutet. Die gerade Strecke  $a-b-c-d-e-a$  ist der abgewinkelte Umfang des Kreises, den das Ende des drehenden Vektors beschreibt. Indem wir nun in jeder Stellung des Vektors von dessen Endpunkt eine horizontale Linie herüberziehen, bekommen wir die einzelnen Punkte der Sinuslinie. Um nun für irgendwelche

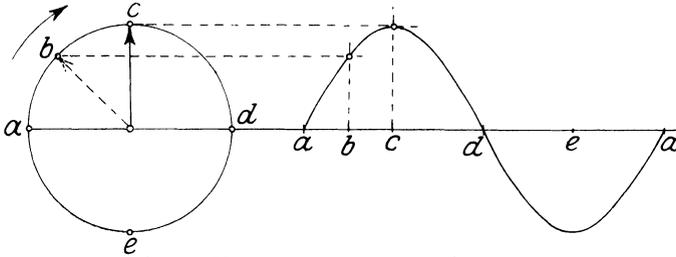


Abb. 177. Darstellung einer Sinuslinie.

Sinuslinien, z. B. die beiden der Abb. 178 die erzeugenden Vektoren zu finden, gehen wir den obigen Weg rückwärts. Wir schlagen Kreise, deren Radien gleich den Höchstwerten der Sinuslinien sind und legen dann an einer beliebigen Stelle einen Schnitt  $N-N$ . Von den Schnittpunkten ziehen wir dann Horizontale herüber nach den Kreisen, welche dort die

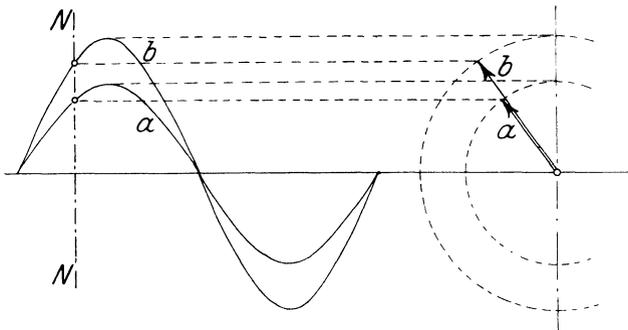


Abb. 178. Man findet die Vektoren der Wellen, wenn man einen beliebigen Schnitt  $N-N$  legt.

Endpunkte der Vektoren liefern. Wir sehen, daß die Vektoren von Sinuslinien, welche in Phase liegen, in die gleiche Richtung fallen. Zwei Sinuslinien  $a$  und  $b$ , welche nach Abb. 179 nicht in Phase liegen, ergeben in gleicher Weise Vektoren  $O-a$  und  $O-b$ , welche gegeneinander um einen Winkel  $\alpha$  verschoben sind, der der Verschiebung der beiden Wellen gegeneinander entspricht. Wir wollen nun die beiden Sinuslinien addieren, indem wir in jedem Augenblick die Summe  $x + y$  bilden. Wir erhalten dann eine neue Sinuslinie  $c$ , deren Vektor  $O-c$  leicht gefunden werden kann. Man macht aber gleichzeitig die Entdeckung, daß der

Vektor  $O-c$  die Diagonale eines Parallelogramms ist, welches aus den beiden Vektoren  $O-a$  und  $O-b$  als Seiten gebildet wird. Wir können uns also durch eine solche Parallelogrammkonstruktion die mühsame Addition der Wellen ersparen. Noch einfacher wird es, wenn man nur die

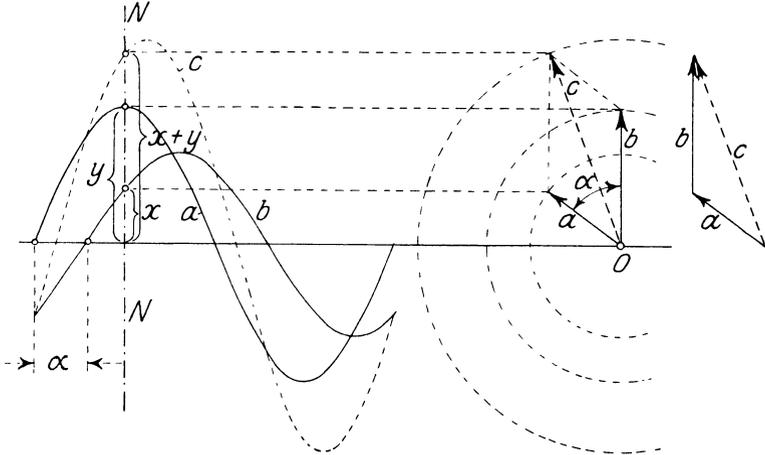


Abb. 179. Addition zweier Sinuslinien.

Hälfte des Parallelogramms zeichnet, wie es rechts dargestellt ist. Wir merken uns also: *Um die Summe zweier oder mehrerer Sinuslinien zu finden, reißt man sich deren Vektoren nach Größe und Richtung gleichsinnig aneinander. Die Verbindungslinie vom Anfang zum Endpunkt des Linienzugs stellt den Summenvektor dar.*

## C. Die Beziehung zwischen Strom und Spannung im Wechselstromkreis.

### 1. Selbstinduktion im Wechselstromkreis.

Wir sahen auf S. 46, daß der Strom in einer Spule nicht plötzlich auf seinen Wert  $E : R$  ansteigt, wenn man eine Gleichstromspannung anlegt. Angenommen, er brauche dazu bei einer bestimmten Spule  $\frac{1}{100}$  Sekunde, so würde die Spannung nach Abb. 175 in dieser Zeit, wenn man einmal 50 sekundliche Wellen annimmt, von  $a$  bis  $d$  gekommen sein. Also ehe der Strom überhaupt seinen Höchstwert erreicht hat, ist die Spannung schon wieder verschwunden. Wir sehen also, daß der Strom bei Wechselstrom überhaupt nicht den Wert erreichen kann, der bei Anlegung einer gleich großen Gleichstromspannung entstehen würde, und daß der Strom um so niedriger bleiben muß, je größer die Selbstinduktion der Spule und je größer die Wellenzahl ist. Während also früher bei Gleichstrom nur beim Ein- und Ausschalten eine Wirkung der Selbstinduktion zu beobachten war, tritt dieselbe bei Wechselstrom wegen der dauernden Stromänderung fortgesetzt auf.

Wir wollen nun nach Abb. 180 eine Spule, deren Ohmscher Widerstand  $R$  sei, an eine Wechselfspannung legen und diese so lange verändern,

bis ein Wechselstrom  $I$ , den wir in Abb. 181 durch eine Sinuslinie dargestellt haben, hindurchfließt. Wir fragen nun: Wie groß muß die Wechselspannung  $e$  sein, damit dieser Strom  $I$  fließt? Die zugeführte Spannung hat zwei Aufgaben: einmal hat sie den Strom  $I$  durch den Ohmschen Widerstand zu treiben, und dann wird ein Teil derselben benötigt, um die in der Spule durch die fortwährende Stromänderung auftretende Selbstinduktionsspannung im Gleichgewicht zu halten. Wir sehen also wieder, daß bei großer Selbstinduktionsspannung ein geringerer Teil der zugeführten Spannung übrig bleibt, um den Strom durch den Widerstand  $R$  zu treiben, daß dann also ein geringerer Strom fließen wird. Dieser Teil der Spannung, der Ohmsche Spannungsabfall  $I \cdot R$ , liegt mit der Stromwelle in Phase, denn wenn der Strom Null ist, muß auch die Spannung, die ihn erzeugt, Null sein (s. Abb. 181). Um die in der Spule auftretende Selbstinduktionsspannung zu ermitteln, wollen wir bedenken, daß der angenommene Strom einen Kraftfluß  $\mathcal{C}$  erzeugt, der um so größer ist, je größer der Strom ist (wenn man von

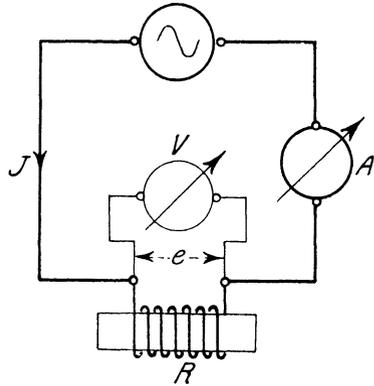


Abb. 180.

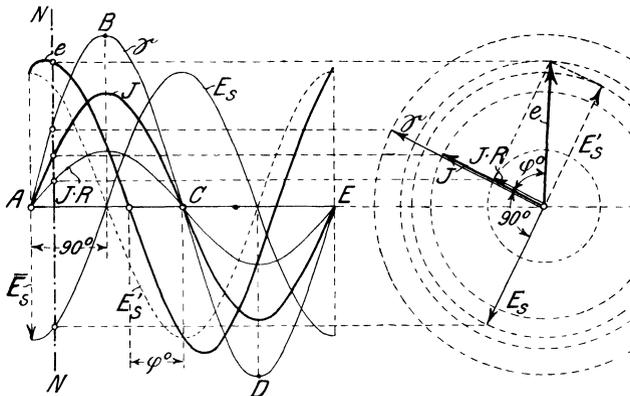


Abb. 181. In einer Spule eilt der Wechselstrom der Spannung nach.

der Sättigung absieht). Auch die Welle des Kraftflusses  $\mathcal{C}$  muß mit der Stromwelle in Phase liegen, weil unter Vernachlässigung der geringen Remanenz ohne Strom kein Kraftfluß vorhanden sein kann. Welche Selbstinduktionsspannung durch einen Kraftfluß hervorgerufen wird, der sich nach einer Sinuslinie ändert, haben wir aber bereits in dem Beispiel auf S. 45 kennen gelernt. Der stärkste Anstieg des Kraftflusses, also die größte Kraftlinienänderung in der Zeiteinheit, ist im Punkt A vorhanden. In diesem Augenblick wird also auch die größte Selbstinduktions-

spannung  $\bar{E}_s$  erzeugt. Nachher steigt der Kraftfluß weniger schroff an, und an dem Gipfel B hört überhaupt der Anstieg auf, dort wird also auch keine Selbstinduktionsspannung erzeugt. Wir wissen nun, daß die Welle der Selbstinduktionsspannung in den Punkten A, C und E ihren Höchstwert, in den Punkten B und D ihren Nullwert haben muß. Da aber die frühere Regel sagt, daß ein ansteigender Strom eine entgegengerichtete Selbstinduktionsspannung und ein abnehmender Strom eine gleichgerichtete Spannung erzeugt, so ist damit die Lage der Spannungswelle  $E_s$  bestimmt. Diese Spannung soll nun von der zugeführten Spannung im Gleichgewicht gehalten, also aufgehoben werden, und wir brauchen dazu natürlich eine entgegengesetzt gleiche Spannung  $E_s'$ , deren Welle in Abb. 181 punktiert gezeichnet ist. Die Spannung  $e$ , welche wir an die Spule legen müssen, setzt sich aus den beiden Spannungen  $I \cdot R$  und  $E_s'$  zusammen und wird einfach durch Addition der beiden Wellen gefunden, sie entspricht etwa der einem Gleichstrommotor zugeführten Spannung, deren größter Teil auch der im Motor erzeugten Gegenspannung das Gleichgewicht hält, während der Rest  $J \cdot R$  ist. Der Einfluß der Selbstinduktion tritt jetzt deutlich zutage. Während wir ohne Selbstinduktion als Spannung nur die Welle  $I \cdot R$  nötig hätten (wie bei Gleichstrom), brauchen wir hier eine Spannung  $e$ , welche wesentlich größer ist und, was völlig neu ist, nicht mehr in Phase mit der Stromwelle  $I$  liegt. Die Stromwelle beginnt ihren Anstieg später als die Spannungswelle. Wir merken uns also: In eine Spule eilt der Wechselstrom der Spannung nach. Da wir eine Welle durch Drehung des Vektors um  $360^\circ$  erhalten, können wir die Verschiebung der Stromwelle gegen die Spannungswelle auch durch einen Winkel ausdrücken, den wir  $\varphi$  nennen. Um in Abb. 181 das Vektordiagramm zu bekommen, legen wir wieder an irgend einer Stelle einen Schnitt N—N und verfahren genau wie früher. Der Winkel zwischen den Vektoren  $e$  und  $I$  ist  $\varphi$ . Derjenige zwischen den Vektoren  $I$  und  $E_s$  muß  $90^\circ$  betragen, weil die Wellen um ein Viertel einer Periode gegeneinander verschoben sind.

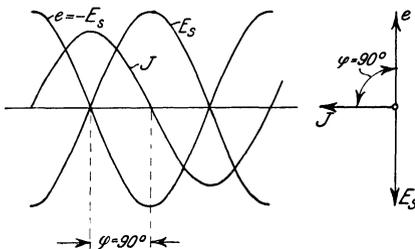


Abb. 182. In der widerstandslosen Spule eilt der Strom der Spannung um  $90^\circ$  nach.

Wir können nun zwei Grenzfälle unterscheiden:

1. Die Selbstinduktion ist sehr groß, der Widerstand  $R$  vernachlässigbar klein.

In diesem Falle fällt die Spannungswelle  $I \cdot R$  in Abb. 181 fort, die zugeführte Spannung  $e$  braucht demnach nur der Selbstinduktionsspannung das Gleichgewicht zu halten, wie dies Abb. 182 darstellt.

In diesem Falle erreicht die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung ihren höchsten Wert  $\varphi = 90^\circ$ .

2. Die Selbstinduktion ist vernachlässigbar klein, der Widerstand  $R$  jedoch sehr groß.

Jetzt tritt keine Selbstinduktionswirkung auf, wir haben es demnach mit einem einfachen Ohmschen Widerstand zu tun. Den Verlauf

der Strom- und Spannungswelle zeigt bereits Abb. 175. Beide Wellen liegen in Phase. Die Phasenverschiebung ist gleich Null.

**Berechnung der Selbstinduktionsspannung.** Es genügt, wenn wir deren Wert an einer Stelle, z. B. im Augenblick A berechnen. Hierzu wollen wir aber noch folgendes vorausschicken: In Abb. 183 ist ein Zylinder vom Radius R dargestellt, auf welchem eine Schraubenlinie gezeichnet ist, die bekanntlich entsteht, wenn man ein Papierdreieck ABC um den Zylinder

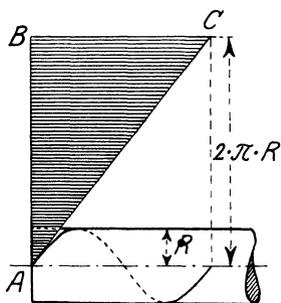


Abb. 183.

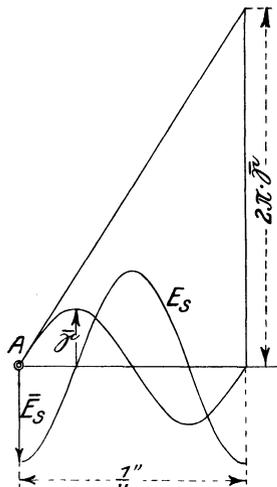


Abb. 184.

wickelt. Die Seite A—B muß gleich dem Umfang  $2 \cdot R \cdot \pi$  sein. AC bildet die Tangente an die Schraubenlinie, die in der Projektion eine Sinuslinie ist.

Um die im Augenblick A der Abb. 184 erzeugte Selbstinduktionsspannung  $\bar{E}_s$  zu berechnen, denken wir uns, daß der Kraftfluß so wie in diesem Augenblick weiter anstiege. Dann erreichte er nach obigem Satz nach Ablauf einer Welle, das ist  $1/\nu$  Sekunde den Wert  $2 \cdot \pi \cdot \bar{\mathcal{C}}$ . Nach Gleichung 19 ist

$$E_s = \frac{z \cdot \mathcal{C}}{t \cdot 100000000},$$

worin  $\mathcal{C}$  die Kraftlinienänderung in t Sekunden ist. z ist die Windungszahl. Setzt man hier die Kraftlinienänderung  $2 \cdot \pi \cdot \bar{\mathcal{C}}$  in  $1/\nu$  Sekunden ein, so erhält man:

$$\bar{E}_s = \frac{z \cdot 2 \cdot \pi \cdot \bar{\mathcal{C}} \cdot \nu}{100000000}.$$

Um aus diesem Höchstwert den Effektivwert zu bekommen, müssen wir noch durch  $\sqrt{2}$  dividieren und erhalten dann:

$$E_s = \frac{4,44 \cdot \bar{\mathcal{C}} \cdot \nu \cdot z}{100000000} \dots \dots \dots 36$$

Aus dem Vektordiagramm Abb. 181 geht hervor, daß die Spannung  $I \cdot R$  mit der Selbstinduktionsspannung  $E_s$  stets einen Winkel von  $90^\circ$  einschließt. Der Eckpunkt B in Abb. 185 muß also nach den Gesetzen

der Geometrie auf einem Halbkreis über der Spannung  $e$  als Durchmesser liegen. Der Phasenverschiebungswinkel  $\varphi$  ist um so größer, je größer die Selbstinduktionsspannung  $E_s$  gegenüber dem Ohmschen Spannungsverlust  $I \cdot R$  ist. Eine große Selbstinduktionsspannung entsteht aber nach Gleichung 36 durch einen großen Kraftfluß, durch eine hohe Wellenzahl und durch eine große Windungszahl.

**Die Hintereinanderschaltung von Selbstinduktion und Widerstand.** In der durch Abb. 186 dargestellten Hintereinanderschaltung einer Spule mit einem Ohmschen Widerstand werden beide von dem gleichen Strom  $I$  durchflossen. Bei der Aufzeichnung des Vektordiagramms gehen wir deshalb von diesem Wert aus und tragen uns denselben unter Annahme eines beliebigen Maßstabs in Abb. 187 auf. Wir wollen in diesen Diagrammen jetzt immer gleich die Effektivwerte auftragen. Durch Abb. 181 wissen wir, daß die Spannung  $e_1$  an der Spule diesem Strom um einen Winkel  $\varphi_1$  voreilen muß. Wir tragen uns also  $e_1$  um diesen Winkel verschoben an. Der gleiche Strom  $I$  durchfließt den Widerstand  $R_2$ , und an diesem Widerstand liegt die Spannung  $I \cdot R_2 = e_2$ , die nach dem Früheren in Phase mit dem Strom liegen muß. Wir zeichnen also den Vektor  $e_2$  in die Richtung des Stromes  $I$ . Um die Maschinenspannung  $e$

Abb. 185.  
Spannungsdreieck.

die Spannung  $e_1$  an der Spule diesem Strom um einen Winkel  $\varphi_1$  voreilen muß. Wir tragen uns also  $e_1$  um diesen Winkel verschoben an. Der gleiche Strom  $I$  durchfließt den Widerstand  $R_2$ , und an diesem Widerstand liegt die Spannung  $I \cdot R_2 = e_2$ , die nach dem Früheren in Phase mit dem Strom liegen muß. Wir zeichnen also den Vektor  $e_2$  in die Richtung des Stromes  $I$ . Um die Maschinenspannung  $e$

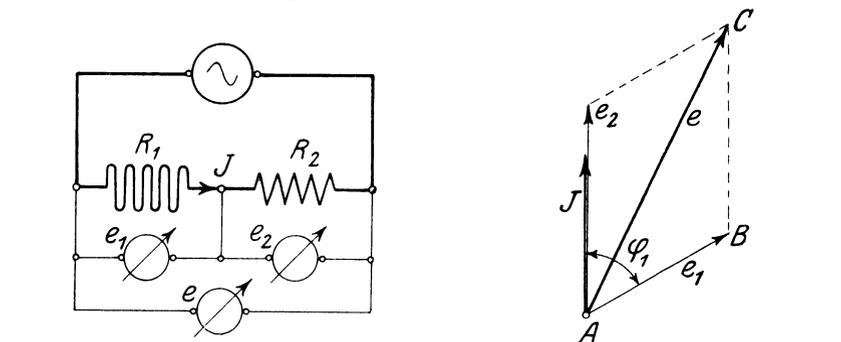


Abb. 186.

Abb. 187. Diagramm der Hintereinanderschaltung (Abb. 186).

zu bekommen, haben wir die geometrische Summe der beiden Spannungen  $e_1$  und  $e_2$  zu bilden. Dies könnte dadurch geschehen, daß wir uns die gegeneinander verschobenen Sinuswellen dieser beiden Spannungen aufzeichneten und genau wie in Abb. 179 addierten. Einfacher ist es aber bekanntlich, aus den Vektoren der beiden Spannungen ein Parallelogramm zu bilden. Die Diagonale stellt dann den Vektor der Summenspannung dar. Wir müssen wohl beachten, daß die Ablesungen der beiden Spannungsmesser  $e_1$  und  $e_2$  addiert, keineswegs die Zeigerstellung des dritten Spannungsmessers  $e$  ergibt, weil die Instrumente doch nicht die Augenblickswerte, sondern die Effektivwerte anzeigen. Auch das Diagramm 187 zeigt ja, daß nicht  $e = e_1 + e_2$  ist. Wir können

diese Schaltung benutzen, um die Phasenverschiebung  $\varphi_1$  einer Spule zu ermitteln. Wir messen die drei Spannungen und zeichnen uns mit denselben zuerst das Spannungsdreieck ABC und dann das übrige Diagramm.

**Die Parallelschaltung von Selbstinduktion und Widerstand.** Das Kennzeichen der Parallelschaltung, welche Abb. 188 darstellt, ist die

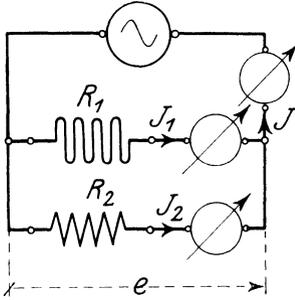


Abb. 188.

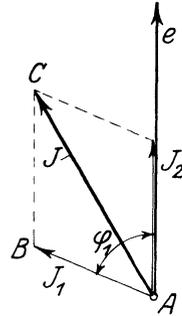


Abb. 189. Diagramm der Parallelschaltung (Abb. 188).

gemeinsame Spannung. Wir zeichnen uns deshalb in Abb. 189 zuerst den Vektor dieser Spannung  $e$ . Der Strom  $I_1$  der Spule eilt dieser Spannung um den Winkel  $\varphi_1$  nach, während der Strom  $I_2$  des Ohmschen Widerstandes mit  $e$  in Phase liegt. Um den Gesamtstrom  $I$  zu bekommen, haben wir das Parallelogramm zu bilden und die Diagonale zu ziehen. Auch mit dieser dreifachen Strommessung können wir die Phasenverschiebung bestimmen, indem wir zuerst wieder das Stromdreieck ABC aufzeichnen.

**Die Hintereinanderschaltung von Selbstinduktionen.** Diese Schaltung liefert uns ein Vektordiagramm, welches sich nur dadurch von Abb. 187 unterscheidet, daß auch  $e_2$  gegen den Strom  $I$  um einen Winkel  $\varphi_2$  ver-

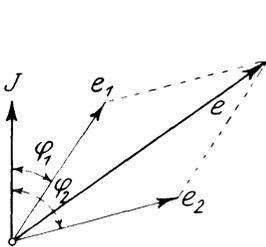


Abb. 190. Diagramm zweier hintereinander geschalteten Spulen.

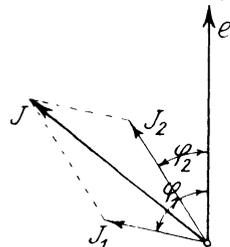


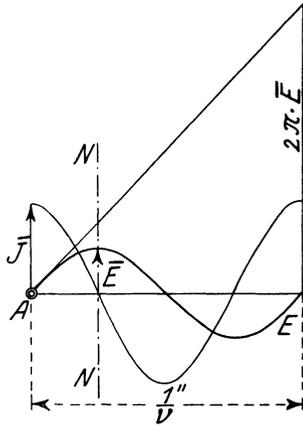
Abb. 191. Diagramm zweier parallel geschalteten Spulen.

schoben ist (Abb. 190). Es ist nun leicht, auch das Diagramm für mehrere hintereinander geschaltete Spulen zu zeichnen.

**Die Parallelschaltung von Selbstinduktionen.** Das Vektordiagramm zweier parallel geschalteten Spulen ist in Abb. 191 dargestellt und bedarf keiner weiteren Erläuterung.

2. Kapazität im Wechselstromkreis.

Die Ladung  $Q$ , welche ein Kondensator aufnimmt, ist nach S. 48 um so größer, je größer die angelegte Spannung  $E$  ist. Legen wir eine Wechselspannung  $E$  an den Kondensator, so wird die Ladung und Entladung des Kondensators nie zur Ruhe kommen, weil sich die Spannung doch fortwährend ändert. Es werden sich also Lade- und Entladeströme in stetiger Folge aneinander reihen und einen richtigen Wechselstrom ergeben, obwohl doch der Stromkreis durch die Isolierschicht des Kondensators unterbrochen ist. Ein Strommesser zeigt also dauernd einen Ausschlag. Die stärkste Änderung der Spannung haben wir dort,



wo nach Abb. 192 die Spannung vom Punkt A ansteigt. Es ist deshalb anzunehmen, daß in diesem Augenblick auch der stärkste Ladestrom fließt. Die Ladung ist beendet, wenn die Spannung ihren Höchstwert erreicht hat. Dann muß demnach auch der Ladestrom Null werden. Die darauffolgende Abnahme der Spannung bedingt natürlich eine zunehmende Entladung des Kondensators, also einen entgegengesetzt fließenden Entladestrom.

Abb. 192. Der Kondensatorstrom eilt der Spannung um  $90^\circ$  vor.

Wir sehen, daß die Stromwelle des entstehenden Wechselstromes um eine viertel Welle, also um  $90^\circ$ , gegen die Kondensatorspannung verschoben ist. Während aber früher bei der Selbstinduktion der Strom der Selbstinduktionsspannung  $E_s$  um  $90^\circ$  nacheilte, eilt hier der Strom der Kondensatorspannung um  $90^\circ$  vor. Das Vektordiagramm des Kondensators zeigt Abb. 192 ebenfalls.

**Die Beziehung zwischen Strom und Spannung.** Wir wollen wieder wie früher annehmen, daß die Spannung  $E$  so wie im Punkte A der Abb. 192 weiter ansteige. Dann würde nach dem Früheren ein konstanter Ladestrom auf den Kondensator fließen, dessen Größe mit dem Wechselstrom  $\bar{I}$  im Augenblick A übereinstimmen müßte. Nach Gleichung 20 und 21 ist die Ladung  $Q$ :

$$Q = I \cdot t \text{ und } Q = C \cdot E.$$

Wir setzen diese beiden Werte gleich und finden dann:

$$I = \frac{C \cdot E}{t}.$$

In Abb. 192 würden wir nach  $1/\nu$  Sekunden eine Spannung  $2 \cdot \pi \cdot \bar{E}$  erreichen. Setzen wir diese Werte in die vorstehende Beziehung ein, so finden wir:

$$\bar{I} = \frac{C \cdot 2 \cdot \pi \cdot \bar{E}}{1/\nu}$$

Durch beiderseitige Division durch  $\sqrt{2}$  bekommen wir die Effektivwerte:

$$I = E \cdot m \cdot C \dots \dots \dots 37$$

worin  $2 \cdot \pi \cdot \nu = m$  gesetzt ist.

Diese Beziehung zeigt uns, daß der Kondensatorstrom um so größer ist, je größer die Wellenzahl und die Spannung ist.

**Beispiel:** Nach Abb. 193 sei an eine Wechselstrommaschine, welche 10000 V liefert, ein Kabel angeschlossen, welches am Ende offen ist. Trotzdem fließt ein Strom hinein, weil die beiden Kabeladern als Belege eines Kondensators aufzu-

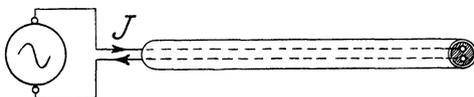


Abb. 193. Ein Kabel stellt einen Kondensator dar.

fassen sind. Das Kabel habe eine Länge von 20 km und für jedes km eine Kapazität von  $0,2 \mu F$ . Wie groß ist der Strom  $I$ , wenn die Spannung 50 sekundliche Wellen hat?

Die Kapazität des ganzen Kabels ist:

$$C = 20 \cdot 0,2 = 4 \mu F = 0,000004 F$$

$$m = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314$$

$$I = 10000 \cdot 314 \cdot 0,000004 = 12,5 A.$$

Dieser Ladestrom kann bei sehr langen Kabelleitungen und hohen Spannungen so groß sein, daß der Betrieb solcher Leitungen in Frage gestellt ist.

**Die Hintereinanderschaltung von Kondensatoren.** Die in Abb. 194 hintereinandergeschalteten beiden Kondensatoren sind von dem gleichen Strom  $I$  durchflossen. Bei der Zeichnung der Vektoren in Abb. 195

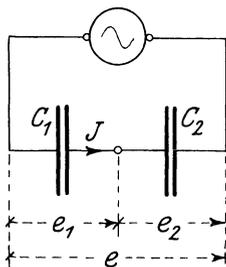


Abb. 194.

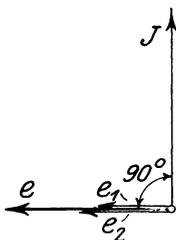


Abb. 195. Diagramm der Hintereinanderschaltung (Abb. 194).

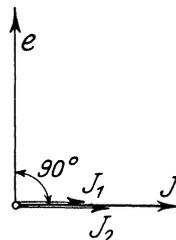


Abb. 196. Diagramm zweier parallel geschalteten Kondensatoren.

gehen wir deshalb von dem Strom aus und zeichnen uns dazu um  $90^\circ$  nacheilend die beiden Spannungen  $e_1$  und  $e_2$ , deren Summe die Maschinen-spannung  $e$  ergibt.

**Die Parallelschaltung von Kondensatoren.** Das Diagramm der Schaltung ist in Abb. 196 dargestellt. Durch Addition der um  $90^\circ$  der Spannung voreilenden beiden Ströme erhält man den Maschinenstrom.

### 3. Die Zusammenschaltung von Selbstinduktion und Kapazität. Die Hintereinanderschaltung.

Um zu der in Abb. 197 dargestellten Schaltung das Vektordiagramm zu zeichnen, gehen wir wieder von der gemeinsamen Stromstärke  $I$  aus.

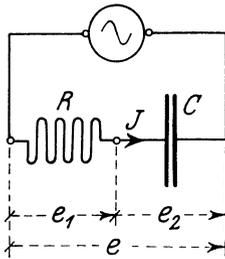


Abb. 197.

Die Spannung  $e_2$  am Kondensator eilt dem Strom um  $90^\circ$  nach. Die Spannung  $e_1$  an der Spule denken wir uns nach Abb. 185 zusammengesetzt aus dem Ohmschen Spannungsabfall  $I \cdot R$ , der in Phase mit dem Strom  $I$  liegt und der Selbstinduktionsspannung  $E_s$ , welche dem Strom um  $90^\circ$  voreilt. Das Parallelogramm aus diesen beiden Spannungen liefert uns in der Diagonale die Spannung  $e_1$  an der Spule (Abb. 198). Setzen wir hierauf  $e_1$  und  $e_2$  zu einem neuen Parallelogramm zusammen, so ergibt uns die neue Diagonale die Maschinenspannung  $e$ . Unter Fort-

lassung aller unnötigen Linien können wir auch das rechts gezeichnete Diagramm zeichnen, in welchem die drei Spannungsgrößen  $I \cdot R$ ,  $E_s$  und  $e_2$  in richtiger Richtung, gleichsinnig aneinandergereiht sind. Die Verbindungslinie vom Anfangs- zum Endpunkt ergibt die Gesamtspannung  $e$ .

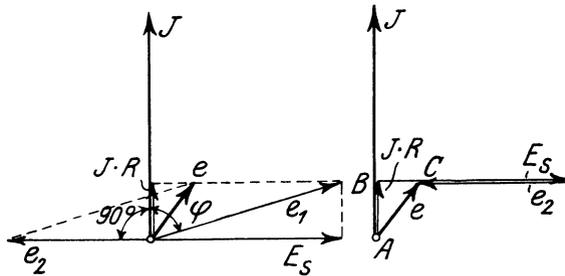


Abb. 198. Diagramm der Hintereinanderschaltung (Abb. 197).

In dem Dreieck  $ABC$  ist  $BC = E_s - e_2$ . Es könnte nun sein, daß  $E_s$  gerade gleich  $e_2$  wäre, dann wäre  $BC = 0$  und die Klemmenspannung  $e$  stimmte mit  $I \cdot R$  überein. Die zusammenschaltete Selbstinduktion und Kapazität verhält sich dann also gradeso, wie wenn es nur ein Ohmscher Widerstand wäre. Man bezeichnet diesen Zustand als *Spannungsresonanz*. Das Diagramm lehrt, daß in diesem Resonanzfalle die Spannungen an der Spule und am Kondensator sehr viel größer sein können, als die Maschinenspannung  $e$ . Diese Überspannungen können in Leitungsnetzen eine ernste Gefahr bilden.

Um bei gegebener Maschinenspannung mittels des Diagramms die Spannungen  $e_1$  und  $e_2$  zu bestimmen, nimmt man am besten einmal einen Strom  $I$  an, rechnet sich die Spannungen  $I \cdot R$ ,  $E_s$  und  $e_2$  damit aus und zeichnet das Diagramm auf. Handelt es sich um eine eisenlose Selbstinduktion, so stellt das Verhältnis der Strecke  $AC$  zur gegebenen Maschinenspannung den Maßstab dar, mit dem die einzelnen Spannungen gemessen werden müssen. Bei einer Spule mit Eisen hingegen ist die

Aufgabe für verschiedene Annahmen von  $I$  durchzurechnen, bis man auf die richtige Maschinenspannung  $e$  kommt.

**Die Parallelschaltung.** Auch bei der Parallelschaltung von Selbstinduktion und Kapazität ist Resonanz möglich. Abb. 200 stellt das

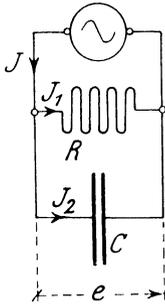


Abb. 199.

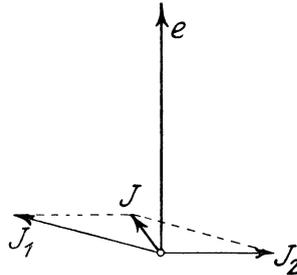


Abb. 200. Diagramm der Parallelschaltung (Abb. 199).

Diagramm der Schaltung 199 dar. Der Strom  $I_1$  der Spule eilt der gemeinsamen Spannung um einen Winkel nach, der kleiner als  $90^\circ$  ist. Der Strom  $I_2$  hingegen eilt um  $90^\circ$  vor. Die geometrische Summe beider ergibt den Strom  $I$ , der seinen kleinsten Wert dann hat, wenn er in Richtung der Spannung  $e$  liegt. Dann herrscht *Stromresonanz*. Die Ströme in der Spule und im Kondensator übersteigen dann den der Maschine entnommenen Strom ganz beträchtlich.

Nimmt man die Spule verlustlos mit  $90^\circ$  nacheilendem Strom an, so kann man durch passende Bemessung von Spule und Kondensator erreichen, daß  $I_1 = I_2$  wird. Dann ist  $I = 0$ . Man könnte dann also die Stromquelle fortnehmen und dennoch würde in dem Stromkreis zwischen Spule und Kondensator der Wechselstrom  $I_1 = I_2$  weiterfließen. Ein solcher Stromkreis stellt deshalb ein elektrisches Schwingungssystem dar, dessen Wellenzahl durch die Größe der Spule und des Kondensators bestimmt ist. Stimmt nun die Eigenwellenzahl eines solchen Stromkreises mit der Wellenzahl einer angelegten Spannung überein, so steigert sich die Schwingung immer mehr bis zu unendlich großen Strom- oder Spannungswerten (Resonanz).

#### D. Die Leistung des Wechselstroms.

Unter dem Effektivwert eines Wechselstromes verstanden wir nach S. 118 denjenigen mittleren Stromwert, der, konstant fließend, ebensoviel Watt in einem Widerstand in Wärme verwandelt wie der Wechselstrom. In einem Widerstand  $R$  werden deshalb durch einen Wechselstrom mit dem Effektivwert  $I$

$$\mathcal{G} = I^2 \cdot R$$

Watt in Wärme verwandelt.

In Abb. 176 hatten wir bereits einmal den Verlauf der Wattlinie dargestellt. Die Wattlinie  $\mathcal{G}$  bekommen wir durch Multiplikation von Strom und Spannung in jedem Augenblick. Der mittlere Wattverbrauch ist gleich  $\bar{e} \cdot \bar{I} : 2$ . Setzen wir nun noch statt  $\bar{e}$  den Wert  $\sqrt{2} \cdot e$  und statt  $\bar{I}$  den Wert  $\sqrt{2} \cdot I$ , so erhält man

$$\mathcal{E} = \frac{\sqrt{2} \cdot e \cdot \sqrt{2} \cdot I}{2} = e \cdot I.$$

Bis hierher stimmt also die Berechnung der Wechselstromleistung vollständig mit derjenigen für Gleichstrom überein. Jetzt wollen wir aber eine Spule betrachten, bei welcher zwischen Strom und Spannung

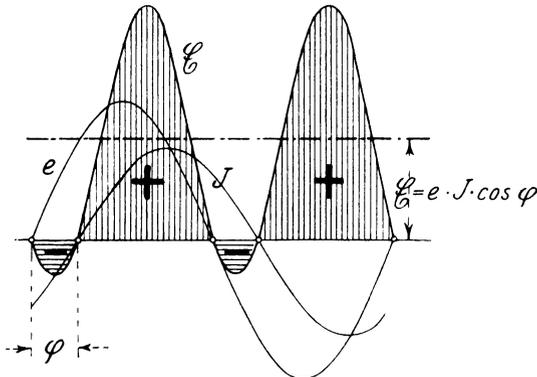


Abb. 201. Wattverbrauch bei nacheilendem Strom.

eine Phasenverschiebung  $\varphi$  vorhanden ist. In Abb. 201 sind die beiden Wellen  $e$  und  $I$  mit einer Verschiebung  $\varphi$  gegeneinander gezeichnet. Bilden wir jetzt das Produkt aus beiden in jedem Augenblick, so erhalten wir zwar eine ganz ähnliche Wattlinie wie in Abb. 176. Dieselbe ist aber nicht so hoch wie jene, weil die Höchstwerte von  $e$  und  $I$  nicht zusammen-

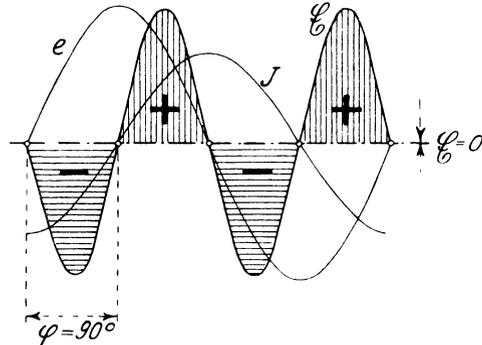


Abb. 202. Der Wattverbrauch ist Null, wenn der Strom um  $90^\circ$  nachhinkt.

treffen und reicht auch unten über die Nulllinie hinaus. Der horizontal schraffierte negative Teil ist Leistung, welche von der Spule an die Maschine zurückgeliefert wird, und die man von der oberen Leistung abziehen muß, um den wirklichen Effektverbrauch der Spule zu bekommen. Wir erkennen also, daß durch die Phasenverschiebung nicht mehr  $e \cdot I$  Watt verbraucht werden, sondern weniger. In Abb. 202 ist schließlich auch der Grenzfall untersucht, wenn die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung  $90^\circ$  ist. Dann ist die Wattlinie symmetrisch zur Nulllinie, der negative Teil, in welchem Energie an das Netz zurückgeliefert wird, ist gerade so groß, wie derjenige Teil, in welchem Effekt verbraucht wird. Die Energie pulsiert also lediglich zwischen Maschine und Spule hin und her, ohne daß dieselbe in Wärme umgesetzt wird. Eine Wärmeentwicklung ist ja auch gar nicht möglich, denn eine Phasenverschiebung von  $90^\circ$  ist ja nur denkbar, wenn der Widerstand der Spule  $R = 0$  ist.

Die Leistung des Wechselstroms ist demnach nur dann gleich Strom mal Spannung, wenn keine Phasenverschiebung vorhanden ist. Sobald

ein Phasenverschiebung  $\varphi$  vorhanden ist. In Abb. 201 sind die beiden Wellen  $e$  und  $I$  mit einer Verschiebung  $\varphi$  gegeneinander gezeichnet. Bilden wir jetzt das Produkt aus beiden in jedem Augenblick, so erhalten wir zwar eine ganz ähnliche Wattlinie wie in Abb. 176. Dieselbe ist aber nicht so hoch wie jene, weil die Höchstwerte von  $e$  und  $I$  nicht zusammen-

treffen und reicht auch unten über die Nulllinie hinaus. Der horizontal schraffierte negative Teil ist Leistung, welche von der Spule an die Maschine zurückgeliefert wird, und die man von der oberen Leistung abziehen muß, um den wirklichen Effektverbrauch der Spule zu bekommen. Wir erkennen also, daß durch die Phasenverschiebung nicht mehr  $e \cdot I$  Watt verbraucht werden, sondern weniger. In Abb. 202 ist schließlich auch der Grenzfall untersucht, wenn die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung  $90^\circ$  ist. Dann ist die Wattlinie symmetrisch zur Nulllinie, der negative Teil, in welchem Energie an das Netz zurückgeliefert wird, ist gerade so groß, wie derjenige Teil, in welchem Effekt verbraucht wird. Die Energie pulsiert also lediglich zwischen Maschine und Spule hin und

eine Verschiebung da ist, muß der Effekt kleiner sein. Wie kann man denselben berechnen?

In der Trigonometrie versteht man unter dem Kosinus eines Winkels im rechtwinkligen Dreieck das Verhältnis der anliegenden Kathete zur Hypotenuse. Auf Abb. 185 angewandt, folgt:

$$\cos \cdot \varphi = \frac{I \cdot R}{e},$$

hieraus 
$$R = \frac{e \cdot \cos \cdot \varphi}{I}.$$

Da nun in jedem Widerstand, einerlei ob es der Widerstand einer Spule ist oder nicht, immer  $I^2 \cdot R$  Watt in Wärme umgesetzt werden, können wir auch hier schreiben:

$$\mathcal{G} = I^2 \cdot R.$$

Nun setzen wir den obigen Wert von R ein und erhalten:

$$\mathcal{G} = I^2 \cdot \frac{e \cdot \cos \varphi}{I} = I \cdot e \cdot \cos \varphi . . . . . 38$$

Der Kosinus des Phasenverschiebungswinkels ist also der Faktor, mit welchem wir bei Wechselstrom das Produkt Strom mal Spannung noch multiplizieren müssen, um den wirklichen Wattverbrauch zu erhalten. Wir nennen  $\cos \varphi$  deshalb den *Leistungsfaktor*. Derselbe muß gleich 1 sein bei einem Ohmschen Widerstand. Dies trifft auch zu, denn bei einem Widerstand ist die Phasenverschiebung Null und  $\cos 0^\circ = 1$ . Bei einer Phasenverschiebung von  $90^\circ$  wird  $\cos 90^\circ = 0$  und damit auch die Leistung  $\mathcal{G} = 0$ . Da in Abb. 202 ein Wattverbrauch nicht stattfindet, weil der Strom um  $90^\circ$  gegen die Spannung verschoben ist, nennt man diesen Strom auch vielfach *wattlosen* Strom. Auch der im Kondensator um  $90^\circ$  voreilende Strom ist ein wattloser Strom. Ein Wattmeter, welches wir in bekannter Weise einschalten, zeigt immer den wirklichen Wattverbrauch.

## E. Die Drosselspule.

**1. Die verlustlose Drosselspule.** Unter einer Drosselspule verstehen wir eine Spule mit Eisenkern, welche in der Elektrotechnik häufig angewandt wird, um eine Wechselspannung abzdrosseln. Die in Abb. 203 dargestellte Drosselspule besitzt einen fast geschlossenen Eisenkreis, der beiderseits nur durch einen schmalen, verstellbaren Luftspalt  $d$  unterbrochen ist. Wir wollen zunächst einmal annehmen, daß diese Drosselspule weder einen nennenswerten Ohmschen Spulenwiderstand noch Verluste im Eisen habe. Nach dem auf S. 122 Gesagten dient dann die zugeführte Klemmenspannung  $e$  nur dazu, die in der Spule erzeugte Selbstinduktionsspannung im Gleichgewicht zu halten. Diese Spannung, welche wir in Zukunft der Einfachheit halber statt mit  $E_s$  nur mit  $E$  bezeichnen wollen, ist auf S. 123 berechnet worden und beträgt nach Gleichung 36:

$$E = \frac{4,44 \cdot \bar{\mathcal{G}} \cdot \nu \cdot z}{10000000}.$$

Sie muß bei der verlustlosen Drosselspule mit der Klemmenspannung  $e$  übereinstimmen. In dieser Gleichung sind bei der ausgeführten Drosselspule alle Größen bis auf den Kraftfluß  $\mathfrak{S}$  bekannt. Derselbe ist demnach vollständig bestimmt. Während bei Gleichstrom nach S. 31 der Kraftfluß sich aus der Amperewindungszahl und der Länge des Kraftlinienweges ohne weiteres berechnen ließ, ist dies bei Wechselstrom nicht möglich, weil man den Strom zunächst noch gar nicht kennt. Der Strom ist aber in seiner Größe nicht durch ein so einfaches Gesetz, wie das Ohmsche Gesetz für Gleichstrom bestimmt, sondern seine Größe hängt ja gerade von dem Kraftfluß, den er erzeugen soll, ab. Die Verhältnisse liegen also kurz gesagt so, daß eine an die Drosselspule angelegte Spannung einen ganz bestimmten Kraftfluß, welcher nach obiger Gleichung berechnet werden kann, erzeugt. Dieser Kraftfluß bedarf zur Überwindung der magnetischen Widerstände einer bestimmten Amperewindungszahl, die uns die Rechnungsweise auf S. 31 liefert. Da nun die Windungszahl festliegt, wird die Spule soviel Strom aus dem Netz aufnehmen müssen, daß die berechnete Ampere-Windungszahl herauskommt. Die Drosselspule paßt sich also hinsichtlich der Stromaufnahme ganz den magnetischen Verhältnissen an. Schreibt die angelegte Spannung einen großen Kraftfluß vor, oder hat dieser erhebliche Widerstände zu überwinden, so hat die Spule einen so hohen Strom aufzunehmen, daß eine ausreichende Amperewindungszahl zur Erzeugung des geforderten Kraftflusses vorhanden ist. Da wir Verluste nicht voraussetzen, ist der Strom wattlos, er eilt der Spannung also um  $90^\circ$  nach.

**Beispiel:** Die in Abb. 203 dargestellte Drosselspule werde an eine Wechselspannung von 100 V, 50 Wellen angelegt. Wie groß ist der Wechselstrom, den die Spule durchfließt, wenn die Windungszahl  $z = 100$  ist, und wenn der Luftspalt  $d$  das eine Mal Null, das andere Mal 0,5 mm ist?

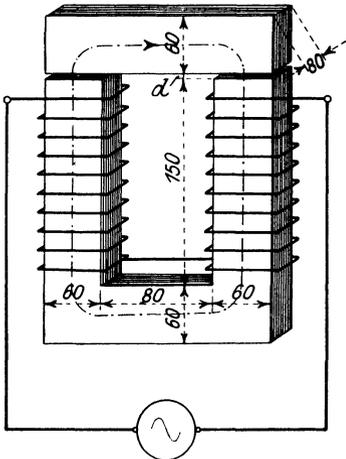


Abb. 203. Drosselspule.

Nach Abb. 48 benötigen wir zur Erzeugung von 10400 Kraftlinien durch  $1 \text{ cm}^2$  etwa 4 AW/cm. Für den ganzen Kraftlinienweg also:

$$AW = 4 \cdot 65 = 260.$$

Nach Gleichung 36 ist:

$$\mathfrak{S} = \frac{E \cdot 100000000}{4,44 \cdot v \cdot z} = \frac{100 \cdot 100000000}{4,44 \cdot 50 \cdot 100},$$

$$\mathfrak{S} = 450000 \text{ Kraftlinien.}$$

Der Eisenquerschnitt ist  $6 \cdot 8 = 48 \text{ cm}^2$ , da aber eine Unterteilung in Bleche vorgenommen werden muß, die durch Papier voneinander getrennt sind, ist nur etwa  $90\%$  des berechneten Querschnitts Eisen, also:

$$48 \cdot \frac{90}{100} = 43,2 \text{ cm}^2.$$

Die Kraftlinienzahl durch ein  $\text{cm}^2$  ist also:

$$\mathfrak{S} = \frac{450000}{43,2} = 10400.$$

Um diese zu erzeugen, brauchen wir eine bestimmte Amperewindungszahl:

a) *Ohne Luftspalt.* Die Länge des Kraftlinienwegs beträgt nach Abb. 203  $l = 65 \text{ cm}$ .

Hieraus ergibt sich der Strom zu:

$$\bar{I} = \frac{AW}{z} = \frac{260}{100} = 2,6 \text{ A,}$$

also dessen Effektivwert:

$$I = \frac{2,6}{\sqrt{2}} = 1,83 \text{ A.}$$

b) *Mit Luftspalt 0,5 mm.* Die für das Eisen notwendigen AW bleiben die gleichen. Da aber der Kraftfluß noch durch eine Luftstrecke von  $2 \cdot 0,5 = 1$  mm hindurch muß, deren Kraftliniendichte

$$\mathfrak{B} = \frac{450\,000}{48} = 9400$$

ist, brauchen wir nach Seite 31 ferner noch:

$$AW_I = 0,8 \cdot \mathfrak{B} \cdot l = 0,8 \cdot 9400 \cdot 0,1 = 750$$

Für das Eisen hinzu:

$$AW_e = 260$$

$$AW = 1010$$

$$\bar{I} = \frac{1010}{100} = 10,1 \text{ A,}$$

$$I = \frac{10,1}{\sqrt{2}} = 7,2 \text{ A.}$$

Bei genauerer Rechnung müßte man noch berücksichtigen, daß sich die Kraftlinien bei dem Durchtritt durch die Luft etwas ausbreiten, so daß der Übertrittsquerschnitt um einige Prozent größer eingesetzt werden muß. Die benötigten AW und der Strom werden dadurch kleiner.

Wir sehen aus vorstehendem Beispiel, daß ein und dieselbe Spule an der gleichen Spannung einen ganz verschiedenen Strom aufnehmen kann, je nach dem magnetischen Widerstand, welcher sich dem Kraftfluß bietet. Je größer der Luftspalt ist, um so größer ist auch die Stromaufnahme. Wir können demnach den Luftspalt zur Regelung benutzen, wenn eine Drosselspule als Vorschaltwiderstand dient. Bei geringem Luftspalt wird sie eine hohe Spannung, bei großem Luftspalt eine kleine Spannung abdrosseln. Den Luftspalt hält man durch Pappe oder Preßspan auf bestimmtem Abstand. Metalle nimmt man dazu nicht gern, weil darin Wirbelströme, wie auf S. 44 erläutert, entstehen.

**2. Die Drosselspule unter Berücksichtigung der Verluste.** Die Verluste einer Drosselspule setzen sich aus den Kupferverlusten und den Eisenverlusten zusammen. Während die ersteren leicht zu berechnen sind, wenn der Ohmsche Widerstand der Wicklung gegeben ist, ist die Bestimmung der letzteren, welche in Wirbelstrom- und Hysteresisverluste zerfallen, weniger sicher. Die Entstehungsursache der Wirbelströme haben wir auf S. 44 näher betrachtet. Bei der Drosselspule, welche von Wechselstrom durchflossen ist, entsteht auch ein wechselnder Kraftfluß, und wenn wir uns das Eisen wieder nach Abb. 65 zerlegt denken, ändert sich der von den gedachten Eisenwindungen umschlossene Kraftfluß fortwährend, so daß Wirbelströme in ihnen entstehen, die wir nur durch starke Unterteilung des Eisens und durch Verwendung legierter Bleche in zulässigen Grenzen halten können. Wechselstrommagnete müssen deshalb immer sorgfältig in Bleche unterteilt sein. (Bleche von 0,5—0,3 mm mit Papierzwischenlage.) Die Hysteresisverluste entstehen

durch die fortwährende Ummagnetisierung, die bei 50 Wellen 50 mal in der Sekunde vor sich geht.

Für die Berechnung faßt man die beiden Eisenverluste zusammen und bezieht sie auf 1 kg Eisengewicht. Die Schaulinie in Abb. 204 gibt für

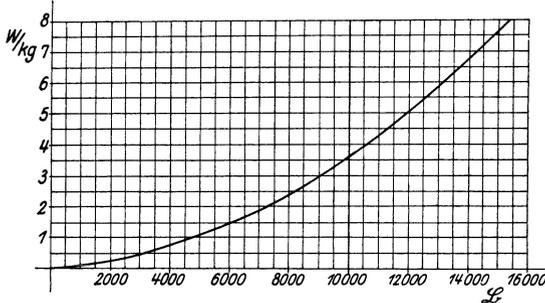


Abb. 204. Eisenverluste in 1 kg Schmiedeeisen bei 50 sekundlichen Wellen und 0,5 mm Blechstärke.

normales Dynamoblech von 0,5 mm an, wieviel Watt in jedem kg Eisen bei verschiedenen Magnetisierungen in Wärme verwandelt werden. Wie zu erwarten ist, steigt die Linie bei höheren Kraftlinienzahlen stark an. Um einen einfachen Vergleich zwischen verschiedenen Blechsorten zu haben, bedient man sich der sog. *Verlust-*

*ziffer*. Man versteht darunter den Wattverlust im Eisen bei einer Magnetisierung von  $\mathfrak{B} = 10000$  Kraftlinien durch ein cm<sup>2</sup> bei 50 Wellen in der Sekunde. Die Verlustziffer des in Abb. 204 dargestellten Eisens ist demnach 3,6.

Wir hatten an erster Stelle eine verlustlose Drosselspule betrachtet, weil deren Berechnung sich am einfachsten gestaltet. Wir sind aber auch berechtigt, eine praktische Drosselspule auf diese Weise zu berechnen, wenn es uns nicht auf große Genauigkeit ankommt. Denn die meisten Drosselspulen haben einen sehr geringen Widerstand und keine so großen Sättigungen, daß die Eisenverluste beträchtlich werden. Wenn dies alles aber nicht zutrifft, oder wenn der Luftspalt so groß ist, daß ein

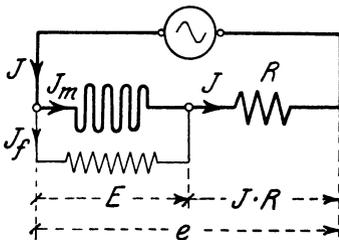


Abb. 205. Ersatzschaltung der Drosselspule mit Verlust.

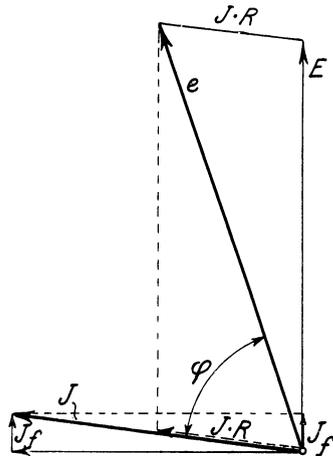


Abb. 206. Diagramm der Drosselspule nach Abb. 205.

beträchtlicher Strom durch die Spule geht, dann müssen wir genauer rechnen. Zu diesem Zweck denken wir uns in Abb. 205 wieder eine vollständig verlustlose Drosselspule, der aber ein Widerstand R vorgeschaltet sei, dessen Größe mit demjenigen der wirklichen Spule über-

einstimmt. Wir haben also weiter nichts getan, als den Widerstand und die Selbstinduktion, die in der wirklichen Spule vereint sind, getrennt gezeichnet. Parallel zur Spule denken wir uns aber noch einen weiteren Widerstand, in welchem gerade so viel Watt in Wärme verwandelt werden sollen, wie im Eisen durch die Eisenverluste verloren gehen. Es ist also ein Ersatzwiderstand, der uns die Einberechnung der Eisenverluste erleichtern soll. Bei der Aufzeichnung des Diagramms in Abb. 206 wollen wir von der verlustlosen Spule ausgehen und nach Aufzeichnung des Vektors  $E$  der Spannung an dieser Spule den hindurchfließenden Strom  $I_m$  in genau der gleichen Weise berechnen, wie denjenigen im Beispiel auf S. 132. Alsdann bestimmen wir das Eisengewicht und ermitteln an Hand der Darstellung 204 den gesamten Eisenverlust, welcher, durch die Spannung  $E$  dividiert, den Strom  $I_f$  ergibt. Dieser Strom muß in Phase mit seiner Spannung  $E$  liegen. Um nun den Strom  $I$  zu bekommen, also den Strom, der durch die wirkliche Drosselspule fließt, bilden wir aus  $I_m$  und  $I_f$  das Parallelogramm und ziehen die Diagonale  $I$ . Dieser Strom fließt auch durch den gedachten Vorschaltwiderstand  $R$  und ruft einen Ohmschen Spannungsverlust  $I \cdot R$  hervor, welcher zur Spannung  $E$  mittels Parallelogramms addiert werden muß, um die Maschinenspannung, also die Klemmenspannung  $e$  der wirklichen Spule zu bekommen. Wir müssen aber wohl beachten, daß die Spannung  $I \cdot R$  in Phase mit dem Strom  $I$  liegen muß, weil es doch ein Widerstand ist. In Zukunft wollen wir in den Diagrammen immer die eine (punktierter) Hälfte fortlassen.

**Beispiel:** Die in dem Beispiel auf Seite 132 betrachtete Drosselspule mit  $2 \cdot 0,5$  mm Luftspalt habe den großen Widerstand  $R = 5 \Omega$ . Wie groß ist der Strom und die Phasenverschiebung?

Schätzen wir die Spannung  $E$  einmal etwas geringer als die Klemmenspannung, nämlich zu 90 V. Dann wird:

$$\bar{E} = \frac{90 \cdot 100000000}{4,44 \cdot 50 \cdot 100} = 407000,$$

$$\bar{B} = \frac{407000}{43,2} = 9400 \text{ Kr./cm}^2.$$

Nehmen wir den Luftquerschnitt wegen der Kraftlinienausbreitung um 5% größer an:

$$48 + 5\% = 50,5 \text{ cm}^2.$$

Die magnetische Induktion in der Luft ist demnach:

$$\bar{B}_l = \frac{407000}{50,5} = 8100 \text{ Kr./cm}^2.$$

Die nötigen AW sind also:

$$\begin{aligned} AW_l &= 0,8 \cdot 8100 \cdot 0,1 = 650 \\ AW_e &= 3 \cdot 65 = 195 \\ \hline AW &= 845 \end{aligned}$$

$$I_m = \frac{845}{100} = 8,45 \text{ A},$$

$$I_m = 8,45 : \sqrt{2} = 6 \text{ A}.$$

Das Eisengewicht berechnet sich nach Abb. 203 zu 23,5 kg. Der Verlust pro kg beträgt nach Abb. 204 für  $\bar{B} = 9400 \text{ Kr./cm}^2$  3,2 W, also der ganze Eisenverlust:

$$\bar{C}_f = 3,2 \cdot 23,5 = 75 \text{ W}.$$

Der Strom  $I_f$  berechnet sich zu:

$$I_f = \frac{\mathcal{E}_f}{E} = \frac{75}{90} = 0,834 \text{ A.}$$

Die Aufzeichnung nach Abb. 206 ergibt:

$$I = 6,1 \text{ A und} \\ I \cdot R = 6,1 \cdot 5 = 30,5 \text{ W.}$$

Ferner kann man durch Abmessen feststellen:

$$e \approx 100 \text{ V,} \\ \varphi = 64^\circ \text{ und } \cos \varphi = 0,43.$$

Würde sich die Spannung nicht richtig zu 100 V ergeben haben, so müßte man die Rechnung mit einem anders angenommenen E wiederholen.

Der Wattverbrauch der Spule ist:

$$\begin{array}{r} \text{Kupferverlust } I^2 \cdot R = 6,1^2 \cdot 5 = 186 \text{ W} \\ \text{Eisenverlust} \qquad \qquad \qquad = 75 \text{ W} \\ \hline 261 \text{ W.} \end{array}$$

Derselbe muß sich auch aus dem Diagramm ergeben zu:

$$\mathcal{E} = e \cdot I \cdot \cos \varphi = 100 \cdot 6,1 \cdot 0,43 = 261 \text{ W.}$$

Die auf das Eisenstück ausgeübte Zugkraft schwankt (wie die Wattlinie in Abb. 176) zwischen einem Höchstwert und Null. Der Höchstwert ist nach Gl. 2:

$$P = \frac{0,04 \cdot \mathcal{B}^2 \cdot F}{1\,000\,000} = \frac{0,04 \cdot 8100^2 \cdot (50,5 \cdot 2)}{1\,000\,000} \\ P = 264 \text{ kg.}$$

Die mittlere Zugkraft ist gleich dem halben Höchstwert, also:

$$P = 132 \text{ kg.}$$

Das vorstehende Beispiel zeigt uns auch, warum Drosselspulen mit Vorteil bei Wechselstrom statt Vorschaltwiderständen benutzt werden. Die obige Spule drosselt bei 6,1 A 100 V ab und verbraucht 261 W. Würde man statt ihrer einen Widerstand nehmen, so würden in demselben  $6,1 \cdot 100 = 610 \text{ W}$  nutzlos verbraucht. Wir haben also trotz des hohen Widerstandes unserer Drosselspule noch eine erhebliche Leistung erspart.

Wir hatten anfänglich behauptet, daß die angelegte Spannung die Größe des Kraftflusses nach Gleichung 36 vorschreibe, und daß dann die Spule so viel Strom aufnehmen müsse, als zur Erzeugung des Kraftflusses nötig sei. Aus vorstehendem Beispiel sehen wir jedoch, daß dies nicht genau stimmt. Vielmehr bestimmt die Spannung E, welche um  $I \cdot R$  kleiner ist als e, die Größe des Kraftflusses. Derselbe wird also bei großem Strom und Widerstand kleiner ausfallen. Wenn es uns etwa einfallen sollte, eine sehr hohe Spannung an eine Spule zu legen, z. B. 500 V statt der 100 V in dem obigen Beispiel, so würde keineswegs eine fünffache Kraftliniendichte entstehen, weil die Sättigung eine solche ja überhaupt nicht zuläßt, sondern der Strom würde infolge der notwendigen starken Magnetisierung so groß werden, daß nach Abzug von  $I \cdot R$  nur noch eine verhältnismäßig kleine Spannung E übrig bliebe, deren Größe den Kraftfluß bestimmt.

## F. Der Wechselstromerzeuger.

**Der Aufbau der Wechselstrommaschine.** Die durch Abb. 86 dargestellte einfache Wechselstrommaschine eignet sich nicht für größere Leistungen und Spannungen. Es würde nämlich sehr große Schwierig-

keiten machen, wenn wir mittels der Schleifringe Wechselstrom von vielen tausend Volt Spannung abnehmen wollten, auch müßten bei großen Strömen die Schleifringe sehr groß sein. Man kehrt deshalb die Sache um und läßt den Anker still stehen, dafür aber das Magnetgestell umlaufen. Es ist klar, daß sich dadurch nur der Aufbau der Maschine ändert, die Eigenschaften und ihre Wirkungsweise bleiben unverändert. Fernerhin leuchtet aber ein, daß der Aufbau ziemlich ungeschickt ist, wenn man den Anker im Zentrum stillstehen läßt, während die Magnetpole außen umlaufen, und daß es besser wäre, wenn man den umlaufenden Teil, der doch auf einer Welle gelagert werden muß, im Zentrum der Maschine anordnen würde. Die heutigen Wechselstrommaschinen sind fast ausnahmslos nach dieser letzteren Art ausgeführt. Abb. 207 ist eine vereinfachte Zeichnung einer Wechselstrommaschine. Das umlaufende Magnetgestell ist als Polrad M ausgebildet und trägt die Magnetpole

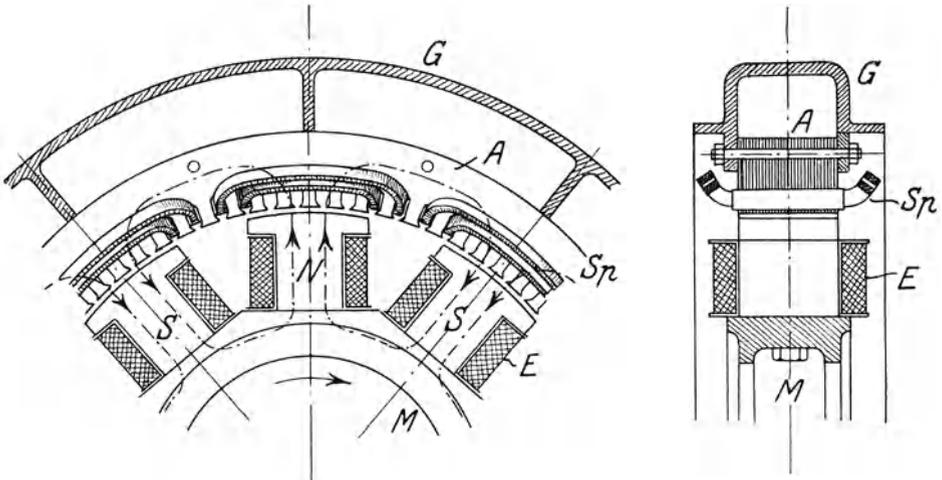


Abb. 207. Wechselstromerzeuger.

mit den Erregerwicklungen E. Diesen muß der erforderliche Erreger-Gleichstrom natürlich mittels Schleifringen zugeführt werden. Dieselben können aber klein sein und verlangen auch keine außergewöhnliche Isolation, weil der Erregerstrom klein und von nicht hoher Spannung ist. Der feststehende Anker besteht in der Hauptsache aus dem ringförmigen, aus Blechen aufgebauten Eisenkörper A, in dessen Nuten die Spulen Sp eingebettet sind. Die Spulenweite stimmt mit der Polteilung überein, es bleiben also immer einige Nuten frei. Der Ankerkörper A wird von dem gußeisernen Gehäuse G getragen, an welchem sich auch die Füße befinden.

**Das Verhalten der Wechselstrommaschine.** a) *Im Leerlauf.* Die allgemeine Induktionsgleichung 23 auf S. 61 gilt natürlich auch für Wechselstrommaschinen. Wenn wir wissen wollen, wie sich die erzeugte Spannung der Wechselstrommaschine bei konstanter Umlaufzahl ändert, wenn wir den Erreger-Gleichstrom verändern, brauchen wir nur in der

Gleichung  $E = c \cdot n \cdot \mathcal{E}$  das konstante  $n$  mit  $c$  zusammenzufassen, so daß wir erhalten:

$$E = C \cdot \mathcal{E}.$$

Die erzeugte Spannung ändert sich also genau wie das Magnetfeld. Da letzteres nach der bekannten Magnetisierungslinie ansteigt, muß auch die Linie der erzeugten Spannung (wie bei den Gleichstrommaschinen) nach einer ähnlichen Linie, der *Leerlaufkennlinie* Abb. 142, ansteigen. Den Gleichstrom für die Erregung müssen wir entweder aus einem vorhandenen Gleichstromnetz beziehen, oder, was häufiger ist, es ist mit der Wechselstrommaschine eine kleine Gleichstrommaschine, die sog. *Erregerdynamo*, gekuppelt.

b) *Bei Belastung.* Einer Wechselstrommaschine kann man ebenso, wie jeder anderen Maschine jeden beliebigen Strom bis zur Größe des Kurzschlußstromes entnehmen. Die der Maschine entnommenen Ströme können natürlich auch phasenverschoben sein. Wenn z. B. im Leitungsnetz viele Drosselspulen oder schwach belastete Motoren angeschlossen sind, wird der entnommene Strom der Spannung stark nachteilen, wenn aber die Wechselstrommaschine auf ein Kabelnetz arbeitet, indem gerade keine

Verbraucher eingeschaltet sind, so wird dieses als Kondensator wirkende Netz einen um  $90^\circ$  voreilenden Ladestrom aufnehmen.

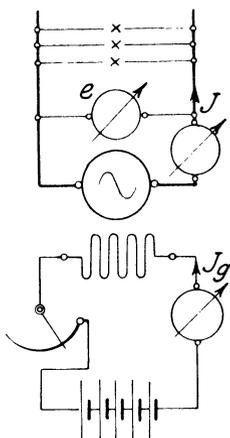


Abb. 208. Die belastete Wechselstrommaschine.

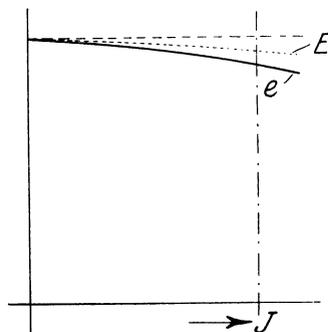


Abb. 209. Die Klemmenspannung der Wechselstrommaschine sinkt mit zunehmender Belastung.

Die belastete Wechselstrommaschine zeigt auch die Erscheinung der *Ankerrückwirkung*, die wir bei den Gleichstrommaschinen bereits kennen gelernt haben. Durch sie entsteht eine Beeinflussung des Hauptfeldes, und zwar wird dasselbe durch das Ankerfeld geschwächt, wenn der Maschine ein mit der Spannung phasengleicher oder ein nachteilender Strom entnommen wird. Ein voreilender Strom hingegen bewirkt eine Verstärkung des Feldes. Es geht hieraus hervor, daß die Spannung einer Wechselstrommaschine wegen der Ankerrückwirkung mit zunehmender Belastung sinken muß, wenn der entnommene Strom in Phase liegt, ganz besonders aber, wenn er nachteilend ist. Die Maschine zeigt hingegen eine Spannungserhöhung, wenn sie eine kapazitive Belastung durch voreilende Ströme hat.

Die in Schaltung 208 erzeugte Spannung ist in Abb. 209 durch Linie E dargestellt. An den Klemmen der Maschine muß natürlich eine noch kleinere Spannung  $e$  herrschen, weil doch der Ankerstrom in dem Widerstand  $r$  der Ankerwicklung einen Ohmschen Spannungsabfall  $I \cdot r$  hervorruft. Im Gegensatz zur Gleichstrommaschine tritt aber hier bei der Wechselstrommaschine noch ein weiterer Spannungsabfall auf, der sog. *induktive Spannungsabfall*. Während die früher betrachteten Kraftlinien der Ankerströme nur entstehen wollten, aber durch das stärkere Hauptfeld daran gehindert wurden, vermag der Ankerstrom in der unmittelbaren Umgebung der Nuten auch wirklich Kraftlinien zu erzeugen. Dieselben verlaufen etwa, wie die punktierten Linien in Abb. 210 andeuten und werden *Streukraftlinien* genannt. Wenn aber unsere von einem Wechselstrom durchflossene Ankerspule Kraftlinien erzeugt, so muß sie sich

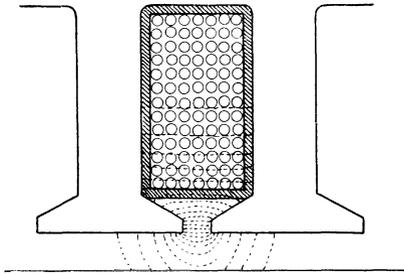


Abb. 210. Streukraftlinien.

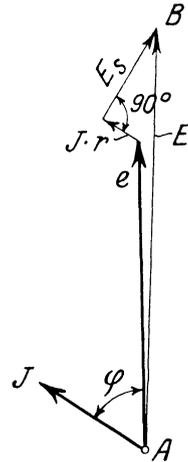


Abb. 211. Diagramm des Wechselstromerzeugers.

auch genau wie die früher betrachtete Drosselspule verhalten. Es muß also in ihr durch den fortwährenden Wechsel der Streukraftlinien eine Selbstinduktionsspannung entstehen, zu deren Überwindung wir einen geringen Teil der erzeugten Spannung opfern müssen. Entnehmen wir beispielsweise einer Wechselstrommaschine bei einer Phasenverschiebung  $\varphi$  einen nacheilenden Strom  $I$  und sei die dann herrschende Klemmenspannung  $e$ , so müssen wir nach Abb. 211 zunächst zu  $e$  den Ohmschen Spannungsabfall  $I \cdot r$  in Richtung von  $I$  addieren, weil  $I \cdot r$  mit  $I$  in Phase liegen muß, dann haben wir noch den induktiven Spannungsabfall senkrecht zu  $I \cdot r$  anzureihen, welcher gleich  $E_s$  ist. Daß wir diese Selbstinduktionsspannung senkrecht zu  $I \cdot r$  auftragen müssen, geht aus Abb. 185 hervor. Die Verbindungslinie A—B vom Anfang zum Ende des Linienzuges gibt uns dann die größere Spannung  $E$ , die in der Maschine erzeugt werden muß. Das gleiche Diagramm für den Fall, daß die Maschine mit voreilendem Strom (Kondensatoren) belastet ist, läßt erkennen, daß dann die erzeugte Spannung merkwürdigerweise geringer ist als die Klemmenspannung, weil die Selbstinduktionsspannung in diesem Falle die erzeugte Spannung unterstützt.

## V. Der Drehstrom und die Drehstrommaschinen.

### A. Die Drehstromerzeugung.

Wir haben uns in Abb. 212 die frühere einfache Wechselstrommaschine nochmals aufgezeichnet. Deren Anker trägt aber jetzt drei

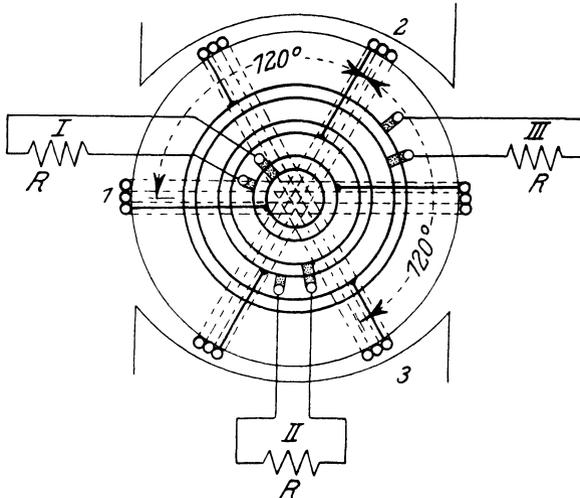


Abb. 212. Drehstromerzeuger.

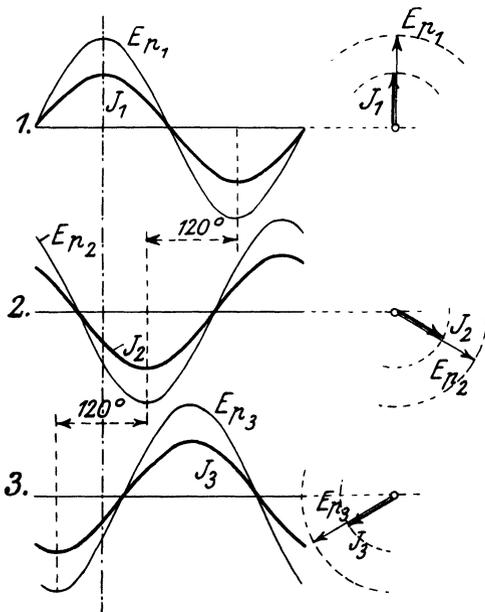


Abb. 213. Die in den drei Spulen der Abb. 212 erzeugten Wechselspannungen.

völlig voneinander getrennte Spulen, die um  $120^\circ$  gegeneinander versetzt sind. Jede Spule hat ihre eigenen Schleifringe, an die wir nach Belieben Stromverbraucher anschließen könnten. Bei der Umdrehung des Ankers wird in jeder Spule eine Wechselspannung erzeugt, und zwar bei einer Umdrehung eine Welle. Diese drei Wechselspannungen stimmen aber zeitlich nicht überein. Abb. 213 zeigt den Verlauf der Spannung in den drei Spulen. Weil die Spule 2 um  $120^\circ$  gegen Spule 1 verschoben ist, treten alle Spannungswerte um  $120^\circ$ , also um ein Drittel Welle

früher ein als bei Spule 1, wenn man Rechtsdrehung annimmt. Ebenso muß die Spannungswelle der dritten Spule derjenigen der Spule 2 um  $120^\circ$  voreilen. Die Verschiebungen gegeneinander sind in Abb. 213 eingezeichnet, auch sind die zugehörigen Vektoren gezeichnet. Wir wollen nun an jedes Schleifringpaar der Abb. 212 einen Widerstand  $R$  anschließen, wie dies auch die Schaltung

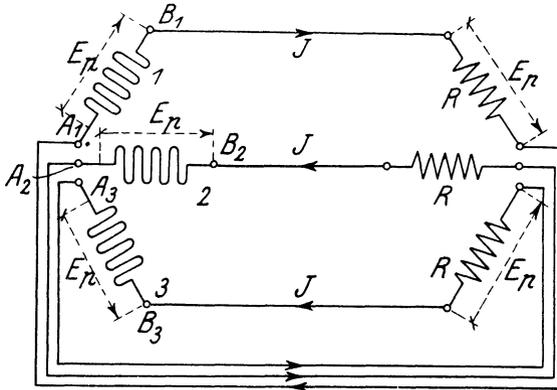


Abb. 214. An die drei Spulen der Abb. 212 ist je ein Widerstand angeschlossen.

Abb. 214 andeutet. Dann wird die in einer Spule erzeugte Spannung durch ihren Widerstand einen Strom treiben, welcher nach dem Ohmschen Gesetz gleich  $E_p : R$  ist. Wir wollen aber nicht vergessen, daß die drei Stromkreise bis jetzt völlig voneinander getrennt sind. Jeder der drei Ströme liegt mit seiner Spannung in Phase, wie dies Abb. 213 zeigt. Man liebt es jedoch, die drei Vektoren nicht getrennt voneinander zu zeichnen, sondern sie zu einem Diagramm zu vereinigen, wie es Abb. 215 darstellt. Es fragt sich aber jetzt: Was haben wir durch diese komplizierte Anordnung erreicht? Es leuchtet ein, daß wir die Maschine entschieden besser ausnutzen, als wenn wir nur einen einfachen Wechselstrom entnehmen würden, denn diejenigen Teile unseres Ankers, die sonst freibleiben, sind jetzt mit stromliefernden Spulen belegt, ohne daß die Reibungs- und Eisenverluste größer geworden sind als bei der einfachen Maschine. Wir erkaufen uns diesen Vorteil aber durch den Nachteil, daß wir nicht nur sechs Schleifringe, sondern auch sechs Leitungen zum Stromverbraucher nötig haben, während wir bei der einfachen Wechselstrommaschine doch mit zwei Zuleitungen auskamen. Wir wollen deshalb überlegen, ob wir nicht mit geringerer Leitungszahl auskommen können.

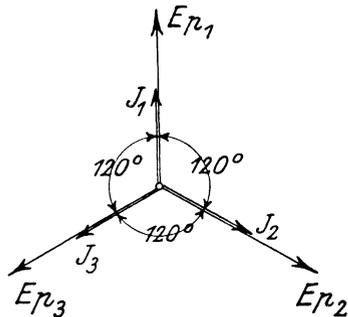


Abb. 215. Diagramm der Schaltung (Abb. 214).

**1. Die Sternschaltung.** Zu diesem Zweck betrachten wir zunächst einmal die Schaltung Abb. 216. Wenn man von den getrennten Stromkreisen a und b, deren Leitungen auf große Strecken parallel laufen, Leitungsmaterial ersparen will, so kann man einen gemeinsamen Leiter benutzen, wie dies Abb. c darstellt. In diesem fließt die Differenz  $I - i$  der Ströme. Hätte man hingegen statt dessen die Leiter 1 und 3 zu einem gemeinsamen Leiter zusammengefaßt, so würde darin  $I + i$  fließen. Die Verkettung von Stromkreisen ändert aber an den Spannungen und den Strömen gar nichts, es wird lediglich das Leitungskupfer von zwei Elementen gleichzeitig benutzt. Eine solche Stromkreisverkettung wollen wir nun mit Abb. 214 vornehmen, indem wir die drei schon nebeneinander gezeichneten Leiter zu einem gemeinsamen zusammenfassen.

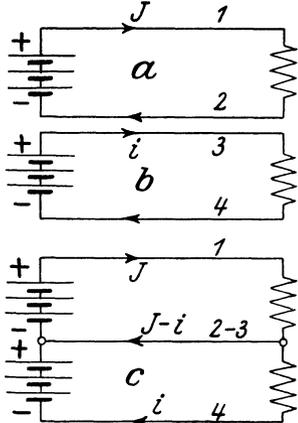


Abb. 216. Zwei Stromkreise können einen gemeinsamen Leiter haben.

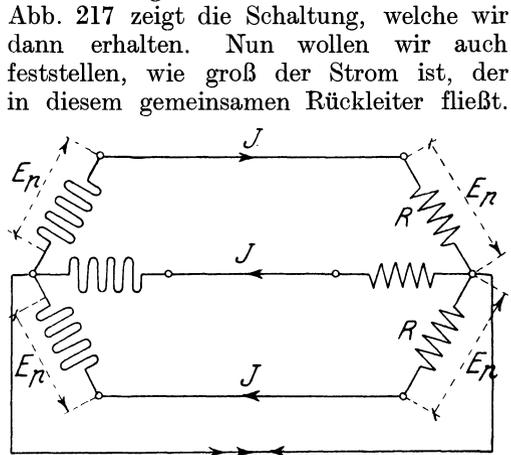


Abb. 217. Verkettung der drei Stromkreise der Abb. 214.

Die drei darin gleichzeitig fließenden Ströme sind in Abb. 213 übereinander dargestellt. Greifen wir einen Augenblick heraus, z. B.

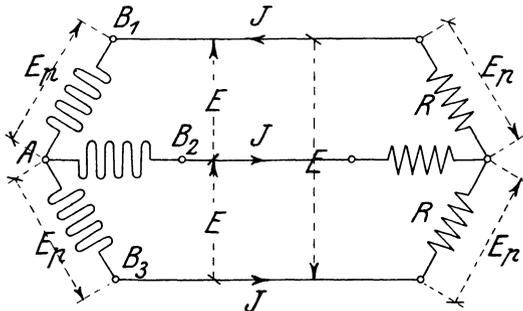


Abb. 218. Drehstrom-Sternschaltung.

den durch die Vertikale angegeben, so sehen wir, daß eine Addition der drei Ströme den Wert Null ergibt. Auch für jeden anderen Augenblick können wir feststellen, daß die Summe der drei Ströme jederzeit Null ist. In unserem gemeinsamen Rückleiter in Abb. 217 fließt demnach über-

haupt gar kein Strom, wir können ihn deshalb unbekümmert fortlassen und erhalten die viel benutzte *Sternschaltung* der Abb. 218. Es ist nun noch zu erwähnen, daß wir einen solchen mehr-

fachen, phasenverschobenen Wechselstrom **Drehstrom** nennen, insbesondere nennt man den beschriebenen *Dreiphasen-Drehstrom*, oder wohl auch dreiphasigen Wechselstrom. Die drei Zweige heißen die *Phasen* des Drehstroms. Wenn wir an Drehstrom einen Verbraucher anschließen wollen, z. B. einen Heizwiderstand, so muß derselbe aus drei Widerstandszweigen bestehen, die nach Abb. 218 ebenso wie die drei Stromerzeugerspulen *in Stern* geschaltet werden. Bei Drehstrom sind demnach drei Zuleitungen zum Verbraucher notwendig. Es gibt viele, die sich dies nicht recht vorstellen können, weil sie meinen, daß ebenso wie bei Gleichstrom, der eine Leiter der Hinleiter, der andere der Rückleiter des Stromes sein müsse. Bei Drehstrom wechseln sich die einzelnen Leiter infolge der Phasenverschiebung ab. Einmal ist der eine Leiter Hinleiter und die beiden anderen Rückleiter, im nächsten Augenblick ist der zweite Leiter jedoch schon Hinleiter und dafür der erste und dritte Rückleiter usf.

Wir wollen uns immer wieder erinnern, daß sich durch die Verkettung der drei Wechselstromkreise nichts an den Strom- und Spannungsverhältnissen geändert hat. Der Strom  $I$  in der Sternschaltung Abb. 218 berechnet sich also zu:

$$I = \frac{E_p}{R}$$

Neu ist in der Sternschaltung lediglich die Spannungsgröße  $E$  zwischen den drei Leitungen. Wir nennen dieselbe die *verkettete Spannung* oder einfach die Drehstromspannung im Gegensatz zur Spannung  $E_p$ , welche *Phasenspannung* heißt. Wie groß ist nun die verkettete Spannung  $E$ ?

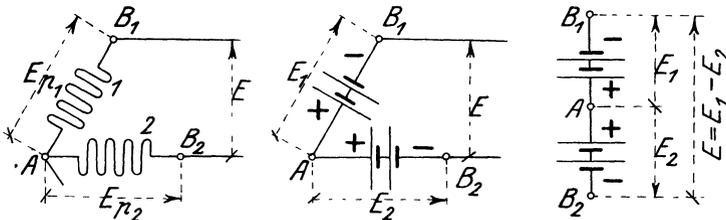


Abb. 219.

In Abb. 219 haben wir uns die beiden Spule 1 und 2 mit dem Sternpunkt A nochmals aufgezeichnet. An dem Punkt A liegen die Anfänge der Spulen, während  $B_1$  und  $B_2$  die Endpunkte sind. Die Spulen sind also ebenso wie die daneben gezeichneten Elemente geschaltet, die in der dritten Darstellung nur gerade ausgestreckt sind. Man sieht, daß die Spannung  $E$  gleich der Differenz der Einzelspannungen  $E_1$  und  $E_2$  sein muß. Nun darf man aber bei Drehstrom nicht etwa sagen  $E = E_{p1} - E_{p2}$ , denn das würde ja Null ergeben, man muß vielmehr bedenken, daß die Spannungen an den beiden Spulen doch um  $120^\circ$  gegeneinander verschoben sind, daß man also entweder die zugehörigen Sinuswellen voneinander abziehen muß oder, was viel einfacher ist, daß man im Vektordiagramm geometrisch die Differenz der beiden Vektoren bildet. In Abb. 220 sind die Spannungswellen der beiden Spulen 1 und 2 dargestellt.

Wenn wir jetzt aber die einzelnen Spannungen der Welle 2 von denen der Welle 1 abziehen wollen, müssen wir sehr auf die Vorzeichen achten und bedenken, daß man in der Algebra eine Größe von einer anderen abzieht, indem man das Vorzeichen jener umkehrt und dann die Größen einfach addiert. Dies soll auch hier geschehen. Von Welle 2 kehren wir die Vorzeichen dadurch um, daß wir die Welle wie punktiert umklappen. Hierauf addieren wir einfach Welle 1 mit der punktierten und erhalten die größere Welle E der verketteten Spannung.

Viel einfacher ergibt sich die verkettete Spannung aus dem Vektor-

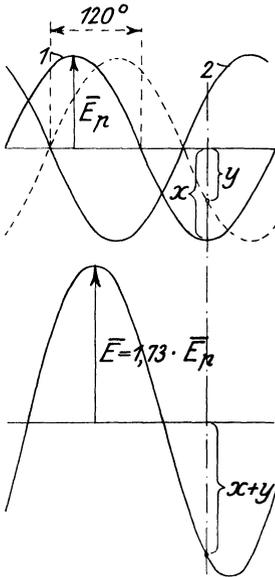


Abb. 220. Die verkettete Spannung ist die Differenz der Spannung 1 und 2.

diagramm. In Abb. 221 wollen wir  $E_{p_2}$  von  $E_{p_1}$  abziehen. Wir kehren zu diesem Zweck  $E_{p_2}$  um, wie punktiert, und bilden das Parallelogramm, welches als Diagonale die Spannung E ergibt. Da aber die Strecke A—B nach Größe und Richtung mit C—D übereinstimmt, ist es viel einfacher, die letztere Gerade zu ziehen. Die drei verketteten Spannungen bilden also im Diagramm ein gleichseitiges Dreieck. Aus dem Drei-

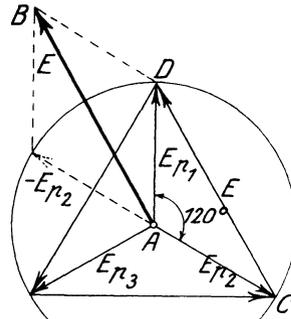


Abb. 221.

eck ACD ergibt sich nun die Größe der verketteten Spannung durch Abmessen oder Rechnung zu:

$$E = \sqrt{3} \cdot E_p = 1,73 \cdot E_p \dots \dots \dots 39$$

Die verkettete Spannung ist  $\sqrt{3}$  mal größer als die Phasenspannung.

Wir haben früher behauptet, daß der gemeinsame Rückleiter in Abb. 217, welcher die Nullpunkte der beiden Sterne miteinander verbindet, in Fortfall kommen kann, weil die Summe der durchfließenden Ströme in jedem Augenblick gleich Null ist. Das letztere trifft aber nicht immer zu. Wenn die drei Phasen ungleichmäßig belastet sind, wenn also die drei Widerstände R nicht übereinstimmen, dann haben die drei Ströme in Abb. 213 verschiedene Größe und ihr Summenwert ist nicht Null. Wir brauchen in diesem Falle den vierten Leiter, den man auch den *Nullleiter* nennt. Eine ungleiche Belastung der drei Phasen ist aber bei Belastung durch Glühlampen die Regel und wir wollen deshalb eine andere Schaltung suchen, bei welcher auch bei ungleicher Belastung mit drei Zuleitungen auszukommen ist.

**2. Die Dreiecksschaltung.** In Abb. 222 ist die frühere Schaltung der Abb. 214 noch einmal wiederholt, es sind nur die Spulen in etwas anderer Lage zueinander gezeichnet. Um eine andere Verkettung der drei Wechselstromkreise zu bekommen, wollen wir einmal probieren, ob nicht die nebeneinander gezeichneten Leiter zu einem einzigen vereinigt werden können. Dies ist in Abb. 223 geschehen. Man möchte aber Bedenken gegen diese Schaltung haben, weil doch die drei Erzeugerspulen zu einem

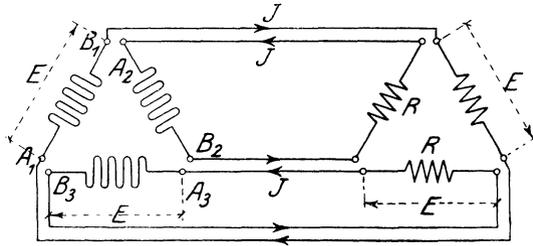


Abb. 222. Diese Schaltung stimmt mit Abb. 214 überein.

Stromkreis 1—2—3 kurzgeschlossen sind. Wir sind jedoch sofort beruhigt, wenn wir Abb. 213 betrachten. Dieselbe lehrt, daß ebenso wie die Ströme, auch die Summe der erzeugten 3 Spannungen in jedem Augenblick gleich Null ist. In dem Stromkreis 1—2—3 fließt demnach kein Kurzschlußstrom. Wir sehen aber, daß es wichtig ist, die drei Spulen richtig hintereinanderschalten. Würde man z. B. die zweite Spule umgekehrt einschalten, so daß  $B_2$  mit  $B_1$  zusammenfiel, dann

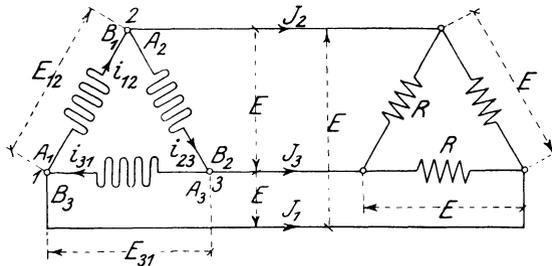


Abb. 223. Drehstrom-Dreiecksschaltung.

läge die Spannungswelle 2 in Abb. 213 gerade entgegengesetzt und die Summe der drei Spannungen wäre keineswegs Null. Es würde also innerhalb der Maschine ein starker Kurzschlußstrom kreisen.

Die in Abb. 223 dargestellte Schaltung ist also brauchbar, und wir nennen sie ihrer Form wegen *Dreiecksschaltung*. Wir haben dabei den Verbrauchsapparat auch in Dreieck geschaltet. Dies ist keineswegs unbedingt nötig. Derselbe könnte auch in Stern geschaltet werden oder auch der Erzeuger in Stern und der Verbraucher in Dreieck. Ist eine ungleichmäßige Belastung durch den Verbraucher zu erwarten, so werden wir denselben immer in Dreieck schalten, weil dies in Dreiecksschaltung nichts ausmacht.

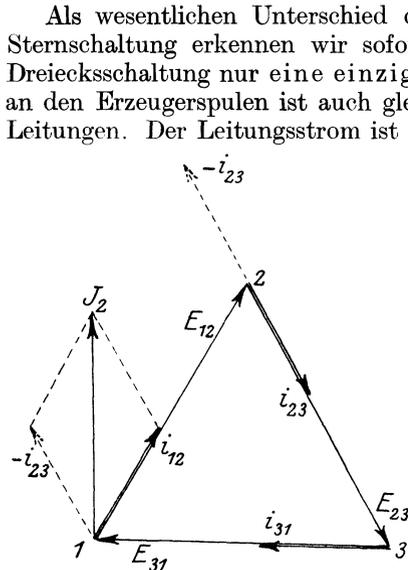


Abb. 224.

Als wesentlichen Unterschied der Dreiecksschaltung gegenüber der Sternschaltung erkennen wir sofort aus den Schaltungen, daß es bei Dreiecksschaltung nur eine einzige Spannung gibt. Die Spannung  $E$  an den Erzeugerspulen ist auch gleichzeitig die Spannung zwischen den Leitungen. Der Leitungsstrom ist aber hier nicht der Spulenstrom und wir wollen nun feststellen, in welchem Verhältnis der Leitungsstrom zum Phasenstrom in den Erzeugerspulen steht. Wir haben oben gehört, daß die drei Spulen richtig hintereinander geschaltet werden müssen, so daß immer das Ende der einen mit dem Anfang der nächsten Spule verbunden ist. In die Leitung 2 fließt demnach ein Strom  $I_2 = i_{12} - i_{23}$ . Um diesen Leitungsstrom  $I$  zu finden, haben wir also die Differenz der angrenzenden Phasenströme zu bilden. Wir könnten dies wieder durch Aufzeichnung der Wellen machen, wollen aber der Kürze halber vor-

ziehen, das Vektordiagramm zu benutzen. Abb. 224 zeigt das Dreieck der drei Spannungen  $E$ . Weil wir eine Belastung durch Ohmsche Widerstände haben, wollen wir annehmen, daß die Ströme  $i_{12}$ ,  $i_{23}$  und  $i_{31}$  mit den zugehörigen Spannungen  $E_{12}$ ,  $E_{23}$  und  $E_{31}$  in Phase liegen. Den Leitungsstrom  $I_2$  finden wir dann dadurch, daß wir den Vektor von  $i_{23}$  umkehren (punktirt gezeichnet) und mit  $i_{12}$  durch Parallelogrammbildung addieren. In gleicher Weise kann man die Ströme  $I_1$  und  $I_3$  finden, die mit  $I_2$  übereinstimmen. Aus dem Dreieck ergibt sich nun:

$$I = \sqrt{3} \cdot i = 1,73 \cdot i \dots \dots \dots 40$$

Der Leitungsstrom ist  $\sqrt{3}$  mal so groß wie der Phasenstrom.

Wenn wir bei Drehstrom allgemein von Strom und Spannung sprechen, dann meinen wir immer den Leitungsstrom und die Spannung zwischen den Leitungen.

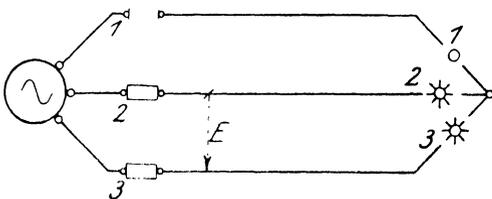


Abb. 225. Eine Sicherung ist durchgebrannt (Sternschaltung).

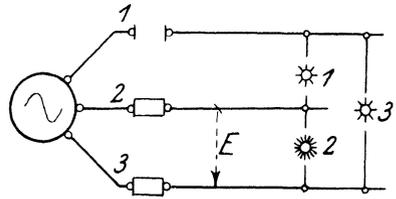


Abb. 226. Eine Sicherung ist durchgebrannt (Dreiecksschaltung).

Wir wollen uns zum Schluß noch überlegen, wie sich ein Netz in Stern- und Dreiecksschaltung verhält, wenn aus irgend welchen Gründen in einer Leitung die Sicherung durchbrennt. Abb. 225 zeigt eine Sternschaltung von drei Lampen.

Sicherung 1 sei durchgebrannt. Es herrscht also nur noch zwischen den Leitungen 2 und 3 die einfache Wechselspannung  $E$ , an welcher die Lampen 2 und 3 jetzt in Hintereinanderschaltung liegen. Die beiden Lampen brennen demnach trüb, während 1 dunkel ist. Bei der Dreiecksschaltung der Lampen in Abb. 226 brennt Lampe 2 mit voller Spannung. Die Lampen 1 und 3 liegen in Hintereinanderschaltung an der gleichen Spannung, jede brennt also mit halber Spannung.

Abb. 225 zeigt uns zugleich aber auch einen weiteren Nachteil, der uns die Verwendung der Sternschaltung bei Lichtnetzen erschwert. Angenommen, die drei Sicherungen seien unversehrt, es schalte aber jemand die Lampe 1 aus. Dann würde dieses Ausschalten genau so wirken, als ob die Sicherung 1 durchgebrannt wäre. Die Lampen 2 und 3 würden nur noch trüb brennen. Wenn wir jedoch einen Nulleiter ziehen, bleiben die anderen Phasen beim Ausschalten einer Lampe völlig unbeeinflusst.

### B. Die Drehstromleistung.

Die Drehstromleistung ist gleich der Summe der Leistungen in den Phasen. Sind die drei Phasen **gleich stark belastet**, so beträgt der Effekt aller zusammen bei Stern- bzw. Dreiecksschaltung:

$$\mathcal{E} = 3 \cdot E_p \cdot I \cdot \cos \varphi \text{ bzw. } \mathcal{E} = 3 \cdot E \cdot i \cdot \cos \varphi \dots\dots 41$$

oder bei Einführung der verketteten Spannung bzw. des Leitungsstromes:

$$E = \sqrt{3} \cdot E_p \qquad I = \sqrt{3} \cdot i$$

$$\mathcal{E} = 3 \cdot \frac{E}{\sqrt{3}} \cdot I \cdot \cos \varphi \qquad \mathcal{E} = 3 \cdot E \cdot \frac{I}{\sqrt{3}} \cdot \cos \varphi$$

$$\mathcal{E} = \sqrt{3} \cdot E \cdot I \cdot \cos \varphi \dots\dots\dots 42$$

worin  $\varphi$  die Phasenverschiebung zwischen  $I$  und Phasenspannung  $E_p$  bedeutet. Bei gleicher Belastung der Phasen genügt bei der Messung ein Leistungsmesser, welcher den Effekt nach Abb. 227 in einer Phase mißt. Seine Angaben sind mit der Phasenzahl zu multiplizieren, um den gesamten Drehstromeffekt zu bekommen. Bei Dreiecksschaltung

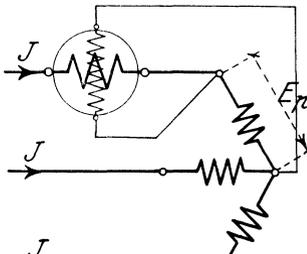


Abb. 227. Drehstrom-Leistungsmessung bei gleicher Phasenbelastung.

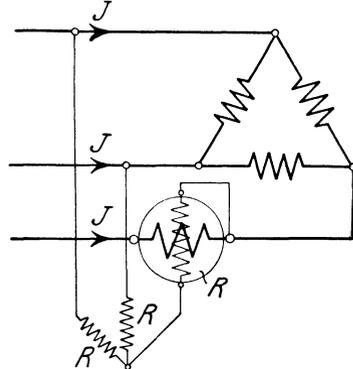


Abb. 228. Leistungsmessung mit künstlichem Sternpunkt und gleicher Phasenbelastung.

müßte man, um den Effekt einer Phase messen zu können, das Dreieck an einer Ecke öffnen, um die Stromspule des Leistungsmessers einschalten zu können. Die Spannungsspule liegt wieder an der Spannung derjenigen Spule, deren Strom durch die Stromspule geht. Auch hier

haben wir die Ablesungen wieder mit drei zu multiplizieren. Nun ist aber zuweilen eine Öffnung der Dreiecksschaltung nicht möglich, auch ist der Sternpunkt bei Sternschaltung oft nicht zugänglich, so daß die betrachteten Schaltungen gar nicht hergestellt werden können.

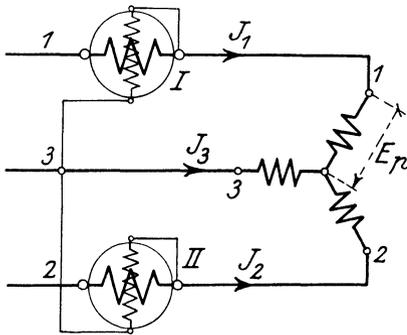


Abb. 229. Zweiwattmeterschaltung für ungleiche Phasenbelastung.

Dann muß man sich die Phasenspannung künstlich herstellen durch Schaffung eines sog. *künstlichen Sternpunktes*, wie dies Abb. 228 zeigt. Die drei Widerstände  $R$  des künstlichen Sternes, von denen einer die Spannungsspule des Wattmeters ist, müssen genau gleiche Ohmzahlen haben. Dann liegt an der Spannungsspule genau die Phasenspannung und die Ablesung ergibt, mit drei multipliziert, den Gesamteffekt.

Bei ungleicher Belastung der Phasen liegt es am nächsten, drei Leistungsmesser zu verwenden, deren drei Spannungsspulen zusammen einen künstlichen Sternpunkt bilden. Die Summe der drei Ablesungen ergibt den Gesamteffekt.

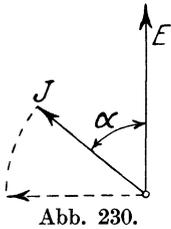


Abb. 230.

Trotz ungleicher Belastung der einzelnen Phasen kann man dennoch mit zwei Wattmetern auskommen, wenn man die sog. *Zweiwattmeterschaltung* nach Abb. 229 verwendet. Bei derselben sind die Enden der beiden Spannungsspulen an die dritte Phase angeschlossen, welche keine Stromspule enthält. Der Gesamtwattverbrauch in den drei Phasen ist in dieser Schaltung gleich der Summe der Angaben der beiden Leistungsmesser.

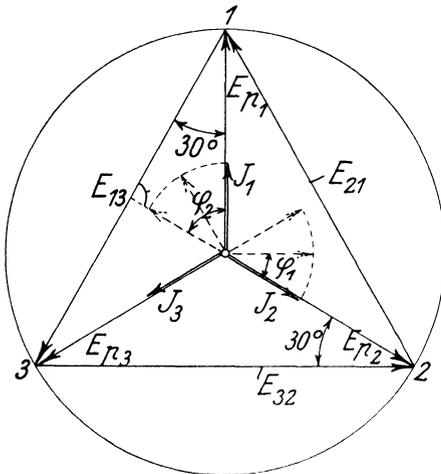


Abb. 231.

Ein Leistungsmesser zeigt immer den wirklichen Effekt unter Berücksichtigung der Phasenverschiebung. Sei z. B. die in Abb. 230 dargestellte Spannung  $E$  an die Spannungsspule des Leistungszeigers gelegt, während dessen Stromspule von dem Strom  $I$  durchflossen ist, so zeigt das Wattmeter  $E \cdot I \cdot \cos \alpha$  an. Denken wir uns einmal die Phasenverschiebung des Stromes, wie punktiert gezeichnet, auf  $90^\circ$  erhöht, so wird das Wattmeter Null zeigen, trotzdem die Größe von Strom und Spannung unverändert geblieben ist, weil jetzt  $\alpha = 90^\circ$ ,  $\cos 90^\circ$  aber gleich Null ist.  $E \cdot I \cdot 0$  ist aber gleich 0.

Betrachten wir jetzt das Drehstromdiagramm Abb. 231. An Wattmeter I der Schaltung 229 liegt die Spannung  $E_{13}$  und Strom  $I_1$  fließt durch seine Stromspule. Für Wattmeter II kommen indessen die

Werte  $I_2$  und  $E_{32}$  in Frage. Wir haben einmal angenommen, daß die Ströme  $I$  mit den Phasenspannungen  $E_p$  in Phase liegen. Dann schließen die Ströme  $I_1$  und  $I_2$  mit den zugehörigen Spannungen  $E_{13}$  bzw.  $E_{32}$  die Winkel von  $30^\circ$  ein. Jedes Wattmeter zeigt also:

$$E \cdot I \cdot \cos 30^\circ.$$

Nun ist nach Tabelle  $\cos 30^\circ$  gleich 0,866. Beide Wattmeter zusammen zeigen also:

$$2 \cdot 0,866 \cdot E \cdot I = 1,73 \cdot E \cdot I.$$

Dies ist aber nach Gleichung 42 der Gesamtwattverbrauch für den Fall, daß keine Phasenverschiebung vorhanden ist. In etwas umständlicherer Weise ließe sich aber auch die Richtigkeit des Behaupteten für den Fall beweisen, daß Phasenverschiebung vorhanden ist, oder die Phasen ungleich belastet sind. Wenn wir in Abb. 231 bei gleichen Strömen und Spannungen eine Phasenverschiebung  $\varphi$  annehmen, so stellt sich  $I_1$  immer mehr senkrecht auf seine Spannung, während  $I_2$  immer mehr parallel zu der zugehörigen Spannung  $E_{32}$  wird. Der Ausschlag des Leistungsmessers I muß deshalb zurückgehen, während derjenige von II steigt. Bei  $\varphi_1 = 30^\circ$  hat  $I_2$  die parallele Lage erreicht und Wattmeter II zeigt den Höchstwert an. Bei  $\varphi_2 = 60^\circ$  indessen steht  $I_1$  auf seiner Spannung senkrecht, so daß Wattmeter I Null zeigt. Bei noch größerer Phasenverschiebung wird der Ausschlag dieses Leistungszeigers negativ und muß von dem des Wattmeters II subtrahiert werden. Es ist bei der Messung deshalb peinlich genau auf richtigen Anschluß und auf die Ausschlagrichtung zu achten.

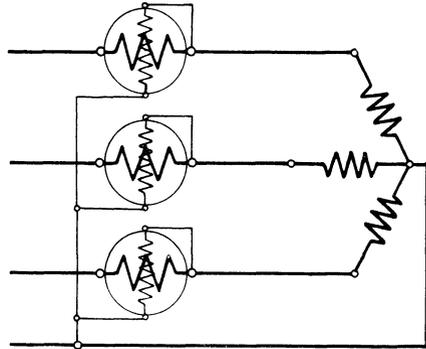


Abb. 232. Leistungsmessung bei Sternschaltung mit Nulleiter.

Bei einem Drehstromnetz mit Nulleiter kann bei ungleichmäßiger Belastung der Effekt nicht mit zwei Wattmetern gemessen werden. Wir müssen dann eine Dreiwattmeterschaltung nach Abb. 232 wählen und haben die drei Ablesungen zu addieren.

### C. Der Drehstromerzeuger.

**1. Der Aufbau des Drehstromerzeugers.** Auch bei dem Drehstromerzeuger ist es vorteilhaft, den Anker, auch *Stator* oder *Ständer* genannt, still stehen zu lassen, während das Magnetgestell als *Polrad* umläuft. Letzteres nennt man auch vielfach *Rotor* oder *Läufer*. Es ergibt sich hieraus ein Aufbau des Drehstromerzeugers, welcher bis auf die Wicklung genau mit demjenigen des Wechselstromerzeugers übereinstimmt. Abb. 233 zeigt einen Drehstromerzeuger mit Erregermaschine. An dem Polrad sind die Schleifenringe, mit deren Hilfe der Erregerstrom zugeführt wird, erkennbar. Der Eisenkörper des feststehenden Ankers wird bei großen vielpoligen Maschinen aus vielen Ringsegmenten zusammengesetzt. Eine größere Zahl von Schlitzten sorgt für eine gute Abkühlung des Eisens. Das Eisen des Polrades ist natürlich nicht in Bleche unterteilt, weil dieses Eisen einen konstanten Kraftfluß führt.

Die Wicklung der Drehstrommaschine muß eine dreifache sein. Nach Abb. 212 hat die zweipolige Maschine drei Spulen, die um  $120^\circ$  gegen-

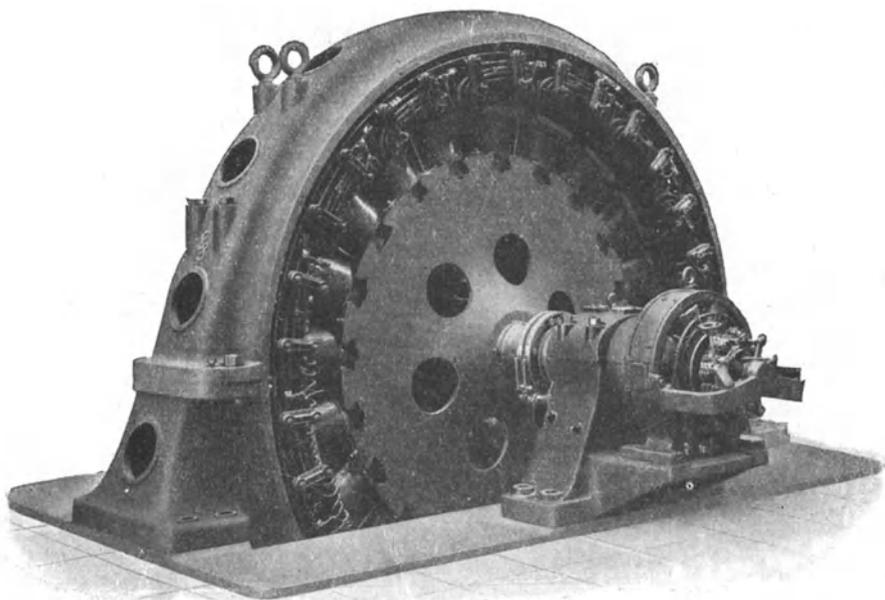


Abb. 233. Drehstromerzeuger mit Erregermaschine.

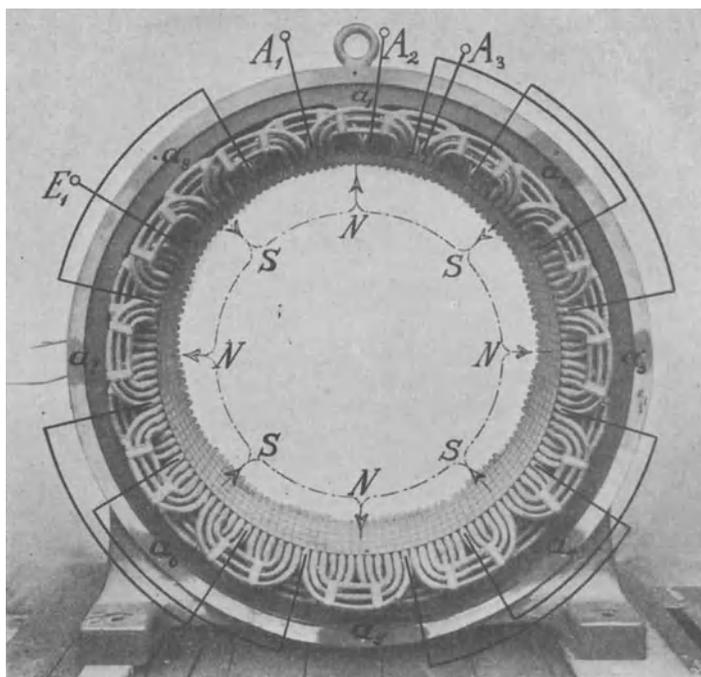


Abb. 234. 8poliger Ständer einer Drehstrommaschine.

einander verschoben sind. Eine vierpolige Maschine muß dann 6 Ankerspulen haben, eine sechspolige 9 usf. Abb. 234 zeigt einen achtpoligen Ständer mit 24 Spulen. Die aus dem Eisen hervortretenden *Spulenköpfe* müssen übereinander weggreifen. Dieselben sind deshalb in zwei Ebenen gewickelt, so daß kürzere hintere Spulen und längere vordere Spulen entstehen. Jeder der drei Phasen gehören 8 Spulen an, die einfach hintereinandergeschaltet sind. Die drei Reihen zu je 8 Spulen können dann entweder in Stern oder in Dreieck geschaltet werden. In Abb. 234

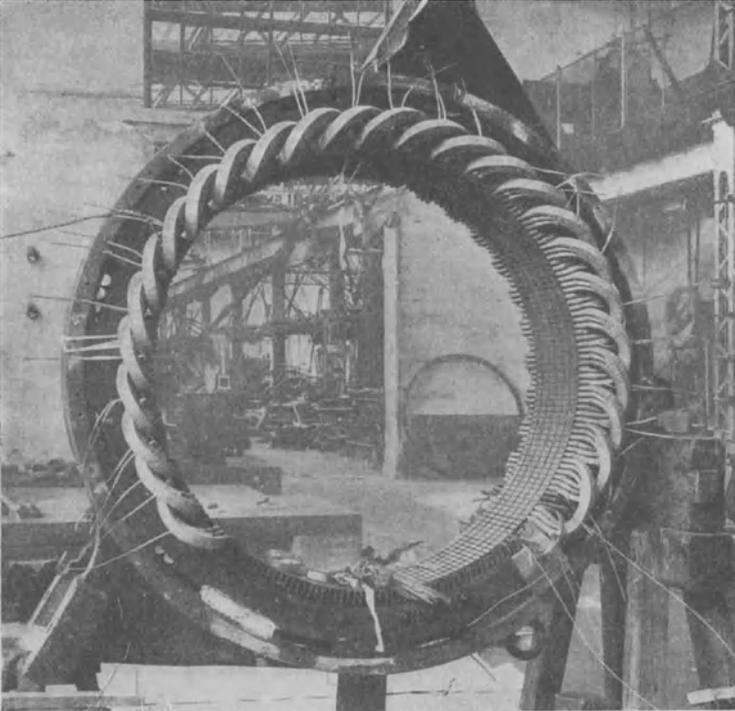


Abb. 235. Ständer während des Wickelns.

sind die Spulen der ersten Phase mit  $a_1$  bis  $a_8$  bezeichnet, die sie verbindenden Leiter, die sog. *Schaltdrähte*, sind eingezeichnet. Von den beiden anderen Phasen sind nur die Anfänge  $A_2$  und  $A_3$  angegeben. Das 8polige Polrad ist nur durch Mittellinien angedeutet. Die Spulenform der Abb. 234 hat die größte Verbreitung gefunden. Zuweilen trifft man auch eine Spule, welche derart gekröpft ist, daß alle Spulen gleich werden, wie sie Abb. 235 zeigt.

Die Abbildung zeigt außerdem den Wicklungsvorgang. In die Nuten werden geschlossene Mikahülsen (mit Schellack zusammengeklebte Glimmerplättchen) eingeschoben, die ein Stückchen über das Eisen vorstehen. In diese Hülsen werden soviel Drahtstäbe eingeschoben, als die Spule Leiter hat, und jeder Stab hat die Dicke des Spulendrahtes einschließlich Besspannung. Beim Wickeln zieht man

immer einen Drahtstab heraus und schiebt den Spulendraht gleich hinterher. Man erkennt dies alles an der in der Wicklung begriffenen Spule. Damit der Spulenkopf gleichmäßig wird, ist auf beiden Stirnseiten eine Holzschablone festgebunden oder festgekeilt, um welche der Draht geschlungen wird. Jede Spule füllt hier drei Nuten, wie dies auch in Abb. 234 der Fall ist. Man nennt solche Wicklungen auch Dreilochwicklungen. Bei Maschinen für sehr hohe Spannungen ist es nicht gut, die Spulen in die Nuten einzufädeln, weil zwischen den einzelnen Drahtwindungen Lufträume verbleiben, in welchen die hohen elektrischen Spannungen aus dem Sauerstoff und Stickstoff der Luft Stickstoffoxyde bilden, welche mit der Luftfeuchtigkeit Salpetersäure ergeben. Es besteht somit die Gefahr, daß die Isolation im Laufe der Zeit zerstört wird. Man wendet deshalb das Compoundierungsverfahren an, bei welchem alle Hohlräume der getrennt hergestellten Spule mit Isoliermasse (Kompouendmasse) ausgefüllt werden.

Die früher allgemein üblichen vielpoligen und deshalb langsam laufenden Erzeuger findet man heute fast nur noch in Wasserkraftzentralen. Dampfkraftwerke verwenden heute fast ausschließlich die billigeren Dampfturbinen als Antriebsmaschinen, welche sehr viel höhere Umlaufzahlen haben. Hierdurch ist auch aus dem früheren langsam laufenden Drehstromerzeuger ein Schnellläufer geworden. Wegen der

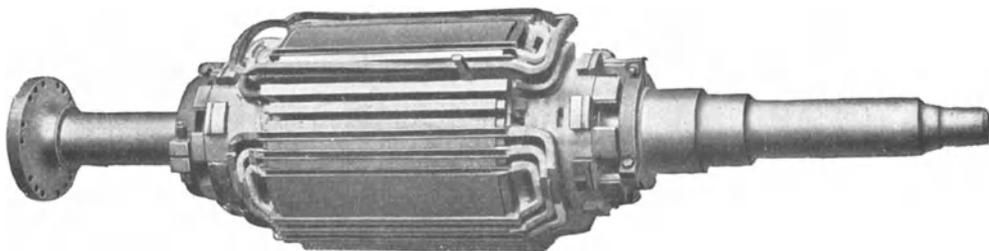


Abb. 236. Halbfertiger Läufer einer Turbomaschine.

hohen Umfangsgeschwindigkeiten muß das Polrad anders ausgeführt werden. Man stellt einen massiven zylindrischen Eisenkörper her und hobelt Nuten in denselben, so daß er fast das Aussehen eines Gleichstromankers bekommt. Die Erregerwicklung unterteilt man in Einzelspulen, die in diese Nuten eingelegt werden, wie Abb. 236 zeigt. Einige Spulen fehlen noch an diesem Läufer. Die größeren Eisenflächen inmitten der Spulen sind die Pole. Nach Einlegung der Spulen werden die Nuten durch Bronzekeile sicher verschlossen, und die aus den Nuten herausragenden Spulenköpfe erhalten eine Bronzekappe zum Schutz gegen Schleuderwirkung. Ebenso wie der Läufer ist auch der Ständer der schnelllaufenden Turbomaschinen sehr lang gebaut.

**2. Das Verhalten der Drehstrom-Erzeuger.** Was wir auf S. 137 über das Verhalten der Wechselstrommaschine gesagt haben, gilt vollständig auch hier. Insbesondere auch die Betrachtung über die Rückwirkung des Ankerfeldes auf das Magnetfeld bei Belastung. Auch das Vektordiagramm der Abb. 211 gilt für die Drehstrommaschine, es bezieht sich dann lediglich auf die Spannungen und Ströme einer Phase.

Eine jede Maschine erleidet einmal einen Kurzschluß. Sei es durch verkehrte Schaltung im Netz oder auch infolge mangelhafter Isolation. Der dann auftretende Kurzschlußstrom ist der höchste, den die Maschine

überhaupt hergeben kann. Man hat zu unterscheiden zwischen dem *plötzlichen* Kurzschlußstrom und dem *Dauer-Kurzschlußstrom*. Der erste tritt nur im ersten Augenblick des Kurzschlusses auf und erreicht die 20–30fache Höhe des normalen Maschinenstroms. Der Dauer-Kurzschlußstrom, der sich dann einstellt, ist wesentlich niedriger und beträgt nur das 3–4fache des Normalstroms. Daß der plötzliche Kurzschlußstrom sehr viel höher sein muß, folgt daraus, daß im ersten Augenblick des Kurzschlusses noch das Magnetfeld ungeschwächt besteht und die volle Spannung erzeugt. Hinterher schwächt der gewaltige Kurzschlußstrom durch Rückwirkung das Hauptfeld, so daß es fast verschwindet.

Man hat nun die merkwürdige Entdeckung gemacht, daß schnell laufende Erzeuger einen wesentlich höheren Kurzschlußstrom haben als langsamlaufende. Es rührt dies hauptsächlich daher, daß das Streufeld, welches die Ankerleiter nach Abb. 210 um sich herum bilden, bei Schnellläufern viel kleiner ist, denn es ist klar, daß eine langsam laufende Maschine viel mehr Leiter haben muß, um die nötige Spannung zu erzeugen, daß also auch durch die große Nutenzahl mehr Gelegenheit zur Entstehung von Streukraftlinien gegeben ist. So wenig angenehm uns die Streuung sonst ist, bei einem Kurzschluß ist sie erwünscht, weil dann infolge der hohen Selbstinduktionsspannung eine starke Verminderung des Kurzschlußstromes eintritt. Man sieht sich deshalb bei Turbomaschinen zuweilen gezwungen, künstlich eine schützende Selbstinduktion einzubauen, die man als eisenlose Drosselspule vor den Erzeuger schaltet. Trotz alledem ist aber der plötzliche Kurzschlußstrom immer noch so groß, daß zwischen den Wicklungsköpfen der Ständerspulen Kräfte von vielen tausend Kilogramm auftreten können. Dieselben können nicht nur die spröden Nutenhülsen abbrechen, sondern auch die Wicklungen verbiegen. Eine starke Befestigung der Wicklungsköpfe ist deshalb bei Schnellläufern unumgänglich notwendig.

Bei Kurzschlüssen von Wechsel- und Drehstrommaschinen tritt häufig auch eine Überlastung der zugehörigen Erregermaschine ein. Dies erscheint auf den ersten Blick unverständlich, weil diese Maschine doch nur den Erregerstrom zu liefern hat und mit dem Drehstromnetz in gar keiner Verbindung steht. Wir müssen aber bedenken, daß im Augenblick des Kurzschlusses das Magnetfeld durch den schwächenden Ankerstrom geradezu ausgeblasen wird, wodurch hohe Spannungen und Ströme im Erregerstromkreis entstehen, auch erzeugt das starke Wechselstromfeld des kurzgeschlossenen Ankers eine Wechselspannung im Erregerstromkreis, die sich über die Gleichstromspannung der Erregermaschine lagert.

Die Wellenzahl einer Drehstrommaschine ist natürlich genau wie bei einer Wechselstrommaschine durch die Umlaufzahl und Polzahl bestimmt. Um sekundlich 50 Wellen zu erzeugen, muß also die zweipolige Maschine  $50 \cdot 60 = 3000$ , die 4polige Maschine  $50 \cdot 60 : 2 = 1500$  Uml./min. machen. Wenn eine Drehstrommaschine ein Netz speist, in welches noch mehrere Drehstromerzeuger Strom liefern, so müssen alle Maschinen, falls sie gleiche Polzahl haben, genau die gleiche Umlaufzahl machen, weil doch alle parallel arbeitenden Maschinen genau die gleiche Wellenzahl erzeugen müssen. Angenommen, eine Maschine empfinde einen stärkeren Antrieb von der Dampfmaschine, so würde die von ihr erzeugte Spannung etwas früher ihren Höchstwert erreichen und auch etwas früher durch Null gehen, so daß ihre Spannungswelle gegen die Netzspannung eine geringe Voreilung hätte. Dann tritt aber das gleiche ein, wie wenn wir zwei Elemente mit verschiedenen Spannungen parallel schalten, die Spannungsdifferenz, welche zwischen den beiden verschobenen Spannungswellen vorhanden ist, erzeugt einen Aus-

gleichstrom derart, daß unsere voreilende Maschine mehr Strom zu liefern hat, also stärker belastet ist. Das Voreilen wird ihr also durch die Mehrbelastung erschwert. Wenn hingegen die Antriebsmaschine etwas nachläßt, so entsteht wieder eine Spannungsdifferenz zwischen den beiden Spannungswellen, die aber jetzt umgekehrt gerichtet ist und einen Ausgleichsstrom erzeugt, der sich jetzt vom Belastungsstrom unserer Maschine subtrahiert. Die Maschine hat also ihre Belastung vermindert. Stellen wir jetzt aber den Dampf unserer Antriebsmaschine etwa ganz ab, so will dieselbe natürlich stehen bleiben. Sowie aber das Polrad nur um einen kleinen Winkel zurückbleibt, ist die Spannungsdifferenz zwischen den beiden verschobenen Spannungswellen schon so groß geworden, daß der Strom sogar umgekehrt durch unsere Maschine fließt und deshalb ein treibendes Drehmoment erzeugt. Der Drehstromerzeuger ist also durch sein Zurückbleiben zu einem Motor geworden. Bedenken wir also wohl, daß die besprochenen belastenden und entlastenden Ausgleichsströme schon dann entstehen, wenn nur das Polrad um einen kleinen Winkel voreilend oder nacheilend verdreht ist, aber genau die gleiche Umlaufgeschwindigkeit hat wie die übrigen Polräder. Es ist damit gerade so, wie wenn mehrere Leute an einer Kurbel drehen. Dann kann einer seinen Antrieb nach Belieben verstärken oder verringern. Er kann sich sogar von den anderen mitziehen lassen, aber immer macht er die gleiche Umdrehungszahl wie die anderen. Dieser *Gleichlauf*, auch *Synchronismus* genannt, ist das Kennzeichnende der Wechsel- und Drehstrommaschinen. Man nennt sie deshalb auch vielfach *Synchronmaschinen*, oder wenn sie als Motoren laufen, *Synchronmotoren*. Der Vorgang ist also nach dem Gesagten so, daß der Erzeuger, welcher zurückbleiben will, von dem Netz durch ein antreibendes Drehmoment *im Tritt* gehalten wird, während der voreilende Erzeuger durch ein entgegengesetztes, bremsendes Drehmoment in Tritt zurückgezogen wird. Es kann sogar vorkommen, daß das Polrad unter dem Einfluß dieser entgegengesetzten Drehmomente abwechselnd vor- und nacheilt, also während des Laufes Schwingungen ausführt, die bei Kolbenantriebsmaschinen, durch den regelmäßigen Stoß des Kolbens immer mehr gesteigert, schließlich so groß werden, daß die Maschine außer Tritt kommt.

Die Inbetriebnahme einer einzelnen Maschine erfolgt genau wie bei Gleichstrommaschinen in der Weise, daß zunächst der Erzeuger durch die Antriebsmaschine auf normale Geschwindigkeit gebracht wird. Hierauf ist zu erregen, bis der Spannungsmesser der Maschine die vorgeschriebene Spannung anzeigt. Würde keine Spannung erzeugt, so wäre zunächst festzustellen, ob überhaupt ein Erregerstrom fließt. Man erkennt dies an einem auftretenden Ausschaltlichtbogen oder auch an der Anziehung eines den ruhenden Polen genäherten Eisenstabes. Fehlt der Erregerstrom, so ist, vorausgesetzt, daß die Erregermaschine überhaupt Spannung liefert, die Unterbrechung zu suchen (Bürsten, Magnetregulator durchgebrannt, Drahtbruch an den Erregerwicklungen). Fließt Erregerstrom und trotzdem fehlt der Magnetismus, so sind die Erregerwicklungen kurzgeschlossen, so daß der Strom an denselben vorbeifließt (z. B. Verbindung der Schleifringe). Die Maschine kann aber auch trotz voller Erregung spannungslos sein, wenn der Ständer eine Unterbrechung hat. Man kann dieselbe erkennen, wenn man die unerreger Maschine kurzschließt und wieder öffnet, dann muß die durch den remanenten Magnetismus erzeugte Spannung bei fehlerfreiem Ständer einen kleinen Lichtbogen erzeugen. Bei Hochspannungsmaschinen ist dieser Versuch nicht

ganz ungefährlich, weil diese Spannung von 2 bis 5% der normalen unter Umständen tödlich sein kann. Liefert die Maschine bei richtiger Umlaufzahl nicht ganz die volle Spannung, so ist vielleicht im Ständer Windungsschluß vorhanden. Derselbe kann sich auch durch starke Erwärmung der betreffenden Spule bemerkbar machen, oder durch starkes Brummen oder Erzittern der Maschine. Nötigenfalls können auch die Spannungen der einzelnen Spulen, welche gleich sein müssen, nachgemessen werden. Unzulängliche Spannung tritt natürlich auch auf, wenn die Schaltung der Ständerspulen zueinander unrichtig ist.

Die Leistungsfähigkeit einer Drehstrommaschine hängt natürlich, wie bei jeder elektrischen Maschine, von der Größe der Verluste, also von der Erwärmung ab. Entnehmen wir nun einmal der Maschine ihren Normalstrom, der mit der Spannung in Phase liegen möge ( $\cos \varphi = 1$ ) und das andere Mal, den gleichen, aber phasenverschobenen Strom bei einem Leistungsfaktor  $\cos \varphi = 0,5$ , so gibt die Maschine im zweiten Falle nur halb so viel Watt ab und doch ist sie bis an die Grenze ihrer Leistungsfähigkeit beansprucht, weil die gleichen Verluste auftreten wie im ersten Fall. Wir haben also darauf zu achten, daß möglichst wenig Verbraucher angeschlossen werden, die einen phasenverschobenen Strom entnehmen. Hierzu gehören Drosselspulen und leerlaufende oder schwach belastete Motoren. Da die Leistungsfähigkeit einer Wechselstrommaschine nach dem Vorstehenden weniger durch die abgegebenen Watt, als vielmehr durch die Volt-Ampere bestimmt ist, gibt man die Leistung von Wechsel- und Drehstrommaschinen meistens in *Kilo-Volt-Ampere*, kVA, an.

## VI. Die Umformung elektrischer Energie.

Die Umformung elektrischer Energie von einer Stromart in die andere oder von einer Spannung in eine andere kann immer mit einem **Doppelmaschinenumformer** geschehen. Um z. B. Gleichstrom in Drehstrom umzuformen, würde man den Gleichstrom einem Gleichstrommotor zuführen, welcher einen Drehstromerzeuger antreibt.

Einfacher ist die Umformung mit den **Einankerumformern** möglich, bei welchen die gleiche Wicklung sowohl als Motorwicklung, als auch als Erzeugerwicklung dient. Abb. 237 zeigt schematisch die Umformung von Gleichstrom in Drehstrom. Der Anker ist ein normaler Gleichstromanker, an dem drei Ab-

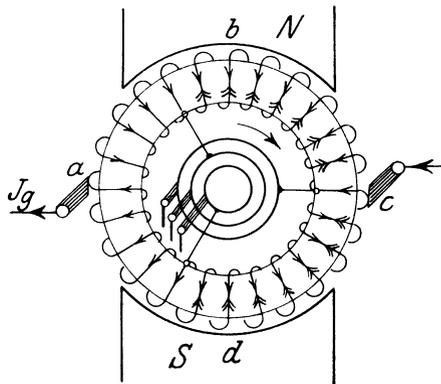


Abb. 237. Gleichstrom-Drehstrom-Einankerumformer.

leiter zu Schleifringen geführt sind. Der Gleichstrom  $I_g$  wird den Kommutatorbürsten a und c zugeführt, und an den drei Schleifringen kann der Drehstrom abgenommen werden. Die Richtung

des Gleichstroms ist durch einfache Pfeile, die des Drehstroms durch Doppelpfeile angegeben. Man sieht, daß in dem gezeichneten Augenblick Gleich- und Drehstrom in den beiden rechten Phasen entgegengerichtet sind und sich teilweise aufheben. Hierin liegt ein wichtiger Vorteil der Einankerumformer. Die Aufhebung der Ströme hat nämlich einen geringeren Kupferverlust zur Folge. Es läßt sich feststellen, daß dieser Vorteil verschwindet, wenn die Wechselstromseite mit stark phasennacheilenden Strömen belastet wird, daß der Vorteil aber um so größer wird, je mehr Phasen die Wechselstromseite hat. Man formt deshalb selten in Einphasenwechselstrom um, öfter in Dreiphasen- und am häufigsten in Sechsphasenwechselstrom, den man durch eine einfache Umschaltung in gewöhnlichen Drehstrom verwandeln kann. Dem Vorteil eines hohen Wirkungsgrades steht der Nachteil gegenüber, daß die Wechselspannung der Einankerumformer in unabänderlichem Verhältnis zur Gleichspannung steht. Die Wechselspannung ist bei einer Phase gleich dem 0,7fachen, bei drei Phasen gleich dem 0,612—0,7fachen und bei sechs Phasen gleich dem 0,35—0,42fachen der Gleichspannung. Wenn ein solcher Umformer von der Gleichstromseite aus betrieben wird, und wenn die Wechselstromseite mit stark nacheilenden Strömen belastet wird, besteht die Möglichkeit, daß durch die dann vorhandene starke Ankerrückwirkung das Feld so geschwächt wird, daß der Umformer durchgeht.

Wechsel- oder Drehstrom läßt sich auch in ruhenden Umformern, den **Gleichrichtern**, in Gleichstrom verwandeln. Dieselben beruhen auf der Tatsache, daß zwischen einer Quecksilber- und einer Stahlelektrode ein Lichtbogen nur in einer Richtung möglich ist, daß also ein solcher Lichtbogen wie ein Ventil wirkt und von einem angelegten Wechselstrom nur die eine Halbwelle durchläßt. Kleine Gleichrichter von einigen kW Leistung werden aus Glas hergestellt, große hingegen (bis 1000 kW) haben einen eisernen Topf, welcher bei Bedarf luftleer gepumpt wird.

## Die Transformatoren.

Wir können Gleichstrom in Gleichstrom anderer Spannung nur durch zwei Maschinen umformen. Die Umformung von Wechsel- oder

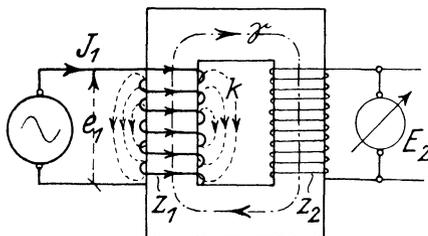


Abb. 238. Wechselstrom-Transformator.

Drehstrom in andere Spannungen ist jedoch in außerordentlich einfacher und billiger Weise durch ruhende Transformatoren möglich.

**1. Die Wirkungsweise der Transformatoren.** a) *Der Wechselstromtransformator.* Ein Transformator besteht aus einem geschlossenen Eisenkern, auf dessen

Schenkeln zwei völlig voneinander getrennte Spulen angeordnet sind. Abb. 238 stellt einen solchen schematisch dar. Die linke Spule ist an eine Wechselspannung  $e_1$  angeschlossen und hat  $z_1$  Windungen. Man nennt sie auch die Primärspule. Die

rechte Spule habe  $z_2$  Windungen und wird Sekundärspule genannt. Wir wollen nun zunächst einmal annehmen, die rechte Spule sei offen, so daß in derselben ein Strom nicht fließen kann. Dann können wir diese Spule überhaupt fortdenken, und es bleibt eine einfache Drosselspule übrig, wie wir sie früher eingehend betrachtet haben. Da Transformatoren immer sehr geringe Spulenwiderstände haben, wollen wir ferner zu nächst einmal von Verlusten absehen. Nach dem früher Gesagten erzeugt der Wechselstrom  $I_1$  in der Primärspule einen wechselnden Kraftfluß  $\mathfrak{S}$ , der mit dem Strom in Phase liegt. Abb. 239 stellt deren Verlauf dar. Infolge der fortwährenden Kraftlinienänderung durch den Kraftfluß  $\mathfrak{S}$  entsteht in der Primärspule mit den  $z_1$  Windungen eine Spannung  $E_1$ , die sich nach Gleichung 36 berechnet zu:

$$E_1 = \frac{4,44 \cdot \bar{\mathfrak{S}} \cdot \nu \cdot z_1}{100\,000\,000}$$

Diese Spannung, die wir bei der Drosselspule die Selbstinduktionsspannung nannten, ist nach Abb. 239 um  $90^\circ$  gegen den Strom verschoben, weil sie doch gleich Null sein muß, wenn der Kraftfluß seinen Gipfel erreicht hat. Da wir jetzt von dem Ohmschen Spannungsabfall absehen, hält diese Spannung hier nur die Klemmenspannung  $e_1$  im Gleichgewicht. Die Spannungswelle  $e_1$  liegt also gerade entgegengesetzt wie  $E_1$ . Der wechselnde Kraftfluß, welcher in der Primärspule die Spannung  $E_1$  erzeugt, geht aber, wenn wir von den wenigen Streukraftlinien k absehen, in ganzer Stärke auch durch die Sekundärspule mit den  $z_2$  Windungen, und es ist doch ganz klar, daß derselbe dort durch seine fortwährende Kraftlinienänderung auch eine Spannung  $E_2$  erzeugen wird, die sich entsprechend berechnet zu:

$$E_2 = \frac{4,44 \cdot \bar{\mathfrak{S}} \cdot \nu \cdot z_2}{100\,000\,000}$$

Während aber die primäre Spannung  $E_1$  von der zugeführten Spannung  $e_1$  im Gleichgewicht gehalten wird, ist dies mit der sekundär erzeugten Spannung  $E_2$  nicht der Fall, weil dort keine andere Spannung ist. Wir können dieselbe deshalb benutzen, um irgendwelche Verbraucher mit Wechselstrom zu speisen. Das Bedeutsame der ganzen Anordnung liegt nun darin, daß wir eine ganz beliebige Spannung  $E_2$  auf der Sekundärseite erzeugen können. Wir brauchen nach vorstehender Gleichung ja nur die Windungszahl  $z_2$  entsprechend groß zu machen. Während also die primär erzeugte Spannung  $E_1$  immer von der zugeführten Spannung im Gleichgewicht gehalten, also gleich dieser ist, können wir sekundär jede beliebige Spannung erzeugen. Der Transformator gestattet

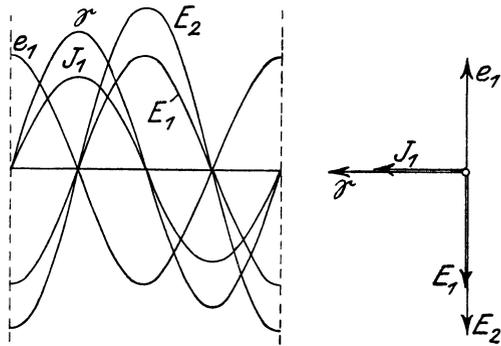


Abb. 239. Verhalten des verlustlosen Transformators.

uns also die Umwandlung von Wechselstrom in solchen anderer Spannung. Aus den beiden obenstehenden Gleichungen für  $E_1$  und  $E_2$  läßt sich durch Division derselben auch das *Übersetzungsverhältnis* des Transformators, das ist das Verhältnis der Primär- zur Sekundärspannung berechnen. Es ist:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{z_1}{z_2} \dots \dots \dots 43$$

Die Spannungen verhalten sich also wie die Windungszahlen. Durch Anordnung einer Sekundärspule mit doppelt so hoher Windungszahl

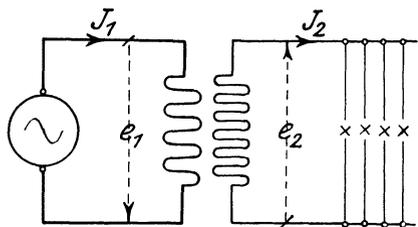


Abb. 240. Schema des belasteten Transformators.

als primär, können wir demnach die Wechselspannung verdoppeln.

Der Primärstrom  $I_1$  ist wie bei jeder Drosselspule mit geschlossenem Eisenkreis sehr klein, weil nur wenige AW zur Erzeugung des Kraftflusses nötig sind. Wir wollen jetzt nach Abb. 240 auf der Sekundärseite einige Glühlampen anschließen, so daß ein Strom  $I_2$  fließt, welcher, wie bei

allen Widerständen, in Phase mit seiner Spannung  $e_2$  liegt. Der sekundär abgegebene Effekt ist dann  $e_2 \cdot I_2$ , und es ist doch selbstverständlich, daß primär mindestens ebensoviel zugeführt werden muß, so daß unter Vernachlässigung einer im Transformator auftretenden kleinen Phasenverschiebung angenähert gilt:

$$I_1 \cdot e_1 = I_2 \cdot e_2$$

oder:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{e_2}{e_1} \dots \dots \dots 43a$$

Die Ströme verhalten sich also umgekehrt, wie die Spannungen und damit auch umgekehrt, wie die Windungszahlen. In dem Augenblick, in welchem wir dem Transformator sekundär einen Strom  $I_2$  entnehmen, muß demnach auch primär ein entsprechend größerer Strom  $I_1$  aufgenommen werden. Wie ist dies aber möglich, da doch beide Wicklungen in keiner elektrischen Verbindung stehen? Wenn wir sekundär einen Strom  $I_2$  entnehmen, wird dieser mit  $I_2 \cdot z_2$  Amperewindungen auch einen Kraftfluß erzeugen wollen, welcher dem primären Kraftfluß  $\ominus$  entgegenwirkt. Sowie aber dieser Kraftfluß  $\ominus$  nur um ein Geringes geschwächt wird, entsteht nach Gleichung 36 auch eine geringere Gegenspannung  $E_1$ , so daß die zugeführte Primärspannung  $e_1$  überwiegt und nun einen zusätzlichen Primärstrom  $I_1'$  erzeugt, dessen Amperewindungen  $I_1' \cdot z_1$  gerade die magnetische Wirkung des Sekundärstromes  $I_2$  aufheben. Bei gleicher Windungszahl auf beiden Seiten muß demnach die Primärspule zu dem schon vorhandenen Leerlaufstrom einen zusätzlichen Strom aufnehmen, der gerade so groß wie der Sekundärstrom, aber entgegengerichtet ist. Abb. 241 stellt diese Verhältnisse dar. Der Sekundärstrom  $I_2$  liegt hier z. B. in Phase mit der Spannung  $e_2$ . Die magnetisierende Wirkung desselben wird durch einen neu aufgenommenen Primärstrom  $I_1'$  aufgehoben, der bei gleicher

Windungszahl genau gleich und entgegengesetzt  $I_2$  ist. Insgesamt wird also aus dem Netz ein Strom  $I_1$  entnommen, der sich aus dem ursprünglichen Leerlaufstrom und dem zusätzlichen Belastungsstrom  $I_1'$  zusammensetzt. Wir wollen in Zukunft die Größe der Vektoren immer so zeichnen, als ob beide Spulen die gleiche Windungszahl hätten. Beim Abmessen müßten wir allerdings die Meßwerte mit dem Windungsverhältnis multiplizieren, um die richtigen Werte zu bekommen. Wenn wir den Transformator induktiv belasten, also einen der Spannung  $e_2$  nacheilenden Strom  $I_2$  entnehmen, ergibt sich ein Diagramm, welches durch Abb. 242 dargestellt ist. Wir haben also auch

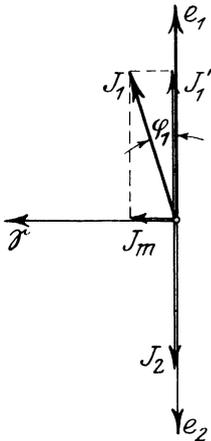


Abb. 241. Diagramm des verlustlosen Transformators bei induktionsfreier Belastung.

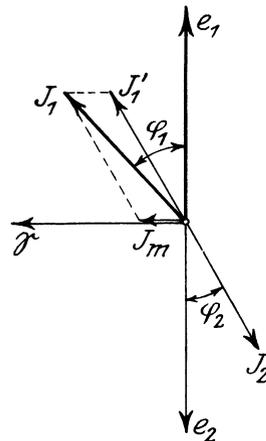


Abb. 242. Diagramm des verlustlosen Transformators bei induktiver Belastung.

primär eine größere Phasenverschiebung bekommen. Genau genommen stehen also nur die Ströme  $I_2$  und  $I_1'$  in dem obengenannten Windungsverhältnis, während sich der wirkliche Primärstrom  $I_1$  nur angenähert zum Sekundärstrom verhält, wie das umgekehrte Windungsverhältnis.

Können wir nicht auch Gleichstrom mit einem Transformator transformieren? Nein, denn wenn wir in die Primärspule einen Gleichstrom einleiten, entsteht ein konstanter Kraftfluß, der nur im Augenblick des Entstehens einen Spannungsstoß in der Sekundärspule erzeugt. Man könnte aber nun daran denken, den Gleichstrom fortwährend ein- und auszuschalten, wie wir dies bei den früheren Induktionsapparaten getan haben. Dann würde in der Sekundärspule nicht Gleichstrom, sondern Wechselstrom entstehen. Denn beim Ausschalten entsteht doch eine umgekehrte Spannung, als beim Einschalten.

Wir haben bisher angenommen, daß der Transformator keine Verluste habe. Obwohl wir durch diese Vernachlässigung nur einen geringen Fehler gemacht haben, weil die Verluste sehr gering sind, wollen wir doch noch eine Verbesserung vornehmen. Sowohl die Primär-, als auch die Sekundärwicklung werden einen, wenn auch sehr geringen Widerstand  $R_1$  bzw.  $R_2$  haben, so daß in den beiden Wicklungen Ohmsche Spannungsabfälle auftreten, welche in Phase mit den Strömen  $I_1$  bzw.  $I_2$  liegen müssen. Außerdem treten aber noch induktive Spannungs-

abfälle auf, die wie folgt entstehen. Der Sekundärstrom will einen Kraftfluß erzeugen. Dies sucht die Primärwicklung durch Aufnahme eines entgegengewirkenden Stromes zu verhindern. Es gelingt ihr aber doch nicht ganz, vielmehr vermag der Sekundärstrom dennoch einige Streukraftlinien, die in Phase mit ihm pulsieren, zu erzeugen. Selbstverständlich erzeugen diese Streukraftlinien auch eine kleine Selbstinduktionsspannung, die ebenso wie der Ohmsche Spannungsverlust von der erzeugten Spannung abgezogen werden muß, um die Klemmenspannung sekundär zu bekommen. Ähnlich steht es auf der Primärseite. Auch hier ist von der zugeführten Spannung zunächst einmal der primäre Ohmsche Spannungsabfall abzuziehen. Dann haben wir aber auch hier einen induktiven Spannungsabfall infolge von Streukraftlinien. Es

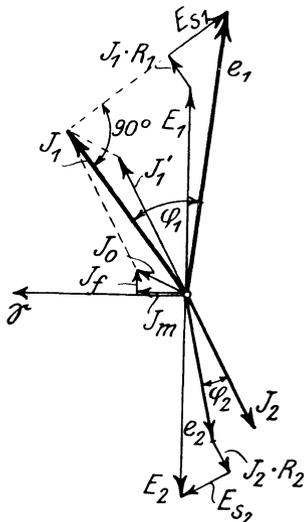


Abb. 243. Vollständiges Diagramm des Transformators.

sind dies aber keine Streukraftlinien des Kraftflusses  $\mathfrak{S}$ , sondern sie entstehen erst durch den Primärstrom  $I_1$  und liegen somit mit diesem in Phase. Die Selbstinduktionsspannung, welche diese Streukraftlinien erzeugen, muß deshalb senkrecht zum Primärstrom  $I_1$  liegen. Diese Verhältnisse sind in dem vollständigen Diagramm Abb. 243 dargestellt. Dasselbe berücksichtigt ferner auch die Eisenverluste, welche genau wie bei der einfachen Drosselspule nach Abb. 206 mit dem Magnetisierungsstrom  $I_m$  den Strom  $I_0$  ergeben, welches der Leerlaufstrom des Transformators ist, also derjenige Strom, welchen der unbelastete Transformator aufnimmt. Dieser Strom gibt mit dem Strom  $I_1'$ , welcher den Sekundärstrom im Gleichgewicht hält, den wirklichen Primärstrom  $I_1$ . Mit Hilfe dieses Diagrammes können wir das Verhalten des Transformators bei den verschiedenen Belastungsmöglichkeiten untersuchen. Z. B. erkennen wir, daß bei Annahme eines stark nacheilenden Belastungsstromes  $I_2$  die Unterschiede zwischen erzeugter Spannung und Klemmenspannung sowohl primär als auch sekundär größer werden. Belasten wir indessen mit Kondensatoren, so daß der Transformator einen der Spannung  $e_2$  um  $90^\circ$  voreilenden Strom  $I_2$  abgibt, so ergibt sich sogar eine Spannungserhöhung.

Genau genommen verhalten sich nur die erzeugten Spannungen  $E_1$  und  $E_2$  wie die Windungszahlen. Im Leerlauf sind jedoch die Spannungsabfälle so außerordentlich klein, daß kein meßbarer Unterschied zwischen Klemmenspannung und erzeugter Spannung besteht. Aber auch der belastete Transformator hat Klemmenspannungen, welche noch angenähert im Windungsverhältnis stehen.

Es bleibt nun noch die Frage, ob wir den Eisenkern unseres Transformators beliebig dünn machen können. Nach Gleichung 36 erfordert eine Spannung  $E_1$ , die ja annähernd gleich der Primärspannung ist, einen ganz bestimmten Kraftfluß, wenn die Windungszahl angenommen ist. Nun könnte man doch einmal eine sehr hohe Windungszahl zugrunde legen, um damit einen geringen Kraftfluß und ein ganz geringes Eisengewicht zu bekommen. Würden wir einen solchen

Transformator belasten, so würden sich wegen der hohen Windungszahlen primär und sekundär ganz gewaltige Amperewindungen entgegenwirken, und da der magnetische Widerstand des Eisenweges bei dem geringen Eisenquerschnitt gar nicht so sehr viel geringer wäre als der Widerstand durch die Luft, würde ein starker Kraftfluß sowohl primär als auch sekundär als Streuung durch die Luft gehen. Wir würden infolgedessen riesige induktive Spannungsverluste bekommen, so daß sekundär keine nennenswerte Klemmenspannung mehr zu erwarten wäre. Wir hätten uns dieses Ergebnis auch schon von vornherein denken können. Der primäre und der sekundäre Stromkreis eines Transformators sind doch durch den magnetischen Kraftfluß miteinander gekoppelt. Er ist es, welcher die Energie von der Primärseite auf die Sekundärseite überträgt, ganz ähnlich, wie ein Riemen mechanische Energie von einer Scheibe auf die andere überträgt. Wenn nun der Kraftfluß sehr schwach angenommen wird, ist derselbe ebenso wenig wie ein zu schwacher Riemen in der Lage, die große Energieübertragung zu bewältigen.

b) *Der Drehstromtransformator.* Da der Drehstrom nichts weiter als mehrfacher Wechselstrom ist, können wir ihn auch mittels Einphasentransformatoren (Wechselstromtransformatoren) transformieren. Abb. 244

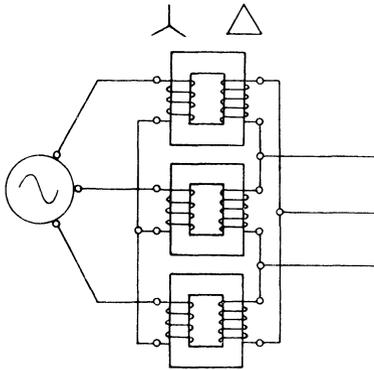


Abb. 244. Transformierung von Drehstrom durch 3 Wechselstromtransformatoren.

zeigt eine derartige Schaltung, bei welcher die Primärspulen in Stern, die Sekundärspulen in Dreieck geschaltet sind. Es ist jedoch keines-

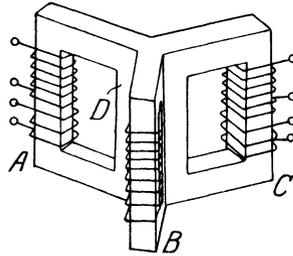


Abb. 245. Verkettung des Eisens der 3 Transformatoren (Abb. 244).

wegs notwendig, gerade so zu schalten. In Abb. 245 haben wir nun die drei Transformatoren zusammengestellt, wobei zur Verringerung des Gewichtes der Schenkel D für alle 3 Transformatoren benutzt werde. Welcher Kraftfluß würde in diesem gemeinsamen Schenkel fließen? Wir denken uns nun in Abb. 213 in Phase mit den drei Strömen die Wellen des Kraftflusses liegen. Ebenso wie bei den Strömen ist auch die Summe der drei Kraftflüsse in jedem Augenblick gleich Null. In unserem Kern D fließt also überhaupt kein Kraftfluß und wir können ihn ganz fortlassen. Wir haben demnach hier auch eine Verkettung des Kraftflusses vorgenommen. Ein solcher Drehstromtransformator ist natürlich wesentlich billiger als drei Einphasentransformatoren. Mit Rücksicht auf einfache Herstellung stellt man heute die drei Kerne fast immer in eine Ebene, wie es Abb. 248 darstellt. Drehstrom läßt sich auch mit zwei Einphasentransformatoren transformieren. Man schaltet in Abb. 244 auch sekundär in Stern und entfernt den mittleren Transformator dadurch, daß man seine Spulen kurzschließt (V-Schaltung).

Hinsichtlich der Wirkungsweise unterscheidet sich der Drehstromtransformator gar nicht von dem Wechselstromtransformator. Auch für ihn gilt das Diagramm der Abb. 243 mit allem, was darüber gesagt wurde. Die dort verzeichneten Spannungen und Ströme sind bei Drehstrom auf die Phase zu beziehen.

**2. Der Aufbau der Transformatoren.** Je nach der Anordnung des Eisenkörpers unterscheiden wir *Kerntransformatoren* nach Abb. 246

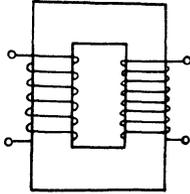


Abb. 246. Kerntransformator.

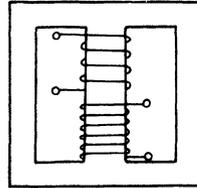


Abb. 247. Manteltransformator.

und *Manteltransformatoren* nach Abb. 247. Der Eisenkörper verlangt mit Rücksicht auf die im Eisen auftretenden Wirbelströme eine Unterteilung in Bleche, die, wie bereits mehrfach beschrieben, auf einer Seite

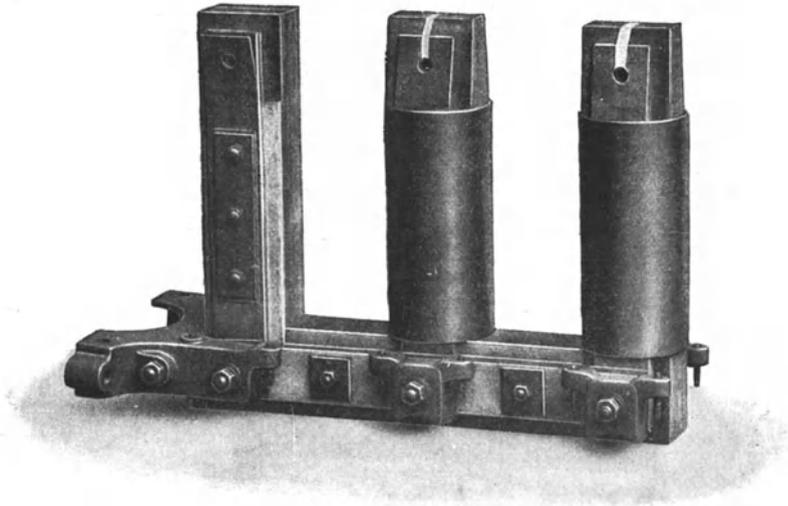


Abb. 248. Eisenkörper eines Transformators vor Einschichtung der Jochbleche.

mit Seidenpapier beklebt sind. Die Blechstärke wird im allgemeinen 0,3—0,5 mm stark gewählt, auch werden vielfach legierte Bleche mit hohem elektrischem Widerstand verwendet. Der Leerlaufstrom  $I_0$  des Transformators ist um so kleiner, je weniger AW zur Magnetisierung benötigt werden. Es ist deshalb dringend nötig, dem Kraftfluß einen Weg geringen Widerstandes zu bieten, also Stoßfugen im Eisen so sauber zu bearbeiten, daß der Übertrittswiderstand für die Kraftlinien gering

ist oder eine Verblattung der Bleche vorzunehmen. Eine Herstellung der Bleche aus einem Stück ist nicht möglich, weil die Spulen getrennt auf der Wickelbank hergestellt werden müssen. Große Transformatoren werden wegen der schwierigen Herstellung meist mit stumpfem Stoß ausgeführt. Abb. 248 zeigt den Eisenkörper eines Drehstrom-Kerntransformators vor der Einschichtung der oberen Jochbleche. Die Kernbleche werden durch Nietbolzen zusammengehalten.

Die Hoch- und Niederspannungswicklung dürfen nicht zu weit auseinanderliegen, weil dadurch das Auftreten von Streukraftlinien, die nur durch eine der Wicklungen gehen, begünstigt würde. Es ist vielmehr eine gute „Vermischung“ der Spulen dadurch anzustreben,

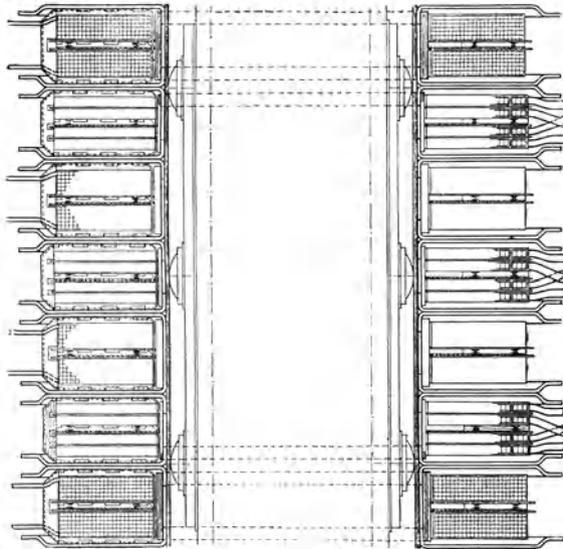


Abb. 249. Scheibenwicklung.

daß man die Spulen unterteilt und abwechselnd Hoch- und Niederspannungswicklung aufeinander folgen läßt. Eine Unterteilung ist bei höheren Spannungen auch wegen der besseren Isolation notwendig.

Wir unterscheiden *Röhren-* oder *Zylinderwicklungen* und *Scheibenwicklungen*. Die letzteren findet man hauptsächlich bei Manteltransformatoren. Die vieldräftigen Hochspannungsspulen wechseln sich mit den dickdräftigen Niederspannungsspulen ab, wie Abb. 249 im Schnitt erkennen läßt. Abb. 250 stellt eine Röhrenwicklung dar. Die Niederspannungswicklung ist innen, die Hochspannungswicklung außen mit mehrfacher Unterteilung angeordnet. Eine Preßspannhülse trennt die Wicklungen voneinander. Mittels Holzkeilen und Beilagen wird die Wicklung sicher gehalten.

Wie bei jeder elektrischen Maschine muß auch jeder Transformator eine genügend große Abkühlungsfläche haben, damit die Temperatur keine die Isolation schädigende Höhe erreichen kann. Bei kleinen Trans-

formatoren, deren Abmessungen im Verhältnis zur Leistung größer sind, als bei großen Transformatoren, genügt im allgemeinen eine einfache Luftkühlung. Wollte man hingegen bei mittleren und größeren Leistungen mit Luftkühlung auskommen, so müßte man, da doch die abkühlende Wirkung von umlaufenden Teilen fehlt, die Transformatorabmessungen unnötig groß machen. Man vergrößert deshalb die abkühlende Oberfläche durch einen weniger teuren Stoff, durch einen Ölkasten. Öl kann

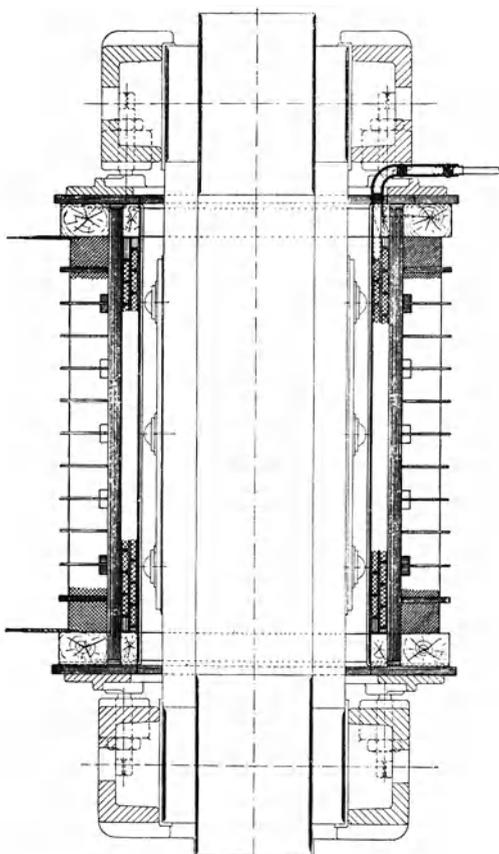


Abb. 250. Röhrenwicklung.

ja unbedenklich hierzu genommen werden, da es ein vorzüglicher Isolator ist. Den Ölkasten versieht man vielfach noch mit Rippen, welche die Oberfläche weiter vergrößern. Es ist dabei wichtig, daß das Öl im Inneren Gelegenheit hat, durch Strömung die Wärme schnell abzuleiten. Es muß deshalb sowohl den Eisenkern überall bestreichen können, als auch zwischen den Spulen hindurchfließen können. Eine derartige einfache Ölkühlung reicht für Transformatoren für mehrere tausend kVA noch aus. Bei ganz großen Leistungen ist hingegen eine künstliche Kühlung des Öls notwendig. Dies ist dadurch möglich, daß man in den oberen Teil des Ölbehälters eine von Wasser durchflossene Kühlschlange einbaut. Ist nur schmutziges Wasser vorhanden, so kann man auch das Öl des Transformators durch eine im Schmutzwasser liegende Kühlschlange pumpen.

Das Öl der Transformatoren muß eine hohe Durchschlagsfestigkeit gegen elektrische Spannungen haben. Es ist zu beachten, daß Spuren von Wasser dasselbe bereits erheblich verschlechtern. Schon 0,1% Wasser würde die Durchschlagsfestigkeit etwa auf die Hälfte herabsetzen. Es ist deshalb dringend nötig, das Öl dauernd wasserfrei und sauber zu erhalten. Ein Abschluß des Öles von der Luft ist außerdem auch deshalb wünschenswert, weil der Luft-sauerstoff das warme Öl chemisch verändert. Ein absolut luftdichter Ölkasten ist aber kaum herzustellen, weil jeder Transformator infolge der Temperaturschwankungen bei wechselnder Belastung „atmet“, d. h. bei Abkühlung Luft einsaugt und bei Erwärmung hinausdrückt. Die Luftfeuchtigkeit scheidet sich im Innern ab und sinkt zu Boden. Vielfach erreicht man einen guten Luft-

abschluß durch einen sog. Ölkonservator. Es ist dies ein hochliegender Ölbehälter, welcher den Transformatorkegel stets voll Öl hält, wobei das Konservatoröl kalt bleibt, so daß es von der Luft nicht zersetzt wird. Hereingesaugtes Wasser scheidet sich im Konservator ab und kann nicht in den Transformator gelangen. Abb. 251 zeigt einen Transformator vor dem Einbau mit Ölbehälter und einem auf dem Deckel angeordneten Konservator. Jeder Transformator erfordert eine Überwachung des Öles. Von demselben sind in Abständen von mehreren Monaten an der tiefsten Stelle Ölproben zu entnehmen, die auf Feuchtigkeit und Verunreinigung zu untersuchen sind. Kann man keine Durchschlagsversuche mit höherer Spannung anstellen, so erhitze man eine Ölprobe in einem Reagenzrohr. Das wasserfreie Öl wird dabei keine knackenden Geräusche verursachen. Ein eingetauchter glühender Eisendraht darf ebenfalls kein Geräusch machen. Feuchtes Öl muß ausgekocht werden. Im Notfall ist dies in einem offenem

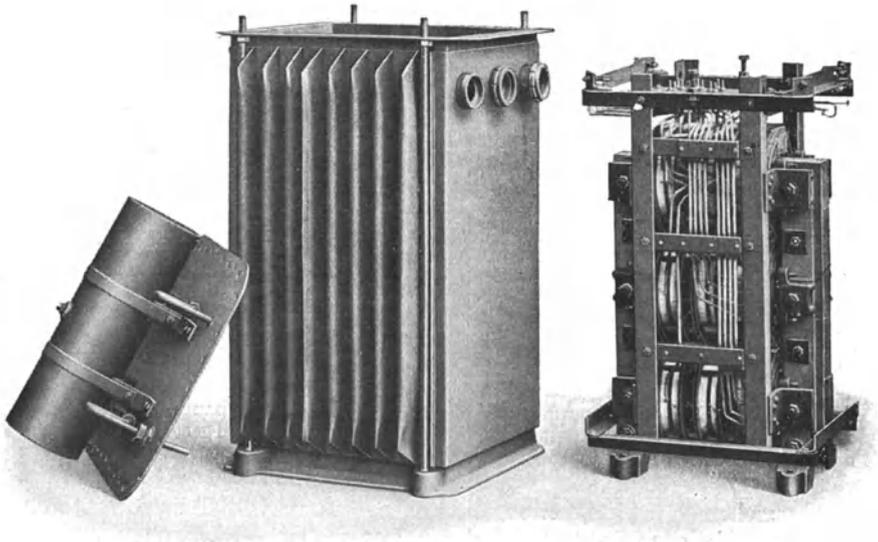


Abb. 251. Transformator vor dem Einbau.

Behälter möglich, besser verwendet man einen Dampfkocher, dessen Temperatur so geregelt werden kann, daß die Siedetemperatur des Wassers nur wenig überschritten wird. Noch besser ist ein Abkochen unter Luftleere. Eine Reinigung des Öles kann in sog. Filterpressen vorgenommen werden. Während der Ölerneuerung darf der Transformator natürlich nicht betrieben werden.

**3. Das Verhalten der Transformatoren.** Da der leerlaufende Transformator wegen des sehr kleinen Leerlaufstroms keinen nennenswerten Spannungsabfall besitzt, können wir durch eine beiderseitige Spannungsmessung im Leerlauf das Übersetzungsverhältnis, d. i. das Windungsverhältnis ermitteln. Mit zunehmender Belastung ergibt sich nach Diagramm 243 ein Abfall der Klemmenspannung  $e_2$ . Abb. 252 stellt deren Verlauf bei konstanter Primärspannung dar, bei welcher die strichpunktierte Linie für induktive Belastung mit nacheilenden Strömen gilt. Der auftretende Spannungsabfall bei normaler Belastung ist bei den Transformatoren wegen des vollständig geschlossenen Eisenkreises wesentlich kleiner als bei Maschinen. Er beträgt bei induktionsfreier

Belastung nur bis 2% und bei den üblichen induktiven Belastungen mit  $\cos \varphi = 0,8$  etwa nur 4–6%.

Häufig ist es nötig, mehrere Transformatoren auch sekundär parallel zu schalten. Dies ist nur dann ohne weiteres möglich, wenn die Spannungsabfälle derselben angenähert die gleichen sind. Wenn wir zwei Transformatoren A und B, deren ungleiche Spannungsabfälle bei Belastung durch Abb. 253 dargestellt sein mögen, parallel schalten, muß die Sekundärspannung  $e_2$  beider gleich sein. Die Abbildung lehrt, daß dann aber die Belastung beider Transformatoren grundverschieden ausfällt. Um z. B. einen älteren Transformator mit großem Spannungsabfall mit einem modernen parallel schalten zu können, bleibt nichts übrig, als den Spannungsabfall des letzteren durch Vorschaltung einer kleinen Drosselspule etwas zu vergrößern, wodurch sich dann eine gleichmäßige Verteilung der Last erzielen läßt.

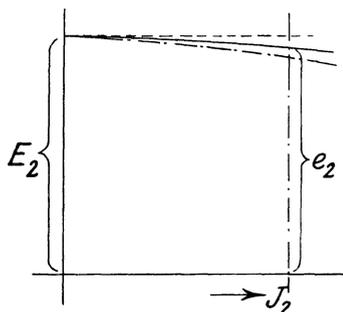


Abb. 252. Die Klemmenspannung des Transformators sinkt mit zunehmender Belastung nur wenig.

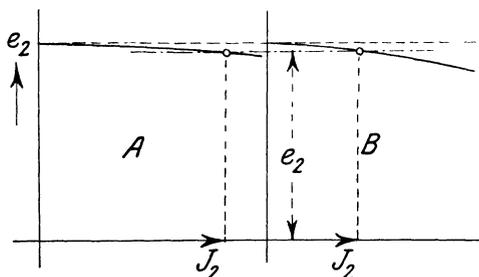


Abb. 253. Ungleicher Spannungsabfall ruft ungleiche Belastung parallel geschalteter Transformatoren hervor.

Die gleichen Schwierigkeiten entstehen, wenn wir Transformatoren sehr verschiedener Größe parallel schalten wollen. Wir wollen uns an dieser Stelle schon merken, daß parallel geschaltete Transformatoren immer primär und sekundär abschaltbar sein müssen. Denn wenn nur der Transformator primär abgeschaltet würde, könnte man nicht daran arbeiten, weil derselbe, von rückwärts gespeist, volle Spannung besitzen würde.

Der *Effektverlust* eines Transformators setzt sich aus dem Kupferverlust und dem Eisenverlust zusammen. Wegen des Fortfalls der Reibungsverluste kann man von vornherein auf einen hohen Wirkungsgrad schließen. Da bei allen Belastungen die erzeugten Spannungen  $E_1$  und  $E_2$  ziemlich unverändert sind, können wir auch auf einen konstanten Kraftfluß  $\mathfrak{S}$  rechnen. Die Eisenverluste, welche von der Größe dieses Kraftflusses abhängen, sind demnach konstant, während die Kupferverluste mit dem Quadrate des Belastungsstromes ansteigen. Es liegt in der Hand des Konstrukteurs, die Verluste durch reichliche Bemessung der Kupfer- und Eisenquerschnitte niedrig zu halten, wodurch der Preis des Transformators allerdings steigt. Es wäre aber auch möglich, allein die Eisenverluste niedrig zu halten, wodurch dann die Verluste bei schwacher Belastung wesentlich niedriger und der Wirkungsgrad

bei Unterbelastung höher sein würde. Einen solchen Transformator mit niedrigen Eisenverlusten wird man wählen, wenn längere Leerlaufzeiten und Unterbelastungen häufig vorkommen, wie dies bei Lichttransformatoren während der Hellstunden des Tages der Fall ist. Transformatoren für Kraftzwecke, die meistens voll und zuweilen noch überlastet werden, erhalten hohe Eisenverluste bei geringen Kupferverlusten, so daß der Höchstwert des Wirkungsgrades erst bei Vollast erreicht wird. Durch diese Unterscheidung zwischen Kraft- und Lichttransformatoren erreicht man einen günstigeren Jahreswirkungsgrad. Die Berechnung des Wirkungsgrades bei wechselnder Belastung kann in der auf S. 95 für Motoren angegebenen Weise erfolgen, dabei ist

$a = 0.5$  bei Lichttransformatoren,

$a = 1$  bei Krafttransformatoren.

Bei 50 Wellen werden etwa folgende Vollast-Wirkungsgrade erreicht:

|               |          |       |
|---------------|----------|-------|
| 1 kW Leistung | . . . .  | 0,92  |
| 5 kW          | .. . . . | 0,958 |
| 10 kW         | .. . . . | 0,964 |
| 50 kW         | .. . . . | 0,978 |
| 1000 kW       | .. . . . | 0,985 |

Zur Bestimmung des Wirkungsgrades eines Transformators könnte man einfach mittels Wattmeters primär und sekundär den Effekt messen und dann das Verhältnis bilden. Eine solche Messung ist aber nicht anzuraten. Denn wenn die verwendeten Meßinstrumente beispielsweise einen Fehler von 2% hätten, so könnte bei dem oben aufgeführten 1000 kW-Transformator die abgegebene Leistung unter Umständen größer als die zugeführte gemessen werden. Es ist deshalb richtiger, die Verluste durch eine Messung zu ermitteln. Wenn wir bei dieser Messung etwas falsch messen, ändert das an dem Wirkungsgrad wenig. Zur Bestimmung der Eisenverluste messen wir einfach den dem Transformator im Leerlauf zugeführten Effekt. Wegen der außerordentlichen Kleinheit des Leerlaufstromes können wir dessen Verlust in der Wicklung vernachlässigen, so daß der gesamte Leerlaufseffekt als Eisenverlust anzusehen ist, der ja bei allen Belastungen ziemlich konstant ist. Um die Kupferverluste zu messen, schließen wir den Transformator sekundär kurz. Bei diesem Kurzschlußversuch dürfen wir aber primär unter keinen Umständen die volle Spannung zuführen, weil dies ein regelrechter und gefährlicher Kurzschluß wäre. Wir speisen vielmehr mit einer ganz kleinen Spannung von wenigen Volt, die gerade hinreicht, um Ströme bis zu der Größe des normalen Belastungsstroms zu erzeugen. In dieser Schaltung ist die Spannung  $E_1$  verschwindend klein und ebenso auch der Kraftfluß  $\mathcal{E}$ . Wir sind demnach berechtigt, die Eisenverluste gleich Null zu setzen und können den ganzen, bei verschiedenen Stromstärken gemessenen Effekt als Kupferverlust buchen. Die Berechnung des Wirkungsgrades bei verschiedenen Belastungen ist dann sehr leicht.

Die beiderseitige Parallelschaltung von Drehstromtransformatoren ist auch dann, wenn die allgemeine Bedingung ungefähr gleichen Spannungsabfalls erfüllt ist, nicht immer möglich. Um dies zu verstehen, wollen wir Abb. 254 betrachten, bei welcher ein Transformator sowohl primär als auch sekundär in Stern geschaltet ist. Die Primärphasenspannung in Phase I, welche durch den Vektor  $E_{p1}$  dargestellt ist, wird in die entgegengesetzt liegende Spannung O—A sekundär transformiert. Das gleiche ist bei den übrigen beiden Phasen der Fall, so daß wir sekundär zwischen den drei Leitungen die verketteten Spannungen A—B, B—C und C—A haben. Wenn wir diesem Trans-

formator einen anderen parallel schalten wollen, so muß derselbe nicht nur drei Spannungen haben, die nach der früheren Regel mit den Spannungen des ersten Transformators in der Größe übereinstimmen, sondern die drei Spannungen der beiden Transformatoren müssen auch in Phase liegen. In Abb. 254 haben wir nun einen zweiten Transformator, der auch primär in Stern, sekundär hingegen in Dreieck geschaltet ist. Um das sekundäre Spannungsdreieck ABC zu bekommen, haben wir die drei Vektoren O—A, O—B und O—C aus Abb. 254 in gleicher Richtung aufzutragen, aber wegen der Dreieckschaltung zu einem Dreieck ABC vereinigt. Obwohl nun durch entsprechende Wahl des Windungsverhältnisses die Spannungen AB, BC und CA in den beiden sekundären Spannungsdreiecken übereinstimmen, ist doch eine Parallelschaltung der beiden Transformatoren

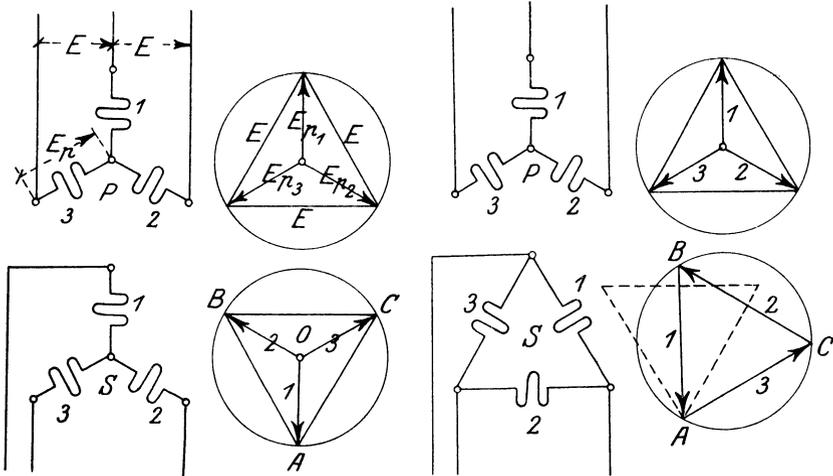


Abb. 254. Stern-Stern-Schaltung.

Abb. 255. Stern-Dreieck-Schaltung.

unmöglich, weil die Richtungen der Spannungen nicht übereinstimmen. Damit eine Parallelschaltung sowohl primär als auch sekundär möglich wäre, müßte das Spannungsdreieck in der punktierten Lage liegen. Würde man die Transformatoren dennoch parallel schalten, so würden durch die Spannungsdifferenzen, welche durch die Phasenverschiebung zwischen den Transformatoren entstehen, große Ausgleichströme zwischen denselben fließen. Prüft man die verschiedenen Schaltungen in dieser Richtung, so findet man, daß sich nie Transformatoren mit normaler Schaltung mit solchen gemischter Schaltung zusammenschalten lassen, wobei man unter normaler Schaltung eine solche versteht, bei welcher primär und sekundär die gleiche Schaltungsart vorhanden ist. Bei gemischter Schaltung sind Primär- und Sekundärschaltung verschieden, also z. B. Stern-Dreieck.

Das Parallelschalten eines neu aufgestellten Transformators, also die richtige Auswahl der drei Leitungen bedarf besonderer Beachtung. Um in Abb. 256 den Transformator  $T_2$ , welchen der gleiche Erzeuger speist, sekundär mit  $T_1$  parallel

zu schalten, kann man zunächst eine Phase, z. B. u mit T verbinden. Nun weiß man aber nicht, ob man weiterhin v mit S oder mit R verbinden soll. Da müssen wir bedenken, daß nur zwei Punkte dann gefahrlos miteinander verbunden werden dürfen, wenn zwischen ihnen keine Spannung herrscht. v darf

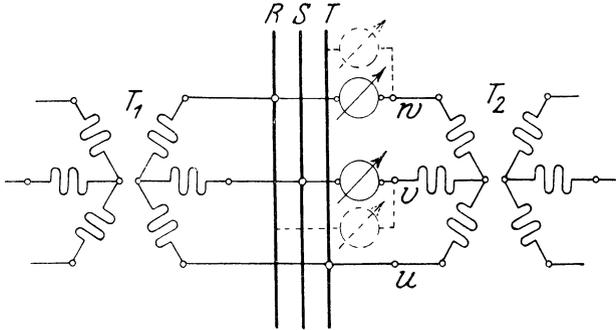


Abb. 256.

also nur dann mit S und w mit R verbunden werden, wenn die eingezeichneten Spannungsmesser keine Spannung anzeigen. Zeigt der Spannungsmesser in beiden Fällen Spannung, so ist wie punktiert zu messen, und wenn auch dann die Ausschläge noch nicht Null sind, ist die gleiche Prüfung mit u an S oder mit u an R zu wiederholen. Wären die Transformatoren überhaupt nicht parallel schaltbar, so würden wir niemals die Spannung Null bekommen. Wir dürfen uns aber bei dieser Schaltung ja nicht irre führen lassen, wenn wir nur einen Spannungsmesser anschließen und vielleicht die direkte Verbindung u—T fortlassen. Dann wird der Spannungsmesser trotz falscher Schaltung nichts anzeigen, weil ja gar kein geschlossener Stromkreis durch den Spannungsmesser vorhanden ist. Er könnte allenfalls dann doch Spannung anzeigen, wenn Teile der beiden Transformatoren mit der Erde in Verbindung ständen, also *Erd-schluß* hätten. Statt der Voltmeter kann man auch Glühlampen verwenden, wenn die Spannung nicht zu hoch ist.

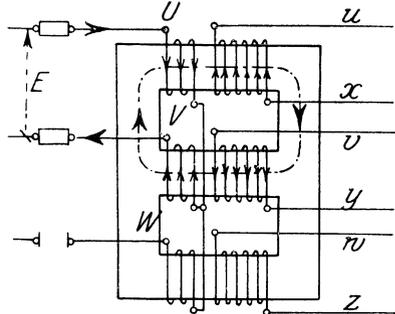


Abb. 257. Eine Sicherung ist durchgebrannt.

Es ist jetzt noch lehrreich, zu wissen, wie sich ein Drehstromtransformator

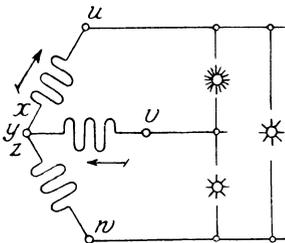


Abb. 258.

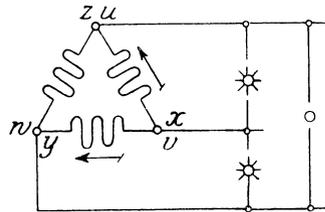


Abb. 259.

verhält, wenn auf der Primärseite eine Sicherung durchbrennt, während diejenigen der beiden anderen Phasen unverletzt bleiben. Zunächst müssen wir feststellen

daß dem Transformator dann kein Drehstrom mehr zufließt. Mit zwei Leitungen kann man nur Einphasenstrom, gewöhnlichen Wechselstrom, zuführen. In Abb. 257 ist die Primärseite in Stern geschaltet. Während bei unversehrten Sicherungen an jeder Spule die Phasenspannung  $E : \sqrt{3}$  herrscht, liegen jetzt zwei Spulen in Hintereinanderspaltung an der Spannung  $E$ , so daß auf jede Spule  $E : 2$  entfällt. Infolgedessen muß auch sekundär die Spannung  $u-x$  und  $v-y$  im Verhältnis  $\sqrt{3} : 2$  kleiner geworden sein. Die Spannung  $w-z$  ist Null, weil durch diese Spule gar kein Kraftfluß geht. Wenn wir nun die Sekundärseite nach Abb. 258 in Stern schalten, so brennt die Lampe zwischen  $u-v$  mit voller Spannung, während die beiden anderen Lampen in Hintereinanderschaltung an  $u-v$  zu denken sind, also jede die halbe Spannung bekommt. In Dreieckschaltung nach Abb. 259 bekommen die Lampen zwischen  $u-x$  und  $v-y$  entsprechend der primären Spannungsverminderung eine im Verhältnis  $\sqrt{3} : 2$  verminderte Spannung, während die Lampe  $w-z$  überhaupt nicht brennt. Abb. 260 veranschaulicht die gleichen Verhältnisse bei primärer Dreieckschaltung. Die Spule  $U$  behält ihre

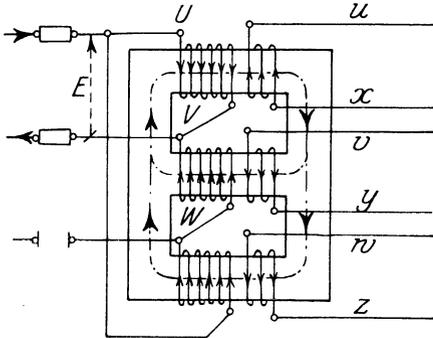


Abb. 260. Eine Sicherung ist durchgebrannt.

volle Spannung, während die Spulen  $V$  und  $W$  in Hintereinanderschaltung an der Spannung  $E$  liegen, so daß auf jede  $E : 2$  entfällt. Der Kraftfluß nimmt den punktiert ange deuteten Verlauf. Die Spannung  $u-x$  wird also auch die volle sein, während zwischen  $v-y$  und  $w-z$  die halbe normale Spannung liegt. Schalten wir sekundär in Stern, so brennt die Lampe  $v-w$  gar nicht, und die beiden übrigen Lampen mit der etwas verringerten Spannung  $1,5 : \sqrt{3}$ . Bei der Dreieckschaltung hingegen brennt  $u-v$  normal und die übrigen mit halber Spannung.

4. Besondere Transformatoren. a) Die Spartransformatoren (Autotransformatoren). Der günstige Wirkungsgrad der Einankerumformer hatte bekanntlich darin seine Ursache,

daß die Ströme der beiden Stromarten sich teilweise in der gemeinsamen Wicklung aufhoben, wodurch geringere Verluste entstanden. Diesen Grundsatz kann man auch bei Transformatoren anwenden, indem man nach Abb. 261 die Wicklung für die Primär- und Sekundärseite teilweise gemeinsam benutzt. In dem gemeinsamen Wicklungsteil fließt nur die Differenz des Primär- und Sekundärstromes, die entstehenden Kupferverluste sind demnach geringer als bei getrennten Wicklungen.

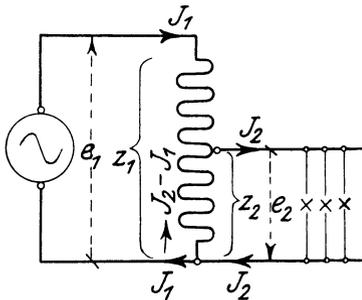


Abb. 261. Schema des Spartransformators.

Die günstigsten Verhältnisse treten offenbar dann ein, wenn die primäre Spannung nicht sehr von der sekundären verschieden ist, weil dann Primärstrom und Sekundärstrom nahezu übereinstimmen, so daß in dem größten Teil der Wicklung nur noch ein kleiner Differenzstrom fließt. Bei großem Unterschied zwischen den beiden Spannungen ist der Vorteil des Spartransformators belanglos, auch ist es dann

wegen der Unfallgefahr nicht ratsam, die Niederspannungswicklung mit der Hochspannungswicklung in direkte Verbindung zu bringen.

**b) Die Meßtransformatoren.** *a) Die Spannungswandler.* Bei geringer Belastung eines Transformators steht die Primärspannung zur Sekundärspannung in bestimmtem, konstantem Verhältnis. Dies macht man sich zunutze, um bei gefährlicher Hochspannung die Spannungsmesser völlig von der Hochspannung zu trennen. Ein Spannungswandler nach

Abb. 262 transformiert die hohe Spannung auf eine nicht mehr gefährliche Höhe herunter, an welche der Spannungsmesser angeschlossen ist. Auf die Skala wird man natürlich wegen der einfacheren Ablesung gleich die Hochspannungswerte schreiben.

Einen Pol der Niederspannungswicklung erdet man, damit, wenn einmal die Hochspannungswicklung mit der Niederspannungswicklung Verbindung bekommen sollte, die Gefahr

für eine berührende Person weniger groß ist. Ebenso wie die Spannungsmesser werden auch die Spannungsspulen von Zählern oder Leistungsmessern angeschlossen.

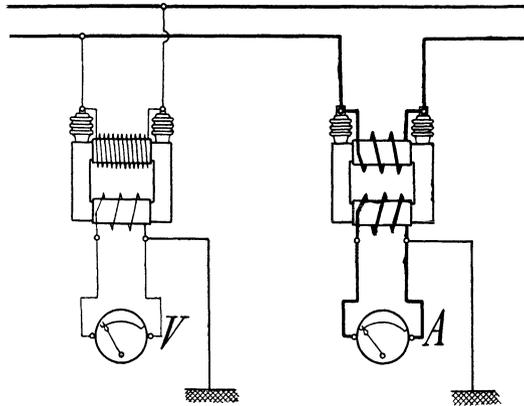


Abb. 262. Meßtransformatoren.

(Aus Preger-Lehmann, Unfallverhütungs-Technik.)

*β) Die Stromwandler.* Ein Stromwandler, den Abb. 262 ebenfalls darstellt, ist ein sekundär kurzgeschlossener Transformator, denn der eingeschaltete Strommesser hat doch einen verschwindend geringen Widerstand. Es ist klar, daß dann die Primärspannung außerordentlich gering sein muß. Die Magnetisierung des Transformator Eisens ist deshalb ebenfalls sehr niedrig, so daß in dem Transformator diagramm 243 der Leerlaufstrom  $I_0$ , der sich aus dem Magnetisierungsstrom  $I_m$  und dem Strom  $I_f$  für Eisenverluste zusammensetzt, vernachlässigbar klein ist. Dann steht aber der Primärstrom zum Sekundärstrom genau im Verhältnis der Windungszahlen, so daß der kurzgeschlossene Transformator zu Meßzwecken benutzt werden kann. Was würde nun geschehen, wenn durch einen Mangel an dem Strommesser derselbe ausgebaut würde? Dann wäre der Kurzschluß des Transformators aufgehoben, und wir würden primär statt der früheren sehr kleinen Spannung eine beträchtlich größere haben. Abgesehen von diesem primären Spannungsverlust würde die hohe Spannung eine starke Magnetisierung bewirken. Die dadurch bedingten hohen Eisenverluste, für welche der Wandler nicht berechnet ist, würden ihn in kurzer Zeit verbrennen lassen. Wir müssen also einen Stromwandler in solchem Falle sekundär kurzschließen. Der Spannungswandler hingegen muß natürlich offen bleiben.

Erwähnenswert ist noch ein Stromwandler mit zu öffnendem Eisenkreis, der sog. *Anleger nach Dietze*, welcher zur vorübergehenden Wechselstrommessung

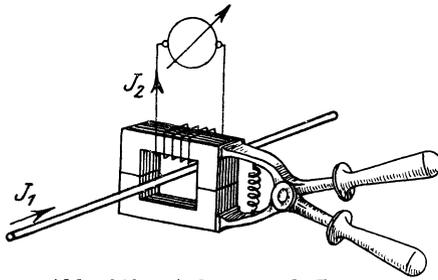


Abb. 263. Anleger nach Dietze.

Anlassen und Regeln von Motoren und haben eine veränderliche Windungszahl in der Weise, daß an verschiedenen Stellen der Wicklung

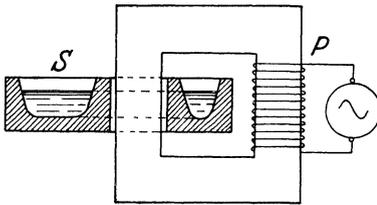


Abb. 264.  
Schema eines Induktionsofens.

in dem Bad ein sehr großer Strom fließen, welcher das Metall flüssig erhält oder auch zum Schmelzen bringt.

recht brauchbar ist, weil der Leiter, dessen Wechselstrom gemessen werden soll, weder durchgeschnitten noch losgeklemmt zu werden braucht. Der Stromleiter wird nach Abb. 263 lediglich zwischen den als Zange ausgebildeten Eisenkern genommen und ist als eine Primärwindung zu betrachten. Der sekundäre Strommesser zeigt dann den richtigen Strom an. Bedingung ist aber, daß der Eisenkern gut geschlossen ist.

c) **Die Reguliertransformatoren.** Dieselben dienen zum Anzapfen gemacht sind, von welchen Leitungen zu Schalterkontakten führen.

d) **Die Induktionsöfen.** Abb. 264 stellt schematisch einen Induktionsofen dar. Es ist ein Transformator, dessen Sekundärwicklung aus einer einzigen Windung besteht, die durch das Metallbad S gebildet ist. Dem Windungsverhältnis entsprechend wird

## VII. Die Wechsel- und Drehstrommotoren.

### A. Die Synchronmotoren.

Wir haben auf S. 154 die Wirkungsweise der Synchronmotoren bereits besprochen und wissen, daß sie nichts weiter als die Umkehrung der Wechsel- und Drehstromerzeuger sind und sich von diesen im Bau nicht unterscheiden. Jeder Erzeuger kann vielmehr ohne weiteres auch als Motor laufen, wenn die Antriebskraft einmal etwas nachlassen sollte. Bemerkenswert ist jedoch, daß die Umlaufzahl dieser Synchronmotoren eine durch Polzahl und Wellenzahl unabänderlich festliegende ist, daß also eine Veränderung der Umlaufzahl, wie es bei anderen Motoren möglich, gänzlich ausgeschlossen ist. Noch viel unangenehmer ist aber der Umstand, daß Synchronmotoren gar nicht allein anlaufen können. Sie müssen vielmehr genau wie ein Erzeuger erst auf die synchrone Umlaufzahl gebracht werden, und dann werden sie in der früher beschriebenen Weise mitgenommen.

Daß dem so ist, lehrt uns Abb. 265. In dem Leiter vor dem Pol fließe gerade der Höchstwert des Stromes nach vorne, dann wirkt auf den Pol eine Antriebskraft

in der Pfeilrichtung. Ehe aber die schwere Masse des Polrades nur Zeit hat, sich in Bewegung zu setzen, hat der zugeführte Wechselstrom bereits eine halbe Welle durchlaufen und fließt in dem bezeichneten Leiter von vorn nach hinten, so daß das Polrad gerade umgekehrt laufen möchte. Ganz anders liegen die Verhältnisse, wenn wir das Polrad durch eine Antriebsmaschine auf synchronen Lauf gebracht haben. In der gezeichneten Lage bekommen wir eine Kraft im Rechtsdreh Sinn. Eine halbe Welle später ist die Stromrichtung in allen Leitern gerade entgegengesetzt. Dann ist aber unser Pol bei synchronem Lauf in die punktierte Lage gekommen, empfängt also wiederum eine Drehkraft nach rechts. Also dadurch, daß das Polrad synchron läuft, bleiben die Drehkräfte immer nach einer Seite gerichtet. Wir erkennen aber auch weiterhin, daß ein Motor, der zu sehr überlastet wird und nur einmal für einen Augenblick aus dem Gleichlauf herauskommt, sofort *außer Tritt* fallen muß.

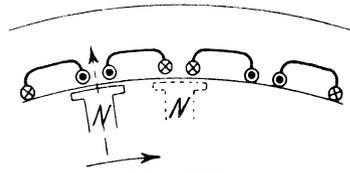


Abb. 265.

Wir haben früher gesehen, daß eine Synchronmaschine dadurch mehr Belastung übernimmt, daß man ihr einen verstärkten Antrieb gibt. Dadurch erfährt der Vektor der erzeugten Spannung gegen denjenigen der Netzspannung eine voreilende Verdrehung, so daß sich die Vektoren nicht mehr decken, sondern zwischen ihren Enden eine Spannungsdifferenz entsteht, welche einen Belastungsstrom, einen Wattstrom erzeugt. Umgekehrt erzeugt ein Nachbleiben des Vektors der erzeugten Spannung eine entgegengesetzte Spannungsdifferenz, die einen Motor-Wattstrom erzeugt.

Was geschieht aber, wenn wir die Erregung unseres Synchronmotors ändern? Bei Gleichstrommotoren würde sich dadurch die Umlaufzahl ändern. Das ist hier nicht möglich, weil der Motor unbedingt synchron laufen muß. Eine Verstärkung der Erregung wird deshalb notwendig die erzeugte Spannung vergrößern müssen, wodurch gegenüber der zugeführten Klemmenspannung auch eine Spannungsdifferenz entsteht. Diese Spannungsdifferenz ist aber etwa senkrecht zu der, welche bei einer Verdrehung der Vektoren entstand und wird deshalb keinen Wattstrom, sondern einen wattlosen Strom erzeugen.

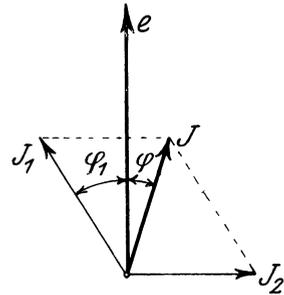


Abb. 266.

Eine entgegengesetzte Differenz entsteht bei Schwächung der Erregung und damit ein entgegengerichteter wattloser Strom. Eine Verstärkung der Erregung veranlaßt den Synchronmotor einen wattlos voreilenden Strom aufzunehmen (wie ein Kondensator), während eine Untererregung einen wattlos nach eilenden Strom bedingt. Wenn ein Motor nach Abb. 266 bereits einen um  $\varphi_1$  nacheilenden Strom  $I_1$  aufnimmt, und wir verstärken seine Erregung, so nimmt er außerdem noch den Strom  $I_2$  auf, der sich mit  $I_1$  zu dem wirklich fließenden Motorstrom  $I$  zusammensetzt. Diese Erscheinung kann von Bedeutung sein. Wir hörten auf S. 155, daß für die Beanspruchung einer Maschine die kVA und nicht die kW maßgebend sind, daß also eine Maschine, insbesondere auch die Antriebsmaschine nicht ausgenutzt ist, wenn der Leistungsfaktor  $\cos \varphi$  infolge nacheilenden Stromes sehr klein ist. Ein Leistungsfaktor von 0,8 gilt

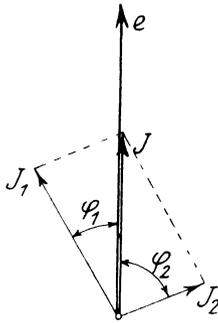


Abb. 267.

z. B. schon als recht gut. Wenn wir nun an einen Stromerzeuger einen oder mehrere Verbraucher angeschlossen haben, die nach Diagramm 267 einen um  $\varphi_1$  nacheilenden Strom  $I_1$  aufnehmen, so kann man, wenn man einen dort notwendig werdenden Antrieb mit einem Synchronmotor ausrüstet, diesen gerade so übererregen, daß er einen um  $\varphi_2$  voreilenden Strom  $I_2$  aufnimmt. Der Gesamtstrom aller Verbraucher ist also dann  $I$  und liegt in Phase mit der Spannung. Wir haben durch den Einbau des Synchronmotors demnach sowohl die Phasenverschiebung in der Zuleitung, als auch im Erzeuger E beseitigt.

## B. Die Asynchronmotoren.

### 1. Der gewöhnliche Drehstrommotor.

a) **Die Wirkungsweise.** Die einfache Drehstrommaschine nach Abb. 212 besitzt drei gegeneinander um  $120^\circ$  verschobene Spulen. In jeder derselben entsteht bei Umdrehung eine Wechselspannung und die drei, verkettet, bilden bekanntlich den Drehstrom. Abb. 268 zeigt einen feststehenden Eisenring, in welche ebenfalls drei um

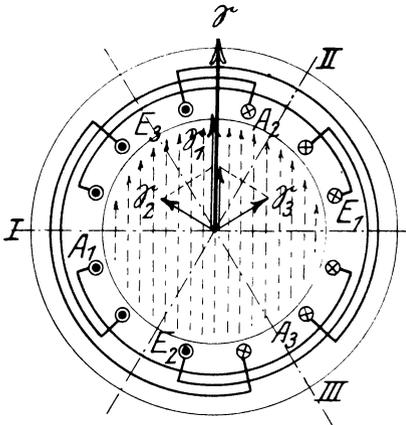


Abb. 268. Feldrichtung im Augenblick a der Abb. 273.

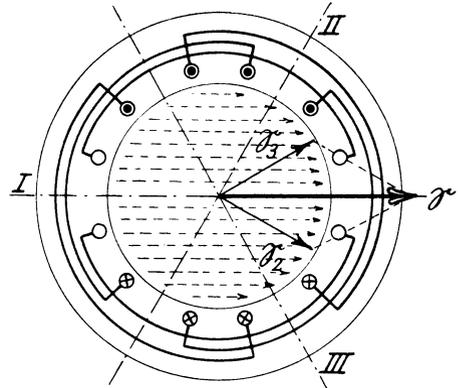


Abb. 269. Feldrichtung im Augenblick b der Abb. 273.

$120^\circ$  verschobene Spulen I, II und III eingebettet sind. Jede Spule hat hier zwei Windungen, deren Enden mit A und E bezeichnet sind. Die Wicklung unterscheidet sich gar nicht von derjenigen in Abb. 212. Nur die Form der Spulen ist etwas anders, weil zur Freihaltung des mittleren Hohlraums beispielsweise von Spule I der aus dem Eisen vorn herausragende Wicklungskopf zur Hälfte nach oben, zur Hälfte nach unten abgelenkt ist. Die anderen Spulen sind entsprechend ausgeführt. Die Spulenebene I liegt also in Abb. 268 horizontal. Diese drei Spulen wollen wir nun in Stern oder Dreieck schalten und einen Drehstrom hindurchschicken. Wir wissen, daß dann in

jeder Spule nur ein einfacher Wechselstrom fließt, der in Phase mit ihm einen Wechselkraftfluß erzeugt. Dieser Kraftfluß steht auf der Ebene der erzeugenden Spule senkrecht. Der Kraftfluß  $\mathcal{E}_1$  der Spule I steht also auf der Geraden I senkrecht und wechselt nur

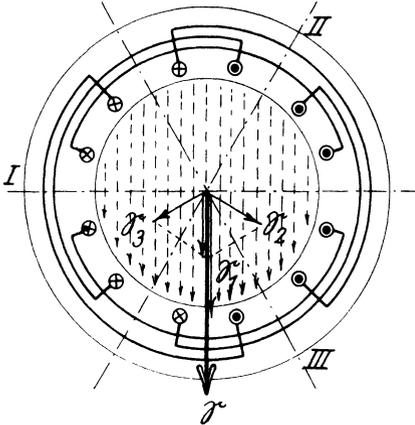


Abb. 270. Feldrichtung im Augenblick c der Abb. 273.

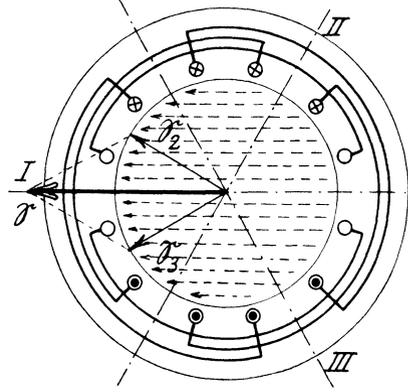


Abb. 271. Feldrichtung im Augenblick d der Abb. 273.

fortgesetzt Größe und Sinn. In Abb. 273 haben wir den in die drei Spulen hineingeleiteten Wechselstrom und ferner auch den in jeder auftretenden Kraftfluß gezeichnet. Abb. 268 entspricht nun dem Augenblick a der Abb. 273. In diesem Augenblick hat Spule I gerade den Höchstwert des Stromes und Kraftflusses. Derselbe ist positiv und mit  $\mathcal{E}_1$  bezeichnet. Sowohl in Spule II, als auch in III fließt in diesem Augenblick ein negativer Strom gleich dem halben Höchstwert. Die entsprechenden Kraftflüsse  $\mathcal{E}_2$  und  $\mathcal{E}_3$  sind eben falls eingezeichnet. Wenn wir nun die drei Einzelkraftflüsse zu einem resultierenden Kraftfluß zusammenfassen, erhalten wir den Kraftfluß  $\mathcal{E}$ . Abb. 269 ist in ganz gleicher Weise für den Augenblick b der Abb. 273 gezeichnet. In diesem Augenblick ist Spule I stromlos, während Spule II einen positiven und Spule III einen negativen Strom führt. Der resultierende Kraftfluß  $\mathcal{E}$  setzt sich hier also aus den Einzelkraftflüssen  $\mathcal{E}_2$  und  $\mathcal{E}_3$  zusammen. Wir erkennen, daß dieser Kraftfluß  $\mathcal{E}$  seine Größe beibehalten hat, daß er aber gegenüber Abb. 268 um  $90^\circ$  verdreht ist. Das magnetische Feld

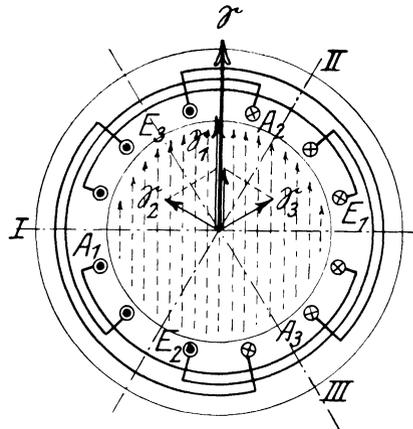


Abb. 272. Feldrichtung im Augenblick a der Abb. 273.

im Augenblick c zeigt Abb. 270 und dasjenige im Augenblick d und a die Abb. 271 bzw. 272. In allen Fällen behält der Kraftfluß  $\mathfrak{E}$  seine Größe bei und dreht sich während einer Periode des zugeführten Wechselstromes gerade einmal ganz herum. Bei einem Wechselstrom von 50 sekundlichen Wellen macht unser magnetisches Feld in der Minute demnach  $50 \cdot 60 = 3000$  Umläufe. Wir nennen ein solches Feld ein *Drehfeld*. Um Drehstrom zu erzeugen, ließen wir in einer Dreiphasenwicklung ein Polrad umlaufen, wenn wir nun umgekehrt in eine Dreiphasenwicklung einen Drehstrom schicken, erhalten wir ein umlaufendes Magnetfeld.

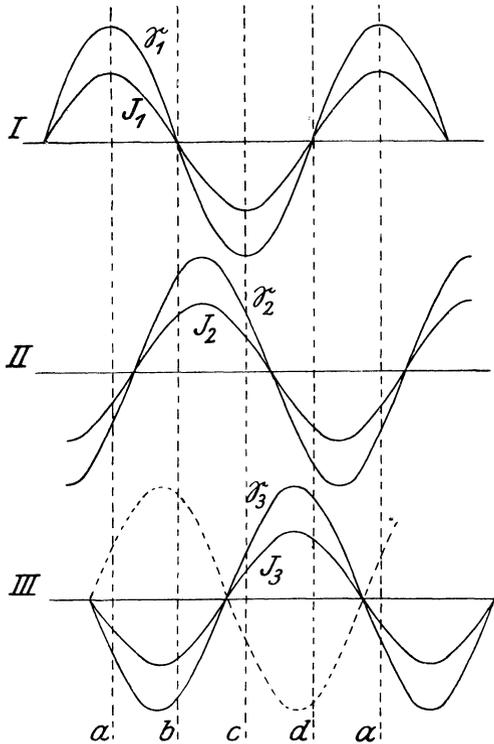


Abb. 273. Die drei Wechselfelder bilden in einer Dreiphasenwicklung ein Drehfeld.

klar, daß dann das Drehfeld während einer Welle nur eine halbe Umdrehung machen kann, daß also bei 50 sekundlichen Wellen das Drehfeld  $50 \cdot 60 : 2 = 1500$  Umläufe in der Minute macht. Eine solche Wicklung mit 2 mal drei Spulen nennen wir eine *vierpolige* Wicklung. Ganz entsprechend würde eine *sechspolige* Wicklung mit 3 mal 3 Spulen ein mit 1000 minutlichen Umdrehungen umlaufendes Drehfeld erzeugen.

Es ist jetzt noch lohnend, einmal festzustellen, was geschieht, wenn die Schaltung der Spulen zueinander nicht stimmt, wenn z. B. in Abb. 268 Anfang und Ende der dritten Spule miteinander verwechselt seien. Dann ist die Strom- und Kraftflußrichtung in derselben gerade umgekehrt wie sie sein sollte, also wie in Abb. 273 punktiert eingezeichnet. Wenn wir nun in den verschiedenen Augenblicken den

phasenwicklung einen Drehstrom schicken, erhalten wir ein umlaufendes Magnetfeld. Wir wollen jetzt einmal zwei der drei Drehstromleitungen umwechseln, also den zweiten Strom in die dritte Spule und den dritten Strom in die zweite Spule schicken. Für den Augenblick a bekommen wir dann wieder das Feldbild der Abb. 268, für den Augenblick b hingegen Abb. 271. Wir sehen, daß das Drehfeld jetzt in umgekehrtem Drehsinn umläuft. Wir merken uns also wohl: *Um die Drehrichtung eines Drehfeldes umzukehren, müssen wir irgend zwei der drei Drehstromleitungen verwechseln.*

Ebenso wie wir es bei den Drehstrom-Erzeugern gemacht haben, können wir nun auch hier die drei Spulen auf einer Hälfte des Eisenringes anordnen und auf der anderen Hälfte nochmals drei Spulen. Es ist

resultierenden Kraftfluß bilden, bekommen wir weder eine gleichbleibende Größe, noch eine regelmäßig weiterdrehende Richtung, also überhaupt kein richtiges Drehfeld.

Wir hatten schon von Anfang an den Hohlraum unseres Eisenringes frei gehalten und wollen jetzt einen geblätternen Eisenkörper hineinbringen, damit die Kraftlinien keinen unnötig großen Widerstand finden. In diesen Eisenkörper wollen wir aber nach Abb. 274 am Umfang eine größere Zahl Kupferstäbe einbetten, welche an den Stirnseiten durch einen Kupferferring alle miteinander verbunden sind. In dem Augenblick, in welchem der Drehstrom in der feststehenden Dreiphasenwicklung eingeschaltet wird, beginnt das Drehfeld seine Umläufe, deren Zahl durch die Wellenzahl und die Polzahl (Spulenzahl) gegeben und unveränderlich ist. Wir sehen aber jetzt, daß die Kraftlinien unseres umlaufenden Drehfeldes von den ruhenden Leiterstäben des Ankers geschnitten werden. In den letzteren wird demnach eine Spannung erzeugt und, weil sie kurzgeschlossen sind, auch ein Strom von ganz bestimmter Richtung. Diese Richtung lehrt uns aber das frühere Lenzsche Gesetz,

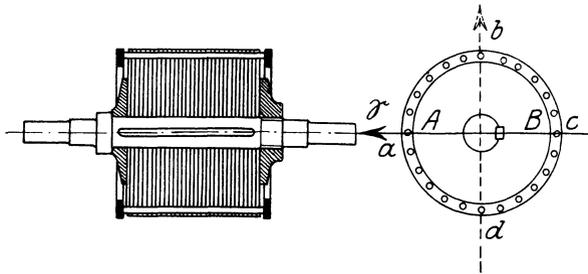


Abb. 274. Kurzschlußläufer.

welches besagt, daß der erzeugte Strom die Bewegung zu hemmen sucht. An ein Aufhalten des unabänderlich umlaufenden Drehfeldes ist aber natürlich nicht zu denken. Wenn also die Bewegung zwischen Feld und Leiter gehemmt, also beseitigt werden soll, so ist dies nur dadurch möglich, daß die im Anker erzeugten Ströme auch dem Anker eine Drehung im Sinne des Drehfeldes erteilen. Der Anker läuft also dem Drehfeld nach, ohne es jedoch je ganz zu erreichen; denn wenn er gerade so schnell wie das Drehfeld lief, würden ja keine Kraftlinien mehr geschnitten. Dann entstünde kein Strom mehr, und die Reibung würde sofort den Anker zurückhalten und zwar so viel, daß wieder einige Kraftlinien geschnitten und gerade ein Strom erzeugt würde, dessen Zugkraft die Reibungswiderstände überwinden könnte. Wenn freilich der Anker noch irgend eine Maschine antreibt, muß er ein stärkeres Drehmoment entwickeln. Dies erfordert aber einen stärkeren Ankerstrom, der nur dadurch entsteht, daß der Anker noch etwas mehr hinter dem konstant umlaufenden Drehfeld zurückbleibt, wodurch mehr Kraftlinien geschnitten werden. Wir sehen also, daß dieser *Drehstrommotor* keine synchrone Umlaufzahl hat wie der Synchronmotor, er heißt deshalb auch *Asynchronmotor*. Nur das Drehfeld läuft synchron. Das Zurückbleiben des Ankers hinter dem Dreh-

feld nennt man den *Schlupf*  $s$  des Motors und versteht, genau gesprochen, darunter das Verhältnis:

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} \dots \dots \dots 44$$

worin  $n_0$  die Drehfeldumlaufzahl und  $n$  die Ankerumlaufzahl ist. Die Schlüpfung  $s$  ist also veränderlich. Im Leerlauf bleibt der Anker kaum merklich hinter dem Drehfeld zurück, während mit zunehmender Last der Schlupf immer größer wird. Da aber die kurzgeschlossenen Ankerleiter nur einen sehr geringen Widerstand haben, leuchtet es ein, daß schon die bei geringem Schlupf erzeugte kleine Spannung einen für die Entwicklung eines großen Drehmomentes hinreichenden Strom erzeugen kann, daß sich die Ankerumlaufzahl also auch bei normaler Last nicht sehr viel von der Drehfeldumlaufzahl unterscheidet. Wir sehen demnach hier schon, daß sich ein Drehstrommotor ganz ähnlich wie ein Beneschlußmotor verhalten wird.

Der im Anker durch das Kraftlinienscheiden erzeugte Strom ist natürlich auch ein Wechselstrom, dessen Periodenzahl allerdings nicht mit der Netzwellenzahl übereinstimmt. Die Ankerwellenzahl hängt vielmehr von der Drehzahl des Ankers ab. Sie stimmt nur dann mit der Netzwellenzahl überein, wenn wir den Anker festhalten, vermindert sich aber immer mehr, je schneller der Anker läuft und wird Null, wenn die Ankerdrehzahl mit der Umlaufzahl des Drehfeldes übereinstimmt. Es leuchtet ein, daß der Drehstrommotor, solange wir den Anker festhalten, nichts anderes ist als ein Transformator, und wir könnten sogar sekundär Lampen oder dergleichen anschließen, wenn wir statt der kurzgeschlossenen Kupferstäbe eine offene Wicklung auf den Anker brächten. Aber auch während des Laufs stimmt die Wirkungsweise mit derjenigen eines Transformators bis auf den einen Unterschied überein, daß im Drehstrommotoranker eine veränderliche Wellenzahl erzeugt wird, während diese bei dem Transformator stets mit der Netzwellenzahl übereinstimmt. Für die weitere Betrachtung des Drehstrommotors können wir deshalb das früher entwickelte Diagramm des Transformators benutzen, wobei wir zur Vereinfachung von den primären Verlusten absehen. In dem einfachen Transformator diagramm Abb. 242 setzt sich der Primärstrom  $I_1$  aus dem Magnetisierungsstrom  $I_m$  zur Erzeugung des Magnetfeldes und aus dem Strom  $I_1'$  zusammen, welcher zur Aufhebung der magnetischen Wirkung des Sekundärstroms  $I_2$  nötig ist. Wenn der Transformator die Übersetzung 1 hat, wenn also die Zahl der primären Leiter mit derjenigen sekundär übereinstimmt, ist  $I_1' = I_2$ . Wir wollen im Diagramm des Drehstrommotors der Einfachheit halber stets die Übersetzung 1 annehmen. Auch der Drehstrommotor braucht einen Magnetisierungsstrom  $I_m$ , der sogar wesentlich größer ist als derjenige eines Transformators, weil der Kraftfluß des Motors durch einen Luftspalt gehen muß. Außer diesem Strom muß auch der Motor noch einen Strom aus dem Netz aufnehmen, welcher die magnetische Wirkung des Ankerstromes aufhebt, diesem also bei gleicher Leiterzahl primär und sekundär gleich und entgegengesetzt gerichtet ist. Die geometrische Summe dieses Stromes  $-I_2$  mit dem Magnetisierungsstrom  $I_m$  ergibt wie bei dem Transformator den wirklichen Primärstrom  $I_1$ .



$$\tan \varphi_2 = \frac{E_{s2}}{I_2 \cdot R_2}$$

Die Selbstinduktionsspannung  $E_{s2}$  wird durch den Ankerstreufuß  $\mathfrak{S}_s$  hervorgerufen. Dieser ist aber um so größer, je größer der Ankerstrom ist, also:

$$\mathfrak{S}_s = k \cdot I_2.$$

Hierin ist  $k$  ein konstanter Faktor, der bei Motoren mit großer Streuung groß ist. Die Selbstinduktionsspannung berechnet sich aus dem Streukraftfluß nach Gleichung 36. Faßt man in dieser alle konstanten Größen zu einer einzigen  $c$  zusammen, so kann man schreiben:

$$E_{s2} = c \cdot \mathfrak{S}_s \cdot \nu_2 = c \cdot k \cdot I_2 \cdot \nu_2.$$

Hierin ist  $\nu_2$  die veränderliche Ankerwellenzahl. Setzt man diesen Wert von  $E_{s2}$  in die obige Tangentengleichung ein, so erhält man:

$$\tan \varphi_2 = \frac{c \cdot k \cdot \nu_2}{R_2} \dots \dots \dots 45$$

Da  $c$ ,  $k$  und  $R_2$  bei einem ausgeführten Motor unveränderliche Größen sind, lehrt die vorstehende Beziehung, daß die Tangente des Winkels  $\varphi_2$  der Ankerwellenzahl, also auch dem Schlupf proportional ist. Angenommen, daß Spannungsdreieck  $OBE$  in Abb. 275 gelte bei festgehaltenem Anker. Die Ankerwellenzahl  $\nu_2$  ist dann gleich der Netzwellenzahl. Wenn wir nun das entsprechende Dreieck für den Fall zeichnen wollen, daß die Ankerwellenzahl nur halb so groß ist, daß also der Anker halb so schnell wie das Drehfeld läuft, so müssen wir zunächst  $E_2$ , welches dem Schlupf proportional ist, halb so groß annehmen. Dann müssen wir einen Winkel  $\varphi_2'$  antragen, dessen Tangentenverhältnis halb so groß ist als bei dem früheren Winkel  $\varphi_2$  und können dann das neue Spannungsdreieck  $OB'E'$  zeichnen. Wir bemerken nun, daß die Verlängerung von  $E-B$  und  $E'-B'$  durch denselben Punkt  $C$  geht, und zwar bei jedem beliebigen Spannungsdreieck. Nach den Regeln der Geometrie muß deshalb, weil bei  $B$  doch stets ein rechter Winkel liegt, dieser Punkt  $B$  immer auf einem Kreisbogen über dem Durchmesser  $O-C$  liegen. Das Ergebnis unserer Betrachtung ist also: Der Endpunkt  $B$  des Strahles  $OB = I_2 \cdot R_2$  wandert bei wechselnder Belastung auf einem Halbkreisbogen. Dasselbe muß aber auch für den Strom  $I_2$  gelten, weil  $R_2$  doch eine konstante Größe ist. Folglich muß der Endpunkt  $A$  der Strecke  $DA = I_2$  sich auch auf einem Halbkreis bewegen. An dem so gefundenen Diagramm (Heylanddiagramm) können wir nun das Verhalten eines Motors vollkommen ablesen. Im Leerlauf befindet sich Punkt  $A$  ganz in der Nähe von  $D$ . Der Strom  $I_1$  ist also nicht viel größer als der Magnetisierungsstrom und hat eine ziemlich große Phasenverschiebung  $\varphi$ . Mit zunehmender Belastung wandert Punkt  $A$  auf dem Halbkreis, wodurch  $I_1$  größer wird. Die Phasenverschiebung nimmt erst ab, erreicht einen kleinsten Wert, wenn  $OA$  Tangente des Kreises ist und nimmt dann wieder zu. Der größte Strom, welchen der Motor überhaupt aufnehmen kann, ist der sogenannte Kurzschlußstrom, welcher bei festgehaltenem Anker fließt. In Abb. 276 ist dieser Strom  $I_k$ , ebenso auch der normale Strom  $I_1$  eingetragen. Wir erkennen jetzt schon,

daß ein Motor einen um so größeren Strom aufnehmen und deshalb auch um so mehr leisten kann, je größer der Durchmesser des Diagrammkreises ist. Dieser Durchmesser  $DX$  in Abb. 275 verhält sich aber genau wie  $OC$  und der letztere wird, wie man leicht sieht, um so größer, je kleiner  $E_{s2}$  im Verhältnis zu  $I_2 \cdot R_2$  ist. Da  $E_{s2}$  durch die Streuung hervorgerufen ist, können wir sagen, daß die Leistungsfähigkeit eines Motors durch die Streukraftlinien stark vermindert wird.

Das *Drehmoment* eines jeden Motors ist nach Gleichung 27 dem Ankerstrom  $I_2$  und dem Drehfeld  $\mathfrak{S}$  proportional. Hier ist jedoch noch ein weiterer sehr wichtiger Umstand zu beachten. Wir wollen einmal die Leiter  $A-B$

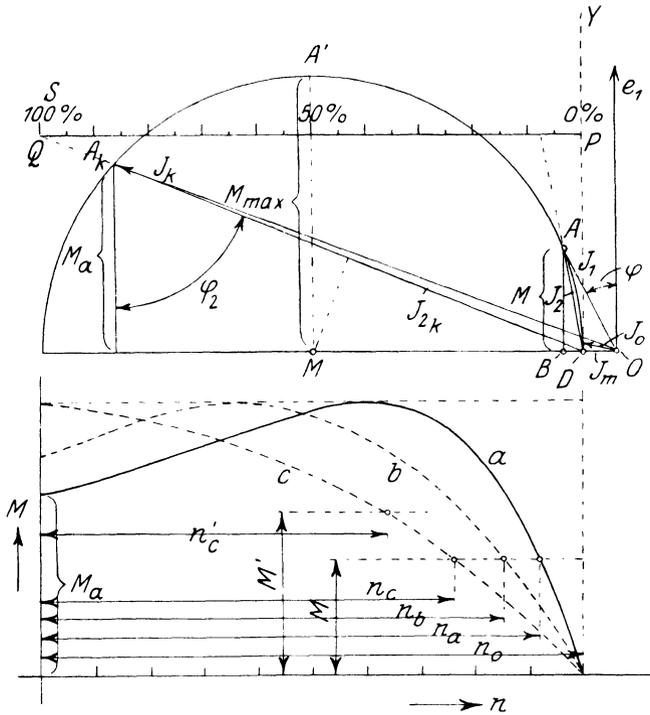


Abb. 276. Heylanddiagramm des Drehstrommotors.

des Ankers Abb. 274 als eine Spule betrachten. Wenn der Drehkraftfluß  $\mathfrak{S}$  gerade in der gezeichneten Lage  $a$  ist, gehen keine Kraftlinien durch diese Spule. Ist aber das Feld in die punktierte Lage  $b$  gekommen, so umschlingt die Spule den ganzen Kraftfluß. In Abb. 277 stellt  $\mathfrak{S}$  die von der Spule jeweils umschlossene Kraftlinienzahl dar. Die durch den Kraftlinienwechsel in der Spule erzeugte Spannung  $E_2$  ist ebenfalls eingezeichnet. Diese Spannung erzeugt den Ankerstrom  $I_2$ , der ihr infolge der Selbstinduktion um einen Winkel  $\varphi_2$  nacheilt. Würde der Strom  $I_2$  mit  $E_2$  in Phase liegen, wie gestrichelt gezeichnet ist, so wäre im Augenblick  $a$  gerade der Höchstwert des Stromes vorhanden, also gerade dann, wenn zwar keine Kraftlinien durch die Spule  $A-B$  gehen, wenn

aber nach Abb. 274 die Leiter A und B mitten im Feld liegen. Wir bekommen also ein kräftiges Drehmoment. Wenn hingegen unser Strom der Spannung um  $90^\circ$  nacheilt, wie dies strichpunktiert gezeichnet ist, so ist in dem Augenblick a, wenn die Kraftlinien die Leiter umgeben, gerade kein Strom vorhanden, also das Drehmoment Null. Wir sehen also, daß das Drehmoment nicht nur von den Größen  $I_2$  und  $\mathfrak{C}$  abhängt, sondern auch noch von der Phasenverschiebung  $\varphi_2$ . Einen ähnlichen Fall hatten wir ja schon einmal, nämlich bei der Leistung des Wechselstromes. Dieselbe war auch von der Phasenverschiebung zwischen E und I abhängig und wurde auf S. 131 zu  $E \cdot I \cos \varphi$  gefunden. Ent-

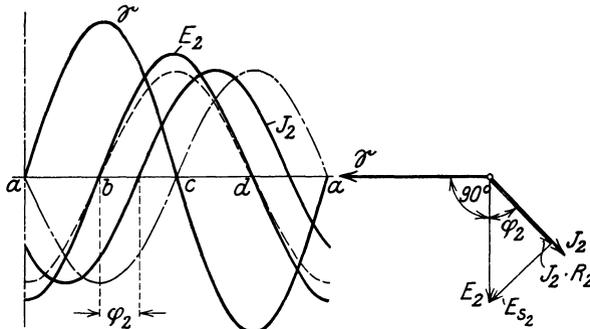


Abb. 277.

sprechend müssen wir auch hier noch mit  $\cos \varphi_2$  multiplizieren und können das Drehmoment M ausdrücken durch

$$M = C \cdot \mathfrak{C} \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 \dots \dots \dots 46$$

Bei Vernachlässigung des primären Spannungsabfalls und bei konstanter Netzspannung ist der Kraftfluß  $\mathfrak{C}$  konstant. Wir können das Drehmoment demnach auch einfach  $I_2 \cdot \cos \varphi_2$  proportional setzen. Nun ist aber in Abb. 275 im Dreieck ADF die Strecke AF, welche auf dem Kreisdurchmesser senkrecht steht, gleich  $I_2 \cdot \cos \varphi_2$ , sie stellt demnach das Drehmoment des Motors dar. Aus dem Diagramm Abb. 276 sehen wir deutlich, wie sich das Drehmoment mit zunehmender Belastung ändert. Zuerst wächst es, erreicht in der Strecke MA' einen Höchstwert und nimmt dann wieder bis auf den Wert  $M_a$  ab, welcher bei stillstehendem Anker erreicht wird. Das Anlaufmoment ist also keineswegs das höchste. Es hat dies seinen Grund darin, daß bei stillstehendem Anker in demselben die höchste Wellenzahl auftritt, die nach Gleichung 36 eine entsprechend hohe Selbstinduktionsspannung und Phasenverschiebung  $\varphi_2$  zur Folge hat.

Die Abhängigkeit des Drehmomentes von der zugeführten Spannung geht auch aus Gleichung 46 hervor. Nehmen wir beispielsweise einmal halbe Netzspannung an, so wird der Kraftfluß  $\mathfrak{C}$  auf die Hälfte sinken. Dadurch wird aber im Anker nur die halbe Spannung und der halbe Strom  $I_2$  entstehen, so daß das Drehmoment, welches sowohl von  $\mathfrak{C}$  als auch von  $I_2$  abhängt, auf ein Viertel zurückgehen muß. Das Dreh-

moment ist demnach dem Quadrate der Spannung proportional.

Das Verhältnis des höchsten Drehmomentes  $M_{\max}$  zum normalen Moment nennt man die *Überlastungsfähigkeit*, sie ist bei Drehstrommotoren etwa 2–3. Ein Motor kann ein um so größeres Höchstmoment entwickeln, je größer sein Diagrammkreis ist. Der Durchmesser desselben ist aber nach dem früher Gesagten um so größer, je kleiner die Streuung ist.

Wir können dem Diagramm Abb. 276 auch in einfacher Weise den Schlupf oder die Drehzahl entnehmen. Nach Gleichung 45 ist die Ankerwellenzahl und damit der Schlupf der Tangente  $\varphi_2$  proportional. Wir bilden uns deshalb ein rechtwinkliges Dreieck, in dem der Winkel  $\varphi_2$  vorkommt. In Abb. 276 ist Winkel  $ADY = \varphi_2$ . Errichten wir auf  $DY$  irgendwo eine Senkrechte  $PQ$  und teilen diese Strecke in 100 Teile, so schneidet der jeweilige Ankerstrom  $DA$  den auftretenden Schlupf ab. Unterhalb des Diagramms Abb. 276 sind nun in Abhängigkeit von der Drehzahl die Drehmomente aufgetragen. Das Drehmoment ist Null, wenn der Anker die gleiche Geschwindigkeit, wie das Drehfeld hat. Es erreicht seinen Höchstwert, wenn die Umlaufzahl etwa auf 70–80 % derjenigen des Drehfeldes gesunken ist. Im Anlauf herrscht das kleinere Moment  $M_a$ . Dieses Anlaufmoment ist sehr oft so klein, daß es die Antriebswiderstände nicht überwinden kann. Um dasselbe zu vergrößern, müßte im Diagramm Abb. 276 der Kurzschlußpunkt  $A_k$  höher heraufgerückt werden, wenn möglich bis zum Punkte  $A'$ . Dies ist nur denkbar durch Verkleinerung des Winkels  $\varphi_2$ . Nach Gleichung 45 läßt sich tang  $\varphi_2$  durch Vergrößerung des Ankerwiderstandes  $R_2$  verkleinern, und man erhält die Drehmomentlinie  $b$  bzw.  $c$  der Abb. 276, wenn die Leiterstäbe des Ankers einen höheren Widerstand haben.

Der in Abb. 274 dargestellte Anker, welcher *Käfiganker* oder *Kurzschlußläufer* genannt wird, könnte zwar zur Erzielung eines ausreichenden Anlaufdrehmomentes mit erhöhtem Leiterwiderstand ausgeführt werden. Aber dies ist nur auf Kosten des Wirkungsgrades möglich, denn die Kupferverluste im Anker sind doch um so größer, je größer der Ankerwiderstand ist. Beide Bedingungen, nämlich hohes Anzugsmoment und hoher Wirkungsgrad, lassen sich gleichzeitig nur dadurch erfüllen, daß man den Anker nicht als Kurzschlußläufer, sondern als *Schleifringläufer* ausführt. Er bekommt in diesem Falle eine dreiphasige Wicklung, die der primären Feldwicklung ganz ähnlich ist und deren Enden über drei Schleifringe herausgeführt sind. Es ist dadurch möglich, während des Anlaufs dem Anker einen getrennten Widerstand, einen Anlaßwiderstand vorzuschalten und mit ihm das Anlaufmoment so weit wie möglich zu erhöhen. Wenn dann der Motor seine normale Drehzahl erreicht hat, entwickelt er ohnehin ein großes Drehmoment, so daß der zusätzliche Widerstand wieder entfernt werden kann. Durch die Verwendung eines Schleifringläufers mit Anlaßwiderstand erzielen wir also ein hohes Anlaufmoment und vermeiden dennoch eine Verschlechterung des Wirkungsgrades während des Laufs. Wir dürfen aber nicht übersehen, daß der Anlaßwiderstand eines Drehstrommotors in den Ankerstromkreis eingeschaltet wird, also in einen Stromkreis, der mit dem Netz in keiner elektrischen Verbindung steht. Wir wollen in

Zukunft, wie es allgemein üblich ist, den Anker des Drehstrommotors *Läufer* oder *Rotor* nennen, den feststehenden Teil hingegen *Ständer* oder *Stator*. Während sich bei einem Transformator die sekundäre Windungszahl nach der vorgeschriebenen Spannung richtet, gibt es eine derartige Vorschrift bei dem Drehstrommotor nicht. Wir können den Läufer vielmehr ganz nach Belieben mit wenig Leitern für niedrige Spannung oder mit viel Windungen für hohe Spannung wickeln. Eine Berechnung des Läuferstromes aus der Leistung, wie es bei dem Ständerstrom möglich ist, läßt sich deshalb nicht durchführen. Man müßte dazu noch das Windungsverhältnis zwischen Ständer und Läufer wissen. Vom praktischen Standpunkt aus läßt sich allerdings die Läuferspannung nicht ganz nach Belieben wählen. Eine sehr niedrige Sekundärspannung hätte einen großen Läuferstrom zur Folge, zu dessen Abnahme sehr breite Schleifringe erforderlich wären. Andererseits würde eine hohe Läuferspannung sehr gute Isolation der Schleifringe verlangen, auch wäre die Berührung derselben dann gefährlich.

Wir haben bei den bisherigen Betrachtungen stets vorausgesetzt, daß die Stärke des Drehfeldes bei allen Belastungen die gleiche sei. Dies trifft nicht ganz zu, weil in der Ständerwicklung ein Ohmscher Spannungsabfall auftritt und weil auch ein induktiver Spannungsabfall durch Streukraftlinien hervorgerufen wird. Nach Abzug dieser Spannungsabfälle von der zugeführten Spannung erhalten wir die Spannung  $E_1$ , welche für die Bildung des Drehfeldes maßgebend ist (s. Transformatoren). Wir können jedoch auch bei den weiteren Betrachtungen von der Berücksichtigung der Ständerverluste absehen, weil sie die Wirkungsweise des Motors nicht sehr beeinflussen.

**Die Berechnung des Motorstromes.** Wenn wir die abgegebene Leistung in Watt  $\mathcal{G}_2$  nennen, so entfällt auf jede Phase des Dreiphasenmotors  $\mathcal{G}_2 : 3$ . Die größere aufgenommene Leistung jeder Phase beträgt dann  $\mathcal{G}_2 : 3 \cdot \eta$ , worin  $\eta$  der Motorwirkungsgrad ist. Diese Leistung ist aber nach dem früheren gleich  $E_p \cdot I \cdot \cos \varphi$ .

$$\frac{\mathcal{G}_2}{3 \cdot \eta} = E_p \cdot I \cdot \cos \varphi.$$

Setzen wir hierin statt der Phasenspannung  $E_p$  noch  $E : \sqrt{3}$  ein,

so ergibt sich: 
$$I = \frac{\mathcal{G}_2}{\sqrt{3} \cdot \eta \cdot E \cdot \cos \varphi} \dots \dots \dots 47$$

**Beispiel:** Ein 12 kW-Drehstrommotor für 500 V habe einen Wirkungsgrad  $\eta = 0,88$  und einen Leistungsfaktor  $\cos \varphi = 0,9$ . Wie groß ist der Ständerstrom und wie groß der Läuferstrom, wenn am ruhenden Läufer eine Spannung von 190 V zwischen den Schleifringen gemessen wurde?

Die abgegebene Leistung jeder Phase ist  $12000 : 3 = 4000$  W.

Die aufgenommene Leistung also:

$$4000 : \eta = 4000 : 0,88 = 4550 \text{ W.}$$

Die Phasenspannung  $E_p$  ist:

$$E_p = \frac{500}{\sqrt{3}} = 289 \text{ V,}$$

$$E_p \cdot I_1 \cdot \cos \varphi = 4550 = 289 \cdot I_1 \cdot 0,9,$$

$$I_1 = \frac{4550}{289 \cdot 0,9} = 17,5 \text{ A.}$$

Wir haben hier vorausgesetzt, daß der Ständer in Stern geschaltet sei. Nehmen wir Dreiecksschaltung an, so ist die Spannung an einer Phase  $\sqrt{3}$  mal größer, der Strom aber entsprechend kleiner, so daß das Ergebnis unverändert ist.

Für die Berechnung des Läuferstromes, wobei wir auch eine Dreiphasenwicklung voraussetzen, wollen wir uns mit einer angenäherten Rechnung begnügen. Wir nehmen an, daß sich die Ströme bei dem Transformator umgekehrt wie die Spannungen verhalten. Also:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{E_1}{E_2} \quad I_2 = 17,5 \cdot \frac{500}{190} = 46 \text{ A.}$$

Diese Berechnung des Läuferstromes war bei dem Transformator ziemlich genau, bei dem Drehstrommotor ist sie weniger richtig, weil der Leerlaufstrom  $I_0$  das Verhältnis der Primär- zur Sekundärseite stört, wie dies Abb. 275 ja zeigt. Dieser Leerlaufstrom, welcher auch im Drehstrommotor sich aus dem eigentlichen Magnetisierungsstrom und dem Wattstrom zur Deckung der Reibungs- und Eisenverluste zusammensetzt, ist nämlich viel größer als derjenige des Transformators. Es liegt dies daran, daß der Eisenkreis des Drehstrommotors notwendig einen Luftspalt enthalten muß, wodurch ein wesentlich größerer Magnetisierungsstrom benötigt wird. Der Leerlaufstrom kann deshalb etwa 20 bis 40% des Normalstromes betragen. Der große Leerlaufstrom  $I_0$  ist auch mit die Ursache dafür, daß der Drehstrommotor eine starke Phasenverschiebung  $\varphi$  zwischen Ständerstrom und Spannung hat. Sein Leistungsfaktor  $\cos \varphi$  wird also nie eins sein.

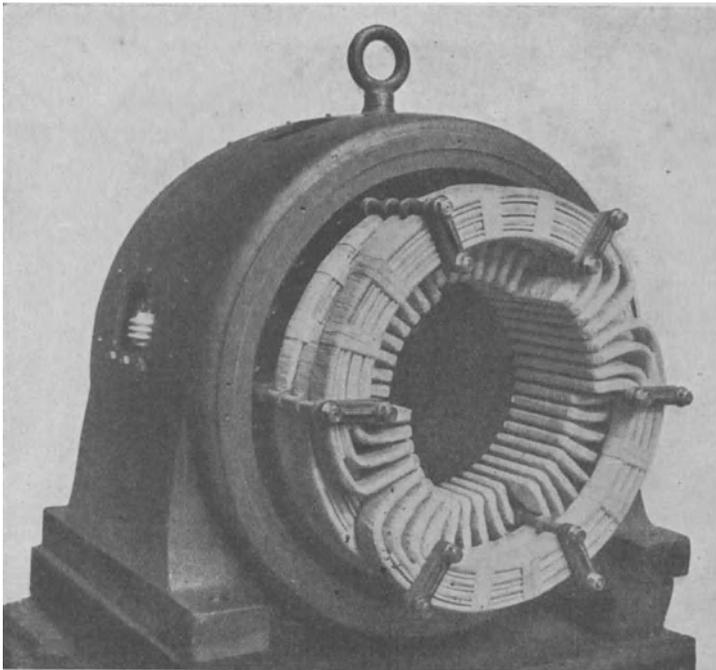


Abb. 278. Zweipoliger Ständer eines Drehstrommotors für 525 PS, 5000 V.

**b) Der Aufbau des Drehstrommotors.** Es gibt keinen zweiten Motor, der in seinem Aufbau an die Einfachheit des Drehstrommotors herankommt. Man denke nur an den *Kurzschlußmotor*, dessen Käfiganker

weder Schleifringe noch Isolation besitzt, und dessen Ständer nur eine ruhende Wicklung ohne blanke Teile hat.

Der Ständer aller Drehstrommotoren besteht aus dem ringförmigen Eisenkörper, der aus Blechen zusammengesetzt ist, in welche die Nuten eingestanzt sind. Genau wie bei der Drehstrommaschine ist auch bei dem Motor der Eisenkörper in einem gußeisernen Gehäuse gelagert.

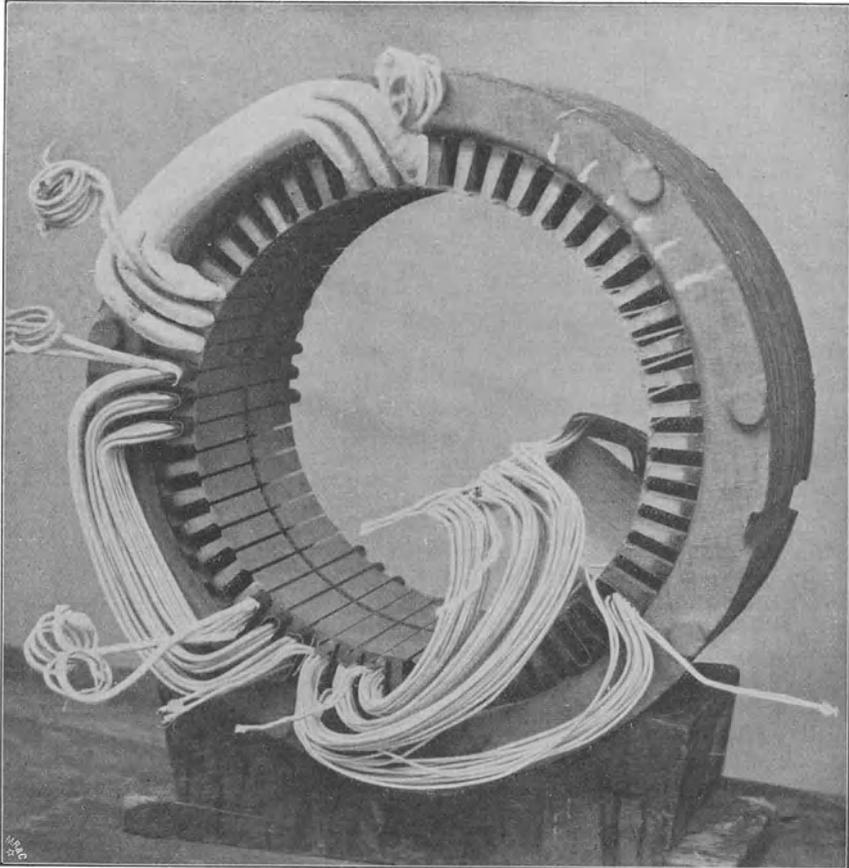


Abb. 279. Neuwickeln einiger Ständerspulen.

Auch die Wicklung stimmt mit derjenigen der Drehstrommaschine überein. Abb. 278 zeigt den zweipoligen Ständer eines großen Drehstrommotors für höhere Spannung. Bei der Wicklung ist ebenso wie in Abb. 268 der Wicklungskopf jeder der drei Spulen zur Hälfte nach der einen, zur Hälfte nach der anderen Seite abgebogen. Jede Spulenseite geht durch 8 Nuten. Auch die Ständer der Abb. 234 und 235 könnten ohne weiteres für Drehstrommotoren Anwendung finden. Die Ständerwicklung ist bei den normalen Motoren eine Drahtwicklung. Da die

Nuten der Drehstrommotoren fast immer halb und manchmal sogar ganz geschlossen sind, können die Spulen nicht wie bei Gleichstromankern in fertigem Zustand eingelegt werden, obwohl dies gerade bei der Dreiphasenwicklung mit der eigenartigen Kröpfung der Spulen besonders erwünscht wäre. Bei halb offenen Nuten kann man allerdings doch die Spulen getrennt auf einer Schablone wickeln, wenn man sie nicht mit Band bewickelt. Dann kann man nämlich die fertig gebogene Spule dadurch einlegen, daß man einen Draht nach dem anderen durch den Nutenschlitz in die Nute legt, wie dies Abb. 279 zeigt. Zuvor muß natürlich die Nute mit Preßspan ausgekleidet sein. Bei höheren Spannungen muß die Spule von einer geschlossenen Nutenhülse aus Mika umhüllt sein. In diesem Falle bleibt nichts übrig, als die Drähte einzufädeln. Kleine Motoren kann man nicht als Hochspannungsmotoren wickeln. Im allgemeinen ist die untere Grenze:

bei 3000 V 75 kW  
 „ 5000 V 150 kW

Der *Läufer* muß ebenfalls einen aus Blechen zusammengesetzten Eisenkörper haben. Wenn auch bei normalem Lauf die Wellenzahl im Anker gering ist, so daß keine nennenswerten Eisenverluste entstehen, so wächst dieselbs doch bei Überlastungen und ist im Anlauf sehr groß. Abb. 280 zeigt einen Schleifringanker mit dreiphasiger Drahtwicklung. Bei größeren Motoren findet man häufiger eine Stabwicklung, ähnlich wie bei Gleichstromankern. Die geschlossene Wicklung hat an drei Stellen Ableiter, die nach den drei Schleifringen führen, es ist also eine Dreieckschaltung.

Wir brauchen die Schleifringe eines Schleifringankers eigentlich nur während des Anlaufens. Sobald der Läufer die normale Umlaufzahl erreicht hat, ist der Anlaßwiderstand heraus und die drei Enden, welche über die Schleifringe zum Anlasser geführt sind, sind miteinander verbunden. Wenn man diese Verbindung schon

am Läufer machen könnte, brauchte man die Bürsten überhaupt nicht mehr. Motoren für Dauerbetrieb erhalten deshalb meistens eine *Kurzschluß- und Bürstenabhebevorrichtung*, welche mittels Hebels oder



Abb. 280. Schleifringläufer mit Drahtwicklung.

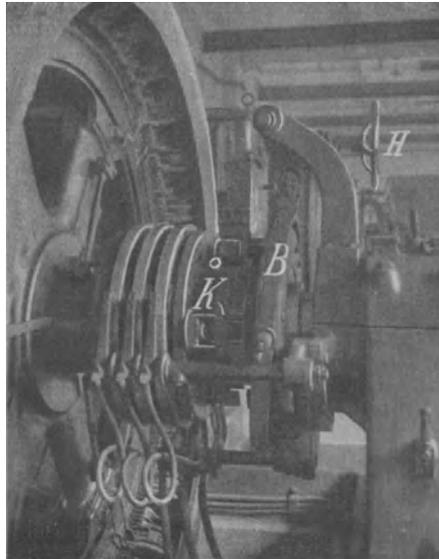


Abb. 281. Kurzschluß- und Bürstenabhebevorrichtung an einem großen Drehstrommotor.

Handrads am Motor betätigt wird, und welche nach dem Anlassen eine Verbindung der drei Schleifringe miteinander ermöglicht mit darauffolgender Bürstenabhebung. Der Verschleiß der Bürsten ist dann sehr gering. Bei Motoren für aussetzenden Betrieb hat eine solche Vorrichtung keinen Zweck. Abb. 281 läßt die Messerkontakte K an den Schleifringen erkennen, welche durch achsiale Verschiebung des Bügels B miteinander verbunden werden. Die Betätigung geschieht durch das Anlasserhandrad H nach Erreichung des letzten Kontaktes.

Zur Verbesserung des Leistungsfaktors müssen wir bei Drehstrommotoren einen kleinen Luftspalt anstreben. Derselbe wird bei kleinen Motoren, insbesondere solchen mit Kugellagern nicht mehr als 0,3 mm gemacht, bei mittleren Motoren und kleineren mit normalen Lagern etwa 0,5 mm, bei großen Motoren mehr. Man vergegenwärtige sich, wie außerordentlich wenig dies ist und wie schon der geringste Lagerverschleiß ein Schleifen des Läufers bewirken kann. Der notwendig kleine Luftspalt ist deshalb der größte Nachteil des Drehstrommotors.

In der Wahl der Umlaufzahl ist man bei Drehstrommotoren beschränkter als bei Gleichstrommotoren, weil man immer an das Drehfeld gebunden ist, dessen Umlaufzahl durch Polzahl und Wellenzahl festliegt. Wenn möglich, wird man immer schnellaufende Motoren wählen, weil sie billiger sind und weil die Streuung wegen der geringeren Spulenzahl kleiner ist.

c) Das Verhalten des Drehstrommotors. a) Als Motor. Wir haben bereits festgestellt, daß die Umlaufzahl mit zunehmender Belastung nur wenig abnehmen wird, weil bei dem geringen Läuferwiderstand schon eine kleine Spannung einen großen Strom erzeugen kann. Die

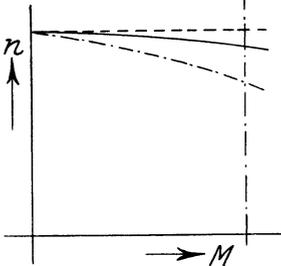


Abb. 282. Die Drehzahl des Drehstrommotors sinkt nur wenig bei zunehmender Belastung.

Abhängigkeit der Umlaufzahl von dem Drehmoment zeigt uns ja Abb. 276 schon. Um den Verlauf noch deutlicher zu machen ist derselbe in Abb. 282 in umgekehrter Lage nochmals gezeichnet. Die strichpunktierte Linie gilt für erhöhten Läuferwiderstand. Je geringer der Schlupf ist, um so besser ist der Wirkungsgrad. Der normale Schlupf beträgt etwa bei Motoren

|                         |         |
|-------------------------|---------|
| von 1 kW Leistung . . . | 7 %     |
| „ 10 kW „ . . .         | 4 %     |
| „ 50 kW „ . . .         | 2,5 %   |
| über 100 kW „ . . .     | bis 2 % |

Motoren mit Kurzschlußanker und hohem Anzugsmoment haben einen etwa doppelt so hohen Schlupf.

Das Drehmoment steht nach dem Früheren in quadratischer Abhängigkeit von der zugeführten Spannung. Der Drehstrommotor ist also gegen starke Spannungsabfälle in den Zuleitungen empfindlich, und es kann der Fall eintreten, daß derselbe bei zu schwachen Zuleitungen bei Überlast nicht mehr durchzieht. Das Höchstmoment beträgt bei normalen Motoren etwa das 2,5fache des normalen, bei Motoren für Hebezeuge und ähnliche Betriebe mit häufigem, schweren Anlauf wird

mindestens ein Höchstmoment vom dreifachen Normalwert verlangt. Der Schlupf, bei welchem das Höchstmoment erreicht wird, liegt etwa bei 20–30%.

Die Verluste des Drehstrommotors setzen sich aus den bei allen Belastungen nahezu konstanten Eisen- und Reibungsverlusten und den veränderlichen Kupferverlusten zusammen. Bei 50 sekundlichen Wellen im Netz sind etwa folgende Wirkungsgrade normal:

|               |             |               |
|---------------|-------------|---------------|
| 1 kW Leistung | . . . . .   | $\eta = 0,74$ |
| 2 kW          | „ . . . . . | 0,80          |
| 5 kW          | „ . . . . . | 0,85          |
| 10 kW         | „ . . . . . | 0,88          |
| 20 kW         | „ . . . . . | 0,905         |
| 50 kW         | „ . . . . . | 0,92          |
| 1000 kW       | „ . . . . . | 0,96          |

Der Wirkungsgrad bei veränderter Belastung berechnet sich in genau gleicher Weise wie bei den Gleichstrommotoren (s. S. 95). Das Verhältnis  $a$  der konstanten zu den veränderlichen Verlusten ist dabei zu 0,5–1 anzunehmen, wenn es sich um einen normalen Motor handelt. Bei Motoren für aussetzenden Betrieb und bei Schnellläufern hingegen 1 und mehr.

Der *Leistungsfaktor* hängt von der Polzahl (Streuung) ab und ist normal etwa:

| Leistung | bei $n = 750$ | bei $n = 1500$ |
|----------|---------------|----------------|
| 1 kW     | 0,78          | 0,87           |
| 5 kW     | 0,84          | 0,905          |
| 10 kW    | 0,855         | 0,92           |
| 25 kW    | 0,87          | 0,93           |
| 100 kW   | 0,895         | 0,94           |

Diese Tabelle gilt für 50 Perioden. Bei Kurzschlußmotoren sind die Werte etwas höher.

In Abb. 283 ist das Verhalten eines 18pferdigen, sechspoligen Kranmotors für 50 Perioden bei veränderlichem Belastungsdrehmoment dargestellt.

Infolge Durchbrennens einer Sicherung oder durch schlechten Kontakt kommt es leider zuweilen vor, daß eine der drei Motorphasen keine Spannung bekommt. Dann bleibt der Motor nicht etwa stehen, sondern er läuft als Asynchron-Wechselstrommotor, dessen Wirkungsweise wir später betrachten werden, weiter. Dabei nimmt er einen wesentlich größeren Strom auf, so daß die Gefahr des Verbrennens besteht. Durch Einschaltung von Strommessern in die drei Zuleitungen kann man sich überzeugen, ob alle

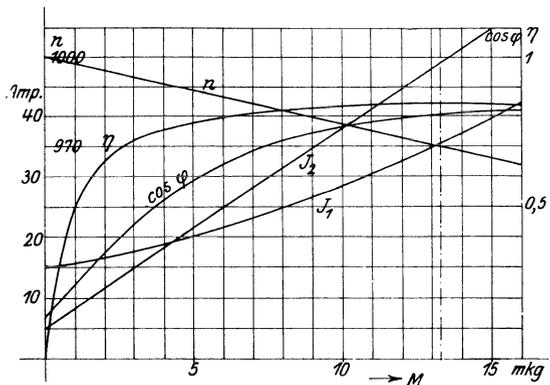


Abb. 283. Verhalten eines sechspoligen Drehstrommotors für 13 KW, 325 V.

Phasen gleichmäßig belastet sind. Um den Motor zu schützen, kann man keinen Nullspannungsschalter verwenden, weil der Motor die fehlende Phasenspannung selbst erzeugt. Nullstromausschalter sind hingegen geeignet.

Läuft ein Motor nicht an, so ist zunächst einmal festzustellen, ob zwischen allen drei Motorklemmen die volle Spannung ist. Auch ist die Spannung zwischen den Schleifringen, die gleich sein muß, nachzumessen. Hat der Motor noch nicht gelaufen, so besteht die Möglichkeit, daß ein Schaltungsfehler vorliegt, daß eine ganze Phase oder einzelne Spulen verkehrt geschaltet sind. Der Motor brummt dann stark und die Stromaufnahme ist ungleich. Es ist jedoch auch möglich, daß im Ständer oder Läufer eine Unterbrechung oder ein Windungsschluß vorhanden ist, was durch eine Widerstandsmessung der drei Phasen (durch Messung von Strom und Spannung) festgestellt werden könnte. Besondere Aufmerksamkeit muß man dem Luftspalt im Betriebe schenken. Derselbe muß mittels einer zwischen-geschobenen Stahlbandlehre von Zeit zu Zeit nachgemessen werden, wobei man an der Meßstelle natürlich Zahn und Zahn gegenüberstellen muß. Zuweilen ist es unvermeidlich einen beschädigten Läufer etwas abzdrehen. Dies muß mit äußerster Vorsicht und so wenig wie möglich geschehen, weil durch die Vergrößerung des Luftspaltes das Feld verkleinert wird. Die Zugkraft des Motors sinkt also stark.

$\beta$ ) Als Erzeuger. Wenn man einen Nebenschlußmotor über seine Leerlaufumlaufzahl hinaus schneller antreibt, so liefert er als Erzeuger

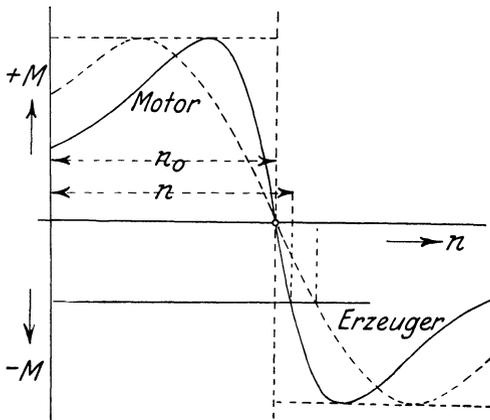


Abb. 284. Der Drehstrommotor wird bei übersynchronem Lauf zum Erzeuger.

Strom in das Netz zurück. Auch der Drehstrommotor hat eine bestimmte Leerlaufgeschwindigkeit, die wenig geringer als die des Drehfeldes ist. Dabei schneiden die Läuferleiter infolge des Zurückbleibens Kraftlinien, wodurch eine Spannung und ein Strom entsteht, der den Anker schneller zu drehen bestrebt ist. Wenn wir nun den Anker durch einen äußeren Antrieb schneller als das Drehfeld drehen, so schneidet er wieder Kraftlinien, aber jetzt in umgekehrter

Richtung, so daß jetzt ein negativer Strom entsteht, welcher bestrebt ist, die Läufergeschwindigkeit zu vermindern. Der Motor bremsst also. Der negative Läuferstrom ruft natürlich auch einen negativen Ständerstrom hervor, so daß die Maschine jetzt bremsend Strom in das Netz zurückliefert. Da bei übersynchronem Lauf die gleichen Verhältnisse herrschen wie unterhalb der Drehfeldumlaufzahl, und weil es doch nur auf den Geschwindigkeitsunterschied zwischen Läufer und Drehfeld ankommt, ist anzunehmen, daß sich das Moment als Erzeuger genau wie dasjenige des Motors verhält. Abb. 284 zeigt den Verlauf, und wir sehen, daß der Erzeuger einen übersynchronen Schlupf hat, der ebenso groß wie der untersynchrone Schlupf des Motors ist. Bei Einschaltung von Widerstand in den Läufer erhalten wir die punktierte Linie. Bei gleichem Drehmoment macht also der Erzeuger mit

Widerstand mehr Umdrehungen. Dies ist für die Senkbremsung von Wichtigkeit. Man muß sich also hüten, eine große Last mit eingeschaltetem Widerstand abzusenken, weil die Umlaufzahl leicht eine gefährliche Höhe erreichen kann. Zur Nachlaufbremsung ist der Asynchron-Erzeuger nicht geeignet, weil er nur oberhalb der synchronen Umlaufzahl bremsend wirken kann. Derselbe kann jedoch auch als Drehstromerzeuger in elektrischen Zentralen dienen und wird bei kleineren Wasserkraftwerken und solchen mit Dampfturbinenantrieb oft gern verwandt, weil die Maschine ohnegleichen einfach ist und keine feine Regulierung der Geschwindigkeit verlangt. Der Asynchron-Erzeuger kann aber niemals allein ein Netz speisen, er muß immer in einer Synchronmaschine einen Schrittmacher haben, der die Höhe der Wellenzahl angibt und den Magnetisierungsstrom liefert. Er kann deshalb nur in Parallelschaltung mit einem vorhandenen Netz betrieben werden.

$\gamma$ ) **Das Anlassen des Drehstrommotors und die Regelung seiner Umlaufzahl.** Das Anlassen eines Kurzschlußmotors erfolgt einfach durch Einlegen eines dreipoligen Schalthebels. Der Einschaltstrom beträgt allerdings ein Vielfaches des normalen, so daß es nicht zulässig ist, größere Motoren als Kurzschlußmotoren anzulassen.

Elektrizitätswerke gestatten deshalb meistens nicht, Motoren über 2–4 kW als Kurzschlußmotoren anzuschließen. Braucht ein Motor kein hohes Anlaufdrehmoment zu entwickeln, so kann derselbe auch bei etwas größeren Leistungen ein Kurzschlußmotor sein, wenn man durch Verringerung der zugeführten Spannung den Anlaufstrom kleinhält. Dies kann man in sehr einfacher Weise durch die sog. Stern-Dreieckschaltung erreichen, bei welcher nach Abb. 285 auf der ersten Stufe die Ständerwicklungen in Stern, auf der zweiten Stufe in Dreieck geschaltet sind. Zuerst liegt also an jeder Spule die Spannung  $E : \sqrt{3}$ , nachher die volle Spannung  $E$ . Diese Anlaßart läßt sich natürlich nur dann durchführen, wenn beide Enden jeder Phase zugänglich sind. Mittels Stern-Dreieckschalters lassen sich Motoren bis etwa 8 kW anlassen. Eine weitergehende Verringerung der zugeführten Spannung läßt sich in einfacher Weise durch einen Stator-Vorschaltwiderstand oder, unter Vermeidung der Verluste eines Widerstandes, durch einen Reguliertransformator erreichen. Man muß dabei nur bedenken, daß das Drehmoment dem Quadrate der Spannung proportional ist, daß also z. B. eine Spannungsverminderung auf die Hälfte, das Drehmoment auf nur ein Viertel bringt. Infolgedessen wird das Anlassen mittels Spannungsregelung immer beschränkt anwendbar bleiben.

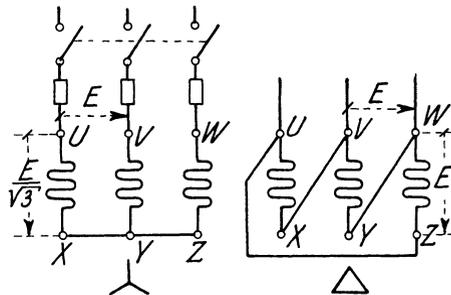


Abb. 285. Stern-Dreieckschalter.

Man durch Verringerung der zugeführten Spannung den Anlaufstrom kleinhält. Dies kann man in sehr einfacher Weise durch die sog. Stern-Dreieckschaltung erreichen, bei welcher nach Abb. 285 auf der ersten Stufe die Ständerwicklungen in Stern, auf der zweiten Stufe in Dreieck geschaltet sind. Zuerst liegt also an jeder Spule die Spannung  $E : \sqrt{3}$ , nachher die volle Spannung  $E$ . Diese Anlaßart läßt sich natürlich nur dann durchführen, wenn beide Enden jeder Phase zugänglich sind. Mittels Stern-Dreieckschalters lassen sich Motoren bis etwa 8 kW anlassen. Eine weitergehende Verringerung der zugeführten Spannung läßt sich in einfacher Weise durch einen Stator-Vorschaltwiderstand oder, unter Vermeidung der Verluste eines Widerstandes, durch einen Reguliertransformator erreichen. Man muß dabei nur bedenken, daß das Drehmoment dem Quadrate der Spannung proportional ist, daß also z. B. eine Spannungsverminderung auf die Hälfte, das Drehmoment auf nur ein Viertel bringt. Infolgedessen wird das Anlassen mittels Spannungsregelung immer beschränkt anwendbar bleiben.

Die überwiegende Mehrzahl aller mittleren und größeren Motoren sind Schleifringmotoren, die nach Abb. 286 in der Weise angelassen

werden, daß zunächst mittels dreipoligen Schalthebels der Ständer S eingeschaltet wird, während der Läufer noch offen ist (Anlasser in Nullstellung). Der Motor läuft dann noch nicht, weil ja im Läufer L kein Strom fließen kann, und der Ständerstrom ist sehr klein. Dann schaltet man stufenweise, langsam den Läuferwiderstand R ab, wobei sich der Motor bei normaler Stromaufnahme in Bewegung setzt. Nach Erreichung des letzten Kontaktes können gegebenenfalls die Kurzschlußkontakte K geschlossen und die Bürsten abgehoben werden. Um

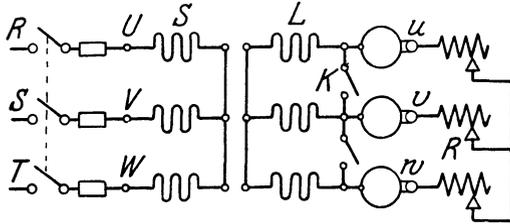


Abb. 286.  
Anlaßschaltung des Schleifringmotors.

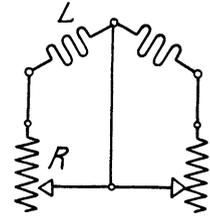


Abb. 287.  
Zweiphasiger Läufer.

einfachere Anlasser zu bekommen, findet man zuweilen auch zweiphasige Läufer nach Abb. 287.

**Die Anlaßwiderstände.** Wenn wir von der Leistung, die einem Drehstrommotor zugeführt wird, die Verluste im Ständer abziehen, so erhalten wir die auf den Läufer übergehende Leistung. Dieselbe wird im Augenblick des Einschaltens in dem Ohmschen Widerstand gänzlich in Wärme verwandelt, weil der ruhende Läufer mechanische Arbeit noch nicht abgibt. Erst wenn der Läufer sich dreht, wird mechanische Arbeit abgegeben, die bei gleichem Drehmoment um so größer ist, je höher die Drehzahl, je geringer der Schlupf ist. Die im Läufer in Wärme verwandelte Energie, welche übrig bleibt, wenn man von der auf den Läufer übertragenen Energie die abgegebene mechanische Arbeit abzieht, muß deshalb mit zunehmender Umlaufzahl abnehmen. Der Läuferverlust ist also dem Schlupf proportional.

Für eine Bestimmung der Anlaßwiderstände nimmt man am besten das Motordiagramm Abb. 276 zur Hilfe. Wenn der Motor mit normalem Moment anlaufen soll, so muß im Anlaufaugenblick ebensoviel Watt in dem Anlaßwiderstand in Wärme verwandelt werden, wie normal mechanische Energie abgegeben wird. Hieraus läßt sich der Anlaßwiderstand berechnen, wenn man dem Diagramm die Größe des Läuferstroms entnimmt. Damit während des Anlassens der Strom in bestimmten Grenzen bleibt, darf der Anlaßwiderstand nicht in gleich große Stufen geteilt werden. Die ersten Stufen müssen vielmehr größer gemacht werden, wie von den Gleichstrommotoren her bekannt ist.

Eine schnelle überschlägliche Berechnung liefert auch die Tatsache, daß bei konstantem Drehmoment auch der Schlupf dem Läuferwiderstand proportional ist. Wenn also ein Motor bei normaler Belastung z. B. einen Schlupf von 4% hat, so muß er im Anlauf, also bei einem Schlupf von 100% einen  $100:4 = 25$  mal größeren Läuferwiderstand haben, wenn er im Anlauf das Normalmoment entwickeln soll. Wenn der Läuferwiderstand bekannt ist, läßt sich der notwendige Anlaßwiderstand leicht bestimmen.

Bei manchen Motoren steht der Anlasser weit von dem Motor entfernt, wodurch eine nicht unwesentliche Erhöhung des Widerstandes durch die Läuferleitungen eintritt. Wenn dann der Anlasser nur wenige Stufen hat, tritt leicht eine derartige Verschiebung ein, daß das Höchstmoment zwischen zwei Stufen fällt, und daß die Momente auf den einzelnen Stufen nicht zum Anlauf hinreichen. Man muß dann die Größe des Anlaßwiderstandes verändern, bis der Motor anläuft.

**Bestimmung des Diagramms.** Um für einen ausgeführten Motor das Diagramm Abb. 276 aufzeichnen zu können, macht man im allgemeinen zwei Versuche: 1. Den *Leerlaufversuch*, welcher den Leerlaufstrom  $I_0$  und seine Phasenverschiebung liefert und 2. den *Kurzschlußversuch*, bei dem der Motor mit festgehaltenem, aber kurzgeschlossenem Anker an eine *niedrige* Spannung gelegt wird. Durch Umrechnung auf normale Spannung bekommt man den normalen Kurzschlußstrom des Motors. Man trägt sich dann den Leerlauf- und Kurzschlußstrom mit der richtigen Phasenverschiebung an und kann dann leicht den Diagrammkreis der Abb. 276 zeichnen.

**1. Beispiel:** Ein Drehstrommotor für 115 V leistet normal 3,7 kW bei 1440 minutlichen Umläufen. Bei offenem Läufer herrscht zwischen den Schleifringen eine Spannung von 102 V. Der Leistungsfaktor bei normaler Belastung ist  $\cos \varphi = 0,88$ , der Wirkungsgrad  $\eta = 0,84$ . Der Läuferwiderstand wurde zu  $R_2 = 0,09 \Omega$  je Phase gemessen. Der leerlaufende Motor nimmt  $I_0 = 7,3$  A bei  $\cos \varphi_0 = 0,26$  auf. Bei kurzgeschlossenem und festgehaltenem Läufer nimmt der Motor bei einer Ständerspannung von 25 V einen Strom  $I_k = 25,6$  A bei  $\cos \varphi_k = 0,35$  auf. Wie groß ist das höchste Drehmoment, welches der Motor entwickeln kann?

Zunächst berechnen wir den Kurzschlußstrom bei normaler Spannung zu:

$$I_k = 25,6 \cdot \frac{115}{25} = 118 \text{ A.}$$

Diesen Strom und den Leerlaufstrom von 7,3 A tragen wir uns mit der angegebenen Phasenverschiebung an den Spannungsvektor an, wobei wir einen beliebigen Maßstab zugrunde legen. Abb. 276 stellt die genannten Werte maßstäblich dar. Der Magnetisierungsstrom  $I_m$  ergibt sich zu 7 A. Man kann nun den Diagrammkreis zeichnen. Das normale Drehmoment des Motors ist nach den Regeln der Mechanik:

$$M = 0,975 \cdot \frac{\mathcal{G}_2}{n} = 0,975 \cdot \frac{3700}{1440} = 2,5 \text{ mkg.}$$

Der normale Motorstrom beträgt nach Gleichung 47

$$I = \frac{3700}{\sqrt{3} \cdot 0,84 \cdot 115 \cdot 0,88} = 25 \text{ A.}$$

Diesen Strom tragen wir uns in dem früher gewählten Maßstab in das Diagramm ein. Es ist die Strecke OA. Die Strecke AB stellt also das obige Moment von 2,5 mkg dar. Durch Abmessen kann festgestellt werden, daß das Höchstmoment  $MA'$  2,72 mal so groß, wie das Normalmoment ist. Das Höchstmoment beträgt also:

$$M_{\max} = 2,5 \cdot 2,72 = 6,8 \text{ mkg.}$$

**2. Beispiel:** Welcher Anlaßwiderstand ist bei dem Motor des vorigen Beispiels nötig, um mit normalem Strom anzufahren?

Die abgegebene Leistung je Phase beträgt  $3700 : 3 = 1230$  W. Der normale Läuferstrom ist durch die Strecke AD gegeben, welche 23 A darstellt. Da das Diagramm aber für das Übersetzungsverhältnis 1 gilt, müssen wir diesen Stromwert noch mit dem Spannungsverhältnis multiplizieren, um den wirklichen Läuferstrom zu bekommen. Also:

$$I_2 = 23 \cdot \frac{115}{102} = 25,9 \text{ A.}$$

Im Anlaufaugenblick wird die ganze abgegebene Leistung in Wärme verwandelt, folglich:

$$I_2^2 \cdot R_2 = 1230 = 25,9^2 \cdot R_2$$

und hieraus:

$$R_2 = 1,84 \, \Omega \text{ je Phase.}$$

**Die Regelung der Umlaufzahl.** Den baulichen Vorzügen des Drehstrommotors steht die mangelhafte Regelbarkeit als wichtigster Nachteil gegenüber. In Abb. 276 ist unten die Abhängigkeit des Drehmomentes von der Umlaufzahl dargestellt und zwar durch Linie a für den kurzgeschlossenen Läufer, durch Linie b mit etwas und durch die Linie c mit mehr Widerstand im Läuferstromkreis. Die Darstellung läßt erkennen, daß mittels des Läuferwiderstandes eine Regelung der Drehzahl möglich ist, denn wenn der Motor mit dem Drehmoment  $M$  belastet ist, macht er ohne Widerstand im Läufer  $n_a$  Umläufe, mit Widerstand hingegen  $n_b$  bzw.  $n_c$ . Durch weitere Erhöhung des Läuferwiderstandes kann die Drehzahl noch weiter herabgedrückt werden. Die Regelart hat wichtige Nachteile. Da die Verluste im Läuferstromkreis dem Schlupf proportional sind, ist diese Regelung ebenso unwirtschaftlich, wie die Hauptstromregelung der Gleichstrommotoren. Sie hat auch den weiteren Nachteil, daß bei konstant gehaltenem Widerstand sich die Drehzahl stark mit der Belastung ändert. Wenn nach Abb. 276 ein Läuferwiderstand entsprechend der Linie c eingeschaltet ist, tritt bei dem Moment  $M$  die Umlaufzahl  $n_c$  auf, steigert sich aber das Moment auf  $M'$ , so sinkt die Drehzahl auf  $n_c'$ , während durch eine Entlastung des Motors die Umlaufzahl auf  $n_0$  anwachsen würde. Diese Abhängigkeit von der Belastung ist um so stärker, je mehr Widerstand in den Läufer eingeschaltet ist.

Eine Regelung durch Ständervorschaltwiderstände wäre zwar auch denkbar. Sie würde jedoch ebenso unwirtschaftlich sein, und würde ferner das Drehmoment des Motors stark herabsetzen, weil doch das entwickelte Drehmoment mit dem Quadrate der zugeführten Spannung sinkt.

Die Regelung durch Läuferwiderstände ist trotz ihrer Nachteile bei kurzzeitigem und aussetzendem Betrieb allgemein üblich. Es liegt dies daran, daß es eine andere, einfache Regelart nicht gibt, und daran, daß bei kurzzeitigem Betrieb die Verluste nicht so ins Gewicht fallen.

Es gibt nur noch eine Möglichkeit, die Umlaufzahl wirtschaftlich besser zu regeln, dies ist die *Polumschaltung*. Bei derselben sind die Spulen zu Anfang vielpolig und bei höheren Umlaufzahlen wenigpolig geschaltet. Die Umschaltung ist aber sehr umständlich und erfordert viel Leitungen. Auch ist der Leistungsfaktor solcher Motoren schlecht. Sie kommen deshalb selten zur Anwendung.

Die schwierige Regelbarkeit des Drehstrommotors hat zur Aufindung anderer Möglichkeiten geführt. Von diesen ist die auf S. 110 beschriebene *Leonardschaltung* eine der wichtigsten. Wir haben in Abb. 165 nur nötig, den Umformermotor  $M_1$  als normalen Drehstrommotor an das Drehstromnetz zu legen. Die Regelung erfolgt in der früher beschriebenen Weise.

In neuerer Zeit ist eine weitere Regelart vielfach zur Anwendung gekommen, die im folgenden kurz beschrieben werden soll. Bei der Widerstandsregelung der normalen Drehstrommotoren wird die bei starkem Schlupf im Läufer erzeugte

elektrische Energie in Widerständen in Wärme verwandelt. Könnte man dieselbe nutzbringend verwenden, so wäre die Aufgabe gelöst. Dies geschieht in Abb. 288 dadurch, daß der im Läufer des Antriebsmotors A erzeugte Drehstrom veränderlicher Wellenzahl einem Einankerumformer C zugeführt wird, welcher ihn in Gleichstrom umsetzt, der dann einem Motor B zugeführt wird. Dieser Gleichstrommotor B unterstützt dann den gekuppelten Hauptantriebsmotor A. Bei geringem Schlupf des Motors A erhält der Umformer Drehstrom niedriger Wellenzahl und Spannung und formt bei langsamem Lauf in Gleichstrom geringer Spannung um. Die vom Motor B aufgenommene und an die Welle abgegebene Leistung ist also gering. Bei starker Verminderung der Umlaufzahl des Motors A liefert derselbe hingegen dem Umformer viel Energie, so daß der Hintermotor B erheblich mehr zu leisten hat. Die Größe der Hilfsmaschinen richtet sich nach der verlangten Regelbarkeit. Die Erregung des Umformers und des Motors B wird einer besonderen Gleichstromquelle entnommen. Die Veränderung der Drehzahl des Motors A geschieht mit dem Magnetregulator D. Der Hintermotor B bestimmt nämlich die Umlaufzahl. Durch Regelung seines Nebenschlußstromes kann man also die Umlaufzahl des Hauptmotors ändern. Das Anlassen erfolgt mit dem Anlasser E, wie bei jedem Drehstrommotor. Der Umformer kommt dann von selbst in Tritt. Bei Antrieb von Walzwerken mit Schwungmassen muß der Motor B noch eine zusätzliche Hauptstromwicklung haben, damit bei Stoßbelastung die Umlaufzahl etwas abfallen kann.

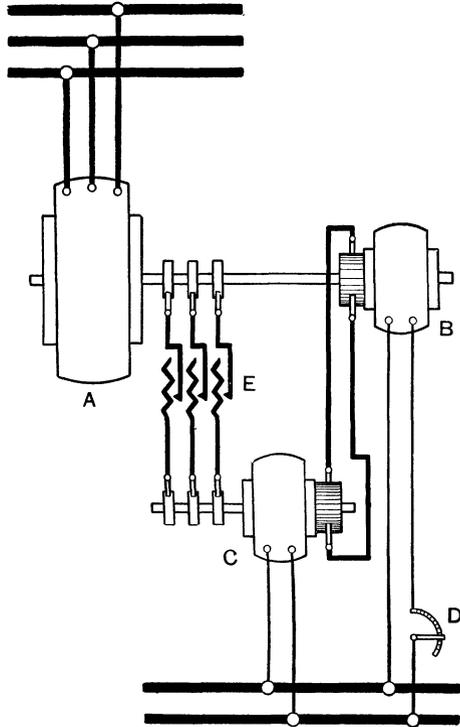


Abb. 288. Drehstrommotor mit Regelsatz zur verlustlosen Regelung.

## 2. Der Wechselstrommotor.

Wenn wir nach Abb. 289 in einem Ständereisenkörper eine Einphasenwicklung unterbringen und einen einfachen Wechselstrom hindurchschicken, so erzeugt derselbe ein Wechselfeld  $\mathfrak{E}_y$ , welches senkrecht zur Spulenebene steht und mit der Wellenzahl des Netzstromes fortgesetzt entsteht und verschwindet. Ein in den Hohlraum hineingebrachter Käfiganker wird sich nicht drehen können. Eine solche Käfigwicklung können wir uns zerlegt denken in zwei aufeinander senkrecht stehende Spulen, nämlich a—a und b—b, wie dies punktiert angedeutet ist. Die Spule b—b liegt in ihrer Ebene in der Kraftlinienrichtung, sie bleibt also ganz un-

beeinflußt. Die Spule  $a-a$  hingegen wird von dem Wechselkraftfluß des Ständers durchsetzt, der in ihren Leitern eine Spannung und einen Strom  $i_a$  erzeugt. Die Spule  $a-a$  verhält sich also genau wie die Sekundärspule eines kurzgeschlossenen Transformators. Wir wollen jetzt dem Läufer von Hand eine Drehung nach beliebiger Seite geben, und dadurch die bisherige Symmetrie stören. Bei der Drehung schneiden die Leiter der Spule  $b-b$  die Kraftlinien  $\mathcal{E}_y$ , so daß auch in ihnen eine Spannung und ein Strom  $i_b$  entsteht. Dieser Strom erzeugt senkrecht durch die Spule ein allerdings schwaches Feld  $\mathcal{E}_x$ . Nun liegen die Leiter  $a-a$  mit dem Strom  $i_a$  in diesem Feld  $\mathcal{E}_x$  und erzeugen ein Drehmoment, welches die Drehung verstärkt. Dadurch wird ein stärkerer Strom  $i_b$  und ein stärkeres Feld  $\mathcal{E}_x$  erzeugt, so daß nach und nach die Geschwindigkeit sich bis zur synchronen steigert. Dann kann der Wechselstrommotor belastet werden und verhält sich in jeder Hinsicht genau wie ein Drehstrommotor.

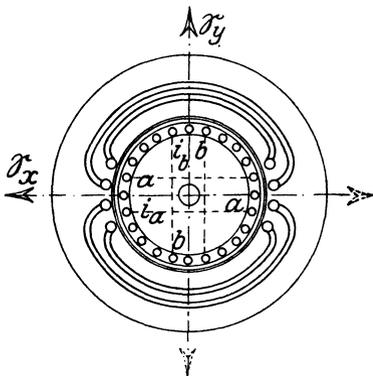


Abb. 289. Wechselstrom-Asynchronmotor.

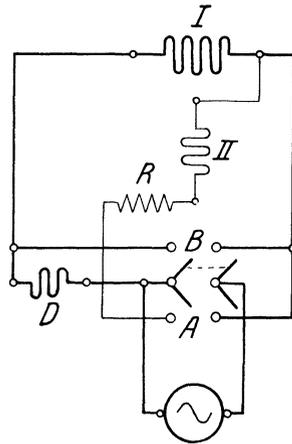


Abb. 290. Anlaßschaltung eines Wechselstrommotors mit Hilfswicklung.

Der schlechte Anlauf ist ein schwerwiegender Nachteil dieses *asynchronen Wechselstrommotors*, der ihn für sehr viele Zwecke ungeeignet macht. Damit der Motor nun wenigstens leer mit geringem Drehmoment anzulaufen vermag, bedient man sich fast allgemein einer Hilfswicklung, welche gegen die Hauptwicklung versetzt ist. In Abb. 290 ist I die Hauptwicklung und II die Hilfswicklung. Im Anlauf A legt man den Umschalthebel nach unten. Dann ist der Hauptwicklung eine Drosselspule D und der Hilfswicklung ein Widerstand R vorgeschaltet. Die Ströme in den beiden Wicklungen müssen also gegeneinander phasenverschoben sein, und es wird ähnlich wie im Drehstrommotor ein, wenn auch kleines Drehfeld entstehen, welches den Läufer in Gang bringt. Sobald dies der Fall ist, legt man den Hebel in die Betriebsstellung B, in welcher nur die Hauptwicklung eingeschaltet ist. Durch Verwendung von Kondensatoren statt des Widerstandes läßt sich noch eine bessere Phasenverschiebung erzielen.

### 3. Weitere Anwendungen der Drehfelderscheinung.

a) *Die Drehtransformatoren (Induktionsregler).* Ein Drehstrommotor kann als Transformator betrachtet werden, an dessen Läufersehlfingren je nach dem Schlupf ein Drehstrom verschiedener Wellenzahl abgenommen werden kann. Halten wir den Läufer ganz fest, so hat der Läuferdrehstrom die gleiche Wellenzahl wie der Netzstrom. An den Schleifringen werden wir dabei stets die gleiche Spannung messen, auch wenn wir den Läufer im Ständer verdrehen. Durch eine solche Verstellung des festgehaltenen Läufers ändern wir aber die Phase des im Läufer erzeugten Drehstroms gegenüber dem zugeführten, denn wenn man z. B. den Läufer im Drehfeldsinn verdreht, werden die Leiter erst etwas später von dem umlaufenden Drehfeld geschnitten, als es vorher der Fall war. Verdreht man den Läufer eines zweipoligen Motors um  $180^\circ$ , so erhält man eine Schleifringspannung, die gerade entgegengesetzt liegt wie vorher. Einen solchen *Drehtransformator* kann man nun zur Veränderung von Drehstromspannungen benutzen, und zwar entweder um die Spannung eines Netzspeisepunktes dauernd auf einem konstanten Betrag zu halten, oder auch um bei Einankerumformern, deren Spannungsverhältnis ja bekanntlich unveränderlich ist, die Drehstromspannung etwas verändern zu können. Man schaltet zu diesem Zweck die drei Läuferwicklungen  $L$  in die Zuleitungen zum Speisepunkt oder Umformer ein, wie dies Abb. 291 zeigt, während der Ständer  $S$  normal geschaltet ist. Sei die Spannung vor dem Drehtransformator  $E_1$ , so wird derselbe eine zusätzliche Spannung  $e$  liefern, die nach Abb. 292 je nach der Läuferstellung sich in verschiedener Richtung zu der Spannung  $E_1$  addiert, so daß wir durch Verdrehen des Läufers zwischen den Spannungswerten  $E_1 - e$  und  $E_1 + e$  regulieren können. Die Verdrehung des Läufers erfolgt mit einem selbstsperrenden Schneckenantrieb, damit das Läuferdrehmoment keine Umdrehung bewirken kann, und zwar von Hand oder selbsttätig mittels kleinen Motors. Wie Abb. 292 zeigt, entsteht durch die Regulierung eine kleine Phasenverschiebung zwischen  $E_1$  und  $E_2$ . Man kann dieselbe vermeiden, wenn man zwei gekoppelte Drehtransformatoren hintereinander schaltet und in beiden die Drehung der Zusatzspannung  $e$  nach entgegengesetzten Seiten vornimmt.

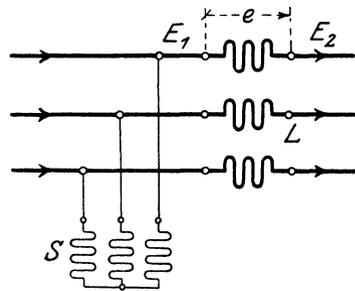


Abb. 291. Schaltung eines Drehtransformators.

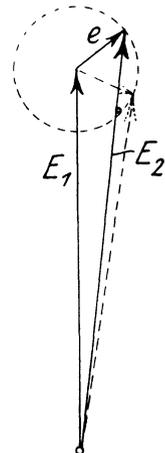


Abb. 292. Die Spannung  $e$  des Drehtransformators kann beliebig zur Spannung  $E_1$  addiert werden.

b) *Die Drehfeldmeßinstrumente.* Dieselben beruhen alle auf dem gleichen Grundsatz, den wir für den Anlauf der Wechselstrom-Asynchronmotoren benutzten.

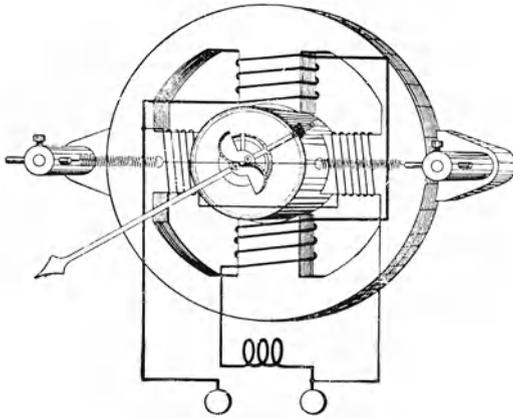


Abb. 293. Drehfeld-Meßinstrument.  
(Ferraris-Instrument.)

Abb. 293 zeigt einen Drehfeldstrommesser. Der hindurchfließende Strom teilt sich in zwei Teile, von denen der eine wenige Windungen der vertikalen Pole und der andere die vielen Windungen der horizontalen Pole durchfließt. Beide Teilströme sind wegen des Unterschiedes in der Selbstinduktion gegeneinander phasenverschoben, und es entsteht ein schwaches Drehfeld, welches auf die Aluminiumtrommel drehend wirkt. Da sich

die Phasenverschiebung mit der Wellenzahl ändert, können die Instrumente nur bei der Wellenzahl, für die sie hergestellt sind, genau zeigen.

## C. Die Kommutatormotoren für Wechsel- und Drehstrom.

### 1. Die Wechselstrom-Kommutatormotoren. a) Der Reihenschlußmotor.

Wir können nach dem Früheren den Drehsinn eines Gleichstrommotors nur dadurch umkehren, daß wir entweder das Feld oder die Ankerwicklung umpolen. Die Drehrichtung ändert sich nicht, wenn wir einfach die beiden Zuleitungen vertauschen. Wenn wir demnach einem Gleichstrom-Hauptschlußmotor Wechselstrom zuführen, muß derselbe auch damit betriebsfähig sein, weil sich bei der negativen Stromrichtung sowohl die Richtung des Ankerstroms als auch des Feldstroms geändert hat. Allerdings wird das entwickelte Drehmoment stets zwischen einem Höchstwert und Null wechseln, also im Mittel kleiner sein, als bei Betrieb mit Gleichstrom, aber dieser Nachteil muß schließlich bei allen Wechselstrommotoren in Kauf genommen werden. Wir werden

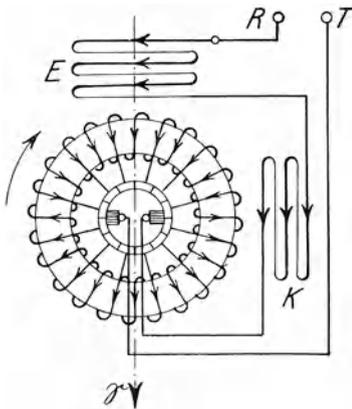


Abb. 294.

Wechselstrom-Hauptschlußmotor.

jedoch finden, daß ein normaler Gleichstrommotor nicht recht für Wechselstrombetrieb geeignet ist. Vor allem muß das Magnetgestell, welches doch jetzt einen wechselnden Kraftfluß führt, geblättert

werden, auch ist es ratsam, zur gleichmäßigeren Verteilung des Feldes und zur Verminderung der Streuung keine ausgeprägten Magnetpole zu verwenden, sondern, wie bei den Asynchronmotoren, die Wicklung gleichmäßig verteilt in die Nuten eines Ständer-Eisenringes einzubetten. Auch die Kommutation wird bei Wechselstrom sehr viel schlechter sein als bei Gleichstrom. Es hat dies in der Hauptsache in folgendem seinen Grund. In Abb. 294 stellt E die Erregerwicklung dar, die bei dem Hauptschlußmotor mit dem Anker hintereinander geschaltet ist. Es entsteht nun durch den Wechselstrom in der Erregerwicklung ein wechselnder Kraftfluß  $\mathcal{E}$ , welcher den Anker durchsetzt. Dieser Wechselkraftfluß geht auch durch die Ankerspulen, welche sich gerade in der neutralen Zone befinden, und welche durch die Bürsten eben kurzgeschlossen sind. Diese Spulen verhalten sich demnach gerade wie die kurzgeschlossene Spule eines Transformators, und es wird in ihnen durch den Kraftlinienwechsel ein kräftiger Kurzschlußstrom erzeugt, dessen Unterbrechung durch die Bürsten zu Feuererscheinungen führt. Besonders im Anlauf bei ruhendem Anker wird die Gefahr des Feuerns groß sein. Sehr nachteilig macht sich auch das Ankerfeld bemerkbar. Der den Motor durchfließende Strom erzeugt auf seinem Weg durch den Motor zunächst in der Erregerwicklung den Kraftfluß  $\mathcal{E}$  und dann im Anker ein Querfeld, welches für Gleichstrom durch Abb. 132b dargestellt war. Diese starken Kraftflüsse bedingen eine sehr große Selbstinduktionsgegenspannung, wodurch es unmöglich ist, einen großen Strom, wie ihn ein großes Drehmoment erfordert, durch den Motor hindurchzubekommen. Was können wir aber tun, um die Selbstinduktion zu verringern? Wir müssen den Strom hindern, so viel Kraftlinien zu erzeugen. Zwar die in der Spule E erzeugten Kraftlinien  $\mathcal{E}$  brauchen wir zum Betrieb des Motors, nicht aber brauchen wir die Kraftlinien des Ankerfeldes. Um ihre Entstehung zu verhindern beschreiten wir den gleichen Weg, wie auf S. 91. Wir ordnen in Abb. 294 in der Richtung der neutralen Zone, also senkrecht zur Erregerwicklung E eine *Kompensationswicklung* K an, die vom Ankerstrom durchflossen ist und dem Anker genau so viel AW entgegengesetzt, wie dieser hat. Das Ankerfeld kann also jetzt überhaupt nicht entstehen. Es ist jedoch keineswegs unbedingt nötig, daß die Kompensationswicklung mit dem Anker hintereinandergeschaltet wird. Man kann sie auch einfach für sich kurzschließen, wie dies Abb. 295 zeigt. Wenn hier der Ankerstrom in horizontaler Richtung ein Ankerfeld erzeugt, welches natürlich auch die Kompensationswicklung durchsetzt, so wird der Kraftlinienwechsel in dieser eine Spannung und einen Strom erzeugen, wie bei einem sekundär kurzgeschlossenen Transformator. Die Kompensationswicklung erzeugt also so viel Gegen-AW, daß das Ankerfeld bis auf einen kleinen Rest einfach entblasen wird. Die schwierige Kommutation gestattet nun leider

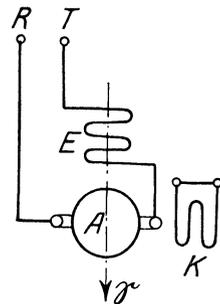


Abb. 295. Wechselstrom-Hauptschlußmotor mit kurzgeschlossener Kompensationswicklung.

Abb. 295 zeigt. Wenn hier der Ankerstrom in horizontaler Richtung ein Ankerfeld erzeugt, welches natürlich auch die Kompensationswicklung durchsetzt, so wird der Kraftlinienwechsel in dieser eine Spannung und einen Strom erzeugen, wie bei einem sekundär kurzgeschlossenen Transformator. Die Kompensationswicklung erzeugt also so viel Gegen-AW, daß das Ankerfeld bis auf einen kleinen Rest einfach entblasen wird. Die schwierige Kommutation gestattet nun leider

nicht, den Anker für eine beliebig hohe Spannung zu wickeln. Wir müssen also die gerade verfügbare Netzspannung auf die Ankerspannung heruntertransformieren. Abb. 296 zeigt diese Schaltung, bei welcher der Transformator T auch benutzt wird, um dem Motor eine veränderliche Spannung zuzuführen, um ihn also anzulassen und zu regeln. Durch die Notwendigkeit dieses Regeltransformators mit zugehörigem Schaltapparat erfährt der Motor eine beträchtliche Verteuerung, welche sehr oft seine Anschaffung verhindert. Die Umkehrung der Drehrichtung geschieht wie bei den Gleichstrommotoren durch Umpolen der Erregerwicklung E oder des Ankers.

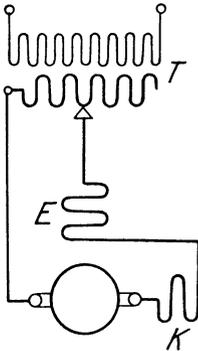


Abb. 296. Hauptschlußmotor mit Regeltransformator.

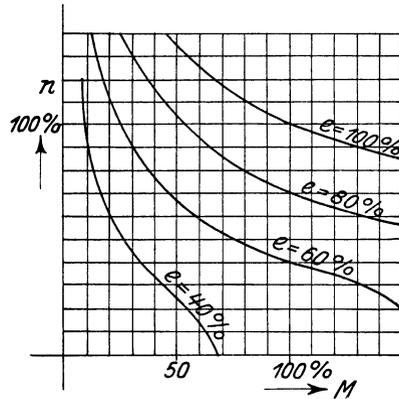


Abb. 297. Die Drehzahl des Wechselstrom-Hauptschlußmotors sinkt stark mit zunehmender Belastung.

Das Verhalten des Wechselstrom-Hauptschlußmotors entspricht ganz demjenigen des Gleichstrom-Hauptschlußmotors. Abb. 297 zeigt die Abhängigkeit der Umlaufzahl vom Drehmoment  $M$  bei verschiedenen, mit dem Regeltransformator konstant gehaltenen Klemmspannungen  $e$ . Im Leerlauf geht der Motor durch. Die Größe des Drehmomentes ist auch bei dem Wechselstrommotor durch das Produkt aus Ankerstrom und Feldstärke gegeben, die ja immer in Phase liegen. Abb. 158 gilt auch hier für den Anstieg des Drehmomentes  $M$ . Dasselbe erreicht nicht die hohen Werte des Gleichstrommotors, weil man längst nicht so große Ströme durch den Motor bekommt.

**b) Der Repulsionsmotor.** Der wesentliche Nachteil des Hauptschlußmotors ist, daß wir wegen der Kommutierungsschwierigkeiten eine geringe Ankerspannung und damit fast immer einen Transformator brauchen. Wir wollen überlegen, ob wir denselben vermeiden können. In Abb. 295 hatten wir mittels des Ankerfeldes in der gegenüberstehenden, kurzgeschlossenen Kompensationswicklung einen Strom erzeugt. Hierbei war die Ankerwicklung als die vom Wechselstrom gespeiste Primärseite, die Kompensationswicklung als die Sekundärseite eines Transformators anzusehen. Jetzt wollen wir die Rollen vertauschen und nach Abb. 298 der früheren Kompensationswicklung den Wechselstrom zuführen. Die Wicklung K ist also jetzt die Primärseite unseres Transformators, während der Anker als Sekundärseite

kurzzuschließen ist. Damit haben wir den Anker vom Netz getrennt und können ihn wickeln wie wir wollen. An der Wirkungsweise hat sich durch diese Vertauschung gar nichts geändert, höchstens das eine, daß der im Anker erzeugte Kurzschlußstrom gegenüber dem Primärstrom in der Spule K um  $180^\circ$  versetzt ist, während bei dem früheren Hauptschlußmotor der gleiche Strom die Erregerwicklung und den Anker durchfloß. Ankerstrom und Feld erreichen also nach wie vor gleichzeitig ihren Höchstwert, so daß das Drehmoment voll wirksam ist. Um die Drehrichtung umzukehren, können wir hier natürlich nicht den Anker umpolen. Vielmehr müssen wir entweder die Erregerwicklung oder die Kompensationswicklung K umkehren, denn durch Umpolen der letzteren kehren wir ja den erzeugten Ankerstrom mit um. Wir gehen jetzt noch einen Schritt weiter und ersetzen die beiden Wicklungen E und K durch eine einzige, die sich in einer Zwischenlage befindet, wie es Abb. 299 zeigt. Wir müssen uns also das von dieser Spule erzeugte Feld in zwei Komponenten zerlegt denken. Die vertikale Komponente ist das frühere Feld  $\mathfrak{E}$ , während die horizontale Komponente den

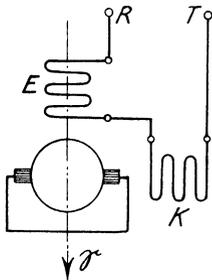


Abb. 298.

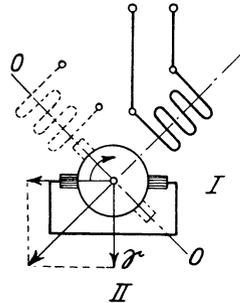


Abb. 299. Repulsionsmotor.

Ankerstrom erzeugt und durch die Gegenamperewindungen des kurzgeschlossenen Ankers aufgehoben wird. Die Drehrichtung des Ankers kann man jetzt ohne weiteres aus dem Schema finden. Der Anker muß nämlich ein Feld zu erzeugen bestrebt sein, welches der horizontalen Komponente entgegenwirkt, woraus sich mit dem Feld  $\mathfrak{E}$  die eingezeichnete Drehrichtung ergibt. Wie können wir nun die Drehrichtung umkehren? In Abb. 298 könnten wir es durch Umpolung der Kompensationswicklung K erreichen. Um in Abb. 299 das Gleiche zu tun, müßte die horizontale Feldkomponente statt nach links, nach rechts gerichtet werden, was man durch eine Verschiebung der Wicklung in die punktierte Lage erreichen könnte. Viel einfacher aber ist es, die Wicklung liegen zu lassen und statt ihrer die Bürsten zu verschieben. Bringen wir dieselben zunächst aus der gezeichneten Lage in die Stellung 0—0, so liegt die Ankerwicklung senkrecht zum Feld der Erregerwicklung, und es entsteht kein Ankerstrom. Der Motor kann also nicht anlaufen. Sobald wir aber die Bürsten über diese Stellung hinaus in die Lage II bringen, liegen sie genau so zur Wicklung, als ob wir diese in die punktierte Lage gebracht hätten. Der Motor läuft demnach in umgekehrter Richtung. Wir können durch eine solche Bürstenverschiebung

aber nicht nur den Motor umsteuern, sondern auch anlassen und in seiner Drehzahl regeln. Ein Anlasser oder ein Anlaßtransformator ist also überflüssig, auch kann die Ständerwicklung ganz unabhängig vom Anker für jede beliebige Spannung gewickelt werden.

Diese außerordentliche Einfachheit und Billigkeit haben diesem Motor, welcher *Repulsionsmotor* genannt wird, zu einer großen Verbreitung verholfen. Es darf nicht etwa angenommen werden, daß die größte Bürstenverschiebung  $90^\circ$  betrage. Wenn wir aus der Stellung 0 um  $90^\circ$  verdrehen, stehen die Bürsten in der Achse der Erregerwicklung. Es wird dann im kurzgeschlossenen Anker zwar ein kräftiger Strom erzeugt (Sekundärseite eines Transformators), aber die Feldkomponente  $\mathfrak{C}$  fehlt, so daß ein Drehmoment nicht auftritt. Der größte Verschiebungswinkel ist deshalb bei dem zweipoligen Motor etwa  $75-80^\circ$ , bei dem vierpoligen Motor die Hälfte davon usw. Eine Abart des Repulsionsmotors ist der sog. *Déri-Motor*, welcher nach Abb. 300 zwei Bürstensätze besitzt. Die Bürsten A—A stehen fest, während die Bürsten B—B verschiebbar sind.

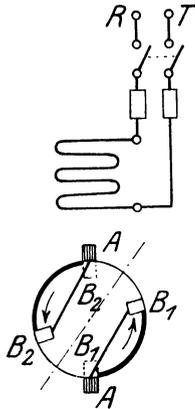


Abb. 300. Repulsionsmotor mit doppeltem Bürstensatz.

In der Nullstellung stehen alle Bürsten, wie punktiert gezeichnet in der Achse der Erregerwicklung. Durch Verdrehen der Bürsten B in der Pfeilrichtung entstehen zwei Ankerabschnitte, die

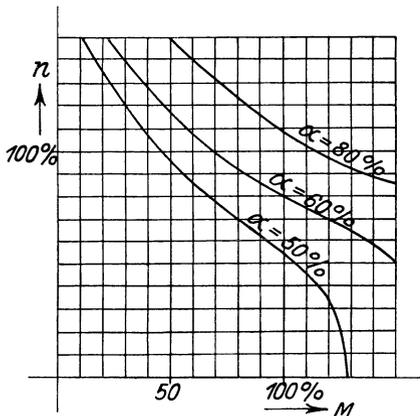


Abb. 301. Umlaufzahl des Repulsionsmotors bei wachsender Last und verschiedenen Bürstenverschiebungswinkeln.

vom Drehmoment bei verschiedenen Bürstenstellungen zeigt Abb. 301, worin der Drehwinkel in Prozenten des Höchstwertes angegeben ist.

e) **Der Reihenschlußmotor mit Läufererregung.** Der Reihenschlußmotor nach Abb. 298 läßt sich weiterhin noch dadurch vereinfachen, daß man das Feld  $\mathfrak{C}$  nicht durch eine besondere Erregerwicklung E,

in Abb. 300 stark ausgezogen sind, und in denen genau wie bei dem gewöhnlichen Repulsionsmotor Ströme erzeugt werden, die ein starkes Drehmoment liefern. Der Déri-Motor unterscheidet sich in Wirkungsweise und Verhalten fast nicht von dem gewöhnlichen Repulsionsmotor. Ein Vorteil ist, daß sich bei dem Déri-Motor die Bürstenverstellung über fast  $180^\circ$  erstreckt, und daß in der Nullstellung in den von den Bürsten kurzgeschlossenen Ankerspulen keine nennenswerte Spannung durch das wechselnde Feld erzeugt werden kann, weil die Bürstenstellung gerade senkrecht zu derjenigen der Abb. 296 und 299 ist.

Die Abhängigkeit der Umlaufzahl

sondern durch den Läufer erzeugt. Zu diesem Zweck hat derselbe in Abb. 302 ein weiteres Bürstenpaar bekommen, welches senkrecht zu dem früheren steht. In diesem Motor mit Ankererregung hat man sich demnach im Läufer zwei Ströme zu denken, welche sich überlagern, einmal den über die kurzgeschlossenen, horizontal gezeichneten Bürsten fließenden Strom, den die Kompensationswicklung K erzeugt, und dann den dem Netz entnommenen Strom, der über die vertikal gezeichneten Bürsten fließt und das Feld  $\ominus$  erregt. Dieser Motor hat mit der in Abb. 303 dargestellten Abänderung unter dem Namen Winter-Eichbergmotor vielfach Anwendung gefunden. In dieser letzteren Schaltung wird der Läufer-Erregerstrom dem Netz über einen Transformator T entnommen, mit welchem der Motor zugleich geregelt werden kann.

Hinsichtlich des Aufbaus bieten die Wechselstrom-Kommutatormotoren nichts Neues. Der Ständer ist genau wie bei den Asynchronmotoren gebaut, und der Anker ist ein normaler Gleichstromanker, bei welchem man allerdings möglichst wenig Windungen für jede Anker-

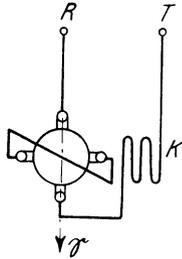


Abb. 302.

Reihenschlußmotor mit Läufererregung.

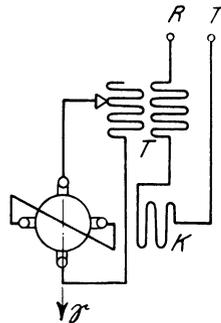


Abb. 303.

Winter-Eichbergmotor.

spule nimmt, wodurch sich eine hohe Kollektorlamellenzahl ergibt. Die Bürsten werden schmal gemacht, damit der Bürstenkurzschluß nicht so lange dauert. Die Verschiebung der Bürsten bei dem Repulsionsmotor geschieht durch einen Handgriff oder ein Handrad.

Trotzdem sich die beschriebenen Kommutatormotoren hinsichtlich ihrer Umlaufzahl alle wie ein Gleichstrom-Hauptschlußmotor verhalten, werden dieselben doch auch für alle möglichen Antriebe benutzt, bei denen konstante Umlaufzahl erwünscht ist, weil sie eine *verlustlose* Regelung der Geschwindigkeit erlauben, und weil das Anlassen und Regeln des Repulsionsmotors so einfach ist. Wenn der letztere bei Antrieben verwandt wird, die eine dauernd konstante Umlaufzahl erfordern, versieht man ihn mit einem Schleuder-Kurzschließer, einem auf der Motorachse angeordneten Schalter, der bei Erreichung einer bestimmten Geschwindigkeit durch Schleuderkraft drei Punkte des Ankers kurzschließt. Dadurch wird der Motor zu einem gewöhnlichen Wechselstrom-Asynchronmotor und zeigt das bekannte Verhalten desselben, also nahezu unveränderte Umlaufzahl bei allen Belastungen. Die Vorzüge des Repulsionsmotors haben denselben sogar in Drehstromnetzen zur Einführung gebracht, wo er einphasig angeschlossen wird. Zu beachten ist jedoch, daß alle

Wechselstrom-Kommutatormotoren einen niedrigeren Wirkungsgrad als die Asynchronmotoren haben, und daß sie natürlich auch teurer und im Betrieb wegen des Kommutators empfindlicher sind. Man wird sie deshalb nur dort verwenden, wo neben großem Anzugsmoment eine häufige Änderung der Umlaufzahl notwendig ist. Bremsung wird durch Gegenstrom, also Umkehr der Drehrichtung erreicht. Dabei besteht die Gefahr, daß sich der Motor wie ein Gleichstromerzeuger selbst erregt. Es müssen deshalb noch Widerstände eingeschaltet werden, die leider auch eine Vernichtung der Bremsenergie zur Folge haben.

**2. Die Drehstrom-Kommutatormotoren. a) Der Drehstrom-Hauptschlußmotor.** Da der gewöhnliche Drehstrommotor nur eine verlustreiche Regelung mittels Läuferwiderständen erlaubt, liegt zuweilen ein Bedürfnis für einen den Wechselstrom-Kommutatormotoren ähnlichen Motor vor. Abb. 304 stellt das Schema eines Drehstrom-Hauptschluß-

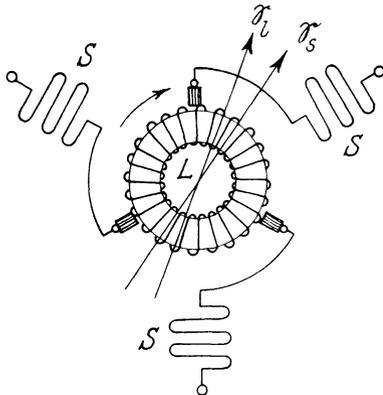


Abb. 304.

Drehstrom-Hauptschlußmotor.

motors dar. Ständer und Läufer sind hintereinandergeschaltet. Die Läuferwicklung ist wieder eine gewöhnliche Gleichstromwicklung, bei welcher, zweipoligen Motor vorausgesetzt, drei um  $120^\circ$  versetzte Bürsten auf dem Kommutator schleifen. Die drei Abschnitte des Ankers sind also in Dreieck geschaltet. Wenn man den feststehenden Bürsten einer solchen Wicklung einen Drehstrom zuführt, entsteht wie in jeder Dreiphasenwicklung ein konstant umlaufendes Drehfeld, wobei es ganz gleichgültig ist, ob sich der Anker dreht oder nicht, weil doch trotz der Drehung die Lage der drei Abschnitte unverändert

bleibt. Eine Veränderung würde erst dann eintreten, wenn man die drei Bürsten verdrehen würde. Es ist dies die gleiche Erscheinung, die wir bei den Gleichstrommaschinen bereits kennen lernten. In Abb. 132 b bleibt nämlich auch das Ankerfeld immer in gleicher Richtung quer, trotzdem sich der Anker dreht. Wir erzeugen also in diesem Drehstrommotor zwei Drehfelder, ein Ständerdrehfeld  $\mathfrak{S}_s$  und ein Läuferdrehfeld  $\mathfrak{S}_l$ , und zwar in gleicher Umlaufrichtung. Durch Verdrehung der drei Bürsten werden jedoch die drei Läuferphasen im Raum verdreht, so daß man dem Läuferdrehfeld eine Verschiebung im Drehsinn oder entgegen erteilen kann. Man kann also nach Belieben die beiden Drehfelder zueinander stellen. Sind beide in gleicher Richtung und gleichem Sinn, so addieren sich Ständer- und Läuferdrehfeld zu einem resultierenden Drehfeld. Haben sie jedoch entgegengesetzten Sinn, so heben sie sich bei gleicher Stärke auf. In den Zwischenlagen bilden beide zusammen ein resultierendes Feld. Die erste der genannten Bürstenstellungen wollen wir die Nullstellung nennen. Bei ihr kann der Motor kein Drehmoment ausüben, weil in diesem Falle die drei Läuferphasen den drei Ständerspulen genau gegen-

überstehen. Es ist dann ebenso wie bei einer Magnetnadel, deren Nordpol nach Norden zeigt, deren Kraftlinien also gleiche Richtung und Sinn mit dem Erdfeld haben. Auf diese Nadel wirkt kein Drehmoment, sie ist in Ruhe. Stellen wir die Nadel genau entgegengesetzt, so daß der Nordpol nach Süden zeigt, so läßt sich durch ganz genaue Einstellung auch erreichen, daß kein Drehmoment auf die Nadel wirkt. Wenn wir bei unserem Motor die Bürsten um  $180^\circ$  (zweipoliger Motor) verdrehen, wirkt das Läuferdrehfeld auch dem Ständerdrehfeld entgegen, und es ist kein Drehmoment vorhanden. Da sich aber die beiden Felder zum großen Teil aufheben, sind außer den Streukraftlinien keine Kraftlinien mit dem Stromkreis verkettet. Es treten deshalb auch keine Gegenspannungen auf, und infolgedessen wird in dieser Kurzschlußstellung ein großer Strom den Motor durchfließen. Ebenso wie auf eine Magnetnadel in den Zwischenstellungen, in welchen sie einen Winkel mit der Nord-Südrichtung einschließt, ein kräftiges Drehmoment wirkt, ebenso zeigt auch unser Motor ein kräftiges Drehmoment, wenn das Läuferdrehfeld um einen Winkel kleiner als  $180^\circ$  gegen das Ständerfeld verdreht wird, und zwar sucht das Drehmoment die beiden Drehfelder gleichzurichten. In ähnlicher Weise wie sich der *Dér*motor von dem gewöhnlichen Repulsionsmotor durch einen doppelten Bürstensenatz, von denen der eine feststand, unterschied, können wir auch den Drehstrommotor mit doppeltem Bürstensenatz ausrüsten und erhalten dadurch einen in mancher Hinsicht besser arbeitenden Motor. Das Verhalten des Drehstrom-Hauptschlußmotors entspricht ganz demjenigen der Wechselstrom-Hauptschlußmotoren. Die Abhängigkeit der Drehzahl von dem Drehmoment bei verschiedenen Bürstenverschiebungswinkeln stimmt mit derjenigen in Abb. 301 überein.

Wie können wir nun die Drehrichtung umkehren? Durch Vertauschung der Läuferphasen gegenüber den Ständerphasen geht es nicht, denn dann würde ja das Drehfeld des Läufers seine Richtung umkehren, und umgekehrt wie das Ständerfeld laufen. Wir müssen vielmehr beide Felder umkehren, was wir erreichen, wenn wir zwei Zuleitungen, wie bei dem gewöhnlichen Drehstrommotor, vertauschen. Der Läufer läuft immer im Drehfeldsinn, wie bei dem Asynchronmotor. Er kann aber auch synchron mit ihm laufen, so daß keine Spannung in demselben erzeugt wird, ja, es ist sogar möglich, daß der Anker treibend übersynchron läuft. Dabei steigt der Leistungsfaktor und kann sogar den Wert eins erreichen. Auch der Drehstrom-Hauptschlußmotor kann wegen der Kommutierung nur für geringe Spannungen gewickelt werden und erfordert deshalb normalerweise einen Transformator.

Wie alle Motoren mit einem Geschwindigkeitsverlauf nach Art des Hauptschlußmotors steigert auch dieser Motor bei schwacher Belastung seine Drehzahl zu außerordentlicher Höhe. Eine Bremsung bei schnellerem Antrieb ist also nicht möglich. Wohl aber können wir ein Bremsmoment dadurch ausüben, daß wir die Bürsten im entgegengesetzten Sinne verschieben. Der Motor bleibt dabei in normaler Schaltung am Netz und vermag einen Teil der Bremsenergie in das Netz zurück-

zuliefern. Um zu vermeiden, daß der Motor sich dabei wie eine Gleichstromdynamo selbst erregt, schaltet man noch kleine Widerstände ein.

b) **Der Drehstrom-Nebenschlußmotor.** Um teure Schaltapparate und Transformatoren zu vermeiden, werden bei diesem Motor die Rollen des Ständers und Läufers vertauscht. Nach Abb. 305 führen wir also jetzt dem Läufer den Drehstrom mittels dreier Schleifringe zu. Der-

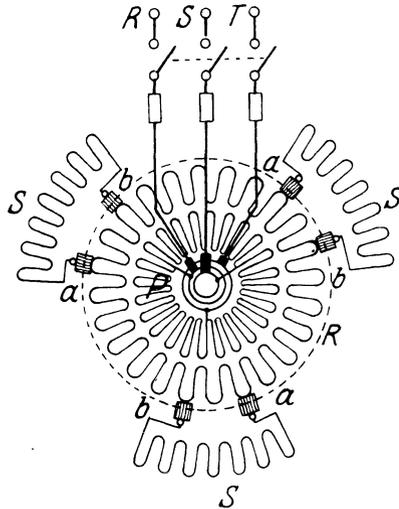


Abb. 305. Drehstrom-Nebenschlußmotor.

selbe erzeugt wie sonst der Ständer ein Drehfeld, welches bei synchronem Lauf des Läufers gerade im Raum stillsteht. Dieses Drehfeld wirkt wie bei jedem gewöhnlichen Drehstrommotor auf die hier feststehende Ständerwicklung S, und wenn wir einmal annehmen, daß die Bürsten a und b zusammengerückt seien, haben wir es mit einem normalen Drehstrom-Kurzschlußmotor zu tun, dessen Drehzahl bei allen Belastungen, selbst bei negativen Momenten nahezu die gleiche ist. Bei dem normalen Drehstrommotor konnten wir nun die Umlaufzahl dadurch beliebig vermindern, daß wir Widerstände in den Sekundärteil einschalteten, wodurch also an den Läufer-

schleifringen eine um so größere Spannung entstand, je mehr die Drehzahl vermindert wurde. Wir wollen nun hier bei unserem Motor diese Spannung nicht durch Einschaltung von Energie verzehrenden Widerständen an der Sekundärwicklung S erzeugen, sondern wir wollen die Spannung von einem Transformator abnehmen. Diesen bauen wir aber in den Motor ein, in der Weise, daß wir auf den Läufer noch außer der Primärwicklung P eine sekundäre Reglerwicklung R bringen und sie wie eine Gleichstromwicklung mit dem Kommutator verbinden. Mit Hilfe der Bürsten a und b können wir nun von dieser Transformator-

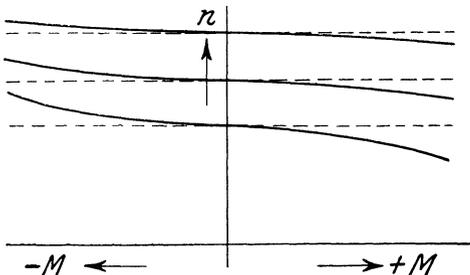


Abb. 306. Drehzahl des Drehstrom-Nebenschlußmotors bei wachsender Last und verschiedenen Bürstenstellungen.

Sekundärwicklung R beliebige Spannungen abnehmen und der Wicklung S zuführen. Je weiter wir also die Bürsten a und b auseinanderücken, um so größer ist die zugeführte Spannung und um so langsamer läuft der Motor. Jeder Bürstenstellung entspricht eine bestimmte Spannung und damit eine konstante Drehzahl. Abb. 306 zeigt den

Verlauf der Geschwindigkeit in Abhängigkeit von dem Drehmoment. Die Umkehr der Drehrichtung erfolgt wie bei dem normalen Drehstrommotor. Auch hinsichtlich der Bremsung verhält er sich genau wie jener, mit dem einen Unterschied, daß auch bei untersynchronen Umlaufzahlen eine Bremsung möglich ist.

Der Wirkungsgrad der Drehstrom-Kommutatormotoren ist infolge der besseren Ausnutzung besser als derjenige der Einphasen-Kommutatormotoren, jedoch etwas niedriger als der Wirkungsgrad der Drehstrom-Asynchronmotoren. Da sie noch wesentlich teurer sind, beschränkt sich ihre Anwendung auf die Fälle, bei denen eine verlustlose Regelung dringendes Erfordernis ist.

## VIII. Die Erzeugungsstätten der elektrischen Energie.

### A. Der Antrieb.

Die Antriebsmaschinen eines elektrischen Kraftwerkes können Dampfmaschinen, Verbrennungskraftmaschinen und Wasserkraftmaschinen sein. Welche davon in Frage kommen, hängt natürlich ganz von den örtlichen Verhältnissen ab, und eine vergleichende Kostenberechnung hat sehr oft erst zu entscheiden, welcher Antrieb der zweckmäßigere ist. In der Nähe von Steinkohlen- oder Braunkohlengebieten, bei den meisten städtischen Zentralen, sowie bei Werken, welche größere Mengen Dampf zu anderen Zwecken brauchen, ist der Dampfmaschinenantrieb der vorteilhaftere. Bei demselben ist jedoch die Kolbenmaschine fast vollständig durch die weniger Raum beanspruchende und leichter anzuwärmende Dampfturbine verdrängt. Bei kleineren Zentralen sind Lokomobilen wegen ihrer Billigkeit und Wirtschaftlichkeit beliebt. Verbrennungskraftmaschinen kommen als Großgasmaschinen sowie als Dieselmotoren zur Anwendung. Besonders die letzteren zeichnen sich durch hohen Wirkungsgrad aus. Wasserkraft sollte überall, wo nur eine einigermaßen ausbauwürdige Gefällhöhe vorhanden ist, zur Energiegewinnung herangezogen werden, weil sie allein unerschöpfliche Energiequellen sind. Im allgemeinen sind die Anlagekosten der Wasserkraft, insbesondere bei niedrigen Gefällhöhen so groß, daß die Erzeugungskosten nicht viel geringer sind, als diejenigen von Dampfkraftwerken.

Der Wirkungsgrad eines Dampfkraftwerkes wird in erster Linie durch den Wirkungsgrad der Dampfmaschine bestimmt. Große Dampfturbinen können einen Wirkungsgrad von 20% bei Vollast haben. Derjenige des ganzen Kraftwerkes, einschließlich Kesseln und elektrischer Maschinen wird also 15–16% betragen. Nun wird aber die Anlage sehr oft mit Unterbelastung und mit schlechterem Wirkungsgrad arbeiten, so daß im Durchschnitt ein Dampfkraftwerk nicht mehr als 11% der in der Kohle enthaltenen Wärmeenergie in elektrische Energie umsetzt. Bei Dieselmotoren und manchen Großgasmaschinen wird ein Wirkungsgrad von etwa 30% erreicht. Der durchschnittliche Jahreswirkungsgrad eines solchen Werkes beträgt indessen kaum mehr als 22%.

## B. Die Wahl der Spannung.

Um 1000 kW bei einer Spannung von 500 V übertragen zu können, brauchen wir einen Leiter für  $1000000 : 500 = 2000$  A. Um die gleiche Leistung bei einer Spannung von 10000 V zu übertragen, braucht man nur einen sehr viel schwächeren Leiter für  $1000000 : 10000 = 100$  A. Wir können also um so mehr Leitungsmaterial sparen, je höher wir die Spannung wählen. Eine Grenze ist nur durch die Schwierigkeiten gezogen, welche die Isolation bei sehr hohen Spannungen bietet, und durch die sehr viel höheren Kosten der Schaltapparate bei hohen Spannungen. Fernerhin tritt bei Spannungen über 100000 V noch ein Leistungsverlust durch Ausstrahlung der Leitungen hinzu.

Bei *Gleichstrom* sind hinsichtlich der Wahl der Spannung sehr enge Grenzen gezogen. Da derselbe nicht transformierbar ist, stimmen

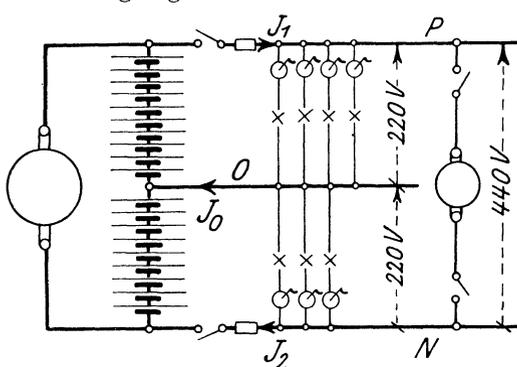


Abb. 307. Dreileiternetz.

Maschinenspannung und Verbrauchsspannung überein. Die Verbrauchsspannung kann aber mit Rücksicht auf die Glühlampen nicht höher als 250 V sein, und wir werden finden, daß bei dieser niedrigen Spannung die Verteilungsleitungen schon bei einer Netzausdehnung von 1 km unverhältnismäßig stark und teuer sein müssen, wenn man nicht sehr große und störende Spannungsverluste in den Leitungen zulassen will. Eine Verbesserung läßt sich in der Weise erreichen, daß man immer zwei Lampen hintereinander schaltet. Dann kann man die Maschinenspannung auf  $2 \cdot 250 = 500$  V bringen. Damit man aber trotzdem die Lampen unabhängig voneinander ein- und ausschalten kann, muß man die Schaltung nach Abb. 307 wählen. Bei diesem *Dreileiternetz* ist der Maschine meist eine Batterie parallel geschaltet, durch welche die Maschinenspannung in zwei Hälften geteilt wird. Der mittlere Leiter wird der Mittel- oder *Nulleiter* genannt. In demselben würde kein Strom fließen, wenn in beiden Netzhälften gleich viel und gleich starke Lampen eingeschaltet wären. Ist dies nicht der Fall, so fließt im Nulleiter ein Strom  $I_0 = I_1 - I_2$ . Da man bestrebt ist, die Verbraucher gleichmäßig auf die Netzhälften zu verteilen, wird im Nulleiter nie ein großer Strom fließen, so daß derselbe schwächer als die Außenleiter, etwa halb so stark, ausgeführt werden kann. Motoren wird man immer an die volle Spannung der Außenleiter legen.

Bei *Wechsel-* und *Drehstrom* gibt es keine derartigen Beschränkungen in der Spannungswahl. Nicht nur, daß wir bereits mit den Stromerzeugern, die ja keinen Kommutator haben, jede beliebige Spannung erzeugen können sind wir auch in der Lage, dieselbe mittels Transfor-

motoren beliebig hinauf oder für den Verbraucher beliebig herunter zu transformieren. Infolgedessen ist Wechsel- und Drehstrom in allen Netzen von einiger Ausdehnung die einzig mögliche Stromart. Insbesondere der Drehstrom ist im Laufe der Zeit bei allen größeren Kraftwerken zur Einführung gekommen. Es liegt dies einmal daran, daß es lange Zeit keinen brauchbaren Motor für Wechselstrom gab, während Drehstrommotoren durch Einfachheit und Billigkeit bekannt waren, dann bietet aber auch die Übertragung der Energie bei Drehstrom trotz der drei Leiter Vorteile. Um dies einzusehen, wollen wir einmal annehmen es sei ein Wechselstrommotor für 1000 kW Leistung und 5000 V mit einem Leistungsfaktor  $\cos \varphi = 0,9$  und einem Wirkungsgrad  $\eta = 0,95$  angeschlossen und das andere Mal ein Drehstrommotor mit gleichen Werten. Bei dem Wechselstrommotor ist der Strom:

$$I = \frac{1000000}{5000 \cdot 0,9 \cdot 0,95} = 234 \text{ A.}$$

Bei dem Drehstrommotor ist die Phasenspannung  $5000 : \sqrt{3} = 2890 \text{ V}$ . Also der Strom:

$$I = \frac{1000000}{3 \cdot 2890 \cdot 0,9 \cdot 0,95} = 135 \text{ A.}$$

Bei Wechselstrom haben wir also zwei Leiter mit je 234 A, also 468 A zu leiten, während wir bei Drehstrom drei Leiter zu 135 A, also zusammen nur 405 A zu leiten haben.

Die Höhe der Zentralenspannung richtet sich ganz nach der Netzausdehnung. Das Hochspannungsnetz, welches heute bereits einen großen Teil Deutschlands überspannt, hat eine Spannung von 100000 V. Werkszentralen reichen meistens mit 3000—5000 V aus. Natürlich besitzt nur das Hochspannungsverteilungsnetz diese hohe Spannung. An den einzelnen Verbrauchsstellen wird die Spannung auf einen geeigneten Wert herabtransformiert.

### C. Die Maschinengröße.

Die in einem Kraftwerk aufgestellte Maschinenleistung kann nicht einfach gleich der Summe der Leistungen aller angeschlossenen Verbraucher gemacht werden, weil die Maschinen dann viel zu groß werden würden, wodurch einerseits die Anlagekosten erhöht und andererseits die unterbelasteten Maschinen mit schlechtem Wirkungsgrad arbeiten würden. Wir müssen nämlich bedenken, daß die angeschlossenen Lampen und Motoren lange nicht alle gleichzeitig eingeschaltet sind. Bei Lichtkraftwerken hat man beispielsweise die Erfahrung gemacht, daß von den installierten Lampen höchstens einmal die Hälfte zur Abendzeit im Winter gleichzeitig brennt. Dies ist bei der Bemessung der Maschinenleistung zu berücksichtigen. Alle Kraftwerke mit starkem Lichtbetrieb zeigen in den Abendstunden eine starke Belastungsspitze, während den ganzen Tag über die Inanspruchnahme sehr gering ist. Um mit möglichst kleinen und billigen Maschinen auszukommen, nimmt man in Gleichstromanlagen gern eine Akkumulatorenbatterie zur Hilfe, welche zur Abendzeit mit der Betriebsmaschine gemeinsam die hohe Belastung

übernimmt und während des schwachen Betriebes am Tage von der Maschine aufgeladen wird. Man kann so erreichen, daß die Maschine den ganzen Tag über nahezu voll belastet und mit hohem Wirkungsgrad läuft. Den sehr schwachen Spätnachtbetrieb übernimmt die Batterie. Bei der Bemessung der Maschineneinheiten ist zu bedenken, daß große Maschinen einen höheren Wirkungsgrad haben als kleine, daß es also ratsam ist, statt mehrerer kleinen Maschinen eine große aufzustellen. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, daß jede Anlage eine gewisse Reserve benötigt, die bei Ausbesserungen in Betrieb genommen werden kann. Kleine Anlagen haben oft eine volle Reserve, d. h. die Reservemaschine hat die gleiche Leistung wie die Hauptmaschine, was wegen der Gleichheit der Reserveteile wertvoll ist. Größere Werke würden mit so hoher Reserve zu teuer werden, man findet bei ihnen eine Reserve von 20% ausreichend.

Für die Beurteilung der Ausnutzung eines Kraftwerkes dient der

$$\text{Ausnutzungsfaktor} = \frac{\text{jährlich abgegebene kWh}}{\text{höchstmögliche jährliche Abgabe in kWh}}$$

Derselbe beträgt bei Anschluß von Lichtnetzen 10–20%. Ferner bedient man sich auch des Verschiedenheitsfaktors

$$= \frac{\text{Summe der Einzelhöchstbelastungen der Verbraucher in kW}}{\text{Höchstleistung des Kraftwerkes in kW}}$$

Derselbe ist bei Lichtkraftwerken etwa 1,1–2.

## D. Das Parallelschalten von Stromerzeugern.

**1. Bei Gleichstrom.** Da in jedem Elektrizitätswerk mehrere Maschinen zur Aufstellung gelangen, wird es täglich vorkommen, daß zu einer im Betriebe befindlichen Maschine eine zweite Maschine parallel geschaltet werden muß, weil die eine Maschine allein die Belastung nicht mehr bewältigen kann. Den Vorgang des Parallelschaltens wollen wir im folgenden betrachten. Dabei beschränken wir uns bei Gleichstrom auf Nebenschlußmaschinen, weil Hauptstrommaschinen wegen der auf S. 100 genannten Eigenschaften nicht für Zentralen in Frage kommen und Doppelschlußmaschinen genau wie Nebenschlußmaschinen parallel geschaltet werden. Abb. 308 zeigt das Schaltungsschema einer Dreileiterzentrale, welche mit zwei Nebenschlußmaschinen  $M_1$  und  $M_2$  ausgerüstet ist. S sind Abschmelzsicherungen, MS Nullstromausschalter, welche selbsttätig abschalten, sobald der durchfließende Strom auf einen gewissen Mindestwert gesunken ist. Wir wollen annehmen, daß Maschine 1 im Betriebe sei, und daß Maschine 2 neu hinzugeschaltet werden soll. Zu diesem Zweck treiben wir dieselbe zunächst durch die Antriebsmaschine an, bis die normale Drehzahl erreicht ist. Alsdann legen wir den Schalthebel  $S_2$  ein und erregen die Maschine mittels des Magnetreglers  $R_2$  so weit, daß der Spannungsmesser dieser Maschine genau den gleichen Wert wie derjenige der ersten Maschine zeigt. Jetzt erst legen wir den Hebel  $MS_2$  ein, wodurch die Maschine parallel geschaltet ist. Hätten wir ohne die richtige Spannung zu haben oder gar ohne Erregung eingeschaltet, so hätten wir einen Kurzschluß gemacht, weil wir die volle Spannung zwischen den Sammelschienen P und N auf den

sehr kleinen Ankerwiderstand der zweiten Maschine geschaltet hätten. — Die Maschine 2 ist jetzt zwar parallel geschaltet, sie gibt aber noch keinen Strom ab, weil sie schwächer erregt ist als Maschine 1. Denn wir hatten so erregt, daß die belastete Maschine 1 die gleiche Spannung wie die leerlaufende Maschine 2 erzeugte. Um letztere zu belasten, müssen wir ihre Erregung verstärken, bis die Belastung gleichmäßig verteilt ist. Hierdurch wird allerdings Maschine 1 entlastet, so daß infolge der geringeren

Spannungsabfälle ihre Spannung steigt, und wir sind gezwungen, mit ihrer Erregung etwas zurückzugehen, damit die Sammelschienenspannung konstant bleibt.

Würde nun im Betrieb eine der Maschinen eine nicht hinreichende Spannung liefern, so würde die andere Maschine einen Rückstrom durch dieselbe treiben, wodurch aus dem Erzeuger ein Motor würde. Dann würde also die Antriebsmaschine von der elektrischen Maschine angetrieben. Dies verhindert der Nullstromausschalter MS. Sobald der Strom nur abnimmt, schaltet er die betreffende Maschine ab.

Abb. 308 zeigt ferner die übrige Schaltung. Mit Hilfe der Zellschalter E und L (s. S. 27) können Zellen der Batterie zu- und abgeschaltet werden. Die Entladehebel E dienen zur Einstellung der Verbrauchsspannung an den Sammelschienen, während die Ladehebel L zur Einstellung der Ladespannung dienen. ZM ist eine Zusatz-Lademaschine, welche die zusätzliche Spannung liefert, die man beim Laden braucht. Mittels Umschalters U kann man entweder beide Batteriehälften I und II in Hintereinanderschaltung aufladen (wie gezeichnet) oder jede Hälfte für sich allein. Natürlich darf die Zusatzmaschine, die von einem besonderen Motor angetrieben wird, erst dann eingeschaltet werden, wenn ihr Spannungsmesser in den beiden punktiert gezeichneten Stellungen gleiche Spannung zeigt.

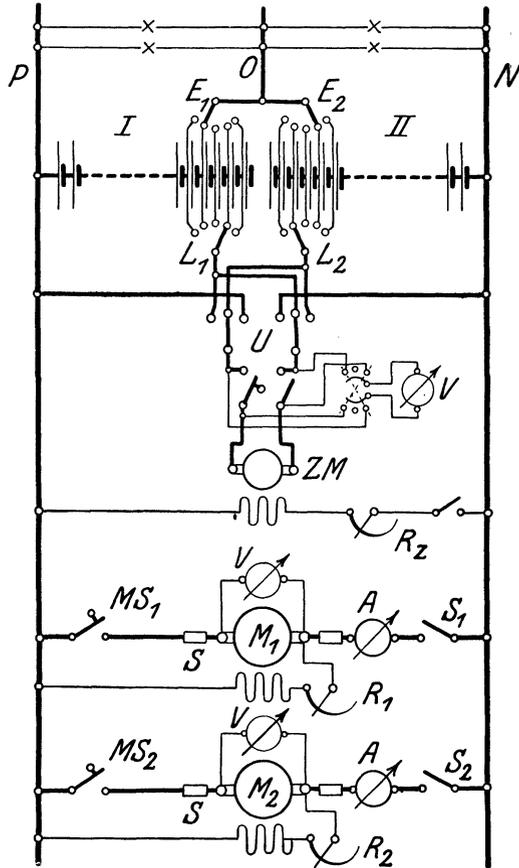


Abb. 308. Schaltung zweier Nebenschlußerzeuger mit Batterie und Lademaschine.

**2. Bei Wechselstrom.** Um zu einer im Betriebe befindlichen Wechselstrommaschine eine zweite zur Unterstützung parallel zu schalten, verfährt man zunächst genau wie bei Gleichstrommaschinen. Nach Abb. 309

treibt man zuerst die zuzuschaltende Maschine II mit normaler Drehzahl an und erregt, bis ihr Spannungsmesser den gleichen Wert, wie derjenige der Maschine I zeigt. Nun dürfen wir aber unter keinen Umständen einfach den Schalthebel einlegen, weil wir bei Wechselstrom doch notwendig gleiche Wellenzahl brauchen, um parallel schalten zu dürfen.

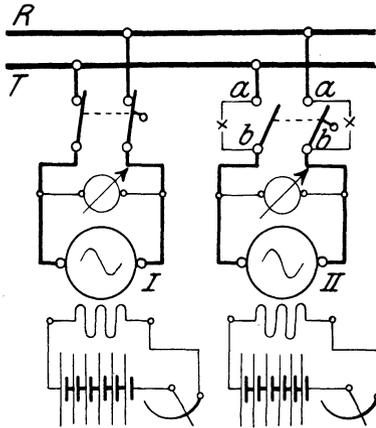


Abb. 309. Parallelschaltung zweier Wechselstromerzeuger.

Es genügt keineswegs, daß wir mit einem Umlaufzähler etwa die richtige Drehzahl der Maschine II festgestellt haben, denn schon die geringste Abweichung davon bringt die größten Phasenverschiebungen zwischen den Spannungen der beiden Maschinen hervor, wie wir gleich sehen werden, und es entsteht dadurch zwischen den Schalterpunkten a und b eine Spannungsdifferenz, die bei gefahrlosem Schalten nicht vorhanden sein darf. Um eine Spannungsdifferenz zwischen a und b anzuzeigen, können wir entweder Spannungsmesser benutzen oder viel einfacher sog. *Phasenlampen*.

Was zeigen nun diese Lampen? In Abb. 310 sind die von beiden Maschinen erzeugten, in ihrer Größe übereinstimmenden Spannungen aufgezeichnet. Maschine II laufe jedoch etwas langsamer, so daß eine geringe Differenz in der Periodenzahl vorhanden ist. Anfangs decken sich die Spannungswellen noch

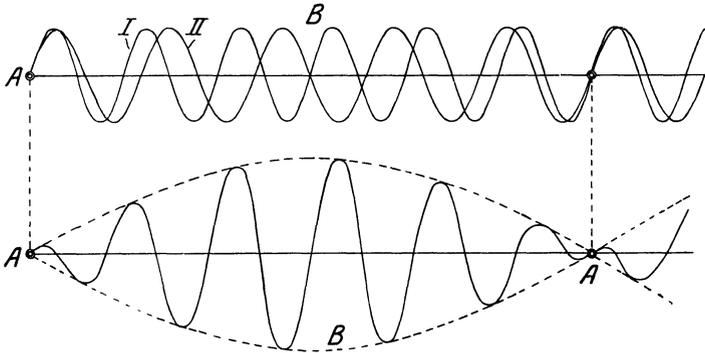


Abb. 310. Spannungsdifferenz zwischen zwei gleichen Wechselspannungen, deren Wellenzahl etwas verschieden ist.

ziemlich, aber schon nach wenigen Wellen sind sie weit auseinandergekommen und liegen an der Stelle B nahezu entgegengesetzt. Später kommen sie dann wieder zusammen. Die Spannungsdifferenz zwischen den Schalterpunkten a und b, an welcher die Phasenlampe liegt, ist nun weiter nichts als die Differenz zwischen den beiden Maschinenspannungen der Abb. 310. In der unteren Abbildung ist diese Differenz

gebildet, und wir sehen deutlich, daß an der Lampe Schwebungen auftreten, daß an den Stellen A, wo sich die Spannungswellen decken, keine Spannung an den Lampen herrscht, an den Stellen B hingegen die doppelte Spannung. Die Lampen werden also wechselnd aufleuchten und verlöschen. An diesem Aufleuchten und Verlöschen erkennen wir, daß die Wellen der beiden Maschinen noch nicht übereinstimmen, und wir haben die Antriebsmaschine deshalb entsprechend zu regeln. Durch einen schnelleren Lauf der Maschine II wird deren Welle kürzer, so daß die beiden Spannungswellen sich jetzt schon viel besser decken. Es leuchtet ein, daß es nun wesentlich länger dauern wird, bis infolge der sehr geringen Wellendifferenz die Spannungen so weit auseinandergekommen sind, daß die Lampen aufleuchten. Das Aufleuchten und Verlöschen geht also nun in langsamerem Wechsel vor sich. Bei völliger Übereinstimmung der Wellen hört das Flackern der Lampen schließlich ganz auf. Das ist für uns das Kennzeichen, daß die Wellenzahlen beider Maschinen übereinstimmen. Wir dürfen aber jetzt den Hebelschalter immer noch nicht einlegen, denn es besteht ja die Möglichkeit, daß trotz gleicher Spannung und Wellenzahl die Spannungswellen ungleich zueinander liegen, etwa nach Abb. 311. Ein

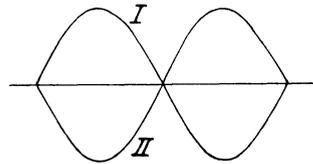


Abb. 311.

Ein Einschalten in diesem Augenblick würde einen Kurzschluß mit doppelter Spannung bedeuten. Aber auch hier helfen uns die Phasenlampen. Liegen die Spannungen nach Abb. 311 zueinander, so herrscht ja an den Lampen dauernd die volle Spannung, während bei richtiger Lage der Spannungen gar keine Spannung vorhanden sein dürfte. Ehe wir also den Schalthebel einlegen, haben wir erstens so lange die Antriebsmaschine zu regeln, bis das Flackern der Lampen aufhört, und dann noch, bis die Lampen dauernd dunkel bleiben. Es wird allerdings sehr schwer sein, dies für längere Zeit zu erreichen, es genügt aber auch, wenn die Lampen mehrere Sekunden hindurch dunkel bleiben. In diesem Augenblick ist dann einzuschalten. Vielfach findet man auch die sog. *Hellschaltung* der Lampen, bei welcher die Lampen zwischen Punkt a des einen und Punkt b des anderen Schalthebels liegen. Hierbei würde der Einschaltaugenblick dann gekommen sein, wenn, nach Aufhören des Flackerns, die Lampen dauernd hell brennen. Man muß sich also genau unterrichten, welche Schaltung man vor sich hat. Durch das Einlegen des Hebels ist die Maschine zwar parallel geschaltet, aber noch nicht belastet. Während wir dies bei Gleichstrom durch stärkere Erregung erreichen konnten, wird unsere Wechselstrommaschine nach S. 173 bei stärkerer Erregung lediglich einen wattlos voreilenden Strom abgeben. Ihr Wattmeter wird nach wie vor Null zeigen. Zur Teilnahme an der Belastung können wir die Maschine (S. 154) nur zwingen, wenn wir ihr einen Antrieb zum schnelleren Lauf geben, wenn wir also den Regulator der Antriebsmaschine verstellen. Diese Verstellung kann man gewöhnlich mittels kleinen Motors, der von der Schalttafel aus eingeschaltet wird, vornehmen.

**3. Bei Drehstrom.** Wenn wir nach Abb. 312 die Phasenlampen schalten, ist das Parallelschalten, genau wie früher, bei dauerndem Verlöschen der Lampen vorzunehmen. Meist wird aber nach Abb. 313 geschaltet. In diesem Falle ist der Einschalt Augenblick gekommen, wenn die erste Lampe verlöscht und die beiden anderen hell brennen. Bei dieser Lampenschaltung geht das Aufleuchten und Verlöschen der drei Lampen nacheinander vor sich, und zwar in bestimmter Reihenfolge, wenn die Maschine langsamer läuft, und umgekehrt, wenn sie voreilt.

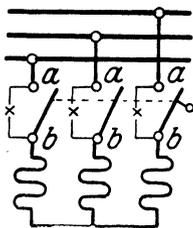


Abb. 312.

Bei höheren Spannungen kann man die Lampen nicht mehr direkt anschließen. Man benutzt dann Spannungswandler, wie wir sie auf S. 171 für Spannungsmesser kennen gelernt haben.

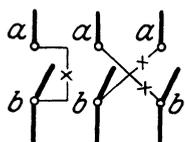


Abb. 313.

Wenn wir nur eine einzige Maschine in der Zentrale haben, ist die Inbetriebnahme natürlich viel einfacher. Wir haben mittels der Erregung nur die vorgeschriebene Spannung einzustellen und einzuschalten. Die Maschine muß dann schon ohne unser Zutun die ganze Belastung übernehmen, welche in dem Netz gefordert wird. Eine Änderung

der Erregung würde in diesem Falle lediglich die Zentralenspannung ändern, eine Verstärkung des Antriebs würde die Wellenzahl erhöhen. Die Belastung hingegen kann nicht geändert werden, sie wird von den Verbrauchern bestimmt.

## E. Die Schaltanlage.

Wie wir schon aus den Abb. 308 und 309 gesehen haben, arbeiten alle Erzeuger eines Kraftwerkes auf ein gemeinsames Sammelschienensystem. Alle Maschinen sind einzeln abschaltbar. Hochspannungsmaschinen können außerdem noch durch *Trennschalter* (s. Abb. 340) von den Sammelschienen abgetrennt werden, damit man ohne jede Gefahr Reparaturen an den Maschinen vornehmen kann. Von den Sammelschienen zweigen nun die Leitungen nach den Speisepunkten des Netzes und zu den größeren Verbrauchern ab. Diese Leitungen sind auch alle abschaltbar, bei höheren Spannungen auch noch durch Trennmesser. Die Schalter sind bei Niederspannung fast immer einfache Hebel-schalter, welche auf einer gemeinsamen Schalttafel im Maschinenhaus angebracht werden können. Bei Hochspannung von mehreren tausend Volt kann man nur Ölschalter verwenden, auch beanspruchen die Sammelschienen und sonstigen Apparate so viel Raum, daß ein besonderes Schalthaus nötig ist. Die Betätigung der Schalter erfolgt allerdings meistens von einer Tafel im Maschinenhaus oder von einem besonderen Betätigungsraum aus. Die Schalter müssen in diesem Falle natürlich mittels Zugmagneten oder kleiner Motoren eingeschaltet werden.

## F. Der Verkauf der elektrischen Energie.

Der Verkaufspreis der elektrischen Energie richtet sich nach den Erzeugungskosten. Diese setzen sich aus den festen Unkosten, wie Verzinsung und Tilgung des Anlagekapitals, Steuern, Löhne und Versicherungen und den veränderlichen Kosten, wie Betriebsstoffe (Kohlen), Öl und Hilfsmaterialien zusammen. Die festen Kosten bleiben immer die gleichen, einerlei, ob das Werk viel Energie oder gar keine liefert. Die veränderlichen Kosten hingegen sind der erzeugten Energie ungefähr proportional. Da nun die festen Kosten einen erheblichen Teil der Gesamterzeugungskosten ausmachen, bei Wasserkraftwerken sogar fast die alleinigen Kosten sind, muß es das Bestreben eines jeden Elektrizitätswerkes sein, möglichst viel Energie zu liefern, damit sich die festen Kosten auf möglichst viel kWh verteilen. Billige Energie kann demnach nur von Werken mit gutem Ausnutzungsfaktor geliefert werden. Zur Beurteilung der einzelnen Verbraucher bedienen sich die Elektrizitätswerke des Begriffs der sog. Benutzungsdauer, worunter man versteht:

$$\text{Benutzungsdauer} = \frac{\text{jährlich bezogene kWh}}{\text{Anschlußwert in kW}}$$

Als Anschlußwert bezeichnet man die Summe der Normalleistungen aller angeschlossenen Motoren und Apparate. Die elektrochemische Industrie, welche Tag und Nacht ziemlich gleichmäßig Energie verbraucht, ist ein gern gesehener Abnehmer, weil sie eine Benutzungsdauer von 6000—7000 Stunden erreicht. Da das Jahr nur 8760 Stunden hat, ist die Belastung eine ziemlich gleichmäßige. Schon weit weniger günstig sind Straßenbahnbetriebe, welche eine Benutzungsdauer von etwa 1700—2000 Stunden erreichen. Lichtnetze mit Bahnbetrieb haben nur eine Benutzungsdauer von etwa 1500 Stunden und normale Lichtnetze je nach der Zahl der Motoranschlüsse noch weniger. Als Anreiz zur höheren Benutzungsdauer bieten die Elektrizitätswerke ihren Abnehmern Vorteile. Der bekannteste derselben ist, daß Kraftstrom zu einem erheblich billigeren Preis geliefert wird, als Lichtstrom, weil der Motorbetrieb fast immer in die Tageszeit fällt, in welcher das Werk schlecht ausgenutzt ist. Man könnte sich auf den Standpunkt stellen, daß es genüge, wenn die Kosten dieses Kraftstromes lediglich die veränderlichen Betriebskosten deckten. Weil nun bei dieser Berechnung sehr wohl die Möglichkeit besteht, daß gerade zur Abendzeit, in welcher das Werk ohnehin hoch beansprucht ist, auch noch Motoren betrieben werden sind die sog. Doppeltarifzähler vielfach im Gebrauch, Zähler, welche ein Umschaltuhrwerk haben, welches bewirkt, daß der Energieverbrauch der Tageszeit von demjenigen der Abendzeit getrennt gezählt wird. Der letztere wird höher berechnet, wobei es gleichgültig ist, ob derselbe für Beleuchtung oder Motoren verbraucht wird. Da die Einführung derart komplizierter Zähler nicht leicht ist, hilft man sich meistens mit anderen Mitteln, z. B. durch die Gewährung eines hohen Benutzungsstundenrabattes, durch welchen ein Preisnachlaß bei Erreichung einer bestimmten Benutzungsdauer zugesichert wird,

Auch die Teilung der Kosten in eine feste Bereitstellungsgebühr und die nach einem Zähler berechneten Kosten verfolgt das gleiche Ziel, die Kosten gerecht zu verteilen und den Abnehmer zur möglichst gleichmäßigen Abnahme anzureizen.

## IX. Die Übertragung und Verteilung der elektrischen Energie.

Die Energieübertragung, welche heute die ganze Technik beherrscht, ist die elektrische, weil wir mit ihr leicht große Energiemengen über Hunderte von km verteilen können. Wir haben nach dem Früheren nur nötig, die Spannung recht hoch zu wählen, um geringe Ströme und damit dünne Leitungen zu bekommen.

Der elektrische Gleichstrom erlaubt allerdings keine Transformierung, die Höhe der Spannung ist deshalb durch die Glühlampen begrenzt, wie auf S. 208 erläutert wurde. Die elektrische Energieübertragung konnte aus diesem Grunde erst durch den Wechsel- und Drehstrom die heutige Verbreitung gewinnen. Wir wollen nun an einem einfachen Beispiel eine Drehstrom-Energieübertragung betrachten. In Abb. 314 sei K ein Kraftwerk, etwa eine Wasserkraftanlage, welche neben anderen Gebieten auch eine entfernte Fabrik speisen soll. Die gezeichneten beiden Erzeuger  $G_1$  und  $G_2$  arbeiten auf ein Sammelschienensystem  $S_1$ , welches aus drei getrennten, auf Porzellanisolatoren befestigten Schienen besteht, die aber in der Abbildung nur durch eine Linie mit drei Querstrichen angedeutet sind. Da die Fabrik sehr weit abliegt, ist zur Kleinhaltung des Fernleitungsquerschnitts eine hohe Spannung erforderlich, 50000 V angenommen. Diese hohe Spannung kann man nicht gut direkt durch die Maschinen erzeugen, auch sind wohl noch andere, näher gelegene Abnehmer vorhanden, welche keine so hohe Übertragungsspannung nötig haben. Wir erzeugen deshalb in den Maschinen eine niedrigere Spannung, etwa 5000 V. Diese Spannung nehmen die nahe gelegenen Verbraucher von den Sammelschienen  $S_1$  ab. Für die Fabrik wird diese Spannung in Transformatoren  $T_1$  auf 50000 V hinauftransformiert und über Sammelschienen  $S_2$  der Fernleitung F zugeführt. In der Fabrik wird in einer Transformatorenstation Tr mittels Transformatoren  $T_2$  die hohe Spannung wieder auf einen niedrigeren Wert heruntertransformiert, dessen Wert sich nach der Ausdehnung des Werkes richtet. Im allgemeinen sind Werkspannungen von 3000–6000 V ausreichend. Nehmen wir einmal 5000 V an. Mit dieser Spannung, welche wir von den Sammelschienen  $S_2$  abnehmen, können wir alle größeren Motoren  $M_1$ , etwa über 150 kW, direkt betreiben. Die Kleinmotoren können wir nicht mit so hoher Spannung speisen, und es ist eine nochmalige Transformierung notwendig. Bei größerer Ausdehnung der Fabrikanlagen ist es ratsam, eine möglichst hohe Spannung zu wählen, da aber die kleineren Motoren nur höchstens für 500 V gewickelt werden, kann man im allgemeinen keine höhere Spannung als diese wählen. Wir erzeugen also in Transformatoren  $T_3$  eine Spannung von 500 V, welche wir an den Sammelschienen  $S_3$

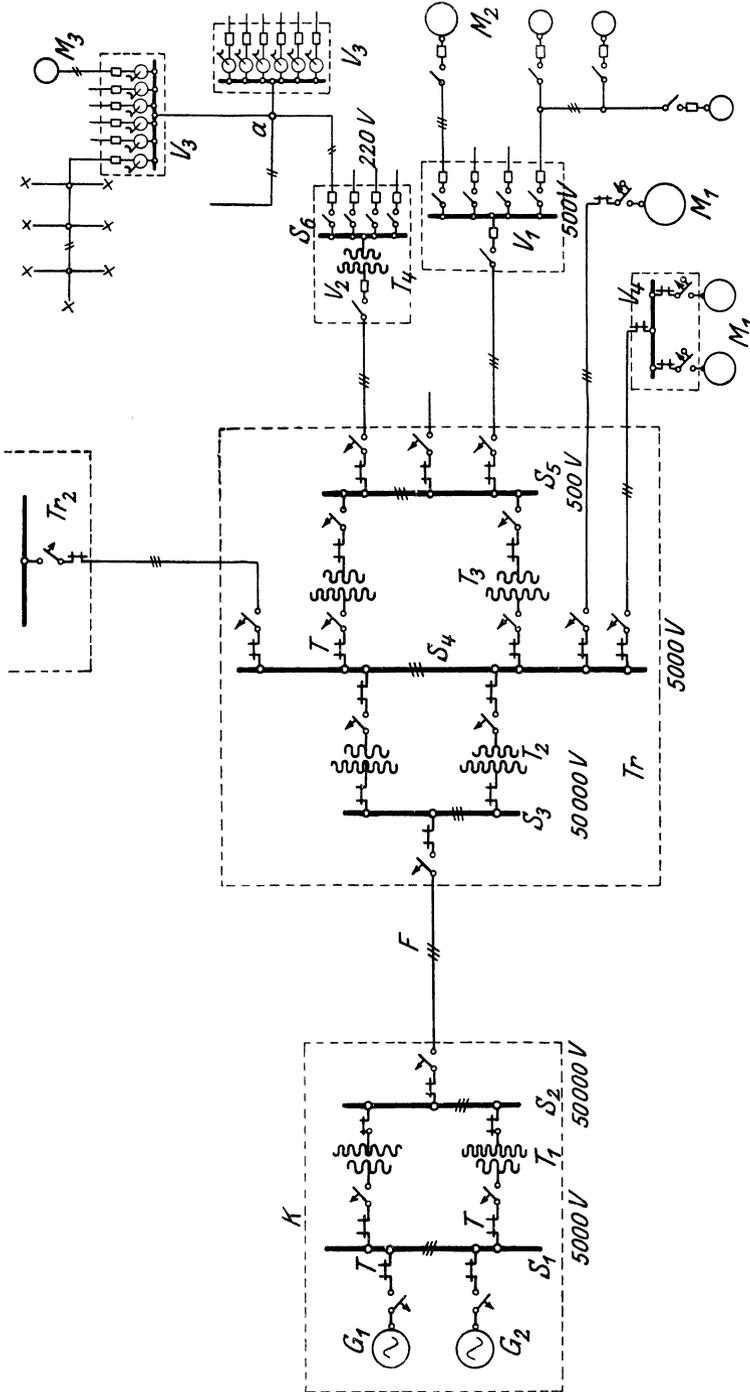


Abb. 314. Elektrische Energieübertragung.

abnehmen und den Hauptverteilungen  $V_1$ , die in verschiedenen Fabrikgebäuden angeordnet sein können, zuführen. An diese Verteilungen sind nun alle mittleren und kleineren Motoren angeschlossen. Für die Beleuchtung ist aber auch die Spannung von 500 V noch zu hoch. Wir wollen die höchste der normalen Lampenspannungen, nämlich 220 V wählen, unter der Annahme, daß die Fabrikräume so trocken sind, daß diese hohe Spannung durchführbar ist. In Transformatoren  $T_4$ , die so bemessen sind, daß sie ein größeres Fabrikgebäude oder auch mehrere derselben versorgen können, wird die Spannung von 500 V auf 220 V herabtransformiert. Eine Verteilung  $V_2$  ermöglicht die Verteilung nach verschiedenen Gebäuden oder Gebäudeabschnitten, wo dann weitere Verteilungen  $V_3$  angeordnet sind, von denen die Lampenstromkreise abzweigen. Bei ausgedehnten Werksanlagen sind außer den Transformatoren  $T_3$  noch weitere, ganz gleiche Transformatorstationen  $Tr_2$  vorhanden. Die kleinsten Motoren  $M_3$ , etwa unter  $1/2$  kW, kann man ohne Störung an die Lichtspannung legen.

## A. Die Fernleitung.

**1. Die Spannungsverhältnisse.** Wir wollen uns zunächst eine Gleichstromleitung denken, welche die vollkommenste Isolation besitzt, welche überhaupt möglich ist, etwa eine blanke Kupferleitung auf großen, sauberen Porzellanisolatoren. Wir könnten in diesem Falle unbedenklich eine der beiden Leitungen mit der Hand berühren. Leider sind aber solche Leitungen mit vollkommener Isolation selten. Wenn ja auch die Porzellanisolatoren selbst, solange sie heil sind, eine verhältnismäßig gute Isolation verbürgen, so gibt es doch bei einem ausgedehnten Netz so viele Stellen, wo aus Platzmangel oder Nachlässigkeit nur eine schwache Isolationsschicht den Leiter von dem anderen Leiter oder von Erde trennt; auch sind alle Isoliermittel keine vollkommenen Isolatoren. Wenn auf diese Weise der eine Leiter über einen mehr oder weniger kleinen Widerstand Verbindung mit Erde bekommen hat, sagen wir, er hat *Erdschluß*. Nun dürfen wir die Leitung nicht mehr berühren. In Abb. 315 seien A und B die beiden Leitungen, von denen B durch einen Isolatorenbruch od dgl. direkten Erdschluß bekommen habe. Eine auf der Erde stehende Person berühre die Leitung A mit der Hand. Da die Erde durch den Erdschluß an — liegt, ist die Person in ihrer ganzen Länge zwischen + und — geschaltet. Es fließt deshalb ein Strom durch den Körper, dessen Größe von den Widerständen des Stromkreises abhängt. Zunächst findet der Strom den Widerstand  $w_1$ , welcher durch die Haut der Hand gebildet ist, dann  $w_2$ , den eigentlichen Körperwiderstand und zuletzt  $w_3$ , den Übertrittswiderstand an den Füßen. Während der Körperwiderstand ziemlich konstant ist, ändern sich  $w_1$  und  $w_3$  sehr, je nachdem ob die Person feuchte oder trockene Hände und Füße oder auch benagelte Schuhe hat. Ein vierter Widerstand  $w_4$  ist der Erdwiderstand. Von der Größe der betrachteten Widerstände wird es abhängen, ob die Person gefährdet ist oder nicht. Im ungünstigsten Falle, also z. B. Berührung mit nasser Hand, in metallischer Badewanne stehend, können 100 V tödlich wirken. Würde unsere Person die Leitung

B berühren, so würde sie keinen Schlag bekommen, weil diese Leitung ja ohnehin an Erde liegt. Um nun eine Leitung auf Erdschluß nachprüfen zu können, bedient man sich im allgemeinen eines Spannungsmessers, welcher nach Abb. 316 geschaltet ist. Legen wir mittels des Umschalters den Spannungsmesser an Leitung B und er zeigt nichts, so hat Leitung A keinen Erdschluß, schlägt das Instrument aber voll aus, so hat die Leitung A direkten Erdschluß.

Bei Wechselstrom dürfen wir eine Leitung auch dann nicht berühren, wenn der Isolationszustand der beiden Leitungen ein vollkommener ist.

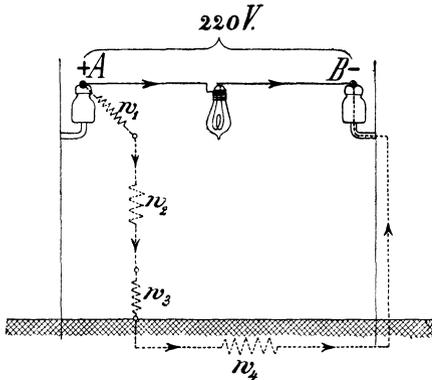


Abb. 315. Zweileiternetz mit Erdschluß.

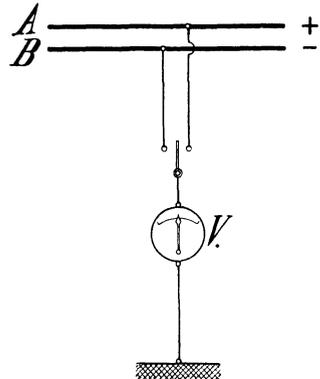


Abb. 316. Erdschlußanzeiger.

Aus Preger-Lehmann, Unfallverhütungs-Technik.)

Denn eine viele km der Erde parallel gespannte Leitung bildet einen Kondensator, bei welchem Erde bzw. Leiter die beiden Belege bilden, während die Luft die Isolationsschicht darstellt (s. S. 48). Fernerhin bilden auch die beiden Leiter gegeneinander noch einen Kondensator. Wenn wir uns diese Leitungskapazitäten durch gewöhnliche Kondensatoren ersetzt denken, können wir also das Schema Abb. 317 zeichnen, und wir sehen, daß die beiden Kapazitäten  $C_a$  und  $C_b$  hintereinander geschaltet sind, daß also an jeder derselben die halbe Netzspannung liegen wird, wenn wir voraussetzen, daß beide Leiter gegen Erde die gleiche Kapazität besitzen. Eine Person, welche, auf dem Boden stehend, die eine der Leitungen mit der Hand berührt, hat also zwischen Fuß und Hand die halbe Betriebsspannung. Während bei niedrigen Spannungen und geringer Netzausdehnung die Gefahr unbedeutend ist, wächst diese ganz außerordentlich, wenn wir in das Gebiet der Hochspannung kommen. Denn nach Gleichung 21 und 22 wächst die Ladung eines Kondensators proportional mit der Spannung und die aufgespeicherte Energie sogar proportional dem Quadrate der Spannung. Da ferner ja auch bei höheren Spannungen die Gefahren größer werden, die ein mangelhafter Isolationszustand zur Folge hat, unterscheiden die Errichtungsvorschriften des

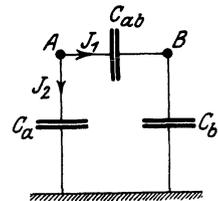


Abb. 317. Ersatzschaltung der Kapazität einer Doppelleitung AB.

Verbandes deutscher Elektrotechniker zwischen **Niederspannung** und **Hochspannung**. Zur Niederspannung gehört ein Leitungsnetz, wenn zwischen einem der Leiter und Erde nie eine höhere Spannung als **250 V** herrschen kann. Das Netz Abb. 315 ist ein Niederspannungsnetz, denn wenn z. B. Leiter B Erdschluß hat, besteht zwischen A und Erde nur eine Spannung von 220 V. Das Dreileiternetz in Abb. 307 ist ein Hochspannungsnetz. Denn wenn z. B. Leitung B Erdschluß bekäme, würde zwischen A und Erde 440 V herrschen. Um nun aber ein solches Netz doch nach den weniger strengen Vorschriften für Niederspannung ausführen zu dürfen, können wir den Nulleiter *erden*, d. h. dauernd gut mit Erde verbinden (Anschluß an ein Wasserrohrnetz, Schienennetz oder besondere Erdplatten oder Rohre im Grundwasser). Dann besteht zwischen den Leitern A bzw. B und Erde nur eine Spannung von 220 V. Bekommt aber einer der Außenleiter Erdschluß, so gehen die Sicherungen durch, weil es ein Kurzschluß ist. Es kann also niemals eine Spannung von mehr als 220 V zwischen einem der Leiter und Erde herrschen. Damit nun aber unbeabsichtigterweise nicht doch einmal aus dem Niederspannungs- ein Hochspannungsnetz wird, darf der Nulleiter weder abschaltbar sein, noch darf er Sicherungen erhalten.

Das Beispiel auf S. 127 hat uns bereits gelehrt, daß in eine unbelastete, am Ende offene Wechselstromleitung ein Strom fließen muß, welcher sich nach Abb. 317 aus den beiden Strömen  $I_1$  und  $I_2$  zusammensetzt und wie bei jedem Kondensator der Spannung um  $90^\circ$  voreilt. Dieser Ladestrom spielt eine um so größere Rolle, je höher die Spannung und um so größer die Kapazität der Leitungen ist. Hohe Kapazität besitzen aber vor allem Kabelleitungen, weil dort die beiden Leitungen viel dichter zusammenliegen, als bei Freileitungen. Die Ladeströme können infolgedessen bei Kabelleitungen für hohe Spannungen so groß werden, daß es unwirtschaftlich ist, Kabelfernleitungen von mehr als 60–70 km Länge herzustellen. Aber auch bei ausgedehnten Hochspannungs-Freileitungen verdienen die Ladeströme sorgsame Beachtung, weil sie sehr leicht zu Störungen Veranlassung geben können. Wir wollen z. B. einmal annehmen, daß in Abb. 317 Leitung B Erdschluß bekäme. Dann tritt sofort eine Veränderung der Ladeströme ein, weil durch den Erdschluß  $C_b$  überbrückt wird und an  $C_a$  die volle Spannung  $E$  liegt. Der Ladestrom  $I_2$  hat sich also verdoppelt.

Jeder stromdurchflossene Leiter hat um sich herum ein magnetisches Feld, welches bei Wechselstrom ständig wechselt und nach dem früheren deshalb in dem Leiter eine Selbstinduktionsspannung erzeugt. Diese Selbstinduktion ist nun zwar bei einem geraden Leiter äußerst klein, sie tritt aber bei Fernleitungen wegen der riesigen Länge derselben dennoch in Erscheinung, und zwar haben umgekehrt, wie bei der Kapazität, die Freileitungen eine höhere Selbstinduktion als die Kabel, weil bei den ersteren der große Abstand zwischen den Leitern eine Ausbildung des magnetischen Feldes ermöglicht. Durch das gemeinsame Auftreten von Kapazität und Selbstinduktion in Hochspannungsnetzen treten in denselben oft *Überspannungen* auf, derart, daß die Spannung zwischen einem Leiter und Erde weit größer ist als normal.

In den bisherigen Betrachtungen haben wir immer die Kapazität der Leitung durch einen einzelnen Kondensator und ebenso die Selbstinduktion durch eine Einzelspule ersetzt. Dies dürfen wir genau genommen nicht tun, insbesondere dann nicht, wenn wir wissen wollen, wie sich die Spannung längs der Leitung ändert. Um uns den wirklichen Verhältnissen, der gleichmäßig verteilten Kapazität und Selbstinduktion wenigstens zu nähern, wollen wir uns dieselben in eine Anzahl gleichmäßig verteilter Kondensatoren und Selbstinduktionsspulen zerlegt denken.

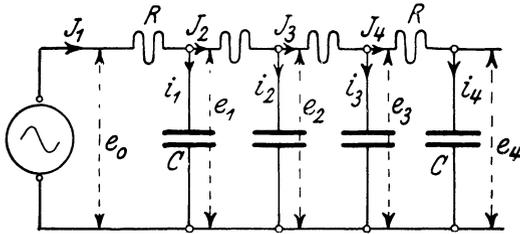


Abb. 318. Ersatzschaltung einer Fernleitung.

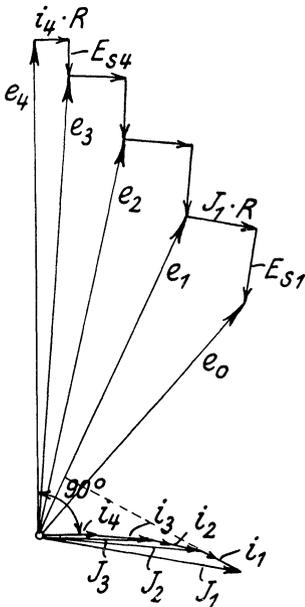


Abb. 319. Diagramm der unbelasteten Leitung (Abb. 318).

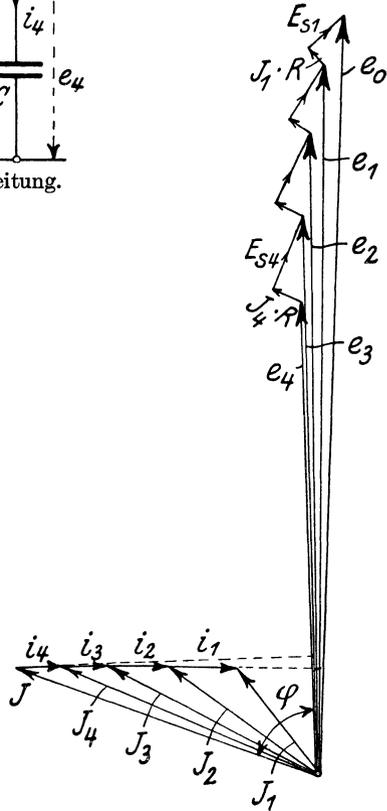


Abb. 320. Diagramm der belasteten Fernleitung.

wie dies Abb. 318 für eine am Ende offene Leitung zeigt. Zur Aufzeichnung des zugehörigen Diagramms Abb. 319 beginnen wir mit dem Leitungsende, wo die Spannung  $e_4$  herrscht. An dieser Spannung liegt die erste Teilkapazität, deren Strom  $i_4$  gegen jene Spannung um  $90^\circ$  voreilend aufzutragen ist. Dieser Strom  $i_4$  ruft in der letzten Spule einen Ohmschen Spannungsabfall  $i_4 \cdot R$  und einen induktiven Spannungsabfall  $E_{s4}$  hervor, von denen der erstere in Richtung mit  $i_4$ , der letztere senkrecht dazu, zur Spannung  $e_4$  addiert werden muß, um die Spannung  $e_3$  zu bekommen. An dieser Spannung liegt wieder ein Kondensator, dessen Strom  $i_3$  gegenüber  $e_3$  um  $90^\circ$  voreilt, und den wir an  $i_4$  anreihen, weil die Summe von  $i_4$  und  $i_3$  den Strom  $I_3$  ergibt. Dieser Strom ruft in der vorletzten Spule den Ohmschen

Spannungsabfall  $I_3 \cdot R$  und den induktiven Spannungsabfall  $E_{s_3}$  hervor, die parallel, bzw. senkrecht zu  $I_3$  zur Spannung  $e_3$  zu addieren sind um die Spannung  $e_2$  zu bekommen. Auf gleiche Weise schreiten wir bis zur Anfangsspannung  $e_0$  fort. Wie vorauszusehen war, nimmt der Strom vom offenen Leitungsende nach dem Anfang hin allmählich zu. Ganz anders verhält sich aber die Spannung. Sie ist an der erzeugenden Maschine niedriger, als am Leitungsende, wir haben also eine Spannungserhöhung. Die Verhältnisse gestalten sich ganz anders, wenn wir die Leitung belastet annehmen, wenn also z. B. an die Endspannung  $e_4$  ein Motor oder Transformator angeschlossen ist, welcher einen um  $\varphi^0$  nacheilenden Strom aufnimmt. Verfahren wir nun genau wie oben bei der Aufzeichnung des Diagramms, so erhalten wir Abb. 320. Jetzt nimmt der Strom nach dem Anfang hin ab, die Spannung hingegen zu. Der Spannungsunterschied am Leitungsende zwischen der leerlaufenden und voll belasteten Leitung ist bestimmend für den Leitungsquerschnitt.

**2. Die Ausführung der Fernleitung.** Obwohl sich die als Erdkabel verlegte Fernleitung durch höhere Sicherheit und Störungsfreiheit vor der Freileitung auszeichnet, sind doch nur verhältnismäßig wenige Kabelleitungen anzutreffen. Es liegt dies einmal an den höheren Kosten, dann aber auch an dem schon erwähnten höheren Ladestrom, sowie an den Schwierigkeiten, welche die Isolation bei höheren Spannungen bereitet. Wir wollen deshalb die Kabelleitungen hier übergehen und kommen bei den Verteilungsleitungen auf dieselben zurück.

Für Freileitungen werden im allgemeinen Hartkupfer- oder Aluminiumseile

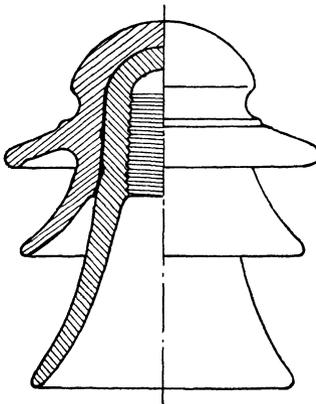


Abb. 321. Delta-Isolator.

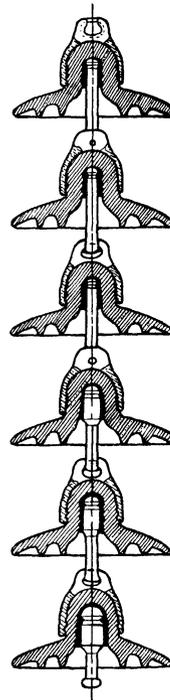


Abb. 322. Hängeisolatorenkette.

verwandt, welche durch Porzellanisolatoren gut isoliert sind. Das Telegraphen-Reichsmodell der Isolatoren hält zwar im trockenen Zustand eine Spannung von vielen tausend Volt aus, es ist aber trotz dem nicht für Hochspannung verwendbar, weil bei Regen die Spannung an dem eng beigezogenen Mantel nach der Stütze überschlägt. Man verwendet deshalb heute allgemein als Stützisolatoren die *Delta-*

*isolatoren*, von denen Abb. 321 einen darstellt. Der innere Mantel ist stark verlängert und von der Stütze abgebogen. Diese Stützisolatoren werden bei Spannungen über 70000 V zu schwer, und man benutzt dann Hängeisolatoren, von denen man je nach der Spannung eine beliebige Anzahl hintereinander schaltet. Abb. 322 zeigt eine solche Hängekette (siehe auch Abb. 328). Als Leitungsständer kommen bei Nebenlinien und schwach belasteten Linien Holzmaste in Frage und zwar im einfachsten Falle Einfachmaste, bei schwereren Leitungen und höheren Spannungen Doppelständer oder A-Maste in Form eines A. Eine Imprägnierung derselben erhöht die Haltbarkeit. Die Querstäbe, welche die Isolatoren tragen, werden immer aus Eisen hergestellt. Derartige Eisenteile werden geerdet. Die Mastabstände werden bei Hochspannung möglichst groß gewählt, weil die Stützpunkte Gefährpunkte sind. Für alle wichtigeren Linien kommen Eisenmaste in Frage. Um Nebenlinien von den Hauptlinien abschalten zu können, oder auch um Ortschaften oder einzelne Verbraucher abtrennen zu können, bedient man sich der *Mastschalter*. Es sind dies Ausschalter, deren Kontakte zum besseren Verlöschen des Ausschaltlichtbogens mit Hörnern ausgerüstet sind. Die Schalter werden meistens von unten bedient, ihr Antrieb muß auf das sorgfältigste geerdet werden. Die Höhe der Hochspannungsfreileitungen über dem Boden ist durch die Errichtungsvorschriften festgelegt, dieselbe soll an keiner Stelle weniger als 6 m und bei Wegübergängen mindestens 7 m sein (s. Abb. 328).

**3. Der Überspannungsschutz.** In Hochspannungsnetzen, besonders bei Freileitungen, können Gefahren entweder durch Wanderwellen entstehen, die über die Leitungen eilen, oder dadurch, daß die Leitungen gegen Erde eine unzulässig hohe Spannung annehmen. Wenn wir eine sehr lange Leitung einschalten, so ist dieselbe nicht schon in dem Augenblick, in dem sich die Schalterkontakte berühren, bis zum Ende unter voller Spannung, weil auch die Elektrizität eine endliche Fortpflanzungsgeschwindigkeit hat. Betrachtet man einen Punkt der Leitung, so wird derselbe in einem kurzen Augenblick nach dem Einschalten der Leitung noch nicht von der Spannungswelle, die sich von dem Schalter aus in Bewegung gesetzt hat, erreicht sein. Sehr wenig später aber steht dieser Leitungspunkt bereits unter voller Spannung. So eilt die Einschaltwandlerwelle über die ganze Leitung und wird am offenen Ende wie eine Wasserwelle reflektiert, wobei die Spannung auf den doppelten Wert ansteigt. Derartige Wanderwellen treten ebenso auch bei Kurzschlüssen und Erdschlüssen, ferner auch bei atmosphärischen Entladungen auf. Wenn eine Wanderwelle auf die Wicklung eines Transformators oder einer Maschine trifft, so ist im ersten Augenblick die erste Spulenwindung bereits unter Spannung, die nur schwach von ihr isolierte zweite Windung aber noch nicht usf. Die ersten Windungen sind deshalb gefährdet, und man isoliert sie deshalb meistens besser voneinander, als die tiefer liegenden. Spulen mit Selbstinduktion bieten den Wanderwellen ein Hindernis, an denen sie ähnlich wie an einem offenen Leitungsende teilweise zurückgeworfen werden. Man schaltet deshalb Maschinen und Transformatoren meist Drosselspulen L vor, wie Abb. 323 zeigt. Da sich Wanderwellen niemals vermeiden lassen, muß man ein Leitungsnetz so bauen, daß sie

nicht gefährlich werden können. Dies geschieht am vollkommensten in Ringnetzen, in denen die Wanderwelle bei ungehindertem Umlauf schnell verebht. Falls sich in dem Stromkreis Spulen mit Selbstinduktion befinden, welche die Wanderwellen hindern könnten, müssen dieselben

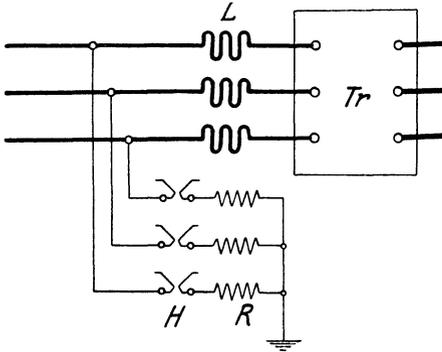


Abb. 323. Schaltung eines Hörnerableiters.

durch Ohmsche Widerstände, die den Wellen wenig hinderlich sind, überbrückt werden (z. B. die Stromwandler der Strommesser und Zähler). Überspannungen der Leitungsanlage gegen Erde können durch atmosphärische Einflüsse, durch den Bruch einer Leitung, durch Nacheinanderschalten der einzelnen Phasen und durch Erdschlüsse hervorgerufen werden. Um den atmosphärischen Einfluß zu vermindern, zieht man über die Mastspitzen meist eine weitere, geerdete Leitung, das sog. Blitzseil. Um ein Nacheinanderschalten der Phasen zu vermeiden, müssen sowohl die Schaltkontakte der Einzelphasen bei den Ölschaltern, als auch bei den Trennschaltern miteinander gekuppelt sein. Abschmelzsicherungen sind zu vermeiden,

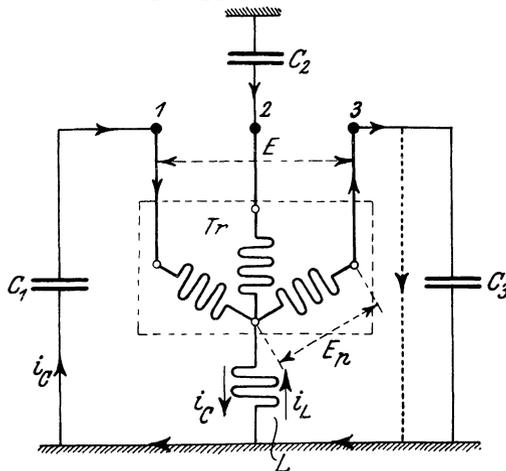


Abb. 324. Löschspule.

weil die Möglichkeit besteht, daß die Leitung nur einpolig abgeschaltet wird. Erdschlüsse können durch Leitungsbrüche, durch Beschädigungen an Isolatoren oder auch durch Überschläge der Spannung an den Isolatoren auftreten. Abgesehen von den gefährlichen Wanderwellen, die sich bei Eintritt eines Erdschlusses in Bewegung setzen, bildet derselbe auch eine dauernde Gefahr dadurch, daß er Überspannungen gegen Erde und stärkere Ladeströme in den Leitungen erzeugt. In Abb. 324 liegt an den drei Hochspannungsfreileitungen 1, 2 und 3 ein Transformator  $Tr$ . Die Kapazität, welche die Leitungen gegen Erde haben, ist durch die Kondensatoren  $C_1$ ,  $C_2$  und  $C_3$  dargestellt. Wenn nun Leitung 3, wie punktiert gezeichnet, durch einen Isolatorbruch oder durch einen Überschlag und Erdschlußlichtbogen Verbindung mit Erde bekommt, liegt der Kondensator  $C_1$  und ebenso natürlich auch  $C_2$  an der vollen Spannung  $E$ , so daß deren Ladeströme

über die Mastspitzen meist eine weitere, geerdete Leitung, das sog. Blitzseil. Um ein Nacheinanderschalten der Phasen zu vermeiden, müssen sowohl die Schaltkontakte der Einzelphasen bei den Ölschaltern, als auch bei den Trennschaltern miteinander gekuppelt sein. Abschmelzsicherungen sind zu vermeiden, weil die Möglichkeit besteht, daß die Leitung nur einpolig abgeschaltet wird. Erdschlüsse können durch Leitungsbrüche, durch Beschädigungen an Isolatoren oder auch durch Überschläge der Spannung an den Isolatoren auftreten. Abgesehen von den gefährlichen Wanderwellen, die sich bei Eintritt eines Erdschlusses in Bewegung setzen, bildet derselbe auch eine dauernde Gefahr dadurch, daß er Überspannungen gegen Erde und stärkere Ladeströme in den Leitungen erzeugt.

erheblich größer sind, als bei gesunder Leitung. Zugleich können die Kapazitäten im Verein mit der Selbstinduktion der Leitungen zu einer Spannungserhöhung, unter Umständen sogar zu Resonanzerscheinungen Veranlassung geben. Einen wirksamen Schutz gegen Erdschlüsse bietet die *Erdschlußspule* von Petersen, welche in Abb. 324 durch L dargestellt ist. Sobald Leitung 3 Erdschluß bekommt, durchfließt die Kondensatoren der vergrößerte Ladestrom  $i_c$ , welcher der Spannung um  $90^\circ$  voreilt. Infolge des Erdschlusses liegt aber die Löschspule L an der Phasenspannung  $E_p$  und führt demnach einen Strom  $i_L$ , welcher ihrer Spannung um  $90^\circ$  nacheilt. Durch richtige Bemessung der Spule läßt sich nun erreichen, daß sich der voreilende Strom  $i_c$  mit dem nacheilenden Strom  $i_L$  in der Spule gerade aufhebt, wodurch der Erdschluß unwirksam wird und ein Erdschlußlichtbogen verlöscht. Die bekannteste Schutzvorrichtung gegen Überspannungen ist der *Hörnerableiter*. Abb. 323 stellt dessen Schaltung in einem Drehstromnetz dar. Der Zwischenraum zwischen den Hörnern H ist so bemessen, daß die normale Spannung noch nicht überschlägt. Jede Überspannung ruft indessen einen Überschlag hervor, wobei der Lichtbogen an den Hörnern hochsteigt und verlöscht. Die Widerstände R müssen vorhanden sein, damit bei einem Überschlag die Leitungen nicht miteinander kurzgeschlossen werden können. Zuweilen werden Hochspannungsleitungen zum Schutz gegen Überspannungen auch über sehr hohe Widerstände dauernd geerdet.

## B. Die Energieverteilung.

**1. Verteilungsleitungen.** Auch bei den Verteilungsleitungen gilt der Grundsatz, durch Wahl möglichst hoher Spannung an Leitungskupfer zu sparen. Es wäre deshalb bei der Stromverteilung einer Stadt oder einer großen Fabrik erwünscht, die Hochspannung bis an die einzelnen Verbrauchsstellen zu leiten und dort erst auf die Gebrauchsspannung herabzutransformieren. Dadurch würden aber außerordentlich viele Transformatorstationen erforderlich sein, deren Kosten die Ersparnis an Leitungskupfer weit aufwiegen würden. Es muß deshalb in praktischen Fällen ein günstigster Mittelweg gesucht werden, bei welchem die Zahl der Unterstationen so beschränkt wird, daß die Gesamtkosten des Hoch- und Niederspannungsnetzes, sowie der Unterstationen einen Mindestbetrag erreichen.

Häufig sind die einzelnen Transformatorstationen nicht gleich stark belastet. Es ist dann vorteilhaft, dieselben durch eine Ringleitung miteinander zu verbinden, damit bei einer Überbeanspruchung einer Station und ihrer Leitungen die anderen ausgleichend mitbeansprucht werden.

In dem Bestreben, eine möglichst hohe Verteilungsspannung zu wählen, sind wir durch die Kleinmotoren behindert, welche im allgemeinen nur bis 500 V gewickelt werden. Diese Spannung hatten wir deshalb auch schon in dem Verteilungsbeispiel Abb. 314 zugrunde gelegt. Wegen der Lichtspannung ist dann aber eine nochmalige Transformation erforderlich. Um Kraft und Licht von den gleichen Transformatoren

speisen zu können ist eine Verteilung in Aufnahme gekommen, welche durch Abb. 325 dargestellt ist. Es ist ein Drehstromnetz mit Nulleiter. Die Motoren  $M$  liegen an der Spannung von 380 V, während die Lampen zwischen Drehstromleitung und Nulleiter an 220 V gelegt sind. Sobald wir den Nulleiter erden, gehört das Netz noch zu den Niederspannungsanlagen.

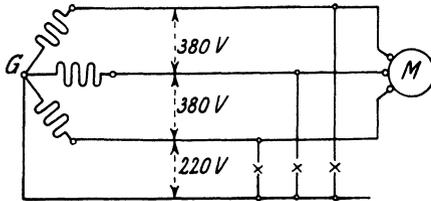


Abb. 325.

Bei einem Gleichstromverteilungsnetz gibt es leider keine Möglichkeit zu transformieren, wir müssen also mit der gleichen Spannung verteilen. Allerdings werden wir auch bei Gleichstrom zu einzelnen Speisepunkten, die zentral gelegen sind, Speiseleitungen legen und von diesen Punkten mit Verteilungsleitungen

zu den einzelnen Verbrauchsstellen gehen. Die Speisepunkte können zum Ausgleich untereinander verbunden werden.

Für die *Bemessung der Verteilungsleitungen* sind mehrere Gesichtspunkte maßgebend. In erster Linie haben wir dafür zu sorgen, daß die Erwärmung der Leitungen keine unzulässige ist. Die Errichtungsvorschriften schreiben deshalb für die einzelnen Querschnitte Höchststromstärken vor, die nicht überschritten werden dürfen. Diese Belastungen können der Tabelle auf S. 228 entnommen werden. Blanke Freileitungen können bis 50 mm<sup>2</sup> wie die isolierten Leitungen belastet werden, darüber hinaus besteht nur die allgemeine Vorschrift, daß die Erwärmung in zulässigen Grenzen bleiben muß. Wir dürfen nun aber keineswegs annehmen, daß wir diese Querschnitte einfach zur Ausführung bringen dürfen. Wir würden dann bei längeren Leitungen einen ganz unzulässigen Spannungs- und Energieverlust im Leitungsnetz haben. Bei allen längeren Leitungen ist deshalb nicht die Erwärmung, sondern der Spannungsabfall für die Leitungsdimensionierung maßgebend. Die Größe des zulässigen Spannungsabfalls müßte eigentlich durch eine Berechnung festgelegt werden, in welcher ein Vergleich zwischen den Kosten eines Netzes mit geringen Leitungsquerschnitten, dafür aber hohen dauernden Verlusten, und den Kosten eines teureren Leitungsnetzes mit geringen Energieverlusten gezogen wird. Derartige Berechnungen sind aber oft recht unsicher, weshalb man Erfahrungswerte zugrunde legt. Bei Kraftverteilungen wird ein Gesamtspannungsabfall von etwa 10% zugelassen, bei Lichtverteilungsleitungen ein gesamter Spannungsabfall von 2–3%. Dabei ist aber zu berücksichtigen, daß etwa in der Verteilung vorhandene Transformatoren auch einen Spannungsabfall verursachen (s. S. 166). Am einfachsten liegen die Verhältnisse bei Gleichstrom, wo der Spannungsabfall einfach gleich  $I \cdot R$  in jeder der beiden Leitungen ist, der Gesamtabfall also  $2 \cdot I \cdot R$ . Bei Wechsel- und Drehstrom spielt die Selbstinduktion der Leitungen und genau genommen auch die Kapazität eine Rolle. Die letztere kann bei Verteilungsfreileitungen jedoch immer vernachlässigt werden, auch selbst

bei Kabeln, die ja auch in Verteilungen kaum mehr als 1–2 km lang sind, kann sie unberücksichtigt bleiben. Bei Kabeln kann ferner auch die Selbstinduktion außer Betracht bleiben, so daß bei ihnen nur der Ohmsche Spannungsabfall in Frage kommt. Bei Freileitungen ist eine Berücksichtigung des induktiven Spannungsabfalls angebracht.

Unter Vernachlässigung des induktiven Spannungsabfalls läßt sich der durch den Ohmschen Widerstand verursachte Spannungsverlust nach Abb. 326 auch leicht rechnerisch bestimmen. Am Leitungsende werde ein der Spannung  $E_2$  um  $\varphi^0$  nacheilender Strom verbraucht. Nimmt man angenähert an, daß die Spannung  $E_1$  am Leitungsanfang im Diagramm parallel zu  $E_2$  liege, so ist der Spannungsunterschied:

$$\varepsilon = E_1 - E_2 = 2 \cdot I \cdot R \cdot \cos \varphi.$$

Bei Drehstrom wird das Diagramm mit den Phasenspannungen gezeichnet. Der Abfall der verketteten Spannung ist also:

$$\varepsilon = \sqrt{3} \cdot I \cdot R \cdot \cos \varphi.$$

Anstatt eine Leitung nach dem Spannungsabfall zu bemessen, kann man auch einen bestimmten Energieverlust zugrunde legen und darnach den Leitungsquerschnitt berechnen. Bei Wechsel- und Drehstrom kommt man dann ohne Diagramm zum Ziel. Es ist allerdings ratsam, den prozentualen Energieverlust etwas niedriger anzunehmen, als den oben genannten Spannungsverlust.

**Beispiel:** Der 12 kW-Drehstrommotor des Beispiels auf S. 184 soll in einer Entfernung von 400 m vom Verteilungspunkt angeschlossen werden. Wie groß ist der Leitungsquerschnitt zu wählen, wenn in dieser Zuleitung 5% der übertragenen Leistung verloren gehen dürfen?

Die vom Motor in einer Phase aufgenommene Leistung betrug 4550 W. 5% davon sind 227 W. Diese dürfen bei dem Motorstrom von 17,5 A in einer Leitung verloren gehen. Also:

$$I^2 \cdot R = 227$$

$$R = \frac{227}{I^2} = \frac{227}{17,5^2} = 0,74 \Omega.$$

Nach Gleichung 7:

$$\frac{l}{k \cdot q} = \frac{400}{57 \cdot q} = 0,74 \Omega.$$

$$q = 9,5 \text{ mm}^2,$$

also der Normalquerschnitt 10 mm<sup>2</sup>.

Hätte man nur auf Erwärmung gerechnet, so wäre nach Tabelle S. 228 schon eine Kupferleitung von 2,5 mm<sup>2</sup> für den Strom von 17,5 A ausreichend gewesen.

Jede Leitung, welcher Art sie auch sei, braucht einen Schutz derart, daß sie selbsttätig abgeschaltet wird, sobald die Leitung dauernd ein höherer Strom durchfließt, als nach der Tabelle S. 228 höchstens zulässig ist. Bei Spannungen unter 1000 Volt bedient man sich hauptsächlich hierzu der Abschmelzsicherungen, die nach dem zu schützenden

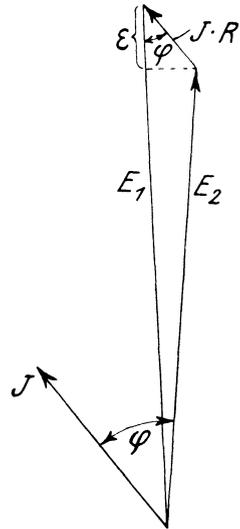


Abb. 326.

Belastungs- und Widerstandstabelle.

| Querschnitt eines Leiters in mm <sup>2</sup> | Isolierte Leitungen           |                            |                               |                            |                               |                            |                               |                            |                                  |           | Höchste dauernd zulässige Stromstärke in Ampere |           |  |           |        |           | Widerstand in Ohm für 1 km |           |  |  |
|--|-------------------------------|----------------------------|-------------------------------|----------------------------|-------------------------------|----------------------------|-------------------------------|----------------------------|----------------------------------|-----------|---|-----------|--|-----------|--------|-----------|----------------------------|-----------|--|--|
|  | Kupfer                        |                            | Aluminium                     |                            | Zink                          |                            | Eisen                         |                            | Einleiter-Bleikabel bis 750 Volt |           | Versilbte Dreileiterkabel bis 3000 Volt         |           | Versilbte Dreileiterkabel bis 10000 Volt |           | Kupfer | Aluminium | Zink                       | Eisen     |  |  |
|  | Zu-lässige Strom-stärke in A. | Stärke der Sicherung in A. | Zu-lässige Strom-stärke in A. | Stärke der Sicherung in A. | Zu-lässige Strom-stärke in A. | Stärke der Sicherung in A. | Zu-lässige Strom-stärke in A. | Stärke der Sicherung in A. | Kupfer                           | Aluminium | Kupfer  | Aluminium | Kupfer                                   | Aluminium |        |           |                            |           |  |  |
|  |                               |                            |                               |                            |                               |                            |                               |                            |                                  |           |   |           |  |           | Kupfer | Aluminium | Kupfer                     | Aluminium |  |  |
| 1  | 11                            | 6                          | 8                             | 6                          | —                             | —                          | —                             | —                          | 24                               | —         | 17  | —         | —  | —         | 17,84  | 30,6      | 62,5                       | 143,0     |  |  |
| 1,5  | 14                            | 10                         | 11                            | 6                          | —                             | —                          | —                             | —                          | 31                               | —         | 22  | —         | —  | —         | 11,9   | 20,4      | 41,7                       | 95,4      |  |  |
| 2,5  | 20                            | 15                         | 16                            | 10                         | 11                            | 6                          | 8                             | 6                          | 41                               | —         | 29  | 22        | —  | —         | 7,14   | 12,2      | 25,0                       | 57,2      |  |  |
| 4  | 25                            | 20                         | 20                            | 15                         | 13                            | 10                         | 10                            | 6                          | 55                               | 42        | 37  | 37        | —  | —         | 4,45   | 7,65      | 15,6                       | 35,8      |  |  |
| 6  | 31                            | 25                         | 24                            | 20                         | 16                            | 10                         | 12                            | 10                         | 70                               | 70        | 47  | 36        | —  | —         | 2,97   | 5,10      | 10,4                       | 23,8      |  |  |
| 10   | 43                            | 35                         | 34                            | 25                         | 23                            | 20                         | 17                            | 15                         | 95                               | 75        | 65  | 50        | 60                                       | 46        | 1,78   | 3,06      | 6,25                       | 14,3      |  |  |
| 16   | 75                            | 60                         | 60                            | 35                         | 40                            | 35                         | 30                            | 25                         | 130                              | 100       | 85  | 65        | 80                                       | 60        | 1,11   | 1,91      | 3,9                        | 9,0       |  |  |
| 25   | 100                           | 80                         | 80                            | 60                         | 52                            | 35                         | 40                            | 35                         | 170                              | 130       | 110   | 85        | 105                                      | 80        | 0,714  | 1,22      | 2,5                        | 5,7       |  |  |
| 35   | 125                           | 100                        | 95                            | 80                         | 65                            | 60                         | 50                            | 35                         | 210                              | 160       | 135   | 105       | 125                                      | 95        | 0,51   | 0,875     | 1,78                       | 4,1       |  |  |
| 50   | 160                           | 125                        | 125                           | 100                        | 83                            | 60                         | 65                            | 60                         | 260                              | 200       | 165   | 125       | 155                                      | 120       | 0,357  | 0,612     | 1,25                       | 2,86      |  |  |
| 70   | 200                           | 160                        | 155                           | 125                        | 105                           | 80                         | 80                            | 60                         | 320                              | 245       | 200   | 145       | 190                                      | 155       | 0,255  | 0,437     | 0,89                       | 2,04      |  |  |
| 95   | 240                           | 200                        | 185                           | 160                        | 125                           | 100                        | 95                            | —                          | 385                              | 295       | 240   | 185       | 225                                      | 170       | 0,188  | 0,322     | 0,658                      | 1,5       |  |  |
| 120  | 280                           | 225                        | 245                           | 200                        | 145                           | 125                        | 110                           | —                          | 450                              | 345       | 280   | 215       | 260                                      | 200       | 0,148  | 0,255     | 0,52                       | 1,19      |  |  |
| 150  | 325                           | 260                        | 250                           | 225                        | 170                           | 125                        | 125                           | —                          | 510                              | 390       | 315   | 240       | 300                                      | 230       | 0,119  | 0,208     | 0,417                      | 0,95      |  |  |
| 185  | 380                           | 300                        | —                             | —                          | —                             | —                          | —                             | —                          | 575                              | 440       | 360   | 275       | 340                                      | 260       | 0,096  | 0,165     | 0,338                      | 0,77      |  |  |
| 240  | 450                           | 360                        | —                             | —                          | —                             | —                          | —                             | —                          | 670                              | 515       | 420   | 320       | —  | —         | 0,074  | 0,127     | 0,26                       | 0,596     |  |  |
| 300  | 525                           | 420                        | —                             | —                          | —                             | —                          | —                             | —                          | 760                              | 580       | 475   | 365       | —  | —         | 0,059  | 0,104     | 0,209                      | 0,47      |  |  |
| 400  | 640                           | 500                        | —                             | —                          | —                             | —                          | —                             | —                          | 910                              | 695       | 570   | 435       | —  | —         | 0,044  | 0,076     | 0,156                      | 0,358     |  |  |
| 500  | 760                           | 600                        | —                             | —                          | —                             | —                          | —                             | —                          | 1035                             | 795       | —   | —         | —  | —         | 0,035  | 0,061     | 0,125                      | 0,286     |  |  |
| 625  | 880                           | 700                        | —                             | —                          | —                             | —                          | —                             | —                          | 1190                             | 910       | —   | —         | —  | —         | 0,028  | 0,050     | —                          | —         |  |  |
| 800  | 1050                          | 850                        | —                             | —                          | —                             | —                          | —                             | —                          | 1380                             | 1055      | —   | —         | —  | —         | 0,022  | 0,038     | —                          | —         |  |  |
| 1000   | 1250                          | 1000                       | —                             | —                          | —                             | —                          | —                             | —                          | 1585                             | 1250      | —   | —         | —  | —         | 0,018  | 0,031     | —                          | —         |  |  |

Mehrere Kabel im Boden verlegt 75%, in warmen Räumen verlegt 55% der obigen Belastung.

Leitungsquerschnitt zu bemessen sind. Es leuchtet ein, daß überall, wo von einer starken Leitung eine schwächere abzweigt, unbedingt eine Sicherung angeordnet werden muß, welche den abgehenden schwachen Querschnitt schützt. Nur dann kann man auf eine Sicherung an der Abzweigstelle verzichten, wenn auch der starke Querschnitt so schwach gesichert wird, daß auch in ihm kein höherer Strom möglich ist, als er für den Abzweig zulässig ist.

a) Die Legung von Freileitungen. Als Leitungsmaterial kommt hauptsächlich Hartkupfer und Aluminium in Frage und zwar wegen der bei Niederspannung notwendigen großen Querschnitte als biegsames Seil. Zur Isolation genügt bis 500 V das Reichs-Telegraphenmodell der Isolatoren oder eine kleine Deltaglocke, an welchen die Leitung mit Bindedraht befestigt wird. Die Verbindung einzelner Leitungsstücke miteinander erfolgt durch Niet- oder Schraubenverbinder, nicht etwa durch Lötung. Bei geringer Leitungszahl erhalten die Isolatorenstützen Holzgewinde und werden in den Holzmast eingeschraubt. Bei größerer Leitungszahl werden die Stützen an eisernen Querträgern festgeschraubt. Als Mastenmaterial dient in der Hauptsache Holz, welches zur Erhöhung der Haltbarkeit imprägniert sein muß. Grünes Holz verzieht sich. Je nach der Belastung mit Leitungen kommt man mit Einfachmasten aus, oder braucht Doppelständer. Eck- und Verteilungsmaste müssen im allgemeinen stärker sein. Die Einsetztiefe der Maste in den Boden richtet sich nach der Masthöhe und der Bodenbeschaffenheit und beträgt etwa 1,5 m. Bei aufgeschüttetem oder Sumpfboden

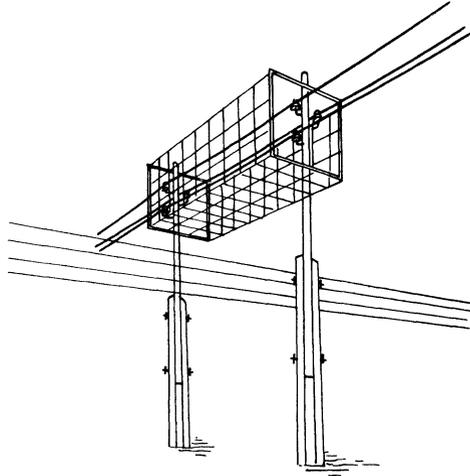


Abb. 327. Kasten-Schutznetz.

ist ein Betonsockel notwendig, in welchen Eisen mit eingestampft werden, an denen der Mast nach gehörigem Abbinden des Zementes angeschraubt werden kann. Die Befestigung muß derart sein, daß der Mast seitlich zwischen die Eisen geschoben werden kann, weil ein Einlassen von oben her sehr schwierig ist. Masten, welche einen seitlichen Zug auszuhalten haben, wie dies bei einem Richtungswechsel der Leitung der Fall ist, müssen verstrebt oder verankert werden. Ankerseile sind gut zu erden, weil sie leicht unter Spannung geraten können; noch besser schaltet man etwa in der Mitte einen Porzellanisolator in Form eines Eies ein, dann ist der auf dem Boden stehende, welcher den Anker berührt, geschützt und ebenso jemand, der den Mast besteigt und zufälligerweise den Anker und gleichzeitig eine der unter Spannung stehenden Leitungen berührt. Bei Kreuzungen mit den Telephonleitungen der Post müssen

Niederspannungsleitungen isoliert gespannt werden. Hochspannungsleitungen müssen durch ein Schutznetz von den Postleitungen getrennt

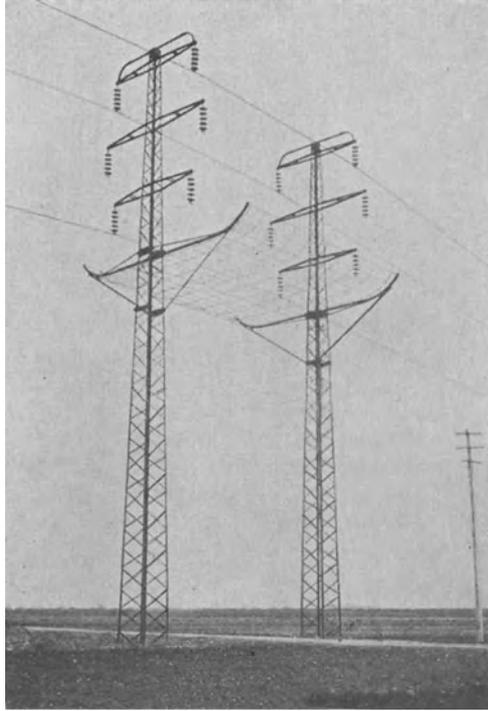


Abb. 328. 80 000 V-Leitung mit Muldenschutznetz.

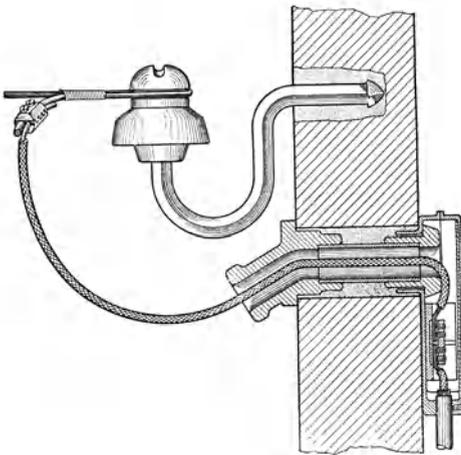


Abb. 329. Freileitungseinführung.

werden, wenn sie nicht bruch-sicher aufgehängt sind. Abb. 327 zeigt die Kreuzung einer Hochspannungsleitung mit einer Telephonleitung, bei welcher die erstere durch ein sog. Kastennetz umhüllt ist. Um einen genügenden Abstand zu bekommen, sind die beiden Masten vorge-schuht. Ein etwas billigeres Netz ist das Muldenetz nach Abb. 328. Schutznetze sind zu erden.

Innerhalb von Ortschaften, sowie auf Fabrikgrundstücken sucht man die Masten nach Möglichkeit zu vermeiden,

indem man an den Gebäuden eiserne Rohrständereinführungen oder kleine Ausleger anbringt. Der Übergang von einer Freileitung zu der isolierten Leitung innerhalb eines Gebäudes muß besonders sorgfältig gemacht werden. Abb. 329 stellt eine einfache Einführung dar. Die isolierte Leitung wird durch eine nach unten gebogene Einführungspfeife aus Porzellan sowohl vor Regen, als auch vor dem Einfluß des Mauerwerks geschützt. Sind gleichzeitig sehr viele Leitungen einzuführen, so kann man ein Blech in eine Wandöffnung einsetzen, welches so viel Löcher hat, als Leitungen einzuführen sind. Jede Leitung ist durch eine



Abb. 330. Rohrständereinführung.

Porzellanbüchse von dem Blech getrennt. Beliebte sind auch die Rohrständereinführungen nach Abb. 330. Der Einführungskopf schützt die isolierte Leitung vor Regen und vor den scharfen Kanten des Rohres.

**b) Die Kabel und ihre Legung.** Kabel sind Leitungen, welche für die Einbettung in den Erdboden geeignet sind. Man unterscheidet ein- und mehradrige Kabel. Die Adern sind durch getränkte Jute oder Papier voneinander isoliert und zum Schutze gegen Feuchtigkeit mit einem nahtlosen Bleimantel umpreßt. Eine Bewehrung aus spiralförmig aufgewundenem Eisenband schützt vor mechanischen Schädigungen. Die Lieferung der Kabel erfolgt auf großen Holztrommeln, von welchen sie bei Legung im Freien in Kabelgräben von 60–70 cm Tiefe abgezogen werden. Starke Krümmungen des Kabels sind unbedingt zu vermeiden. Als kleinsten Krümmungsradius rechnet man etwa den 15fachen Kabeldurchmesser. Bei kalter Witterung dürfen Kabel nicht verlegt werden, weil dann die Isolation brüchig ist. Das in den Gräben gezogene Kabel wird, nach gehöriger Einbettung in Sand, durch eine Schicht Ziegelsteine oder besondere Formsteine gegen Hackenhiebe abgedeckt. Hochspannungskabel werden vorteilhaft von Niederspannungskabeln getrennt. An Wegkreuzungen tut man gut die Kabel in Guß- oder Tonrohre einzuziehen, damit bei einer Änderung nicht immer die Straße gesperrt werden muß. Die Eintrittsstelle in das Rohr ist gut zu unterstopfen, weil dort das Kabel leicht abknickt. Damit man beim Aufgraben das richtige Kabel unter vielen findet müssen dieselben mit Nummern versehen sein. Man wickelt deshalb in Abständen von 10–20 m Bleistreifen mit der Nummer um die Kabel. Die Enden eines Kabels müssen durch Anbringung eines Kabelendverschlusses, welcher mit flüssiger Isolier-

masse ausgegossen wird, sorgfältig gegen das Eindringen von Feuchtigkeit geschützt werden. Abb. 331 zeigt die Herstellung eines solchen Verschlusses. Der Bleimantel wird bei Hochspannung geerdet. Die Ver-

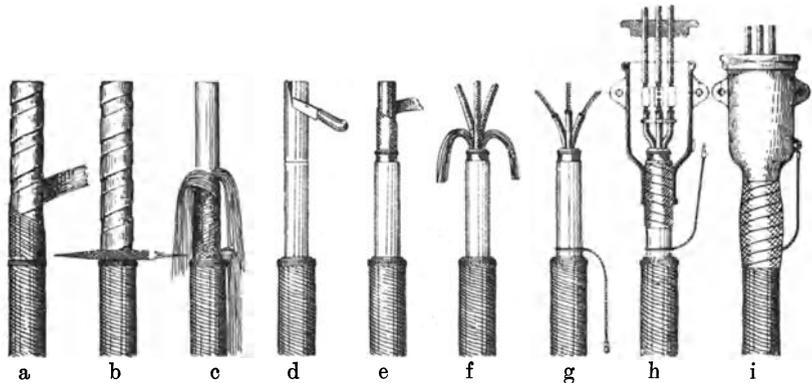


Abb. 331. Herstellung eines dreiadrigen Kabelendverschlusses. a) Abbinden der Jute mit Draht und Ablösen derselben. b) Durchfeilen des Eisenbandes und Ablösen derselben. c) Entfernung der Jute. d) Ablösung des Bleimantels. e) Abbinden der Isolation und Abwickeln derselben. f) Entfernung der Fülljute. g) Abbinden der Adern und Befreiung von der Isolation. Anlöten des Erddrahtes. h) Aufsetzen, Abdichten und Ausgießen des Endverschlusses. i) Fertiger Endverschluß.

bindung der einzelnen Kabellängen geschieht durch Kabelmuffen. Abb. 332 zeigt eine Muffe eines dreiadrigen Kabels vor dem Ausgießen.

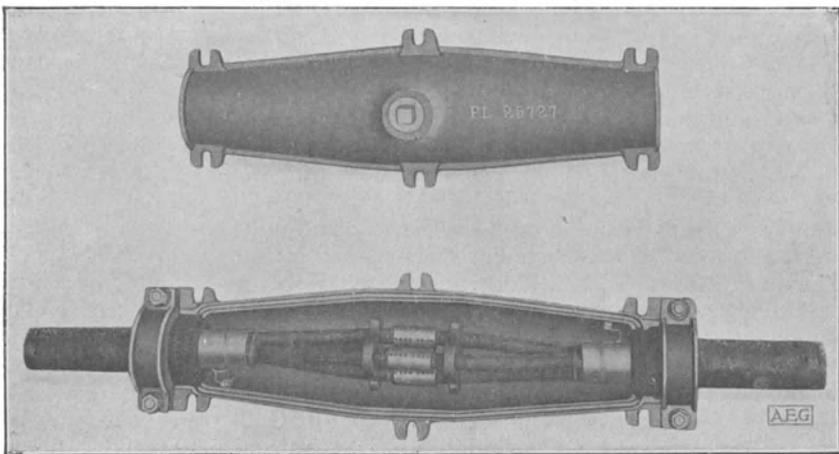


Abb. 332. Kabelverbindungs- oder Kabelmuffe fertig zum Ausgießen.  
(Entnommen aus A.E.G., Hilfsbuch für elektrische Licht- und Kraftanlagen.)

Abzweigmuffen werden in ganz gleicher Weise hergestellt. Die Adern werden bei Kupfer verschraubt, bei Aluminium verschweißt. Innerhalb von Gebäuden können Kabel auch an den Wänden oder

unter der Decke verlegt werden. Bei leicht herzustellenden Böden geschieht die Legung wie im Freien. Bei Betonfußböden sieht man besser gemauerte Kanäle von etwa 20 cm Tiefe vor, die mit Platten abgedeckt werden, oder man legt Rohre ein. Chemischen Einflüssen widerstehen Kabel nicht. Laugen greifen den Bleimantel an und Säuren die Bewehrung. In solchen Fällen sind die Kabel unter der Decke anzubringen und mit Asphalt gründlich zu streichen. Wo eine Entzündungsmöglichkeit besteht, ist die äußere Juteumwicklung der Kabel zu entfernen. Im Handbereich sollte man auch Kabel

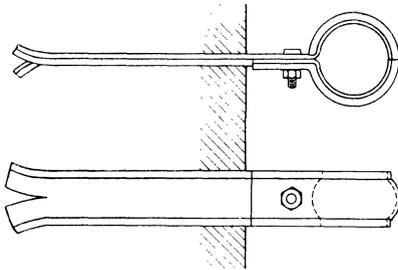


Abb. 333. Kabelbefestigung mit Schellen.  
(Aus A.E.G.-Hilfsbuch.)

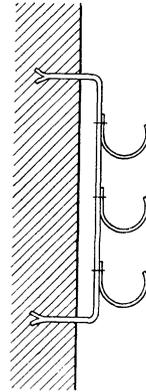


Abb. 334. Hakenregister.  
(Aus A.E.G.-Hilfsbuch.)

durch ein übergeschobenes Rohr schützen. Abb. 333 zeigt eine Schelle für die Befestigung eines vertikal geführten Kabels an einer Wand, Abb. 334 die horizontale Lagerung mehrerer Kabel. Die Legung unter der Decke kann in entsprechender Weise erfolgen; bequemer ist es indessen, wenn man eine Kabelbrücke nach Abb. 410 vorsieht.

**2. Die Transformatorstationen.** a) **Der Bau derselben.** Die einfachste Transformatorstation ist die *Maststation* nach Abb. 335. Die Einrichtung derselben ist meist so, daß der Transformator sowohl hochspannungsseitig als auch niederspannungsseitig durch einfache Trennstücke oder ausschaltbare Sicherungen im Notfall abgetrennt werden kann. Auch Schutzdrosselspulen und Hörnerableiter werden meistens angeordnet. Derartige Stationen findet man zur Speisung einzelner Ortschaften oder bei Fabrikanlagen zur Beleuchtung abseits gelegener Lagerplätze. Sie können höchstens mit Transformatoren bis etwa 20 kW ausgerüstet werden und sind nicht gerade sehr beliebt, weil alle Apparate den Witterungseinflüssen ausgesetzt sind. Wenn die Spannung hochspannungsseitig nicht sehr hoch ist, kann man einen Bretterverschlag um die Apparate machen. Geschützter und daher beliebter sind die Stationen in gemauerten Häuschen. Abb. 336 stellt eine solche dar, wie sie zur Versorgung von Ortschaften bei Überlandzentralen häufig zu finden sind. Die ankommende Hochspannungsleitung kann durch Trennmesser abgetrennt werden. Sie geht dann innerhalb des Häuschens nach unten zu einem Ölshalter; hierauf über einen weiteren Trennschalter zu Drosselspulen, welche den nachfolgenden Transformator vor Wanderwellen schützen sollen. Sind mehr als ein Transformator vorhanden,

so können dieselben durch eine Wand voneinander getrennt und durch ein Drahtgitter von dem übrigen Raum abgeschlossen werden. Die Verteilung der Niederspannung geschieht einfach auf Marmortafeln, auf welchen Hebelschalter und Sicherungen für die verschiedenen abgehenden Freileitungen angeordnet sind. Die Bauhöhe einer solchen Transformatorstation ist durch die vorgeschriebene Höhe der Freileitung bestimmt. Bei Kabelnetzen genügen also niedrige Transformatorhäuser. In Städten und größeren Ortschaften werden die Transformatoren bei unterirdischer

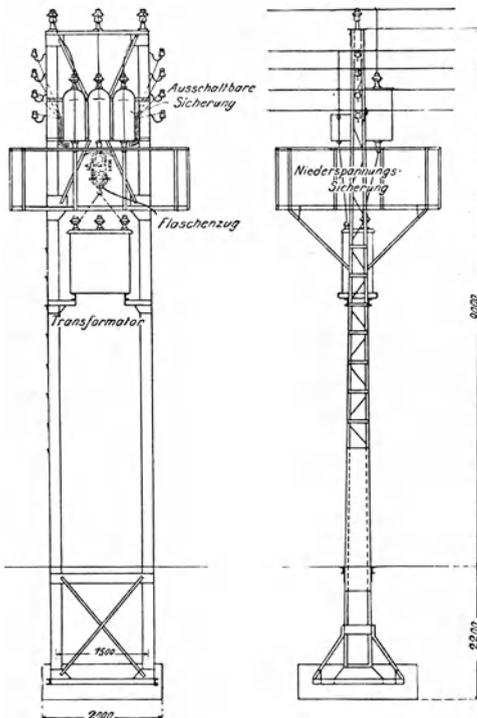


Abb. 335. Mast-Transformatorstation.

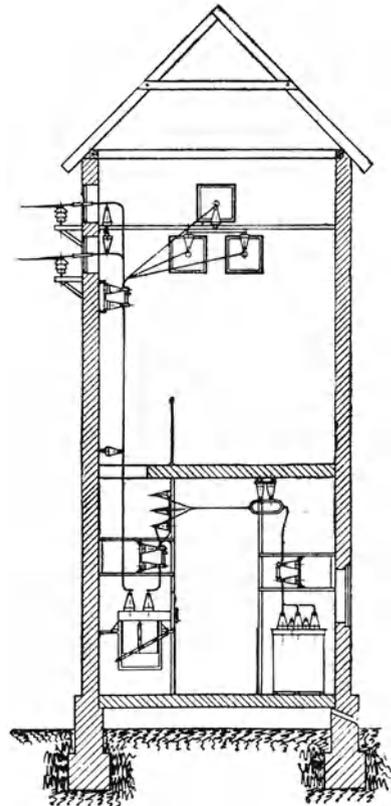


Abb. 336. Transformatorstation.

Leitungszuführung zuweilen in Litfassäulen, oder in unterirdischen Stationen untergebracht. Dieselben bieten im allgemeinen zwar wenig Raum, bilden aber in größeren Städten oft die einzige Möglichkeit für die Unterbringung. In Fabriken bietet der Bau kleiner Stationen an geeigneten Plätzen keine Schwierigkeit, auch ist es immer möglich, in den Fabrikgebäuden selbst passende Räume abzutrennen. Das Brummen der Transformatoren ist dort kaum störend. Wir wollen nun die Einrichtung einer größeren Station in einer Fabrik betrachten.

Abb. 337 stellt schematisch den Grundriß dar. Die ankommenden Hochspannungsspeisekabel  $K_a$  werden über Trennschalter und Öl-

schalter an die Hochspannungssammelschienen Sh geführt. Von diesen Sammelschienen zweigen nun in genau gleicher Weise die abgehenden Kabel Kh nach den Hochspannungsmotoren, sowie die Verbindungsleitungen mit anderen Stationen ab. Ferner gehen Abzweige Kl zu den drei aufgestellten Transformatoren, denen noch Schutzdrosselspulen D vorgeschaltet sind. Jedes ankommende und abgehende Kabel hat seine besondere Zelle, die von der nächsten durch dünne Wände (Duroplatten) getrennt ist. Einen bei a—b gelegten Schnitt zeigt Abb. 338. Das ankommende Kabel, welches durch den Endverschluß E verschlossen ist, wird über die Trennmesser T und einen Stromwandler W zum Ölschalter S und von hier zu den Sammelschienen Sh geführt. Diese sind doppelt vorhanden, damit man bei Reparaturen nicht den Betrieb stören muß.

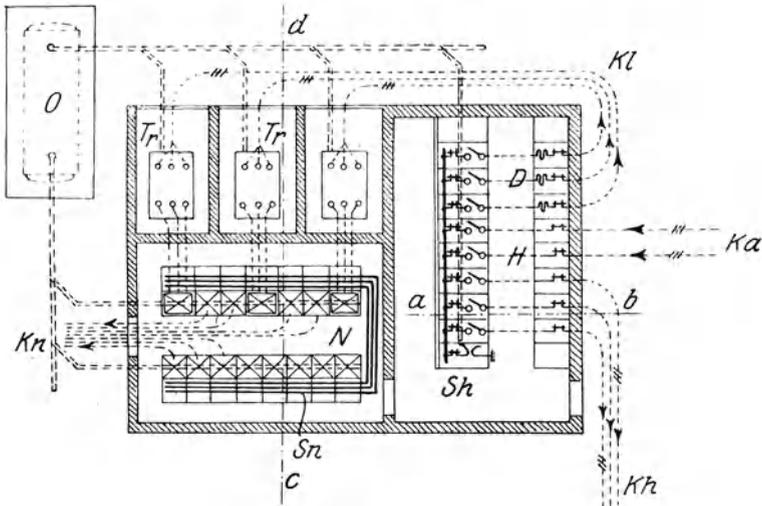


Abb. 337. Schematischer Grundriß einer größeren Transformatorenstation.

Alle Zellen sind von den Bedienungsgängen durch Türen aus Drahtgewebe abgetrennt. Damit die Berührung derartiger Metallteile ungefährlich ist, müssen alle an eine Erdungsleitung angeschlossen werden. Bei der Erdung ist darauf zu achten, daß durch den gelegentlichen Ausbau eines geerdeten Teiles, andere nicht von der Erdleitung abgetrennt werden. Die Anschlüsse müssen also parallel zueinander liegen. Unter den Ölschaltern befindet sich ein Ölabfluß O, der nach Abb. 337 in einen seitlich der Station im Boden liegenden Kessel O mündet. Es ist dies notwendig, damit bei größeren Ausführungen die großen und teuren Ölmengen bei Störungen nicht verloren gehen und bei Bränden dem Verbrennen entzogen werden. Damit sich bei einem Brand die Abflüsse nicht verstopfen können, sollten Transformatorenzellen glatte Steinwände ohne Putz haben. Die Hochspannungsanlage H ist nach Abb. 337 von der Niederspannungsanlage N völlig getrennt. Von der Niederspannungsseite der drei Transformatoren Tr führen Leitungen über drei Ausschalter zu den Niederspannungssammelschienen Sn, von

denen über eine Reihe weiterer Schalter nach den Kabeln  $Kn$  abgezweigt wird. Abb. 339 stellt einen Schnitt in Richtung  $c-d$  dar.  $Tr$  sind die in getrennten Räumen stehenden Transformatoren. Diese Zellen müssen

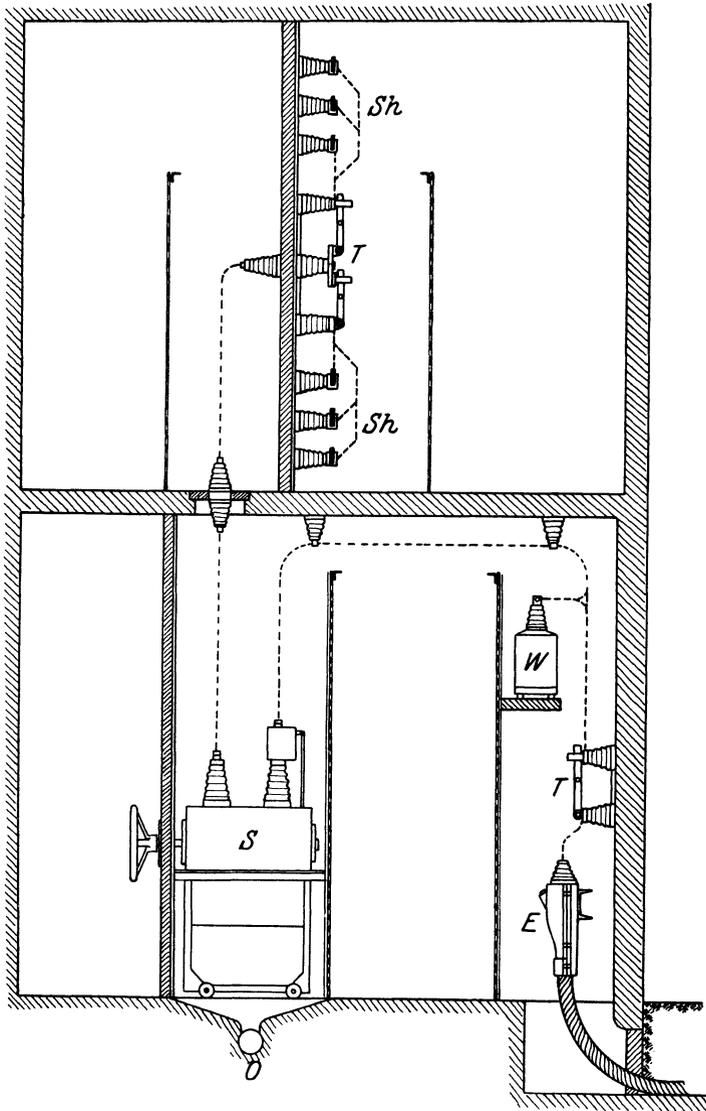


Abb. 338. Hochspannungsanlage.

gut entlüftet sein, damit die Erwärmung der Transformatoren keine unzulässige ist. Bei sehr großen Ausführungen ist sogar eine Signallvorrichtung am Platze, welche bei Erreichung der höchst zulässigen Temperatur Warnzeichen gibt und darüber hinaus den Transformator

abschaltet. Die Verteilung der Niederspannungsseite kann sehr verschieden ausgeführt werden. Bei der höchsten üblichen Spannung, 500 V, und größeren Leistungen ist es ratsam, nach Abb. 339 Ölschalter für die Verteilung zu nehmen, welche bei Überschreitung der für die abgehende Leitung höchst zulässigen Stromstärke selbsttätig abschalten. S sind diese Schalter. Auch hier sind zur Erhöhung der Betriebssicherheit zwei Sammelschienensysteme  $S_n$  genommen, die mittels der Trennmesser T nach Belieben eingeschaltet werden können. Die beschriebene Verteilung ist natürlich ziemlich teuer, aus welchem Grunde auch bei Spannungen von 500 V sehr oft statt der Ölschalter Hebelschalter mit

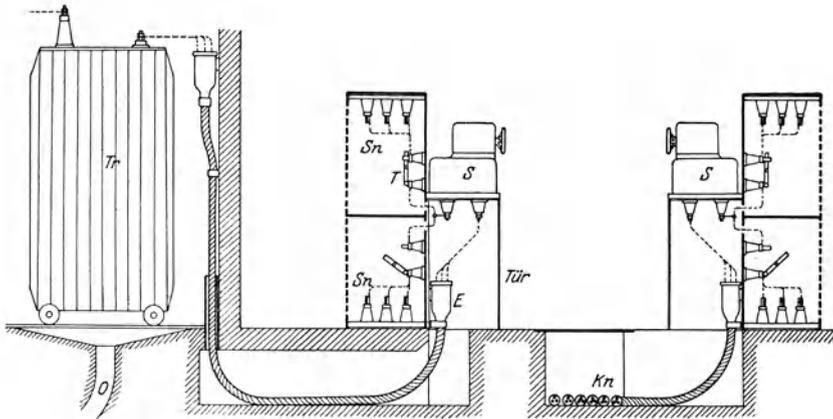


Abb. 339. Schnitt c—d der Abb. 337.

Abschmelzsicherungen verwandt werden. Besonders bei den niedrigeren Spannungen von 220 V und 110 V findet man diese Ausführung fast ausschließlich. Die Hebelschalter und Sicherungen werden auf einer Marmor- oder auch Blechtafel angeordnet, und zwar vielfach auf der Rückseite derselben, um Unfälle oder Beschädigungen der Tafel zu vermeiden.

**b) Die Hilfsapparate. Die Schalter.** Die einfachste Form der Schalter ist der in Hochspannungsanlagen zur Abtrennung von Leitungen und Apparaten dienende *Trennschalter*. Nach Abb. 340 besteht derselbe aus einem einfachen Messer, welches mit einer vorzüglich isolierten Hakenstange bewegt werden kann. Ein Abschalten unter Strom ist unter keinen Umständen zulässig, weil nicht nur der Bedienende, sondern die ganze Anlage gefährdet sein würde. Auch die Unterspannungsetzung einer längeren Leitung sollte man nicht damit vornehmen, weil doch schon die offene Leitung einen nicht unbedeutlichen Ladestrom aufnehmen kann, und weil ferner durch das Nacheinandereinlegen der Trennmesser Spannungserhöhungen möglich sind. Die nächst

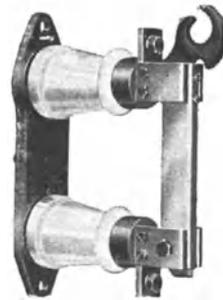


Abb. 340. Trennschalter.

vollkommenere Stufe der Schalter sind die *Hebelschalter*. Abb. 341 stellt einen dreipoligen Hebelschalter mit Momentausschaltung und für rückseitigen Anschluß der Leitungen dar. Die Momentausschaltung wirkt in der Weise, daß bei der Ausschaltbewegung zuerst eine Feder gespannt

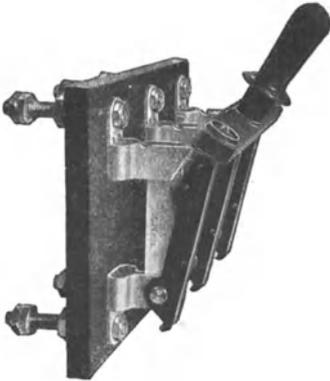


Abb. 341. Dreipoliger Hebelschalter.

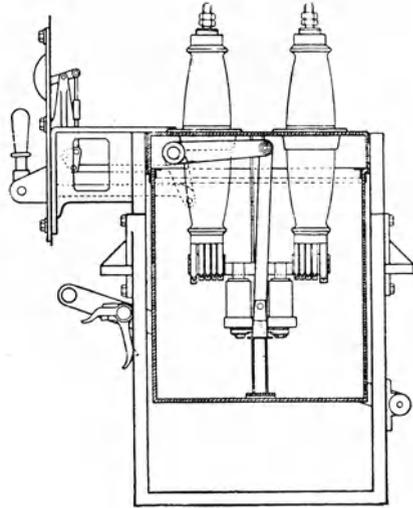


Abb. 342. Ölschalter.

wird, welche bei der Weiterbewegung auch dann das Kontaktmesser schnell von dem Kontakt abreißt, wenn die Bewegung des Handhebels

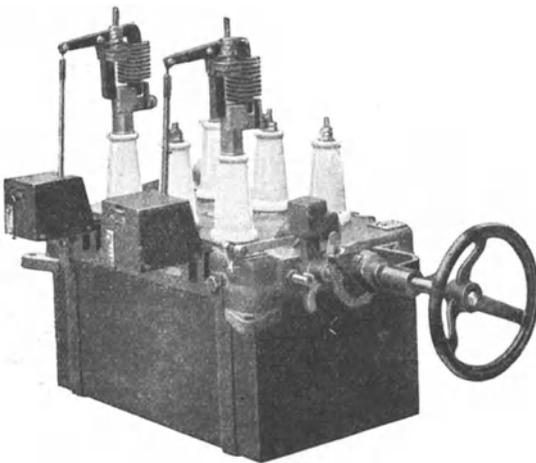


Abb. 343. Dreipoliger Ölschalter mit zweiphasiger Auslösung.

die gefahrlose Bedienung. Abb. 342 stellt die Wirkungsweise der Ölschalter dar. Mit Hilfe eines Hebels oder Handrades wird das horizontal liegende Messer unter Öl bewegt. Der Ölkasten selbst ist mittels des schrägen Hebels senkbar, so daß die Kontakte leicht nachgesehen

eine zögernde ist. Eine Schutzhaube über dem Schalter schützt den Bedienenden vor Verbrennungen. Es wurde bereits betont, daß Hebelschalter hauptsächlich nur bei Niederspannungsverteilungen zur Anwendung kommen und schon bei 500 V nicht mehr gern gesehen sind. An ihre Stelle tritt dann der *Ölschalter*, bei welchem sich der Ausschaltvorgang unter Öl abspielt. Der Hauptvorteil dieses Schalters ist seine große Betriebssicherheit und

werden können. Abb. 343 zeigt das Äußere eines dreipoligen Öl-schalters. Die beiden Apparate auf den Durchführungsisolatoren sind Auslöser, auf die wir im nächsten Abschnitt zu sprechen kommen.

*Die Sicherungen.* Wir haben bereits ge-hört, daß jede Leitung zur Vermeidung un-zulässiger Erwärmung nur mit einem be-stimmten Strom belastet werden darf. Damit derselbe nicht überschritten wird, bauen wir Sicherungen ein, welche bei Niederspannung fast immer Abschmelzsicherungen, bei Hoch-spannung meistens Auslöser sind. Die voll-kommensten Abschmelzsicherungen sind die *Stöpselsicherungen*. Abb. 344 zeigt deren Aus-führung. Inmitten einer Patrone befindet sich der Schmelzdraht D, welcher oben und unten an Kontaktblättchen angelötet ist. Die Patrone steckt lose in einer mit Gewinde versehenen Schraubkappe, welche in das Gewinde G des Sockels eingeschraubt werden kann. Die Patrone bekommt aber nur dann Kontakt mit dem Sockelkontakt F, wenn ihr Durchmesser d kleiner ist, als der Durchmesser  $d_1$  der isolierenden Paßschraube P. Man erreicht dadurch, daß nie eine größere Sicherung als für die Leitung zulässig ist, eingesetzt werden kann, was bei nach-lässigem Personal und auftretenden Störungen leicht ver-sucht wird. Der Strom wird also dem mittleren Kontakt F zugeleitet, durchfließt den Schmelzdraht D und wird über das Gewinde G fortgeleitet. An einem kleinen Kennplättchen, welches beim Durchschmelzen von der Patrone abfällt, er-kennt man, daß sie durchgebrannt ist. Derartige Stöpsel-sicherungen sind bis 200 A und 500 V erhältlich. Bei größeren Stromstärken kommen *Streifensicherungen* in Frage. Abb. 345 zeigt einen Schmelzstreifen und Abb. 346 eine zweipolige Streifensicherung ohne den unbedingt erforderlichen Schutz-kasten. Wegen ihrer größeren Unfallsicherheit und leichten Auswechsel-barkeit sind die Röhrensicherungen sehr beliebt. Der Schmelzdraht befindet sich in einer isolierenden Hülse, die wie ein Trennmesser herausgenommen werden kann.

Der auf einer Abschmelzsicherung angegebene Strom heißt *Nennstrom*. Die Sicherung vermag das 1,25fache dieses Nennstroms gerade noch dauernd zu ertragen. Wird sie höher belastet, so schmilzt sie durch, und zwar um so schneller, je größer der Strom ist.

Alle Abschmelzsicherungen haben den Übelstand, daß jedes Durchschmelzen, welches auch durch ungefährliche Stromstöße bei kurzzeitigen Überlastungen eintritt, eine mehr oder weniger lange

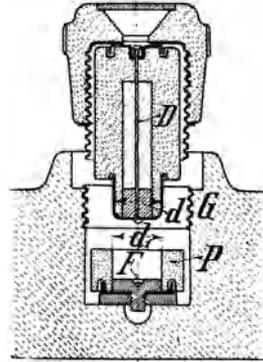


Abb. 344. Patronen-sicherung.  
(Aus Preger-Lehmann, Unfallverhütungs-Technik.)



Abb. 345. Schmelz-streifen.



Abb. 346. Zweipolige Streifensicherung.

Betriebsstörung verursacht. Außerdem treten schon bei Spannungen von 500 V zuweilen gewaltige Zerstörungen ein, insbesondere dann, wenn von der Sicherung starke Leitungen zum Kraftwerk führen. Aus diesen Gründen verwendet man heute auch bei den 500 V-Verteilungen schon gern keine Abschmelzsicherungen mehr, sondern läßt mittels eines Auslösers den Ölschalter, der ja leicht und gefahrlos abschalten kann, die Unterbrechung besorgen. Bei den eigentlichen Hochspannungsanlagen aber verbietet sich die Verwendung von Abschmelzsicherungen überhaupt, und zwar einmal wegen der Gefährlichkeit der beim Durchschmelzen auftretenden Lichtbögen, dann aber auch, weil dieselben beim Verlöschen Überspannungen verursachen können. Hinzu kommt noch, daß durch das Durchbrennen nur einer Sicherung, die Leitung wie durch das Nacheinandereinschalten von Trennmessern einer Spannungserhöhung ausgesetzt sein kann. Während man Abschmelzsicherungen immer in allen Leitungen, außer den geerdeten anordnet, kann man bei den Auslösern

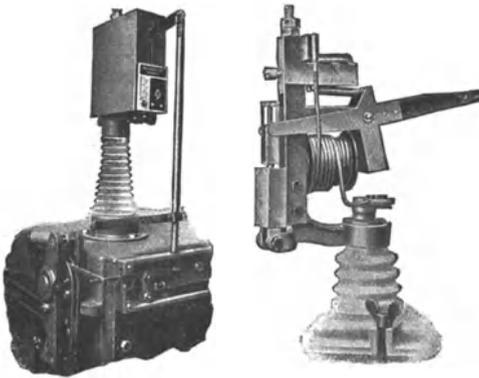


Abb. 347. Auslösemagnet.

hiervon absehen. Es genügt, wenn in Wechselstromleitungen eine und wenn bei Drehstromnetzen zwei der Leitungen einen Auslöser bekommen, weil ja doch der Strom in der freien Leitung nicht anwachsen kann, ohne daß auch derjenige in einer der anderen Leitungen größer wird. Wenn allerdings das Drehstromnetz einen geerdeten Nullpunkt hat, trifft dies nicht mehr zu, und wir brauchen drei Auslöser. Die einfachste Überstrom-Aus-

lösung besteht nach Abb. 347 aus einem auf dem Durchführungsisolator des Ölschalters (s. auch Abb. 343) angeordneten Magneten, dessen Spule von dem Hauptstrom durchflossen ist. Erreicht dieser Strom eine unzulässige Höhe, so wird unter Überwindung einer Federkraft der Kern in die Spule hineingezogen. Diese Bewegung ist aber durch eine Dämpfung verzögert, und es dauert einige Sekunden, bis der Kern seine Bewegung vollendet hat. Dann erst löst die vertikale Schaltstange aus Isolierstoff eine Klinke, welche den Ölschalter in der Einschaltstellung festhielt, und Federn, die beim Einschalten gespannt wurden, besorgen die Ausschaltung. Je größer der Überstrom ist, um so schneller wird auch der Auslöser seinen Weg vollendet haben. Die Auslösezeit ist demnach bei dieser Auslösung genau wie bei einer Abschmelzsicherung von der Größe der Stromstärke abhängig. Dies ist oft ein Nachteil, denn wenn z. B. im Netz ein stärkerer Überstrom auftritt, wird nicht nur der Schalter, welcher die gefährdete Leitung schützt, ausschalten, sondern auch die weiter nach der Zentrale liegenden Schalter, die auch von dem großen Strom durchflossen sind. Es liegt dies daran, daß bei so hohem Strom derartige Schalter fast augenblicklich auslösen.

Man bevorzugt aus diesem Grunde vielfach die sog. unabhängigen Auslösungen, bei welchen die Auslösezeit eine ganz bestimmte und einstellbare ist, die nicht von der Größe des Stromes abhängt.

Die direkte Auslösung nach Abb. 347 ist zwar einfach und billig, ihr ist jedoch eine solche nach Abb. 348 vorzuziehen, bei welcher Stromwandler benutzt werden, deren Sekundärströme die Auslösemagnete durchfließen und bei übernormalem Betrag eine allmähliche Anziehung der Kerne und eine Lösung der die Schaltwelle haltenden Klinke bewirken. In diesem Falle sind alle Teile der Auslösung der gefährlichen Hochspannung entrückt.

Als vorbeugender Überschutz dient auch die sog. *Nullspannungsauslösung*, welche die Aufgabe hat, den Schalter auszuschalten, sobald aus irgend einem Grunde die Spannung ausbleibt. Es ist dies besonders bei Motorenbetrieb wichtig, bei welchem die wiederkehrende Spannung kurzgeschlossene Motoren vorfindet, wenn nicht der Bedienende für ein rechtzeitiges

Vorschalten des Anlassers sorgt. Nach Abb. 349 fließt normal der Sekundärstrom eines Spannungswandlers durch die Spule eines Nullspannungsmagneten. Bleibt die Spannung aus, so läßt dieser Magnet seinen Kern los, und dieser löst die Klinke. Auch durch Drücken eines Druckknopfes kann die Auslösung erfolgen. Bei allen Überstromauslösungen ist sowohl die Größe des Stromes, bei welchem der Schalter auslösen soll, als auch die Auslösezeit in gewissen Grenzen einstellbar, und zwar erfolgt diese Einstellung bei den beschriebenen Ausführungen immer am Schalter.

Bequemer ist es, wenn man den Sekundärstrom der Stromwandler einem Relais zuführt, welches ähnlich wie ein Zähler gebaut sein kann und dessen Scheibe bei Überstrom in Drehung kommt. Hierdurch wird nach Ablauf einer einstellbaren Zeit ein Kontakt geschlossen oder auch geöffnet, welcher den Auslösemagneten zur Lösung der Klinke veranlaßt. Da das Relais an beliebiger Stelle angebracht werden kann, ist hier die Einstellung des Auslösestromes und der Zeit sehr bequem.

Bei den besprochenen Überstromauslösungen wäre es denkbar, daß der Bedienende bei Vorhandensein eines Kurzschlusses das Handrad

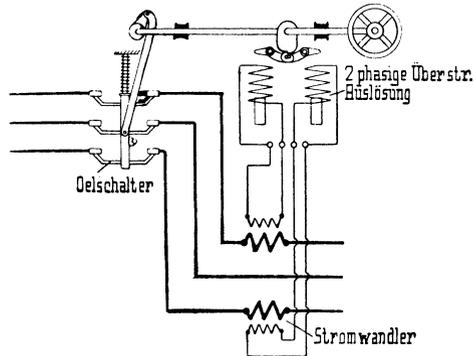


Abb. 348. Zweiphasige Überstromauslösung mit Stromwandlern.

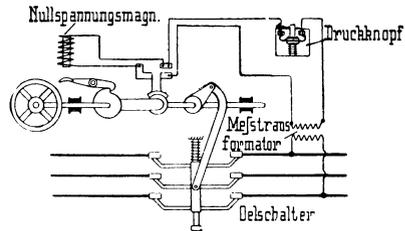


Abb. 349. Nullspannungsauslösung mit Spannungswandler und Ausschaltedruckknopf.

festhielte, so daß der Schalter nicht auslösen könnte. Um dies zu verhindern, gibt man den Schaltern meist eine sog. *Freiauslösung*, bei welcher das Handrad nicht starr mit der Schalterwelle verbunden ist. Eine Kuppung verbindet beide miteinander, und das Auslösen erfolgt einfach in der Weise, daß die verbindende Kuppung gelöst wird.

Die Größe des einzustellenden Auslösestromes richtet sich nach dem Leitungsquerschnitt und ist so zu bemessen, daß dauernd kein höherer Strom durch die Leitungen fließt, als die Tabelle S. 228 vorschreibt. Die Einstellzeit richtet sich nach dem Betrieb. Wo Stromstöße selten sind, kann man kurz einstellen. Im Bahnbetrieb z. B., oder im Hüttenwerksbetrieb treten fortwährend kurzzeitige Überströme auf, welche den Schalter nicht zur Abschaltung bringen sollen. Wir müssen also eine längere Zeit einstellen, wobei aber grundsätzlich festzuhalten ist, daß alle weiter nach der Zentrale hin liegenden Schalter stufenweise auf eine längere Auslösezeit eingestellt werden müssen, damit möglichst immer nur der Schalter der überlasteten Leitung abschaltet.

Die übrigen Hilfsapparate der Transformatorstationen, die Stromwandler, Spannungswandler und Hörnerableiter haben wir bereits früher besprochen.

**3. Die Verteilungspunkte.** Aus dem Beispiel Abb. 314 haben wir bereits die elektrische Energieverteilung im allgemeinen kennen gelernt. Wir wollen jetzt die einzelnen Verteilungspunkte näher betrachten und fassen zunächst die Hochspannungsmotoren  $M_1$ , die an der Spannung von

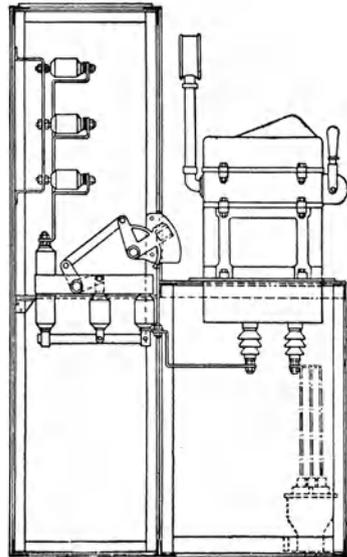
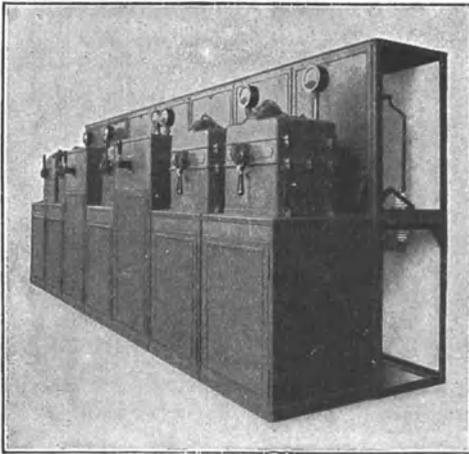


Abb. 350. Hochspannungsverteilung. Das Ausschalten der Trennmesser geschieht von vorn.

5000 V liegen, ins Auge. Ist ein derartiger Motor so groß, daß eine Zelle der Transformatorstation Tr allein für ihn geopfert werden

kann, so genügte eigentlich der in der Station bereits eingebaute Schalter mit Auslösung zum Ein- und Ausschalten des Motors. Derselbe wird aber selten der Station so nahe stehen, daß dies aus betriebstechnischen Gründen möglich ist. Er bedarf deshalb noch eines weiteren Schalters, auf den wir später noch zurückkommen. Stehen mehrere Hochspannungsmotoren in einem Raum zusammen, so können dieselben von einer Verteilung  $V_4$  aus geschaltet werden. Eine derartige Verteilung kann in sauberen und trockenen Räumen genau wie eine Verteilung in einer Transformatorenstation, also nach Abb. 338 ausgeführt werden. Da dieser Fall aber selten ist und zudem die Bedienenden nicht immer die wünschenswerte Schulung haben, zieht man meistens gekapselte Verteilungen vor. Abb. 350 zeigt eine derartige Anlage, und sie enthält nichts weiter, als in den hinteren Schränken die Sammelschienen und

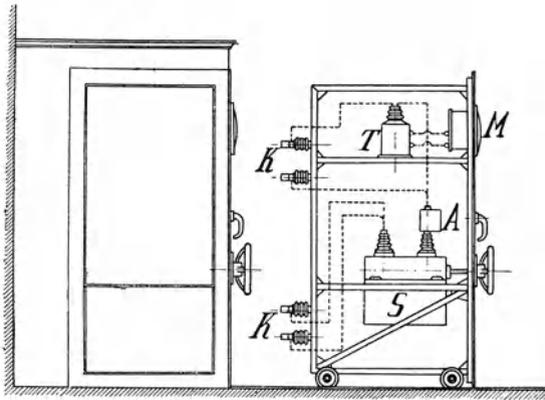


Abb. 351. Hochspannungsverteilung mit ausfahrbaren Feldern. S = Ölschalter. A = Auslöser, T = Stromwandler, M = Strommesser.

(Aus Preger-Lehmann, Unfallverhütungs-Technik.)

Trennmesser und vorn die Ölschalter mit den selbsttätigen Auslösungen. Um bei Reparaturen schnell und gefahrlos an die Apparate heranzukönnen, werden zuweilen nach Abb. 351 die Verteilungsfelder ausfahrbar gemacht. Besondere Trennschalter sind dann nicht erforderlich, weil die Kontakte K als solche wirken. Das eingeschaltete Feld ist natürlich verriegelt, es kann nur im ausgeschalteten Zustand ausgefahren werden. Stehen unsere Hochspannungsmotoren vereinzelt und weit auseinander, dann stellen wir den Schalter eines jeden möglichst neben den Motor. Weitere Hochspannungsabzweige hatte unsere Transformatorenstation nur noch nach den anderen Stationen  $Tr_2$  usw., deren Verteilungen genau mit derjenigen der besprochenen Station übereinstimmen.

Die erste Verteilung mit der Betriebsspannung der mittleren Motoren, die in unserem Beispiel 500 V betrug, haben wir bereits betrachtet, und sie war in der Transformatorenstation untergebracht. Von ihr aus gehen je nach der Belastung eine oder mehrere Leitungen nach einer 500 V Unterverteilung  $V_1$ , welche in dem Fabrikgebäude Aufstellung findet.

Man wird naturgemäß anstreben, daß jedes Gebäude nur eine derartige Kraftverteilung hat, weil dies übersichtlicher und für die Bedienung einfacher ist. Zuweilen geht dies aber nicht, weil vielleicht sehr viel mehr Leitungsmaterial gebraucht wird, oder weil der Verteilungspunkt für manche Gebäudeabschnitte unzugänglich ist. Dann ist eine Unterteilung der Verteilung notwendig. Die Ausführung der Verteilung  $V_1$  kann ebenso verschieden sein, wie diejenige der früheren. In einer sauberen und trockenen Werkstatt ist die Verwendung von Hebelschaltern auf einer Tafel ohne weiteres möglich, wenn dafür gesorgt ist, daß Unberufene nicht an die Tafel können. Es könnte also ein verschließbarer Raum abgetrennt werden, oder man stellt die Tafel in dem durch die Verbandsvorschriften verlangten Abstand an einer freien Wand auf und umschließt das ganze mit Drahtgewebe oder einer Blech-

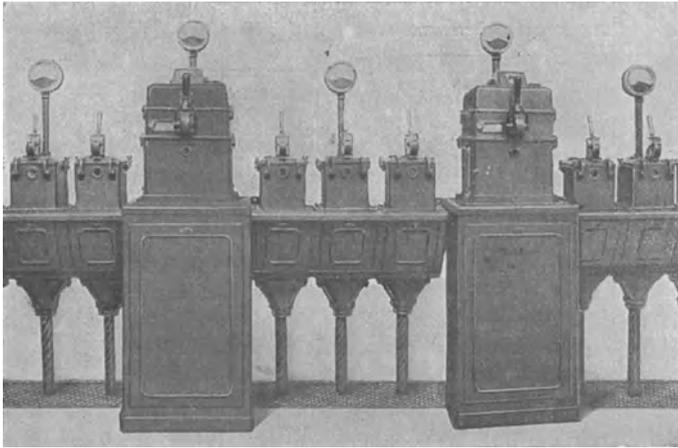


Abb. 352. Verteilungsanlage mit Ölschaltern und Sicherungen für geringere Spannungen (500 V).

verkleidung. In allen Fabrikanlagen jedoch, in welchen es weder trocken noch reinlich ist, sollte man von der Verwendung von Hebelschaltern auf Marmor absehen, ganz besonders bei der schon ziemlich gefährlichen Spannung von 500 V. Es ist dann ratsam, entweder Ölschalter zu verwenden oder vollkommen gekapselte Luftschalter. Eine Verteilung mit Ölschaltern zeigt Abb. 352. In dem abgeschragten unteren Kasten befinden sich die durchgehenden Sammelschienen, an welche die Schalter der abgehenden Leitungen direkt angeschlossen sind. Die beiden großen Schalter liegen in den Zuleitungen, welche durch Trennmesser von den Sammelschienen geschieden werden können. Alle Schalter besitzen Abschmelzsicherungen unter Öl. Es ist bei denselben zu beachten, daß eine Sicherung unter Öl erheblich später durchbrennt als in Luft, daß also richtig bemessene Schmelzstreifen verwandt werden. Es ist ferner zu erwähnen, daß die sonst üblichen Silberschmelzstreifen bei Durchbrennen unter Öl zu Schwierigkeiten Veranlassung geben können. Der-

artige Schalterbatterien können auch in schmutzigen und feuchten Räumen zur Anwendung kommen und vertragen eine rauhe Behandlung ohne weiteres. Da sie jedoch teuer sind, zieht man oft die eisengekapselten Luftschalter vor. Eine Batterie solcher Schalter ist in

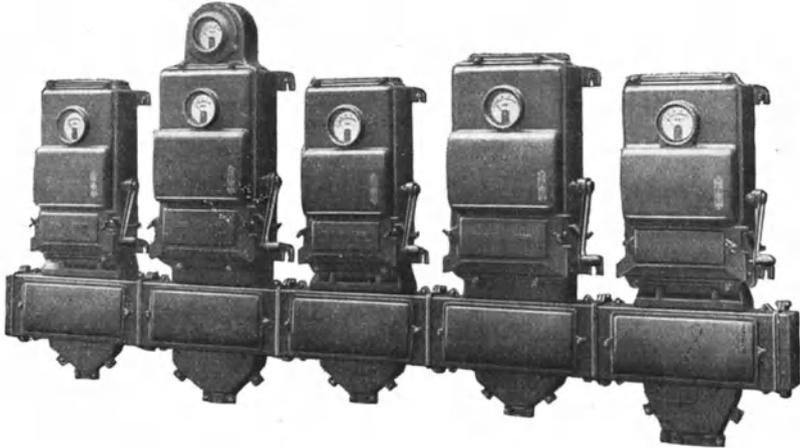


Abb. 353. Verteilungsanlage mit gekapselten Luftschaltern und Sicherungen.

Abb. 353 dargestellt. Der untere durchlaufende Kasten enthält die Sammelschienen, von denen alle Schalter abzweigen. Der zweite Schaltkasten liegt in der Zuleitung. Die Klappe, welche die Sicherungen abdeckt, läßt sich nur dann öffnen, wenn der Schalter ausgeschaltet ist, und umgekehrt kann man nicht einschalten, solange jene Klappe offen ist. Diese Verriegelung erreicht man entweder durch im Inneren angebrachte Klinken, oder auch durch eine Schlitzführung in der Verschlussklappe. Die ankommende Leitung der Verteilung  $V_1$  in Abb. 314 braucht nicht unbedingt Schalter und Sicherung zu haben, es würde auch genügen, wenn nur Trennmesser vorhanden wären. Bei der Schaltkastenreihe Abb. 353 dienen die unteren schrägen Stützen als Kabelendverschlüsse. Wenn; wie es öfter vorkommt, die Kabel von oben herunter kommen, können die Kabelstutzen auf den Kopf der Schaltkästen gesetzt werden. Es besteht dann jedoch die Gefahr, daß das Kabelöl durch die Metallader hindurchsickert und ausläuft. Um dies zu verhindern kann man entweder die Kabellitze innerhalb des Endverschlusses in die Einzeldrähte auflösen, oder man führt die Kabel nach Abb. 354 aus, wenn Platz dafür da ist. Die Größe der Verteilungsschalter richtet sich nach der Leistung der Motoren, die ihrer Lage nach und aus betriebstechnischen Gründen zu einem Stromkreis zusammengefaßt

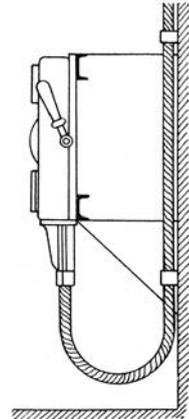


Abb. 354.  
Kabelanschluß  
von oben.

werden. Die Schalter sind möglichst gleicher Größe zu nehmen. Es ist klar, daß man an die gleiche Verteilungsleitung möglichst nur Motoren legt, deren Maschinen ohnehin voneinander abhängen, damit bei einer Störung an irgend einer Stelle ein Mindestmaß des Betriebes gestört ist. Ganz falsch wäre es z. B. von zwei Aufzügen, von denen der eine als Reserve anzusehen ist, beide Motoren an den gleichen Stromkreis gelegt wären. Dann würden bei einer Störung des elektrischen

Teiles beide Maschinen außer Betrieb sein.

Wenn von den Motoren  $M_2$  der Abb. 314 einer so groß ist, daß er als Einzelmotor an einer Leitung hängt, könnte man auf den Schaltkasten am Motor verzichten, wenn sich die Verteilung  $V_1$  in nächster Nähe des Motors befindet.

In dem genannten Schema ist die Zuleitung zu dem Lichttransformator  $T_4$  von der 500 V-Verteilung der Transformatorstation abgezweigt. Das ist zwar sehr gut, weil das Lichtnetz von den Spannungsschwankungen des Kraftnetzes bewahrt bleibt, aber auch teuer.

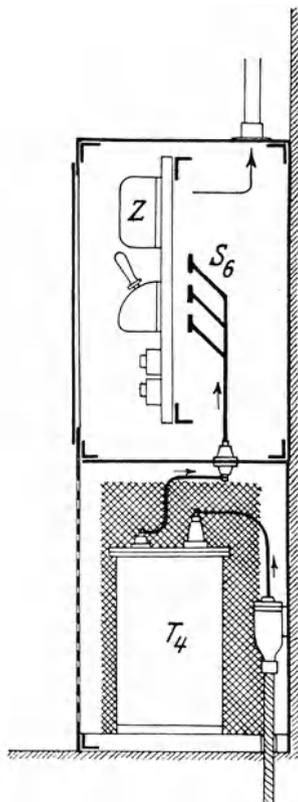


Abb. 355. Hauptlichtverteilungspunkt mit Transformator.

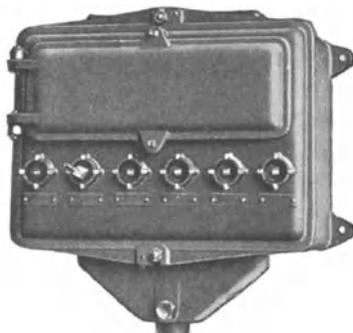


Abb. 356. Lichtstromverteilung.

Man zieht es deshalb in Fabriken meistens vor, den Lichttransformator von der Kraftverteilung  $V_1$  aus zu speisen. Beträgt die Spannung dieser Verteilung unter 250 V, oder haben wir es mit dem Netz nach Abb. 325 zu tun, so kann von hier aus die Lichtstromverteilung ohne Transformator vor sich gehen. Der auf der Hochspannungsseite des Transformators  $T_4$  gezeichnete Schalter mit Sicherung kann fehlen, wenn nur ein Transformator an der Leitung hängt. Dann ist aber der zugehörige Schalter der Verteilung in der Transformatorstation nicht nach dem Querschnitt der zum Transformator  $T_4$  gehenden Leitung, sondern nach dem kleineren

Normalstrom des Transformators einzustellen. Die Ausführung der Verteilung  $V_2$  kann nach Abb. 355 erfolgen. In einem eisernen Schrank, der an geschützter Stelle des Fabrikgebäudes Aufstellung findet, ist mit guter Entlüftung unten der Transformator  $T_4$  und völlig getrennt davon in dem oberen Teil eine Verteilungstafel mit Schalthebeln und Sicherungen untergebracht. Auch ein Zähler  $Z$  kann angeschlossen werden. Verlangt der Transformator noch einen Primärschalter, so kann man neben der Verteilung noch einen Schaltkasten aufhängen.

In schmutzigen Betrieben ist die Ausführung nach Abb. 355 nicht sehr zu empfehlen, weil dieselbe nicht leicht zu dichten ist. Man zieht dann eine gekapselte Verteilung vor, wobei der Transformator entweder hoch an der Wand auf eine Wandstütze gesetzt oder sonstwie der zufälligen Berührung entzogen wird. Während ein solcher Lichttransformator im allgemeinen ein größeres Fabrikgebäude oder auch mehrere zusammenliegende kleine versorgt, sind die Abzweige an der Verteilung  $V_2$  meist so bemessen, daß auf jeden etwa ein Stockwerk oder ein sonstiger Abschnitt eines größeren Gebäudes oder auch die ganze Beleuchtung eines kleinen Werkshauses entfällt.

Die letzten Verteilungen  $V_3$  schließlich sind möglichst im Mittelpunkt der angeschlossenen Lampen anzubringen. Man verwendet meist 6 A-Sicherungen für die Abzweige. Die Zahl der anzuschließenden Lampen ist durch diese Annahme festgelegt. Auch ganz kleine Motoren  $M_3$  können hier angeschlossen werden (Ventilatoren). Während man in Wohnräumen, sowie in Geschäftsgebäuden fast ausnahmslos diese Lichtverteilungen auf Marmortäfelchen unterbringt, ist in unsauberen Fabrikräumen wieder die gekapselte Verteilung nach Abb. 356 vorzuziehen. Die Drehschalter können ohne den Kasten zu öffnen mittels Steckschlüssels eingeschaltet werden.

## X. Die elektrischen Beleuchtungsanlagen.

### A. Der Lichtbedarf.

Als Einheit der Beleuchtung dient das *Lux*, das ist diejenige Helligkeit, welche eine Normkerze im Abstand 1 m erzeugt. Eine Lampe mit der Lichtstärke  $I$  Normkerzen erzeugt also in einem Abstand  $r$  auf einer ihr senkrecht zugekehrten Fläche die Beleuchtung  $E$ :

$$E = \frac{I}{r^2},$$

da doch die Beleuchtung mit dem Quadrate der Entfernung  $r$  abnimmt. Neigen wir die beleuchtete Fläche, so nimmt die Helligkeit ab, der obige Ausdruck ist dann noch mit dem Kosinus des Neigungswinkels zu multiplizieren Also:

$$E = \frac{I}{r^2} \cdot \cos \alpha.$$

Die erforderliche Helligkeit hängt von dem Verwendungszweck des zu beleuchtenden Raumes ab. Man braucht etwa die in nachstehender Tabelle angegebenen Beleuchtungsstärken:

|                                   | Lux               | HK/m <sup>2</sup> |
|-----------------------------------|-------------------|-------------------|
| Wohnräume . . . . .               | 10— 15 . . . . .  | 2— 3,5            |
| Fabrikhallen . . . . .            | 10— 20 . . . . .  | 2— 4              |
| Spinnereien, Webereien . . . . .  | 15— 25 . . . . .  | 3— 5              |
| Schlossereien . . . . .           | 25— 35 . . . . .  | 5— 7              |
| Mechanikerwerkstätten . . . . .   | 35— 50 . . . . .  | 7—10              |
| Druckereien, Setzereien . . . . . | 50— 80 . . . . .  | 10—16             |
| Präzisionsarbeiten . . . . .      | bis 100 . . . . . | bis 20            |
| Fabrikhöfe . . . . .              | 5— 10 . . . . .   | 1— 2              |

Die letzte Spalte der Tabelle gibt die für ein m<sup>2</sup> Bodenfläche etwa benötigte Lichtstärke an, woraus man leicht überschläglich berechnen kann, wieviel kW ein Gebäude an Beleuchtung verbraucht und wieviel Verteilungen zweckmäßig anzuordnen sind. Man kann dabei annehmen, daß eine HK einem Watt entspricht.

In jedem Fabrikraum sind zwei Beleuchtungsmöglichkeiten zu unterscheiden: Allgemeinbeleuchtung und Einzelplatzbeleuchtung. Im allgemeinen kommen beide gleichzeitig vor und zwar überwiegt die Allgemeinbeleuchtung oder ist ausschließlich anzuwenden, wenn die Arbeiten an wechselnden Stellen ausgeführt werden, wie in Montagehallen, oder auch, wenn das Lichtbedürfnis eines Fabrikraumes sowohl zeitlich als örtlich überall das gleiche ist, wie z. B. bei Drehbank-Automaten, die in Reihen nebeneinander stehen und alle die gleiche Helligkeit und zu gleicher Zeit brauchen. Die Einzelbeleuchtung ist indessen vorzuziehen, wenn einzelne Maschinen eine besonders starke Helligkeit benötigen oder auch öfter in Über- oder Nachtschichten arbeiten. Jede Einzelplatzbeleuchtung erfordert aber daneben eine, wenn auch schwache Allgemeinbeleuchtung. Diese ist nicht nur wegen der Unfallsicherheit nötig, sondern auch mit Rücksicht auf das Auge. Dasselbe paßt sich nämlich dem jeweiligen Beleuchtungsgrad an und würde leicht durch das Licht der Einzelbeleuchtung geblendet werden, wenn es zuvor im Anblick dunkler Stellen des Raumes ausruhen konnte. Es wäre also eine gleichmäßige Lichtverteilung anzustreben, die aber nicht schattenlos sein dürfte, weil eine geringe Schattenbildung zum genauen Sehen wünschenswert ist. Räume, von denen aus nach außen beobachtet werden muß, wie Führerhäuser an Kranen oder Stellwerke dürfen nur schwach beleuchtet sein, auch sind die Lampen abzublenden.

## B. Die Anordnung der Beleuchtung.

Wir haben also in jedem Einzelfalle nach Prüfung der örtlichen Verhältnisse zu entscheiden, inwieweit Allgemeinbeleuchtung ausreicht oder Einzelbeleuchtung anzuwenden ist. Die Lampen einer Allgemeinbeleuchtung werden im allgemeinen gleichmäßig im Raum verteilt, nur wenn Maschinen oder dgl. die Lichtstrahlung behindern, ordnet man entsprechend anders. In Hallen, die von einem Kran befahren werden, ist die Aufhängung der Lampen oft deswegen schwierig, weil

der Kran bis unter die Decke geht. Man kann dann die Lampen nach Abb. 357 in die Decke einlassen oder überhaupt auf Deckenlampen verzichten. In letzterem Fall müßten an die Stelle der Deckenlampen Seitenlampen treten. Neben der Allgemeinbeleuchtung ist die Beleuchtung der Treppen und der Ein- und Ausgänge zu beachten. Die Frage, ob viele kleine Lampen oder wenige große anzuordnen sind, entscheidet sich durch die Höhe und den Bau des zu beleuchtenden Raumes. Wir müssen eine möglichst gleichmäßige Bodenelligkeit bei geringer Lampenzahl anstreben und können diese beiden Bedingungen nur erfüllen, wenn wir in hohen Hallen hochkerzige Lampen verwenden. In niedrigen Arbeitsräumen müssen hingegen viele kleine Lampen aufgehängt werden. Die Bogenlampe kommt heute wegen der hohen Bedienungskosten kaum noch in Frage.

In Gebäuden, in denen Störungen an der Lichtenanlage den ganzen Betrieb gefährden könnten, wie z. B. in Kessel- und Maschinenhäusern, ist eine erhöhte Sicherheit nötig. Zunächst wird man dafür sorgen, daß die einzelnen Verteilungsstromkreise nicht stark belastet sind. Dann ist es ratsam, jeder Lichtverteilung nicht einen scharf umgrenzten Gebäudeabschnitt zuzuweisen, sondern man speist von einem Verteilungspunkt auch Lampen, welche in dem Verteilungsabschnitt einer anderen Verteilung angebracht sind. Man erreicht damit, daß bei einer Störung an einer Verteilung nicht dieser Betriebsabschnitt ganz dunkel ist, sondern noch durch einige Lampen einer anderen Verteilung notdürftig aufgehell wird. Es ist jedoch nicht zu vergessen, daß durch diese Anordnung die Leitungen länger als sonst werden, daß es also eine Verteuerung der Anlage ist. Die Sicherheit ist überdies nur eine beschränkte, denn wenn die Störung an der Hauptverteilung oder gar in der Zentrale ist, brennt keine Lampe. Da man aber gerade dann die Beleuchtung am dringendsten braucht, ist eine Notbeleuchtung in größeren Kraftwerken üblich, welche von einer Akkumulatorenbatterie gespeist wird. Man findet zuweilen diese Notlampen wie in Theatern so angeordnet, daß man leicht den Ausgang finden kann. Dies ist nicht richtig. Eher sollte man den Eingang finden können, vor allem aber muß man bei ihrem Licht die dringendsten Arbeiten verrichten können. Es müssen also in einem Kesselhaus die Manometer noch erkennbar und die Bedienung der Speisepumpen muß möglich sein. Damit eine solche Notbeleuchtung auch immer betriebsbereit ist, muß es zu den täglichen Arbeiten der Bedienenden gehören, sie für einen Augenblick einzuschalten. Das Einschalten erfolgt überhaupt zweckmäßig von einer zentral gelegenen Stelle aus, damit man im Notfall nicht die meist weniger bekannten Schalter zu suchen braucht, und damit ferner die Notbeleuchtung nicht zum normalen Betrieb eingeschaltet wird.

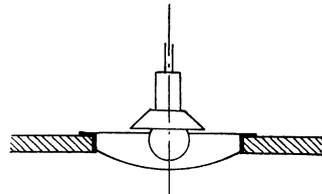


Abb. 357.  
Eingelassene Deckenlampe.

Für die Beleuchtung von Einzelplätzen lassen sich nur schwer allgemeine Richtlinien geben, da die Anordnung ganz von den örtlichen Verhältnissen und der Art der Tätigkeit abhängt. Damit man mit kleinen Lampen ausreicht, sollte die Lichtquelle möglichst dicht an den Arbeitspunkt gebracht werden, wobei aber die Lampe so anzubringen ist, daß das Auge nicht geblendet wird. Es sind also unter Umständen Reflektoren nötig, welche alle nach unerwünschten Richtungen gehenden Lichtstrahlen auf das Arbeitsstück werfen. Bei der Bearbeitung glänzender Gegenstände ist zu beachten, daß die das Auge ermüdenden und unter Umständen auch blendenden Glanzlichter um so stärker und unangenehmer sind, je mehr das Licht der Lampe von einem Punkt ausgeht.

Eine gewöhnliche Glühbirne ist also einer Halbwattlampe in diesem Falle vorzuziehen, wenn nicht die letztere durch eine Milchglaslocke ein verteilteres Licht aussendet. Bei der Festlegung einer Einzelbeleuchtung unterrichte man sich zunächst ganz gründlich über den Arbeitsvorgang, welcher an der zu beleuchtenden Stätte vor sich geht, insbesondere auch, wo und wann ein genaues Sehen erforderlich ist. Bei einer Kopfdrehbank wird es beispielsweise genügen, wenn vor der Planscheibe über Augenhöhe eine Lampe fest angeordnet wird. Bei langen Spitzdrehbänken kommt man hingegen kaum mit einer festen Lampe aus, sondern es ist über der Bank eine bewegliche Lampe anzubringen, welche da aufgehängt wird, wo gerade der Drehstahl arbeitet. Die richtige Beleuchtung von Schlosser-Werkbänken bietet ziemliche Schwierigkeiten. In den Fällen, in welchen die Reihe der Schraubstöcke dauernd besetzt ist und nicht sehr feine Arbeiten ausgeführt werden, begnügt man sich am besten mit einer Allgemein-

beleuchtung. Bei teilweiser Besetzung der Bank oder genauerer Arbeit ist eine Einzelbeleuchtung

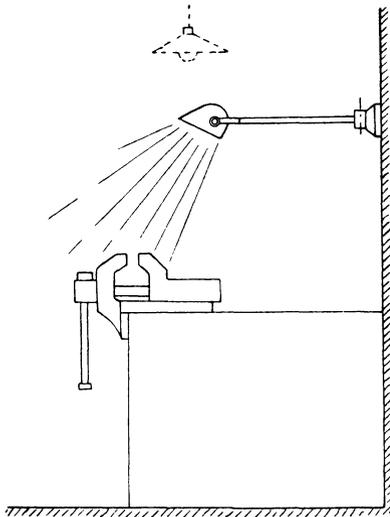


Abb. 358. Schraubstockbeleuchtung.

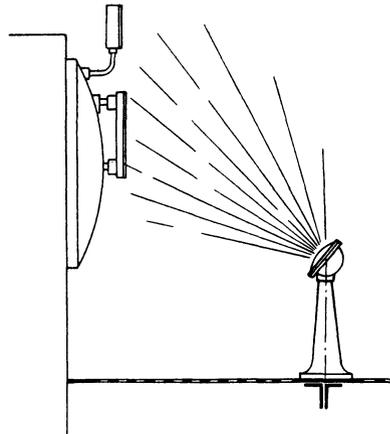


Abb. 359. Wasserstandsbeleuchtung.

mit herabhängenden Pendeln am einfachsten. Dieselben können auch verschiebbar eingerichtet werden, damit man nicht an jedem Schraubstock eine Lampe braucht. Für das Auge angenehmer ist jedoch eine Beleuchtung nach Abb. 358, bei welcher drehbare Arme eine Lampe mit Reflektor tragen. Der letztere ist auch drehbar und kann so gestellt werden, daß nur das Werkstück beleuchtet wird. In Kesselhäusern bietet oft die Beleuchtung der Wasserstände Schwierigkeiten, weil sich an dem Kessel selbst wegen der oft sehr hohen Temperaturen keine Beleuchtungskörper anbringen lassen, und weil eine Anbringung an der meist sehr hohen Decke noch schwieriger ist. Man kann dann auf der Wasserstandsbühne den Wasserständen gegenüber Säulen oder kleine Mauerpfeiler errichten, auf denen man eine seitlich abgeblendete Lampe anbringt, wie dies Abb. 359 zeigt. Für die Ablesung von

Instrumenten, wie Manometer, Zugmesser ist immer eine abgeblendete Lampe vorzuziehen. Um noch ein weiteres Beispiel anzuführen, sei die Beleuchtung einer Filterpresse erwähnt, welche bekanntlich zum Filtrieren größerer Flüssigkeitsmengen in chemischen Fabriken dient. Die Aufgabe der Beleuchtung ist bei ihr eine zweifache: Im Betrieb hat der Bedienende die Reihe von Abläufen, welche längs der Presse sind, genau zu überwachen, damit nicht trübe Flüssigkeit ausläuft. Am besten wäre hierzu eine Beleuchtung hinter den Ausläufen geeignet. Da man dieselbe aber mit Rücksicht auf die Unsauberkeit unter der Presse nicht gebrauchen kann, ist eine Beleuchtung A nach Abb. 360 zu wählen. Während der Reinigung der Presse genügt diese Lampe jedoch nicht, weil sie nicht genügend zwischen die nur wenig auseinandergeschobenen Platten leuchtet. Es ist deshalb eine kleine, verschiebbare Lampe B nötig,

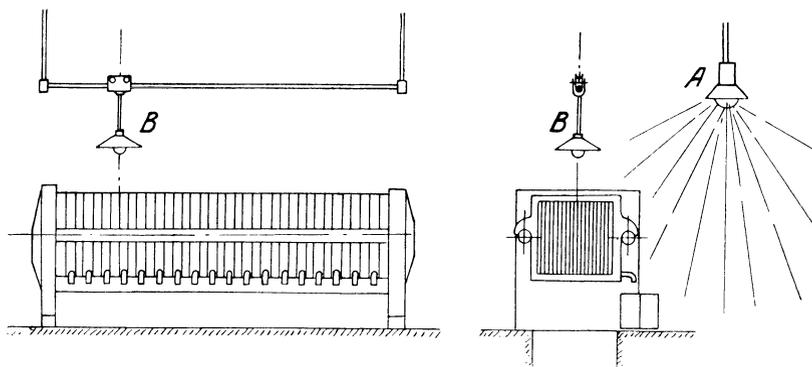


Abb. 360. Beleuchtung einer Filterpresse.

welche gerade dahin geschoben wird, wo die Platten gereinigt und neue Filtertücher eingelegt werden.

Zuweilen wird die Forderung gestellt, daß man in Fabrikgebäuden, insbesondere in großen Hallen die Beleuchtung von einem Punkte ein- und ausschalten kann. Die verschiedenen Verteilungen  $V_3$  der Abb. 314 sind dann an einem Punkte zu vereinigen. Selbstverständlich bedingt diese Anordnung eine Verteuerung. Es ist auch ferner zu überlegen, daß bei dieser zentralen Schaltung nur Lampen an einem und demselben Stromkreis hängen dürfen, welche auch gleichzeitig brennen sollen. Es dürfen also nicht die Lampen eines dunklen Ganges, die vielfach auch am Tage brennen, mit denen eines hellen Raumes zusammengeschaltet werden, oder man muß letztere nochmals besonders abschaltbar machen. Auch bei den Steckern ist das gleiche zu beachten. Die billigste Anlage ergibt sich, wenn dieselben mit an die Lampenstromkreise angeschlossen werden, dann müssen aber bei Schaltung der Lampen von der Verteilung aus, diese immer mitbrennen, wenn die Handlampe gebraucht wird. Um dies bei häufiger Benutzung der Handlampen zu vermeiden, kann man entweder den Stechdosen einen ganz getrennten Stromkreis geben, oder man kann wenigstens für sie und einen Lampenstromkreis nur einen gemeinsamen Rückleiter benutzen. Im letzteren Fall darf aber der Lampenstromkreis auf der Verteilungstafel nur einpolig abschaltbar sein.

Es ist ratsam, sämtliche Lampen mit Nummern zu versehen und an der Verteilung jeder Sicherung ein Schildchen zu geben, auf welchem verzeichnet ist, welche Lampennummern sie umfaßt. Die Lampen in hohen Hallen müssen herablaßbar sein.

### C. Die Leitungen und die Hilfsapparate.

Für die Lichtinstallation kommen meistens folgende Leitungsarten zur Verwendung:

1. *Fassungsadern* (FA). Der Leiter trägt eine wasserdichte Gummihülle und eine Umklöppelung aus Baumwolle. Wegen der leichten Isolation dürfen Fassungsadern nur an den Beleuchtungskörpern selbst verwandt werden und zwar bei Spannungen bis 250 V.

2. *Gummibandleitungen* (GB). Der Leiter trägt eine Baumwollumspinnung, hierauf eine Gummibandumwicklung, dann nochmals eine Baumwollumspinnung und eine imprägnierte Baumwollumklöppelung. Dieselben dürfen nur in trockenen Räumen und über Putz verlegt werden, wenn die Spannung nicht mehr als 125 V beträgt.

3. *Gummiaderleitungen* (GA). Der Leiter trägt eine nahtlose Gummihülle, darüber eine Bewicklung aus gummiertem Band und eine imprägnierte Baumwollumklöppelung. Dieselben können zur festen Verlegung bis 1000 V, zum Anschluß beweglicher Apparate bis 500 V benutzt werden. Unter Putz können sie nur in Rohren liegen.

4. *Gummiaderschnüre* (SA). Der vieldrätige, also leicht bewegliche Leiter trägt eine Baumwollumspinnung, hierauf eine wasserdichte Gummihülle, dann eine Umklöppelung aus Glanzgarn oder Seide. Sie sind wie Gummiadern verwendbar, werden wegen der leichten Beweglichkeit jedoch hauptsächlich zum Anschluß beweglicher Apparate benutzt. Als Lampenpendel erhalten sie noch eine Tragschnur.

5. *Bleikabel*. Dieselben kommen nur in nassen Räumen, insbesondere auch in Gruben zur Anwendung.

**Die Bemessung der Leitungen.** Der kleinste zulässige Querschnitt ist  $1 \text{ mm}^2$ . An Beleuchtungskörpern ist auch  $0,75 \text{ mm}^2$  zulässig. Als

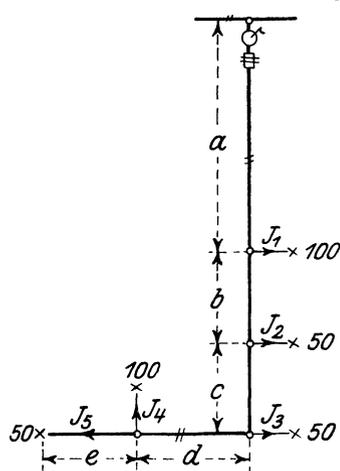


Abb. 361. Lampenstromkreis.

erste Bedingung für die Leitungsdimensionierung gilt die Erwärmung. Die Leitungen dürfen also unter keinen Umständen stärker belastet werden, als die Tabelle auf S. 228 zuläßt. Als zweite Bedingung müssen wir aber auch einen möglichst geringen Spannungsabfall stellen, damit die das Auge sowohl als die Lampe schädigenden Helligkeitsschwankungen auf ein Mindestmaß herabgemindert werden. Der gesamte Spannungsabfall in einer Lichtverteilungsanlage soll im allgemeinen nicht mehr als 2–3% betragen. Bedenkt man nun, daß in den Hauptzuleitungen bereits Spannungsabfälle auftreten, so darf also innerhalb eines Gebäudes nur vielleicht noch 1,5 bis 2% zugelassen werden und innerhalb eines Stockwerks etwa 1%, wobei

immer vorausgesetzt ist, daß alle Lampen gleichzeitig brennen.

Wenn wir einen Verteilungsstromkreis nach Abb. 361 voraussetzen, ist der Spannungsabfall bis zur letzten Lampe stückweise zu berechnen.

Auf der Strecke a fließt der Strom  $I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5$ , der Spannungsabfall auf dieser Strecke ist demnach:

$$(I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5) \cdot \frac{2a}{k \cdot q}.$$

Die Leitungslänge a ist hierin doppelt genommen, weil es sich um Hin- und Rückleitung handelt. Auf der Strecke b ist der Spannungsabfall in gleicher Weise zu berechnen, jedoch zu beachten, daß dort nur noch ein Strom  $I_2 + I_3 + I_4 + I_5$  fließt. Der Spannungsabfall bis zur letzten Lampe ist gleich der Summe der Abfälle auf den einzelnen Teilstrecken.

**Beispiel:** In Abb. 361 haben die Lampen die eingeschriebenen Stärken und eine Spannung von 120 V. Die einfachen Leitungslängen sind  $a = 10$  m,  $b = 4$  m,  $c = 4$  m,  $d = 5$  m,  $e = 4$  m, und der Leitungsquerschnitt beträgt durchgehend  $1,5$  mm<sup>2</sup>. Wie groß ist der Spannungsabfall an der letzten Lampe?

Unter Annahme von 1 Watt für die Kerze ergeben sich folgende Ströme:  $I_1 = 0,84$  A,  $I_2 = 0,42$  A,  $I_3 = 0,42$  A,  $I_4 = 0,84$  A,  $I_5 = 0,42$  A. Auf der Strecke a fließt die Summe dieser Ströme, also  $2,94$  A. Der Spannungsabfall ist dort:

$$2,94 \cdot \frac{20}{57 \cdot 1,5} = 0,69 \text{ V.}$$

Auf der Strecke b fließt nur noch  $2,1$  A. Der Spannungsabfall beträgt demnach:

$$2,1 \cdot \frac{8}{57 \cdot 1,5} = 0,197 \text{ V.}$$

Für die folgenden Strecken ergibt sich ebenso:  $0,157$  V,  $0,148$  V und  $0,039$  V. Also insgesamt ein Spannungsabfall von  $1,231$  V, dies sind etwa  $1\%$ .

Für Überschlagsrechnungen kann man annehmen, daß die gesamte Belastung eines Stromkreises in einem Schwerpunkt vereinigt sei. Die Lage dieses Schwerpunktes kann man schätzen. Bei gleicher Größe der Lampen liegt er im Mittelpunkt der Brennstellen, sind aber einige große Lampen dabei, so ist der Schwerpunkt näher zu diesen anzunehmen. Angenommen, in dem vorigen Beispiel sei der Belastungsschwerpunkt an dem Leitungsknick am Ende der Strecke c, dann ist der Spannungsabfall:

$$2,94 \cdot \frac{36}{57 \cdot 1,5} = 1,238 \text{ V,}$$

also ziemlich genau richtig.

Bei Wechsel- und Drehstrom erfolgt die Berechnung der Leitungen in genau gleicher Weise, da bei Glühlampen eine Phasenverschiebung bekanntlich nicht auftritt.

**Die Schalter.** Bei Lichtanlagen kommen ausschließlich die *Dreh- oder Dosenschalter* in Frage. Während dieselben in Wohn- und Geschäftsräumen Gehäuse aus irgend einem Isolierstoff haben, wird bei feuchten Räumen Porzellan vorgezogen. In Fabrikräumen hingegen ist es ratsam, vollkommen gekapselte Schalter in Gußeisengehäuse zu verwenden, weil dieselben die Kontakte vor Schmutz und Feuchtigkeit schützen und zugleich mechanisch widerstandsfähig sind. Während man in Wohnräumen des besseren Aussehens wegen zuweilen in die Wand eingelassene Schalter verwendet, ist diese Ausführungsart auch in Fabriken dann angebracht, wenn der vorstehende Schalter in einem Durchgang stören würde. Derselbe wird dann in eine kleine Wandvertiefung gesetzt. In sehr feuchten Räumen, insbesondere in Ställen, kann man einen Stall-Schalter nach Abb. 362

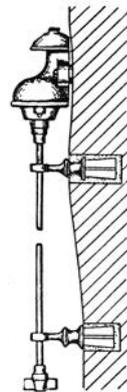


Abb. 362.  
Stallschalter.

verwenden. In solchen Räumen werden nämlich meistens blanke Leitungen auf Kellerisolatoren gelegt, die nicht in Handbereich heruntergeführt werden dürfen. Die Schaltungen, welche man mit Drehschaltern ausführen kann, sind außer der einfachen Ausschaltung das Nacheinanderschalten verschiedener Stromkreise (s. Schaltung 3 auf S. 435), das beliebige Ein- und Ausschalten einer Lampe von zwei Stellen aus mit Wechselschaltern (s. Schaltung 10 auf S. 437) und das Schalten einer oder mehrerer Lampen von mehreren Stellen aus mit Wechselschaltern und Polwendeschaltern (s. Schaltung 11 auf S. 438).

In Räumen, in welchen explosible Gase auftreten oder Explosivstoffe gelagert werden, setzt man gut geschützte Schalter auf die Außenwände des Gebäudes. Auch die Lampen bedürfen in diesem Falle einer schützenden Überglocke oder man bringt im Inneren überhaupt keine elektrischen Leitungen an und beleuchtet von außen her durch besondere Beleuchtungsfenster.

**Die Sicherungen.** Bei Beleuchtungsanlagen kommt man immer mit den normalen, auf S. 239 beschriebenen Patronensicherungen aus. Wie erwähnt, ist an allen Stellen eine Sicherung zu setzen, wo sich der Abzweigquerschnitt vermindert, wenn man nicht vorzieht, den ganzen Stromkreis nach dem kleinsten vorkommenden Querschnitt zu sichern, damit nur eine Sicherung gesetzt zu werden braucht. Die Sicherungen, welche für die einzelnen Querschnitte in Frage kommen, können der Tabelle S. 228 entnommen werden.

**Die Steckvorrichtungen.** Dieselben bestehen aus der auf der Wand fest angebrachten Steckdose, welche auch die Sicherungen enthält und dem Stecker. Beide Teile werden für Fabriken am besten aus Gußeisen angefertigt.

## D. Die Legung der Leitungen.

Man unterscheidet die folgenden Legungsarten:

**1. Die offene Legung** (Bezeichnung (r)). Die isolierten Leitungen werden frei ohne jeden Schutz an Isolierrollen mittels Bindedrahts befestigt. Eine direkte Befestigung auf der Wand ist unzulässig. Die Rollen werden mittels Stahldübel oder auch Holzdübel an der Wand angebracht, bei größerer Zahl nebeneinander können sie auch auf einem gemeinsamen Wandeisen befestigt werden. Der Rollenabstand beträgt höchstens 80 cm. In Handbereich sind die Leitungen durch Einziehen in Rohre oder durch Abdeckung gegen Beschädigungen zu schützen. Während in Wohnräumen heute die offene Legung kaum noch in Frage kommt, ist sie in Fabriken wegen ihrer Billigkeit noch immer beliebt. In nassen Räumen und solchen mit ätzenden Dünsten ist sie die einzig brauchbare Legungsart. In Ställen z. B. legt man blanke Leitungen, die zum Schutz gegen chemische Angriffe mit Emaillelack gestrichen sind, auf Rollen, und zwar auf die etwas größeren Kellerisolatoren. Auch in hohen Fabrikhallen, in denen die sonst übliche Installation schwierig und teuer werden würde, zieht man es oft vor, eine blanke Leitung über Isolatoren längs der Decke zu spannen und von ihr die Deckenlampen abzuzweigen.

Eine Abart dieser Installation ist diejenige mittels Spanndrahtes. Dieselbe kommt in Frage, wenn für die Rollen keine Stützpunkte in genügend kleinem Abstand vorhanden sind. Man spannt dann einen Eisendraht und hängt die Leitung isoliert daran auf.

**2. Die Legung in Rohre** (Bezeichnung (o)). a) *in Bergmannrohr*. Es sind dies Messing- oder verbleite Eisenrohre, welche eine Auskleidung aus Papier haben, das mit Isoliermasse getränkt ist. Ihre Normlänge beträgt 3 m. Die Rohre können auf Putz und unter Putz verlegt werden. Letztere Legungsart kommt nur in Wohnräumen zur Anwendung. Erst nach der Legung der Rohre und nachdem die Wände möglichst ausgetrocknet sind, werden die Leitungen eingezogen. Die Rohre müssen deshalb eine ganz bestimmte lichte Weite haben, die sich nach der Stärke und Anzahl der Leitungen richtet. Man kann etwa einziehen:

| lichte Rohrweite                           | Gummiaderleitungen                                |
|--|---|
| 11 mm . . . . . 1 × 6 mm <sup>2</sup> ,    | 2 × 1,5 mm <sup>2</sup> , 3 × 1 mm <sup>2</sup>   |
| 13,5 mm . . . . . 1 × 10 mm <sup>2</sup> , | 2 × 2,5 mm <sup>2</sup> , 3 × 1,5 mm <sup>2</sup> |
| 16 mm . . . . . 1 × 25 mm <sup>2</sup> ,   | 2 × 4 mm <sup>2</sup> , 3 × 2,5 mm <sup>2</sup>   |
| 21 mm . . . . . 1 × 35 mm <sup>2</sup> ,   | 2 × 10 mm <sup>2</sup> , 3 × 6 mm <sup>2</sup>    |
| 29 mm . . . . . 1 × 120 mm <sup>2</sup> ,  | 2 × 25 mm <sup>2</sup> , 3 × 16 mm <sup>2</sup>   |
| 36 mm . . . . . 1 × 185 mm <sup>2</sup> ,  | 2 × 50 mm <sup>2</sup> , 3 × 35 mm <sup>2</sup>   |

Kriegsleitungen erfordern wegen der stärkeren Isolation stets mindestens die nächst höhere Rohrweite. Auch bei Legung unter Putz sind die Rohre etwas reichlich zu wählen. Das Einziehen aller Leitungen eines Rohres geschieht gleichzeitig mittels eines vorher durchgeschobenen Stahlbandes, und nachdem die Leitungen vorher mit Talkumpulver geglättet sind. Zuweilen werden auch gleich bei der Rohrlegung Eisendrähte mit eingezogen. Innerhalb der Rohre dürfen unter keinen Umständen Leitungsverbindungen sein, Abzweige dürfen nur in einer Abzweigdose gemacht werden. Es ist grundsätzlich darauf zu achten, daß nicht mehr Abzweig- und Verbindungsstellen vorhanden sind, als unbedingt erforderlich sind, denn diese sind vor allem Störungsquellen. Damit aber das Einziehen der langen Leitungen überhaupt möglich ist, müssen außer den Abzweigdosen noch Durchgangsdosen zwischengeschaltet werden, welche lediglich ein Nachziehen des Drahtes ermöglichen sollen. Diese Dosen haben also keine Klemmen. Man muß, um gut einziehen zu können, bei gerader Strecke alle 8—10 m eine Dose haben, bei Krümmungen jedoch meist schon nach Überwindung von etwa drei Bogen. Das Biegen der Rohre erfolgt mit einer dem Rohrdurchmesser angepaßten Biegezange, welche Kerbe in den Mantel drückt. Bei scharfen Krümmungen benutzt man fertige Winkelstücke, die zu öffnen sind, weil sie anderenfalls das Drahteinziehen zu sehr erschweren würden. Damit ferner nicht Unregelmäßigkeiten der Isolierschicht des Rohres oder Schmutz das Einziehen behindert, prüfe man vor Benutzung jedes Rohr. Die Befestigung der Rohre erfolgt auf Putz mittels Schellen, die auf Stahl- oder Holzdübeln festgeschraubt werden. In der Nähe der Dosen und Schalter müssen die Rohre besonders gut befestigt werden. Eine Legung unter Putz erfordert stets, daß in das Mauerwerk vertiefte

Rinnen eingestemmt werden, weil der Putz nur höchstens fingerdick ist. Die Rohre werden in diesen Rinnen entweder mit einigen Heftnägeln gehalten oder man gipst sie an einigen Stellen fest. Sie brauchen durchaus nicht so genau gerichtet gelegt zu werden wie auf Putz, auch können sie ruhig schräg über die Decke verlaufen. Nur an der Wand sollten sie möglichst nicht schräg verlaufen, weil man beim Einschlagen von Bildernägeln doch immer eher vermutet, daß die Leitung vom Schalter senkrecht nach oben verläuft. Nach Legung der Rohre werden dieselben zugeputzt, wobei aber der Dosenrand und die Putzoberfläche in einer Ebene liegen müssen. Hat die Decke Hohlkehlen, so sind die Dosen weiter nach unten zu setzen.

Obwohl die Legung unter Putz weniger genau sein braucht und deshalb billiger ist, stellen sich insgesamt die Kosten doch höher, als bei Legung auf Putz, weil das Ausstemmen der Wände sehr kostspielig ist, und weil Maurer und Elektriker gegenseitig aufeinander warten müssen. Bei allen Maurerarbeiten, ganz besonders wenn es sich um Betonarbeiten handelt, sollte man stets dem Bauherrn diese Arbeiten überlassen, weil derselbe sonst leicht bei Auftreten von Mauerrissen und dgl. die Elektriker verantwortlich macht. Unter keinen Umständen aber dürfen beim Einsetzen von Dübeln in Betonunterzüge etwa die darin befindlichen Zugeisen durchgemeißelt werden.

b) *in Hartgummirohr*. Dieses Rohr wird nur unter Putz gelegt und es zeichnet sich vorteilhaft dadurch vor dem Papierrohr aus, daß es erwärmt, leicht von Hand beliebig gebogen werden kann und innen eine glatte Oberfläche besitzt.

c) *Stahlpanzerrohre*. Auch das Stahlpanzerrohr hat Papierisolation und wird ebenfalls in Normallängen von 3 m geliefert. Es zeichnet

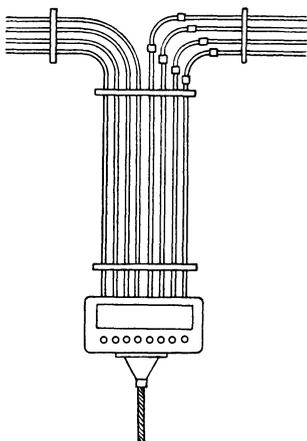


Abb. 363.

sich vor anderen Rohren durch seine hohe mechanische Festigkeit aus und erlaubt ferner eine vollständig dichte Verbindung der einzelnen Teile. Für Wohnhäuser kommt es höchstens für die Keller in Frage, in Fabriken ist dasselbe jedoch trotz seines hohen Preises sehr beliebt. Eine Legung unter Putz kommt naturgemäß nicht in Frage, wohl aber kann das Rohr in Betondecken mit eingebettet werden. Das Biegen der Rohre geschieht nicht mit einer Zange, sondern auf einer besonderen Biegevorrichtung in kaltem Zustand. Bei den größeren Rohren von 29 und 36 mm lichte Weite reicht die Biegevorrichtung meist nicht aus, man biegt dann um einen Holzdorn. Im Notfall ist bei harten Rohren die Isolation zu entfernen und das Rohr

warm zu machen. Die Rohrnaht lege man weder außen, noch innen in die Krümmung, sie soll wegen ihrer geringeren Festigkeit die neutrale Faser sein. Da das Biegen der Rohre viel Arbeit kostet, benutzt man überall, wo es möglich ist, fertige Bogen. Vielfach findet man auch an Stellen, wie Abb. 363 zeigt, von Hand gebogene Krümmer. Da aber gerade dort das genaue Biegen viel Zeit kostet,

sollte man trotz des ungleichen Abstandes fertige Bogen verwenden, wie dies die rechte Seite der Abbildung zeigt. Die Verbindung der einzelnen Rohre miteinander erfolgt durch verschraubbare Muffen, die nötigenfalls noch mit Hanf und Mennige gedichtet werden können. Die Befestigung der Rohre auf der Wand geschieht genau wie bei den übrigen Isolierrohren mit Stahl- oder Holzdübeln, wobei man möglichst den Leitungsweg wählt, der kurz ist und die geringste Mühe macht. Wenn beispielsweise ein Betongebäude mit Betonunterzügen ein hölzernes Dach hat, so benutze man dieses und meide den Beton. In feuchten Räumen leiden alle Isolierrohre trotz häufigen Anstrichs sehr dadurch, daß sich Wasser zwischen Rohr und Wand setzt und ein Durchrosten des Rohres mit sich bringt. Da nun Stahlpanzerrohre eine genügende mechanische Festigkeit haben, legt man dieselben in feuchten Räumen auf Abstandsschellen, wie Abb. 364 zeigt, also in einem Abstand von wenigen cm von der Wand. Auch alle Dosen und Schalter werden von der Wand abgerückt. Man kann dann das Rohr immer in gutem Anstrich halten. Vor allem Sorge man aber auch für eine gute Abdichtung aller Verbindungsstellen. Rohrenden, welche nicht verschraubt werden können, gieße man am Ende mit Isoliermasse zu. Man muß dabei mit peinlicher Aufmerksamkeit auf die geringste Undichtigkeit achten, weil derartige Rohre sonst durch das

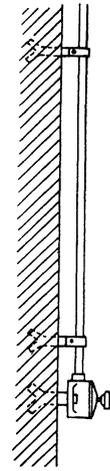


Abb. 364. Stahlpanzerrohr auf Abstandsschellen.

Atmen doch nach und nach Wasser aufnehmen. Dieses Atmen ist so zu denken, daß bei der Erwärmung der Leitungen Luft durch die Undichtigkeit hinausgedrückt wird, während bei der darauf folgenden Abkühlung feuchte Luft hereingesaugt wird. Man vermeide auch sehr, daß ein Rohr einen Wassersack hat, daß es also eine Ausbiegung nach unten hat, weil sich dort leicht Feuchtigkeit ansammelt, die zu einem Kurzschluß führt. Auch die Beleuchtungskörper werden in feuchten Räumen vielfach fest mit den Rohren verschraubt. Bei weniger feuchten Räumen wird oft zwischen Rohr und Lampe ein Metallschlauch eingeschaltet um ihre Befestigung elastischer zu machen. Unter Decken, die von schweren Wagen oder Kranen befahren werden, ist eine federnde Aufhängung der Beleuchtungskörper wünschenswert. Um bei Stahlpanzerrohren das Einziehen der

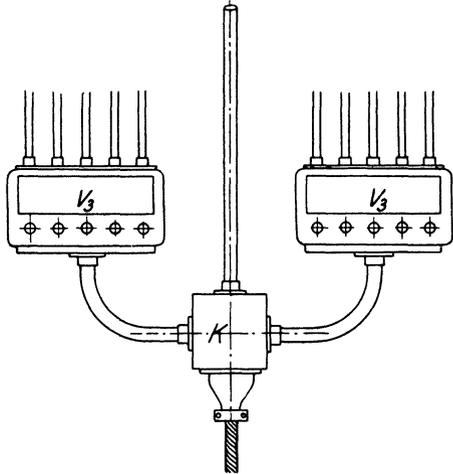


Abb. 365. Übergang von Kabel auf Stahlpanzerrohr mit Lichtstromverteilung.

Lampe ein Metallschlauch eingeschaltet um ihre Befestigung elastischer zu machen. Unter Decken, die von schweren Wagen oder Kranen befahren werden, ist eine federnde Aufhängung der Beleuchtungskörper wünschenswert. Um bei Stahlpanzerrohren das Einziehen der

Leitungen zu erleichtern, sind auch bei ihnen Durchgangsdosen zu setzen. Eingefügte Winkel lassen sich meist nicht öffnen, dieselben müssen deshalb herausnehmbar sein, was man dadurch erreicht, daß man den anstoßenden Rohren Langgewinde gibt, so daß die Muffen, welche Rohr und Winkelstück verbinden, in ganzer Länge auf das Rohr geschraubt werden können.

Um von einem Kabel auf Stahlpanzerrohr überzugehen, braucht man einen Abzweigkasten mit Endverschluß, wie Abb. 365 einen solchen zeigt. Dieser Kasten K ist gut abgedichtet und im unteren Teil ausgegossen. Von ihm zweigen in diesem Falle die Leitungen nach den Unterverteilungen  $V_3$  ab. Der Kasten K würde also etwa dem Punkt a in Abb. 314 entsprechen.

d) *Peschelrohr*. Dasselbe ist ein Stahlrohr ohne Isolierschicht und zuweilen mit Schlitz. Es war das erste gut durchgebildete Rohrsystem, hat jedoch keine weiteren Vorzüge.

e) *Die Rohrdrähte* (Falzdrähte, Kuhlodrähte). Bei diesen sind die isolierten Leitungen mit einem eng anliegenden Messingmantel fest umpreßt. Diese Rohrdrähte werden in größeren Längen geliefert, man erspart also das mühsame Einziehen der Leitungen und das Setzen von Durchgangsdosen. Da außerdem der Mantel eng anliegt, ist der äußere Durchmesser sehr viel geringer, als derjenige anderer Rohre. Rohrdrähte können deshalb, ohne störend zu wirken, auf Putz gelegt werden. Das Biegen geschieht mit der Biegezange. Ist einer der Leiter geerdet, so kann der Messingmantel als geerdeter Leiter benutzt werden. Die Leitung fällt dann noch dünner aus, weil sie nur einadrig zu sein braucht.

Bei allen Leitungen, die einen Schutz aus Eisen besitzen, wie Stahlpanzerrohre oder auch eisenbandbewehrte Bleikabel müssen bei Wechselstrom Hin- und Rückleiter zusammenliegen und bei Drehstrom ebenso alle drei Leiter. Wenn dies nicht der Fall wäre, so entstände in dem Eisenmantel ein magnetischer Wechselkraftfluß, wodurch die Umhüllung erwärmt würde. Auch der Spannungsabfall würde größer ausfallen.

## XI. Der elektromotorische Antrieb.

### A. Die Vorzüge des elektromotorischen Antriebs.

Es ist bereits darauf hingewiesen worden, daß einer der Hauptvorzüge des Elektromotors, anderen Antriebsmotoren gegenüber, darin besteht, daß derselbe bei allen Belastungen einen guten Wirkungsgrad hat, daß er also nie wesentlich mehr Energie aufnimmt, als er gerade zu leisten hat. Dies ist für das Kleingewerbe ein beachtenswerter Umstand. Nicht minder wichtig ist die stete Betriebsbereitschaft und die Einfachheit und Schnelligkeit des Anlassens. Während ein Gasmotor z. B. auch in Betriebspausen nicht abgestellt wird, um das lästige Anlaufen zu vermeiden, kann der Elektromotor stets stillgesetzt werden. Auch die Reinlichkeit des elektromotorischen Betriebes ist zu nennen und die damit verbundene Ersparnis an Öl und Putzmaterialien. Der Haupt-

grund für die große Verbreitung des Elektromotors liegt allerdings in den Vorzügen der elektrischen Energieverteilung, welche ja mit mäßigen Kosten erlaubt, selbst jedem einsam gelegenen Gutshof billige Energie zuzuführen.

Es liegt nahe, daß man bei der Einführung des elektrischen Antriebs lediglich nur den früheren Antriebsmotor durch einen Elektromotor ersetzte. Eine Maschinenfabrik z. B. deren Transmission durch eine Dampfmaschine betrieben worden war, setzte an deren Stelle einen Elektromotor, für den sie die Energie vielleicht billiger von einem Elektrizitätswerk beziehen konnte. Durch einen solchen Antrieb waren aber die möglichen Vorteile, die der elektrische Antrieb bietet, keineswegs ausgenutzt, denn die lange Transmission verbrauchte nach wie vor einen nicht unerheblichen Teil der zugeführten Energie, und zwar auch dann, wenn bei Über- oder Nachtschichten nur einige der angetriebenen Werkzeugmaschinen betrieben werden sollten. Dies wurde besser, als man zu dem sog. *Gruppenantrieb* überging. Man faßte dabei eine Anzahl Maschinen, die nahe zusammen standen und meist zu gleicher Zeit liefen, zu einer Gruppe mit kleiner Transmission und gemeinsamem Motor zusammen. Auch heute wird der Gruppenantrieb noch zuweilen vorgezogen, wenn die genannten Bedingungen erfüllt sind. Weit häufiger findet man aber den elektrischen *Einzelantrieb*, bei welchem jede Maschine ihren besonderen Antriebsmotor hat, der angelassen und stillgesetzt werden kann, ganz wie es die Maschine erfordert. Wir wollen von vornherein wohl beachten, daß durch eine solche Unterteilung der Antriebsleistung in viele Kleinmotoren notwendig der Anschaffungspreis wachsen muß; denn viele kleine Motoren sind teurer, als ein großer von gleicher Leistung. Dafür ersparen wir aber auch die Transmission. Wir müssen auch ferner bedenken, daß der Wirkungsgrad der Kleinmotoren nicht unerheblich niedriger ist, als derjenige eines großen Motors. Aber diesen geringen Nachteilen setzt der Einzelantrieb eine ganze Reihe wichtiger Vorteile entgegen: Jeder unnütze Leerlauf kann vermieden werden, die Energie verzehrenden Transmissionen und Riemen fallen fort und damit auch die unangenehmen Störungen, welche schadhafte Riemen immer hervorrufen. Das Gebäude kann leichter gebaut werden, da es keine schweren Transmissionen zu tragen hat, vor allem aber ist man jetzt in der Aufstellung der Maschinen völlig frei und kann sie dort aufstellen, wo es der gesetzmäßige Arbeitsgang erfordert, auch können jetzt die Maschinen von Laufkränen bedient werden. Wir wollen außerdem nicht vergessen, daß erst durch den Einzelantrieb die Möglichkeit gegeben ist, die wertvollen Eigenschaften des Elektromotors für den Betrieb auszunutzen: Wir können die Drehrichtung unserer Maschine nach Belieben wechseln, und zwar in sonst kaum denkbar kurzer Zeit, wir können ferner die Geschwindigkeit in aller einfachster Weise weitgehend verändern und sind auch in der Lage, mit den einfachsten Mitteln Sicherheitsvorkehrungen gegen allerlei Gefahren zu treffen, welche mit mechanischen Mitteln teuer und hinderlich sein würden.

**Beispiel:** In einer Werkstatt sollen 20 Drehbänke aufgestellt werden, deren jede etwa 1,5 kW bedarf. Welche Energieersparnis erzielt man, wenn man statt einer Transmission, die eine Länge von 50 m haben müßte, elektrischen Einzel-

antrieb wählt? Die minutliche Drehzahl der Drehbankscheiben von 350 mm Durchmesser soll 200 sein, und es soll angenommen werden, daß jede Bank nur 4 Stunden der 8stündigen Schicht im Betrieb ist.

Wenn wir eine minutliche Drehzahl der Transmission von 250 annehmen, berechnet sich deren Durchmesser zu 75 mm. Die Scheibe des Antriebsmotors habe einen Durchmesser von 450 mm und mache 750 Umläufe in der Minute.

Da gleichzeitig nur 10 Bänke im Betrieb sind, ist die durchschnittliche Motorbelastung bei Transmissionsbetrieb:

$$1,5 \cdot 10 + \text{Reibungsarbeit} \approx 20 \text{ kW.}$$

Das Motordrehmoment ist also:

$$M = 0,975 \cdot \frac{\mathcal{E}}{n} = 0,975 \cdot \frac{20000}{750} = 26 \text{ mkg.}$$

Hierin ist  $\mathcal{E}$  die abgegebene Leistung und  $n$  die Motordrehzahl. Die Zugkraft des Riemens ist also:

$$P = \frac{M}{D/2} = \frac{26}{0,225} = 115 \text{ kg.}$$

Da der ruhende Riemen aber bereits in jedem Ende eine Spannung haben muß, welche etwa gleich der Zugkraft gesetzt werden kann, tritt im Lauf eine Belastung der Welle mit  $3 \cdot 115 = 345 \text{ kg}$  auf. In gleicher Weise berechnet sich für jede Drehbank ein Riemenzug von  $P = 42 \text{ kg}$  und demnach eine Belastung der Welle

$$\begin{aligned} &\text{während des Laufs von . . . . . } 3 \cdot 42 = 126 \text{ kg} \\ &\text{und während des Stillstandes von . . } 2 \cdot 42 = 84 \text{ kg.} \end{aligned}$$

Da durchschnittlich nur 10 Bänke im Betrieb sind, tritt folgende Wellenbelastung auf:

$$\begin{aligned} 10 \text{ ruhende Bänke . . . . . } &10 \cdot 84 = 840 \text{ kg} \\ 10 \text{ laufende Bänke . . . . . } &10 \cdot 126 = 1260 \text{ kg} \\ \text{Riemenzug des Antriebsmotors . . . . . } &= 345 \text{ kg} \\ \text{Wellen- und Scheibengewicht . . . . . } &= 2200 \text{ kg} \\ \hline &N = 4645 \text{ kg.} \end{aligned}$$

Hierbei ist angenommen, daß der Riemenzug vertikal gerichtet ist. Der Reibungswiderstand am Wellenumfang beträgt:

$$R = \mu \cdot N = 0,08 \cdot 4645 = 370 \text{ kg,}$$

der Reibungsverlust demnach:

$$\begin{aligned} \mathcal{E} = R \cdot v = R \cdot \frac{d \cdot \pi \cdot n}{60} &= \frac{370 \cdot 0,075 \cdot 3,14 \cdot 250}{60} = 362 \text{ mkg/Sek.} \\ 362 \text{ mkg/Sek.} &= \frac{362}{102} = 3,55 \text{ kW.} \end{aligned}$$

Der jährliche Reibungsverlust (300 Arbeitstage) der Transmission beträgt also:  
 $8 \cdot 300 \cdot 3,55 = 8500 \text{ kWh.}$

Dieser Verlust würde bei Einzelantrieb in Fortfall kommen. Ferner verschwinden auch die Riemenverluste an den einzelnen Bänken, jedoch wird dieser Gewinn wieder durch die Verluste in der Übersetzung des Einzelantriebs aufgehoben. Der höhere Wirkungsgrad des großen Motors gegenüber demjenigen der kleinen Motoren bei Einzelantrieb kommt hier nicht zur Geltung, weil der große Motor wegen der Betriebspausen schwach, jeder Einzelmotor jedoch stets voll belastet ist.

## B. Die Wechselwirkung zwischen Antriebsmotor und Arbeitsmaschine.

Eine jede Arbeitsmaschine setzt dem Antrieb einen Widerstand entgegen, zu dessen Überwindung der Motor ein gewisses Drehmoment entwickeln muß. Die Größe des Motordrehmomentes wird also durch die Arbeitsmaschine bestimmt. Anders steht es mit dem zweiten Faktor

der Leistung, der Antriebsgeschwindigkeit. Diese wird durch den Motor angegeben, weil bei jeder Motorart doch eine ganz bestimmte Abhängigkeit zwischen Umlaufzahl und Drehmoment besteht. Es geht hieraus hervor, daß nicht jeder beliebige Motor den Anforderungen einer Arbeitsmaschine hinsichtlich des Geschwindigkeitsverlaufs entspricht, und daß wir eine Auswahl unter den verfügbaren Motoren treffen müssen. Die Drehzahl des Gleichstrom-Nebenschlußmotors und des Drehstrommotors können wir hierbei bei wechselnden Drehmomenten praktisch als konstant ansehen, während wir bei dem Gleichstrom-Hauptschlußmotor die Abhängigkeit nach Abb. 157 zugrunde legen müssen.

Die von dem Motor auf die Arbeitsmaschine übertragene mechanische Arbeit zerfällt in mehrere Posten:

1. Die Nutzarbeit.
2. die Reibungsarbeit und
3. die Beschleunigungsarbeit.

Die letztere kommt nur dann in Frage, wenn schwere, bewegte Massen vorhanden sind, und wenn sich die Geschwindigkeit ändert. Da sie die Betrachtung außerordentlich verwickelt, wollen wir zunächst von ihr absehen.

**1. Der elektromotorische Antrieb ohne Berücksichtigung der Massenwirkung.** Bei manchen Arbeitsmaschinen, wie z. B. bei horizontal bewegten Fahrzeugen, bei Drehöfen usf. kann man von einer Nutzarbeit nicht sprechen, da bei ihnen nur Reibungsarbeit auftritt. Der durch Lager und Getriebe hervorgerufene Reibungswiderstand ändert sich zwar etwas mit der Geschwindigkeit, für praktische Rechnungen können wir denselben jedoch als konstant ansehen. Eine solche Maschine verlangt also bei gleicher Belastung stets das gleiche Drehmoment von dem Antriebsmotor; die benötigte Leistung, welche bekanntlich dem Produkte aus Drehmoment und Geschwindigkeit proportional ist, muß demnach proportional mit der Umlaufzahl wachsen. Wesentlich anders verhalten sich Ventilatoren und Pumpen, die keine Förderhöhe, aber auch nur Reibungswiderstände zu überwinden haben. Der Widerstand einer Flüssigkeit oder eines Gases in einer Rohrleitung wächst nämlich ganz erheblich mit zunehmender Fließgeschwindigkeit, und zwar mit dem Quadrate derselben, wie dies Abb. 450 veranschaulicht. Der Leistungsbedarf solcher Arbeitsmaschinen steigt demnach mit der 3. Potenz der Umlaufzahl.

Unter Nutzbarkeit verstehen wir denjenigen Teil der übertragenen Arbeit, welcher von der Maschine nach Abzug der Reibungsarbeit zur Erledigung des Arbeitsvorganges selbst nutzbringend verbraucht wird, also die Hubarbeit: Last mal Hubhöhe bei einem Kran oder einer Fördermaschine, ferner die Arbeit, welche bei einer Werkzeugmaschine zur Abhebung des Spanes erforderlich ist, oder auch die Walzarbeit, welche in einem Walzwerk aus einem kurzen Block eine lange Schiene erzeugt. Die neben der Nutzarbeit benötigte Reibungsarbeit ist im allgemeinen um so größer, je mehr Nutzarbeit die Maschine verbraucht, je stärker dieselbe also belastet ist. Die Reibungsarbeit einer Maschine wird aber nicht gleich Null, wenn die Nutzarbeit auf Null zurückgeht, weil die Maschine auch im Leerlauf noch

Reibungswiderstände bietet. Unter dem Wirkungsgrad einer Maschine versteht man bekanntlich das Verhältnis:

$$\eta = \frac{\text{Nutzarbeit}}{\text{Nutzarbeit} + \text{Reibungsarbeit}}$$

Das Drehmoment, welches zur Vollbringung der Nutzarbeit von dem Antriebsmotor gefordert wird, hängt ganz von der Art des Arbeitsvorganges ab. Bei Kranhubwerken und Aufzügen ist dasselbe unveränderlich, solange die Last die gleiche bleibt. Ausgehend von der Größe derselben können wir dann leicht berechnen, welches Drehmoment an der Motorwelle wirksam sein muß und können ferner an Hand einer Darstellung nach Abb. 157 feststellen, welche Umlaufzahl der Motor bei dem gefundenen Drehmoment machen wird. Manche Firmen geben zu diesem Zweck in ihren Motorlisten die Abhängigkeit der Motorumlafzahl von dem Drehmoment an. Nicht so einfach läßt sich das Drehmoment bei zahlreichen anderen Antrieben ermitteln, weil oft die Widerstände unbekannt sind und ferner in ihrer Größe wechseln. Eine Drehbank fordert z. B. je nach der Spanstärke ganz verschiedene Antriebsmomente, die beim Abdrehen auf einer Planscheibe, ferner mit dem Drehdurchmesser wachsen. Die Drehmomente beim Auswalzen eines Blockes richten sich in hohem Maße nach der Temperatur desselben, ferner nach dem Grade der Querschnittsverminderung usw. Zur Bestimmung der Wechselwirkung zwischen Motor und Arbeitsmaschine muß das benötigte Drehmoment entweder rechnerisch oder durch Versuche ermittelt werden.

**Beispiel:** Ein Pfannenwagen im Gewichte von 20 t diene der Beförderung von Roheisen vom Hochofen zum 2 km entfernten Stahlwerk. Welche Fahrzeiten werden für Hin- und Rückfahrt gebraucht, wenn die Gleichstrom-Hauptschlußmotoren bei einem Pfanneninhalt von 30 t voll belastet sind und dabei eine Fahrgeschwindigkeit von 12 km/St. erreichen?

Die Hinfahrt dauert: 2 km : 12 km/St. =  $\frac{1}{6}$  St. = 10 Min. Während der Rückfahrt ist die Pfanne leer. Das Gesamtgewicht beträgt dann also nur 20 t gegenüber 50 t bei voller Pfanne. Nach Gleichung 67 ist die Antriebsleistung eines Fahrwerks dem zu befördernden Gewicht und der Fahrgeschwindigkeit proportional. Das Drehmoment an der Laufachse ist also nur dem Gewicht proportional und beträgt bei Leerfahrt deshalb:

$$20 : 50 = 0,4 \text{ des Vollastwertes.}$$

Der Wirkungsgrad des Triebwerks kann bei voller Belastung gleich 0,75 angenommen werden. Nennen wir nun das Motordrehmoment bei voller Pfanne M, so ist an der Laufachse ein Moment  $0,75 \cdot M \cdot \ddot{u}$  wirksam und bei Leerlauf nur:  $0,4 \cdot 0,75 \cdot M \cdot \ddot{u}$ , wenn  $\ddot{u}$  die Übersetzung zwischen Motor und Laufachse bedeutet.

Der Wirkungsgrad bei Leerlauf ist aber kleiner. Wir schätzen 0,7. Das Motordrehmoment des leerlaufenden Wagens beträgt demnach:

$$\frac{0,4 \cdot 0,75 \cdot M \cdot \ddot{u}}{0,7 \cdot \ddot{u}} = 0,43 \cdot M.$$

Die Motoren sind also nur mit 43% ihrer Vollast beansprucht, und Abb. 157 lehrt, daß die Umlaufzahl dann etwa 132% beträgt. Die Fahrgeschwindigkeit des leeren Wagens ist also:

$$1,32 \cdot 12 = 15,8 \text{ km/St.}$$

und die Zeit für die Rückfahrt:

$$2 : 15,8 = 0,126 \text{ St.} = 7 \text{ Min. } 36''.$$

**2. Der elektromotorische Antrieb mit Berücksichtigung der Massenwirkung.** Jede schwere Masse hat das Bestreben, in dem Bewegungs-

zustand zu beharren, in dem sie sich gerade befindet. Man muß deshalb eine Kraft aufwenden, um eine Masse zu beschleunigen, und ebenso bedarf es einer entgegengesetzt gerichteten, verzögernden Kraft, um die in Bewegung befindliche Masse wieder zum Stillstand zu bringen. Jeder elektromotorische Antrieb hat derartige Massen, nämlich Zahnräder, Schwunräder und den Motoranker. Der Antriebsmotor hat deshalb im Anlauf nicht nur die Reibungs- und Nutzarbeit der Maschine zu liefern, sondern auch einen weiteren Betrag an Beschleunigungsarbeit. Die Größe dieser Arbeit richtet sich nach der Schwere der bewegten Massen und nach ihrer Geschwindigkeit. Bei den gewöhnlichen durchlaufenden Arbeitsmaschinen spielt der Arbeitsbetrag, welcher durch die Massenbeschleunigung mehr verbraucht wird, gar keine Rolle, weil das Anlassen selten erfolgt und auch genügend Zeit dafür zur Verfügung steht. Dies trifft aber ganz und gar nicht mehr zu, wenn aus irgend einem Grunde ein Anlauf in aller kürzester Zeit gefordert wird, besonders aber, wenn es sich um einen Umkehrantrieb mit ganz kurzzeitigem Wechsel der Drehrichtung handelt. Die nachteiligen Wirkungen der Massenbeschleunigung können folgende sein:

a) Die Beschleunigungsarbeit kann nur in den seltensten Fällen zurückgewonnen werden, weil viele Motoren dazu ungeeignet sind. Nur die Leonardschaltung und auch der Gleichstrom-Nebenschlußmotor mit Feldregelung ermöglichen bei der Stillsetzung eine Bremsung mit teilweiser Rückgewinnung der Arbeitswucht. Die Beschleunigungsenergie ist also im allgemeinen zu den Verlusten zu rechnen und verringert demnach den Wirkungsgrad der Maschine.

b) Die Beschleunigungsarbeit erhöht die Beanspruchung des Motors. Derselbe muß deshalb bei sehr häufigem Anlassen oder ständigem Wechsel der Drehrichtung größer gewählt werden, als es ohne die Massenwirkung nötig wäre.

c) Die Trägheit der Massen erlaubt nicht, die Anlaufzeit beliebig klein zu machen, weil der Antriebsmotor das dazu erforderliche hohe Drehmoment nicht zu leisten vermag. Es kann also eine unnötige Verlängerung der Arbeitszeit, und damit eine nicht genügende Ausnutzung der Anlage die Folge sein.

d) Das erforderliche hohe Drehmoment hat einen entsprechend großen Strom zur Folge, welcher im Netz störend empfunden werden kann, und welcher größere Schalt- und Anlaßapparate nötig macht, wenn sich das Anlassen häufig wiederholt.

Die rechnerische Behandlung des Anlaufvorganges unter Berücksichtigung der Massenwirkung ist außerordentlich schwierig, weil das zur Beschleunigung erforderliche Drehmoment von der Geschwindigkeitszunahme des Motors abhängt, also keineswegs konstant zu sein braucht. Um mit einfachen Mitteln auszukommen, wollen wir deshalb zunächst einmal voraussetzen, daß mit konstantem Strom angelassen werde. In diesem Falle ist auch das Drehmoment des Motors konstant. Wir können diese Voraussetzung unbesorgt machen, weil man bei langsamem Anlassen stets bestrebt ist, so zu fahren, und weil die Anlaßwiderstände entsprechend abgestuft sind.

a) **Der Anlauf bei konstantem Drehmoment.** Ehe wir mit der Betrachtung beginnen, müssen wir jedoch einiges aus der Mechanik vorausschicken.

Wenn einer Masse vom Gewicht  $G$  eine Beschleunigung  $p$  erteilt werden soll, d. h. wenn in jeder neuen Sekunde ihre Geschwindigkeit um den gleichen Betrag  $p$  zunehmen soll, so brauchen wir dazu eine konstant wirkende Kraft  $P$ . Wie groß muß diese sein? Wir wissen, daß beim freien Fall, der Körper durch die Anziehungskraft der Erde, das Gewicht  $G$ , eine Beschleunigung von  $g = 9,81$  m in jeder Sekunde erfährt. Die Kraft  $P$ , welche eine beliebige Beschleunigung  $p$  erzeugt, muß also in dem gleichen Verhältnis größer oder kleiner sein, also:

$$P = G \cdot \frac{p}{g} \dots \dots \dots 48$$

Dies gilt natürlich auch für eine drehende Masse. Denken wir uns einen Schwungrad vom Gewichte  $G$  und dem mittleren Durchmesser  $D$ , so muß an dessen mittlerem Umfang auch die obige Kraft  $P$  angreifen, wenn seine Geschwindigkeit sekundlich um  $p$  zunehmen soll. Das am Schwungrad wirkende Drehmoment  $M$  ist demnach:

$$M = P \cdot \frac{D}{2} = G \cdot \frac{p}{g} \cdot \frac{D}{2}.$$

Multipliziert man noch Zähler und Nenner mit  $D$ , so bekommt man:

$$M = GD^2 \cdot \frac{p}{2 \cdot g \cdot D}.$$

Den Ausdruck  $GD^2$  nennen wir das *Schwungradmoment* des Kranzes. Wenn unter dem Einfluß dieses Drehmomentes, der Schwungradring in  $t$  Sekunden eine Umfangsgeschwindigkeit  $v$  erreichen soll, so muß die Geschwindigkeitszunahme in jeder Sekunde, das ist die Beschleunigung  $p$ , gleich sein:

$$p = \frac{v}{t} = \frac{D \cdot \pi \cdot n}{60 \cdot t}.$$

Dies in die vorstehende Drehmomentgleichung eingesetzt, ergibt:

$$M = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{n}{t} \dots \dots \dots 49$$

Wir können hieraus berechnen, welches Drehmoment  $M$  erforderlich ist, um einen Schwungrad vom Gewichte  $G$  und dem mittleren Durchmesser  $D$  in  $t$  Sekunden gleichförmig so zu beschleunigen, daß er dann  $n$  minutliche Umdrehungen macht.

Die gleiche Rechnungsweise können wir nun auch auf einen Motoranker anwenden, indem wir ihn uns auch als Schwungrad denken. Sein  $GD^2$  wird durch Versuche festgestellt und ist meistens in den Preislisten angegeben. Oft sind aber außer dem Anker noch weitere Schwungradmassen vorhanden, die auch berücksichtigt werden müssen. Drehen dieselben mit derselben Umlaufzahl wie der Anker, so ist ihr  $GD^2$  einfach zu demjenigen des Ankers zu addieren. Zuweilen sind solche Schwungradmassen aber mit dem Motor durch eine Übersetzung verbunden, wie es Abb. 366 darstellt. Dann ist das Drehmoment an der Schwungradwelle,

welches sich ebenfalls nach Gleichung 49 berechnet, noch mit der Übersetzung, also  $n_1 : n$  zu multiplizieren und kann dann erst zu dem für den Anker notwendigen addiert werden. Wir denken uns also die Schwungmasse mit veränderter Umlaufzahl auf die Ankerwelle verlegt. In diesem Falle ist das Gesamtdrehmoment:

$$M = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{n}{t} + \frac{G_1 D_1^2}{375} \cdot \frac{n_1}{t} \cdot \frac{n_1}{n} \dots \dots \dots 50$$

Der Motor kann auch mit geradlinig bewegten Massen, wie bei Fahrzeugen, gekuppelt sein. Sei das Gewicht der mit der sekundlichen Geschwindigkeit  $v$  bewegten Masse  $Q$ , so denken wir uns diese Masse an einen Ankerpunkt verlegt, dessen Umfangsgeschwindigkeit mit der

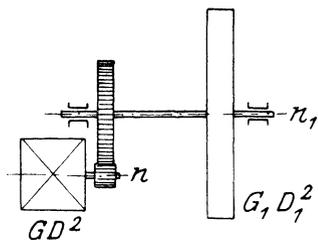


Abb. 366.

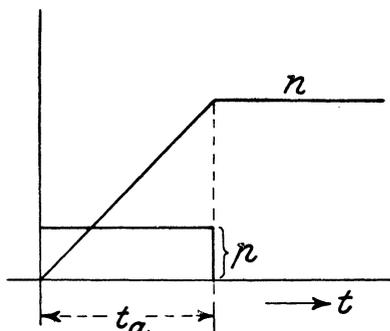


Abb. 367. Anlauf bei konstantem Drehmoment.

Geschwindigkeit der Masse übereinstimmt. Der Kreisdurchmesser  $d$  dieses Punktes ist:

$$d = \frac{60 \cdot v}{\pi \cdot n}$$

Also bedingt die gradlinig bewegte Masse ein zusätzliches Schwungmoment von

$$Q d^2 = \frac{Q \cdot v^2 \cdot 3600}{\pi^2 \cdot n^2}$$

Der Motor muß demnach insgesamt ein Drehmoment entwickeln von:

$$M = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{n}{t} + \frac{0,975 \cdot Q v^2}{n \cdot t} \dots \dots \dots 51$$

Das normale Anlassen eines Motors soll nach dem Früheren bei konstantem Strom geschehen. Da allerdings ein Anlasser nie unendlich feinstufig ist, läßt sich die Gleichhaltung des Stromes zwar nicht ganz erreichen, jedoch sind die Schwankungen nicht groß. Ein konstanter Strom bewirkt aber bei allen Motoren ein konstantes Drehmoment, und damit sind die Ableitungen, welche wir oben vorgenommen haben, gültig. Unter dem Einfluß dieses konstanten Drehmomentes wird sich der Anker beschleunigen, und zwar so, daß in jeder Sekunde die Geschwindigkeit um gleichviel zunimmt. Abb. 367 stellt den Anstieg der Drehzahl in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  dar. Die sekundliche Geschwindigkeitszunahme, das ist die Beschleunigung  $p$ , bleibt

immer die gleiche. Die Anlaßzeit  $t_a$  können wir nun aus Gleichung 49 berechnen zu:

$$t_a = \frac{GD^2 \cdot n}{375 \cdot M} \dots \dots \dots 52$$

Wird nach Abb. 366 eine weitere Masse mit beschleunigt, so würde sein:

$$t_a = \frac{GD^2 \cdot n}{375 \cdot M} + \frac{G_1 D_1^2 \cdot n_1^2}{375 \cdot M \cdot n} \dots \dots \dots 53$$

Entsprechend ergibt sich die Anlaßzeit für den Fall, daß außer dem Anker sowohl eine drehende Masse mit dem Schwungmoment  $G_1 D_1$  auf die minutliche Drehzahl  $n_1$ , als auch ein gradlinig bewegtes Gewicht  $Q$  auf die sekundliche Geschwindigkeit  $v$  gebracht werden soll, zu:

$$t_a = \frac{GD^2 \cdot n}{375 \cdot M} + \frac{G_1 D_1^2 \cdot n_1^2}{375 \cdot M \cdot n} + \frac{0,975 \cdot Q \cdot v^2}{M \cdot n} \dots \dots \dots 54$$

**Beispiel:** Ein Laufkran von 30 t Tragfähigkeit habe ein Eigengewicht von 39 t. Der Fahrtrieb erfolgt durch einen Motor, der bei 26 kW Leistung und 700 minutlichen Umdrehungen dem Kran eine Geschwindigkeit von 100 m in der Minute erteilt. Wie groß ist die Anlaufzeit, wenn das Schwungmoment des Motorankers 12 kgm<sup>2</sup> ist und bei konstantem Strom angefahren wird?

Der Motor soll in diesem Beispiel mittels Zahnradern auf die Laufräder arbeiten. Die Ankerwelle trägt also ein Zahnrad, dessen Schwungmoment wir unter Annahme eines mittleren Durchmessers angenähert berechnen können, und welches zu dem Schwungmoment des Ankers addiert werden muß. In diesem Fall sei 0,25 kgm<sup>2</sup> berechnet worden. Die Arbeitswucht der anderen Räder und Laufrollen können wir vernachlässigen, weil ihre Geschwindigkeit weit geringer ist.

Das normale Drehmoment des Motors berechnet sich nach der Mechanik zu:

$$M_n = 0,975 \cdot \frac{\mathcal{C}}{n},$$

worin  $\mathcal{C}$  die vom Motor abgegebene Leistung in Watt und  $n$  die minutliche Drehzahl ist, also:

$$M_n = 0,975 \cdot \frac{26000}{700} = 36,2 \text{ mkg.}$$

Dieses Moment wird zur Überwindung der Fahrwiderstände benötigt. Damit wir die Massen in Bewegung bringen können, brauchen wir ein erhöhtes Moment, und wir können praktisch annehmen, daß in diesem Falle etwa mit doppeltem Drehmoment angefahren wird. Zur Beschleunigung des Kranes stehen uns also auch noch 36,2 mkg zur Verfügung. Die Anfahrzeit ist demnach:

$$t_a = \frac{(GD^2 + G_1 D_1^2) \cdot n}{375 \cdot M} + \frac{0,975 \cdot Q \cdot v^2}{M \cdot n}.$$

Hierin ist  $v$  die sekundliche Fahrgeschwindigkeit, also  $v = 100 : 60 = 1,67$  m/sek. und  $Q$  ist die Summe von Krangewicht und Last, also  $39000 + 30000 = 69000$  kg.

$$t_a = \frac{(12 + 0,25) \cdot 700}{375 \cdot 36,2} + \frac{0,975 \cdot 69000 \cdot 1,67^2}{36,2 \cdot 700},$$

$$t_a = 0,63 + 7,4 = 8,03 \text{ Sek.}$$

In dieser Zeit legt der Kran einen Weg zurück von:

$$s = \frac{v}{2} \cdot t_a = \frac{1,67}{2} \cdot 8,03 = 6,7 \text{ m.}$$

Es geht hieraus hervor, daß der Kran in vielen Fällen gar nicht in den Beharungszustand gelangt, weil der beabsichtigte Fahrweg kleiner ist als der Anlaufweg.

**b) Der Anlauf mit gleichförmig abnehmendem Drehmoment.** Die vorstehenden Berechnungen gelten genau genommen nur, wenn

genügend Zeit vorhanden ist, um mit konstantem Strom anzulassen. Bei zahlreichen Antrieben ist dies aber gar nicht möglich, weil der Betrieb eine Abkürzung der Anlaufzeit auf das äußerste Maß verlangt. Der Motor erhält bei so plötzlichem Einschalten bereits im ersten Augenblick einen so großen Strom, daß das höchste Drehmoment, welches er überhaupt zu entwickeln fähig ist, und welches auf S. 293 angenähert angegeben ist, wirksam wird. Sobald sich aber der Anker dreht, erzeugt er eine mit steigender Geschwindigkeit zunehmende Gegenspannung, welche die Stromaufnahme und damit das Drehmoment vermindert, bis es nach beendetem Anlauf den für Nutz- und Reibungsarbeit noch nötigen Wert erreicht. Nach welcher zeitlichen Abhängigkeit hier das Drehmoment abnimmt, hängt sowohl von dem Motor, als auch von der Arbeitsmaschine ab. Eine Bestimmung ist deshalb schwierig.

Wir werden aber bei Vergleichsrechnungen keinen allzugroßen Fehler begehen, wenn wir einmal annehmen, daß die Abnahme des Drehmomentes während der Anlaufzeit gleichförmig vor sich geht. Die Beschleunigung  $p$  ist dann natürlich nicht mehr konstant, sondern auch sie wird von einem anfänglichen Höchstwert gleichförmig abnehmen und am Ende der Anlaufzeit  $t_a$  den Nullwert erreichen, wie dies Abb. 368 veranschaulicht. Nach den Regeln der Mechanik hat die abnehmende Beschleunigung zur Folge, daß die Geschwindigkeit nicht mehr, wie punktiert gezeichnet, gradlinig ansteigt, sondern immer mehr zurückbleibt. Ihr Verlauf ist durch eine Parabel dargestellt, die in der Zeit  $t_a$  nur halb so hoch ansteigt, als wenn das anfänglich vorhandene große Drehmoment konstant geblieben wäre. Die punktierte Gerade würde also den Geschwindigkeitsverlauf bei konstant wirkendem Anfangsmoment darstellen, die Parabel hingegen stellt ihn bei gleichförmig abnehmendem Moment dar. Wir sehen, daß wir für die Berechnung der Anlaufzeit demnach die früheren Gleichungen benutzen können, wenn wir darin nur statt  $n$  die doppelte Drehzahl  $2n$  einführen:

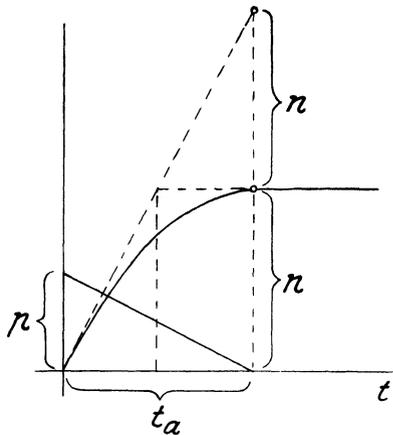


Abb. 368. Anlauf bei gleichförmig abnehmender Beschleunigung (Anfangsbeschleunigung  $p$ ).

$$t_a = \frac{GD^2 \cdot 2 \cdot n}{375 \cdot M} \dots \dots \dots 55$$

Die Anlaufzeit ist also doppelt so groß, als wenn das anfängliche große Drehmoment konstant wirksam geblieben wäre.

Im Falle, daß noch eine gradlinig bewegte Masse vom Gewicht  $Q$  mit zu beschleunigen ist, ergibt sich die Anlaufzeit zu:

$$t_a = 2 \cdot \left[ \frac{GD^2 \cdot n}{375 \cdot M} + \frac{0,975 \cdot Q \cdot v^2}{M \cdot n} \right] \dots \dots \dots 56$$

Selbstverständlich gelten die abgeleiteten Formeln auch für die Verzögerungsperiode, wenn man die entsprechenden Drehmomente einsetzt.

**Beispiel:** In welcher Zeit würde der in dem Beispiel auf S. 266 betrachtete Laufkran anlaufen, wenn der Motor im ersten Augenblick ein viermal so großes Moment wie das Beharrungsmoment entwickeln könnte? (Abnehmendes Drehmoment.)

Das anfänglich zur Beschleunigung verfügbare Drehmoment ist, weil 36,2 mkg zur Überwindung der Fahrwiderstände benötigt werden, nur:

$$M = 3 \cdot 36,2 = 108,6 \text{ mkg.}$$

Nach Gleichung 56 ergibt sich hiermit:

$$t_a = 5,35 \text{ Sek.}$$

Wir wollen nun noch nachprüfen, ob es überhaupt möglich ist, daß der Kran derart schnell anläuft, ob nicht zuerst die Räder auf den Schienen gleiten. Der Kran soll in 5,35 Sek. parabelförmig zunehmend eine Geschwindigkeit von 1,67 m/s. erreichen. Würde er seine Geschwindigkeit so wie im Anfangspunkt der Abb. 368, also wie punktiert gezeichnet, weitersteigern, so hätte er in 5,35 Sek. eine Geschwindigkeit von  $2 \cdot 1,67 = 3,34$  m/s. erreicht. Die Beschleunigung  $p$  im ersten Augenblick, d. h. die sekundliche Geschwindigkeitszunahme beträgt demnach:

$$p = \frac{3,34}{5,35} = 0,625 \text{ m/Sek.}^2$$

Um diese Beschleunigung zu erzeugen, muß an dem Kran nach Gleichung 48 eine Zugkraft wirken von:

$$P = Q \cdot \frac{p}{g} = 69000 \cdot \frac{0,625}{9,81} = 4400 \text{ kg.}$$

Ein Rutschen der Räder würde eintreten, wenn die Beschleunigungskraft  $P$  größer wäre als der Gleit-Reibungswiderstand zwischen Rad und Schiene. Dieser letztere ist aber:

$$R = \mu \cdot Q = 0,2 \cdot 69000 = 13800 \text{ kg.}$$

Ein Rutschen kann also nicht eintreten.

**c) Der Energieverlust durch Massenwirkung.** Zur Beschleunigung eines Schwungrads denken wir uns am mittleren Umfang eine Kraft  $P$  konstant wirkend. Diese Kraft mal  $D/2$  ist das durch Gleichung 49 berechnete Drehmoment  $M$ . Die Beschleunigungsarbeit, welche die Kraft  $P$  während des Anlaufs tut, ist Kraft  $P$  mal Weg  $s$ :

$$A = P \cdot s = \frac{M}{D/2} \cdot s = \frac{2 \cdot M \cdot s}{D}.$$

Zu Beginn macht das Rad 0 Umläufe, am Ende der Anlaufzeit hingegen macht es  $n$  Umdrehungen in der Minute. Im Mittel ist bei gleichförmiger Beschleunigung demnach die Drehzahl gleich  $n:2$  in der Minute, oder  $\frac{n}{2 \cdot 60}$  in der Sekunde.

Während der  $t$  Sekunden des Anlaufs werden also im ganzen:

$$\frac{n}{2 \cdot 60} \cdot t$$

Umdrehungen gemacht.

Ein Umfangspunkt legt deshalb den Weg  $s$

$$s = D \cdot \pi \cdot \frac{n}{2 \cdot 60} \cdot t$$

zurück.

Setzt man diesen Wert statt  $s$  in die obige Arbeitsgleichung ein, so ergibt sich:

$$A = \frac{GD^2 \cdot n^2}{7200} \dots \dots \dots 57$$

Wir sehen hieraus, daß die in einer drehenden Masse aufgespeicherte Arbeitswucht um so größer ist, je größer deren Schwungmoment ist, daß sie aber bei hoher Umlaufgeschwindigkeit besonders groß ist, weil  $n$  im Quadrat vorkommt.

In ganz gleicher Weise läßt sich die in einer gradlinig bewegten Masse vom Gewichte  $G$  aufgespeicherte Arbeit berechnen, wenn man von Gleichung 48 ausgeht. Man erhält dann:

$$A = \frac{G \cdot v^2}{g \cdot 2} \dots \dots \dots 58$$

Hierin ist  $v$  die sekundliche Geschwindigkeit und  $g = 9,81$ .

Um den Energieaufwand während des Anlaufs klarer übersehen zu können, wollen wir im folgenden wieder ein Anlassen mit konstantem Strom, also gleichbleibendem Drehmoment voraussetzen. Ferner wollen wir entsprechend Abb. 369 nach der Anlaufzeit  $t_a$  eine Betriebszeit  $t_b$  annehmen. Das von der Arbeitsmaschine benötigte Drehmoment sei während der ganzen Zeit konstant. Die durch Linie  $\mathcal{E}_2$  dargestellte Leistung wird demnach ohne Berücksichtigung der Massenwirkung an die Arbeitsmaschine

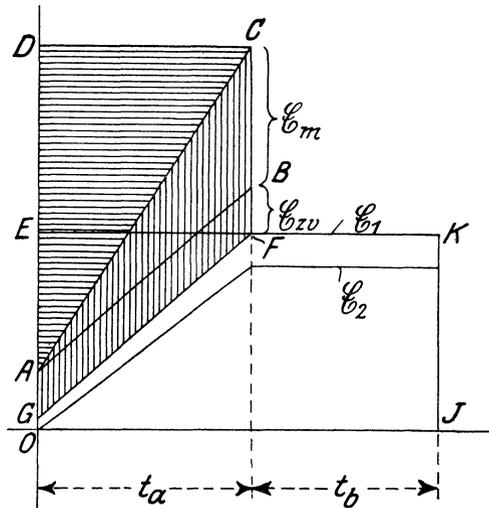


Abb. 369. Der Energieaufwand beim Anlauf.

abgegeben. Während des Anlaufs muß diese Linie gradlinig ansteigen, weil doch die Leistung dem Produkt aus Drehmoment und Geschwindigkeit proportional ist und letztere gleichförmig ansteigt. Addiert man zu dieser Leistung die Motorverluste, so erhält man die vom Motor aufgenommene Leistung  $\mathcal{E}_1$ . Infolge des hohen Beschleunigungsdrehmomentes treten aber im Motor während des Anlaufs wesentlich höhere Kupferverluste auf, die wegen des konstanten Anlaufstromes auch konstant sind. In Abb. 369 sind diese zusätzlichen Motorverluste  $\mathcal{E}_{zv}$  hinzugefügt, ferner auch die Leistung  $\mathcal{E}_m$ , welche zur Beschleunigung aufgewendet werden muß. Die letztere steigt auch während des Anlaufs an, weil sie das Produkt aus konstantem Drehmoment und wachsender Geschwindigkeit ist. Da in dem Diagramm horizontal die Zeit aufgetragen ist und bekanntlich Arbeit das Produkt Leistung mal Zeit ist, stellen die

Diagrammflächen die Arbeit dar. Die Fläche ABC ist demnach die durch Gleichung 57 und Gleichung 58 bestimmte Beschleunigungsarbeit. Ohne Berücksichtigung der Massen nimmt der Motor eine der Fläche O G F K J entsprechende Arbeit auf, bei Berücksichtigung der Massenwirkung hingegen O A C F K J. Der Mehraufwand ist also durch A C F G dargestellt. Wir wissen aber nun, daß die aus dem Netz bei konstanter Netzspannung während des Anlaufs entnommene Leistung konstant sein muß, weil wir konstanten Strom vorausgesetzt haben (angenähert auch bei Drehstrommotoren). Der aus dem Netz entnommene Arbeitsbetrag ist also durch die Fläche O D C F K J gegeben. Die Arbeit A C D ist in den Anlaßwiderständen in Wärme verwandelt worden. Da nun ohne Berücksichtigung der Massenwirkung dem Netz eine Arbeit entsprechend der Fläche O E F K J entnommen würde, ist der durch die Massen verursachte gesamte Mehraufwand durch Fläche E D C F dargestellt, welche geometrisch betrachtet gleich G A B F + 2 mal A B C ist. Der Mehraufwand ist also:

$$\mathcal{E}_{zv} \cdot t_a + 2 \cdot A.$$

Hierin ist A die nach Gleichung 57 u. 58 berechnete Arbeitswucht.

Bei sehr vielen Antrieben spielt die Masse des Motorankers die Hauptrolle, und man nimmt deshalb vielfach an, daß ein Motor mit möglichst geringer Umlaufzahl zu wählen sei, wenn es sich um einen Antrieb mit großer Umlaufzahl handelt. Nun wissen wir aber bereits, daß ein langsam laufender Motor wesentlich größer ist, als ein Schnellläufer gleicher Leistung und deshalb auch ein sehr viel größeres Schwungmoment besitzt. Die Verminderung der Arbeitswucht durch eine verringerte Umlaufzahl wird deshalb wieder durch das große Schwungmoment ausgeglichen. Ob in einem speziellen Falle ein langsam laufender oder ein schnell laufender Motor günstiger ist, muß durch Nachrechnung festgestellt werden, wobei die wirklichen Schwungmomente der vorgesehenen Motoren einzusetzen sind. Bei gleicher Leistung und Umlaufzahl weichen nämlich die Schwungmomente ganz erheblich voneinander ab, wenn der Anker im Verhältnis zum Durchmesser langgestreckt oder kurz ist. Ein langer Anker hat natürlich das kleinere Schwungmoment.

Eine wesentliche Verminderung der durch die Massenwirkung verursachten Verluste kann man dadurch erzielen, daß man die Verluste in den Anlaßwiderständen vermeidet, wie dies bei der Leonardschaltung der Fall ist. Eine weitere Verbesserung würde eintreten, wenn bei der Stillsetzung durch motorische Bremsung ein Teil der Beschleunigungsarbeit A zurückgewonnen würde. Eine Verschlechterung wird hingegen zu erwarten sein, wenn das Stillsetzen der bewegten Massen durch Gegenstrom erfolgt, weil der Motor bei dieser Bremsung noch Energie aus dem Netz aufnimmt.

**Beispiel:** Welche Verluste durch Massenwirkung sind bei dem auf S. 266 betrachteten Kran zu erwarten?

Die in den bewegten Massen des Kranes bei voller Fahrt aufgespeicherte Energie ist:

$$A = \frac{(G D^2 + G_1 D_1^2) \cdot n^2}{7200} + \frac{Q}{g} \cdot \frac{v^2}{2} = \frac{12,25 \cdot 700^2}{7200} + \frac{69000}{9,81} \cdot \frac{1,67^2}{2},$$

$$A = 10635 \text{ mkg.}$$

Der Wirkungsgrad des Gleichstrom-Hauptschlußmotors kann zu 0,88 angenommen werden. Die von dem Motor im Beharrungszustand aufgenommene Leistung ist also:

$$\mathcal{E}_1 = \frac{\mathcal{E}_2}{\eta} = \frac{26000}{0,88} = 29500 \text{ W.}$$

Nehmen wir nach S. 61 an, daß der Spannungsabfall im Anker 3% betrage, dann ist der Kupferverlust bei normaler Belastung:

$$29500 \cdot 3/100 = 885 \text{ W}$$

und bei doppelter Belastung angenähert:

$$4 \cdot 885 = 3540 \text{ W.}$$

Die zusätzlichen Motorverluste im Anlauf betragen also etwa:

$$\mathcal{E}_{zv} = 3540 - 885 = 2655 \text{ W.}$$

Der Mehraufwand durch die Massenwirkung ist also für einen Anlauf:

$$\mathcal{E}_{zv} \cdot t_a + 2 A = 2655 \cdot 8,03 + 104300 = 125600 \text{ W sek.}$$

Hierin ist A in Wattsekunden eingesetzt (75 mkg = 736 W sek).

### C. Der Ausgleich von Belastungsstößen.

Sehr viele Arbeitsmaschinen brauchen zu ihrem Antrieb kein dauernd konstantes Drehmoment, sondern sie bedürfen stoßweise eines Antriebs, der die Größe des normalen um ein mehrfaches übersteigt. Wollte man dem Antriebsmotor die Leistung dieses großen Drehmomentes überlassen, so müßte er nicht nur größer gewählt werden, als es hinsichtlich der Erwärmung notwendig wäre, sondern es würden ihm die fortwährenden Stöße auch schaden. Vor allem würden aber die Belastungsstöße auch Stromstöße nach sich ziehen, die in einem angeschlossenen Lichtnetz sehr störend empfunden würden. Bei derartigen Antrieben, wie Stanzen, Pressen, Walzwerken, Fördermaschinen ist man deshalb immer bestrebt, einen plötzlichen Mehrbedarf an Energie nicht vom Netz, sondern von anderer Stelle leisten zu lassen. Hierfür kommen in den meisten Fällen entweder ein Schwungrad oder eine Akkumulatoren-batterie in Frage.

**Schwungradausgleich.** Aus Gleichung 57 ersehen wir, daß in einem umlaufenden Schwungrad eine erhebliche Energie aufgespeichert ist, die um so größer ist, je größer dessen Schwungmoment ist, die aber mit dem Quadrate der Umlaufzahl wächst. Es ist also ratsam, immer möglichst schnellaufende Schwungräder zur Energieaufspeicherung zu verwenden. Wir wollen uns nun einen elektromotorischen Antrieb mit einem Schwungrad ausgerüstet denken und setzen einmal voraus, daß die Drehzahl des Motors mit zunehmendem Belastungsstrom nur wenig abfällt, wie dies bei Nebenschluß- und Drehstrommotoren der Fall ist. Denken wir uns ferner auf den Motor nacheinander kurzzeitige Belastungsstöße wirken, so muß von der Energie, die ein solcher Stoß benötigt, ein Teil von dem Motor geliefert werden, während der Rest vom Schwungrad übernommen wird. Dieses kann aber nur Energie hergeben, wenn sich seine Drehzahl vermindert. Gleichung 57 erlaubt uns zu berechnen, wieviel bei einer bestimmten Drehzahlverminderung zu erwarten ist. Da aber der angenommene Motor seine Drehzahl nicht sehr vermindern kann, muß derselbe fast ganz allein den Stoß aufnehmen. Im Gegen-

satz dazu steht ein Motor mit abfallender Drehzahl. Bei diesem wird die Stoßenergie zum größeren Teil von dem Schwungrad übernommen, und infolgedessen wird nur ein kleiner Strom aus dem Netz benötigt. Es leuchtet ein, daß die Größe des Schwungrades durch die Höhe der Stromstöße bestimmt ist, die man noch zulassen will. Ein Schwungrad kann also nur dann richtig wirksam sein, wenn die Umlaufzahl des Antriebsmotors bei Belastung genügend abfällt. Dies ist bei Nebenschluß- und Drehstrommotoren nicht der Fall; es muß deshalb bei denselben künstlich ein Abfall von 10—15% bei Normallast erzwungen werden. Bei dem Nebenschlußmotor könnte man dies durch Einschaltung eines kleinen Widerstandes in den Ankerstromkreis erreichen, besser ist es jedoch, wenn man den Nebenschlußmotor überhaupt verläßt und statt seiner einen Doppelschlußmotor mit schwacher Hauptschlußwicklung benutzt. Bei dem Drehstrommotor läßt sich eine so glückliche Lösung nicht finden. Bei ihm bleibt nichts anderes übrig, als durch einen zusätzlichen Widerstand im Läuferstromkreis (Schlupfwiderstand) den Schlupf zu vergrößern. Damit dieser energieverzehrende Widerstand nicht dauernd eingeschaltet ist, kann derselbe bei Auftreffen eines Belastungsstoßes selbsttätig eingeschaltet werden.

**Batterieausgleich.** Der Zweck derartiger Akkumulatorenbatterien, die parallel zum Netz liegen und auch wohl *Pufferbatterien* genannt

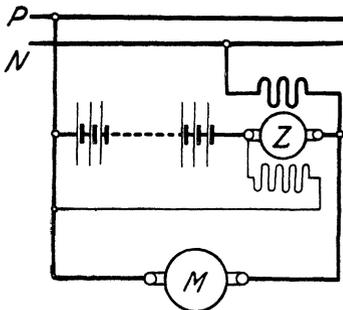


Abb. 370. Piranischtung.

werden, ist, den Mehrbedarf an Strom, den die Antriebsmotoren bei Belastungsstößen haben, zu übernehmen und somit das Netz davon freizuhalten. Abb. 370 zeigt die sog. *Piranischaltung*, bei welcher die Pufferung durch eine Zusatzdynamo Z verbessert ist. Diese Maschine besitzt zwei Erregerwicklungen, von denen die eine von der konstanten Batteriespannung, die andere als Hauptschlußwicklung von dem Netzstrom gespeist wird. Beide Wicklungen wirken sich entgegen, derart, daß bei normaler Belastung des Motors M (es können auch mehrere Motoren sein) sich die beiden Erregungen aufheben und die Zusatzmaschine keine Spannung liefert. Braucht der Motor aber mehr Strom, so wächst auch der Strom in der Hauptschlußwicklung der Zusatzmaschine, und diese liefert eine Spannung in gleichem Sinne wie die Batterie. Durch diese Spannungserhöhung wird die Batterie veranlaßt Strom abzugeben. Der zusätzliche Strom, den die Motoren benötigen, wird demnach von der Batterie gedeckt. Umgekehrt, wenn die Motoren unterlastet sind, wird die Nebenschlußwicklung der Zusatzmaschine überwiegen, wodurch eine die Batteriespannung vermindernde zusätzliche Spannung entsteht, welche einen Ladestrom zur Folge hat. Derartige Schaltungen findet man in Straßenbahnbetrieben häufig.

## D. Der Schutz der elektrischen Ausrüstung gegen schädigende äußere Einflüsse und die Kühlung der Motoren.

Der normale *offene Motor*, wie er durch Abb. 371 dargestellt ist, hat den großen Vorzug, daß die in ihm entwickelte Wärme leicht durch die bewegte Luft abgeführt wird. Er kommt deshalb unbedingt überall da zur Verwendung, wo eine Verschmutzung und Durchfeuchtung nicht zu befürchten ist. Bei dem Antrieb von Werkzeugmaschinen und ähnlichen Maschinen besteht oft die Gefahr, daß Späne und Werkzeuge in den Motor fallen können. Man schützt sich hiergegen einfach dadurch, daß man die Lagerschildöffnungen mit Drahtgewebe oder gelochtem Blech überspannt. Die Wärmeabfuhr wird hierdurch nicht behindert. Räume, die zwar trockene Luft haben, in denen aber zuweilen Spritzwasser auftritt, erfordern einen Schutz des Motors. Für derartige Räume geeignete, *ventiliert gekapselte Motoren* sind entweder so gekapselt, daß die Lagerschilddeckel eine Anzahl überdeckter Luftschlitze haben, oder die Motoren sind nach Abb. 372 mit einem Luftansauge- und Ausblasestutzen versehen. Da auch bei den *ventiliert gekapselten Motoren* eine vollständige Durchlüftung erzielt werden kann, können sie fast ebenso hoch wie die offenen Motoren belastet werden. Motoren für schmutzige Räume, ganz besonders für nasse, müssen *vollkommen gekapselt* sein.

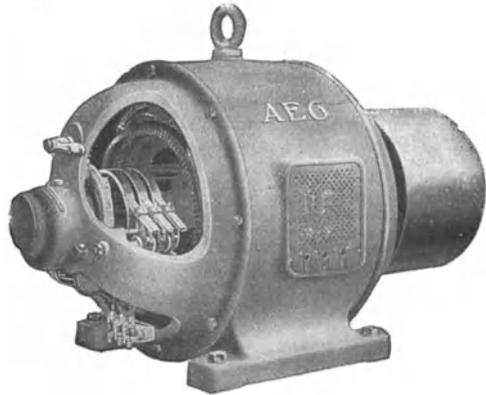


Abb. 371. Offener Motor.

Damit ist aber jeder Luftaustausch nach außen unterbunden, so daß schon bei wesentlich geringerer Belastung die höchst zulässige Motortemperatur erreicht ist. Gekapselte Motoren sind deshalb in der Anlage teuer, und wir werden ihre Verwendung so sehr wie möglich beschränken oder durch irgendwelche Kühlwirkungen ihre Leistungsfähigkeit erhöhen. Es ist auch zu bedenken, daß ein vollkommen dichter Abschluß eines Motors gar nicht zu erreichen ist. Infolge des ständigen Temperaturwechsels, dem ein wechselnd belasteter Motor ausgesetzt ist, entstehen im Motorinneren Druckunterschiede gegenüber dem äußeren Luftdruck, welche ein Ansaugen oder Fortdrücken von Luft zur Folge haben. Der Motor „atmet“. Bei dem vollkommen dicht gekapselten Motor können sich diese Druckunterschiede aber nur durch die Lager ausgleichen und es leuchtet ein, daß darin bei staubiger Luft eine große Gefahr insofern besteht, als der Staub als Schleifmittel wirkend, einen beschleunigten Verschleiß der Lagerschalen herbeiführen wird. Zum Schutze hat man besondere Abdichtungen der Lager ersonnen, auch sieht man zuweilen

eine kleine Öffnung im Gehäuse vor, welche dem Luftausgleich dienen soll. Man nimmt also damit eine geringe Verschmutzung des Motorinneren in Kauf. Um trotz der Kapselung dennoch eine hohe Kühlwirkung und damit große Leistungsfähigkeit zu haben, kann man den Motor mit einem Kühler nach

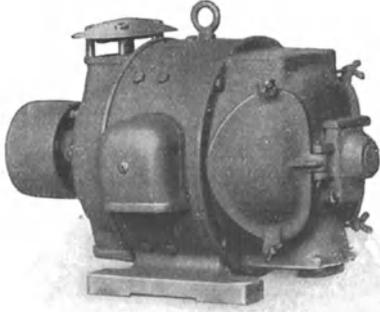


Abb. 372.  
Ventiliert gekapselter Motor.

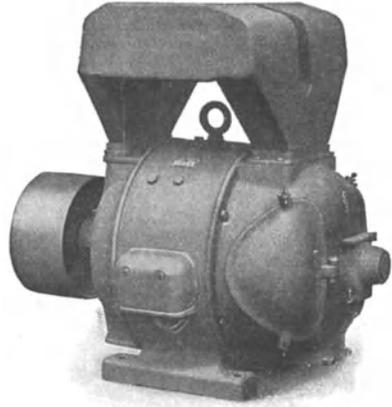


Abb. 373.  
Gekapselter Motor mit Kühler

Abb. 373 versehen. Ein eingebautes Ventilatorrad treibt die Innenluft in stetigem Kreislauf durch Motor und Kühler. In neuerer Zeit kommt

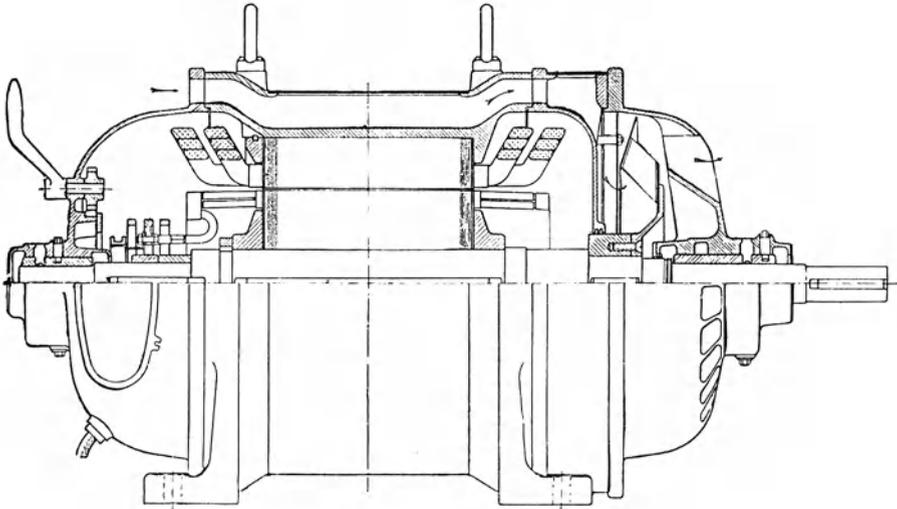


Abb. 374. Motor mit Mantelkühlung.

auch vielfach eine durch Abb. 374 dargestellte Motorbauart zur Verwendung. Der vollkommen gekapselte Motor besitzt einen doppelten Mantel, und ein Ventilatorrad treibt fortgesetzt einen kühlenden Luftstrom durch

den Zwischenraum. Eine sehr wirksame Kühlung gekapselter Motoren kann man in Ausnahmefällen auch durch Wasser oder Druckluft erzielen. Das Wasser strömt hierbei durch einen gut gedichteten Mantel, welcher den Motor umgibt, während die Druckluft in das Motorinnere geleitet wird. Die Druckluftkühlung gestattet außerdem die vollkommene Sauberhaltung des Motors. Während nämlich bei den vorher besprochenen Bauarten stets durch das Atmen eine geringe Verschmutzung des Motorinneren zu erwarten ist, wird bei Druckluftanschluß das Motorinnere stets unter geringem Überdruck gehalten, so daß ein Eindringen von Staub oder Feuchtigkeit ausgeschlossen ist. Natürlich muß die Druckluft selbst rein sein, auch ist durch Wasserabscheider die Feuchtigkeit zu entfernen. Eine andere vollkommene Lösung kann man dadurch erzielen, daß man den gekapselten Motor, welcher nach Abb. 375 mit Stutzen versehen ist, mittels möglichst kurzer Rohrleitungen A und B, die nicht zu eng sein dürfen, mit einem sauberen Nebenraum verbindet.

Der Motor treibt dann mit Hilfe seines Ventilators einen Strom reiner Luft durch das Innere. Im Notfall kann man auch die Rohrleitung ins Freie führen, wobei aber die Gefahr besteht, daß feuchte Luft angesaugt wird, oder daß durch Temperaturwechsel Wasserniederschläge im Motor auftreten. Es erscheint auf

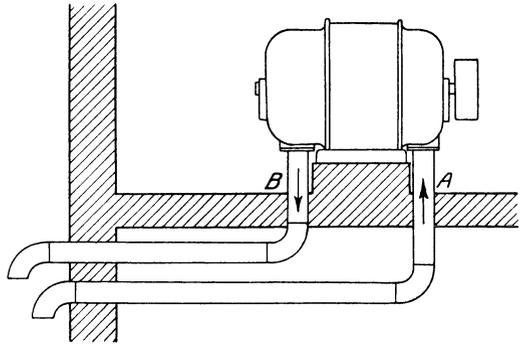


Abb. 375. Motor mit Frischluftzuführung.

den ersten Blick unnützlich, daß man die Abluft in den Nebenraum zurückführt. Würde man jedoch den Abluftstutzen offen lassen, so würde bei einer Abkühlung des Motors infolge Stillsetzens schmutzige Luft aus dem Werksraum in das Motorinnere hereingesaugt. Da eine derartige Verschmutzung indessen nicht groß ist, kann man sich das Abluftrohr in den Fällen sparen, bei welchen der Motor nahezu dauernd läuft oder die Feuchtigkeit bzw. der Staubgehalt im Werksraum nicht zu groß ist. Es liegt auf der Hand, daß eine derartige Anlage mit Luftleitungen ziemlich teuer wird, besonders dann, wenn die Antriebe sehr verschiedenartig sind. Stehen jedoch viele Motoren in einer Reihe, wie dies z. B. bei Spinnereien zutrifft, so lassen sich die Kosten durch Anordnung von Luftkanälen im Gebäude wesentlich vermindern. Bei Abb. 375 ist noch zu beachten, daß die Rohre eine stopfbüchsenartige Führung haben müssen, wenn der Motor auf Gleitschienen verschiebbar ist.

Große Motoren, die eine Kapselung überhaupt nicht gestatten, können nur dadurch gegen Staub und Feuchtigkeit geschützt werden, daß man sie in einem sauberen Nebenraum zur Aufstellung bringt, wobei nur die Welle durch die Wand in den Arbeitsraum ragt. Diese Anordnung ist in Zementfabriken zum Antrieb der Mühlen, sowie bei

dem Antrieb von Brikettpressen sehr beliebt; auch bei Walzwerksantrieben wird diese Lösung meistens gewählt. Einzelne Motoren lassen sich auch dadurch schützen, daß man sie mit einem kleinen Häuschen umgibt. Dasselbe muß natürlich eine gute Entlüftung haben, sei es durch Kaminwirkung oder sei es durch einen eingebauten Ventilator.

In Fällen, in denen die Luft lediglich durch trockenen Staub verunreinigt ist, hat man den Schutz des Motors auch zuweilen dadurch vereinfacht, daß man nach Abb. 376 in den Motorfuß ein Staubfilter einbaut. Die Luft wird mittels des im Motor umlaufenden Ventilatorrades durch dieses Filter angesaugt, und nachdem sie kühlend den Motor durchströmt hat, wird sie durch die Lagerschildschlitze ausgeblasen. Es ist klar, daß bei der großen Luftmenge, die ein Motor zur Kühlung benötigt, auch eine größere Staubmenge abgeschieden werden muß.



Abb. 376. Motor mit Staubfilter.

Ein Filter muß demnach ziemlich groß sein, wenn es längere Zeit hindurch ohne Reinigung wirksam bleiben soll. Wird es aber nicht gereinigt, so verstopft es sich und der Motor wird heiß. Selbstverständlich kann auch bei dieser Anordnung schmutzige Luft durch die Abluftöffnungen hereingesaugt werden, sobald sich der Motor infolge Stillsetzung abkühlt. Ein Motor mit Filterschutz ist deshalb nur zu empfehlen, wenn der Staubgehalt der Luft gering und der Motor mit geringen Unterbrechungen dauernd im Betrieb ist.

Dem Schutz des Motors ist natürlich ganz besonders Beachtung zu schenken, wenn die Luft Staub oder Feuchtigkeit enthält, die vielleicht außerdem noch chemische Einflüsse auf die Motorisolation ausüben. Da es schwer ist, einen Motor vollkommen abzudichten, sollte man in solchen Fällen bei der Motorbestellung besonders darauf hinweisen, daß der Motor für einen feuchten oder säurehaltigen Raum bestimmt ist. Im einen Falle kann er dann mit einem besonderen Feuchtigkeitsschutz versehen werden, der die Wicklungen gegen das Eindringen von Feuchtigkeit widerstandsfähiger macht, im anderen Fall kann ein säurebeständiger Lack zum Streichen der Wicklungen und Metallteile verwendet werden.

In gleicher Weise wie die Innenteile sind natürlich auch die Zuleitungsklemmen gegen Feuchtigkeit oder Staub, ganz besonders gegen leitenden Staub, wie z. B. Kohle zu schützen, weil sie sonst sehr leicht zu Kurzschlüssen Veranlassung geben. In Bergwerken mit Schlagwettergefahr ist ein ganz besonders guter Abschluß der Motoren erforderlich, weil die an Motorschleifbürsten auftretenden Fünkchen zu

Wetterexplosionen Veranlassung geben können. Bei solchen Grubenmotoren streicht die Kühlluft durch einen Plattenschutz, welcher aus einer großen Anzahl mit geringem Spielraum aufeinandergeschichteter Kupferbleche besteht und welcher ebenso wirkt, wie das Drahtgewebe der Davyschen Sicherheitslampe.

Ebenso wie die Motoren müssen auch die Schalt- und Anlaßvorrichtungen gegen schädigende äußere Einflüsse geschützt werden. Da aber im allgemeinen die Isolation derartiger Apparate weit weniger empfindlich ist, und weil der vollkommene Abschluß auch viel leichter möglich ist, bietet der Schutz keine nennenswerten Schwierigkeiten. Wir wollen diese Apparate deshalb später im Zusammenhang betrachten. Auch der Einfluß von Feuchtigkeit und dgl. auf die Leitungslegung soll später behandelt werden.

### E. Der aussetzende Betrieb.

Die Belastbarkeit eines Motors hängt bekanntlich nicht nur von dem höchsten Drehmoment ab, welches er zu entwickeln fähig ist, sondern sie ist vor allen Dingen durch die Temperaturgrenze bestimmt, die mit Rücksicht auf die Isolationsmaterialien nicht überschritten werden darf. Die deutschen Verbandsvorschriften lassen durchschnittlich eine höchste Übertemperatur von  $50^{\circ}$  gegenüber der Umgebung zu, eine Grenze, die übrigens bereits gefährlich hoch ist, wenn sie dauernd erreicht wird. Die im Motor entwickelte Wärme stammt aus den Verlusten, sie ist denselben also proportional. Bei Beginn des Betriebes hat der Motor noch keine Übertemperatur, er kann also auch die in ihm entwickelte Wärme noch nicht nach außen abgeben. Diese Wärme wird also ganz zur Temperaturerhöhung des Motors aufgebraucht. Erst wenn der Motor eine Übertemperatur bekommen hat, gibt er Wärme nach außen ab, die um so größer ist, je wärmer der Motor wird. Im Beharrungszustand schließlich, der nach mehreren Betriebsstunden erreicht wird, halten sich Wärmeentwicklung und Wärmeabfuhr das Gleichgewicht. Die Wärmeabfuhr hängt nun aber in hohem Maße von dem Bau eines Motors ab. Ein offener Motor, welcher der kühlenden Luft freien Zutritt gewährt, wird bei gleicher Größe mehr Wärme abführen können, als ein vollkommen gekapselter Motor, dessen Abkühlung nur durch die Oberflächenkühlung des Gehäuses erfolgt. Wir können einen offenen Motor deshalb im allgemeinen doppelt so hoch belasten, wie einen vollkommen gekapselten gleicher Größe. Die Kühlwirkung wird bei neuzeitlichen Motoren durch den Einbau von Ventilatorrädern noch ganz erheblich gesteigert, wodurch eine höhere Belastung möglich ist (billigere Motoren). Das aktive Gewicht eines Motors ist bei gleicher Umlaufzahl etwa der Motorleistung proportional. Hieraus geht hervor, daß die Leistung etwa mit der dritten Potenz der linearen Abmessungen wächst, während die Oberfläche nur mit dem Quadrate zunimmt. Da nun bei dem gekapselten Motor die Oberfläche allein für die Abkühlung in Frage kommt, leuchtet ein, daß bei größeren Leistungen die Oberfläche für die Kühlung zu klein wird, daß also große Motoren nicht gekapselt werden können. Man findet deshalb auch kaum gekapselte Motoren

über 100 kW. Ferner geht aus dieser Tatsache hervor, daß ein großer Motor längere Zeit braucht, um sich von einer bestimmten Temperatur abzukühlen, als ein kleiner.

Die vorstehenden Überlegungen gewinnen hohe Bedeutung, wenn es sich um *aussetzenden Betrieb* handelt, wenn also in ziemlich rascher Folge auf eine Arbeitszeit  $a$ , eine Ruhepause  $r$  folgt, wie dies Abb. 377 schematisch darstellt. Würden wir für einen solchen Betrieb einen Motor vorsehen, welcher die von der Arbeitsmaschine benötigte Leistung  $\mathcal{E}$  dauernd ununterbrochen leisten könnte, ohne die vorgeschriebene Temperaturgrenze zu überschreiten, so wäre dieser Motor unnötig groß und teuer. Wir kommen bei aussetzendem Betrieb nämlich mit einem wesentlich kleineren Motor aus, weil fortgesetzt Ruhepausen eintreten, in denen keine Wärme entwickelt, wohl aber abgeleitet wird. Selbstverständlich muß der kleiner gewählte Motor aber noch in der Lage sein, das von der Arbeitsmaschine geforderte Drehmoment zu entwickeln. Ein Motor ist für aussetzenden Betrieb richtig bemessen, wenn er sich trotz der Arbeitspausen dennoch bis zur zulässigen Temperaturgrenze erwärmt. Hierbei spielt aber die Dauer der Pausen im Verhältnis zur

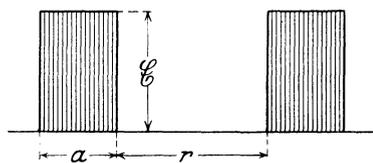


Abb. 377.

$a$  = Arbeitszeit,  $r$  = Ruhepause.

Arbeitszeit eine wichtige Rolle. Um die mittlere Leistung zu finden, die im Dauerbetrieb die gleiche Verlustwärme entwickelt, wie die in Abb. 377 dargestellte aussetzende Leistung, könnte man versucht sein, einfach das Leistungsmittel während der Zeit  $a + r$  zu suchen. Diese Rechnung würde aber nicht richtig sein, weil

doch die Motorverluste angenähert mit dem Quadrate des Stromes und damit auch der Leistung wachsen. Man müßte also den quadratischen Mittelwert der Leistung suchen. Diese *effektive Leistung* ergibt sich ähnlich wie die effektive Stromstärke auf S. 118, indem man die Leistung  $\mathcal{E}$  in Abb. 377 ins Quadrat erhebt und dann das Mittel sucht. Aus diesem Mittel ist dann die Quadratwurzel zu ziehen. Mathematisch dargestellt findet man also die effektive Leistung  $\mathcal{E}_e$  zu:

$$\mathcal{E}_e = \sqrt{\mathcal{E}^2 \cdot \frac{a}{a + r}} \dots \dots \dots 59$$

Das Verhältnis der Arbeitszeit  $a$  zur ganzen Zeit  $a + r$  wollen wir die *Einschaltdauer*  $e$  nennen. Wir können demnach auch schreiben:

$$\mathcal{E}_e = \sqrt{\mathcal{E}^2 \cdot e} = \mathcal{E} \cdot \sqrt{e} \dots \dots \dots 60$$

Im praktischen Betrieb wird das Zeitverhältnis  $e$  naturgemäß stark wechseln, so daß es notwendig ist, eine aus einer längeren Betriebszeit, z. B. einer Stunde berechnete mittlere Einschaltdauer der Rechnung zugrunde zu legen.

Wir erkennen, daß die Einschaltdauer die bestimmende Größe des aussetzenden Betriebes ist, und daß wir uns an ihrer Hand ein Bild über die verschiedenen Arbeitsverhältnisse machen können. Erfahrungsgemäß stellt eine Einschaltdauer von 15% einen schwachen Betrieb dar.

25% Einschaltdauer entspricht einem flotten Betrieb, wie er bei Werkstattkranen üblich ist, während 35% schon einen schweren Betrieb, wie denjenigen von Stahlwerkskranen und Walzwerkshilfsmaschinen zur Darstellung bringt.

**Beispiel:** Zum Hubwerksantrieb eines Kippers sind 20 kW erforderlich. Welche effektive Leistung ist nötig, wenn eine Einschaltdauer von 35% festgestellt wurde? Nach Gleichung 60 ergibt sich:

$$\mathcal{E}_e = \sqrt{\mathcal{E}^2 \cdot e} = \sqrt{20^2 \cdot \frac{35}{100}} = 11,8 \text{ kW.}$$

Der Motor erwärmt sich also bei einer Dauerbeanspruchung von 11,8 kW ebenso sehr, wie bei der aussetzenden von 20 kW.

Bei der vorstehenden Berechnung des quadratischen Mittelwertes der Leistung haben wir indessen Voraussetzungen gemacht, die nicht immer zutreffen.

Die Rechnung stimmt nämlich nur dann, wenn die Zeiten  $a$  und  $r$  ziemlich kurz sind, so daß keine wesentlichen Temperaturänderungen während derselben auftreten. Wesentlich einschneidender ist aber die zweite Voraussetzung, nach welcher wir während der Ruhepause  $r$  eine ebenso starke Wärmeableitung angenommen haben, wie während der Arbeitszeit  $a$ . Dies mag bei einem gekapselten Motor, bei dem lediglich die ruhende äußere Oberfläche abkühlend wirkt, zutreffen. Es stimmt aber nicht mehr bei einem offenen Motor, weil bei ihm die Luftkühlung durch den drehenden Anker eine große Rolle spielt, die während der Pause doch nicht vorhanden ist. Noch größer aber werden die Unterschiede bei den Motoren, deren Kühlung in der Hauptsache auf der Wirkung eingebauter Ventilatorräder beruht. Man muß deshalb bei den letzteren Motoren Zuschläge zu den gefundenen effektiven Leistungen machen, um die verminderte Abkühlung während des Stillstandes zu berücksichtigen.

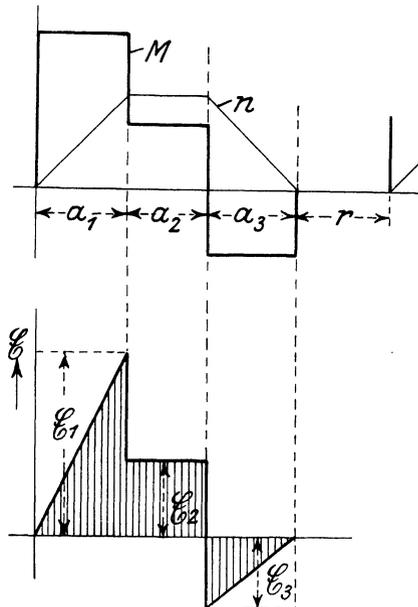


Abb. 378. Arbeitsdiagramm.

Der Arbeitsverlauf eines Motors ist aber nicht immer so einfach wie in Abb. 377. Sobald Massen zu beschleunigen sind, wird im Anlauf eine erhöhte Leistung beansprucht, auch kann zur Abbremsung derselben wiederum der Motor benutzt werden. Um in solchem Falle die effektive Leistung zu ermitteln, können wir ein Anlassen und Bremsen mit konstantem Strom voraussetzen, wie es auch bei den meisten Antrieben praktisch angestrebt wird. Abb. 378 stelle das Arbeitsdiagramm dar. Während der Anfahrzeit  $a_1$ , die der oben berechneten Zeit  $t_a$  entspricht,

steigt die Umlaufzahl gleichförmig an, bleibt während des Beharrungszustandes  $a_2$  auf ihrer Höhe, um während  $a_3$  gleichmäßig vermindert zu werden. Innerhalb jedes Zeitabschnittes ist das Drehmoment gleichbleibend. Da nun die Motorleistung dem Produkte aus Drehmoment und Umlaufzahl proportional sein muß, brauchen wir die Einzelwerte der n- und M-Linie nur miteinander zu multiplizieren, um die untere Leistungslinie zu bekommen. Da die Kupferverluste, die doch einen überwiegenden Anteil an den Motorverlusten haben, gerade im ersten Augenblick, wenn die Leistung noch Null ist, ziemlich groß sind, und da ferner dann noch die kühlende Ventilation fehlt, wird zur Bestimmung der effektiven Motorleistung meistens angenommen, daß während der Anfahr- und Bremszeit die dort auftretende Höchstleistung konstant geleistet werde. Die Effektivleistung ist dann:

$$\mathcal{E}_e = \sqrt{\mathcal{E}_1^2 \cdot e_1 + \mathcal{E}_2^2 \cdot e_2 + \mathcal{E}_3^2 \cdot e_3 \dots \dots \dots} \quad 61$$

Diese Gleichung entspricht Gleichung 60.  $e_1, e_2$  und  $e_3$  sind die einzelnen Einschaltzeiten. Es ist z. B.

$$e_1 = \frac{a_1}{a_1 + a_2 + a_3 + r}$$

Eine etwas genauere Ermittlung der effektiven Leistung zeigt Abb. 379. Es ist dort angenommen, daß das Drehmoment  $M$  während der Anfahr- und Bremszeit

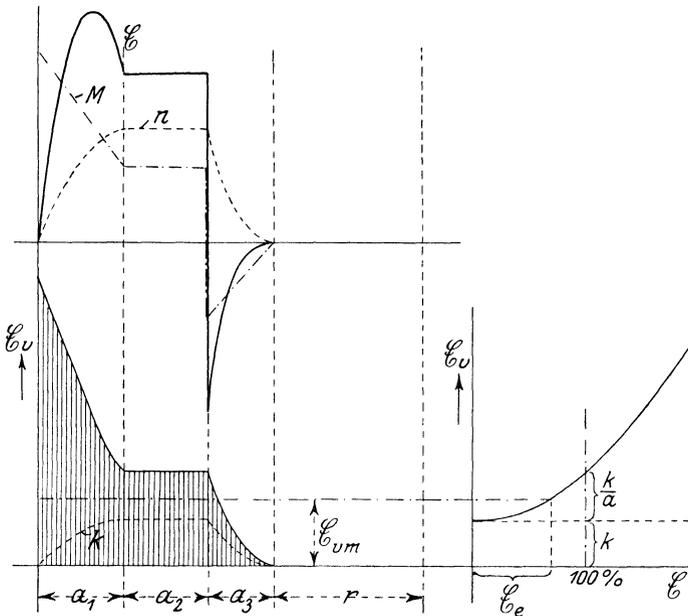


Abb. 379. Bestimmung der effektiven Leistung.

gleichförmig abnehme. Die Geschwindigkeit hat dann den bekannten parabelförmigen Verlauf. Das Produkt aus den Einzelwerten der n- und M-Linie stellt wieder die Leistungslinie  $\mathcal{E}$  dar. Man verschafft sich dann eine Darstellung, in welcher die Motorverluste bei verschiedenen Belastungen aufgetragen sind. Ist

dies nicht möglich, so kann man auch nach S. 95 sich die Motorverluste eines vorläufig angenommenen Motors in einen konstanten Betrag  $k$  und in einen veränderlichen zerlegt denken, welcher bei Normallast gleich  $k/a$  ist. Der Gesamtverlust bei normaler Belastung  $k + k/a$  ist durch die Größe des Motorwirkungsgrades bestimmt. Die Motorverluste  $\mathfrak{C}_v$  kann man sich dann in Abhängigkeit von der Belastung auftragen, wie es in Abb. 379 rechts geschehen ist. Es lassen sich nun leicht die im Motor während des Arbeitsspiels auftretenden Verluste bestimmen und wie unten in Abb. 379 darstellen. Man kann dabei annehmen, daß die konstanten Verluste des Motors hauptsächlich aus Reibungs- und Eisenverlusten bestehen und etwa proportional mit der Umlaufzahl ansteigen. Die veränderlichen Verluste hingegen sind Kupferverluste, die dem Quadrate des Drehmomentes proportional gesetzt werden können. Sie werden zu den konstanten Verlusten  $k$  addiert, und man erhält den Gesamtverlust, von dem man den einfachen Mittelwert über die Spielzeit  $a_1 + a_2 + a_3 + r$  bildet. Dieser Mittelwert  $\mathfrak{C}_{vm}$  schneidet aus der Verlustlinie die Effektivleistung  $\mathfrak{C}_e$  heraus, die natürlich nicht mehr als 100% der Normalleistung des angenommenen Motors betragen darf.

Bei kleineren und mittleren Motoren für aussetzenden Betrieb ist es meistens gar nicht nötig die effektive Leistung zu bestimmen, weil die Motorenlisten der Firmen bereits passende Motoren für aussetzenden Betrieb bei verschiedenen Einschalt Dauern enthalten. Kennt man die Einschalt dauer und die von der Arbeitsmaschine benötigte Leistung, so kann also ohne weiteres ein Motor aus der Liste ausgewählt werden. Auch wenn infolge der Massenbeschleunigung im Anlauf eine höhere Leistung erforderlich ist, kann der Motor in gleicher Weise ausgewählt werden, wenn man aus der Anlaufleistung und der Beharrungsleistung wie folgt einen Mittelwert  $\mathfrak{C}_m$  bildet. Wenn in Abb. 369 während der Anlaufzeit  $t_a$  mit einem Strom gleich dem  $x$ -fachen normalen angelassen wird, so bilden wir uns aus dieser Anlaufleistung  $x \cdot \mathfrak{C}$  und der Leistung  $\mathfrak{C}$ , welche während  $t_b$  im Beharrungszustand gebraucht wird, das quadratische Mittel über die Betriebszeit  $t_a + t_b$ , nämlich:

$$\mathfrak{C}_m = \sqrt{\frac{x^2 \cdot \mathfrak{C}^2 \cdot t_a}{t_a + t_b} + \frac{\mathfrak{C}^2 \cdot t_b}{t_a + t_b}} = \mathfrak{C} \cdot \sqrt{\frac{x^2 \cdot t_a + t_b}{t_a + t_b}}$$

$$\mathfrak{C}_m = \mathfrak{C} \cdot \sqrt{\frac{x^2 \cdot t_a + t_b + t_a - t_a}{t_a + t_b}} = \mathfrak{C} \cdot \sqrt{\frac{(x^2 - 1) \cdot t_a}{t_a + t_b} + 1} \dots 62$$

Wir sehen hieraus, daß der Motor um so größer sein muß, je größer der Anlaufstrom gewählt wird, und je größer die Anlaufzeit im Verhältnis zur Betriebszeit ist.

**Beispiel:** Ein Kranmotor soll während der Anlaufzeit von  $t_a = 3$  Sek. 20 kW und während des Beharrungszustandes von  $t_b = 5$  Sek. noch 10 kW leisten. Die Ruhepause dauert 24 Sek. Welcher Motor ist aus der Liste für 25% Einschalt dauer auszuwählen?

Die mittlere quadratische Leistung über die Betriebszeit von  $3 + 5$  Sek. ist:

$$\mathfrak{C}_m = \sqrt{\frac{20^2 \cdot 3}{3 + 5} + \frac{10^2 \cdot 5}{3 + 5}} = 14,5 \text{ kW.}$$

Da hier die Einschalt dauer  $c = (3 + 5) : (3 + 5 + 24) = 0,25$  ist, kann ein Motor dieser Leistung der Liste für 25% Einschalt dauer entnommen werden.

Will man Gleichung 62 benutzen, so hat man hier  $x = 20 : 10 = 2$  einzusetzen und erhält dann für  $\mathfrak{C}_m$  ebenfalls 14,5 kW.

Der bisherigen Berechnung der effektiven Leistung lag die Annahme zugrunde, daß die Motorverluste dem Quadrate der Leistung proportional

seien. Während diese Annahme für Hauptschlußmotoren, insbesondere für langsam laufende, ziemlich gut zutrifft, stimmt sie weniger gut für Drehstrom- und Nebenschlußmotoren, ganz besonders nicht, wenn es sich um Schnellläufer handelt. Um in einem Beispiel eine genauere Rechnung vorzuführen, wollen wir einen Motor annehmen, welcher für eine Einschaltdauer  $e_1$  bestimmt ist und dabei mit einer Leistung  $\mathcal{E}_1$  beansprucht werden kann. Wie hoch könnte dessen Beanspruchung  $\mathcal{E}_2$  bei einer Einschaltdauer  $e_2$  sein?

Wir wollen:

$$\mathcal{E}_2 = x \cdot \mathcal{E}_1$$

setzen.

Die Verluste des Motors denken wir uns wieder zerlegt in einen konstanten Teil  $k$  und in einen Teil, welcher sich mit dem Grade  $x$  der Belastung quadratisch ändert. Nennen wir nach S. 95 das Verhältnis der konstanten zu den veränderlichen Verlusten bei Vollast gleich  $a$ , so betragen die Verluste bei Vollast:

$$k + \frac{k}{a},$$

hingegen bei  $x$ facher Belastung:

$$k + \frac{k}{a} \cdot x^2.$$

Die Mittelwerte beider Verluste müssen gleich sein, wenn sich der Motor bei den beiden verschiedenen Einschaltzeiten gleich stark erwärmen soll, also:

$$\left(k + \frac{k}{a}\right) \cdot e_1 = \left(k + \frac{k}{a} \cdot x^2\right) \cdot e_2$$

und hieraus:

$$x = \sqrt{\frac{a \cdot e_1 + e_1 - a \cdot e_2}{e_2}} \dots \dots \dots 63$$

**Beispiel:** Ein Hauptschlußmotor kann nach Liste bei einer Einschaltzeit von 0,35 mit 11 kW belastet werden. Wieviel kW darf man ihm bei einer Einschaltzeit von 0,30 zumuten?

Für einen Hauptschlußmotor können wir  $a = 0,5$  annehmen (s. S. 95). Nach Gleichung 63 ist also:

$$x = \sqrt{\frac{0,5 \cdot 0,35 + 0,35 - 0,5 \cdot 0,30}{0,30}} = 1,12.$$

Die neue Leistung beträgt demnach:

$$1,12 \cdot 11 = 12,3 \text{ kW.}$$

Die Gleichung 63 wird bedeutsam, wenn es sich um einen Motor mit hohen konstanten Verlusten handelt, also z. B. um einen Drehstrommotor, bei welchem  $a = 1$  und darüber gesetzt werden kann. Betrachten wir einen solchen Motor, der für eine Einschaltzeit von 0,25 bestimmt ist. Wenn wir nach Gleichung 63 die Belastungsfähigkeit im Dauerbetrieb, also für  $e_2 = 1$ , bestimmen wollen, finden wir, daß der Wurzelausdruck negativ, also unlösbar wird. Der Motor kann also dauernd überhaupt nicht laufen, weil selbst die Verluste im Leerlauf noch eine unzulässige Erwärmung hervorrufen würden. Es geht hieraus

hervor, daß Motoren für Dauerbetrieb hinsichtlich der Verluste nicht mit Motoren für aussetzenden Betrieb übereinstimmen. Letztere können wesentlich höhere Leerlaufverluste haben. Bei der Auswahl eines Motors aus einer Liste muß man sich deshalb genau unterrichten, für welche Einschaltdauer die angegebenen Leistungen gelten. Es ist deshalb auch nicht zu empfehlen, einen Motor für eine Einschaltdauer zu verwenden, welche von der in der Liste für diesen Motor angegebenen stark abweicht.

In der Praxis erfolgt die Berechnung der Motorleistung fast immer unter der einfachen Annahme, daß die Motorverluste mit dem Quadrate der Leistung wachsen. Diese Rechnung bietet auch genügende Sicherheit in allen den Fällen, bei denen die wirkliche Einschaltdauer gleich oder kleiner als die listenmäßige des Motors ist, wenn also der Motor mit übernormalen Drehmomenten beansprucht wird. Die genauere Berechnung mit getrennten Verlusten ist jedoch zu wählen, wenn die Listeneinschaltdauer kleiner als die wirkliche ist.

**Die Prüfleistung (Zeitleistung).** Die Beurteilung eines aussetzenden Betriebes nach der Einschaltdauer ist noch nicht alt. Bis jetzt ist es meist noch üblich, für einen Antrieb einen Motor auszuwählen, der je nach der Schwere des Betriebes, die geforderte Leistung während einer mehr oder weniger langen Zeit ununterbrochen hergeben kann, weil dadurch die Prüfung auf dem Prüfstand wesentlich vereinfacht wird. Man unterscheidet meistens:

*30-Minutenleistung*, bei welcher der Motor so knapp bemessen ist, daß er die auf seinem Leistungsschild verzeichnete Leistung 30 Minuten hindurch ohne Unterbrechung leisten kann, ohne die Temperaturgrenze zu überschreiten. Ein solcher Motor reicht für einen schwachen, aussetzenden Betrieb, wie bei Schiebebühnen, Drehscheiben und Montagekränen aus.

*45-Minutenleistung* (Kranleistung), bei welcher der Motor die angegebene Leistung 45 Minuten ununterbrochen hergeben kann. Sie ist für normalen Kranbetrieb hinreichend.

*60-Minutenleistung*. Derartige Motoren genügen für den angestrengten Betrieb von Hütten- und Stahlwerkskränen.

*90-Minutenleistung*. Sie ist für die Motoren der Walzwerkshilfsmaschinen, wie Rollgänge, Hebetische usw. nötig.

Die Wirkung des aussetzenden Betriebes auf die Anlaßvorrichtung ist eine gerade entgegengesetzte. Während es bei den Motoren möglich war, bei aussetzendem Betrieb mit einem kleineren Motor auszukommen, verlangt dieser Betrieb eine kräftigere Anlaßvorrichtung als im Dauerbetrieb, weil es nicht auf die Dauer, sondern auf die Zahl der Schaltungen ankommt. Ferner kommt noch hinzu, daß die Zahl der Anlaßschaltungen im allgemeinen viel größer ist, als die Zahl der Motoranläufe. Es ist dies darauf zurückzuführen, daß häufig der Anlasser nur ein- und ausgerückt wird, um kleine Berichtigungen der Stellung vorzunehmen.

## F. Die Auswahl des Motors.

1. **Nach der äußeren Bauart.** Dem Bestreben, den Elektromotor auch in seinem Bau der Arbeitsmaschine vollkommen anzupassen, steht die Forderung entgegen, möglichst wenig verschiedene Motortypen in einem Fabrikbetrieb zu verwenden, damit bei Störungen ein Austausch stattfinden kann und eine geringe Anlage an Ersatzteilen oder Ersatzmotoren hinreicht. Man mache sich zum Grundsatz, nur dann von der normalen Motorkonstruktion abzuweichen, wenn eine große Zahl gleicher Motoren benötigt wird, und wenn eine andere Lösung unmöglich ist. Der Maschinenbauer liebt es, zuweilen Motoren mit einem zweiten Wellenstumpf oder mit einem abgeänderten zu bestellen. Eine derartige Änderung ist zwar nicht teuer, aber sie schließt die Verwendung anderer Motoren bei Störungen aus, und wenn ein Motor später nachbestellt wird, vergißt man mit größter Wahrscheinlichkeit die Änderung mitzubestellen. Auch Änderungen der Keilmasse soll man vermeiden.

Anders steht es indessen, wenn die Sicherheit des Betriebes einen entsprechenden Bau des Motors verlangt. In diesem Falle muß der Motor den Betriebsverhältnissen angepaßt werden. Die nachstehende Tabelle gibt eine Übersicht der Motorausführungen und ihrer Verwendung.

|    | Beschaffenheit<br>des Arbeitsraums                                | Motorausführung  |
|----|---|--|
| 1. | trocken, staubfrei  | offener Motor, Abb. 371  |
| 2. | trocken, staubfrei.<br>Gegenstände können in den Motor<br>fallen. | offener Motor mit Drahtgewebeschutz  |
| 3. | trockene Luft, staubfrei, Spritz-<br>wassergefahr                 | ventiliert gekapselter Motor, Abb. 372   |
| 4. | leichte Verstaubung in<br>trockener Luft                          | gekapselter Motor mit Staubfilter,<br>Abb. 376   |
| 5. | sehr starker Staub  | gekapselte Motoren mit Druckluft-<br>anschluß  |
| 6. | starker Staub oder feuchte Luft                                   | gekapselter Motor mit Kühler, Abb. 373<br>oder:<br>gekapselter Motor mit Mantelkühlung,<br>Abb. 374 oder:<br>gekapselter Motor mit Frischluftleitung,<br>Abb. 375 oder:<br>offener Motor in sauberem Nebenraum<br>oder: gekapselter Motor mit Druckluft-<br>oder Wasserkühlung |
| 7. | chemische Einflüsse   | wie vorstehend, jedoch mit Säureschutz   |
| 8. | im Freien   | gekapselter Motor mit Regendach  |

Gekapselte Motoren mit axialer Teilung zum leichteren Ausbau des Ankers sind an den Stellen zu empfehlen, wo der Ausbau wegen des beschränkten Raumes Schwierigkeiten macht. Bei kleineren Hebe-

zeugen wird statt der Fußbefestigung oft zweckmäßiger eine Befestigung durch einen Lagerschildflansch (Flantschmotoren) gewählt. Vertikale Wellen (Zentrifugen, Mühlen) werden mit Vorliebe durch Vertikalmotoren angetrieben. Abb. 380 stellt einen solchen Motor dar, dessen Anker in einem Kugelstützlager aufgehängt ist. Ein gefährdender Lagerverschleiß ist also kaum zu erwarten, weil die Lager lediglich als Führung dienen.

## 2. Die Wahl nach dem Motorverhalten.

Nur in den seltensten Fällen ist bei einem Antrieb noch die Wahl zwischen Gleichstrom-, Wechselstrom- oder Drehstrommotor gelassen, weil die Stromart meistens schon durch die Energieübertragung, insbesondere durch die Größe der Anlage bestimmt ist.

Zwei Dinge sind es, welche bei der Wahl nach dem Motorverhalten vor allem in Frage kommen: Die Änderung der Drehzahl bei verschiedenen Belastungen und die Größe des Drehmomentes, besonders im Anlauf.



Abb. 380. Vertikalmotor.

a) **Drehzahlabfall und Anlaufmoment.** *Gleichstrom.* Die Gleichstrommotoren entsprechen in vollkommener Weise allen Bedürfnissen, die der Maschinenbau hat. Wir entsinnen uns, daß alle Gleichstrommotoren, ganz besonders der Hauptschlußmotor, sich durch ihr hohes Drehmoment auszeichnen. Letzterer erleidet vor allem auch durch den beim Anlauf unvermeidlichen Spannungsabfall keine Verminderung des Drehmomentes. Wir können dasselbe etwa gleich dem 3,5fachen des normalen annehmen, womit der Gleichstrommotor allen Anforderungen gerecht wird. Hinsichtlich des Verhaltens der Drehzahl unterscheiden sich die Gleichstrommotoren sehr. Während der Hauptschlußmotor bei hoher Belastung langsam und bei kleiner Belastung schnell läuft und im Leerlauf sogar durchgeht, behält der Nebenschlußmotor bei allen Belastungen nahezu die gleiche Umlaufzahl. Der Doppelschlußmotor näherte sich je nach dem Verhältnis seiner beiden Erregerwicklungen zueinander mehr dem Nebenschluß- oder dem Hauptschlußmotor. Den Geschwindigkeitsverlauf des Hauptschlußmotors brauchen wir nun, wie schon früher betont wurde, bei Hebezeugen und Bahnen. Bei ihnen will man bei kleiner Last schnell fahren und bei großer Last langsam. Bei Aufzügen hingegen wäre die Verwendung eines Hauptschlußmotors schon nicht zu empfehlen, weil der verschiedenen Geschwindigkeit doch auch ein verschieden großer Nachlauf entspricht, der zu einem ungenauen Anhalten Veranlassung gibt. Es ist also ein Nebenschlußmotor, zum mindesten aber ein Doppelschlußmotor vorzuziehen. Werkzeugmaschinen und Spinnereimaschinen erfordern fast ausnahmslos den Nebenschlußmotor mit gleichbleibender Umlaufzahl. Papiermaschinen genügt zuweilen noch nicht einmal die Konstanz der Umlaufzahl dieses Motors.

Es sind dann besondere Vorkehrungen notwendig, welche jeden Drehzahlabfall beseitigen.

*Wechselstrom.* Diese Stromart kommt nur sehr selten vor, so daß wir ihr keine große Beachtung zu schenken brauchen. Der asynchrone Wechselstrommotor, dessen Umlaufzahl ziemlich gleichbleibend ist, kann nur leer oder mit geringer Last anlaufen. Seine Anwendung ist deshalb eine beschränkte. Die Kommutatormotoren hingegen können ein zwei- bis dreifaches Anzugsmoment entwickeln. Sie stimmen hinsichtlich ihres Geschwindigkeitsverlaufs mit dem Hauptschlußmotor überein.

*Drehstrom.* Lange Zeit gab es nur einen Drehstrommotor, den asynchronen Drehstrommotor, mit nahezu unveränderlicher Drehzahl und einem Anzugsmoment welches den 2- bis 3fachen Normalwert erreicht. Dieser Motor wurde überall angewandt, auch dort, wo ein Abfall der Umlaufzahl wohl wünschenswert gewesen wäre. Auch jetzt, nachdem es Drehstromkommutatormotoren mit anderem Geschwindigkeitsverlauf gibt, ist man dennoch immer auf den gewöhnlichen Drehstrommotor angewiesen, weil die Kommutatormotoren größere Verluste haben und so teuer sind, daß sie nur dann gewählt werden dürfen, wenn auf verlustlose Regelung der Umlaufzahl höchster Wert zu legen ist.

b) **Die Regelbarkeit.** Bei dem Gleichstrom-Hauptschlußmotor gibt es bekanntlich nur eine Hauptstromregelung. Eine Änderung der Erregung durch Parallelwiderstände erfordert große Schaltapparate und starke Leitungen oder Anzapfungen der Erregerwicklung und ist deshalb selten. Die Hauptstromregelung, bei welcher ein mehr oder weniger großer Teil der zugeführten Spannung in Vorschaltwiderständen vernichtet wird, hat den Nachteil, daß etwa so viel Prozent der Motorleistung nutzlos in Wärme umgesetzt werden muß, als die Umlaufzahl in Prozenten erniedrigt werden soll. Es ist also eine Verlustregelung. Ferner bringt die Vorschaltung des Widerstandes eine starke Änderung der Drehzahl bei wechselnder Belastung mit sich, weil der große Strom (bei hoher Last) in dem Widerstand einen großen Spannungsverlust hervorruft. Daß trotz dieses Mangels des Hauptschlußmotors derselbe bei Kranen und Bahnen dennoch mit Hauptstromregelung verwandt wird, liegt daran, daß derartige Motoren ja immer nur kurzzeitig eingeschaltet werden, und auch daran, daß eine andere Möglichkeit nicht besteht. Überall dort, wo eine dauernde Änderung der Drehzahl verlangt wird, ist deshalb bei Gleichstrom ein Nebenschlußmotor zu wählen, der ja bekanntlich durch Änderung des Erregerstromes eine nahezu verlustlose Regelung gestattet. Einen Nachteil besitzt dieselbe hingegen, sie erfordert große und teure Motoren. Die Motorgröße ist bekanntlich durch den Höchstwert des Ankerstromes und durch die höchste Feldstärke bestimmt. Bei einem Regelmotor haben wir aber bei den höheren Umlaufzahlen zwar den Höchstwert des Stromes, aber ein stark geschwächtes Feld, während nur bei der niedrigsten Geschwindigkeit das volle Feld herrscht. Der Regelmotor ist deshalb bei höheren Umlaufzahlen nicht ausgenutzt. Hinzu kommt noch, daß er unter diesen Umständen auch mit geringerem Wirkungsgrad

arbeitet. Es ist aus diesen Gründen wirtschaftlich nicht angängig, ein größeres Regelungsverhältnis als 1 : 3, höchstens 1 : 4 zu wählen. Für eine starke Erniedrigung der Umlaufzahl ist die Feldregelung überhaupt nicht zu gebrauchen, hier ist nur die Hauptstromregulierung möglich. Bei Werkzeugmaschinen kommt dieselbe auch zuweilen in Frage, nicht aber bei Antrieben, welche eine von der Belastung unabhängige Geschwindigkeit fordern, wie dies z. B. bei Papiermaschinenantrieben der Fall ist.

Von den Wechsel- und Drehstrommotoren sind nur die Kommutatormotoren verlustlos regelbar. Sie müssen also trotz ihres hohen Preises und geringeren Wirkungsgrades gewählt werden, wo eine starke, dauernde Regelung der Geschwindigkeit unumgänglich notwendig ist. Da Drehstromkommutatormotoren heute noch besonders teuer sind, wird häufig auch an Drehstromnetze der Wechselstromkommutatormotor angeschlossen, wie z. B. in Spinnereien. Die zahlreichen, verhältnismäßig kleinen Motoren werden auf die drei Phasen des Netzes gleichmäßig verteilt. Sobald einmal der genannte Preisunterschied fortfällt, ist natürlich dem Drehstromkommutator der Vorzug zu geben, weil er einen höheren Wirkungsgrad hat. Die bereits erwähnten Papiermaschinen erfordern nun aber nicht nur eine Regelung der Geschwindigkeit, sondern auch ein Gleichbleiben derselben bei wechselnder Belastung. Diese Bedingung erfüllt nur der Drehstrom-Nebenschlußmotor.

**3. Die Wahl der Motorgröße.** Die Größe eines Motors ist durch die Erwärmung und das höchste Drehmoment, welches die Arbeitsmaschine von ihm fordert, bestimmt. Bei gleichmäßiger Belastung kommt nur die Erwärmung in Frage, wo aber ein Motor meistens schwach belastet ist und nur vorübergehend sehr hohe Drehmomente von ihm gefordert werden, ist es notwendig, den Motor so groß zu wählen, daß er diese Drehmomente leisten kann, auch wenn seine Erwärmung dann wesentlich unterhalb des zulässigen Wertes bleiben sollte.

Die in den Preislisten genannten Motorleistungen, die auch auf jedem Motorschild aufgeschlagen sind, werden so bemessen, daß sich die Motoren bei dieser Leistung nicht mehr erwärmen als es die Normalien für die Bewertung und Prüfung elektrischer Maschinen gestatten. Bei denselben ist eine Außentemperatur der umgebenden Luft von allerhöchstens 35° festgesetzt. Es folgt hieraus von vornherein, daß in solchen Räumen, in denen höhere Außentemperaturen vorkommen können, der Motor größer zu wählen ist, falls keine künstliche Kühlung möglich ist.

**a) Bei Dauerbetrieb.** Ein Motor muß nicht nur für Dauerbetrieb bemessen werden, wenn er dauernd in Betrieb ist, sondern auch dann, wenn er dauernd betrieben werden kann. Motoren mancher Werkzeugmaschinen werden häufig abgestellt, aber dennoch ist ein Motor für Dauerbetrieb zu wählen, weil auch bei starker Beschäftigung und langen Arbeitszeiten die Temperaturgrenze nicht überschritten werden darf. Die Festlegung der Motorgröße ist bei Dauerbetrieb ziemlich einfach. Sobald die von der Arbeitsmaschine benötigte Leistung berechnet oder nach Erfahrungswerten angenommen ist, haben wir nur an Hand der Listen für Dauerbetrieb den Motor auszuwählen und dann noch nachzu-

prüfen, ob derselbe das höchste Drehmoment leisten kann. Hierbei ist vielleicht zu beachten, daß das Drehmoment von Gleichstrom-Nebenschlußmotoren, ganz besonders aber von Drehstrommotoren stark sinkt, wenn ein größerer Spannungsabfall bis zum Motor auftritt.

**b) Bei aussetzendem Betrieb.** *a) Unter Zugrundelegung der Prüfleistung.* Auch bei dem aussetzenden Betrieb haben wir zunächst durch Rechnung oder an Hand von Erfahrungswerten die Antriebsleistung festzustellen. Diese Leistung braucht der Motor aber nicht dauernd abgeben zu können. Je nach der Schwere des Betriebes kommen wir mit einem Motor für 30-, 45-, 60- oder 90-Minutenleistung aus, und aus der nachstehenden Tabelle geht hervor, welche Prüfleistung in den verschiedenen Belastungsfällen zu wählen ist. Bei der Wahl ist auch noch zu berücksichtigen, ob die Arbeitsmaschine stets mit voller Belastung arbeitet, oder ob wechselnde Belastung vorliegt. Im letzteren Falle reicht eine geringere Prüfleistung aus. Nach der Festlegung der Prüfleistung wählen wir aus der Motorliste für **a u s s e t z e n d e n** Betrieb einen passenden Motor aus und prüfen noch, ob derselbe auch das höchste vorkommende Drehmoment bewältigen kann.

| Betrieb     | Belastung | Prüfleistung (Minuten) | Einschalt-dauer | Einschal-tungen i. d. Stunde | Beispiel   |
|-------------|-----------|------------------------|-----------------|------------------------------|--|
| schwach     | wechselnd | 30                     | 0,15            | bis 10                       | Schiebebühnen, Drehscheiben, Maschinenhauskrane    |
|             | voll      | 45                     |                 |                              |  |
| normal      | wechselnd | 45                     | 0,25            | 10 bis 40                    | Werkstattkrane, Waggonkipper, Beschickungsmaschine |
|             | voll      | 60                     |                 |                              |  |
| stark       | wechselnd | 60                     | 0,3             | 40 bis 60                    | Verladekrane, Zangenkrane                          |
|             | voll      | 90                     |                 |                              |  |
| angestrengt | wechselnd | 90                     | 0,35            | 60 bis 120 u. mehr           | Zangenkrane, Rollgänge, Hebetische                 |
|             | voll      |                        |                 |                              |  |

*β) Unter Zugrundelegung der Einschalt-dauer.* Die Prüfleistung bietet zwar für die Prüfung eines Motors auf dem Prüfstand eine geeignete Grundlage, für die Bemessung im aussetzenden Betrieb ist sie jedoch recht unsicher. Man geht deshalb in neuerer Zeit lieber von der mittleren Einschalt-dauer aus, welche für die verschiedenen Arbeitsmaschinen durch Beobachtung oder durch aufzeichnende Meßinstrumente leicht bestimmt werden kann. Liegen hingegen keine Beobachtungswerte vor, so können auch die in vorstehender Tabelle gemachten Angaben als Näherungswerte benutzt werden. Bei der Auswahl des Motors gehen wir auch hier wieder von der Leistung aus, welche die Arbeitsmaschine im Beharrungszustand benötigt. Sind nun im Anlauf Massen zu beschleunigen, so trägt man dieser Mehrbeanspruchung dadurch Rechnung, daß man die berechnete Leistung nach Gleichung 62 auf den Wert  $\mathcal{E}_m$  erhöht. Eine Verminderung der berechneten Leistung um etwa 15—20% kann hingegen eintreten, wenn die Maschine mit wechselnden Lasten arbeitet, die durchschnittlich

40—50% unter der Vollast liegen, für welche die Leistung berechnet wurde. Nach der auf diese Weise gefundenen Leistung sucht man in der Liste des Motorlieferanten einen Motor aus, welcher für die zugrunde gelegte Einschaltdauer bestimmt ist. Wenn die Liste nur Motoren für eine andere Einschaltdauer führt, müssen wir unsere Leistung auf die Einschaltdauer der Liste nach Gleichung 63 umrechnen, wobei aber starke Abweichungen der Einschaltdauer zu vermeiden sind.

Große Motoren verlangen bei der Bestimmung ihrer Leistung eine größere Genauigkeit. Bei ihnen muß unbedingt ein genaues Arbeitsdiagramm aufgestellt werden, aus dem die Arbeitszeiten und Ruhepausen genau hervorgehen, und welches auch den genauen Leistungsverlauf angibt. Nachdem man aus diesem Diagramm die effektive Leistung ermittelt hat, kann man einen Motor auswählen, welcher diese effektive Leistung hergeben kann. Nötigenfalls ist noch ein Zuschlag für verminderte Abkühlung während der Ruhepausen zu machen. Wir dürfen bei dieser Berechnungsweise zum Schluß ganz besonders nicht vergessen nachzuprüfen, ob der gewählte Motor auch das höchste vorkommende Drehmoment bewältigen kann.

**Beispiel:** Für einen 3-Tonnen-Blocktransportkran soll die Leistung des Kranfahrmotors für eine minutliche Fahrgeschwindigkeit von 120 m ermittelt werden. Das Eigengewicht des Kranes beträgt 30 t. Der Laufraddurchmesser ist 700 mm und der Durchmesser der Laufradachsen 120 mm.

Nach Gleichung 66 ist die zur Überwindung der Fahrwiderstände nötige Leistung:

$$\mathcal{E} = \frac{Q \cdot f \cdot v}{102 \cdot R \cdot \eta} + \frac{Q \cdot \mu \cdot d/2 \cdot v}{102 \cdot R \cdot \eta} = \frac{33000 \cdot 0,08 \cdot 2}{102 \cdot 35 \cdot 0,6} + \frac{33000 \cdot 0,1 \cdot 6 \cdot 2}{102 \cdot 35 \cdot 0,6}$$

$$\mathcal{E} = 2,5 + 18,5 = 21 \text{ kW.}$$

Der Betrieb eines Blockkranes ist ein ziemlich angestrengter. Wir legen deshalb eine Einschaltdauer von 0,3 zugrunde. Wechselnde Lasten kommen nicht vor, weil stets nur Blöcke transportiert werden, und weil das Krangewicht die Hauptrolle spielt. Wegen der großen bewegten Massen muß die Mehrbeanspruchung infolge der Massenbeschleunigung berücksichtigt werden. Zu den bewegten Massen gehört aber auch der Anker des Motors, dessen Größe doch erst bestimmt werden soll. Wir entnehmen deshalb unter Berücksichtigung der berechneten Fahrleistung einmal schätzungsweise der Motorliste einen Motor von 32 kW bei 650 minutlichen Umläufen. Derselbe hat ein  $G D^2$  von 16,5  $\text{kgm}^2$ , mit Ritzel etwa 16,8  $\text{kgm}^2$ .

Zur Überwindung der Fahrwiderstände ist ein Drehmoment aufzuwenden von:

$$M = 0,975 \cdot \frac{\mathcal{E}}{n} = 0,975 \cdot \frac{21000}{650} = 31,5 \text{ mkg.}$$

Nehmen wir an, daß mit doppeltem Normalstrom angefahren wird, dann wird nach Abb. 158 ungefähr das doppelte Drehmoment entwickelt. Für die Beschleunigung stehen also auch 31,5 mkg zur Verfügung. Die Anlaufzeit kann nun berechnet werden:

$$t_a = \frac{G D^2 \cdot n}{375 \cdot M} + \frac{0,975 \cdot Q \cdot v^2}{M \cdot n} = \frac{16,8 \cdot 650}{375 \cdot 31,5} + \frac{0,975 \cdot 33000 \cdot 2^2}{31,5 \cdot 650}$$

$$t_a = 0,95 + 6,3 = 7,25 \text{ Sek.}$$

Nehmen wir mangels genauer Angaben nach obiger Tabelle 60 stündliche Einschaltungen an, so dauert ein Arbeitsspiel 60 Sekunden. Bei einer Einschaltdauer von 0,3 muß demnach die Arbeitsdauer 18 Sekunden betragen, welche in 7,25 Sek. Anlauf- und 10,75 Sek. Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit zerfällt. Die erhöhte Motorleistung beträgt also nach Gleichung 62:

$$\mathcal{E}_m = \mathcal{E} \cdot \sqrt{\frac{(x^2 - 1) t_a}{t_a + t_b} + 1} = 21 \cdot \sqrt{\frac{(2^2 - 1) \cdot 7,25}{18} + 1} = 31,3 \text{ kW.}$$

In der Motorliste ist nun ein Motor von mindestens 31,3 kW bei 0,3 Einschalt-dauer aufzusuchen. Enthält die Liste nur die Leistungen für eine andere Einschalt-dauer, so ist nach Gleichung 63 auf diese umzurechnen, z. B. müßte bei  $e_1 = 0,25$  und  $a = 0,5$  (Hauptschlußmotor) sein:

$$\left(k + \frac{k}{a}\right) \cdot e_1 = \left(k + \frac{k}{a} \cdot x^2\right) \cdot e_2 \quad \left(1 + \frac{1}{0,5}\right) \cdot 0,25 = \left(1 + \frac{x^2}{0,5}\right) \cdot 0,3$$

$$x_1 = 0,87.$$

Also die notwendige Motorleistung für 0,25 Einschalt-dauer:  
 $31,3 : 0,87 = 36 \text{ kW}.$

Würde die gefundene Leistung nicht wie in diesem Falle gut mit der Annahme übereinstimmen, so müßte eine neue Annahme mit richtigeren Werten vorgenommen werden.

Es könnte nun noch sein, daß die Motorenliste die Motoren überhaupt nicht nach der Einschalt-dauer, sondern nach der Prüfleistung angibt. In diesem Falle können wir der Tabelle auf S. 288 entsprechend einen Motor von 36 kW Stunden-leistung vorsehen.

c) Die Beeinflussung der Motorgröße durch die Raumtemperatur. Die Normalien für die Bewertung und Prüfung elektrischer Maschinen lassen bei einer höchsten Raumtemperatur von  $35^{\circ}$  durchschnittlich eine Übertemperatur des Motors von  $50^{\circ}$  zu. Da die Erwärmung eines Motors eine Folge der auftretenden Verluste ist, und da die Wärmeabfuhr annähernd um so größer ist, je größer die Übertemperatur des Motors ist, können wir dieselbe den Motorverlusten proportional setzen. Wenn wir wieder, wie es bereits auf S. 95 geschehen ist, uns die Motorverluste in einen konstanten Teil  $k$  und in einen veränderlichen Betrag zerlegt denken, welcher bei normaler Belastung den  $a$ ten Teil von  $k$ , also gleich  $k : a$  ist, so können wir für den Fall normaler Belastung schreiben:

$$\text{Übertemperatur } 85^{\circ} - 35^{\circ} = c \cdot \left(k + \frac{k}{a}\right),$$

hierin ist  $c$  ein konstanter Proportionalitätsfaktor. Für eine andere Raumtemperatur  $t$  und  $x$ fache Belastung würde gelten:

$$\text{Übertemperatur } 85^{\circ} - t = c \cdot \left(k + \frac{k}{a} \cdot x^2\right).$$

Setzt man in diese Gleichung den Wert für  $c$  aus der ersteren Gleichung ein, so erhält man:

$$\left(k + \frac{k}{a}\right) \cdot (85 - t) = \left(k + \frac{k}{a} \cdot x^2\right) \cdot 50$$

und hieraus:

$$x = \sqrt{1,7 + 0,7 \cdot a - 0,02 \cdot t \cdot (a + 1)} \quad . . . . . 64$$

Mit Hilfe dieser Beziehung können wir angenähert berechnen, wie hoch ein Motor bei einer beliebigen Raumtemperatur  $t$  belastet werden darf, wenn eine künstliche Kühlung unmöglich ist. Bei der Festlegung der Motorgröße für einen warmen Raum haben wir die berechnete Motorleistung auf das  $x$ fache zu erhöhen.

**Beispiel:** Wie hoch darf ein normaler 20-kW-Nebenschlußmotor belastet werden, wenn er in einem Raum Aufstellung finden soll, dessen Temperatur  $45^{\circ}$  beträgt?

Wir können für einen Nebenschlußmotor  $a = 1$  setzen. Nach obiger Gleichung ist also:

$$x = \sqrt{1,7 + 0,7 \cdot 1 - 0,02 \cdot 45 \cdot 2} = 0,775.$$

Die zulässige Belastung ist demnach  $20 \cdot 0,775 = 15,5$  kW. Bei welcher Raumtemperatur würde sich dieser Motor bereits leerlaufend bis zur äußersten Temperaturgrenze erwärmen?

Für den Leerlauf ist  $x = 0$  zu setzen. Löst man die Gleichung dann nach  $t$  auf, so findet man

$$t = 60^{\circ}.$$

**4. Die Wahl der Umlaufzahl.** Wir wissen von früher, daß im Motorenbau für jede Leistung eine bestimmte Umlaufzahl als normal gilt. Man sollte bestrebt sein, möglichst diese normal laufenden Motoren zu verwenden. Andererseits müssen wir uns aber auch zum Ziel setzen, möglichst jede energieverzehrende Übersetzung zwischen Motor und Arbeitsmaschine auszuschalten. Bei allen Arbeitsmaschinen, die eine Umlaufzahl in der Größenordnung der Elektromotoren haben, wird man deshalb die Motorgeschwindigkeit der Arbeitsmaschine anpassen, oder zuweilen auch umgekehrt, und wird eine direkte Kupplung vornehmen. Es ist dies z. B. bei allen Kreiselpumpen und Ventilatoren der Fall. Bei derartigen Maschinen werden Umlaufzahlen bis zu 3000 in der Minute gewählt, weil ja nicht nur der schnell laufende Motor, sondern auch die schnell laufende Arbeitsmaschine dadurch billiger ist. Solche hohen Umlaufzahlen erfordern aber gute Lager, ganz besonders bei Drehstrommotoren mit geringem Luftspalt. Aber auch sonst ist es zuweilen notwendig, von der normalen Motordrehzahl abzuweichen. Es kann z. B. möglich sein, daß man bei einem Windwerk mit einem normal laufenden Motor drei Vorgelege braucht, während man mit einem Langsamläufer mit zweien auskäme. Es ist dann festzustellen, welcher Fall am billigsten kommt.

Bei Antrieben mit Hauptschlußmotoren und geringer Reibung in den Getrieben (Antrieb mit einem Vorgelege) sollte man nur Langsamläufer vorsehen, weil bei diesen eine Drehzahlsteigerung bei Entlastung nicht so gefährlich ist, als bei einem ohnehin schon schnell laufenden Motor. Das gleiche gilt für Kranhubwerksmotoren bei großem Hub des Kranes.

Besondere Bedeutung gewinnt die Wahl der Umlaufzahl, bei Antrieben mit häufiger und rascher Umkehr der Drehrichtung, wie bei Umkehrwalzwerken, Rollgängen und Hobelmaschinen. Bei denselben möchte man die Beschleunigungsenergie so klein wie möglich halten, weil sie doch meistens verloren ist, und ferner wünscht man die Anlaufzeit möglichst klein, damit nicht wertvolle Zeit verloren geht. Die Gleichungen 57 und 52 für Arbeitswucht und Anlaufzeit führen die Umlaufzahl im Zähler, so daß man vermuten könnte, der langsam laufende Motor sei vorzuziehen. Wenn man aber bedenkt, daß das Schwungmoment des Langsamläufers infolge seiner größeren Abmessungen wesentlich größer ist, kommt man zu dem Schluß, daß Arbeitswucht und Anlaufzeit des leeren langsam laufenden Motors nicht erheblich von den Werten des Schnellläufers abweichen. Es nützt auch nichts, wenn man bei gleicher Drehzahl einen Motor höherer Leistung auswählt, weil dessen größeres Drehmoment auch eine größere Masse zu beschleunigen hat. Anders kann es jedoch sein, wenn wir mit dem Motor Massen gekuppelt haben, deren Geschwindigkeit eine vorgeschriebene

ist, wie z. B. bei einem Kranfahrwerk oder einem Rollgang. In diesem Falle setzt sich die Anlaufzeit aus verschiedenen Posten zusammen, wie aus Gleichung 54 deutlich hervorgeht. Untersuchen wir zunächst einmal den Fall, daß bei gleicher Leistung einmal ein langsam laufender Motor, das andere Mal ein Schnellläufer gewählt wird. Der erste Posten der Gleichung 54 wird sich nach dem oben Gesagten nicht wesentlich ändern, aber auch die beiden anderen Posten bleiben konstant, weil das Produkt  $M \cdot n$  im Nenner doch der konstanten Leistung proportional ist. Ein Vorteil kann jedoch entstehen, wenn wir einen Motor größerer Leistung verwenden. Dieser kann ein höheres Drehmoment entwickeln, so daß die beiden letzten Posten der Gleichung 54 dadurch verkleinert werden. Bei Verwendung von Gleichstrom-Hauptschlußmotoren muß man hierbei nur bedenken, daß der Motor im Beharrungszustand eine ziemlich hohe Umlaufzahl annehmen wird, weil er dann nur schwach belastet ist.

Wenn man die Motortypen einer Liste auf Anlaufzeit und Arbeitswucht nachrechnet, findet man ganz erhebliche Abweichungen von dem oben Gesagten. Es rührt dies daher, daß für Motoren verschiedener Leistung dennoch oft die gleichen Blechschnitte genommen werden. Der größere Motor erhält dann eben einen entsprechend längeren Anker. Es ist deshalb unbedingt nötig, daß man in besonderen Fällen an Hand der Motorenlisten den Motor aussucht, welcher die günstigsten Anlaufbedingungen bietet. Motoren mit langen Ankern im Verhältnis zu Durchmesser haben naturgemäß eine verhältnismäßig kurze Anlaufzeit. Man wählt deshalb zuweilen auch zwei Motoren halber Leistung zum Antrieb, weil beide einem Motor von doppelt so langem Anker entsprechen.

Bei Antrieb durch zwei Motoren ist jedoch zu beachten, daß sich die Belastung nur dann gleichmäßig auf beide verteilt, wenn sie den gleichen Abfall der Drehzahl bei Belastung haben. (Besonders bei Nebenschluß- und Drehstrommotoren mit geringer Drehzahländerung!) Das Anlassen zweier Gleichstrommotoren kann mit einem Anlasser geschehen. Zwei starr gekuppelte Drehstrommotoren können bei gleicher Ausführung mit einem Anlasser angelassen werden, wenn ihre Läufer derart zueinander stehen, daß phasengleiche Läuferströme entstehen. Bei nicht starrer Kupplung sind zur Vermeidung von Ausgleichströmen zwischen den Läufern zwei Anlasser nötig, die mechanisch gekuppelt sein können.

**Beispiel:** Es stehen zwei A.E.G.-Drehstrommotoren von je 14-kW-Leistung zur Auswahl. Der eine mache minutlich 975, der andere 485 Umläufe. Wie groß ist in beiden Fällen die im drehenden Läufer aufgespeicherte Arbeitswucht und die Anlaufzeit, wenn das Schwungmoment des schnell laufenden Motors  $10,2 \text{ kgm}^2$ , dasjenige des langsam laufenden  $24 \text{ kgm}^2$  beträgt?

Nach Gleichung 57 ist die Arbeitswucht:

$$A_1 = \frac{GD^2 \cdot n^2}{7200} = \frac{10,2 \cdot 975^2}{7200} = 1350 \text{ mkg}; \quad A_2 = \frac{24 \cdot 485^2}{7200} = 785 \text{ mkg}.$$

Da die Beschleunigungsenergie meistens verloren ist, werden durch die Verwendung des Langsamläufers  $1350 - 785 = 565 \text{ mkg}$  erspart. Bei 100 Schaltungen in der Stunde, 120 Wochenstunden und 50 Wochen im Jahr würde dies einen Mehrverlust von

$$565 \cdot 100 \cdot 120 \cdot 50 = 339000000 \text{ mkg} \text{ bedeuten,}$$

oder da

$$1 \text{ kWh} = 368000 \text{ mkg ist,}$$

$$\frac{339000000}{368000} = 920 \text{ kWh.}$$

## G. Motoren-Übersicht.

| Motorart                              | Höchstes Anlaufmoment<br>Normales Moment | Umlaufzahl bei wachsender Last | Regelbarkeit                         | Umkehr der Drehrichtung                                       | Bremung   | Normales Anlassen                               |
|---------------------------------------|--|--------------------------------|--------------------------------------|---|---|---|
| Nebenschluß-Motor                     | 3  | Nahezu konstant                | Nebenschluß- u. Hauptschlußregelung  | Umpolen von Anker- oder Erregerwicklung                       | Bei übernorm. Drehzahl mit Rückgew. Bei unternorm. Drehzahl mit Bremswiderstand | Mit Anlaßwiderst.                               |
| Hauptschluß-Motor                     | 3,5                                      | stark abfallend                | Hauptschlußregelung                  | Umpolen von Anker- oder Erregerwicklung                       | in Erzeigerschaltung auf Bremswiderstand  | mit Anlaßwiderstand                             |
| Doppelschluß-Motor                    | 3 bis 3,5                                | abfallend                      | Nebenschluß- und Hauptschlußregelung | Umpolen von Anker- oder Erregerwicklungen                     | bei übernorm. Drehzahl mit Rückgew. Bei unternorm. Drehzahl mit Bremswiderstand | mit Anlaßwiderstand                             |
| Asynchron-Motor                       | nur unbelast. Anlauf                     | nahezu konstant                | gering: Hauptstromregelung im Läufer | Umpolen der Haupt- oder Hilfswicklung                         | bei übersynchroner Drehzahl m. Rückgew.   | mit Hilfswicklung und Umschalter                |
| Hauptschlußkommutator-Motor           | 2 bis 3                                  | stark abfallend                | verlustlos mit Regeltransformator    | Umpolen von Anker- oder Erregerwicklung                       | durch Umpolen von Anker- oder Erregerwicklung                                   | mit Anlaß-Transformator                         |
| Repulsions-Motor                      | 2 bis 3                                  | stark abfallend                | verlustlos d. Bürstenversch.         | d. entgegengesetzte Bürstenversch.                            | durch entgegengesetzte Bürstenversch.   | d. Bürstenversch.                               |
| Repulsions-Motor mit Schleuderschalt. | 2 bis 3                                  | nahezu konstant                | —                                    | d. Ausschalten u. entgegenges. Bürstenversch.                 | bei übersynchroner Drehzahl mit Rückgew.  | d. Bürstenversch.                               |
| Asynchron-Motor mit Kurzschlußläufer  | 0,5 bis 1,5                              | nahezu konstant                | —                                    | Vertauschen zweier Ständerleitungen                           | bei übersynchroner Drehzahl mit Rückgew.  | mit 3 pol. Schalter oder Stern-Dreieck-Schalter |
| Asynchronmotor mit Schleifringläufer  | 2 bis 3                                  | nahezu konstant                | gering: Hauptstromregelung im Läufer | Vertauschen zweier Ständerleitungen                           | bei übersynchroner Drehzahl mit Rückgew.  | mit Anlaßwiderstand im Läufer                   |
| Hauptschlußkommutator-Motor           | 2 bis 3                                  | stark abfallend                | verlustlos d. Bürstenversch.         | Vertauschen zweier Zuleitungen u. entgegenges. Bürstenversch. | durch entgegengesetzte Bürstenversch.   | d. Bürstenversch.                               |
| Nebenschlußkommutatormot.             | 2 bis 3                                  | nahezu konstant                | verlustlos d. Bürstenversch.         | Vertauschen zweier Zuleitungen                                | bei Überschreitung der eingestellten Drehzahl                                   | d. Bürstenversch.                               |
| Synchron-Motor                        | 0  | konstant                       | —                                    | d. entgegengesetzte Anlaufantrieb                             | bei übersynchronem Antrieb mit Rückgew.   | Antr.d.fremd.Motor u. Parallelschalten          |

Gleichstrom

Wechselstrom

Drehstrom

Die normalen Motordrehmomente sind:

$$M_1 = 0,975 \cdot \frac{14000}{975} = 14 \text{ mkg}; M_2 = 0,975 \cdot \frac{14000}{485} = 28,1 \text{ mkg}.$$

Legt man ein dreifaches Anlaufmoment zugrunde, so berechnen sich die Anlaufzeiten nach Gleichung 55 zu:

$$t_{a1} = \frac{GD^2 \cdot 2 \cdot n}{375 \cdot M} = \frac{10,2 \cdot 2 \cdot 975}{375 \cdot 42} = 1,26 \text{ Sek.}$$

$$t_{a2} = \frac{24 \cdot 2 \cdot 485}{375 \cdot 84,3} = 0,74 \text{ Sek.}$$

Diese Berechnung der Anlaufzeiten ist wahrscheinlich wenig genau, zum Vergleich der Motoren ist sie jedoch vorteilhaft.

**Beispiel:** Ein 10-t-Kran benötigt bei 6 m minutlicher Hubgeschwindigkeit einen 16-kW-Motor. Welche Motorumlaufrzahl ist zu wählen, wenn die Winde mit loser Rolle und einer Trommel von 325 mm Durchmesser ausgerüstet ist und die Hubhöhe 8 m beträgt (Drehstrom)?

Die Drehzahl der Trommel ist  $(2 \cdot 6) : (0,325 \cdot \pi) = 11,8$  je Minute. Unter Annahme einer höchsten Übersetzung von 1 : 8 für ein Vorgelege würde bei zwei Vorgelegen die Motorumlaufrzahl höchstens  $8 \cdot 8 \cdot 11,8 = 755$  und bei drei Vorgelegen höchstens  $8 \cdot 8 \cdot 8 \cdot 11,8 = 6000$  sein dürfen. Es sprechen hier zwei Gründe für die Annahme einer unternormalen Motordrehzahl, erstens die große Hubhöhe, bei welcher beim unachtsamen Absenken großer Lasten ein Durchgehen eher zu befürchten ist, wenn die Drehzahl an und für sich schon hoch ist, und zweitens die Ersparung eines Vorgeleges, wodurch auch der Getriebewirkungsgrad größer wird. Es wird deshalb ein Motor mit höchstens 730 minutlichen Umdrehungen gewählt.

## H. Die Erzielung unveränderter Umlaufrzahl.

Bei den Motoren, welche für eine Regelung der Drehzahl in Frage kommen, wird zuweilen auch die Forderung gestellt, daß die Umlaufrzahl auf einer bestimmten Höhe gehalten werde, und zwar genauer als es beispielsweise der Nebenschlußmotor von selbst tut. Diese Forderung spielt vor allem dann eine Rolle, wenn die zugeführte Spannung aus irgend welchen Gründen stark schwankt oder wenn die Arbeitsmaschine, wie z. B. die Papiermaschine, zur richtigen Arbeitsweise eine konstante Geschwindigkeit braucht. Am nächstliegenden würde es sein, von Hand mit Hilfe eines Magnetreglers oder durch Bürstenverschiebung bei den Wechsel- und Drehstrommotoren die Umlaufrzahl stets zu berichtigen, wenn eine Änderung eintritt. Diese Regelung wird aber sehr unvollkommen sein, weil sie von der Aufmerksamkeit eines Bedienenden abhängt und außerdem schnelleren Änderungen nicht nachkommen kann. Man zieht deshalb selbsttätige Regelungen vor. Bei diesen ist zu unterscheiden zwischen der *trägen Regelung* und der *Schnellregelung*.

**1. Die träge Regelung.** Sie ist der Handregulierung nachgebildet und durch Abb. 381 schematisch dargestellt. Der Nebenschlußmotor M besitzt einen Feldregler FR, der nicht von Hand, sondern durch einen kleinen Motor m angetrieben wird. Mit dem Antriebsmotor M ist eine kleine Tachometer-Dynamo T gekuppelt, deren Spannung genau der Drehzahl proportional ist und einer Relaispule S zugeführt wird. Angenommen, der Motor lief zu schnell, so würde T zu hohe Spannung erzeugen, Spule S würde ihren Kern höher heraufziehen und dadurch die oberen Kontakte des Umschalters U schließen. Die Folge davon

ist, daß Motor *m* Strom bekommt und den Feldregler so verstellt, daß der Erregerstrom größer wird. Würde hingegen der Motor *M* zu langsam laufen, so legte sich der Umschalter *U* nach unten und veranlaßte den Motor *m* zum entgegengesetzten Lauf.

Bei der Regelung eines Wechselstrom- oder Drehstromkommutatormotors könnte die Anordnung die gleiche bleiben mit dem einen Unterschied, daß der Motor *m* die Bürsten verschieben müßte. In jedem Falle hat diese träge Regelung aber den großen Nachteil, daß sie immer zu spät kommt. Der Motor muß erst zu langsam oder zu schnell laufen, ehe überhaupt die Vorrichtung ihre Tätigkeit beginnt. Eine wirklich konstante Geschwindigkeit läßt sich nur mittels Schnellregler erzielen.

**2. Die Schnellregelung.** Diese wesentlich teurere Regelung kommt hauptsächlich dann zur Anwendung, wenn auch auf die Regelfähigkeit überhaupt großer Wert gelegt wird, wenn also ein Leonardumformer zur Aufstellung gelangt (s. S. 110). Abb. 382 stellt die grundsätzliche Schaltung in diesem Falle dar. *A*, *B*, *C* sind die drei gekuppelten Maschinen des Umformers. Der am Netz liegende Drehstrommotor *A* treibt den Erzeuger *B* und die kleine Erregermaschine *C*. Der Antriebsmotor *M* der Arbeitsmaschine empfängt seinen Strom von dem Erzeuger *B*, und wir wissen, daß der Motor um so schneller läuft, je höher die Spannung ist, die ihm zugeführt wird. Nun ist in den Stromkreis der Erregerwicklung des Erzeugers *B* außer einem gewöhnlichen Feldregler *FR* noch ein kleiner Widerstand *r* eingeschaltet, der durch ein Relais *R* kurzgeschlossen, also überbrückt werden kann. Dieser Widerstand ist nun so bemessen, daß *B* eine zu kleine Spannung  $E_1$  liefert, wenn er eingeschaltet ist, daß aber bei überbrücktem Widerstand *r* die in *B* erzeugte

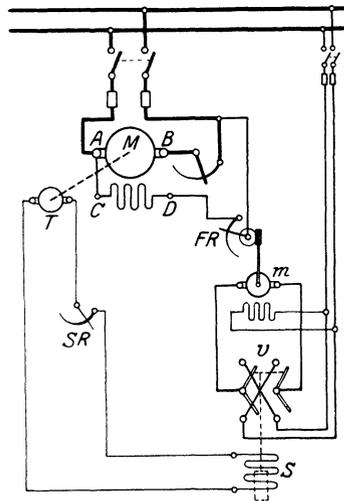


Abb. 381. Träge Regelung der Umlaufzahl.

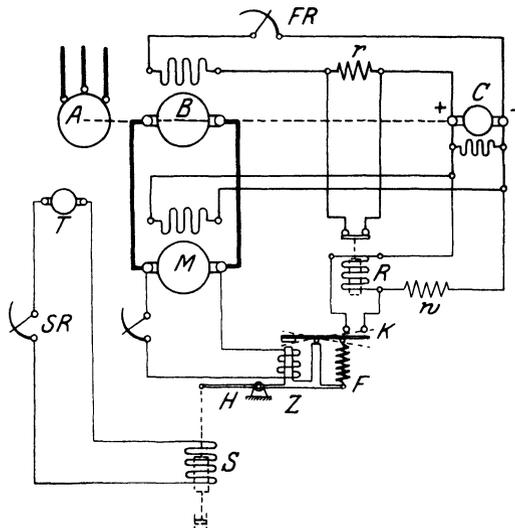


Abb. 382. Schnellregelung der Umlaufzahl.

kurzgeschlossen, also überbrückt werden kann. Dieser Widerstand ist nun so bemessen, daß *B* eine zu kleine Spannung  $E_1$  liefert, wenn er eingeschaltet ist, daß aber bei überbrücktem Widerstand *r* die in *B* erzeugte

Spannung  $E_2$  zu hoch ist. Es besteht also niemals Gleichgewicht. Nun wissen wir von früher, daß in einer so hohen Selbstinduktion, wie sie eine Magnetwicklung darstellt, eine Verstärkung oder eine Schwächung des Stromes nie plötzlich, sondern immer allmählich erfolgt. Man könnte also die Maschine B dadurch auf richtige Spannung regulieren, daß man den Widerstand  $r$  fortgesetzt ein- und ausschaltete. Angenommen, die richtige Spannung läge in der Mitte zwischen den Spannungsgrenzen  $E_1$  und  $E_2$ , so müßte man die Zeit, während  $r$  eingeschaltet ist, genau so lang bemessen, wie diejenige, während er ausgeschaltet ist. Es leuchtet jetzt aber ein, daß wir durch eine verschiedene Bemessung der Ein- und Ausschaltzeiten in der Lage sind, jeden Zwischenwert zwischen den Spannungen  $E_1$  und  $E_2$  konstant zu halten. Diesen Zwischenwert lassen wir nun von der augenblicklichen Drehzahl des Motors  $M$  verschieden hoch einstellen.

Im einzelnen wirkt die Schaltung 382 wie folgt: Sobald die dem Motor  $M$  zugeführte Spannung zu hoch ist, wird die an seinen Klemmen angeschlossene Zitterspule  $Z$  anziehen und unter Überwindung der Feder  $F$  die beiden Kontakte  $K$  miteinander verbinden. Hierdurch ist aber die Spule  $R$  kurzgeschlossen, ihr Kern fällt ab und damit ist der Widerstand  $r$  der Erregung vorgeschaltet. Bei der folgenden sinkenden Spannung läßt die Zitterspule  $Z$  ihren Anker los und die endliche Folge ist, daß der Widerstand  $r$  wieder überbrückt wird. Der Anker der Zitterspule macht also eine Bewegung, wie derjenige einer langsam gehenden elektrischen Klingel. Die von dem Motor  $M$  angetriebene Tachometerdynamo speist auch hier eine Spule  $S$ , deren Kern einen Hebel  $H$  bewegen kann, auf dessen rechter Seite die Zitterspule sitzt. Läuft Motor  $M$  zu schnell, so zieht die Spule  $S$  ihren Kern etwas tiefer, wodurch der Anker der Zitterspule den Kontakten  $K$  etwas nähergerückt wird. Infolgedessen bleibt der Kurzschluß von  $R$  länger erhalten und damit auch die Einschaltung von  $r$ , so daß die erzeugte Spannung und mit ihr die Drehzahl zurückgeht.

Die Schnellregler erlauben die Drehzahl bis auf  $\frac{1}{2}\%$  genau zu halten. Mittels eines Steuerreglers  $SR$  kann ebenso wie bei der Schaltung 381 eine andere Geschwindigkeit eingestellt werden.

## I. Die Auswahl des Anlassers.

Es ist von vornherein zu unterscheiden zwischen Anlassern, die nur zum Ingangsetzen des Motors dienen und solchen, die auch zur Regelung der Umlaufzahl benutzt werden. Regelanlasser müssen so groß gebaut werden, daß sie die im Dauerbetrieb in ihnen entwickelte Wärme ohne unzulässige Temperatursteigerung abführen können. Dem normalen Anlasser hingegen steht nach dem Anlassen im allgemeinen eine längere Ruhezeit zur Verfügung, in welcher er sich wieder abkühlen kann, er kann deshalb kleiner ausgeführt werden. Bestimmend für die Größe des Anlassers sind der *Anlaufstrom*, die *Anlaufzeit* und die *Anlaßhäufigkeit*. Der Anlaufstrom richtet sich sowohl nach der Größe des Motors, als auch nach der Art der Arbeitsmaschine. Er ist sehr klein, wenn der Motor leer oder schwach belastet anläuft, wie dies z. B. dann der Fall ist, wenn die Belastung der Maschine erst nach dem Anlassen mittels Kupplung oder Riemen eingeschaltet wird. Der Anlaufstrom ist hingegen groß, wenn entweder im Anlauf große Massen zu beschleunigen sind, oder wenn die Widerstände der Arbeitsmaschine bei geringer

Geschwindigkeit verhältnismäßig höher sind. Letzteres trifft bei allen Antrieben zu, bei denen die ganze Motorleistung lediglich zur Überwindung von Bewegungswiderständen gebraucht wird. Bei solchen ist das Anlaufmoment infolge dicken Öles u. dgl. oft mehrfach größer als im Lauf. Die Anlaßzeit hängt in erster Linie von der Größe der Massen ab, die zu beschleunigen sind. Ein Kranfahranlasser wird der großen bewegten Masse wegen deshalb stets reichlicher zu bemessen sein, als ein solcher für eine andere Bewegung. Die Anlaßhäufigkeit ist der wichtigste der Faktoren und durch den Betrieb gegeben. Die geringste Schalthäufigkeit haben wir dort, wo ein Motor beispielsweise bei Schichtbeginn angelassen und am Schluß abgestellt wird. Höhere Anlaßhäufigkeit tritt schon bei Werkzeugmaschinen mit Einzelantrieb ein, insbesondere beim Einrichten derselben. Bei Hebezeugen und Fahrzeugen ist dieselbe schon bis zu einem Grade gesteigert, daß die normalen Anlассer nicht mehr verwendet werden können und statt ihrer die sog. Steuerschalter, auch Kontroller genannt, gewählt werden müssen. Bei den Antrieben in Hütten- und Stahlwerken schließlich werden Schaltzahlen von 30000 in der Woche erreicht, wobei vielfach dann nur Kohlesteuerschalter oder Schützensteuerungen ausreichen. Da die Anlaßzeit und die Anlaßhäufigkeit im allgemeinen schwer anzugeben sind, wird in Preislisten meistens zwischen schwerem und leichtem Betrieb unterschieden, sowie auch zwischen Halblastanlauf und Vollastanlauf. Es darf jedoch keineswegs angenommen werden, daß sich die Anlассergröße nur nach den Widerständen richtete, in denen die Wärme entwickelt wird. Diese lassen sich leicht für angestrengten Betrieb bauen. Schwierigkeiten machen indessen die Kontakte, welche die Widerstandsstufen ab- und zuschalten. Dieselben verschmoren um so schneller, um so häufiger geschaltet wird.

**1. Die Flachbahn-Anlассer.** a) **Mit Luftkühlung.** Die Kontakte sind meist in kreisförmiger Bahn auf einer Schiefertafel angeordnet, und die Abschaltung der Widerstände geschieht durch eine über die Kontakte gleitende Kurbel. Die Widerstände sind geschützt hinter der Tafel untergebracht und werden von der durchstreichenden Luft gekühlt. Zum Schutze gegen Berührung muß die Kontaktplatte durch eine Schutzhaube überdeckt sein. Abb. 383 stellt einen derartigen Anlассer dar. Antriebe mit großen Schwungmassen erfordern ein sehr langsames Anlassen. Dasselbe kann dadurch erzwungen werden, daß man den Anlассerhebel mit einem Klinkwerk versieht, welches für jede Stufe

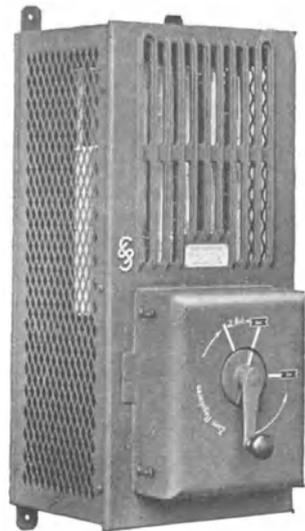


Abb. 383. Flachbahnanlasser

Anlассer für regelbare Nebenschlußmotoren werden nach Abb. 168 ausgeführt. Die starke Luftwirbelung, welche die Anlассer mit Luft-

kühlung hervorrufen, bewirkt in nicht ganz sauberen Räumen eine schnelle Verschmutzung und führt zu Betriebsstörungen.

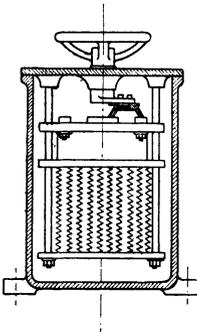


Abb. 384. Ölanlasser.  
(Aus Preger-Lehmann,  
Unfallverhütungs-Technik.)

b) **Mit Ölkühlung.** Diese Anlasser sind vollkommen abgeschlossen und gegen Verschmutzung geschützt. Sie eignen sich deshalb besonders für staubige und feuchte Räume. Die Widerstände liegen in einem Ölbad, welches die Wärme von den Drähten aufnimmt und an das Gehäuse überträgt (Abb. 384).

Flachbahnanlasser kommen nur für geringe Anlaßhäufigkeit in Frage, und zwar etwa 10—15 Anläufe in der Stunde, also etwa bis 500 wöchentliche Schaltungen. Ihre Größe ist durch die Angabe des Anlaßstromes, der Anlaßzeit und der Anlaßhäufigkeit bestimmt. Ungefähre Durchschnittswerte derselben enthält die nachstehende Tabelle.

| Arbeitsmaschine                           | $x = \frac{\text{Anlaßstrom}}{\text{Normalstrom}}$ | $t = \text{Anlaßzeit in Sek.}$ | $z = \text{Zahl der Anläufe je Stunde}$ |
|---|--|--------------------------------|---|
| Becherwerke . . . . .                     | 1,25—1,75  | 10—20                          | 1—5                                     |
| Druckerpresen . . . . .                   | 1,25   | 5—15                           | 10—20                                   |
| Kompressoren, Anlauf ohne Gegendruck      | 0,5—1,25   | 5—20                           | 1—30                                    |
| „ mit Gegendruck .                        | 1,5—2  | 5—20                           | 1—30                                    |
| Kreiselpumpen, unter $n = 1500$ . . . . . | 0,75—1,25  | 2—15                           | 1—30                                    |
| „ über $n = 1500$ . . . . .               | 1—1,5  | 5—25                           | 1—30                                    |
| Kolbenpumpen, Anlauf ohne Gegendruck      | 0,6—1,25   | 5—20                           | 1—30                                    |
| „ mit Gegendruck                          | 1,5—2  | 5—20                           | 1—30                                    |
| Sägen (Kreis- u. Bandsägen) . . . . .     | 0,75—1,25  | 3—15                           | 3—10                                    |
| Transportbänder . . . . .                 | 1,25—1,75  | 10—20                          | 1—4                                     |
| Transmissionen                            |  |                                |   |
| wenig Lager und Scheiben . . . . .        | 0,75—1,25  | 5—15                           | 1—3                                     |
| viel Lager und Scheiben . . . . .         | 1,25—2   | 10—45                          | 1—3                                     |
| Ventilatoren . . . . .                    | 0,6—1  | 2—15                           | 1—30                                    |
| Scheren, Stanzen (mit Schwungrad) . .     | 1,75—2   | 15—60                          | 1—5                                     |
| Zentrifugen . . . . .                     | 1,75—2   | 100—300                        | 1—10                                    |

Normale Werkzeugmaschinen verhalten sich etwa wie Transmissionen. Die hochbeanspruchten neueren Maschinen erfordern jedoch oft die weiter unten beschriebenen Schaltwalzenanlasser.

Bei einem Anlauf mit normalem Strom wird zu Beginn des Anlassens eine Leistung gleich der Motorleistung im Anlaßwiderstand verbraucht, am Ende des Anlaufs jedoch Null. Die mittlere im Widerstand verbrauchte Leistung ist also bei gleichförmigem Anlauf  $\frac{1}{2}$ . Die in Wärme umgewandelte Energie ist demnach bei  $x$ fachem Anlaßstrom

$$\frac{x \cdot \frac{1}{2} \cdot t \cdot z}{2},$$

worin  $t$  die Anlaßzeit und  $z$  die Zahl der stündlichen Anläufe bedeutet.

Diese Anlaßenergie, die meist an Hand der Listenangaben für einen Anlasser berechnet werden kann, darf im Betriebe nicht überschritten werden, weil sonst die Erwärmung unzulässig groß würde.

**Beispiel:** Es stehe ein Anlasser zur Verfügung, welcher nach Liste bei 1,25fachem Anlaßstrom und 4 kW Motorleistung stündlich 3 Anläufe von je 8 Sekunden aushält. Es soll festgestellt werden, ob derselbe für eine Stanze mit Schwungrad ausreicht, welche 1,5 kW benötigt und welche bei 1,75fachem Anlaßstrom stündlich 2 Anläufe von 20 Sekunden Dauer machen wird.

Die stündliche Anlaßenergie des Anlagers beträgt  $(1,25 \cdot 4 \cdot 8 \cdot 3) : 2 = 60$  kW. Die Stanze erfordert eine Anlaßenergie von  $(1,75 \cdot 1,5 \cdot 20 \cdot 2) : 2 = 52,5$  kW. Der Anlasser wird also nicht zu warm. Bei gleicher Spannung in beiden Fällen wird allerdings der erste Stromstoß im zweiten Falle wesentlich größer als notwendig.

**2. Die Flüssigkeitsanlasser.** Während der Ölanlasser in schmutzigen und feuchten Räumen, sowie dort, wo eine rauhe Behandlung möglich, der normale Anlasser ist, kann an diesen Stellen auch ein Flüssigkeitsanlasser verwandt werden, wenn fachkundige Leute ihn bedienen, und wenn die Dampfenwicklung desselben nicht stört. Abb. 385 zeigt einen solchen Anlasser. In Tröge, die mit Sodalösung gefüllt sind, werden beim Anlassen Bleche eingesenkt. Die Lösung stellt den Anlaßwiderstand dar, der um so geringer ist, je tiefer die Bleche eintauchen. Bei Gleichstrom kommen zwei, bei Drehstrom drei Bleche in Frage. Flüssigkeitsanlasser können wegen des geringen Isolationswertes nur bei niedrigen Spannungen gewählt werden.



Abb. 385.  
Flüssigkeitsanlasser  
(geöffnet).

**3. Die Walzenanlasser.** Bei den bisher besprochenen Öl- und Luftanlassern war es stets ein einziger Kontakt, nämlich derjenige am Handhebel, welcher nacheinander sämtliche Widerstandsstufen ab- oder zuschaltete. Es ist klar, daß sich dieser Kontakt bei häufigerem Schalten wegen der bei jeder Stufe auftretenden Lichtbögen und Übergangswiderstände stark erwärmen muß, so daß er in kurzer Zeit verschmort. Ein Anlasser, der für häufiges Schalten geeignet sein soll, muß deshalb so gebaut werden, daß die Unterbrechungen der einzelnen Widerstandsstufen immer zwischen anderen Kontakten stattfinden.

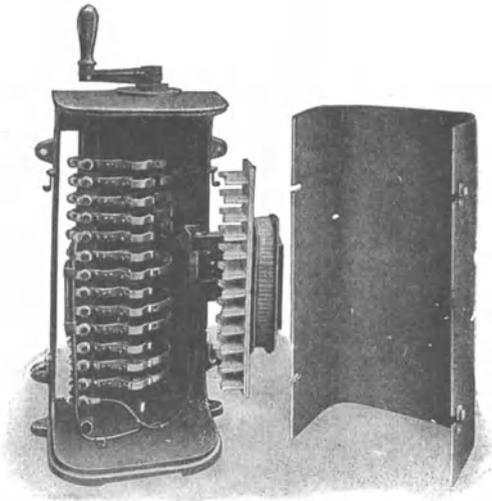


Abb. 386. Geöffneter Kontrollier.

Man erniedrigt dadurch die Schalthäufigkeit des einzelnen Kontaktes. Dieser Grundsatz ist in den Walzenanlassern verwirklicht. Nach Abb. 386 besteht ein solcher aus einer in einem Gehäuse untergebrachten drehbaren Walze, auf welcher in Abstand voneinander eine größere Anzahl Ringsegmente isoliert aufgeschraubt ist. Diesen Segmenten steht eine Reihe ebenfalls isolierter, aber fest angeordneter Kontaktfinger gegenüber, welche beim Drehen der Walze nacheinander mit den verschiedenen langen Walzensegmenten Kontakt bekommen und so die Widerstandsstufen zu- oder abschalten. Eine ferner auf der Welle befestigte Rastscheibe mit Rolle und Feder hält die Walze in den verschiedenen Stellungen fest. Damit nun bei den geringen Kontaktabständen kein Lichtbogen zwischen den

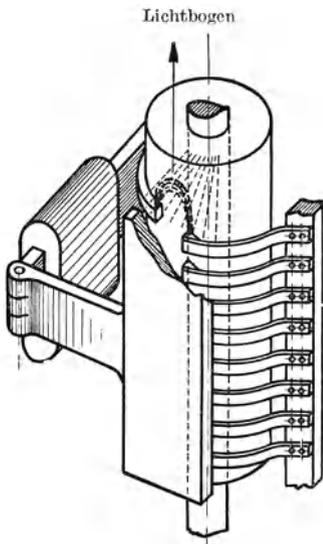


Abb. 387. Wirkungsweise einer Funkenblaspule.

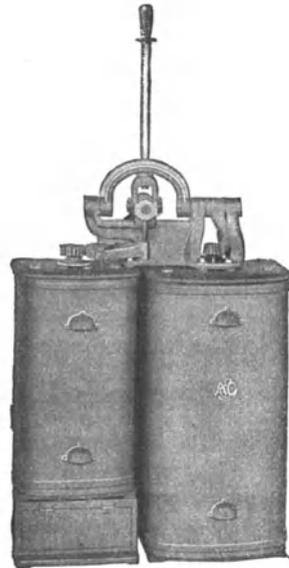


Abb. 388. Universalsteuerung.

Segmenten entstehen kann, wird ein drehbarer Fächer zwischengedreht. Der drehbare Arm desselben ist teilweise aus Eisen, welches durch eine vom Motorstrom durchflossene Blaspule magnetisiert wird. Es entsteht also, wie dies Abb. 387 zeigt, zwischen diesem Arm und der Welle ein magnetisches Feld. Wird nun beim Ausschalten wie gezeichnet ein Lichtbogen gezogen, so wird sich derselbe wie jeder stromdurchflossene Leiter im magnetischen Feld zu bewegen suchen. Dadurch wird er länger und reißt ab. Walzenanlasser können sowohl als einfache Anlasser, als auch als Umkehranlasser gebaut werden; sie gestatten ferner leicht, jede beliebige Bremsschaltung herzustellen. Als Antriebsmittel dient am besten ein Handrad, weil man damit am sichersten steuern kann. Bei Bedienung mehrerer Steuerschalter zu gleicher Zeit ist indessen Hebelantrieb vorzuziehen. In diesem Falle ist es sogar möglich, mittels der durch Abb. 388 dargestellten Universalsteuerung zwei Anlasser mit

einem einzigen Hebel zu betätigen. Die Anlaßwiderstände selbst werden bei derartigen Walzenanlassern in den allermeisten Fällen in einem Kasten getrennt vom Anlasser aufgestellt, damit derselbe nicht durch sie erwärmt wird.

Walzenanlasser können auch mit Ölkühlung versehen sein. Abb. 389 stellt z. B. einen Öl-Walzenanlasser dar, welcher dem Motor angebaut

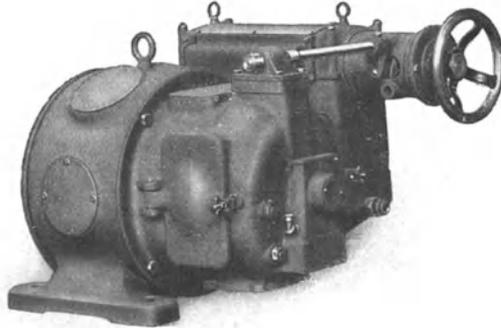


Abb. 389. Motor mit angebautem Anlasser.

ist. Wenn man bei Drehstrommotoren die Bürstenabhebvorrichtung mit dem angebauten Anlasser verbindet, kann auch bei Unachtsamkeit nicht falsch geschaltet werden.

Die Belastbarkeit der Walzenanlasser, auch Kontroller genannt, hängt sehr von ihrer Bemessung ab. Diejenigen der A.E.G. können bei der listenmäßig angegebenen Leistung bis zu 10000 wöchentliche Schaltungen ertragen. Ist die Schaltzahl eine andere, so kann die Belastung nachfolgender Tabelle gewählt werden:

| Schaltzahl/Woche | Leistung in % der normalen |
|------------------|----------------------------|
| 500— 1500        | 125%                       |
| 2000— 8000       | 100%                       |
| 10000—11000      | 90%                        |
| 12000            | 80%                        |
| 18000            | 65%                        |

Während die ersten geringen Schaltzahlen bei Werkzeugmaschinen, Schiebebühnen und Maschinenhauskranen vorkommen, findet man die letzten hohen Schaltzahlen hauptsächlich bei Hütten- und Stahlwerkskranen.

**4. Die Kohlesteuerschalter.** Bei sehr großer Schalthäufigkeit und großen Leistungen reichen die Walzenanlasser nicht mehr aus, und man verwendet dann Kohlesteuerschalter, bei welchen die Schaltkontakte besonders massig und groß sind. Die als Hammerkontakte ausgebildeten Einzelschalter werden von Hand durch eine Nockenwelle bewegt. Abb. 390 zeigt rechts einen solchen Schalter. Eine Spiralfeder strebt die beiden Kontakte zu schließen, die von dem Walzensegment durch Druck auf

die rechte kleine Rolle geöffnet werden. Jeder Schaltkontakt hat seine eigene Funkenblaspule.

Kohlesteuerschalter können bei den listenmäßigen Leistungen bis zu 30000 wöchentlichen Schaltungen verwandt werden. Bei etwa

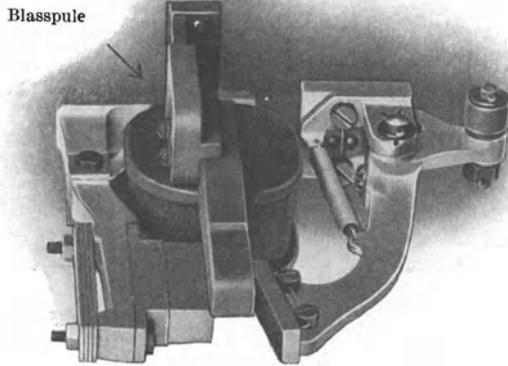


Abb. 390. Hammerkontakt eines Kohlesteuerschalters.

12000 Schaltungen kann der Anlasser mit 125% der normalen Leistung beansprucht werden.

**5. Die Schützensteuerungen.** Ein wichtiger Nachteil der Kohlesteuerschalter ist ihre Unhandlichkeit. Schon bei mittleren Motoren kann ein Mann höchstens einen Apparat bedienen,

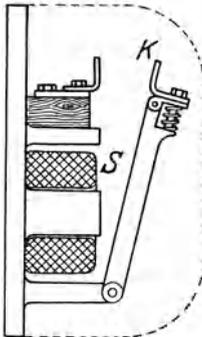


Abb. 391. Schütz.

und solche für große Motoren lassen sich überhaupt nicht mehr von Hand bewältigen. Man zieht deshalb bei solchen schweren Betrieben die Schützensteuerung vor, die sich konstruktiv nur dadurch von dem Kohlesteuerschalter unterscheidet, daß der Hammerkontakt in Abb. 390 nicht von Hand, sondern magnetisch bewegt wird. Einen solchen elektromagnetisch betätigten Schalter nennt man ein *Schütz*. Mehrere solcher Schützen werden zu einer *Schützensteuerung* zusammengestellt. Es sind sowohl einpolige als auch mehrpolige Schütze für Erregung durch Gleich- oder Wechselstrom erhältlich. Abb. 391 zeigt uns schematisch den Aufbau eines Schützes. S ist die Erregerspule, die von Hand eingeschaltet wird und nur einen sehr kleinen Strom verbraucht. Sobald man sie einschaltet, wird der drehbare Anker angezogen und schließt die Kontakte K. Bei Unterbrechung des Spulenstromes öffnet eine Feder die Kontakte. Damit nun bei einer Schützensteuerung die einzelnen Schützen stets in der richtigen Reihenfolge eingeschaltet werden, geschieht das Einschalten mittels einer Meisterwalze, einem Steuerschalter, welcher in seinem Bau mit den früheren Steuerschaltern

übereinstimmt. Derselbe ist jedoch außerordentlich klein, weil er ja doch nur die sehr geringen Spulenströme der Schützen zu schalten hat.

Wir wollen nun in Abb. 392 als Beispiel eine Umkehr-Schützensteuerung für einen Hauptschlußmotor betrachten. M ist die von Hand bewegte Meisterwalze. In der Abbildung ist zur besseren Darstellung der Mantel der Walze aufgeschnitten und in eine Ebene ausgerollt gedacht. Die Walze hat sowohl für Vorwärts- als auch für Rückwärtslauf 5 Stellungen und dazwischen eine Nullstellung, in welcher die Kontaktfinger in der Abbildung stehen. Die Schützen a, b, c, d schalten die Widerstandsstufen, die Schützen v und r den Anker für Vorwärts- und Rückwärtslauf. Denken wir uns nun einmal die Fingerreihe der Meisterwalze M auf die linke Kontaktstellung 1 gestellt. Dann kann vom positiven Pol P ein Strom über die beiden linken oberen Segmente nach dem Finger r fließen, von hier aus durch die Schützenspule r nach dem negativen Pol N. Das zweipolige Schütz r zieht also an und schaltet den Anker A—B ein. Der Motorstrom fließt nun von P durch alle 4 Widerstandsstufen zum rechten Schalter des Schützes r, in der Richtung B—A durch den Anker, dann durch den linken Schalter des Schützes r und durch die Feldwicklung E—F nach dem negativen Pol N. Hätten wir unsere Kontaktfingerreihe auf die rechte Stellung 1 gestellt, so hätte statt r das Schütz v Strom bekommen und hätte den Anker derart eingeschaltet, daß der Strom in Richtung A—B durch den Anker geflossen wäre, wodurch die Drehrichtung des Motors umgekehrt wäre.

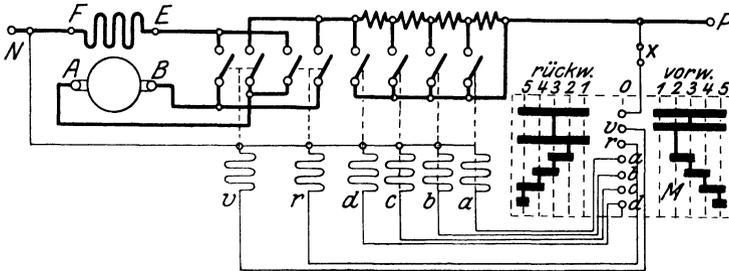


Abb. 392. Schützensteuerung.

Wir sehen nun weiter, daß, sobald wir unsere Fingerreihe auf die Stellungen 2, 3, 4 und 5 weiterrücken, nacheinander die Schützen a, b, c und d anspringen und den Anlaufwiderstand stufenweise abschalten. Es empfiehlt sich, auch einmal die Schaltung aufzuzeichnen für den Fall, daß die Motordrehrichtung nicht umgekehrt zu werden braucht, ferner auch die Schaltung für einen Drehstrommotor. Bei Drehstrom werden die Schützenspulen einfach mit der Wechselfspannung zwischen zwei Drehstromleitungen betrieben.

Die Schützen v und r dürfen niemals gleichzeitig geschlossen sein, weil dies ein Kurzschluß sein würde. Man verriegelt sie deshalb mechanisch gegeneinander oder elektrisch nach Schaltung 6 auf S. 436.

Schützensteuerungen sind für Betriebe mit wöchentlich 10000 bis 30000 Schaltungen geeignet.

**6. Die Selbstanlasser.** Es gibt zahlreiche elektromotorische Antriebe, welche nicht von Fachleuten bedient werden können, oder solche, bei denen der Bedienende seine ganze Aufmerksamkeit einer bestimmten Arbeit zuwenden muß. In solchen Fällen, ferner auch bei Pumpwerken und dgl., die bei Bedarf ganz von selbst anlaufen sollen, sind Selbstanlasser erforderlich. Bei einem Personenaufzug z. B. hat man nur nötig, den Druckknopf für ein bestimmtes Stockwerk zu drücken, worauf der Aufzugsmotor durch einen Selbstanlasser ganz selbsttätig angelassen und später wieder still gesetzt wird. Ebenso ist es bei größeren

Werkzeugmaschinen üblich, Selbstanlasser zu verwenden, weil man dem Arbeiter die Arbeit des Anlassens und Stillsetzens abnehmen möchte, und weil dieses Ein- und Ausschalten vom Arbeitsstand aus vorgenommen werden soll, wo kein Platz für Anlasser ist. Der Bau der Selbstanlasser ist außerordentlich mannigfaltig. Eine sehr einfache Form, die für kleinere Motoren gebräuchlich ist, stellt Abb. 393 schematisch dar. Sobald die Magnetspule *S* eingeschaltet wird, bewegt sich ihr Kern nach oben und spannt die Feder *F*. Der mit dem Gegengewicht *G* verbundene Anlasserhebel kann sich aber unter dem Ein-

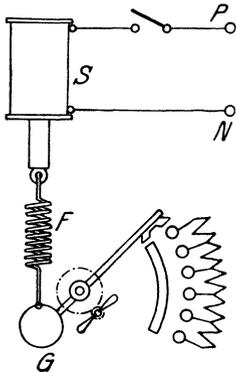


Abb. 393. Selbstanlasser.

fluß der Federspannung doch nur ganz langsam bewegen, weil mittels Räderübersetzung ein hemmendes Flügelrad mit ihm gekuppelt ist. Der Motor wird demnach langsam angelassen. Beim Ausschalten hingegen entkuppelt sich das Flügelrad, so daß das Gewicht *G* schnell abfällt. Bei anderen Ausführungen wird ein Magnet eingeschaltet, der sich von selbst immer wieder ausschaltet und durch die hin- und hergehende Bewegung eine Schaltwalze stufenweise weerschaltet. Sehr häufig findet man zum Antrieb der Schaltwalzen von Selbstanlassern auch kleine Motoren. In neuerer Zeit haben für mittlere und große Motoren die Schützen-Selbstanlasser wachsende Bedeutung gewonnen, besonders bei größeren Werkzeugmaschinen und Aufzügen sind sie häufig anzutreffen.

Abb. 394 stellt eine derartige Schaltung für Drehstrom dar. *M* ist der Drehstrommotor, dessen Ständer, je nachdem ob der Motor vorwärts oder rückwärts laufen soll, entweder durch Schütz *v* oder durch Schütz *r* eingeschaltet wird. Wenn man den Stromweg zum Ständer *UVW* verfolgt, wird man finden, daß beim Anziehen des einen Schützes die beiden äußeren Phasen vertauscht sind gegenüber der Schaltung beim Anziehen des anderen Schützes. Die Schütze *a* und *b* schließen die Läufer-Widerstandstufen kurz. Das Steuerschütz *St* hingegen, welches sich gedämpft bewegt, hat die Aufgabe, zuerst Schütz *a*, etwas später Schütz *b* einzuschalten und zuletzt sich selbst und *a* abzuschalten, so daß nur *b* eingeschaltet bleibt und den Läufer kurzgeschlossen hält. Die Ständerschützen *v* und *r* können durch einen kurzen Druck auf den Druckknopf *V* bzw. *R* eingeschaltet werden und bleiben auch nach dem Loslassen des Druckknopfes eingeschaltet, weil durch die oberen Hilfskontakte *k*<sub>2</sub>, die sich beim Anspringen des Schützes schließen, der Druckknopf überbrückt wird. Der Druckknopf *H* dient zur Stillsetzung des Motors, und zwar genügt ein einmaliger kurzer Druck. Der Strom der Spule *v* ist über die unteren Hilfskontakte *k*<sub>1</sub> des Schützes *r* geführt, damit *v* nur dann anspringen kann, wenn *r* ausgeschaltet ist. Die gleiche Schaltung ist mit Spule *r* gemacht. Sobald man nun einen der beiden Fahrtdruckknöpfe, z. B. *V* drückt, fließt von *S* über Druckknopf *H* und *V* dann über die Kontakte *k*<sub>1</sub> ein Strom durch Spule *v* nach *T*. Schütz *v* schaltet also den Ständer im richtigen Drehsinn ein und fällt auch beim Loslassen des Druckknopfes nicht ab, weil die jetzt geschlossenen Kontakte *k*<sub>2</sub> genau dasselbe machen wie der Druckknopf. Der Motor läuft jetzt schon an, weil der Läufer über sämtliche Widerstände geschlossen ist. Von der Motorklemme *V* zweigt ein Strom durch die Spule *St* ab, geht über die geschlossenen Kontakte *h*<sub>1</sub> nach *R*. Das Steuerschütz zieht also langsam an, vorausgesetzt natürlich, daß Schütz *b* ausgeschaltet ist. Einen Augenblick später bekommen die Kontakte *c*<sub>1</sub> Verbindung, und es fließt dann von *V* durch Spule *a*, über *c*<sub>1</sub> und *h*<sub>1</sub> ein Strom nach *R*. Schütz *a* schaltet also die ersten Widerstandsstufen ab. Ein Weilchen später bekommen auch die

Kontakte  $c_2$  Verbindung und es fließt ein Strom von  $V$  durch  $b$  über  $c_2$  nach  $R$ . Jetzt zieht  $b$  an und schließt den Läufer kurz. Gleichzeitig schließt Schütz  $b$  aber auch die Kontakte  $h_2$ , welche die Kontakte  $c_2$  überbrücken, so daß  $b$  auch dann nicht abfällt, wenn sich die Kontakte  $c_2$  öffnen sollten. Fernerhin ist durch das Anziehen von  $b$  der Kontakt  $h_1$  unterbrochen worden, wodurch  $St$  und  $a$ , die nicht mehr gebraucht werden, abfallen. Die Stillsetzung erfolgt allein durch Drücken

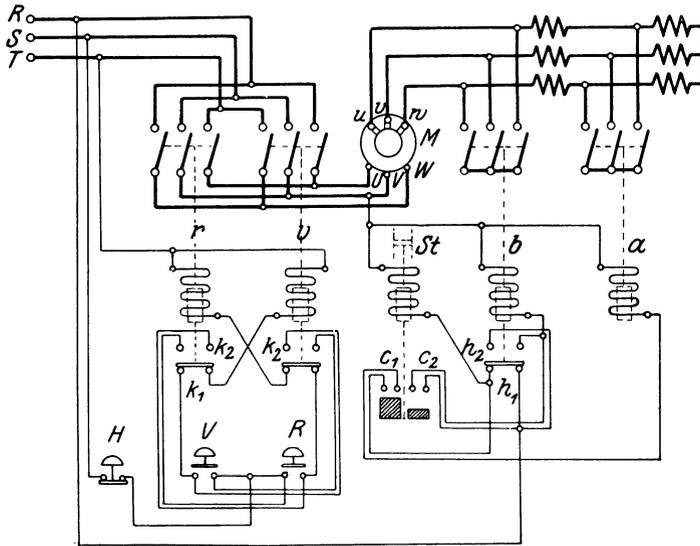


Abb. 394. Schützenselbstanlasser.

von  $H$ . Sind einmal die Schütze abgefallen, so kann ihr Anziehen nur durch Drücken der Druckknöpfe  $V$  oder  $R$  wieder eingeleitet werden.

Man versuche nun, die gleiche Schaltung für einen Hauptschluß- und einen Nebenschlußmotor zu entwerfen.

**Beispiel:** Zum Antrieb der Transmission einer Maschinenfabrik dient ein 50 kW-Motor. Welcher Anlasser ist erforderlich?

Da in einer 8stündigen Schicht im Mindestfalle 3, höchstens aber vielleicht nur 6 Anläufe vorkommen, genügt ein Flachbahn- oder Ölanlasser. Transmissionen verbrauchen in ungünstigen Fällen etwa ein Viertel der übertragenen Leistung, im Anlauf wegen des dicken Öles vielleicht die Hälfte. Da ferner nicht unerhebliche Massen zu beschleunigen sind, wird ein Anlauf mit vollem Strom notwendig sein. Es wird deshalb ein Vollanlasser gewählt. Die Anlaßzeit kann zu etwa 12 bis 15 Sekunden geschätzt werden.

**Beispiel:** Eine Zentrifuge wird durch einen 6 kW-Motor direkt angetrieben und macht 1500 minutliche Umläufe. Das Schwungmoment des Zentrifugenkorbes einschließlich der Füllung und des Motorankers ist zu etwa  $150 \text{ kgm}^2$  bestimmt worden. Welcher Anlasser ist nötig? Das Normalmoment des Motors ist  $M = 0,975 \cdot 6000 : 1500 = 3,9 \text{ mkg}$ . Nimmt man an, daß zur Beschleunigung etwa das 1,75fache Normalmoment zur Verfügung stehe, so ergibt sich nach Gleichung 52 eine Anlaßzeit  $t_a = 150 \cdot 1500 : 375 \cdot 6,8 = 88$  Sekunden. Rechnet man weiter für die Überwindung der Reibungswiderstände, die im Anlauf größer sind, noch das halbe Normalmoment, so wird der Anlaßstrom etwa das 2,25fache des Normalstroms betragen. Die Anlaßhäufigkeit ist durch den Betrieb bestimmt und beträgt meist zwischen 2 und 10 Anläufen in der Stunde. Es ist also noch ein Flachbahnanlasser möglich, dessen Größe durch die Angabe von Anlaßstrom,

Anlaßzeit und Anlaßhäufigkeit bestimmt ist. Zentrifugen erhalten zuweilen noch eine Sicherung, derart, daß sich der Motor selbsttätig abschaltet, wenn die Zentrifuge unachtsamerweise während des Betriebes geöffnet werden sollte.

**Beispiel:** Ein Stripperkran 10 t Tragfähigkeit für 5 t Blöcke hat folgende Motorleistungen und Geschwindigkeiten. Heben 75 kW und 13 m/min., Kranfahren 37 kW und 80 m/min., Katzfahren 16 kW und 50 m/min., Strippen 28 kW, Drehen 5 kW, 4 mal/min. Das Arbeitsdiagramm Abb. 459 gelte für diesen Kran, und es werden bei höchster Ausnutzung 200 Blöcke in 12 Stunden bewältigt. Die durchschnittliche Blockzahl in Tag- und Nachtbetrieb wird kaum mehr als 50 betragen. Nimmt man nun an, daß durch ungenaues Schalten die Zahl der in Abb. 459 aufgezeichneten Einschaltungen verdreifacht wird, ergibt sich eine wöchentliche Schaltzahl:

Heben:  $19 \cdot 3 \cdot 12 \cdot 50 = 34000$ .

Kranfahren:  $6 \cdot 3 \cdot 12 \cdot 50 = 10800$ .

Katzfahren:  $7 \cdot 3 \cdot 12 \cdot 50 = 12600$ .

Zange:  $10 \cdot 3 \cdot 12 \cdot 50 = 18000$ .

Drehen:  $7 \cdot 3 \cdot 12 \cdot 50 = 12600$ .

Für das Hubwerk reicht ein Controller keinesfalls mehr aus. Auch für das Kranfahrwerk ist in Anbetracht der großen Leistung und der großen Massenbeschleunigung ein Controller kaum noch geeignet. Es werden deshalb der leichteren Bedienung wegen für diese beiden Antriebe Schützensteuerungen vorgesehen, wobei die beiden Führercontroller durch Universalsteuerung miteinander verbunden werden. Für das Katzfahren und das Strippen (der Strippermotor läuft leer an) werde ein Controller gewählt, die auch durch Universalsteuerung mit gemeinsamem Hebel gesteuert werden. Da die im allgemeinen für Controller übliche Schaltzahl von etwa 10000 überschritten wird, erfolgt die Auswahl aus der Liste so, daß der Strippercontroller nur mit 65% und der Katzfahrcontroller nur mit 80% der Listenleistung beansprucht sind. Da für das Drehen die Zahl der Einschaltungen bereits reichlich angenommen ist, genügt ein Controller bei voller listenmäßiger Belastung am besten mit Handradantrieb. Da die Drehbewegung verhältnismäßig selten ist, müssen die Walzen so aufgestellt werden, daß der Führer mit jeder Hand eine Doppelwalze steuert.

## K. Der Schutz des Motors gegen Überströme.

Wir haben zu unterscheiden zwischen dem vorbeugenden Schutz und dem eigentlichen Schutz. Die sog. Nullspannungsausschaltungen gehören zu den Vorbeugungsmitteln, denn sie haben die Aufgabe, bei Ausbleiben der Spannung, den Motor abzuschalten, damit der Motor keinen Überstrom bekommt, wenn die Spannung wiederkommt.

**1. Nullspannungsausschaltungen.** In der einfachsten Weise erreicht man eine Ausschaltung bei Ausbleiben der Spannung mit einem Schalter mit Nullspannungsauslösung nach Abb. 395. Der Schalthebel wird durch eine Klinke entgegen der Wirkung einer Feder in der Einschaltstellung gehalten. Bleibt aber einmal die Spannung aus, so läßt die an der Spannung liegende Spule S ihren Kern los, dieser löst im Fallen die Klinke und der Schalter schaltet aus. Häufiger wird die Nullspannungsauslösung an dem Anlasser angebracht, wie dies Abb. 396 darstellt. Der Anlaßhebel steht unter der Wirkung einer Feder, welche ihn in die Nulllage zurückführen will. In der Einschaltstellung befindet sich jedoch ein kleiner Magnet, dessen Spule von dem Erregerstrom des Motors durchflossen ist, und welcher den eisernen Anlaßhebel in der Endlage magnetisch festhält. Bleibt die Spannung aus, so läßt der Magnet los, und die Feder dreht den Anlaßhebel in die Nulllage. Die Schaltung hat noch den

weiteren Vorzug, daß der Anlasser auch dann ausgeschaltet wird, wenn aus irgend einem Grunde einmal der Erregerstrom ausbleiben sollte (Drahtbruch!), ferner ist es auch nicht möglich, den Anlasser auf einer Zwischenstellung stehen zu lassen. Bei größeren Motoren, insbesondere bei Steuerung derselben durch Steuerschalter oder Schützen kann man eine Nullspannungsausschaltung mittels Schütz

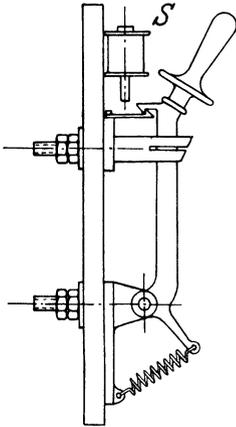


Abb. 395.  
Nullspannungsausschalter.

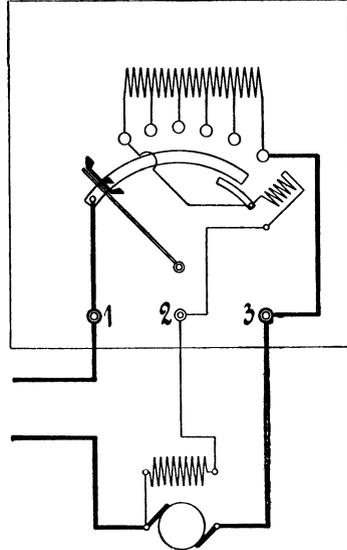


Abb. 396.  
Anlasser mit Nullspannungsauslösung.

herstellen. Abb. 397 zeigt eine derartige Schaltung. Das Schütz S schaltet entweder den Motorstrom selbst oder, wenn es möglich ist, den Steuerstrom anderer Schützen. Sein Schalter könnte also z. B. der Schalter x in Abb. 392 sein. In Abb. 397 ist der Schützenspule ein Widerstand R vorgeschaltet, welcher so groß ist, daß das Schütz nicht genügend Spannung bekommt, um anspringen zu können. Durch einen Druckknopf E kann aber der Widerstand R überbrückt werden, so daß dann das Schütz volle Spannung bekommt und anzieht. Es fällt auch nach dem Loslassen des Druckknopfes nicht ab, weil schon ein sehr kleiner Strom ausreicht, um das einmal angezogene Schütz zu halten. Wenn aber nun einmal die Spannung ausbleibt, oder wenn der Druckknopf A nur für einen Augenblick geöffnet wird, fällt das Schütz ab und kann von selbst nicht wieder anziehen. Diese Schaltung hat den weiteren Vorzug, daß das Schütz sich wegen des vorgeschalteten Widerstandes weniger erwärmt. Eine andere Schaltung zeigt Abb. 398. Bei ihr liegt das Schütz S immer an voller Spannung. Durch Drücken des Druck-

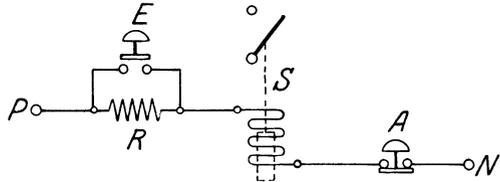


Abb. 397. Nullspannungsausschaltung mit Schütz.

knopf A kann aber der Widerstand R überbrückt werden, so daß dann das Schütz volle Spannung bekommt und anzieht. Es fällt auch nach dem Loslassen des Druckknopfes nicht ab, weil schon ein sehr kleiner Strom ausreicht, um das einmal angezogene Schütz zu halten. Wenn aber nun einmal die Spannung ausbleibt, oder wenn der Druckknopf A nur für einen Augenblick geöffnet wird, fällt das Schütz ab und kann von selbst nicht wieder anziehen. Diese Schaltung hat den weiteren Vorzug, daß das Schütz sich wegen des vorgeschalteten Widerstandes weniger erwärmt. Eine andere Schaltung zeigt Abb. 398. Bei ihr liegt das Schütz S immer an voller Spannung. Durch Drücken des Druck-

knopfes E wird es eingeschaltet und fällt auch beim Loslassen desselben nicht wieder ab, weil der Druckknopf durch die inzwischen

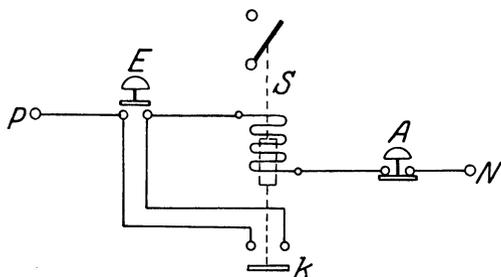


Abb. 398. Nullspannungsausschaltung mit Schütz.

geschlossenen Hilfskontakte k überbrückt ist. Bleibt aber die Spannung vorübergehend aus, so fällt das Schütz ab und kann erst wieder durch Drücken des Druckknopfes E angehoben werden.

**2. Die Überstromausschaltungen.** Der normale Überstromschutz der Niederspannungsmotoren ist

die *Abschmelzsicherung*, deren Konstruktion als Patronen- oder Streifen-sicherung bereits auf S. 239 besprochen wurde. Für die Bemessung der Sicherung ist die Normalstromstärke des Motors, die auf dem Leistungsschild verzeichnet ist, maßgebend. Man sollte den Motor möglichst nicht höher sichern, wobei jedoch beachtet werden muß, daß die Sicherungen eine höhere Stromstärke vertragen, als ihre Nennstromstärke angibt. Der Grenzstrom, welcher noch dauernd ertragen werden kann, ist gleich dem 1,25fachen der Nennstromstärke, so daß demnach die Motorsicherung mindestens gleich dem 0,8fachen des Motorstroms sein muß. Da aber der Anlauf des Motors je nach der Belastung und den zu beschleunigenden Massen einen erhöhtem Anlaufstrom erfordert, muß die Sicherung um so höher gewählt werden, je größer der Anlaufstrom und die Anlaufzeit ist. Um einen ungefähren Anhalt zu haben, wähle man die Nennstromstärke  $J_n$  jedenfalls größer, als sie sich aus der nachstehenden Beziehung errechnet:

$$I_n = I_a \cdot \frac{t}{5 + 1,25 \cdot t}$$

worin  $I_a$  die Anlaufstromstärke und  $t$  die Anlaufzeit in Sekunden ist. Bei großer Anlaßhäufigkeit und in warmen Räumen muß der Wert weiter erhöht werden. Bei den Motoren für aussetzenden Betrieb bleibt wegen der heftigen Anlaufstromstöße nichts übrig, als ziemlich reichlich zu sichern. Die Gefahr ist in diesem Falle aber nicht groß, weil diese Motoren unter ständiger Aufsicht stehen. Viel vorsichtiger und möglichst knapp müssen die ohne Aufsicht an abgelegenen Stellen laufenden Motoren gesichert werden.

Man Sorge auch dafür, daß die Motorsicherung stets *kleiner* ist, als die Sicherung der Zuleitung. Besondere Schwierigkeit hinsichtlich der Sicherung machen die Drehstrom-Kurzschlußmotoren, weil dieselben mit so hohem Strom anlaufen, daß an eine normale Sicherung nicht zu denken ist. Man kann in solchen Fällen zweistufige Schalter verwenden, bei welchen auf der ersten Stellung gar keine oder eine große Sicherung eingeschaltet ist, während auf der zweiten Stellung, der eigentlichen Betriebsstellung, eine knapp bemessene Sicherung

vor dem Motor liegt. Bei Stern-Dreiecksschaltern kann man es entsprechend machen.

Das Auswechseln einer durchgebrannten Sicherung erfordert stets eine gewisse Zeit, die immer dann unangenehm empfunden wird, wenn der ganze Betrieb auf höchste Ausnutzung eingestellt ist, und wenn die Ursache des Durchbrennens nur eine vorübergehende, ungefährliche Überlastung war. Bei Antrieben mit häufigen Überlastungen sieht man deshalb gern überhaupt von der Verwendung von Abschmelzsicherungen ab und sichert mit selbsttätig wirkenden Schaltern, den *Höchststromausschaltern* (Maximalausschaltern). Da ohnehin jeder Motor einen Hebelschalter haben muß, führt man diesen meistens gleich als Höchststromausschalter aus. Abb. 399 zeigt schematisch einen derartigen dreipoligen Schalter. Die in der Mitte gezeichnete Spule liegt an der Spannung der beiden äußeren Phasen und ihr Kern wirkt genau wie der in Abb. 395 auf eine Klinke. In den beiden äußeren Phasen liegt je eine vom Hauptstrom durchflossene Spule, welche bei zu hohem Strom den kleinen Eisenanker anhebt und damit den Strom der mittleren Auslösespule unterbricht. Der Schalter schaltet dann unter Federkraft aus. Durch mehr oder weniger starkes Anspannen einer Feder kann man die Stromstärke einstellen. Die Überstromauslösungen können auch in die durch Abb. 353 dargestellten Schaltkasten eingebaut werden.

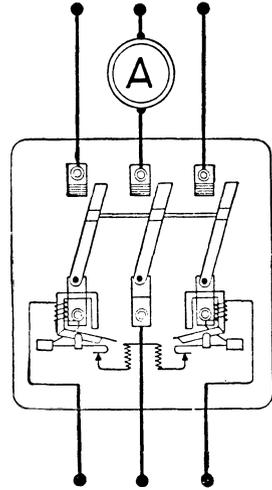


Abb. 399.  
Höchststromausschalter.

Bei größeren Motoren und bei Schützensteuerungen bedient man sich meistens einer Schützensauslösung nach Abb. 400. Dieselbe stimmt als

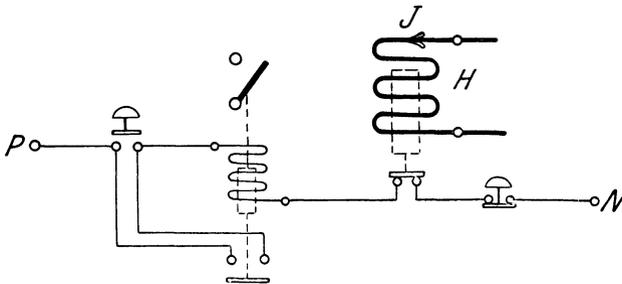


Abb. 400. Höchststrom- und Nullspannungsauslösung.

Nullspannungsauslösung vollständig mit Abb. 398 überein. Es ist jedoch in den Stromkreis noch ein Höchststromauslöser H gelegt, dessen Spule von dem Motorstrom I durchflossen ist und erst ihren Kern anzieht, wenn der Motor überlastet ist. Das Schütz kommt dann ebenso zum

Abfallen, wie beim Drücken des Haltedruckknopfs. Damit nicht kurze, ungefährliche Stromstöße eine Auslösung bewirken, kann der Auslöser mit einer einstellbaren Dämpfung versehen sein.

Unter dem Nennstrom versteht man diejenige Stromstärke, welche der Höchststromausschalter dauernd ohne unzulässige Erwärmung vertragen kann. Die kleinste Auslösestromstärke beträgt 140%, die größte 200% der Nennstromstärke. Bei der Auswahl des Ausschalters ist also sowohl die Nennstromstärke, als auch die Auslösestromstärke zu beachten. Zwischen 140 und 200% ist der Schalter einstellbar. Die Einstellung erfolgt im Betriebe, und zwar so niedrig wie die Stromstöße zulassen.

## L. Die Grenzschaltungen.

Bei zahlreichen elektromotorischen Antrieben würde das Überfahren eines bestimmten Zieles, das Überschreiten eines gewissen erzeugten Druckes oder auch einer Geschwindigkeit eine Gefahr für die Maschine bedeuten. Es ist in solchen Fällen ratsam, nicht allein der Aufmerksamkeit eines Führers zu vertrauen, sondern eine Grenzschaltung anzuordnen, welche den Motor selbsttätig im richtigen Augenblick stillsetzt. Wir unterscheiden *Hauptstromendschaltungen*, bei welchen ein Endschalter den Motorstrom unmittelbar unterbricht und *Hilfsstromendschaltungen*, bei denen der Endschalter lediglich den kleinen Spulenstrom eines Schützes unterbricht. Dieses Schütz schaltet dann erst den Motorstrom aus.

**1. Die Hauptstromendschaltung.** Um die Wirkungsweise dieser Schaltung an einem Beispiel zu erläutern, wollen wir uns das Hubwerk eines Kranes denken, bei welchem verhindert werden soll, daß durch Unachtsamkeit die Hakenflasche zu hoch gezogen wird. Wir ordnen in solchen Fällen in genügendem Abstand von der Höchststellung der Flasche einen kräftigen Schalter an, welcher in den Motorstromkreis eingeschaltet ist, und welcher von der hochgehenden Flasche noch rechtzeitig ausgeschaltet wird. Es ist klar, daß nach erfolgtem Ausschalten der Führer nicht in der Lage ist, den Motor wieder anlaufen zu lassen, und zwar auch nicht im Senksinne, was doch ungefährlich wäre. Es ist deshalb nötig dem Führer eine Möglichkeit zu geben, den geöffneten Endschalter zu überbrücken. Dies kann dadurch geschehen, daß wir einen Hand- oder Fußschalter anbringen, welcher aber so wirken muß, daß er sich von selbst öffnet, damit er nicht einmal aus Versehen dauernd die Endschaltung umgeht. Diese Lösung leidet an dem Übelstande, daß es nun dem Führer auch möglich ist, die Flasche noch höher zu ziehen, was doch gerade durch die Endschaltung vermieden werden sollte. Es wäre deshalb ratsamer einen Überbrückungsschalter anzuordnen, der sich nur dann schließen läßt, wenn der Steuerschalter auf „Senken“ gestellt ist. Durch eine mechanische Sperrung ließe sich dies ohne weiteres erreichen. Es ist jedoch ganz wesentlich einfacher, die notwendige Überbrückung des Endschalters im Steuerschalter selbst durch Anbringung eines weiteren Segmentes vorzunehmen. Abb. 401 zeigt diese Schaltung. Bei derselben ist nur

der untere Teil der Steuerschaltung von Abb. 425 dargestellt, allerdings um ein Segment mit zugehörigem Kontaktfinger vergrößert. Wenn der Steuerschalter auf „Heben“ steht, muß der von P kommende Strom über den Endschalter E fließen, um über den untersten Kontakt des Steuerschalters weiter zu können. Ein Öffnen des Endschalters bewirkt also eine Stillsetzung des Motors. Auf den Senkstellungen hingegen fließt der Strom, von P kommend, sofort zum Steuerschalter, also nicht über den Endschalter. Es ist demnach bei geöffnetem Endschalter zwar nicht möglich, weiter zu heben, wohl aber zu senken. Selbstverständlich muß der Endschalter so eingerichtet werden, daß er sich von selbst wieder schließt, sobald die Flasche abgesenkt wird.

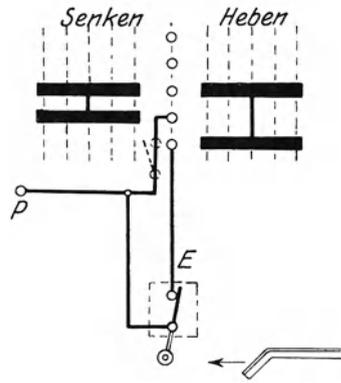


Abb. 401.  
Hauptstrom-Endschaltung.

Die beschriebene einseitig wirkende Endschaltung kommt hauptsächlich bei Kranhubwerken vor. Bei Fahrtrieben hingegen ist die

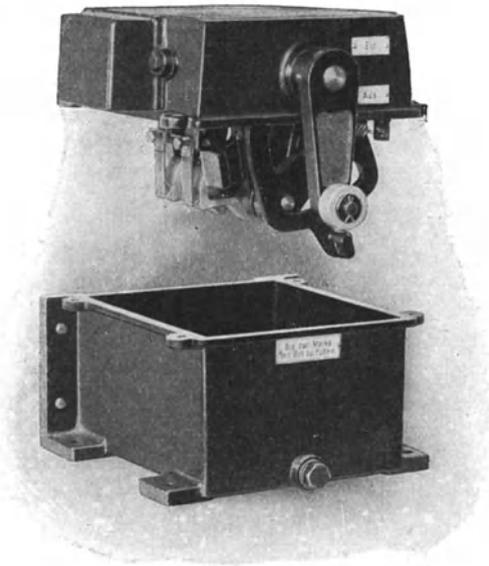


Abb. 402. Starkstrom-Endschalter.

doppelt wirkende Endschaltung üblich, welche die Bewegung in beiden Fahrtrichtungen begrenzt. Diese Grenzschaltung läßt sich leicht aus Abb. 401 dadurch ableiten, daß man, wie punktiert angedeutet, einen zweiten Endschalter einschaltet, welcher sich in der anderen

Grenzstellung öffnet. Sobald dieser geöffnet ist, kann nur in der entgegengesetzten Fahrtrichtung eingeschaltet werden.

Die Endschaltung eines *Drehstrommotors* unterscheidet sich von der gezeichneten nur dadurch, daß die Endschalter zweipolig sein müssen, weil zur Stillsetzung des Drehstrommotors doch mindestens zwei Zuleitungen unterbrochen werden müssen. Natürlich muß auch dann die Zahl der Segmente im Steuerschalter um zwei vermehrt werden.

Hauptstromendschaltungen sind für sehr große Leistungen nicht zu gebrauchen. Auch bei mittleren und kleinen Leistungen sind sie nur dann anwendbar, wenn die Ausschaltbewegung schnell und kräftig bewirkt werden kann und wenn sie nicht betriebsmäßig zur Stillsetzung benutzt wird. In mechanischer Hinsicht müssen Hauptstromendschalter besonders widerstandsfähig sein. Man bringt sie deshalb, wie Abb. 402 zeigt, meist in einem Gußeisenkasten unter. Sie müssen ferner so angeordnet werden, daß der den Rollenhebel bewegende Anschlag, auch wenn er sich über die Grenzstellung hinaus bewegen sollte, keine Zerstörung bewirken kann.

**2. Die Hilfsstromendschaltung.** Es ist nicht immer leicht, an der bewegten Maschine Hauptstromschalter sicher unterzubringen, auch

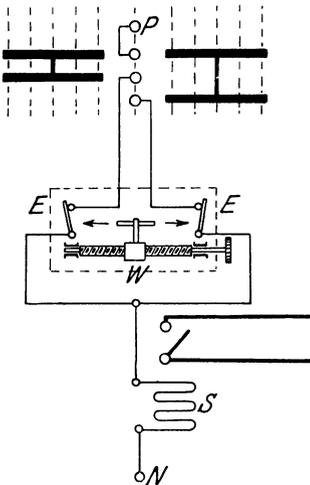


Abb. 403.

Hilfsstrom-Endschaltung.

würden diese Schalter sehr oft gänzlich unzugänglich sein. Ferner würden sie, wenn das Ausschalten betriebsmäßig oft vorkommt, sehr leiden. Man kuppelt deshalb häufig mit dem Triebwerk eine Spindel, welche nach Abb. 403 eine Wandermutter trägt. Die Übersetzung ist nun derart bestimmt, daß die Mutter gerade den Weg vom linken Schalter E bis zum rechten zurücklegt, während die Maschine (Aufzug oder dgl.) gerade einen ganzen Hub macht. Die Vorrichtung kopiert also die Bewegung der Maschine und kann zum Öffnen der Endschalter E benutzt werden. Die langsame, zögernde Bewegung der Wandermutter gestattet aber nicht, daß der große Motorstrom mittels dieser Endschalter unterbrochen wird, weil der am Schalter sich bildende starke Lichtbogen bei längerem Brennen die Kontakte verschmoren und auch zu einem ungenauen Anhalten Ver-

anlassung geben würde. Aus diesen Gründen läßt man die Endschalter einen Hilfsstrom, den kleinen Spulenstrom eines Schützes S unterbrechen, und erst dieses schaltet den Motorstrom aus. Damit auch bei dieser Hilfsstromendschaltung eine Rückwärtsfahrt nach erfolgter Endschaltung möglich ist, muß der Steuerschalter zwei zusätzliche Segmente erhalten, wie aus Abb. 403 hervorgeht. Dieselben können natürlich viel schmaler sein als die übrigen, weil nur ein schwacher Strom über sie fließt. Bei Drehstrom ist das Schütz zweipolig auszuführen, während die übrige Schaltung unverändert bleibt.

Bei allen Endsaltungen muß die Stromunterbrechung so früh eingestellt werden, daß auch bei dem größtmöglichen Nachlaufweg noch keine Gefahr droht. Diese Notwendigkeit wird bei manchen Antrieben aber als sehr lästig empfunden, weil oft gerade in allernächster Nähe der Endstelle gearbeitet werden soll. Um dies möglich zu machen führt die A.E.G. eine Sicherheitsschaltung aus, welche derart wirkt, daß nacheinander zwei Endschalter geöffnet werden, von denen der eine im Abstände des größten Nachlaufes, der andere in unmittelbarer Nähe der Endstelle angeordnet ist. Die Schaltung ist nun derart, daß der erste Endschalter nur dann wirksam ist, wenn der Steuerschalter noch ganz eingerückt ist. Wenn derselbe jedoch bereits in die ersten Stellungen zurückgedreht ist, so daß der Motor langsam läuft, kommt der zweite Endschalter kurz vor der Endstelle zur Wirkung (s. Schaltung 21 auf S. 442).

Die beschriebene Schaltung setzt voraus, daß einer Zurückstellung des Steuerschalters auf die ersten Stellungen auch eine entsprechende Verminderung der Drehzahl folgt. Dies trifft aber bei leerlaufendem oder schwach belastetem Motor nicht zu. Um dennoch volle Sicherheit zu haben, kann man die Schaltung derart abändern, daß man an die der Drehzahl proportionale Ankerspannung der Gleichstrommotoren ein Schütz legt, welches bei niedriger Umlaufzahl abfällt und damit den zuerst zu betätigenden Endschalter überbrückt. Beide Endschalter sind in diesem Falle einfach hintereinander geschaltet. Bei Drehstrom ist diese Schaltung nicht möglich. Man kann dann mit dem Motor einen Schleuderschalter kuppeln, welcher bei niedriger Drehzahl einen Schalter schließt, der den ersten Endschalter überbrückt.

Es ist noch zu erwähnen, daß die Hilfsstromendsaltungen, die mit einem mit dem Triebwerk gekuppelten Spindelendschalter arbeiten, nur für solche Antriebe geeignet sind, bei denen keine Entkuppelung möglich ist. Für ein Kranfahrwerk z. B. ist diese Endschaltung ungeeignet, weil durch ein Rutschen der Räder die Ausschaltung auf der einen Seite zu früh, auf der anderen Seite zu spät erfolgte. Aber auch bei Aufzügen, bei denen eine derartige Verschiebung nicht möglich ist, können durch Längung des Seiles Verschiebungen entstehen, die zeitweise zu korrigieren sind. Die Konstruktion des Spindelendschalters muß demgemäß so sein, daß derartige Einstellungen leicht vorgenommen werden können.

Außer den beschriebenen Endsaltungen zur Begrenzung einer Fahrstrecke gibt es noch zahlreiche andere Grenzsaltungen, welchen sehr oft nicht nur die Aufgabe zufällt, den Motor nach Erreichung eines bestimmten Zieles abzuschalten, sondern auch bei Bedarf wieder selbsttätig einzuschalten. Eine elektrisch angetriebene Pumpe soll z. B. ohne besondere Wartung einen Behälter dauernd gefüllt halten. Mittels eines Schwimmers läßt sich erreichen, daß bei einem höchsten Wasserstand der Motor aus- und bei einem gewissen Tiefstand wieder eingeschaltet wird. Bei ganz kleinen Motoren bis etwa 0,5 kW ist die Lösung dieser Aufgabe nicht schwer, weil dieselben ohne Anlasser eingeschaltet werden können. Größere Motoren verlangen jedoch Anlasser, die bei Leistungen bis etwa 5 kW durch einen Schwimmer oder bei Wasser-Akkumulatoren durch das Belastungsgewicht bewegt werden. Die

Einrichtung ist im allgemeinen so, daß der mit Gewichten belastete Anlasserhebel in der Grenzlage durch den Schwimmer oder dgl. angehoben und gekippt wird. Nach der Kippung vollführt derselbe von einer Dämpfung geregelt, mit passend eingestellter Geschwindigkeit die Anlaßbewegung. Bei Kompressoren und ähnlichen Maschinen muß die Schaltbewegung von einem den Luftdruck messenden Manometer abgeleitet werden. Der Bau dieser Instrumente erlaubt jedoch höchstens, dieselben zum Öffnen und Schließen leichter Kontakte zu benutzen, wobei mit Rücksicht auf die schleichende Bewegung nur ganz geringe Stromstärken unterbrochen werden können. Mittels eines Kontakt-Manometers kann also nicht der Motorstrom geschaltet werden, sondern es ist auch schon bei kleinen Leistungen die Einfügung eines Schützes erforderlich, wie wir dies bei den Hilfsstromschaltungen kennengelernt haben. Aufgabe 23 auf S. 443 zeigt eine derartige Schaltung für kleine Motorleistungen. Größere Motoren erfordern einen Selbstanlasser, bei ihnen erlaubt das Kontakt-Manometer zuweilen nicht einmal mehr die sichere Schaltung der Hilfsströme des Selbstanlассers oder des Schützes, so daß die Zwischenfügung eines weiteren kleinen Schützes notwendig wird. In diesem Falle schaltet das Manometer also den Spulenstrom eines kleinen Hilfsschützes, und dieses erst schaltet den Spulenstrom des Hauptschützes oder des Selbstanlассers.

Zu den Grenzsaltungen gehören auch die Schaltungen, durch welche ein Motor nach Erreichung einer bestimmten Geschwindigkeit ab- oder umgeschaltet wird. Ein Beispiel derselben haben wir bereits auf S. 203 kennengelernt.

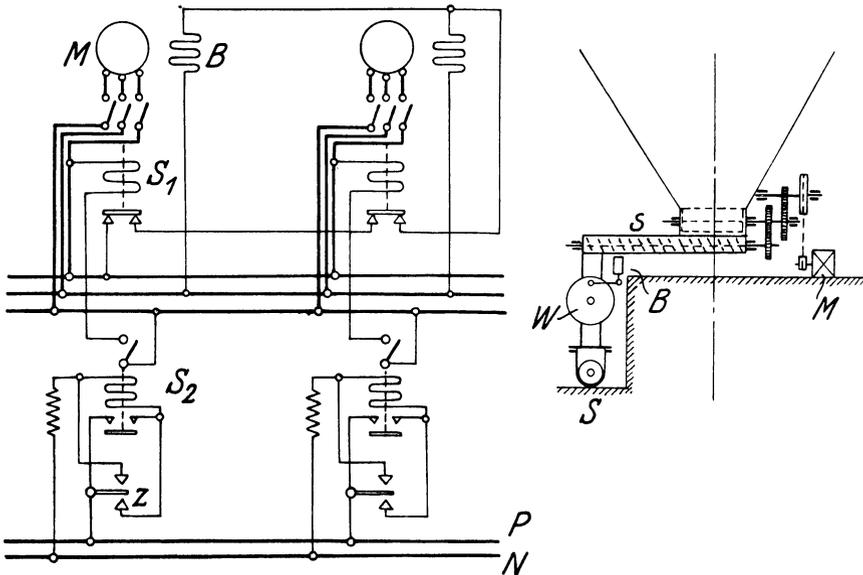


Abb. 404.

**Beispiel:** In einer Tonerdefabrik muß fein gemahlene Tonerde, Kalk, Sulfat und Kohle in ganz bestimmtem Verhältnis miteinander gemischt werden. Die vier

Stoffe befinden sich in getrennten Silos, aus denen sie nach Abb. 404 mittels elektrisch angetriebener Speisewalze und Schnecke  $s$  entnommen und einer selbsttätigen Wage  $W$  zugeführt werden. Jede Wage ist auf ein ganz bestimmtes Gewicht eingestellt und nach Füllung kippt sie das Material in die untere Transportschnecke  $S$ . Es soll eine elektrische Einrichtung geschaffen werden, welche die vier Stoffe selbsttätig im richtigen Verhältnis mischt.

Die Lösung wird am einfachsten und genauesten, wenn man die vier Wagen auf Gewichte einstellt, die dem Mischungsverhältnis entsprechen und dafür sorgt, daß dieselben immer nur gleichzeitig auskippen können. Die Wagen werden also aufeinander warten müssen und so lange muß auch die Speisung aussetzen. Der Antriebsmotor der Speisewalze hat kaum mehr als 3 kW Leistung und wird unter Annahme von 500 V Drehstrom als Kurzschlußmotor ausgeführt. Er kann mittels dreipoligen Schützes geschaltet werden. Es liegt nun nahe, den Spulenstrom der Schütze durch einen Kontakt an der einspielenden Wagenzunge zu schalten. Dies geht aber schlecht, weil diese Kontakte nur ganz leicht sein dürfen und auch, weil man an der Wage nicht gern die gefährliche Spannung von 500 V haben möchte. Es ist deshalb ein Zwischenschütz nötig, dessen Spule von dem Zungenkontakt  $z$  geschaltet wird, und dessen Schalter den Spulenstrom des Motorschützes  $S_1$  schaltet. Das Hilfsschütz erhält am besten seinen Strom aus einer kleinen Batterie von 10 bis 20 Volt, oder man ordnet einen kleinen Transformator an. In Abb. 404 ist die Schaltung nur für zwei Wagen gezeichnet. Sobald dieselben ausgekippt haben, ist der untere Kontakt von  $z$  geschlossen und das Hilfsschütz  $S_2$  schaltet das Motorschütz  $S_1$  ein. Dasselbe geschieht bei den anderen Wagen. Sobald genügend Material eingelaufen ist, spielt die Wage ein und schließt mit dem oberen Zungenkontakt  $z$  die Schützenspule  $S_2$  kurz, so daß dieses Schütz und damit auch  $S_1$  abfällt. Die Speisung der Wage hört jetzt auf. Sind alle vier Wagen gefüllt, so ist der Stromkreis, welcher über die unteren Hilfskontakte von  $S_1$  geführt ist, geschlossen und die kleinen Zugmagnete  $B$  bekommen Spannung und lassen die Wagen auskippen.

### M. Die Leitungen und Hilfsapparate.

Von den Leitungsarten, welche von den Beleuchtungsanlagen her bekannt sind, kommen für den Anschluß von Motoren hauptsächlich nur die *Gummiaderleitungen* und die *Bleikabel* in Frage. Eine weitere häufig verlegte Leitungsart ist die *Panzerader*. Es ist dies weiter nichts als eine Gummiaderleitung, welche als mechanischen Schutz eine engmaschige Umklöppelung aus dünnen Eisendrähten trägt. Für Innenräume können Gummiadern oder Panzeradern gewählt werden, für Außenräume hauptsächlich nur Bleikabel, ebenso auch für nasse Innenräume. Meistens ist eine Eisenbandbewehrung der Bleikabel erforderlich. Da eisenbandbewehrte Kabel sehr steif sind, verwendet man zuweilen auch Bleikabel mit einer Eisendrahtumklöppelung, sog. *Panzerbleikabel*, dieselben sind jedoch weniger widerstandsfähig. Im allgemeinen werden bis zu einem Querschnitt von 16 mm<sup>2</sup> die Leiter eindrätig gewählt und der Anschluß durch Biegen einer Öse hergestellt. Darüber hinaus kommen mehrdrätige Leiter in Frage, deren Anschlußenden mit einem Kabelschuh versehen werden müssen.

**Die Bemessung der Leitungen.** Auch hier gelten die gleichen Grundsätze, die wir bei den Verteilungs- und Lichtleitungen aufgestellt haben: Die Leitungen dürfen nicht höher belastet werden, als die Tabelle auf S. 228 zuläßt und der Spannungsverlust (Energieverlust) muß in zulässigen Grenzen bleiben. Besonders bei Drehstrommotoren und Gleichstrom-Nebenschlußmotoren müssen wir versuchen, den Spannungsabfall so niedrig als möglich zu halten, weil bei ersterem das Drehmoment

mit dem Quadrate der Spannung sinkt und weil bei letzterem auch durch die geringere Spannung das Feld geschwächt wird. Der Rechnungsgang ist der gleiche, wie wir ihn bei den Verteilungsleitungen kennengelernt haben. Bei kurzen Leitungslängen an den Maschinen ist es unnötig, auf Spannungsabfall nachzurechnen, man kann dann den Querschnitt nach der Tabelle auf S. 228 festlegen. Bei aussetzendem Betrieb ist es zulässig, die Leitungen kurzzeitig höher, als die Tabelle angibt, zu belasten. Die effektive Belastbarkeit ergibt sich dann genau wie die effektive Leistung bei aussetzendem Betrieb dadurch, daß man das Stromquadrat bildet, den Mittelwert während eines Arbeitsspiels sucht und die Quadratwurzel daraus zieht.

**Die Hilfsapparate.** Jeder Motor muß allpolig abschaltbar sein und muß einen Überstromschutz (Sicherung) haben. Als Schalter dienen

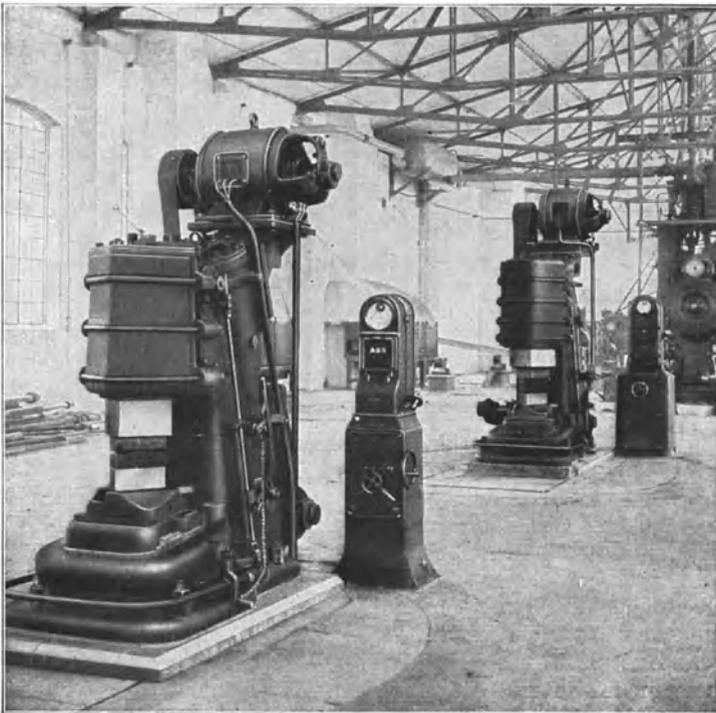


Abb. 405. Antrieb von Schmiedehämmern (mit Schaltsäulen).

bis zu Spannungen von 500 V meistens Hebel-Luftschalter. Diese können zusammen mit den erforderlichen Sicherungen auf eine Marmortafel gesetzt werden. Die Größe der Hebelschalter sollte man nicht nur nach der Motorstromstärke aussuchen, sondern auch nach ihrer mechanischen Widerstandsfähigkeit, weil kleinere Schalter in dieser Hinsicht nie

befriedigen. Man tut gut, keinen Hebelschalter unter 60 A zu verwenden. Motorschalttafeln haben jedoch den Nachteil, daß sie in feuchten und staubigen Räumen schnell derart verschmutzen, daß der Betrieb gefährdet ist. Sie sind ferner für eine Bedienung durch ungeschulte Leute durchaus ungeeignet. Aus diesen Gründen zieht man heute in solchen Fällen immer den eisengekapselten Schaltkasten, den wir bereits früher beschrieben haben, vor (s. Abb. 353). In ihm sind Schalter und Sicherungen, gegebenenfalls auch noch ein Strommesser gut gegen Verschmutzung und Berührung abgeschlossen. Zuweilen wird auch noch der Anlasser mit dem Schaltkasten zu einer Schaltsäule zusammengebaut, wie dies Abb. 405 darstellt. Solche Schaltsäulen können neben dem Motor oder in der Nähe an der Wand aufgestellt werden. Auch Steckvorrichtungen zum Anschluß beweglicher Motoren werden gebraucht. Bei Spannungen über 250 V muß der Stecker mit einem Schalter versehen sein, der derart verriegelt ist, daß der Stecker nur im ausgeschalteten Zustand herausgezogen werden kann. Als Steckerleitungen dienen bewegliche, vieldräftige Leitungen, welche einen besonderen mechanischen Schutz haben müssen. Als solcher dient entweder eine starke Kordelumklöppelung oder auch ein Spiraldraht, der möglichst gut zu erden ist.

## N. Die Legung der Leitungen.

Das früher über die Legung von Leitungen Gesagte gilt auch hier. Gummiaderleitungen können entweder offen auf Rollen gelegt oder in Rohre eingezogen werden. Die offene Verlegung ist die billigere, jedoch ist nicht zu vergessen, daß in Handbereich alle Leitungen dennoch durch Abdeckungen oder Rohre zu schützen sind. Man zieht deshalb überall, wo Beschädigungen der Leitungen möglich erscheinen, die Legung in Rohre vor, und zwar hauptsächlich in Stahlpanzerrohre, weil diese allein eine genügende Festigkeit besitzen und ferner einen dichten Abschluß gegen Staub und Feuchtigkeit gestatten. An solchen Stellen, wo eine Legung der Leitungen in den Boden nicht zu vermeiden ist, oder wo große Nässe herrscht, ist die Verwendung von Bleikabeln, insbesondere der eisenbandbewehrten Bleikabel angebracht. Die verschiedenen Legungsarten sind früher beschrieben worden. Zuweilen sind an den Maschinen selbst außer den Zuleitungen noch zahlreiche weitere Leitungen zu legen. Dieselben können als Bleikabel gelegt werden, es ist aber zu beachten, daß dieselben keine stärkeren Krümmungen vertragen, was an Maschinen nicht immer durchführbar ist. Aus diesem Grunde werden häufiger Stahlpanzerrohre gewählt oder wenn es sich um sehr viele Leitungen mit zahlreichen Krümmungen handelt, Panzeradern (z. B. bei Hebezeugen). Dieselben werden wie Rohre mit Schellen direkt auf dem Eisen befestigt und verursachen deshalb geringe Kosten. Ihre mechanische Widerstandsfähigkeit reicht jedoch an stärker gefährdeten Stellen nicht aus, so daß dort eine besondere Abdeckung erforderlich ist. In feuchten Räumen sind Panzeradern ungeeignet. Bei allen Leitungen mit Eisenbewehrung müssen bei Wechselstrom Hin- und Rückleitung, bei Drehstrom alle drei zusammengehörenden

Leiter in gemeinsamer Umhüllung liegen. Bei den Verbindungsleitungen zwischen Stern-Dreieckschalter und Motor ist besonders acht zu geben, daß die richtigen drei Leitungen zusammengelegt werden (drei Hinleitungen zusammen und drei Rückleitungen zusammen). Einige

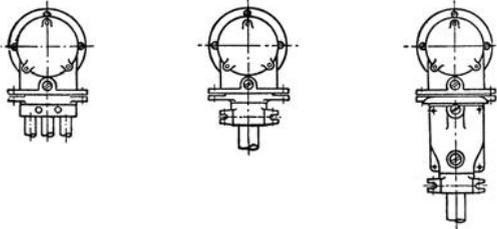


Abb. 406. Motor-Anschlußstutzen.

Schwierigkeit bereitet zuweilen der richtige Anschluß am Motor. Bei demselben darf es weder möglich sein, Spannung führende Teile zu berühren, noch dürfen die Leitungen ungeschützt sein, ganz besonders nicht bei Spannungen über 250 V. Wenn

der Motor feststeht, läßt sich Stahlpanzerrohr leicht bis unter die Schutzkappe führen, die an den meisten normalen Motoren die Klemmen überdeckt. Nötigenfalls ist durch eine weitere Blechkappe der Schutz zu verbessern. Bei Kabeln läßt man am besten nach Abb. 406 den Motor mit einem Stutzen ausrüsten, an

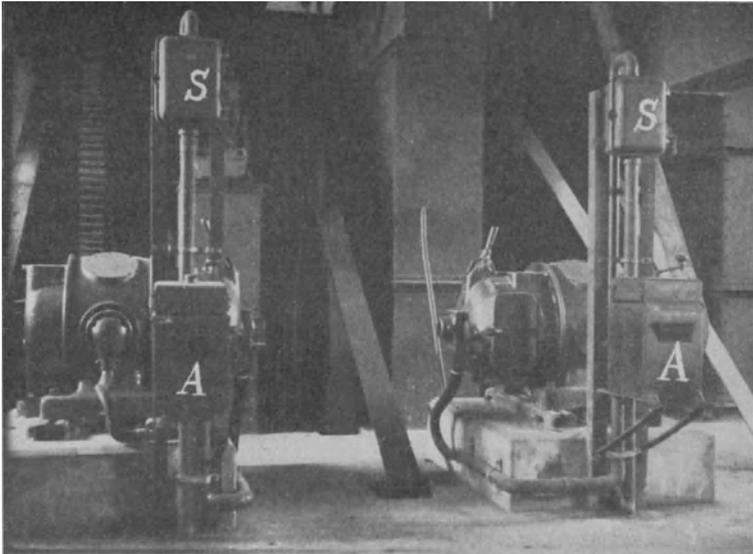


Abb. 407. Installation zweier Becherwerkmotoren in Stahlpanzerrohr.

dem der Endverschluß, wie rechts dargestellt, befestigt werden kann. Diese Ausführung ist auch bei Hochspannung zu empfehlen. Fehlt der Stutzen, so ist der Endverschluß und der Anschluß mit einem kräftigen, nicht zu engen Blechkasten zu umbauen. Bei Motoren, welche auf Gleitschienen verschiebbar sind, kann der Kabelanschluß in gleicher Weise ausgeführt werden; das Kabel muß aber vor dem Anschluß einen recht

großen Bogen machen, damit es hinreichende Beweglichkeit besitzt. Bei stärkeren Kabeln gestattet dies allerdings der Raum oft nicht, und es ist zu empfehlen, größere Hochspannungsmotoren überhaupt

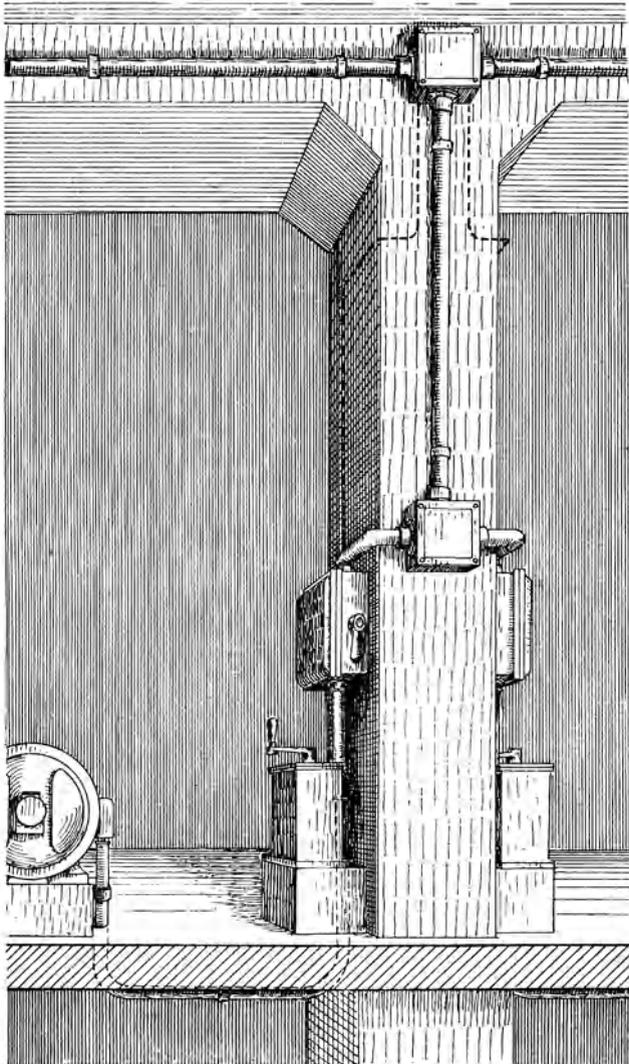


Abb. 408. Motorinstallation in Stahlpanzerrohr.

nicht beweglich aufzustellen. Bei Verwendung von Stahlpanzerrohren kann man die Verbindung zum Motor durch einen beweglichen Metallschlauch herstellen, wie Abb. 407 darstellt. Dieses Bild zeigt uns die Installation zweier Becherwerksmotoren. Die Zuleitung kommt von

der im unteren Stockwerk gelegenen Verteilung, geht in Stahlpanzerrohr durch die Decke und zum Schaltkasten S, welcher Schalter und Sicherungen enthält. Von hier aus geht die Leitung durch Rohr und Schlauch zu dem am linken Motor sichtbaren Stutzen für die Ständereinführung. Die Verbindung zwischen Läufer und Anlasser A ist besonders am rechten Motor sichtbar. Allgemein ist hier noch zu bemerken: Schalter und Anlasser sind immer nahe am Motor aufzustellen. Ist in einigen Metern Entfernung eine Wand, oder kann die Maschine selbst benutzt werden, so bringe man dort diese Apparate an, weil sich die Anlage billiger ergibt. Alle Teile müssen abnehmbar sein, ohne daß andere

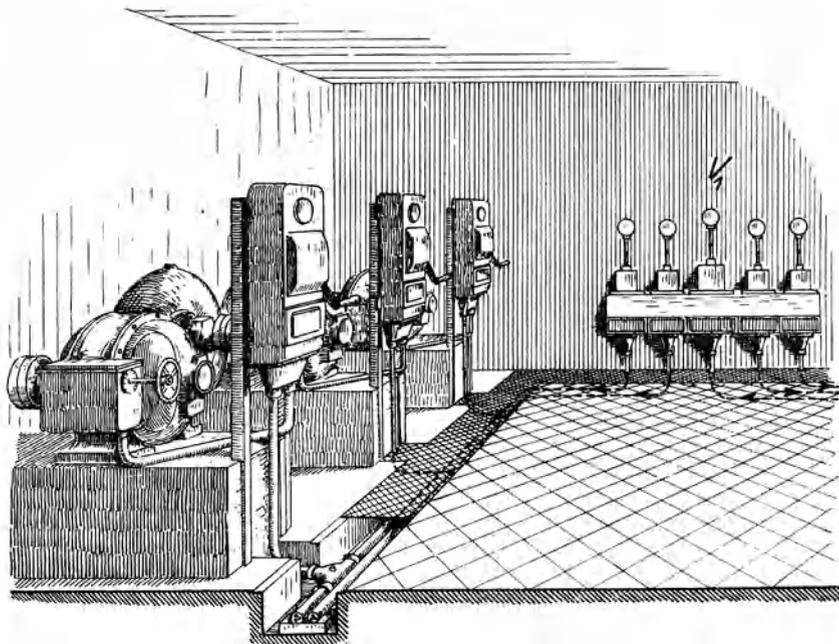


Abb. 409. Motorinstallation mit Kabeln.

Teile mitentfernt werden müssen. Die Füße der Motoren und Anlasser dürfen nicht einzementiert werden.

Das von der Verteilungsstelle kommende Kabel zweigt bekanntlich im allgemeinen nach verschiedenen Motoren ab. Sämtliche Abzweige müssen dann nach den Vorschriften entweder den Querschnitt des Hauptkabels haben, oder das Hauptkabel ist nach dem kleinsten vorkommenden Abzweig zu sichern, wenn derselbe ungesichert bleiben soll. Beides bereitet oft Schwierigkeiten. Wenn von einem starken Hauptkabel ebenso starke Abzweige nach einem kleinen Motor gehen, so kann man die starke Leitung wegen ihrer Dicke oft nicht einführen, und es bleibt nichts anderes übrig, als den Abzweig schwächer auszuführen. Eine Sicherung des Hauptkabels nach diesem schwächeren Abzweig geht aber mit Rücksicht auf die übrigen angeschlossenen Motoren meistens nicht, so daß nichts übrig bliebe, als Sicherungen an dem Abzweig anzuordnen. Nun sind aber derartige außer der Regel angeordnete Sicherungen für den Betrieb höchst unerwünscht, weshalb man meist, entgegen der Vorschrift, noch Abzweige von einigen Metern Länge schwächer und ohne Sicherungen ausführt.

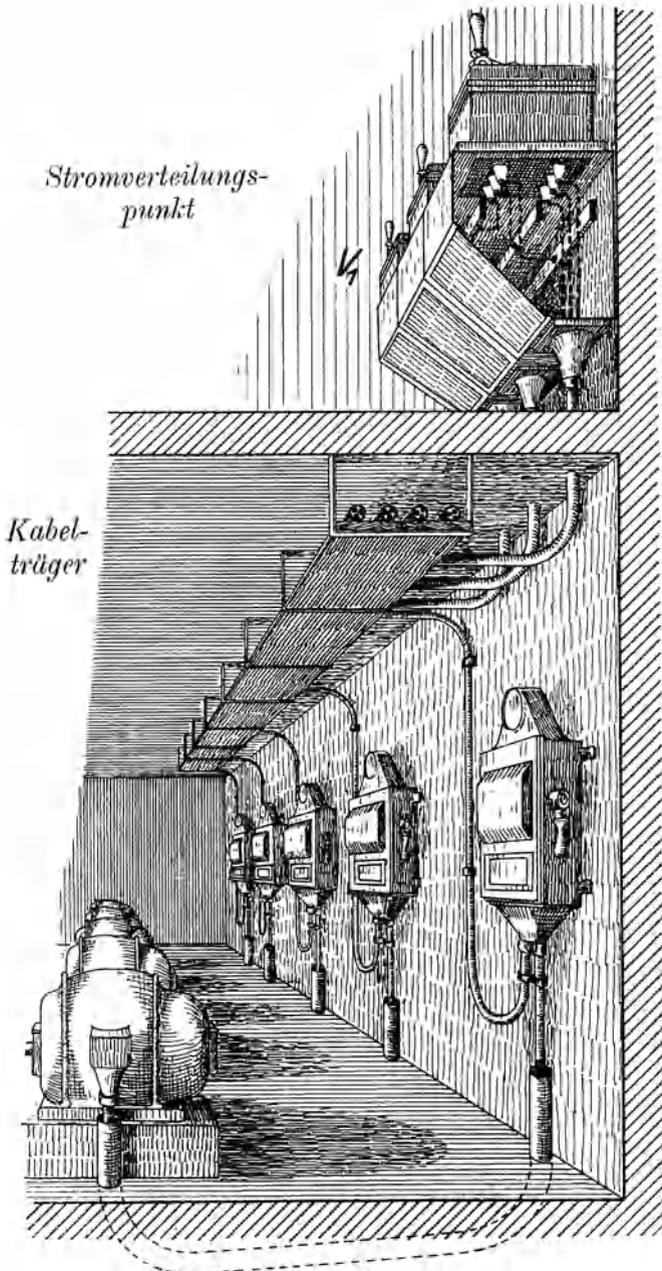


Abb. 410. Kabelanschluß einer Anzahl Kurzschlußmotoren.

Wir wollen nun an Hand von Skizzen einige Motor-Leitungsanlagen betrachten: In Abb. 408 geht die Hauptverteilungsleitung in Stahlpanzerrohr längs eines Unterzuges, und von ihr zweigt eine Leitung nach unten ab. In einem weiteren Abzweigkasten teilt sich die Leitung nach den Schaltkasten der links und rechts aufgestellten beiden Motoren. Alle Abzweige dürfen nur in Abzweigkasten hergestellt werden, die sehr

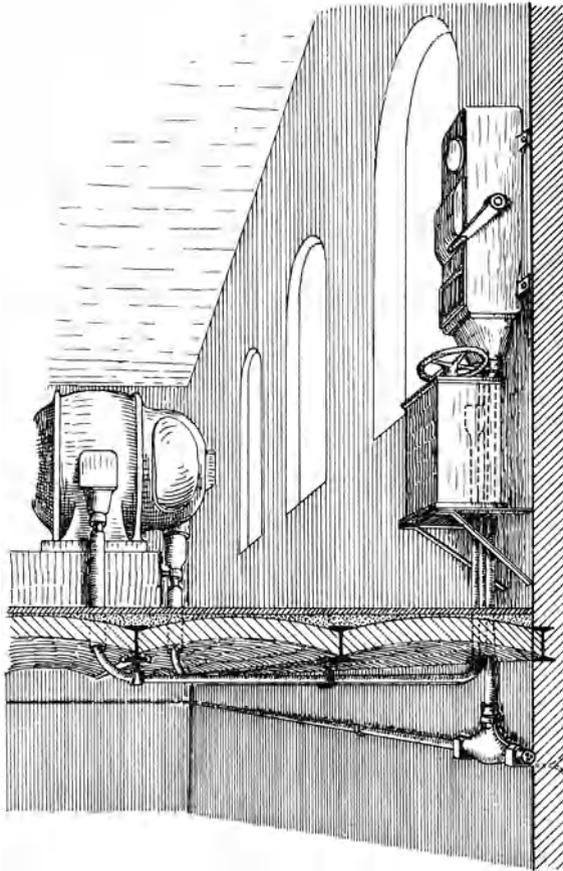


Abb. 411. Anschluß eines Motors an ein Kabel.

viel größer als bei Lichanlagen zu bemessen sind, und die reichlich große Abzweigklemmen besitzen müssen. Damit der Gang zwischen Anlasser und Motor frei bleibt, sind die Leitungen durch die Decke geführt. In feuchten Räumen könnte sich in diesen Rohren ein Wassersack bilden, so daß es in diesem Falle besser wäre Bleikabel zu verwenden. Wenn der Pfeiler nicht hoch ist, läßt sich übrigens der untere Abzweigkasten ersparen, indem man beide Motoranschlüsse, wie punktiert gezeichnet, von oben herab holt. Eine Kabelleitungsanlage ist durch

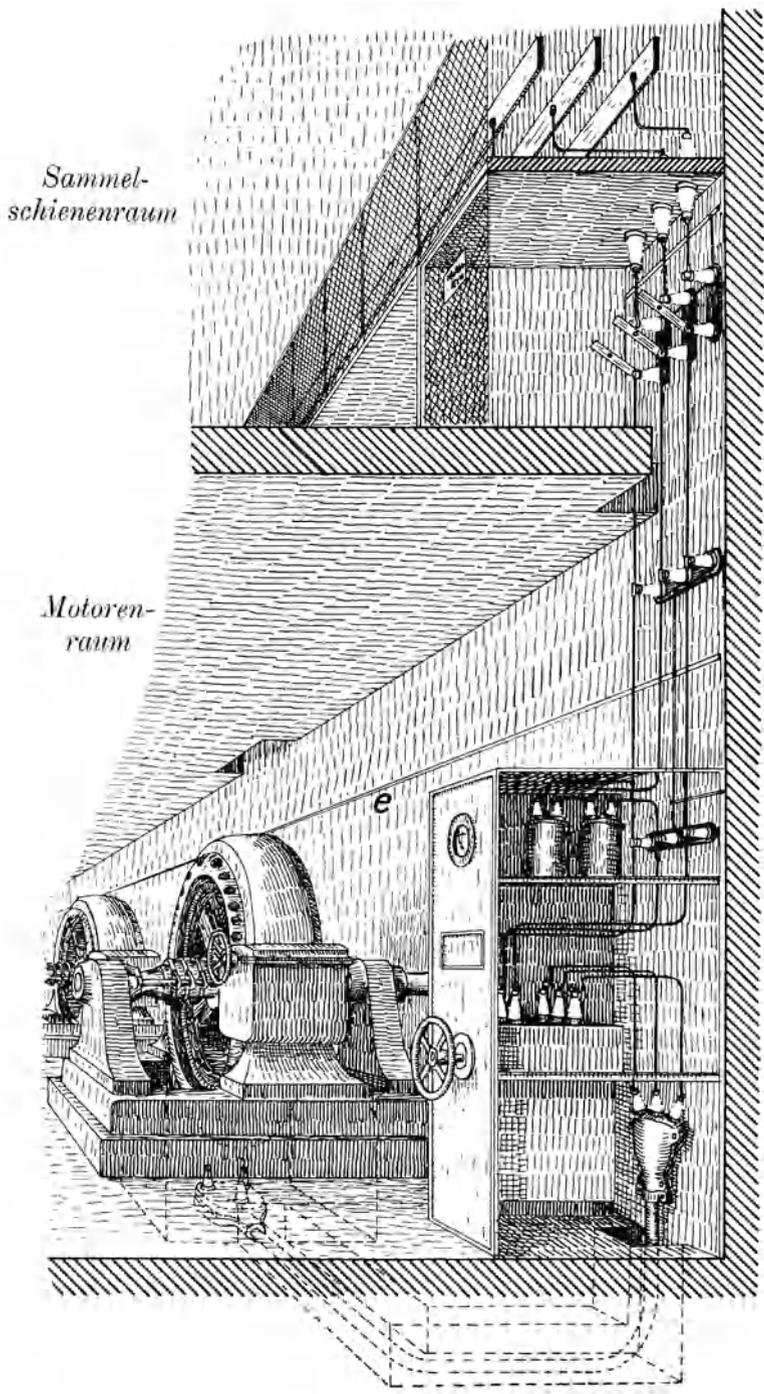


Abb. 412. Anschluß einiger Hochspannungsmotoren (Schaltschrank geöffnet).

Abb. 409 dargestellt.  $V_1$  ist die Verteilung, welche nach dem Schema Abb. 314 den Strom nach den einzelnen Motorengruppen verteilt. Die Kabel liegen nebst den Abzweigmuffen in einem zementierten und abgedeckten Kanal. Die Anlasser sind an die Motoren angebaut und die Schaltkasten werden wieder von Winkeleisenstützen getragen. Eine andere Kabelanlage stellt Abb. 410 dar. Bei ihr sind die Hauptkabel unter der Decke verlegt worden, weil unten wenig Platz vorhanden ist. In dem oberen Stockwerk befindet sich die Verteilung  $V_1$ . Eine andere Anlage, bei welcher von einem an der Wand verlegten Kabel nach oben abzweigt wird, zeigt Abb. 411. Abb. 412 zeigt schließlich noch eine Reihe von Hochspannungsmotoren, die in einem getrennten, sauberen Raum aufgestellt sind und ihre Arbeitsmaschinen durch die Wand hindurch antreiben. Die Motoren haben angebaute Anlasser und neben einem jeden steht ein Schaltschrank, welcher einen Ölschalter, einen Strom- und Spannungswandler sowie Meßinstrumente und Zähler enthält. Die Stromzuleitung geschieht in offener Verlegung auf Isolatoren von den im oberen Stockwerk befindlichen Sammelschienen aus, die nur zur Stromverteilung dieser Motorenreihe da sind. Jeder Schaltschrank kann durch die oberen Trennmesser abgetrennt werden. Die Verbindung zum Motor ist durch ein Stück Kabel hergestellt worden. Würde es sich um die Aufstellung eines einzelnen Hochspannungsmotors handeln, so würde man von der Transformatorstation ein Kabel zu dem Schaltschrank des Motors führen. Den Ölschalter des Motors wird man natürlich mit Nullspannungs- und Höchststromauslösung versehen. Ein solcher Raum mit offen verlegten Hochspannungsleitungen gilt natürlich als elektrischer Betriebsraum und muß ungerufenen Personen verschlossen bleiben.

Besondere Beachtung verdient noch die Erdung aller metallischen Konstruktionsteile, wenn die Spannung 250 V übersteigt (Hochspannung). Man verlegt parallel zur Stromleitung eine Erdungsleitung, meist aus schwachem Flacheisen, an welche man alle Motorgehäuse, alle Schaltkasten, Anlasser usw. gut anschließt. In Abb. 412 stellt e die Erdleitung dar. Sind die Apparate und Motoren auf einer Eisenkonstruktion befestigt, wie es bei einem Laufkran der Fall ist, so braucht man natürlich keine Erdleitung, es ist aber sehr darauf zu achten, daß die Kranschienen geerdet sind. Überhaupt hat man sich stets, wenn man Eisenkonstruktionen u. dgl. als Erde benutzt, zu überzeugen, daß dieselben auch wirklich gut mit der Erde in leitender Verbindung stehen.

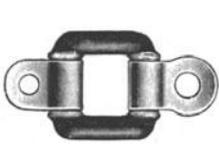
## O. Die Stromzufuhr bewegter Maschinen.

Wenn wir zuerst die gradlinig bewegte Maschine betrachten, so haben wir verschiedene Fälle zu unterscheiden: Eine häufige Bewegung um große Strecken, wie es bei allen Fahrzeugen die Regel ist, dann eine häufige Bewegung um ganz kurze Strecken und zuletzt eine seltene Bewegung um kleine und mittlere Strecken. In dem ersteren Falle ist die Legung einer Schleifleitung nicht zu vermeiden. Man unterscheidet lose und fest verlegte Schleifleitungen. Bei den ersteren ist der Schleifdraht nur an seinen beiden Enden befestigt und stellt allein durch sein

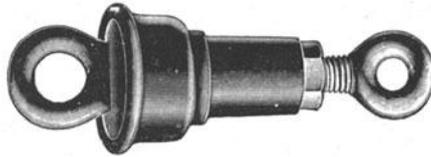
Gewicht den guten Kontakt zwischen Draht und Stromabnehmer her. Damit bei größeren Entfernungen der Drahtdurchhang nicht zu groß ist, sind in Abständen von 8—10 m isolierte Drahtstützen erforderlich. Abb. 413 zeigt zwei Leitungsstützen, eine für geringe und die andere für größere Leiterabstände. Die Schleifdrahtbefestigung am Ende muß isoliert und nachspannbar sein. Zur Isolation können Wirbel- oder Schnallenisolatoren nach Abb. 414 dienen, zum Nachspannen besondere Spannhaken oder auch die Wirbelisolatoren. Als Stromabnehmer kommen Schleifstromabnehmer und Rollenstromabnehmer in Frage. Abb. 415 stellt einen Schleifstromabnehmer für geringe Leiterentfernung, Abb. 416 einen Rollenstromabnehmer für größere Leiterentfernung dar. Bei den fest verlegten Schleifleitungen, wie sie bei Straßenbahnen üblich sind, wird der Draht oder eine Schiene in kürzeren Abständen von Drahtaltern gehalten, so daß er eine ziemlich starre Linie bildet. Die Speisung der festen Leitung ist an jedem Drahtalter möglich, während sie bei der losen Schleifleitung nur an den Enden erfolgen kann. Der Stromabnehmer für feste Schleifleitungen muß zur Erzielung eines guten Kontaktes an den Draht angedrückt



Abb. 413. Leitungsstützen.



Schnallenisolator



Wirbelisolator

Abb. 414.

werden. Dies geschieht durch eine Feder. Gewichte vermeidet man, weil sie zu schwingenden Bewegungen Veranlassung geben. Abb. 417 stellt einen Rollenstromabnehmer dar. Auch Schleifbügel werden viel-

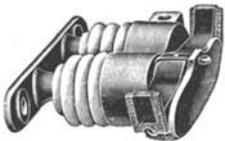


Abb. 415. Schleifstromabnehmer.

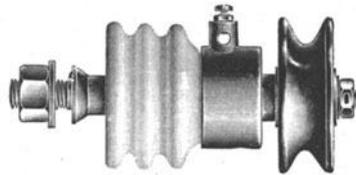


Abb. 416. Rollenstromabnehmer.

fach verwandt, bei denen man neuerdings mit Vorteil Schleifstücke aus Kohle verwendet. Schleifleitungen unter 5 mm  $\varnothing$  sind mit Rücksicht auf den Verschleiß und vorkommende Brandstellen unzulässig. Lose Leitungen über 10 (höchstens 12) mm  $\varnothing$  verbieten sich wegen der großen

Steifigkeit. In neuerer Zeit verwendet man mit gutem Erfolg auch Grubenschienen für die Stromzuleitung.

Auch bei ganz kurzen Bewegungen ist die Verwendung von Schleifdrähten oder Schienen natürlich möglich, jedoch zieht man in solchen Fällen häufig eine Leitungsschere nach Abb. 418 vor, weil bei ihr alle unsicheren Kontakte vermieden sind. Für selten bewegte Maschinen kommt als Stromzuführung das bewegliche Kabel in Frage. Dasselbe kann, wenn die Maschine ihren Standpunkt stunden- oder tagelang beibehält, an längs der Bahn verteilten Steckdosen gestöpselt werden, oder wenn die Bewegung öfter notwendig ist, rollt man es auf eine Kabel-

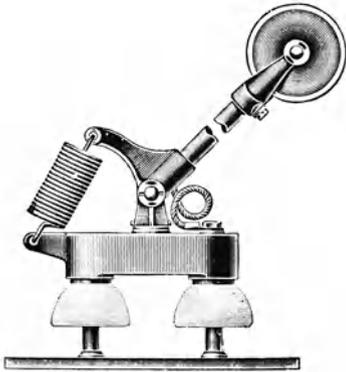


Abb. 417. Rollenstromabnehmer für feste Leitungen.

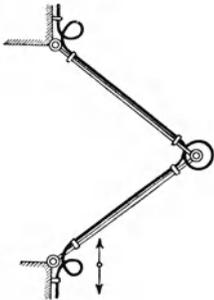


Abb. 418. Leitungsschere.

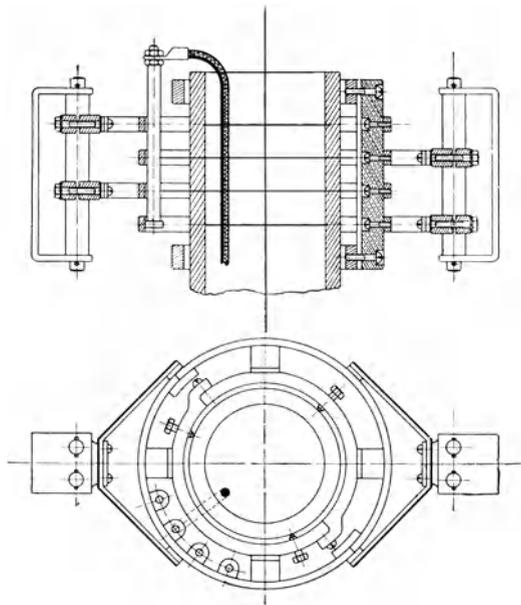


Abb. 419. Schleifringkörper mit Bürsten.

trommel auf. Letztere kann mittels Gewichten oder durch einen dauernd eingeschalteten kleinen Motor das Kabel stets gespannt halten, so daß Beschädigungen durch Überfahren vermieden werden. Derartige Stromzuführungen findet man oft bei Verladekränen, die ihren Standort nur wenig und selten zu ändern brauchen.

Um einer drehenden Maschine den Strom zuzuführen, braucht man ebenso wie bei Maschinen und Motoren Schleifringe. Abb. 419 zeigt einen Schleifringkörper mit vier Schleifringen und Stromabnehmern. Bei manchen Maschinen, insbesondere Drehkränen ohne Zapfenführung, muß der Schleifringkörper eine gewisse Beweglichkeit gegenüber den Bürsten besitzen.

## XII. Wichtige elektrische Antriebe.

### A. Der elektrische Antrieb von Hebezeugen.

1. Die Krane. Die ersten elektrischen Krane unterschieden sich nicht sehr von den bis dahin mechanisch angetriebenen. Sie hatten einen einzigen Motor (weshalb sie auch Einmotorenkrane genannt wurden), der auf eine Welle mit mehreren ausrückbaren Kupplungen arbeitete. Mit diesen Kupplungen wurden dann die verschiedenen Bewegungen, wie Heben, Kranfahren und Katzfahren eingerückt. Es ist klar, daß der dauernd laufende Motor während der unvermeidlichen Pausen unnötig Energie verzehrt, und fernerhin leidet die dauernd laufende Kupplungswelle unter einem großen Verschleiß. Man ging deshalb bald zu den Drei- und Mehrmotorenkranen über, bei denen jede Bewegung ihren eigenen Motor hat, der umkehrbar ist und nur dann eingeschaltet wird, wenn der Motor wirklich arbeitet. Diese Motoren müssen nicht nur unter voller Last anlaufen, sondern wie der Kran- und Katzfahrmotor auch dazu noch erhebliche Beschleunigungsarbeit leisten. Da ferner eine Verringerung der Geschwindigkeit bei hoher Last sehr erwünscht ist, erblicken wir bei Gleichstrom in dem Hauptschlußmotor den geeigneten Motor. Wechselstrom kommt so wenig vor, daß er nicht erwähnt zu werden braucht, Drehstrom hingegen ist die verbreitetste Stromart. Der normale Drehstrommotor erreicht zwar nicht das hohe Drehmoment des Gleichstrommotors, jedoch können wir mit dem erreichbaren dreifachen Anzugsmoment zufrieden sein. Es ist ferner auch nicht gerade erwünscht, daß er eine nahezu gleichbleibende Umlaufzahl bei allen Belastungen hat, aber da trifft es sich glücklich, daß Drehstrom weniger oft in kleinen Betrieben, als vielmehr in den Riesenbetrieben vorkommt, zu denen als hauptsächlichste die Hütten- und Stahlwerke gehören. Die Hebezeuge in solchen Betrieben sind viel mehr Transportmaschine, die nur nebenbei heben und bei denen ohne jede Rücksicht die höchsten Geschwindigkeiten angestrebt werden. In solchem Falle ist der schnell auf volle Drehzahl anspringende Drehstrommotor gar nicht unerwünscht, um so mehr, als er ja auch nicht den empfindlichen Kollektor der Gleichstrommotoren besitzt. Die verlustlos regelbaren, aber sehr teuren Drehstrom-Kollektormotoren kommen für Hebemaschinen kaum in Frage. Die Steuerung der Motoren geschieht mit den bereits beschriebenen Steuerschaltern (Kontrollern), bei schwerem Stahlwerksbetrieb wohl auch mit Kohlesteuerschaltern oder gar Schützensteuerungen. Man ist bestrebt, diese Apparate so aufzustellen, daß man bei der Bedienung einen guten Überblick über das Arbeitsfeld hat. Hebezeuge, deren reger Betrieb einen besonderen Kranführer erfordert, wird man deshalb mit einem Führerkorb ausrüsten, in dem die Steuerschalter untergebracht sind, ferner eine Schalttafel, auf welcher sich ein Hauptschalter und die Sicherungen für jeden Motor befinden. Bei schwächer benutzten Kranen erfolgt die Bedienung meistens vom Boden der Werkstatt aus. Die Steuerschalter finden in diesem Falle auf der Kranbühne Aufstellung und können von unten mit Zugseilen eingeschaltet werden. Sie werden mit Rückschnell-

federn ausgerüstet, damit nicht einmal der Kran versehentlich weiterläuft. Wenn ein Kran ausschließlich an einer Stelle arbeitet, wie z. B. ein Schmiedekran, ist es angebracht, die Steuerschalter unten an der Arbeitsstelle aufzustellen. Wir brauchen dann allerdings zahlreiche Schleifleitungen zum Kran. Wir wollen nun einen elektrischen Fahrtrieb im einzelnen betrachten und zunächst annehmen, daß das Fahrwerk eine mechanische Bremse, die allerdings durch einen Elektromagneten nach Abb. 54 gelüftet wird, besitzt. In diesem Falle ist eine Bremsung durch den Motor unnötig, und wir brauchen die Schaltung lediglich für Vorwärts- und Rückwärtslauf einzurichten. In Abb. 420 haben wir die Walze des Fahralters in eine Ebene ausgerollt gedacht. F ist die Funkenlöschspule (s. S. 300) und M der Bremsmagnet zum Lüften

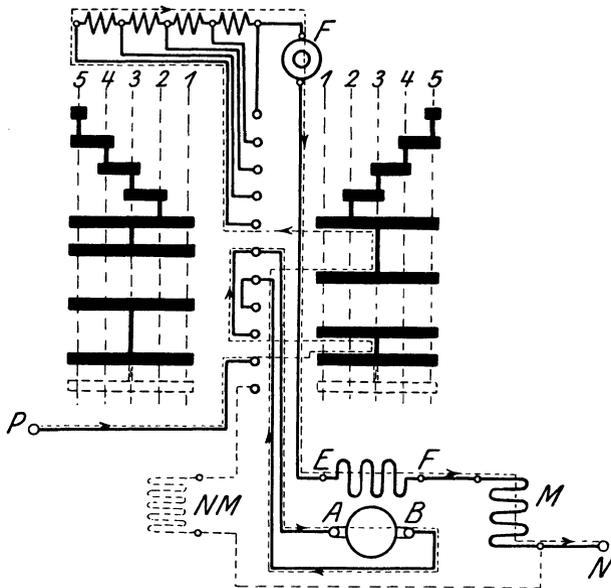


Abb. 420. Umkehrfahrtschaltung.

der Bremse. In dem Schaltungsschema ist dieser Magnet als Hauptschlußmagnet gezeichnet, denn er ist von dem ganzen Motorstrom durchflossen. Es werden jedoch auch Nebenschlußmagnete verwendet, welche im Gegensatz zu dem Hauptschlußmagneten infolge ihrer zahlreichen Windungen dünnen Drahtes einen hohen Widerstand besitzen und an die volle Netzspannung gelegt werden können.

Um die Wirkungsweise des Steuerschalters kennen zu lernen, denken wir uns die Kontaktfingerreihe auf die rechte Stellung 1 gestellt. Dann fließt nach dem punktierten Weg ein Strom von P durch den Anker A—B, durch alle Widerstände, die Löschspule F und das Feld E—F, ferner durch die Magnetspule M nach N. Die Bremse wird gelüftet und der Motor kann anlaufen. Durch Weiterrücken auf die Stellen 2—5 werden nacheinander die einzelnen Widerstandsstufen abgeschaltet, während an der übrigen Schaltung gar nichts verändert wird. Stellen wir aber jetzt die Finger auf die linke Stellung 1, so unterscheidet sich der Stromverlauf

von dem vorigen nur dadurch, daß der von P kommende Strom nun den Anker in Richtung B—A durchfließt, während im Feld die Stromrichtung E—F aufrecht erhalten bleibt. Der Motor läuft demnach umgekehrt herum.

Wenn wir einen Nebenschluß-Bremsmagneten verwenden wollten, bliebe nichts übrig, als denselben durch Anbringung des gestrichelt gezeichneten Segmentes zu schalten, weil er doch immer an der vollen Spannung liegen muß. Der gestrichelt gezeichnete Magnet NM soll der Nebenschlußmagnet sein. Die Hauptschlußmagnete haben den Nachteil, daß sie für die Stromstärke des zugehörigen Motors passend, also immer verschieden gewickelt werden müssen, außerdem sollen sie schon

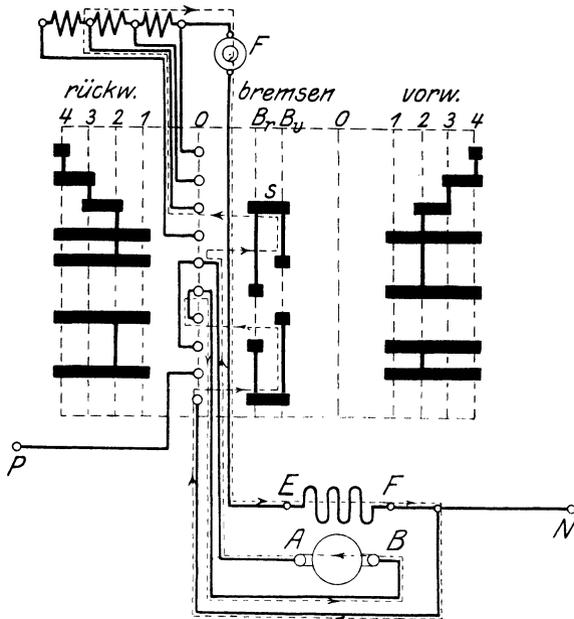


Abb. 421. Umkehrfahrtschaltung mit Bremsstellung.

bei einem Bruchteil des Motorstroms anziehen, weil anderenfalls der Kran oder die Katze sich mit einem Ruck in Bewegung setzen würde, wenn man aber den Magneten für so kleinen Strom wickelt, läuft man Gefahr, daß er bei normalem oder gar übernormalem Strom des Motors zu warm wird. Die Hauptschlußmagnete haben aber den Vorzug, daß sie immer ganz sicher die Bremse lüften, weil der Motor ja nicht eher anlaufen kann, ferner sind sie betriebssicherer als die Nebenschlußmagnete mit ihren dünnen Drähten. Die letzteren haben ferner den Nachteil, daß sie bei großem Spannungsabfall leicht versagen.

In Abb. 421 wollen wir nun eine Schaltung betrachten, welche dann in Frage kommt, wenn eine mechanische Bremse nicht vorgesehen ist, wenn also der Motor die Nachlaufbremse übernehmen muß. Die Schaltung unterscheidet sich nur dadurch von der vorigen, daß in der Mitte noch zwei Bremsstellungen B eingelegt sind, auf welchen der

Motor vom Netz abgetrennt ist und, in sich kurz geschlossen, auf einen Teil der Anlaßwiderstände als Erzeuger arbeitet. Wir wissen aber von S. 115, daß sich der Motor beim Nachlauf nur dann selbst erregen kann, wenn der Anker gegenüber dem Feld umgekehrt geschaltet ist, als bei der Fahrt. Aus diesem Grunde brauchen wir hier zwei Bremsstellungen. Die eine ist für Bremsung bei Vorwärtsfahrt, die andere für Rückwärtsfahrt.

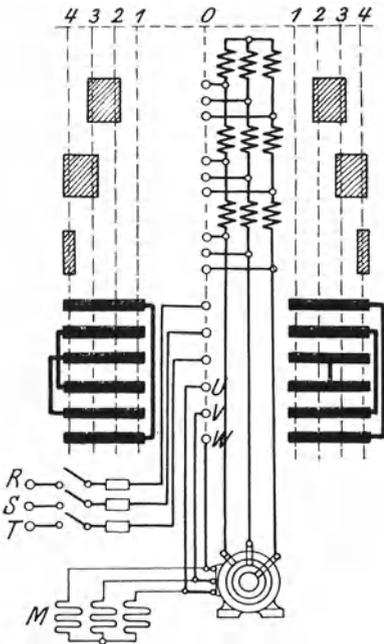


Abb. 422.

Schaltung eines Drehstrommotors.

tung und Umpolung des Ständers, Widerstandsstufen des Läufers ab.

Wenn wir z. B. die Finger auf die rechte Stellung 1 stellen, so läuft der Motor mit den Stromrichtungen A—B und E—F in Anker und Feld. Schalten wir dann ab und stellen auf die rechte Bremsstellung  $B_V$ , so ist der punktierte Stromlauf vorhanden, bei dem Anker und Feld umgekehrt zueinander geschaltet sind. Die Bremswirkung läßt sich dadurch verändern, daß man mehr oder weniger Widerstand einschaltet. Eine Höherrückung des Segmentes s würde den Widerstand vermindern, also die Bremskraft erhöhen. Keinesfalls darf man aber ohne Widerstand fahren, weil bei kurzgeschlossenem Erzeuger am Kollektor gefährliches Spritzfeuer entstehen würde.

Die Fahrschaltung mit Drehstrommotor ist sehr einfach und durch Abb. 422 dargestellt. Die sechs unteren Segmente dienen zur Schaltung der oberen schalten nacheinander die Falls ein Bremsmagnet M vorhanden ist, wird derselbe immer als Nebenschlußmagnet parallel zum Ständer

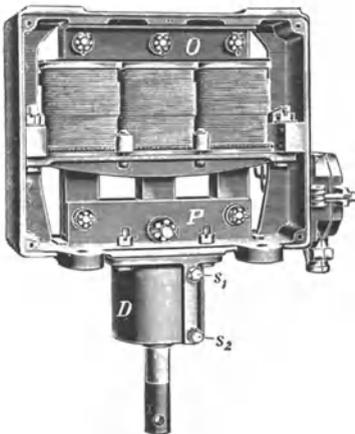


Abb. 423.

Drehstrom-Bremslüftmagnet (geöffnet).

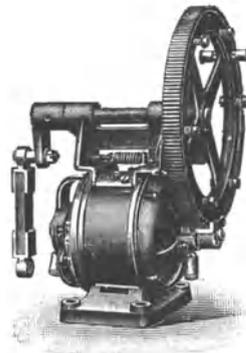


Abb. 424.

Drehstrom-Bremslüftmotor.

gelegt. Die Ausführung derartiger Magnete zeigt Abb. 423. P ist der bewegliche Kern, welcher von den drei Spulen angezogen wird, D ist ein Dämpferzylinder. Das Ganze ist also nichts weiter als eine Drehstrom-Drosselspule, von der wir von früher wissen, daß sie bei großem Luftspalt einen sehr großen Strom aufnimmt, während derselbe im angezogenen Zustand sehr gering ist. Dieser große Stromstoß schadet dem Magneten normal gar nichts, es kann aber vorkommen, daß durch dickes Öl oder sonstige Verschmutzung die Bewegung gehemmt ist. Dann dauert der große Strom länger an und kann zu einer Verbrennung des

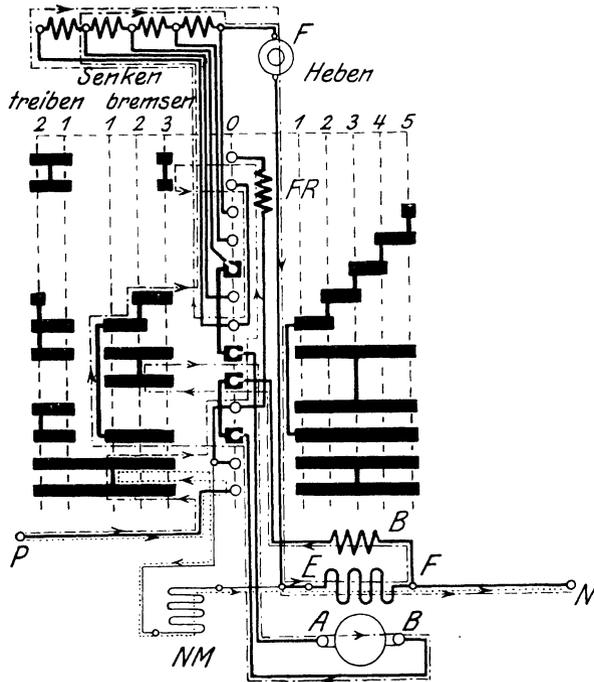


Abb. 425. Gleichstrom-Senkbremsschaltung.

Magneten führen, wenn derselbe nicht gesichert ist. Diese Schwierigkeiten werden vermieden durch die zwar teureren Bremslüftmotoren (s. Abb. 424). Der kleine Motor macht beim Einschalten eine Anzahl Umdrehungen, hebt damit das Bremsgewicht und bleibt unter Strom stehen. Da er parallel zum Ständer des Hauptmotors liegt, läuft er je nach der Motorschaltung links oder rechts herum, aber in beiden Fällen wird das Gewicht gehoben.

Die Hubschaltungen der Krane sind nicht so einfach. Das Schema einer Senkbremsschaltung, Abb. 425, zeigt auf der Seite für Heben keine Veränderung gegenüber den früheren Schemen. Auf der Senkseite haben wir jedoch zunächst drei Bremsstellungen, auf denen der Motor als Erzeuger kurz geschlossen ist und dann folgen noch zwei Stellungen, auf

welchen der Motor im Senksinne treibend wirkt, diese beiden Stellungen sind also genau wie die Hubstellungen, nur der Anker ist umgepolt. Diese Kraftstellungen sind notwendig, weil der leere Haken und leichte Lasten nicht in der Lage sind, das Triebwerk durchzuziehen. Der Kranführer darf aber unter keinen Umständen große Lasten darauf absenken, weil Motor und Last sich unterstützend, eine so große Geschwindigkeit verursachen würden, daß der Anker auseinanderfliegen würde. Wenn der Motor als Erzeuger geschaltet ist, muß er sich zuerst einmal erregen, ehe er überhaupt bremsend wirken kann. Da nun diese Selbsterregung immer einen Augenblick dauert, wird die Last beim Absenken immer erst ein Stückchen frei fallen („Sacken“), ehe der Motor mit der Bremsung einsetzt. Dieses Sacken der Last können wir durch eine Fremderregung auf der ersten Senkststellung vermeiden.

Wir sehen, daß in Abb. 425 auf Bremsstellung 3 oben zwei kleine Segmente angebracht sind, welche auf dieser Stellung über den Feldverstärkungswiderstand FR dem Feld E—F einen Strom aus dem Netz zuführen sollen. Außerdem ist natürlich der Motor als Erzeuger über zwei Widerstandsstufen kurzgeschlossen. Wir haben auf der Senkstellung 3 drei verschiedene Stromkreise zu unterscheiden, die punktiert eingezeichnet sind. Der vom Motor erzeugte Stromlauf ist strich-punktiert, der aus dem Netz entnommene Erregerstrom ist strich-strich-punktiert, während der aus dem Netz entnommene Strom des Nebenschluß-Bremsmagneten punktiert ist. Wir sehen ferner, daß auf den Bremsstellungen außer den Anlasserstufen dauernd ein Bremswiderstand B vorgeschaltet ist. Dieser Widerstand stellt ein Schutz für den Motor dar. Es soll durch ihn vermieden werden, daß beim plötzlichen Zurückgehen auf die ersten Bremsstufen mit starker Bremswirkung, der Kollektor durch den großen Strom leiden könnte. Wenn wir jetzt unsere Fingerreihe auf die weiteren Bremsstellungen 2 und 1 stellen, erhöht sich die Senkgeschwindigkeit, weil mehr Widerstand in den Motorstromkreis eingeschaltet ist, die Last also leichter durchziehen kann. Eine fremde Erregung ist auf diesen Bremsstellungen nicht mehr nötig.

Bei dieser Senkbremsschaltung ist ein Nebenschlußbremsmagnet verwandt worden. Dies ist nötig, denn beim Senken muß doch zuerst einmal die Bremse gelüftet sein, ehe der Motor umlaufen und sich erregen kann. Ein Hauptschlußmagnet könnte also nur dann verwandt werden, wenn man ihn auch auf der ersten Senkstellung fremd erregen würde. In Abb. 425 ist auch in der Nullstellung der Motor in Erzeugerschaltung. Die meist benutzten Bandbremsen wirken nämlich nur im Senksinne kräftig, und man möchte deshalb die Möglichkeit haben, den nach oben gehenden leeren Haken abzubremsen.

Die besprochene Senkbremsschaltung hat den großen Nachteil, daß die Senkgeschwindigkeit keine bestimmte ist. Wenn der Führer bei großen Lasten unvorsichtigerweise auf die Senk-Kraftstellungen geht, kann die Geschwindigkeit beliebig hohe Werte annehmen. Diese Gefahr ist bei einer Senkschaltung beseitigt, welche die auf S. 114 betrachtete Bremswirkung bei Parallelschaltung von Widerständen zum Anker zur Hilfe nimmt. Abb. 426 stellt die Schaltung auf den verschiedenen Stellungen des Steuerschalters dar. Beim Heben ist die Schaltung bis auf die erste Stellung genau wie sonst. Auf dieser ersten Stellung ist jedoch dem Anker ein Widerstand  $r$  parallel geschaltet, wodurch nach den Überlegungen auf S. 108 nicht nur die Geschwindigkeit vermindert, sondern auch bei wechselnder Belastung ziemlich unveränderlich ist. Bei der früheren Schaltung wird auf der ersten Hubstellung eine größere

Last zwar langsam gehoben, der leere Haken oder eine kleine Last werden hingegen sehr schnell bewegt. Durch den in Abb. 426 verwendeten Ankerparallelwiderstand ist auch im letzten Fall die Geschwindigkeit herabgesetzt. Auf den Senkstellungen haben wir die in Abb. 172 betrachtete Schaltung. Der Motor empfängt Erregung aus dem Netz und läuft außerdem als Erzeuger. Die Widerstände werden so bemessen, daß bei Absenkung der Höchstlast auf der letzten Stellung die Geschwindigkeit nicht mehr als das Doppelte der normalen ist. Die Sicherheit, welche diese Schaltung gewährt, ist jedoch durch einen hohen Stromverbrauch erkauft. Auf den Senkstellungen wird nicht nur keine Energie in das Netz zurückgeliefert, sondern noch welche verbraucht. Eine Verbesserung läßt sich in dieser Hinsicht allerdings noch dadurch erzielen,

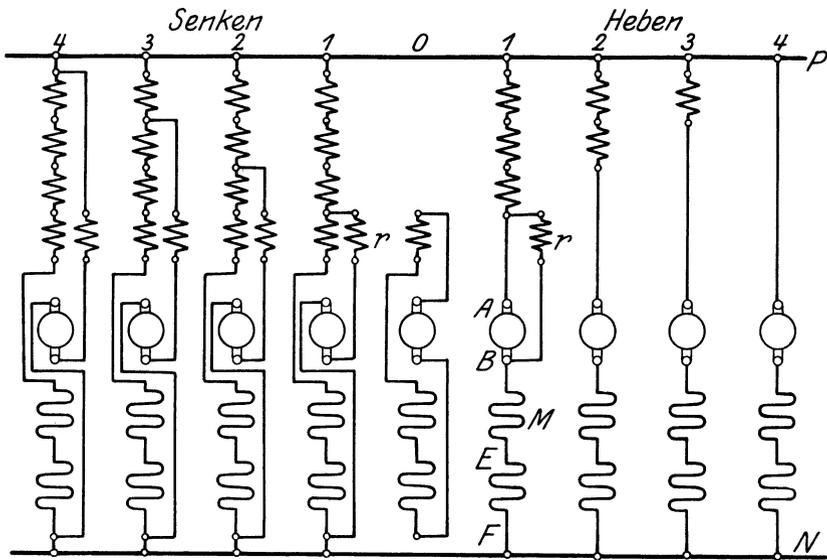


Abb. 426. Senkschaltung mit Ankerparallelwiderständen.

daß man die ersten Senkstellungen, bei denen ja ein Durchgehen des Motors auch bei großen Lasten nicht zu befürchten ist, nach der früheren Schaltung Abb. 425 ausführt und nur die letzten Stellungen nach Abb. 426.

Die normalen Hubwerksschaltungen der Drehstromkrane stimmen mit Abb. 422 überein. Es ist also kein Unterschied zwischen einer Drehstrom-Fahrschaltung und einer Drehstrom-Hubschaltung. Sobald der Drehstrommotor im Senksinne voll eingeschaltet ist und seine Drehfeldumlaufzahl überschritten hat, beginnt er als 'Asynchronerzeuger' zu bremsen, wobei er den erzeugten Strom in das Netz zurückliefert. Wir wissen jedoch von S. 191, daß bei eingeschaltetem Widerstand die Umlaufzahl eine höhere ist. Auf Stellung 1 der Abb. 422 würde sich also die höchste, auf Stellung 4 die geringste Senkgeschwindigkeit einstellen. Der Kranführer eines Drehstromkranes ist also zu befehlen, daß im Senksinne, ganz besonders bei größeren Lasten, möglichst bald auf den

letzten Kontakt zu gehen ist. Dies wird sehr oft von solchen Führern nicht beachtet, welche vorher Gleichstromkrane gefahren haben. Von einer Regelung der Senkgeschwindigkeit kann natürlich keine Rede sein. Es ist dies zwar bei Hütten- und Stahlwerkskranen auch gar nicht notwendig, wohl aber bei Kranen für Gießereien und Werkstätten. Man kann die Gefahr des Durchgehens dadurch verringern, daß man den Senkwiderstand kleiner einstellt, als den Hubwiderstand, daß also auf der Senkseite weniger Stufen vorgesehen werden (s. Abb. 439). Wo aber eine feinstufige Regelung der Senkgeschwindigkeit erforderlich ist, bedient man sich besser der sog. *Gegenstrombremsschaltung*, bei welcher der Motor beim Absenken im Hubsinne eingeschaltet wird. Das

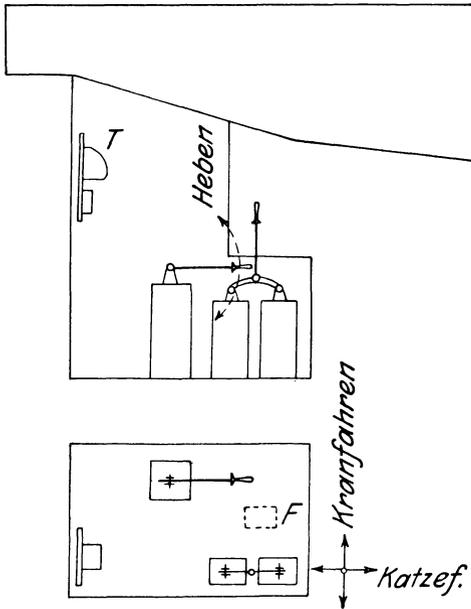


Abb. 427. Führerkorb eines Dreimotorenkrans.

Lastmoment überwiegt jedoch und zieht den Motor nach unten durch. Auf der ersten Senkstellung ist hier der Vorschaltwiderstand im Läuferkreis am kleinsten. Der Motor übt deshalb ein kräftiges Drehmoment im Hubsinne aus, so daß die Last nur ganz langsam ablaufen kann. Auf den weiteren Stellungen wird der Widerstand stark erhöht, wodurch eine erhöhte Senkgeschwindigkeit eintritt. Zuletzt kommen wieder einige Stellungen, auf denen der Motor im Senksinne treibend wirkt, damit man auch nicht-durchziehende Lasten und den leeren Haken absenken kann. Es könnte nun aber der Fall eintreten, daß beim Absenken einer kleinen Last das Motordrehmoment auf der ersten Senkstellung über-

wiegt, und daß statt des Senkens eine Hubbewegung zustande käme. Um dies zu vermeiden, kann man ein mechanisches Gesperre anordnen, oder man kuppelt mit dem Triebwerk eine Schlepp-Schaltwalze, welche den Bremsmagneten zum Einfallen bringt, sobald die Walze vom Triebwerk im verkehrten Sinne mitgenommen wird.

Als Bedienungselemente der Krankontroller kommen das Handrad und der Handhebel in Frage. Da ein Handrad sich nur mit zwei Händen bequem steuern läßt, kann es nur bei Einzelsteuerungen und weniger angestrengtem Betrieb benutzt werden. Hebelantrieb hingegen erlaubt die bequeme Bedienung mehrerer Kontroller, ganz besonders, wenn man Universalsteuerung (S. 300) anwendet. Die Anordnung mehrerer Kontroller im Führerhaus muß so sein, daß eine bequeme Bedienung möglich ist. Dabei ist es nicht immer möglich, die Bewegung der Be-

dienungselemente in Übereinstimmung mit der erzeugten Kranbewegung zu bringen, was bei ungeschultem oder häufig wechselndem Bedienungspersonal immerhin erwünscht ist. Abb. 427 stellt die bei Drei-Motorenkranen übliche Anordnung dar. F ist der Stand des Führers, welcher den Hubkontroller mit der linken Hand, den Universalkontroller mit der rechten bedient. T stellt die Schalttafel dar.

Um ein Überfahren der Grenzstellungen zu vermeiden, kann man Licht- oder Glockensignale anbringen, welche kurz vor der Endlage in Tätigkeit treten. Da aber derartige Zeichen im Getöse des Betriebes oft nicht beachtet werden, sind die früher betrachteten Endschaltungen vorzuziehen. Für das Hubwerk genügt eine einseitige Grenzschtaltung gegen Zuhochziehen der Flasche. Eine direkte Betätigung des Endschalters durch die hochgehende Flasche ist jedoch wegen deren Pendelung nie ganz sicher. Außerdem ist der Endschalter in diesem Falle schlecht zugänglich. Man zieht deshalb bei wichtigeren und größeren Kranen die Hilfsstromendschtaltung mit Spindelendschalter vor. Für die Kran- und Katzfahrbewegung kommt nur die direkte Betätigung der Endschalter in Frage, weil infolge des Rutschens der Räder ein Spindelendschalter die Bewegung nicht dauernd richtig kopiert. Die Endschalter für die Fahrbewegung können sowohl auf dem beweglichen, als auch auf dem ruhenden Teil angebracht werden. Diejenigen für die Kranbewegung wird man unter allen Umständen auf der Kranbühne anordnen. Für die Katzfahrbewegung sind beide Möglichkeiten ausführbar. Wenn der Kontroller in einem Führerkorb steht, der an dem Kranträger befestigt ist, und die Endschalter befinden sich auf der Katze, so sind besondere Schleifleitungen nötig, die zu den Endschaltern führen. Sind aber diese Endschalter an den beiden Enden der Kranbühne fest angeordnet, so genügt die normale Zahl der Schleifleitungen, wohl sind aber feste Leitungen zu den Endschaltern zu führen. Wenn der Führerkorb mit der Katze beweglich ist, ordnet man die Katzfahrendschalter auf der Katze an.

Den fahrbaren und drehenden Teilen eines Kranes muß der Strom durch Schleifleitungen bzw. Schleifringe zugeführt werden. Die Zahl dieser Schleifleitungen und Ringe richtet sich nach der Konstruktion des Kranes und nach der Schaltung. Durch Abb. 428 ist ein normaler Dreimotoren-Laufkran mit feststehendem Führerkorb schematisch dargestellt. Der Strom wird dem Kran durch die Hauptschleifleitung S zugeführt und dann über eine kleine Schalttafel, über Sicherungen den einzelnen Steuerschaltern der Motoren zugeleitet. Hub- und Katzfahrmotor sind mit der Katze beweglich, sie brauchen also Schleifleitungen. Wenn man einem Hauptschlußmotor, der immer den gleichen Drehsinn hat, Strom zuführen will, braucht man dazu nur zwei Leitungen, weil Anker und Feld immer in gleicher Weise zueinander geschaltet bleiben. Soll aber der Motor umkehrbar sein, so muß der Anker in bezug auf das Feld umgepolt werden. Wir müssen, um dies vom Standort des Führers zu können, zwei Leitungen zum Anker und zwei zum Feld führen. Der Umkehrmotor verlangt bei Gleichstrom also 4 Leitungen. Bei einem Drehstrom-Schleifringmotor ist es gleichgültig, ob der Motor umkehrbar ist oder nicht, er braucht in beiden Fällen drei Ständerleitungen und drei

Läuferleitungen. Kurzschlußmotoren haben natürlich nur drei Ständerleitungen. Die Zahl der Schleifleitungen, welche ein Kran benötigt, geht aus vorstehender Überlegung hervor, und wir sehen aus Abb. 428 wie z. B. der Katzfahrmotor K an seine vier Leitungen angeschlossen ist. Hätte das Fahrwerk noch einen Hauptschluß-Bremsmagneten, so bliebe die Zahl der Schleifleitungen die gleiche, weil der Magnet mit dem Motorfeld dauernd hintereinander geschaltet bleibt. Ein Nebenschlußmagnet hingegen brauchte eigentlich zwei weitere Schleifleitungen. Da aber nach Abb. 420 und 425 die eine Klemme des Magneten mit der einen Feldklemme dauernd verbunden werden kann, kommt man mit

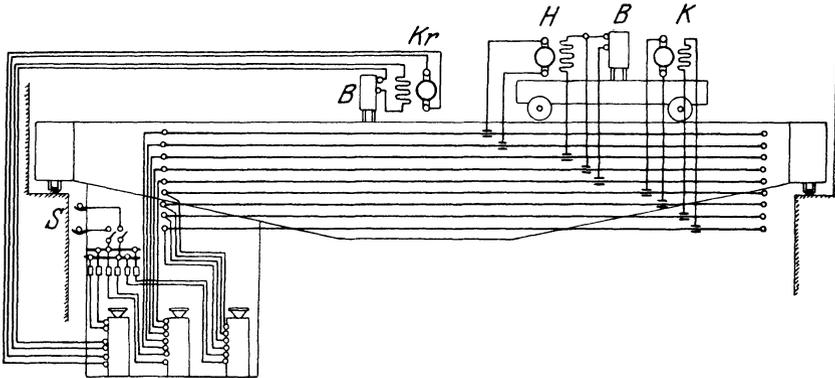


Abb. 428. Schaltung eines Dreimotorenkranes.

nur einer Schleifleitung aus. Aus Abb. 428 ist der Anschluß des Hubmotors H mit Nebenschlußmagnet B ersichtlich. Abb. 429 stellt einen Laufdrehkran dar, bei welchem auf der fahrbaren Katze auf einem Schienenring ein drehbarer Teil gelagert ist, der nach unten durchhängt und dort Last und Hubwerk trägt. Der Führer mit dem Steuerwerk befindet sich auf dem drehbaren Teil. Der durch die Schleifleitungen S dem Kran zugeführte Strom wird deshalb zuerst über einen Schalter, über zwei Kranschleifleitungen und dann über Schleifringe der Schalttafel zugeführt. Von hier aus erfolgt die Verteilung. Der erste Schalter ist nötig, um den ganzen Kran spannungslos machen zu können. Die Schaltung des Hubmotors H und des Drehmotors D braucht keine Schleifringe, weil beide mitdrehen. Dem Katzfahrmotor und seinem Hauptschlußmagneten muß der Strom über vier Schleifringe zugeführt werden, und um zum Kranfahrmotor zu gelangen, müssen wir außerdem noch über vier Schleifleitungen.

Durch Endschaltungen wird die Zahl der Schleifleitungen erhöht. Nach Abb. 401 brauchten wir für den Anschluß des Hubenschalters zwei Schleifleitungen mehr, wir können jedoch durch geschickte Schaltung erreichen, daß man mit einer zusätzlichen Leitung auskommt. Drehstromkrane benötigen für die Bremsmagnete keine besonderen Leitungen, weil dieselben stets dem Ständer parallel geschaltet werden.

Die Anbringung der Hauptschleifleitung eines Kranes längs der Gebäudewand oder an den Gebäudestützen ist im allgemeinen leicht

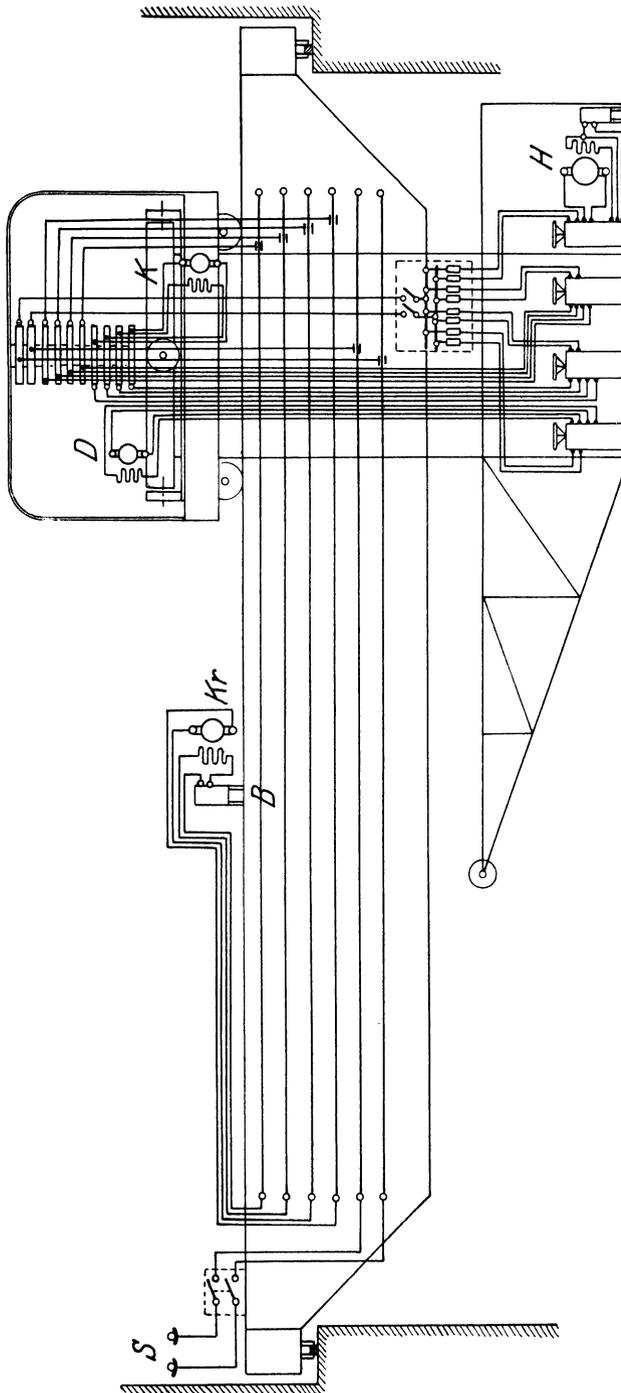


Abb. 429. Schaltung eines Laufdrehkranes.

durchzuführen, sie bereitet nur bei freistehenden Bockkranen Schwierigkeit, bei welchen der Raum zu Verladezwecken u. dgl. freigehalten werden muß. In solchen Fällen muß man zu der sonst wenig beliebten unterirdischen Stromzuführung greifen, die Abb. 430 veranschaulicht. D sind die Schleifdrähte. Der Kanal muß natürlich

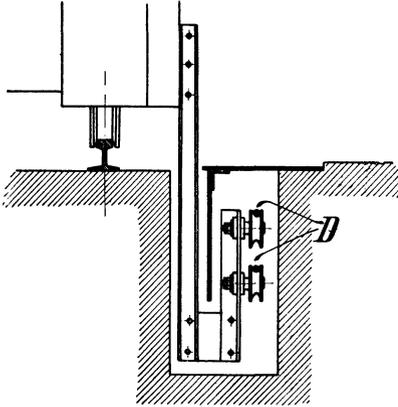


Abb. 430. Unterirdische Stromzuführung.  
(Aus Preger-Lehmann, Unfallverhütungs-  
Technik)

gut entwässert sein. Die Unterbringung der Schleifleitungen an dem Kran bereitet nur dann Schwierigkeiten, wenn ihre Zahl sehr groß ist. Man kann die Leitungen nach Abb. 431 bei normalen Trägern an der Innenseite der Hauptträger unterbringen, wie es links angegeben ist. Auch außerhalb der Laufbühne können sie gespannt werden, wenn man sie durch ein Schutznetz von dem Gang trennt. Bei dem rechts gezeichneten geschlossenen Träger sind die Stellen e—f sehr günstig, weil sie von der Laufbühne A getrennt sind. Ebenso kommt die Stelle b—c in Frage.

Der Hauptschalter und die Sicherungen der einzelnen Kranmotoren werden bei allen Kranen für trockene und staubfreie Räume auf einer kleinen Marmortafel angeordnet. In schmutzigen Räumen hingegen zieht man gekapselte Schaltkasten vor. Um bei Kranen für ange-

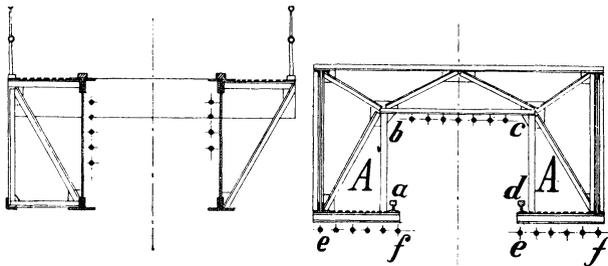


Abb. 431. Schleifleitungen am Kranträger.  
(Aus Preger-Lehmann, Unfallverhütungs-Technik.)

strengten Betrieb und schwierigen Anlaufbedingungen Zeitverluste infolge Auswechslens von Sicherungen zu vermeiden, führt man den Hauptschalter vielfach als selbsttätigen Schalter mit Nullspannungs- und Höchststromauslösung aus. Die Einstellung derartiger Schalter ist jedoch ziemlich schwierig, weil die einzelnen Kranmotoren verschieden groß sind, und weil doch auch mehrere gleichzeitig laufen können. In neuerer Zeit hat man deshalb öfter jeden Motorstromkreis statt der Sicherungen mit einem Auslöser mit Zeiteinstellung ausgerüstet, welcher

bei länger andauerndem Überstrom den Hauptschalter des Kranes zum Ausschalten bringt (s. Aufg. 20, S. 442).

Als *Leitungen* kommen für die Krane wegen der vielen Krümmungen hauptsächlich die Panzeradern in Frage, und zwar für Innenräume die normale Panzerader, für das Freie die Panzerbleikabel. Ausnahmsweise werden auch Gummiadern in Stahlrohre ohne Isolation verlegt. (Weil die Isolation ein Auswechseln von Leitungen erschwert!) Bleikabel müssen natürlich mit Endverschlüssen versehen werden, jedoch genügen ganz einfache Blech- oder Gummiendverschlüsse. Bei der Bemessung des Leitungsquerschnittes kommt nur bei ganz großen Kranen der Spannungsabfall in Frage. Normal wird die Erwärmungsgrenze nach der Tabelle S. 228 zugrunde gelegt. Hierbei ist jedoch zu beachten, daß die Leitungen bei aussetzendem Betrieb höher belastet werden dürfen, als es die Tabelle angibt, weil bei aussetzendem Strom der quadratische Mittelwert des Stromes maßgebend ist. Die richtige Sicherung derartiger schwächer bemessenen Leitungen bereitet einige Schwierigkeiten, weil die Abschmelzsicherung doch durch den Anlaufstrom des Motors mitbestimmt ist. Eine einwandfreie Lösung ist nur mittels Auslösern mit Zeiteinstellung möglich.

Für die *Bemessung des Motors* ist bei dem Hubwerk die Größe der Last und die geforderte Hubgeschwindigkeit bestimmend. Nach den Regeln der Mechanik beträgt die Hubleistung in kW:

$$\mathcal{G} = \frac{Q \cdot v}{102 \cdot \eta} \dots \dots \dots 65$$

Hierin ist Q das Gewicht der Last in kg, v die sekundliche Geschwindigkeit in m und  $\eta$  der Wirkungsgrad des Triebwerks. Derselbe schwankt bei Räderwinden je nach der Größe der Übersetzung zwischen 0,8 und 0,6. Bei Schneckenradantrieb kann er bis 0,4 sinken. Bei einem Wirkungsgrad von 0,5 ab ist das Getriebe selbstsperrend, d. h. unterhalb dieses Wirkungsgrades kann selbst die größte Last nicht mehr durchziehen, es ist also auch zum Absenken Motorkraft erforderlich.

Fahrwerksmotoren haben nur Reibungsarbeit zu leisten. Dieselbe setzt sich aus der rollenden Reibung an dem Laufradumfang und aus der gleitenden Reibung am Laufzapfenumfang zusammen. Die erforderliche Motorleistung in kW beträgt:

$$\mathcal{G} = \frac{Q \cdot f \cdot v}{102 \cdot R \cdot \eta} + \frac{Q \cdot \mu \cdot d/2 \cdot v}{102 \cdot R \cdot \eta} \dots \dots \dots 66$$

Hierin ist Q das Gewicht des Fahrzeugs zuzüglich desjenigen der Last in kg, v die sekundliche Fahrgeschwindigkeit in m, f der Koeffizient der rollenden Reibung gleich 0,08 cm, R der Radius des Laufrades in cm, d der Durchmesser des Laufzapfens in cm und  $\mu$  der Koeffizient der gleitenden Reibung gleich etwa 0,1. Der Wirkungsgrad  $\eta$  des Triebwerks muß etwas niedriger angenommen werden als bei dem Hubwerk, weil die nicht unwesentliche Reibung an den Spurkränzen in der Rechnung nicht berücksichtigt ist.

Nachdem die Antriebsleistung nach den vorstehenden Beziehungen berechnet ist, hat man nach Versuchs- oder Erfahrungswerten die

Einschaltdauer zu bestimmen und kann dann in der früher eingehend betrachteten Weise die Motorgröße ermitteln.

Die Verwendung von Kurzschlußmotoren bei Drehstrom ist zwar sehr vorteilhaft, weil man drei Leitungen erspart, und weil an die Stelle des Kontrollers ein dreipoliger Schalter (gekapselt) tritt. Man muß jedoch bedenken, daß derartige Motoren mit heftigem Ruck anspringen und deshalb für solche Krane ungeeignet sind, bei denen ein ruhiges und genaues Arbeiten unbedingt erforderlich ist.

Die *Bremsmagnete* werden nach ihrer Hubarbeit, d. i. Bremsgewicht mal Hubhöhe bemessen. Ihre Größe richtet sich nach der Größe der zu lüftenden Bremse, also auch nach dem abzubremsenden Drehmoment, und kann angenähert bestimmt werden aus der Beziehung:

$$A = 50 + 7,5 \cdot M,$$

worin  $A$  die Hubarbeit in cmkg und  $M$  das Drehmoment der Bremswelle in mkg bedeutet. Antriebe, welche in rascher Folge viele ganz kurzzeitige Anläufe haben, die mit sog. „Stromspritzern“ arbeiten, müssen Bremsmagnete mit ganz kleinem Hub bekommen. Auch die Bremsmagnete müssen natürlich den Vorschriften hinsichtlich der Erwärmung entsprechen. Für sie ist also die Einschaltdauer genau so zur Anwendung zu bringen wie früher bei den Motoren.

**Beispiel:** Welche Antriebsleistung ist für einen 10-t-Werkstattkran erforderlich, wenn die Hubgeschwindigkeit 6 m minutlich betragen soll, und wenn der Wirkungsgrad des Rädertriebwerks zu 0,7 angenommen wird?

Nach Gleichung 65 ist:

$$\mathcal{E} = \frac{Q \cdot v}{102 \cdot \eta} = \frac{10000 \cdot 0,1}{102 \cdot 0,7} = 14 \text{ kW.}$$

Für einen Werkstattkran kann eine Einschaltdauer von 0,25 zugrunde gelegt werden. Da die Größe der Last stark wechselt und die Höchstlast von 10 t nur sehr selten gehoben wird, können wir den Motor um etwa 20% schwächer wählen, also zu:

$$0,8 \cdot 14 = 11,2 \text{ kW.}$$

Die Beschleunigungsarbeit spielt hier keine nennenswerte Rolle. Einen Motor dieser Leistung suchen wir nun in der Liste für 0,25 Einschaltdauer aus. Sind in derselben nur die Prüfleistungen enthalten, so haben wir nach der Tabelle auf S. 288 45 Minutenleistung zugrunde zu legen, und einen Motor zu wählen, welcher 14 kW 45 Minuten lang ununterbrochen leisten kann.

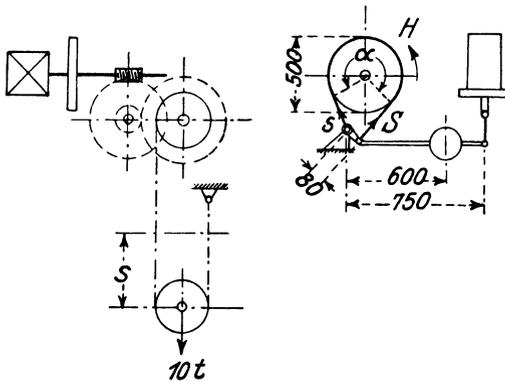


Abb. 432. Hubwerk.

**Beispiel:** Ein Hubwerk (Abb. 432) hebt 10 t mit einer minutlichen Geschwindigkeit von 5,6 m. Der Drehstrommotor macht 970 Umläufe in der Minute und hat ein Schwungmoment von 10,2 kgm<sup>2</sup>. In welcher Entfernung von der Höchststellung der Flasche muß der Endschalter spätestens abschalten, wenn nach dem Abschalten nur die mechanische Bremse wirkt? Der Bremsmagnet hat ein Kerngewicht von 11 kg, ferner trägt der Bremshebel noch ein Gewicht von 10 kg.

Nach Gleichung 57 und 58 beträgt die im Anker und in der Last aufgespeicherte Bewegungsenergie:

$$A = \frac{G D^2 \cdot n^2}{7200} + \frac{G \cdot v^2}{g \cdot 2}$$

Das Schwungmoment der Bremsscheibe kann aus ihren Abmessungen zu  $3,5 \text{ kgm}^2$  berechnet werden.

$$A = \frac{(10,2 + 3,5) \cdot 970^2}{7200} + \frac{10000 \cdot 0,0935^2}{9,81 \cdot 2} = 1785 + 5 = 1790 \text{ mkg.}$$

Von dieser Energie wird der größte Teil durch die Reibung der Bremsscheibe und die Triebwerksreibung in Wärme verwandelt. Ein weiterer Teil dient zur Hebung der Last um den Nachlaufweg s. Das Moment des Kern- und Bremsgewichtes am Bremshebel ist gleich dem Moment der Bremsbandspannung S.

$$S \cdot 80 = 10 \cdot 600 + 11 \cdot 750, \\ S = 178 \text{ kg.}$$

Nach der Mechanik ist die linke Bremsbandspannung um die Reibung kleiner und berechnet sich zu:

$$s = \frac{S}{e^{\mu\alpha}} = \frac{178}{3,7} = 48 \text{ kg.}$$

Hierin ist  $e = 2,718$ , der Reibungskoeffizient  $\mu = 0,28$  und der Umschlingungswinkel  $\alpha = 270^\circ$ . Die Bremse bremst also am Umfang mit

$$P = S - s = 178 - 48 = 130 \text{ kg.}$$

Um 10 t mit 0,0935 m sekundlicher Geschwindigkeit zu heben, braucht man nach Gleichung 65

$$\mathcal{E} = \frac{10000 \cdot 0,0935}{102 \cdot 0,6} = 15,3 \text{ kW.}$$

Hierin ist der Wirkungsgrad zu 0,6 eingesetzt. Das Drehmoment an der Motorwelle ist:

$$M = 0,975 \cdot \frac{\mathcal{E}}{n} = 0,975 \cdot \frac{15300}{970} = 15,4 \text{ mkg}$$

und die zur Hebung der Last am Bremsscheibenumfang wirkende Kraft ist:

$$P = \frac{M}{D/2} = \frac{15,4}{0,25} = 61,6 \text{ kg.}$$

Am Scheibenumfang wirken also bremsend:

|   |           |
|---|-----------|
| Die Bremse mit . . . . .                  | 130 kg    |
| Last- und Triebwerksreibung mit . . . . . | 61,6 kg   |
|   | 191,6 kg. |

Nennen wir den Nachlaufweg am Scheibenumfang L, so muß die Bremsarbeit  $191,6 \cdot L$  gleich der Arbeitswucht A sein, also

$$191,6 \cdot L = 1790 \\ L = 9,35 \text{ m.}$$

Dies sind  $9,35 : 0,5 \cdot 3,14 = 6$  Umdrehungen. Bei 970 Motorumläufen hebt sich die Last um 5,6 m, dann läuft sie bei 6 Umdrehungen um

$$5,6 \cdot \frac{6}{970} = 0,035 \text{ m} = 35 \text{ mm nach.}$$

Um den Nachlauf bei leerem Haken zu finden, können wir die Triebwerks-widerstände vernachlässigen. Dann wirkt nur die Bremse mit 130 kg. Der Motor macht im Leerlauf 1000 Umläufe. Die Arbeitswucht berechnet sich dann zu:

$$A = 1900 \text{ mkg.}$$

Also:

$$130 \cdot L = 1900 \\ L = 14,6 \text{ m} \simeq 9,3 \text{ Umdrehungen.}$$

Der Hakennachlauf ist also:

$$5,6 \cdot \frac{9,3}{970} = 54 \text{ mm.}$$

Da der Reibungskoeffizient der Bremse durch Öl oder Feuchtigkeit leicht stark verringert werden kann, ist mindestens der doppelte Nachlaufweg einzustellen.

**Beispiel:** Für einen normalen Laufkran für 10 t Höchstlast und mit einer Spannweite von 15,5 m sollen die Installationsmaterialien festgelegt werden. Es steht Gleichstrom von 220 V zur Verfügung.

|               | Arbeits-Geschw. m/Min. | Übersetzung   | Motorleistung kW | Motor-Drehzahl | Motor-Wirkungsgrad | Motorstrom |
|---------------|------------------------|---|------------------|----------------|--------------------|------------|
| Hubwerk       | 6                      | 2gäng. Schnecke mit Rad von 29 Zähnen, Rädervorgelege 14/72 Zähne, Trommel, 300 mm Ø, mit loser Rolle | 14               | 950            | 0,88               | 73         |
| Katz-Fahrwerk | 20                     | 1gäng. Schnecke mit Rad von 40 Zähnen, Rädervorgelege 27/45 Zähne, 350 mm Laufraddurchmesser          | 2                | 1200           | 0,78               | 11,7       |
| Kran-Fahrwerk | 90                     | 2 Rädervorgelege: 17/84 Zähne und 13/66 Zähne, 750 mm Laufraddurchmesser                              | 9                | 950            | 0,86               | 48         |

Das Eigengewicht der Laufwinde beträgt 2200 kg, dasjenige des ganzen Kranes ohne Last 14700 kg.

Die Motorstromstärken der obigen Tabelle sind in bekannter Weise aus den Leistungen berechnet worden.

**Isolierte Leistungen:** Panzeradern gewählt, weil der Kran nicht im Freien arbeitet. Da bei den geringen Längen der Spannungsabfall keine Rolle spielt, braucht nur die Erwärmungsgrenze nach Tabelle S. 228 eingehalten zu werden. Also:

Hubmotor: 16 mm<sup>2</sup> Kupfer.

Katzfahrmotor: 4 mm<sup>2</sup> Kupfer, erhöht wegen Bruchgefahr.

Kranfahrmotor: 16 mm<sup>2</sup> Kupfer.

Nebenschluß-Bremsmagnet 150 cm kg Hubarbeit: 2,5 mm<sup>2</sup> Kupfer. (Bruchgefahr!)

#### Schleifleitungen.

Hubmotor: 16 mm<sup>2</sup> entspricht 4,5 mm Ø, wegen Verschleiß und Gefahr des Durchbrennens auf 6 mm erhöht.

Katzfahrmotor: 4 mm<sup>2</sup>, ebenfalls auf 6 mm Ø erhöht.

Bremsmagnet: Es genügt der kleinste übliche Draht von 5 mm Ø. Wegen Einheitlichkeit aber 6 mm gewählt.

#### Motorsicherungen.

Hubmotor: 80 A Nennstrom.

Katzfahrmotor: 15 A Nennstrom.

Kranfahrmotor: 60 A Nennstrom, reichlicher, wegen Massenbeschleunigung im Anlauf.

**Schalter.** Es genügt ein Hauptschalter, bei dessen Bemessung angenommen sei, daß zwei Motoren gleichzeitig arbeiten, also 73 + 48 = 121 A, gewählt 200 A Schalter. Mit Rücksicht auf den aussetzenden Betrieb wäre auch 100 A zulässig.

**Beispiel:** Der Katzfahrmotor des vorigen Kranes springe auf dem ersten Kontakt zu heftig an, wenn die Belastung gering ist. Derselbe soll deshalb einen so großen Anlaufwiderstand erhalten, daß er auch bei leerem Haken ohne Stoß anläuft.

Das normale Drehmoment ist:

$$M_n = 0,975 \cdot \frac{2000}{1200} = 1,625 \text{ mkg.}$$

Im Leerlauf ist das Moment  $M_x$  entsprechend der Belastung geringer, also:

$$M_x = 1,625 \cdot \frac{2200}{10000 + 2200} = 0,3 \text{ mkg.}$$

Nach Abb. 158 verhalten sich die Momente etwa wie die Quadrate des Stromes:

$$\frac{I_x^2}{I^2} = \frac{M_x}{M_n}, \quad I_x = 11,7 \cdot \sqrt{\frac{0,3}{1,625}} = 5 \text{ A.}$$

Folglich muß der Anlaßwiderstand

$$R = \frac{220}{5} = 44 \text{ Ohm haben.}$$

**Beispiel:** Ein Spill zum Rangieren von Eisenbahnwagen soll eine Zugkraft von 1000 kg bei 0,5 m sekundlicher Seilgeschwindigkeit haben. Es soll die elektrische Ausrüstung angegeben werden (Gleichstrom). Unter vorläufiger Annahme eines Getriebewirkungsgrades von 0,6 ergibt sich die Antriebsleistung zu:

$$\frac{P \cdot v}{102 \cdot \eta} = \frac{1000 \cdot 0,5}{102 \cdot 0,6} = 8,2 \text{ kW.}$$

Da ohnehin Schneckenantrieb verwandt wird, braucht kein langsam laufender Motor gewählt zu werden. Es wird deshalb ein Hauptschlußmotor von 8,5 kW,  $n = 1085$  vorgesehen. Bei dem üblichen kurzzeitigen Betrieb genügt 45 Minutenleistung. Bei der vorgeschriebenen Seilgeschwindigkeit und dem Trommeldurchmesser von 250 mm ergibt sich eine Drehzahl der Trommel von 38.

Folglich die notwendige Übersetzung  $38 : 1085 = 1 : 28,6$ . Da bei zweigängiger Schnecke das Rad etwas groß werden würde, wird eine eingängige Schnecke zugrunde gelegt. Die Gefahr, daß bei Entlastung die Motordrehzahl zu hoch werden könnte, ist bei der eingängigen Schnecke geringer. Bei einer zweigängigen wäre es ratsam gewesen die Motordrehzahl etwas geringer anzunehmen, oder den Motor mit einer zusätzlichen Nebenschlußwicklung auszurüsten. Die Gesamtanordnung ist in Abb. 433 dargestellt.

Als Anlaßvorrichtung kommt ein Walzenanlasser mit angebautem Widerstand und für schwachen Betrieb in Frage. Eine Umkehr der Drehrichtung ist nicht nötig. In Abb. 433 ist der Anlasser durch A dargestellt; derselbe wird mittels Steckschlüssels gedreht (zuweilen auch für Fußbetätigung). E stellt die Kabelführung dar. Ein Schaltkasten, welcher den zweipoligen Schalthebel und das Sicherungspaar enthält, kann in einem benachbarten Raum oder auch im Spillkasten selbst untergebracht werden.

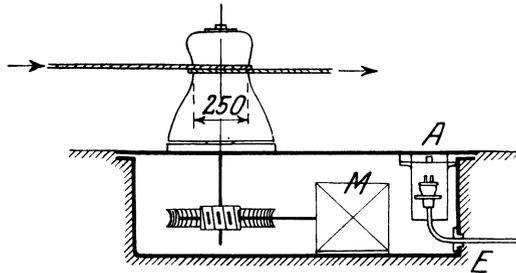


Abb. 433. Spill.

**2. Die Aufzüge.** Manche Lastenaufzüge, die von einem Führer gesteuert werden, lassen sich genau wie die Krane ausrüsten. Sie erhalten einen normalen Kontroller und können bei Gleichstrom auch durch einen Hauptschlußmotor angetrieben werden. Der Aufzugsbetrieb unterscheidet sich von dem Kranbetrieb besonders dadurch, daß bei ersterem stets sehr große Hübe gemacht werden. Die bei der Absenkung des Aufzugskorbes frei werdende große Energie wird bei einem Hauptschlußmotor bekanntlich immer in Widerständen in Wärme verwandelt,

während sie bei dem Nebenschlußmotor zum großen Teil zurückgewonnen werden kann. Man zieht aus diesem Grunde bei großen Hübden den Nebenschlußmotor, oder wenigstens den Doppelschlußmotor vor. Die überwiegende Anzahl aller Aufzüge, besonders der Personenaufzüge hat jedoch keine Handsteuerung, sondern eine selbsttätige Steuerung, bei welcher von dem Bedienenden durch einen Seilzug oder einen Druck auf einen Druckknopf lediglich die Fahrt eingeleitet wird. Selbstanlasser besorgen dann das Anlassen des Motors und Endschalter setzen ihn im richtigen Augenblick wieder still. Bei dieser selbsttätigen Steuerung

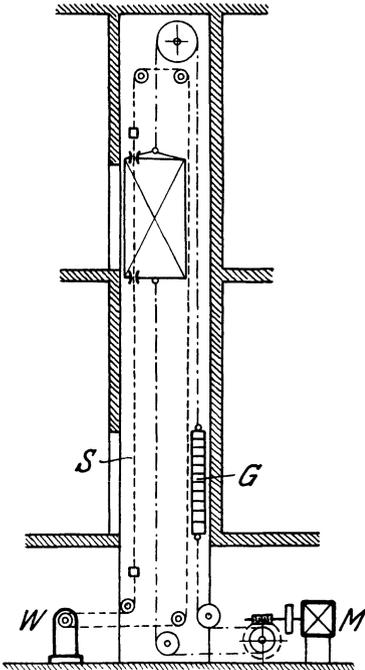


Abb. 434. Aufzug mit Seilsteuerung.

muß verlangt werden, daß der Aufzugskorb immer genau an der Haltestelle anhält, was nur zu erreichen ist, wenn der Aufzug beim Heben und Senken und bei allen Lasten mit konstanter Geschwindigkeit fährt. Es leuchtet ein, daß wir deshalb bei selbsttätig gesteuerten Aufzügen nur Nebenschlußmotoren verwenden können, die höchstens eine schwache zusätzliche Hauptschlußwicklung zur Verstärkung des Anzugsmomentes erhalten dürfen. Bei Drehstrom wird der normale Drehstrommotor verwandt.

Die Bestimmung der Motorleistung erfolgt bei den Aufzügen in genau gleicher Weise wie bei den Kranen. Bei großen Leistungen und bei angestrengtem Betrieb muß ein Arbeitsdiagramm aufgestellt werden, aus welchem die effektive Leistung zu ermitteln ist.

Bei fast allen Aufzügen wird das Gewicht des Fahrkorbes, sowie ein Teil der Nutzlast durch ein Gegengewicht ausgeglichen. Abb. 434 zeigt die Anordnung dieses Gegengewichtes G.

Nehmen wir einmal an, ein Aufzug arbeite ohne Gegengewicht und brauche zur Hebung der Last ohne Reibung 10 kW. Der Wirkungsgrad des Triebwerkes sei 0,6 und derjenige des Motors 0,85. Dann verbraucht der Aufzug beim Heben  $10 : 0,6 = 16,7$  kW. Es werden also 6,7 kW für Reibung verbraucht. Beim Absenken tritt der gleiche Verlust ein, so daß der Motor nur  $10 - 6,7 = 3,3$  kW abbremst und davon  $3,3 \cdot 0,85 = 2,8$  kW in das Netz zurückliefert. Nehmen wir jetzt aber an, daß ein Gegengewicht vorhanden ist, welches Fahrkorb und Last vollkommen ausgleicht, so wäre die Winde vollständig entlastet und der Motor braucht sowohl beim Heben, als auch beim Senken nur die Reibungswiderstände des Triebwerkes zu überwinden. Wir machen also durch die Verwendung eines Gegengewichtes eine wesentliche Energieersparnis. Da die Last

im allgemeinen in ihrer Größe wechselt, läßt sich nie ein vollkommener Ausgleich erzielen. Man gleicht deshalb meistens für die Durchschnittslast aus. Ein weiterer Vorteil des Gegengewichtes besteht darin, daß die zur Hebung einer Last nötige Energie auf den Hub- und Senkweg verteilt wird, so daß man mit einem etwas kleineren Motor auskommt. Ein Nachteil des Gegengewichtes ist indessen, daß durch es die Größe der zu beschleunigenden Massen erhöht wird. Wir wissen aber von früher, daß diese nutzlos aufgewendete Energie immer dann belanglos ist, wenn die Betriebszeit im Verhältnis zur Anlaufzeit groß ist, was bei Aufzügen mit größerem Hub immer der Fall ist.

Die *Aufzugssteuerungen* zerfallen in drei Hauptklassen, in die rein mechanischen Steuerungen, dann in die von Hand betätigten Wendeanlassersteuerungen und schließlich in die rein elektrischen Druckknopfsteuerungen. Die erst genannten Handsteuerungen stimmen im wesentlichen mit den Kransteuerungen überein. Als Sicherung gegen Überfahren der Erdstellungen können Hauptstromendschalter eingebaut werden. Da jedoch im Aufzugsbetrieb die Endschaltungen viel häufiger in Wirksamkeit treten als im Kranbetrieb, zieht man die *Hilfstromendschaltung* vor, bei welcher durch die Endschalter lediglich ein Schützenstrom unterbrochen wird, während die Abschaltung des großen Motorstromes von dem viel besser dafür geeigneten Schütz besorgt wird.

Bei allen Endschaltungen, auch denjenigen der Krane, ist zu vermeiden, daß nach dem Abschalten durch den Endschalter der Motor als Erzeuger den Bremsmagneten speist und dessen Einfallen verhindert.

Die Steuerung mit Wendeselbstanlasser kommt in der Hauptsache bei langsam gehenden Personen- und Lastenaufzügen in Frage. Der Anlasser wird nach Abb. 434 von Hand durch ein Seil, welches durch den Fahrkorb hindurchgeleitet oder von einem Arbeitsstand aus erreichbar ist, auf Heben oder Senken geschaltet, worauf derselbe dann unabhängig vom Führer die Anlaßstufen langsam abschaltet. Dem Führer ist also nur die Einleitung der Fahrt überlassen. Sobald er an dem Seilzug den in Abb. 435 dargestellten Anlasser einrückt, löst sich das rechts sichtbare Gewicht und dieses dreht die untere und die obere Nockenwelle, durch welche die Schalterreihe den Motor und die Widerstandsstufen schaltet. Die Bewegung geht langsam vor sich, weil mit einer Kette oben ein Windflügel gekuppelt ist. Beim Stillsetzen wird das Fallgewicht wieder angehoben. Die Endschaltung kann in einfachster Weise dadurch erfolgen, daß das Seil, welches durch den Fahrkorb

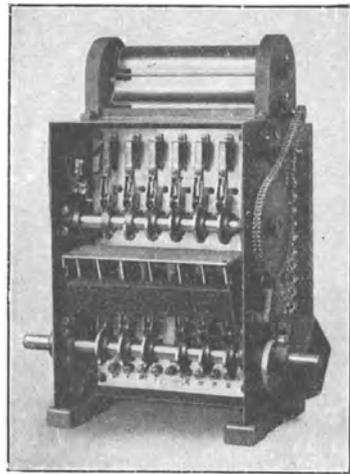


Abb. 435.  
Wendeanlasser für Aufzüge.

geführt ist, in den Endlagen vom Korb mitgenommen wird, wodurch die Ausrückung erfolgt. Bei Personenaufzügen sind nun aber zwei unabhängig voneinander wirksame Endschaltungen vorgeschrieben, man muß also außerdem noch eine gewöhnliche Endschaltung mit Endschaltern anordnen.

Die Aufzugssteuerung, welche sich am vollkommensten allen Ver-

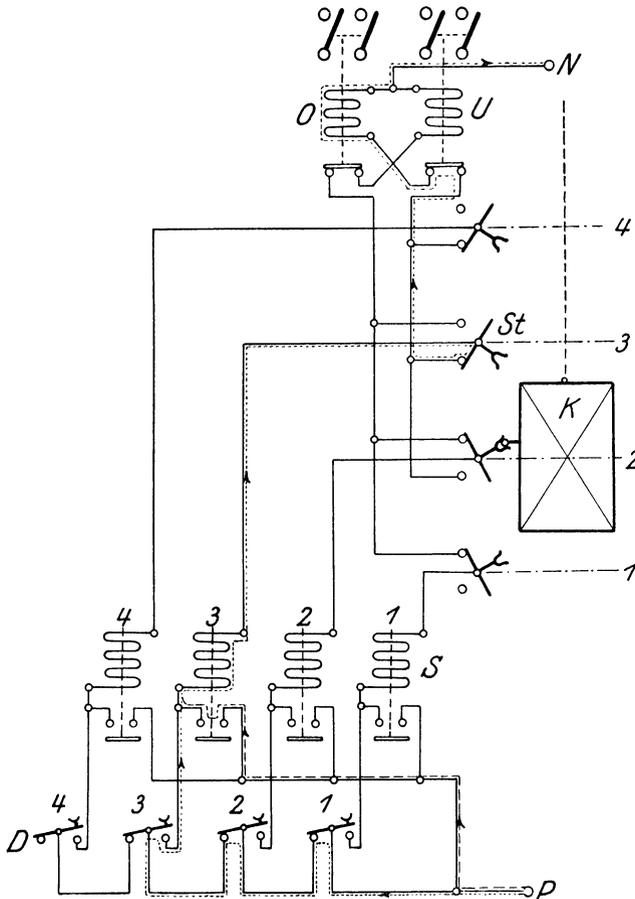


Abb. 436. Druckknopfsteuerung.

hältnissen anpassen läßt, ist die Druckknopfsteuerung. Sie ermöglicht es, einen Personenaufzug ohne Führer ungeschulten Leuten zur Benutzung zu überlassen.

Bei der durch Abb. 436 dargestellten, vereinfachten Druckknopfsteuerung bedeuten D die Druckknöpfe, welche zur Einleitung der Fahrt nach einem der vier Stockwerke kurz gedrückt werden müssen. K ist der Fahrkorb, der bei seiner Bewegung die Stockwerksschalter St umlegt. Die Schützen U und O schalten den Aufzugsmotor entweder nach

unten oder nach oben ein, die weitere Schaltung des Selbstanlassers ist fortgelassen. Die Schützenspulen S haben keinen anderen Zweck als den Stromlauf, der durch Drücken eines der Druckknöpfe hergestellt ist, auch nach dem Loslassen des Druckknopfs aufrecht zu erhalten; sie überbrücken deshalb mit ihren Kontakten die Druckknöpfe. Die denkbar einfachste Schaltung würde nun die sein, daß man durch Drücken eines Druckknopfes ein Schütz S einschaltet, und daß der Strom weiter durch eins der Schützen U oder O geleitet, dieses zum Anziehen brächte und so den Aufzug in Gang setzte. Dies geht aber nicht, denn der Aufzug muß einmal aufwärts fahren, wobei O Strom bekommt, ein andermal abwärts fahren, wozu U eingeschaltet werden muß. Der von den Schützen S kommende Strom muß demnach auf U oder O umschaltbar sein. Diese Umschaltung besorgen die Stockwerksschalter St. Alle Stockwerksschalter in den Stockwerken unterhalb des Fahrkorbs stehen so, daß die von den Schützen S kommenden Leitungen mit dem Schütz U verbunden sind, während die Schalter in den oberen Stockwerken die Schützen S mit dem Schütz O verbinden. Hierdurch ist erreicht, daß beim Drücken des Druckknopfs 4 das Schütz O zur Aufwärtsfahrt anzieht, beim Drücken des Druckknopfs 1 hingegen das Schütz U zur Abwärtsfahrt. Außer dieser Umschaltung haben die Stockwerksschalter jedoch noch die weitere Aufgabe, den Aufzug im richtigen Augenblick stillzusetzen, es sind also die Endschalter. Die Schaltung 436 hat ferner Druckknöpfe mit einem zweiten Kontakt, der sich beim Drücken eines Druckknopfs öffnet, und wir sehen, daß die von P kommende Leitung über sämtliche Druckknöpfe in Hintereinanderschaltung geführt ist, daß also, wenn z. B. mehrere Druckknöpfe gleichzeitig gedrückt würden, nur einer einen Stromschluß herbeiführen könnte, und zwar derjenige, welcher P am nächsten liegt. Damit nicht aus irgend einem Grunde einmal die Schützen O und U gleichzeitig angezogen sind, besitzen beide Hilfskontakte, über welche ihre Spulenströme kreuzweise geführt sind.

Der Fahrkorb steht jetzt im zweiten Stockwerk. Sobald wir nun durch Drücken des Druckknopfs 3 den Auftrag zur Fahrt nach Stockwerk 3 geben, ist der punktierte Stromlauf vorhanden. Wenn Schütz 3 angezogen hat, kann der Druckknopf losgelassen werden, dann beginnt der Stromlauf von P aus nach der gestrichelten Linie. Die normalen Druckknopfsteuerungen besitzen nun außerdem noch eine Reihe Sicherheitsvorkehrungen, die in Abb. 436 fortgelassen sind. Z. B. haben die Türen Kontakte, über welche der von P zu den Druckknöpfen geführte Strom geht. Der Aufzug kann demnach nur dann in Bewegung gesetzt werden, wenn sämtliche Schachttüren geschlossen sind. Ferner haben die Aufzüge meistens außer den Druckknöpfen der Abb. 436 weitere Druckknöpfe, welche außerhalb an den Schachttüren angebracht sind, und welche dazu dienen, den Fahrkorb zu einem bestimmten Stockwerk hinzuholen. Es könnte dann vorkommen, daß der Fahrkorb, der sich auf der Fahrt nach einem bestimmten Ziel befindet, plötzlich von außerhalb nach einem anderen Stockwerk geschaltet wird. Es ist dann eine Schaltung nötig, welche Störung ausschließt, sobald eine Fahrt begonnen ist. Dies läßt sich einfach dadurch erreichen, daß man die von P kommende Zuleitung zu den Druckknöpfen erst noch über weitere Hilfskontakte an den Schützen O und U leitet. Ist also eins von beiden angezogen, so sind alle Druckknöpfe wirkungslos. Die Stillsetzung eines Aufzugs kann durch Drücken eines Ausschaltedruckknopfs erreicht werden, welcher den von P kommenden Strom unterbricht.

Die in dem Aufzugsschacht angebrachten Stockwerksschalter, von denen Abb. 437 ein Bild gibt, sind natürlich schwer zugänglich. Man zieht

deshalb vielfach einen Steuerapparat, auch Kopierapparat genannt, vor, welcher dieselben Umschalter besitzt, die aber nicht von dem Fahrkorb, sondern von einer Wandermutter oder einer Nockenwelle betätigt werden. Abb. 438 zeigt einen solchen Steuerapparat, welcher durch eine Kette mit dem Windwerk zu kuppeln ist.

Für stark benutzte Aufzüge, wie z. B. in Warenhäusern, wird meistens auf die rein selbsttätige Druckknopfsteuerung verzichtet, weil doch ein Führer vorhanden sein muß. Man wählt dann *Handsteuerung* (Hebelsteuerung), bei welcher durch Umlegen eines in dem Fahrkorb angebrachten Schalthebels nach oben oder unten, der Aufzug entsprechend in Bewegung gesetzt wird. Die Stillsetzung geschieht durch Zurücklegung des Hebels in die Nullstellung. Alle Aufzüge, auch diejenigen mit Druckknopfsteuerung haben noch eine Notendschaltung, welche in Tätigkeit tritt, sobald die unterste oder höchste Endlage überfahren wird.



Abb. 437. Stockwerksschalter.

Die bisher beschriebenen Aufzugssteuerungen sind vollkommen ausreichend, wenn die Fahrgeschwindigkeit nicht höher als etwa 0,5—0,6 m in der Sekunde ist, und wenn kein übertriebener Wert auf genaues Anhalten gelegt wird. Muß jedoch mit höheren Fahrgeschwindigkeiten gearbeitet werden, so kommt man

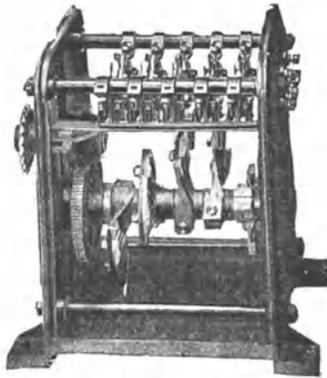


Abb. 438. Kopierapparat.

nicht ohne eine Verzögerung der Geschwindigkeit vor dem Anhalten aus. Diese Verzögerung läßt sich nun nicht etwa durch Vorschaltung von Widerständen in den Motorstromkreis erzielen, denn beim Senken (bei negativen Momenten!) würde durch dieselben ja die Geschwindigkeit noch weiter erhöht. Es bleibt nichts übrig, als durch eine Feldverstärkung die Umlaufzahl herabzusetzen. Damit dies aber überhaupt möglich ist, müssen wir einen regelbaren Nebenschlußmotor nehmen, der normal mit geschwächtem Feld läuft, und der nur beim Anlauf und beim Stillsetzen voll erregt wird. Im allgemeinen wird eine Regelbarkeit des

Motors von 1 : 2 genügen, nur bei ausnehmend hohen Fahrgeschwindigkeiten ist ein Regelbereich von 1 : 3 erwünscht. Die Einschaltung des Feldwiderstandes erfolgt selbsttätig durch eine Vorrichtung, welche dem Selbstanlasser Abb. 393 ähnelt. Nach erfolgtem Anlassen, gewissermaßen als letzte Stellung, bekommt der Zugmagnet Strom und schaltet langsam den Feldwiderstand vor, so daß der Motor seine Drehzahl auf den Höchstwert steigert. Vor Erreichung des Zieles wird durch den Stockwerksschalter zuerst der Magnet abgeschaltet, wodurch der Feldwiderstand ausgeschaltet und der Motor auf halbe Umlaufzahl oder noch niedriger gebremst wird. Einige Augenblicke später erfolgt durch eine zweite Stufe des Stockwerksschalters die völlige Stillsetzung.

Die Verwendung von Regelmotoren hat nach dem früher Gesagten den Nachteil, daß die Motoren unverhältnismäßig groß gewählt werden müssen, ganz besonders dann, wenn hohe Fahrgeschwindigkeiten eine starke Verzögerung vor den Haltestellen notwendig machen. Man zieht deshalb bei Geschwindigkeiten, welche 1,2 m sekundlich übersteigen, vor, die Leonardschaltung anzuwenden, die zwar auch nicht billiger ist, aber dafür eine feinstufige und unveränderliche Geschwindigkeitseinstellung erlaubt. Wenn zum Betrieb Wechsel- oder Drehstrom zur

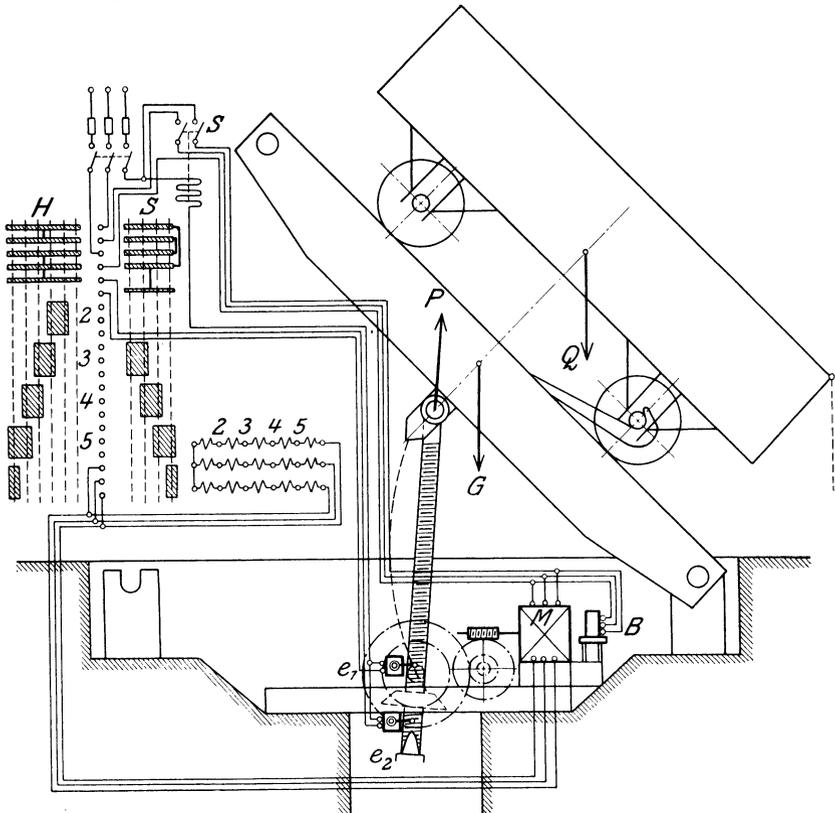


Abb. 439. Wagenkipper.

Verfügung steht, wird man sogar schon bei geringeren Geschwindigkeiten zur Leonardschaltung greifen, weil die normalen Motoren außer dem Drehstromkommutatormotor keine Regelung gestatten. Die Schaltung der Leonardsteuerung ist außerordentlich einfach (s. Abb. 165). Da diese Steuerung ja doch nur bei stark benutzten Aufzügen in Frage kommt, stellt man im Fahrkorb eine Meisterwalze auf, mit welcher die Erregung der Steuerdynamo durch den Führer geregelt wird. Das Anlassen und Stillsetzen erfolgt also meistens von Hand. Nur in den äußersten Endlagen des Aufzugs läuft ein Rollenhebel der Meisterwalze auf eine Gleitbahn auf, so daß die Walze gewaltsam in die Nullstellung gedreht wird.

**Beispiel:** Ein Demag-Wagenkipper nach Abb. 439 soll stündlich 8 Wagenladungen von 20 t kippen. Das Eigengewicht der Bühne beträgt 15 t, das Wagen-gewicht 10 t. Die Gesamtlast ist also 45 t, die in 2 Minuten um 2,7 m in die gezeichnete Lage gehoben werden soll. Es soll die elektrische Ausrüstung festgelegt werden (Drehstrom).

Bei 8 Kippungen je Stunde beansprucht eine Kippung 7,5 Min. Da das Senken etwas rascher geht, ist dafür 1,9 Min. zugrunde gelegt, so daß sich eine Einschaltdauer von  $(2 + 1,9) : 7,5 = 0,52$  ergibt. Man hat nun die Antriebskräfte P, welche bei den verschiedenen Kippstellungen zur Hebung von G und Q erforderlich sind zu bestimmen und die Leistung zu berechnen. Die mittlere Hubgeschwindigkeit ist  $2,7 : 120 = 0,0225$  m/Sek. Für den Hubbeginn ist also die Motorleistung unter Annahme eines Getriebewirkungsgrades 0,5

$$\frac{45000 \cdot 0,0225}{102 \cdot 0,5} = 20 \text{ kW.}$$

In Abb. 440 sind die Leistungen aufgezeichnet, wobei angenommen ist, daß bei  $30^\circ$  Neigung das Auskippen beginnt. Beim Senken müßte bei einem Wirkungsgrad von 0,5 eigentlich keine Antriebsleistung nötig sein. In Wirklichkeit wird jedoch eine geringe Leistung beansprucht werden. Da die oben berechnete Ein-

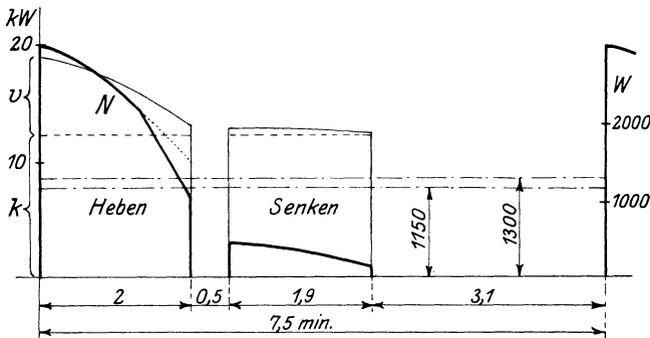


Abb. 440. Arbeitsdiagramm des Kippers (Abb. 439).

schaltdauer nicht listenmäßig ist, wird ein Motor mit 0,35 Einschaltdauer gewählt, welcher 27 kW bei einem Wirkungsgrad von 0,88 leistet. Seine Verluste bei dieser Leistung betragen also  $(27000 : 0,88) - 27000 = 3700$  W. Diese Verluste können bei 0,35 Einschaltdauer in Form von Wärme abgegeben werden. Bei Dauerbetrieb dürften die Verluste nur  $3700 \cdot 0,35 = 1300$  W sein. In Abb. 440 sind die Motorverluste bei den wirklich auftretenden Leistungen in großem Maßstab aufgetragen, wobei ein Verlustfaktor  $a = 1$  zugrunde gelegt ist. Die konstanten Motorverluste betragen also  $3700 : 2 = 1850$  W, und die veränderlichen bei 27 kW Leistung ebensoviel. Im Anlauf bei 20 kW Leistung setzen sich also die Verluste aus den konstanten  $k = 1850$  und den veränderlichen  $v = 1850 \cdot (20^2 : 27^2) = 1000$  W zusammen. Bildet man nachher das Dauermittel der Verluste, so ergibt sich 1150 W, gegen 1300 W, welche der Motor abführen könnte. Der Motor wird beibehalten, weil die nächst kleinere Ausführung nicht hinreichen würde. Da keine wesentliche Beschleunigungsarbeit zu verrichten ist, reicht das Drehmoment sicher aus. Die Umlaufzahl des Motors kann normal, etwa 728 gewählt werden, weil wegen der ohnehin notwendigen großen Übersetzung mit Schnecke und Spindel keine Veranlassung vorliegt, einen Langsamläufer zu nehmen.

Die Schaltung geht aus Abb. 439 hervor. Die beiden Hilfsstromschalter  $e_1$  und  $e_2$  werden in den Endlagen von der Bühne betätigt und schalten den Erregerstrom des Schützes S · B ist der Bremsmagnet, welcher parallel zum Ständer des Motors M liegt. Steuerschalter, Schütz und Schaltkasten werden in einem Führerhäuschen seitlich des Kippers untergebracht.

## B. Der elektrische Antrieb von Fahrzeugen.

Zahlreiche Krane haben keinen anderen Zweck, als irgend ein Gut von einem Ort nach einem anderen zu transportieren, sie sind also eigentlich Transportmaschinen, die nur aus Zweckmäßigkeitsgründen ein Hubwerk haben. Die eigentlichen Fahrzeuge, wie z. B. Wagen zum Transport von Erzen, Roheisen, Schlacken u. dgl. unterscheiden sich deshalb hinsichtlich ihres Antriebes nicht sehr von denen der Hebezeuge. Zum Antrieb eignet sich bei Gleichstrom wieder am besten der Hauptschlußmotor, wegen seines hohen Anzugsmomentes und der mit zunehmender Last abnehmenden Drehzahl. Bei Drehstrom bleibt keine andere Wahl als der normale Drehstrom-Asynchronmotor. Die Motorleistung eines Fahrzeugs berechnet sich auch aus Gleichung 66, wenn dasselbe keine Steigung zu überwinden hat. Die Antriebsleistung für geneigte Bahn erhält man, wenn man zu der für die Fahr-Reibungswiderstände benötigten, nach Gleichung 66 zu berechnenden Leistung noch die Hubleistung nach Gleichung 65 hinzuzählt. Hierbei ist dann aber zu bedenken, daß in letzterer Gleichung als Geschwindigkeit  $v$  der sekundliche Weg des Fahrzeugs in vertikaler Richtung einzusetzen ist. Zum Anlassen und Regeln der Fahrzeugmotoren kommen ausschließlich Steuerschalter in Frage. Bei horizontaler Bahn genügt es im allgemeinen, wenn entweder eine mechanische Bremse oder Bremsstellungen zur Motorbremsung vorhanden sind. Bei geneigter Bahn sind beide Bremsungen wünschenswert, eine mechanische Bremse als Haltebremse muß auf alle Fälle vorhanden sein, weil sonst der Wagen auf geneigter Bahn nicht gehalten werden kann. Die Verwendung von Abschmelzsicherungen ist im Fahrbetrieb oft sehr störend. Man benutzt statt ihrer deshalb häufig Höchststromausschalter, die nach erfolgter Auslösung ohne Zeitverlust wieder eingelegt werden können. Als Zuleitungen werden bei Fahrzeugen fast durchweg die fest verlegten Schleifleitungen benutzt.

**1. Die elektrischen Bahnen. a) Die elektrischen Straßenbahnen.** Für dieselben kommt fast ohne Ausnahme Gleichstrom von 500—700 V in Frage, weil Drehstrom mindestens zwei Fahrleitungen nötig machte, und weil es früher geeignete Wechselstrommotoren nicht gab.

*Das Kraftwerk.* Straßenbahnen sind meistens an städtische Elektrizitätswerke angeschlossen, und es ist deshalb notwendig, den gewöhnlich erzeugten Drehstrom mittels Umformers in Gleichstrom umzuformen. Für diese Umformung kommen sowohl Doppelmaschinen- als auch Einankerumformer in Frage. Das Anlassen und Synchronisieren kann einfach dadurch geschehen, daß der Umformer von der meist vorhandenen Pufferbatterie rückwärts mit Gleichstrom gespeist wird. Die Größe der Maschinenleistung ergibt sich aus der Motorleistung der Wagen und der Anzahl derselben, wobei man an Hand eines Fahrplanes die voraussichtlich gleichzeitig laufenden Wagen feststellt. Da häufig mehrere Wagen gleichzeitig anlaufen oder Steigungen überwinden, wird die augenblickliche Belastung die Durchschnittsbelastung oft erheblich übersteigen, ganz besonders wenn die Wagenzahl klein ist. Bei kleinen Zentralen ist deshalb ein Belastungsausgleich nötig, der am besten durch

eine parallel geschaltete *Pufferbatterie* bewirkt wird. Dieselbe nimmt bei Überlastung an der Stromlieferung teil, während sie bei Unterlast geladen wird. Durch Aufstellung einer *Piranimaschine* (s. S. 272) kann die ausgleichende Wirkung der Batterie noch verbessert werden. Pufferbatterien werden zuweilen so groß bemessen, daß sie bei Störungen die ganze Stromlieferung bis zu einer Stunde übernehmen können. Die von der Umformerstation zur Fahrleitung abgehenden Speiseleitungen erhalten Höchststromausschalter.

*Die Leitungsanlage.* Die Stromzuführung zu den Wagen geschieht heute fast ausschließlich durch oberirdische Fahrleitungen. Dieselben werden durch Drahthalter getragen und sind entweder runde Drähte von 8—9 mm  $\varnothing$  aus Hartkupfer oder Profildrähte von 8förmigem Querschnitt. Profildrähte werden von den Drahthaltern sicherer gehalten. Um Fehlerstellen leichter auffinden und gegebenenfalls abtrennen zu können, wird die Fahrleitung mittels Streckenisolatoren in einzelne Strecken von etwa 500 m Länge zerlegt. Ein Teil dieser Streckenschalter ist stets geöffnet, und die dadurch entstehenden Leitungsabschnitte werden getrennt von der Umformerstation gespeist. Diese Speiseleitungen werden innerhalb der Städte als eisenbandbewehrte Kabel, außerhalb meist als blanke Seile auf den Masten verlegt. Der gesamte Spannungsabfall wird im allgemeinen zu 10% (bis 15%) angenommen. Bei der üblichen Spannung würden demnach etwa 55—60 V Verlust auftreten dürfen. Hiervon läßt man etwa 50 V auf die Oberleitung und nur 6 V auf die Schienenrückleitung entfallen, weil bei höherem Spannungsgefälle in den Schienen leicht durch Abzweigströme im Erdreich elektrolytische Zerstörungen an Röhren auftreten können. Als spezifischer Widerstand der Schienen kann man im Mittel 0,125 zugrunde legen. Um den Übergangswiderstand an den Schienenstößen zu vermindern, muß eine Kupferleitung von mindestens 80 mm<sup>2</sup> den Stoß überbrücken. Der Widerstand der Rückleitung setzt sich also aus dem Schienenwiderstand, aus dem Widerstand der Schienenverbindungsleitung und deren Übergangswiderstand, der etwa zu 0,0015  $\Omega$  für den ganzen Stoß angenommen werden kann, zusammen. Ergibt sich in der Schienenrückleitung ein zu großer Spannungsabfall, so sind die Schienen an einigen Stellen durch sog. Rückspeisekabel mit der Umformerstation zu verbinden.

*Der Motorwagen.* Bei den üblichen Fahrgeschwindigkeiten von 10 bis 15 km/St. reichen Hauptschlußmotoren von 20—50 kW Stundenleistung aus, von denen auf jeder Radachse einer federnd aufgehängt wird und mittels Räderübersetzung von 1 : 4 bis 1 : 6 auf die Radachse arbeitet. Sowohl der Motor, als auch das Vorgelege muß vollkommen gekapselt sein. Die Steuerung der Motoren geschieht durch Schaltersalter. Wie Abb. 441 zeigt, haben dieselben meist zwei Walzen, nämlich die Hauptwalze, mit welcher die Motoren in Reihenparallelschaltung (s. S. 111) angelassen und auch auf Bremsung geschaltet werden können und die Nebenwalze, welche zur Umkehr der Fahrtrichtung dient. Die Nebenwalze der Abb. 441 erlaubt auch, jeden der beiden Motoren einzeln zu betreiben, damit bei einer Beschädigung eines Motors mit dem anderen weitergefahren werden kann. Auf den Stellungen 1—VI werden die

Motoren in Hintereinanderschaltung angelassen, auf den Stellungen 7—XI jedoch in Parallelschaltung. Auf den Stellungen VI, X und XI wird das Feld durch einen Parallelwiderstand geschwächt. Als verlustlose Fahrstellungen kommen also V, VI, IX, X und XI in Frage. Um die vielen starken Verbindungsleitungen zu sparen, kann der Motor, insbesondere die Feldschwächung auch durch Schütze, welche in der Nähe der Motoren untergebracht werden, geschaltet werden. Die Bremsung des Wagens erfolgt durch eine mechanische Bremse, ferner wird der Motor als Stromerzeuger auf einen Bremswiderstand B geschaltet. Außerdem ist dem Bremswiderstand noch ein Zugmagnet M parallel geschaltet, welcher Bremsklötze gegen die Räder preßt. Auch die Anhängewagen können mit solchen Zugmagneten ausgerüstet werden. Die

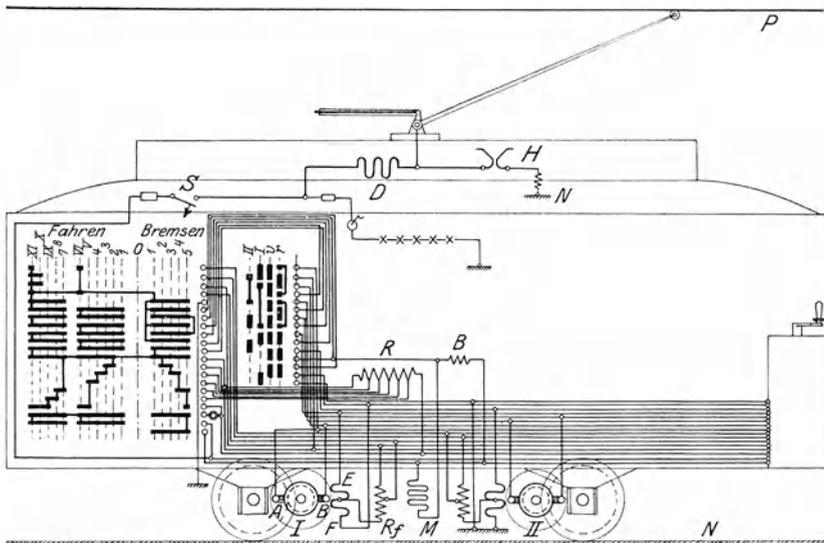


Abb. 441. Schaltung eines Motorwagens.

Abnahme des Stromes von dem Fahrdraht geschieht entweder durch Rollen- oder Schleifbügelstromabnehmer. Letztere haben sich hauptsächlich eingebürgert, weil sie bei Weichen nicht entgleisen können. Als Schleifkontakt dient des geringen Gewichtes wegen Aluminium oder Kohle. Parallel zur ganzen Motorschaltung liegt ein Hörnerableiter H als Blitzschutz. Außerdem ist der Motorschaltung die Drosselspule D vorgeschaltet, welche den Blitzentladeschwingungen hoher Wellenzahl den Weg zu den Motoren versperren soll. Die Lampen zur Wagenbeleuchtung müssen wegen der hohen Spannung hintereinander geschaltet werden.

b) Die elektrischen Fernbahnen. Für diese kommt hauptsächlich einphasiger Wechselstrom in Frage. Als Fahrdrachtspannung hat sich bei großen Entfernungen 15000 V bei  $16\frac{2}{3}$  Perioden eingebürgert. Mit dieser Spannung können Entfernungen von etwa 50 km überwunden

werden. Bei größeren Entfernungen werden in Abständen von etwa 50 km Transformatorstationen längs der Bahn errichtet, in denen die Speisespannung von 50 000—100 000 V auf die Fahrdrachtspannung von 15 000 V herabtransformiert wird. Die Wellenzahl wird sehr niedrig gewählt, weil dadurch nicht nur die Selbstinduktionsspannungen in den Zuleitungen, sondern auch im Motor kleiner werden, wodurch der Leistungsfaktor und die Kommutation günstiger werden. Auch die Induktionswirkung auf benachbarte Telephonleitungen wird bei kleiner Wellenzahl geringer sein. Man wählt die genannte gebrochene Zahl für die Wellenzahl, weil es gerade ein Drittel von 50 ist, wodurch die Umformung möglich ist. Durch die Verringerung der Wellenzahl werden andererseits die Transformatoren und die Stromerzeuger größer und teurer. Hinsichtlich der Motoren kann man sagen, daß der Reihenschlußmotor um so günstiger arbeitet, je niedriger die Wellenzahl ist, weil er sich damit immer mehr dem Gleichstrommotor nähert. Der Repulsionsmotor hingegen, dessen Läuferstrom ein Induktionsstrom ist, verhält sich bei hohen Wellenzahlen günstiger. Die Übertragung der Motorleistung auf die Radachsen kann bei geringeren Leistungen durch

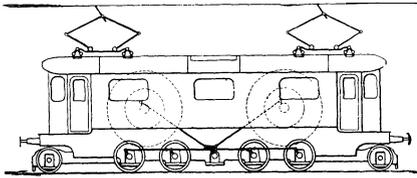


Abb. 442. Lokomotivantrieb.

Räderübersetzung erfolgen. Bei großen Leistungen und großer Geschwindigkeit wird der Motor hochgestellt und treibt nach Abb. 442 mittels Schubstange die gekuppelten Räder an. Zur Regelung der Motoren dient meistens ein Stufentransformator, dessen Stufen unter Benutzung von

Schützen mit dem Führerkontroller geschaltet werden können. Zuweilen werden zur Änderung der Motorspannung auch Drehtransformatoren verwandt, bei welchen die Sekundärwicklung gegen die Primärwicklung verdreht werden kann, so daß in ersterer je nach der Lage eine mehr oder weniger große Spannung entsteht.

Für den Aushilfsbetrieb bei der Staatseisenbahn haben sich in den letzten Jahren auch die Akkumulatoren-Triebwagen eingebürgert. Sie haben den Nachteil, daß die Batterie in kurzen Zeitabständen wieder aufgeladen werden muß, und daß das tote Gewicht der Wagen durch die Batterie außerordentlich groß ist. Wesentlich günstiger verhalten sich die mit einem Benzolmotor ausgerüsteten Wagen. Der Benzolmotor treibt einen Gleichstromerzeuger an und durch Änderung seiner Erregung wird in Leonardschaltung der Wagenmotor gesteuert.

**Die Elektrohängebahnen.** Diese zum Transport von Massengütern gern benutzten Einschienbahnen besitzen Wägelchen mit einem oder zwei Fahrwerksmotoren von höchstens  $\frac{1}{2}$  kW. Die Motoren können deshalb ohne Anlasser eingeschaltet werden. Man unterscheidet offene Fahrstrecken und geschlossene Ringstrecken. Auf den offenen Strecken kann immer nur ein einziger Wagen auf der Strecke hin- und herlaufen. Auf der Ringbahn hingegen behalten die Wagen stets die gleiche Fahrtrichtung bei, und es können so viele Wagen gleichzeitig laufen, als es der gegenseitige Abstand nur zuläßt. Die elektrische Ausrüstung eines

Hängebahnwagens besteht aus dem Motor, dem Bremsmagnet und zuweilen aus einem kleinen, dauernd eingeschalteten Widerstand, welcher den hohen Einschaltstrom etwas herabmindern soll. Durch einen kleinen angebauten Schalter kann man den Wagen nach Belieben stillsetzen. Um nun zu verhüten, daß die auf einer Ringstrecke laufenden Wagen zusammenstoßen, wobei sie unter Strom stehenbleiben könnten, ist eine Streckenblockierung nötig. Wie Abb. 443 zeigt, ist der Fahrdraht in einzelne, voneinander isolierte Strecken geteilt, deren Länge sich aus der Zahl der verkehrenden Wägelchen und aus der Arbeitsweise ergibt. An jeder Trennstelle ist ein sog. Blockschalter angeordnet, welcher jedesmal von dem vorbeistreichenden Schleifbügel eines jeden Wagens verstellt wird. Während die Laufschiene dauernd mit dem negativen Pol der Stromquelle verbunden ist, bekommen die Teilstrecken des Schleifdrahtes erst über die Blockschalter Strom. Die Wirkungsweise der Blockierung ist nun derart, daß der Wagen in dem Augenblick, in dem er die Blockstrecke *b* verläßt, diese mit dem Blockschalter *B* stromlos macht, und die dahinterliegende Strecke *c*, welche bis dahin stromlos

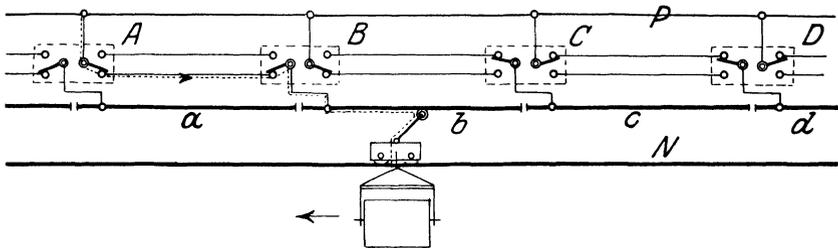


Abb. 443. Blockschaltung einer Elektrohängebahn.

war, wieder unter Spannung setzt. Der Wagen schafft also stets hinter sich eine stromlose Strecke, so daß ein nachkommender Wagen niemals auf seinen Vorläufer auflaufen kann. In der durch Abb. 443 wiedergegebenen Stellung empfängt die Blockstrecke *b* und damit der Wagen wie punktiert Strom über die Blockschalter *A* und *B*, deren Hebel beide nach unten stehen. Sobald aber der Wagen an *B* vorbeistreicht, dreht er dessen Hebel nach oben, wodurch *b* stromlos wird. Gleichzeitig ist aber durch den rechten Schalter in *B* Spannung auf die Blockstrecke *c* gegeben worden. Ein nachfolgender Wagen, welcher auf die Strecke *b* aufläuft, bleibt dort so lange stehen, bis der Vorderwagen die Strecke *a* verlassen hat. Die Blockschalter sind meist kleine gekapselte Walzenschalter mit einem Sternrad, welches bei jedem Wagnervorbeigang um einen Winkel von 30–60° weitergedreht wird. Wenn in die Fahrstrecke noch Abzweige einmünden, sind weitere Sicherungsmaßregeln durch Weichenschalter erforderlich (s. Schaltung 15 auf S. 439). Elektrohängebahnen haben wegen der zahlreichen längs der Bahn verteilten Blockschalter viele Störungsmöglichkeiten, die um so unangenehmer sind, je weniger zugänglich die Bahn ist. Es entsteht deshalb die Frage, ob sich die Blockschalter nicht überhaupt vermeiden lassen. Dies ist möglich wenn man die Stromgebung nach den einzelnen Blockstrecken von kleinen

Schützen besorgen läßt. Abb. 444 zeigt eine derartige Zentralblockierung der Firma Pohlig. Die bei ihr benutzten Schützen sind Hauptschlußschützen, d. h. ihre Spule mit geringem Ohmschen Widerstand ist mit dem Hängebahnmotor hintereinander geschaltet. Sie unterscheiden sich aber auch noch dadurch von normalen Schützen, daß sie ein Klinkwerk besitzen, welches den Kern in der Höchstlage festhält. Die Klinke löst sich, wenn das vorhergehende Schütz anzieht. Die Fahrleitungsschienen 1, 2, 3 und 4 stehen über die Schützenspule dauernd unter Spannung. Nur auf den Blockstrecken 11, 22, 33 und 44 kann ein Hängebahnwagen stillgesetzt werden. Diesen letzteren Strecken wird nämlich der Strom über die unteren Kontakte der Schützen zugeführt, und die Schaltung wirkt derart, daß ein Wagen, welcher auf eine der Hauptstrecken, z. B. auf 2 aufläuft, durch den Motorstrom Schütz b zum Anziehen bringt.

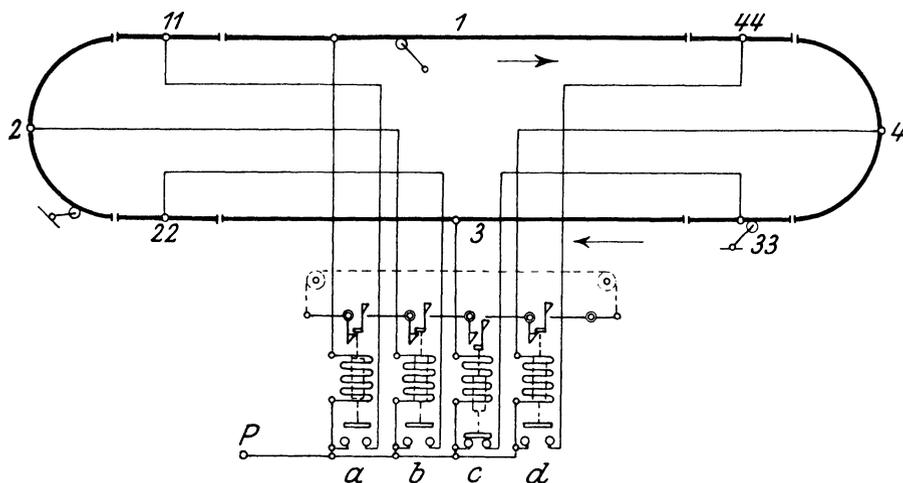


Abb. 444. Zentralblockierung von Pohlig.

Hierdurch werden die Hilfskontakte von b geöffnet, so daß die hinter 2 befindliche Blockstrecke 22 spannungslos wird. Während des Anziehens hat Schütz b aber auch die Klinke von c gelöst, wodurch die weiter zurückliegende Blockstrecke 33 wieder unter Spannung gekommen ist. Bei  $n$  verkehrenden Wagen braucht man  $2n$  Blockstrecken und  $n + 1$  Schützen.

Es kommt zuweilen vor, daß Elektrohängebahnen auch Steigungen zu überwinden haben. Wollte man die Fahrmotoren hierfür bemessen, so würden sie so groß werden, daß sie ohne Anlasser nicht mehr eingeschaltet werden dürften, auch wäre der Zusammenbau mit dem Wagen ziemlich schwierig. In solchen Fällen werden deshalb die Hängebahnwagen nach Abb. 445 durch einen Kettenzug hochgezogen, welcher von einem besonderen großen Motor angetrieben wird. Hängebahn und Kettenantrieb müssen nun derart eingerichtet sein, daß gegenseitige Störungen ausgeschlossen sind. An der unteren Stelle I legt sich die Kette selbsttätig in eine Gabel des Wagens ein und an der Stelle II entkuppelt sie sich wieder. Dafür, daß die Wagen im richtigen Abstand auf die Schrägstrecke auflaufen, sorgt die normale Blockierung, die in der unteren Schaltung der Abb. 445 auch gezeichnet ist. Auf der Schrägstrecke selbst ist eine Blockierung natürlich überflüssig. Die

Schaltung ist nun ferner so einzurichten, daß bei einem Ausbleiben der Spannung der Elektrohängebahn, auch der Kettenbahnmotor zum Stillstand kommt, weil derselbe sonst alle Wagen, die sich gerade auf der Schrägstrecke befinden, am oberen Ende zusammenschieben würde. Da nun die Hängebahnen, um mit einem Schleifdraht auszukommen, ausnahmslos mit Gleichstrom betrieben werden, der Kettenmotor aber mit dem meist vorhandenen Drehstrom, werden wir den Kettenbahnmotor mit einem Höchststromausschalter ausrüsten, welcher den Motor mittels der Hauptschlußspulen  $h$  gegen Überlastungen schützt, dessen Nullspannungsspule  $n$

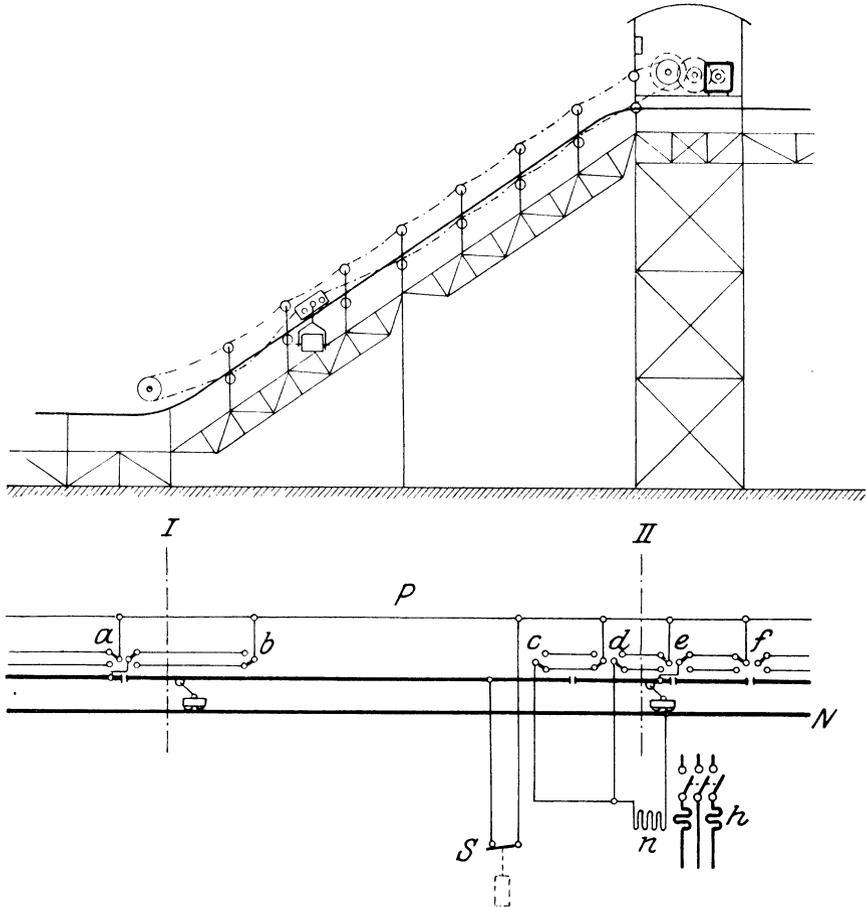


Abb. 445. Hängebahn mit Kettenschrägaufzug.

aber nicht am Drehstrom, sondern am Gleichstrom der Hängebahn liegt. Bleibt die Gleichstromspannung aus, so wird demnach der Hängebahnmotor auch abgeschaltet. Wenn die Schrägstrecke bei eingeschaltetem Gleichstrom ruht, besteht die Gefahr, daß die gerade auf der Schrägbahn befindlichen Hängebahnmotoren, die ruhend, dennoch von einem Strom durchflossen werden, verbrennen. Der Schleifdraht der Schrägstrecke muß deshalb so lange spannungslos sein, als der Kettenbahnmotor still steht. Man erreicht dies einfach dadurch, daß man dem Schleifdraht der Schrägstrecke den Strom über einen Schalter  $S$  zuführt, der mit dem Bremsmagneten des Kettenbahntriebwerks verbunden ist und sich erst schließt,

wenn der Magnet die Bremse lüftet. Nun ist noch weiter dafür zu sorgen, daß, wenn aus irgend einem Grunde ein Wagen nach der Entkuppelung bei II nicht ablaufen kann, dennoch eine Anhäufung von Wagen dort vermieden wird. Man kann dies dadurch erreichen, daß man Blockschalter c, d und e in wesentlich geringerem Abstand als bei den unteren Schaltern a und b anordnet, über welche der Nullspannungsspule n Spannung zugeführt wird. Dieselbe wird in dem in Abb. 445 gezeichneten Augenblick von P aus über Schalter d und c gespeist. Bleibt nun der Wagen in der gezeichneten Lage stehen und ein zweiter heraufkommender Wagen legt den Schalter c um, so wird n spannungslos und die Kettenbahn bleibt stehen.

Manche Hängebahnwagen müssen zur Aufnahme des Fördergutes mit einem Hubwerk ausgerüstet werden. Der erforderliche Hubmotor sowie auch vielfach der Fahrmotor sind dann zu groß, um ohne Anlasser eingeschaltet werden zu können. Um aber trotzdem den Betrieb möglichst selbsttätig zu gestalten, sind verschiedene Schaltungsmöglichkeiten ersonnen worden. Eine der bekanntesten wirkt derart, daß dem Wagen durch zwei Schleifleitungen Strom zugeführt wird und zwar mit der einen den eigentlichen Betriebsstrom, durch die andere einen Steuerstrom für einen Zugmagneten, der beim jedesmaligen Einschalten eine auf dem Hängebahnwagen befindliche Steuerwalze um eine Stellung weiterdreht. Diesen Stellungen entsprechen die einzelnen Tätigkeiten des Hängebahnwagens, wie Heben, Fahren, Senken. Das Anlassen geschieht mit einem Anlasser von dem feststehenden Führerstand aus.

## C. Der elektrische Antrieb in Bergwerken, Hütten- und Stahlwerken.

**1. In Bergwerken.** Der wichtigste Antrieb des Bergwerks ist der *Fördermaschinenantrieb*. In mechanischer Hinsicht sind bei den Fördermaschinen hauptsächlich zwei Bauarten zu unterscheiden, nämlich Trommelmaschinen, bei denen auf einer Doppeltrommel ein Seil auf- und ein anderes abgewickelt wird. An jedem Seilende hängt ein Förderkorb mit mehreren Stockwerken zur Aufnahme der Förderwagen. Dann ferner die Koepemaschinen, bei welchen das Förderseil nur um eine Treibscheibe geschlungen ist und an beiden Enden wieder die Förderkörbe trägt. Da bei den Koepemaschinen das Seil lediglich durch die Reibung auf dem Scheibenumfang mitgenommen wird, ist keine beliebig hohe Beschleunigung möglich, weil sonst das Seil rutschen würde. Bei Teufen von mehreren hundert Metern spielt auch das Seilgewicht eine große Rolle. Die Fördermaschinen erhalten deshalb oft einen Seilausgleich, derart, daß unter den Förderkörben ein die Körbe verbindendes Unterseil befestigt ist, dessen Gewicht also immer den hochstehenden Förderkübel mehr belastet. Damit der Führer in seinem Maschinenhaus den Stand der Förderkörbe jederzeit weiß, hat er einen Teufenzeiger, d. i. eine mit dem Winkwerk gekuppelte Spindel, auf welcher eine Wandermutter den jeweiligen Stand der Förderkörbe zeigt. Zur Bremsung steht dem Führer eine mechanische Bremse zur Verfügung, mit welcher er die Verzögerung der Massen zu bewirken hat, wenn nicht der Antriebsmotor die Bremsung übernimmt. Der Fördermaschinenbetrieb erfordert in erster Linie eine hohe Betriebssicherheit, die nur dann vorhanden sein kann, wenn jeder Stellung des Steuerhebels eine ganz bestimmte

Umlaufzahl des Antriebsmotors entspricht, die sich auch bei geringer Last oder bei negativen Drehmomenten nicht wesentlich ändert. Diese Bedingung erfüllt in vollkommener Weise nur die Leonardschaltung. Diese durch Abb. 446 schematisch dargestellte Schaltung trifft man deshalb bei Hauptschachtfördermaschinen fast ausschließlich. Zumeist steht in Bergwerken Drehstrom zur Verfügung, der einem Drehstrommotor *Dr* zugeführt wird. Dieser treibt einen Gleichstromerzeuger *D* und die Erregermaschine *E* an. Der Erregerstrom des Erzeugers *D* wird in bekannter Weise mit einem Steuerschalter *St* verändert, so daß der Fördermotor *M* eine beliebige hohe Spannung bekommt und entsprechend

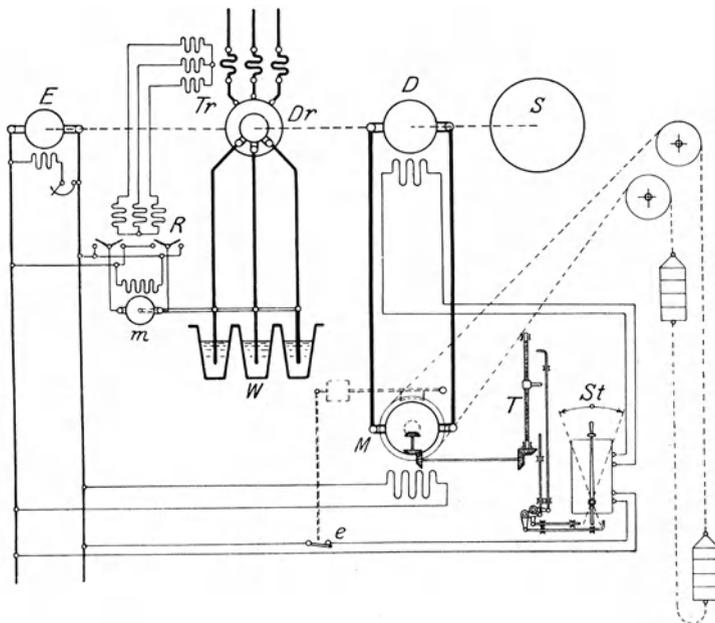


Abb. 446. Fördermaschine mit Leonardschaltung.

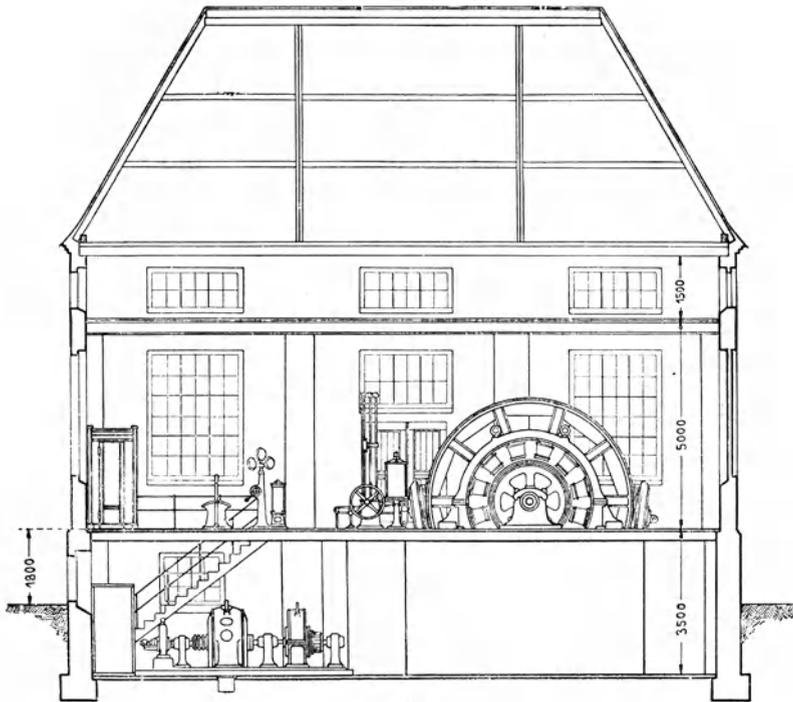
schnell läuft. Um die beim Anfahren unvermeidlichen Belastungsstöße vom Netz fernzuhalten, ist ein Energieausgleich erforderlich, wenn der Motor an ein verhältnismäßig kleines Kraftwerk angeschlossen ist. Dieser Ausgleich kann entweder durch ein Schwungrad oder durch eine Batterie erfolgen. In Abb. 446 trägt die Umformerachse noch ein schweres Schwungrad *S* (*Ilgnerumformer*), welches bei vorübergehenden Überlastungen den Mehrbedarf an Energie decken soll. Damit es überhaupt wirken kann, muß die Umlaufzahl des Umformers mit zunehmender Last stärker abfallen, als es bei einem normalen Drehstrommotor der Fall ist. Der Drehstrommotor hat deshalb einen Läufer-Wasserwiderstand *W*, welcher je nach der Belastung des Motors selbsttätig mehr oder weniger eingeschaltet wird. Der Motorstrom beeinflusst nämlich über einen Stromtransformator *T*, ein Stromrelais *R*, und dieses schaltet den Antriebsmotor *m* zum Wasserwiderstand, den sog. Schlupf Widerstand ein

und aus. Bei größeren Widerständen stehen die Eintauchplatten meistens fest und die Flüssigkeit wird mit einer Kreiselpumpe herein- oder herausgepumpt. Bei einem Ausgleich durch eine Batterie trägt die Umformerachse statt des Schwungrades eine Gleichstrommaschine, welcher eine Pufferbatterie parallel geschaltet ist. Bei Überlastung und verringerter Umformerdrehzahl läuft diese Puffermaschine als Motor treibend, bei Entlastung hingegen als Erzeuger die Batterie ladend.

Den Stand der Förderkörbe erkennt der Führer an dem Teufenzeiger T, welcher gleichzeitig eine selbsttätige Verzögerungsvorrichtung betätigt. Wie Abb. 446 erkennen läßt, schiebt die Wandermutter des Teufenzeigers in ihren Endlagen den Steuerschalter St in die Nullstellung zurück. Es ist also selbst bei völliger Unaufmerksamkeit des Führers ausgeschlossen, daß die Endstellungen überfahren werden. Die ständig benutzten Arbeitsbremsen werden mit Druckluft oder durch Hubmagnete gelüftet, die schwereren Notbremsen bleiben ständig gelüftet, sie werden durch Druckluft oder durch ein Windwerk angehoben und fallen ein, wenn die Endlagen überfahren werden oder auch, wenn die Spannung ausbleibt. Gleichzeitig wird der Schalter e geöffnet. Besitzt der Umformer in einem Schwungrad oder einer Batterie eine Energiereserve, so ist ein Einfallen der Notbremse beim Ausbleiben der Spannung nicht erwünscht. Vielmehr kann in solchen Fällen allein mit dem Schwungrad oder der Batterie die Fördermaschine noch eine Weile im Betrieb gehalten werden.

Die allgemeine Anordnung einer elektrisch betriebenen Fördermaschine geht aus Abb. 447 hervor. Der Antriebsmotor ist mit der Koescheibe direkt gekuppelt. Der Umformer, sowie die Schaltanlage zum Einschalten der den Umformermotor speisenden Hochspannung haben im Keller Aufstellung gefunden. Bei sehr großen Leistungen wird der Umformer hingegen oben aufgestellt, auch erhält er zuweilen, wenn er mit einem sehr schweren Schwungrad ausgerüstet ist, einen kleinen Antriebsmotor zur Ingangbringung. Die Steuerung des Antriebsmotors geschieht von dem Steuerbock aus, mit dessen Hebeln sowohl der Führerkontroller zur Regelung des Erregerstromes der Umformermaschine als auch die Bremse betätigt werden kann. Von seinem Stand aus kann der Führer den Teufenzeiger beobachten, welcher ihm den jeweiligen Stand der Förderkörbe anzeigt, ferner sieht er die Meßinstrumente der Schaltsäule, die ihm Spannung und Stromverbrauch des Fördermotors anzeigen. An einem weiterhin aufgestellten Tachographen kann der Führer die jeweilige Fahrgeschwindigkeit erkennen; auch schreibt dieses Instrument die Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Zeit dauernd auf, so daß noch nachträglich kontrolliert werden kann, ob die vorgeschriebenen Geschwindigkeiten überschritten worden sind.

Für die Hauptschacht-Fördermaschinen kommt die beschriebene Leonardschaltung fast ausschließlich zur Anwendung, weil sie gegenüber allen anderen Antrieben wesentliche Vorzüge besitzt. Die Regelung der Umlaufzahl und das Anlassen geschieht nahezu verlustlos, weil nur der kleine Erregerstrom der Steuerdynamo geregelt wird, vor allem aber ist bedeutungsvoll, daß jeder Stellung des Führerkontrollers eine ganz bestimmte Umlaufzahl entspricht, die sich auch dann nicht ändert,



Schnitt a-b

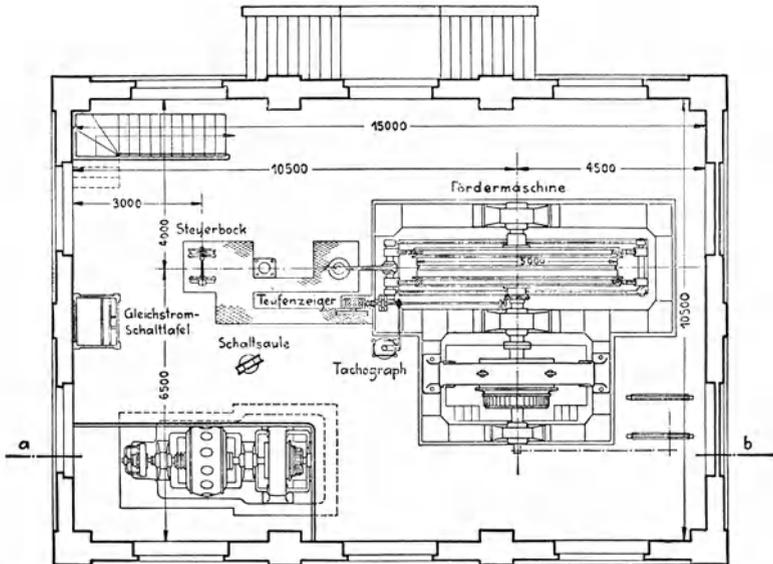


Abb. 447. Elektrisch angetriebene Fördermaschine mit Koescheibe.

wenn die Last wechselt oder wenn sogar ein negatives, den Motor unterstützendes Drehmoment auftritt. Ein Nachteil der Leonardschaltung sind ihre hohen Anschaffungskosten und die durch die Umformung der elektrischen Energie entstehenden höheren Verluste. Nun kommen aber im Bergwerksbetrieb neben den Hauptschacht-Fördermaschinen noch zahlreiche weitere Fördermaschinen und Förderhaspel vor, die weit weniger wichtig sind, und bei denen man sich die hohen Kosten eines Leonardumformers ersparen möchte. So erhalten z. B. die Wetter-schächte, durch welche die schlechte Luft der Grubenanlage abgesaugt wird, auch eine kleine Fördermaschine zur Beförderung irgendwelcher Materialien in oder aus der Grube. Ferner gibt es unter Tage blinde Förderschächte, welche der Förderung von einer Sohle zu einer anderen dienen, und welche mit kleinen, fast ausschließlich elektrischen Fördermaschinen ausgerüstet sind. Alle diese Maschinen, sowie auch die zahlreichen Streckenhaspel erhalten Motorantrieb mit direkter Speisung aus dem Netz. Da fast immer Drehstrom zur Verfügung steht, kommen der Drehstrom-Asynchronmotor und der Drehstrom-Kommutatormotor in Frage. Der normale Drehstrommotor zeichnet sich durch höchste Einfachheit und Billigkeit aus, auch wird sein Wirkungsgrad weder von der Leonardschaltung noch von dem Kommutatormotor erreicht. Das Anlassen und Regeln der Umlaufzahl muß allerdings durch die energieverzehrenden Widerstände des Läuferstromkreises geschehen. Es leuchtet ein, daß der gute Wirkungsgrad des Drehstrommotors deshalb nur dann zur Geltung kommt, wenn die Fahrzeit im Verhältnis zur Anfahrzeit sehr groß ist, also bei großen Teufen. Ein besonders wichtiger Nachteil des Asynchronmotors ist jedoch der, daß seine Umlaufzahl bei eingeschaltetem Läuferwiderstand sehr stark von der Belastung abhängt, und daß eine Bremsung unterhalb der normalen Umlaufzahl, also eine elektrische Verzögerung nicht durchführbar ist. Es hat also keinen großen Zweck, bei ihm mittels einer Übertragung vom Teufenzeiger zum Führerkontroller das Abschalten selbsttätig zu machen, weil bei auftretendem negativen Moment einer Zurückdrehung des Steuerschalters sogar eine höhere Geschwindigkeit folgen würde. Vorteilhaft ist es, wenn man durch einen angebauten Schleuderschalter unzulässige Geschwindigkeitssteigerungen verhütet. Es ist ferner noch als Nachteil des Drehstrommotors zu erwähnen, daß er sich nicht so leicht für die niedrige Drehzahl der Förderscheibenwelle bauen läßt, daß also meist ein oder gar zwei Zahnradvorgelege erforderlich sind, die natürlich den Vorteil eines guten Motorwirkungsgrades wieder aufheben. Besser als der Asynchronmotor eignet sich der zwar kompliziertere und auch empfindlichere Kommutatormotor. Nach dem Früheren müßte der Drehstrom-Nebenschlußmotor mit seiner von der Belastung unabhängigen, konstanten Umlaufzahl am besten für den Förderbetrieb geeignet sein. Daß man bis jetzt stets den Drehstrom-Hauptschlußmotor statt jenes Motors eingebaut hat, liegt wohl nur daran, daß der Nebenschlußmotor mit Bürstenregelung noch ganz neu ist. Die Kommutatormotoren haben den wichtigen Vorzug, daß die Regelung verlustlos erfolgt, daß also auch bei geringen Teufen, bei denen die Anlaßzeit eine erhebliche Rolle spielt, noch ein wirtschaftlicher Betrieb zu erzielen ist.

Bei dem Hauptschlußmotor hängt die Umlaufzahl allerdings in hohem Maße von der Größe der Belastung ab, es ist jedoch durch Verdrehen der Bürsten im Gegensinne eine beliebig starke Bremsung möglich, so daß im Gegensatz zum Asynchronmotor die mechanische Bremse in der Hauptsache nur zum Halten benutzt zu werden braucht. Sowohl bei dem Kommutatormotor, als auch bei dem Asynchronmotor läßt sich die Einwirkung der Anlaufstromstöße auf das Netz nur sehr schwer beseitigen.

Für die Berechnung der Förderleistung dient die Fördermenge als Grundlage. Dieselbe kann jedoch im allgemeinen nicht beliebig gewählt werden, sondern hängt von dem Schacht und den übrigen Einrichtungen ab, z. B. fassen die üblichen Förderhunte je etwa eine halbe Tonne Kohlen. Nimmt man nun einmal einen großen Förderkorb mit vier übereinander liegenden Stockwerken an, sowie, daß in jedes dieser Abteile zwei Hunte hintereinander geschoben werden, so würden mit einem Zuge 8 mal  $0,5 = 4$  t Kohlen gefördert. Das Gewicht des Fahrkorbs und der Hunte ist durch den am anderen Seilende hängenden, abwärts fahrenden Korb mit leeren Hunten ausgeglichen. Das nicht unbeträchtliche Gewicht des Förderseiles muß berücksichtigt werden, wenn es nicht durch ein Unterseil ausgeglichen ist. Auch die Fördergeschwindigkeit schwankt nur in engen Grenzen. Bei Teufen von 300 bis 400 m werden etwa 15 m je Sek., bei Teufen von 600—800 m bis 20 und sogar 25 m je Sek. erreicht. Die Größe der Anfahrbeschleunigung hängt ferner von dem Bau der Fördermaschine ab. Während man bei Koepemaschinen wegen der Gefahr des Seilrutschens nur mit etwa 1 m/Sek.<sup>2</sup> rechnen darf, kann bei Trommelmaschinen mit 1,2—1,5 m/Sek.<sup>2</sup> angefahren werden. Aus der Anfahrbeschleunigung, der Fahrgeschwindigkeit und der Teufe kann man nun das Geschwindigkeitsdiagramm für ein Treiben ausrechnen. Die Pause bis zum neuen Anfahren ergibt sich durch die Zeit, welche nötig ist, um die gefüllten Hunte an der Hängebank aus- und leere einzustoßen. Zu gleicher Zeit werden natürlich auf der Grubensohle leere Hunte aus- und gefüllte eingestoßen. Es ist hierbei jedoch zu bedenken, daß der Förderkorb mehrstöckig ist, und daß das Ausstoßen der Hunte in den einzelnen Korbstockwerken nacheinander geschieht, wobei die Fördermaschine jedesmal eine Verschiebung des Förderkorbes um die Stockwerkhöhe vornehmen muß. Die Pause wird hierdurch größer, ebenso wird der Fördermotor durch die mehrfachen Anlaufstöße höher beansprucht. Nachdem das Geschwindigkeitsdiagramm festgelegt ist, kann nach Gleichung 65 die jeweils erforderliche Leistung ausgerechnet werden, wobei als Wirkungsgrad des mechanischen Teiles der Fördermaschine etwa 0,85 angenommen werden kann. Die Beschleunigungsarbeit beim Anlauf ist natürlich zu berücksichtigen. Aus dem Leistungsdiagramm können wir dann in der früher erwähnten Weise die effektive Leistung ermitteln.

Die oben erwähnten hohen Fahrgeschwindigkeiten, die an Schnellzugsgeschwindigkeit heranreichen, sind nur für Materialfahrten, also für Kohle oder Berge zulässig. Für Seilfahrten mit Personen sind bei der sichersten aller Schaltungen, der Leonardschaltung, nur 10 m/Sek. zulässig. Es ergibt sich schon hieraus, daß für Fördermaschinen die

Regelbarkeit eines Motors eine bedeutsame Rolle spielt. Für Revisionsfahrten, die in jeder der täglich eingelegten Reparaturschicht gefahren werden müssen, muß jedoch noch viel langsamer gefahren werden, damit dabei das Innere des Schachtes, sowie die Beschaffenheit des Seiles genau geprüft werden kann. Bei dem Antrieb durch Asynchronmotoren ist diese Forderung nicht leicht zu erfüllen, weil nur der stark belastete Motor langsam läuft, wenn man Widerstand in den Läuferstromkreis schaltet. Es ist deshalb bei solchem Antrieb bei den Revisionsfahrten eine künstliche Belastung der Förderseile vorzunehmen.

Die bereits erwähnten Streckenhaspel zeichnen sich gegenüber den Fördermaschinen durch größte Einfachheit aus. Als Antriebsmotor dient deshalb immer ein Drehstrommotor mit Kontrollersteuerung. Die einzigen Sicherheitsapparate sind Endschalter.

Die unter Tage eingebauten Förderhaspel müssen schlagwettersichere elektrische Ausrüstungen haben. Der Schleifringkörper der Motoren wird vollkommen gekapselt, die Schalterkontakte werden unter Öl gelegt, und die Widerstände werden so reichlich bemessen, daß eine gefährliche Erwärmung ausgeschlossen ist.

**Die Wasserhaltungen.** Es ist zu unterscheiden zwischen Abteufpumpen, welche die beim Abteufen eines Schachtes eindringenden Wassermassen hinausbefördern sollen, und ortsfesten Pumpenanlagen, welche in eingesprengte Pumpenkammern unter Tage eingebaut sind, und welche das während des Betriebes eindringende Wasser fördern. Die Abteufpumpen müssen sich der jeweiligen Schachttiefe anpassen, sie müssen also beweglich sein. Abb. 448 zeigt eine Abteufpumpe. In einen, an Seilen aufgehängten Senkrahmen ist ein Vertikalmotor mit Kreiselpumpe eingebaut. Wegen der großen Nässe ist ein vollkommen gekapselter Motor erforderlich, der nicht anders als durch Wasser gekühlt werden kann. Da es im Schacht unmöglich ist, den Motor öfter nachzusehen, kommt trotz sehr großer Leistungen nur ein Drehstrom-Kurzschlußmotor in Frage, der von einer Stelle über Tage aus mittels Anlaßtransformators angelassen werden kann. Zum Betriebe werden Spannungen bis 3000 V benutzt. Höhere Spannungen erlaubt das bewegliche Abteufkabel nicht.

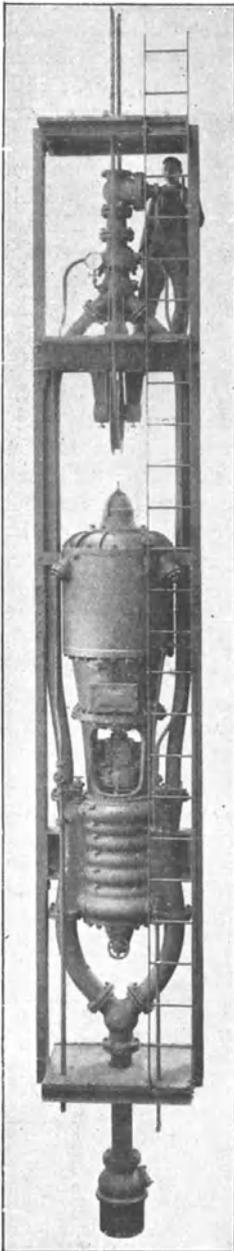


Abb. 448.  
Abteufpumpe.

Dasselbe muß mit der Pumpe gehoben und gesenkt werden können, es ist deshalb oben auf eine Kabeltrommel aufgewickelt. Zur Erzielung einer großen Biegsamkeit erhält der vieldrätige Leiter (höchstens  $3 \times 150 \text{ mm}^2$ ) des Abteufkabels keinen Bleimantel, sondern statt dessen einen wasserdichten Gummimantel, der außen durch dünne Stahldrahtseile bewehrt ist. Die Beanspruchung der Abteufpumpen ist keine gleichmäßige. Während der Sprengungen wird die Pumpe hochgezogen, es sammelt sich infolgedessen ziemlich viel Wasser an, welches nach dem Wiederabsenken der Pumpe eine erhöhte Leistung erfordert. Die Regelung der Leistung geschieht durch den Druckschieber unter genauer Beobachtung des in das Abteufkabel eingeschalteten Strommessers. Durch ein zu weites Öffnen des Schiebers könnte der Motor überlastet werden. Die Abteufpumpen heben das Wasser entweder bis über Tage, oder sie werfen es ortfesten Pumpen zu, welche in Pumpenkammern unter Tage untergebracht sind.

Bei ortsfesten Grubenpumpen kommt außer der Kreiselpumpe auch die mit wesentlich besserem Wirkungsgrad arbeitende Kolbenpumpe in Frage. Besonders bei großen Druckhöhen, und wenn der größere Raumbedarf keine Rolle spielt, werden sie vorgezogen. Der elektrische Antrieb dieser Pumpen weist keine Besonderheiten auf. Es kann sogar häufig auf eine schlagwettersichere Ausführung der Ausrüstung verzichtet werden, wenn die Pumpenkammern an dem Schacht liegen, in welchem die Frischluft einzieht.

Sollte eine Regelung der geförderten Wassermengen nötig sein, so läßt sich dieselbe, da stets Drehstrom zum Antrieb zur Verfügung steht, mittels Regelsatz nach Abb. 288 durchführen. Große Antriebsmotoren haben zuweilen ihren eigenen Stromerzeuger. In diesem Falle kann der Pumpenmotor als Kurzschlußmotor ausgeführt werden. Derselbe läuft dann mit dem Stromerzeuger an. Um bei großen Druckhöhen das Anlaufmoment herabzusetzen, kann man im Anlauf das Druckwasser treibend auf die Pumpe wirken lassen, oder man öffnet einen Umlauf, so daß der Kolbenraum vor und hinter dem Kolben miteinander verbunden ist.

**Die Grubenventilatoren.** Jede Grube braucht je nach ihrer Ausdehnung und der Anzahl der darin beschäftigten Menschen oder Pferde eine bestimmte Luftmenge. Dieselbe haben die über Tage aufgestellten Grubenventilatoren herbeizuschaffen. Die Anordnung ist im allgemeinen derart, daß die Ventilatoren die schlechten Wetter absaugen. Die Frischluft zieht meist durch den Hauptförderschacht ein, während die Ventilatoren an einem entfernten Wetterschacht Aufstellung finden. Dieser Schacht muß natürlich oben luftdicht abgeschlossen sein. Abb. 449 zeigt ein Ventilatorenhaus im Grundriß, in welchem zwei Ventilatoren V untergebracht sind. Dieselben saugen in der Pfeilrichtung aus dem Wetterschacht an und werfen die schlechten Wetter durch die Öffnung A in die freie Luft. Die Luftmenge, die eine Grube braucht, ist nicht konstant, sie wächst mit zunehmender Ausdehnung und richtet sich auch nach der Stärke der Beschäftigung und der Art, wie mit Hilfe von Wettertüren u. dgl. die Wetter in der Grube geleitet werden. Ferner ist bei Schlagwettergefahr eine plötzliche Vergrößerung der Luftmenge um etwa 25% vorgeschrieben. Eine veränderliche Luftmenge bedingt aber einen regelbaren Motor. Da die dem Ventilator zugeführte Leistung nur zur Beschleunigung einer Luftmasse dient, steigt das

Drehmoment  $M$ , wie Abb. 450 zeigt, bei steigender Drehzahl quadratisch an. Die Antriebsleistung  $\mathcal{G}$  wächst also mit der dritten Potenz. Die Abbildung lehrt, daß eine Verminderung der Umlaufzahl um 20%

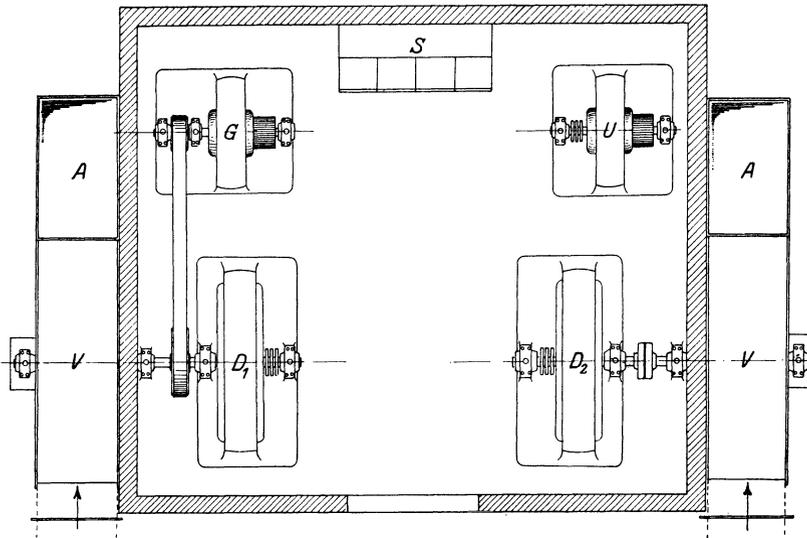


Abb. 449. Grubenventilatorenantrieb.

eine Leistungsabnahme von etwa 50% nach sich zieht. Es genügt demnach schon ein geringer Regelbereich des Antriebsmotors, um jede verlangte Luftmenge einstellen zu können. Da auf Gruben fast immer

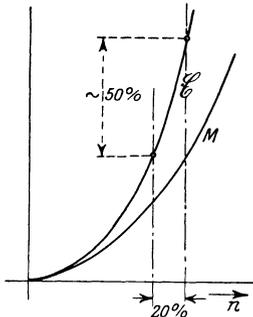


Abb. 450. Drehmoment und Leistung eines Ventilators in Abhängigkeit von der Drehzahl.

Drehstrom zur Verfügung steht, liegt es nahe, die Regelung des Drehstrommotors mit dem Läuferwiderstand zu besorgen. Dies ist bei kleineren Leistungen auch ganz angebracht, bei den häufig vorkommenden Leistungen von mehreren hundert bis 2000 kW spielen die dabei auftretenden Verluste jedoch eine große Rolle, zumal der Motor meist monatelang unverändert mit der einmal eingestellten Umlaufzahl arbeitet. Man verwendet deshalb häufig die bereits früher beschriebene, verlustlos arbeitende Regelung eines Drehstrommotors, die durch Abb. 288 schematisch dargestellt ist. Bei der Anlage nach Abb. 449 sind zwei Ventilatoren gleicher Leistung zur Aufstellung gekommen. Während der eine von dem Drehstrommotor  $D_2$  ohne Regelmöglichkeit angetrieben wird, wird der Läuferstrom des anderen Antriebsmotors  $D_1$  einem Umformer  $U$  zugeführt und von diesem in Gleichstrom verwandelt. Dieser Gleichstrom dient zum Antrieb des Gleichstrommotors  $G$ , welcher mittels Riemens auf die Ventilatorwelle treibend wirkt.  $S$  ist die Schaltanlage. Wenn

mit verminderter Drehzahl gefahren werden soll, wird der Motor  $D_1$  benutzt, bei voller Leistung jedoch zur Ersparung der in den Nebenmaschinen auftretenden Verluste der zweite Motor  $D_2$ , der auch zugleich als Reserve des ersten Motors anzusehen ist. Die Leonardschaltung ist bei Ventilatorenantrieb meist ungünstiger als der Antrieb mit Regelsatz, weil deren Umformermaschinen ebenso groß, wie der Antriebsmotor sein müssen, aber bei Drehzahlverminderung nicht ausgenutzt sind.

Die Antriebsleistung eines Ventilators berechnet sich aus der verlangten Luftmenge  $Q$  in  $m^3$  je Sekunde und aus dem Unterdruck  $h$  in mm Wassersäule (Depression), welcher notwendig ist, um diese Luftmenge durch die Schächte zu treiben, und welche entweder durch Versuche oder durch Rechnungen angenähert ermittelt werden kann. Es gilt dann eine ganz ähnliche Beziehung wie bei den sonstigen Hebe-  
maschinen, nämlich:

$$\mathcal{E} = \frac{Q \cdot h}{102 \cdot \eta} \dots \dots \dots 67$$

Der mechanische Wirkungsgrad  $\eta$  der Ventilatoren ist nicht sehr groß. Er schwankt bei Grubenventilatoren je nach der Größe derselben zwischen 0,4 und 0,8.

**Beispiel:** Für eine Grube sei nach der Zahl der Grubenarbeiter eine minutliche Wettermenge von  $5000 m^3$  vorgeschrieben. Der erforderliche Unterdruck sei zu  $250 \text{ mm W-S}$  ermittelt worden. Wie groß muß die Antriebsleistung des Grubenventilators sein, wenn der mechanische Wirkungsgrad desselben zu  $0,6$  angenommen wird? Nach obiger Beziehung ist, da die sekundliche Wettermenge  $5000 : 60 = 83 m^3$  beträgt:

$$\mathcal{E} = \frac{83 \cdot 250}{102 \cdot 0,6} = 340 \text{ kW Dauerleistung.}$$

Außer den beschriebenen Antrieben kommen in Grubenanlagen über Tage noch zahlreiche weitere Antriebe vor. Die Kohlenwäschen erfordern Becherwerke, Transportbänder, Schnecken und Pumpen, deren Antriebe keine Besonderheiten aufweisen, weil der normale Drehstrommotor benutzt wird. Da es in diesen Anlagen meistens ohnehin nicht sauber ist, wird als Anlasser oft der billige Flüssigkeitsanlasser vorgezogen.

Erwähnung verdient jedoch noch der elektrische Antrieb der *Brikettpressen*. Dieselben besitzen Schwungmassen und brauchen deshalb einen Motor mit etwas abfallender Drehzahl. Bei dem selten vorhandenen Gleichstrom käme also ein Nebenschlußmotor mit schwacher Hauptschlußwicklung in Frage. Die Pressen erfordern jedoch weiterhin eine ziemlich starke Änderung der Geschwindigkeit. Beim Einlegen der neuen Brikettformen muß die Presse ganz langsam laufen, beim sogenannten Anpressen muß sie etwa mit halber Drehzahl laufen, damit dabei die nötige Kohlenmenge und die Stempelstellung ausprobiert werden kann. Diese Bedingung kann nur ein regelbarer Gleichstrommotor erfüllen. Im allgemeinen genügt eine Regelbarkeit von  $1 : 2$ . Steht jedoch Drehstrom zur Verfügung, so ist ein Drehstrom-Kommutatormotor zu empfehlen. Der Drehstromhauptschlußmotor ermöglicht durch den Abfall seiner Drehzahl zwar die gute Wirkung der Schwungmassen, er benötigt

aber noch besondere Schleuderschalter, welche ein Durchgehen im Leerlauf verhüten. Der Drehstrom-Nebenschlußmotor hingegen muß so gebaut werden, daß seine Drehzahl stärker, als bei dem normalen Motor abfällt. Mit Rücksicht auf den starken Schmutz im Pressenraum ist es gut, den Motor mit seinen Apparaten in einem abgetrennten Raum aufzustellen. Das Anlassen und Regeln muß jedoch vom Pressenkopf aus möglich sein, wo auch ein Strommesser zur Beobachtung beim Regeln wünschenswert ist.

**2. In Hüttenwerken.** Der Hochofen braucht Eisenerze, Koks und geringe Mengen Kalk, welche mittels *Aufzügen* zur Gicht befördert

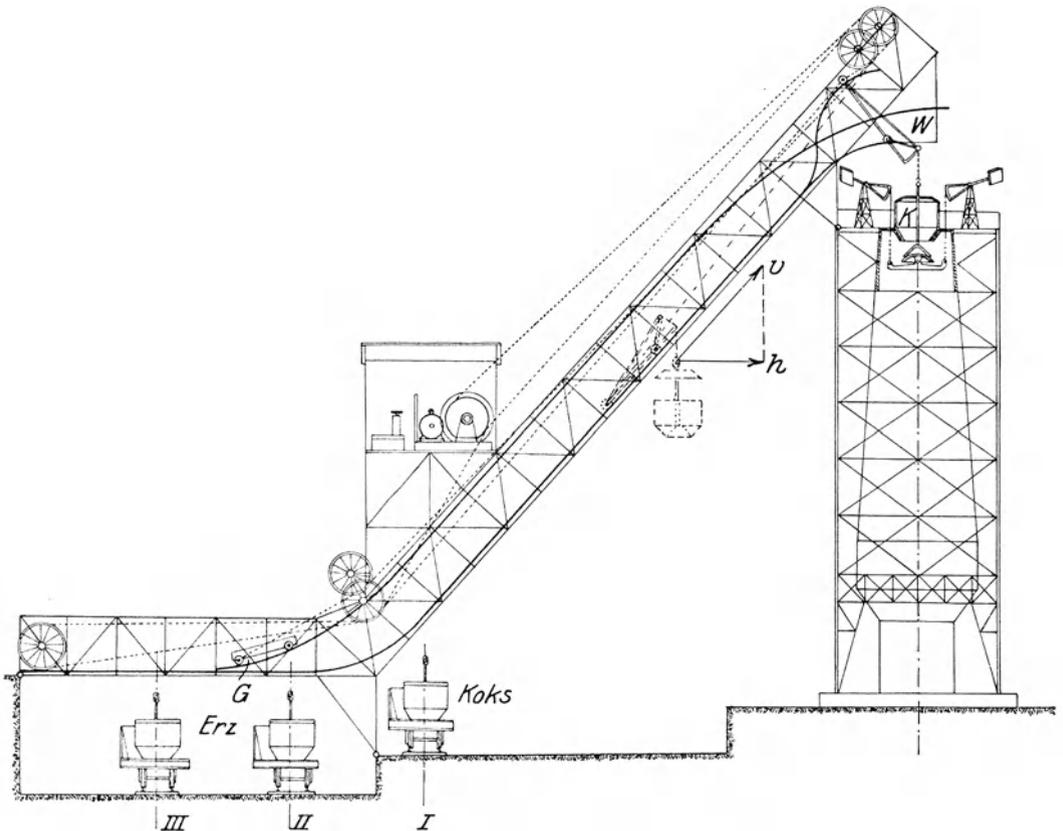


Abb. 451. Hochofen-Schrägaufzug System Stähler und Benrath.

werden müssen. Die Aufzugsleistung richtet sich nach der Größe des Ofens. Ein Ofen mit einer Tagesleistung von beispielsweise 200 t Roheisen braucht bei einer Ausnützung der Eisenerze von 30% etwa 670 t Erz. Beträgt das Fassungsvermögen des Fördergefäßes z. B. 6 t, so sind 111 Hübe im Tag zu fahren, d. s. unter Abzug der Essenspausen etwa 6 Hübe in der Stunde. Für die Verhüttung der obigen Erzmenge

braucht man erfahrungsgemäß 250 t Koks, von welchem das obige Fördergefäß 2,5 t faßt. Es sind also im Tag 100 Kokshübe zu machen, stündlich demnach 5 Hübe. Insgesamt hat unser Aufzug demnach in der Stunde 11 Fahrten zu machen, woraus sich unter Festlegung der nötigen Pausen die Fahrgeschwindigkeit und die Antriebsleistung ergibt. Das heute am weitesten verbreitete Begichtungssystem ist das durch Abb. 451 dargestellte, bei welchem ein Förderkübel K an einer Laufkatze pendelnd aufgehängt ist. Der Kübel wird auf die Gichtöffnung des Ofens aufgesetzt und durch weitere Absenkung des glockenförmigen Bodens entleert, wobei sich die Gichtglocke, die den Ofen sonst abschließt, mitöffnet. Ein Gewichtswagen G dient als Gegengewicht. Die Aufnahme der Kübel mit Koks erfolgt in dem Gleise I von Zubringerwagen, diejenige der Erzkübel in den anderen Gleisen. Die Steuerung des Schrägaufzugs erfolgt von einem besonderen Führerhaus aus, in welchem ebenso wie bei den Fördermaschinen ein Teufenzeiger dem Führer die jeweilige Katzenstellung angibt. Die elektrischen Einrichtungen derartiger Schrägaufzüge sind ziemlich verwickelt, weil trotz der großen Leistungen eine halb selbsttätige Steuerung erforderlich ist. Ein Haupterschwer- nis ist die pendelnde Aufhängung des Kübels. Derselbe darf während der Fahrt keineswegs ins Pendeln kommen, weil er sich sonst weder auf die Gicht, noch auf die Zubringerwagen richtig aufsetzt. Eine Pendelung läßt

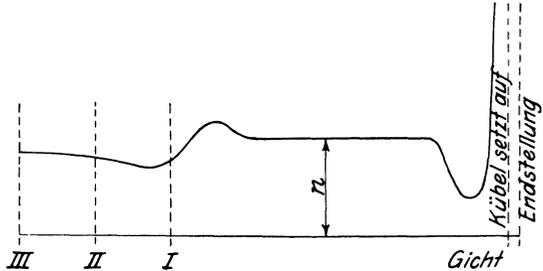


Abb. 452. Notwendige Motordrehzahl bei konstanter Horizontalgeschwindigkeit des Kübels.

sich aber nur dadurch vermeiden, daß man die Horizontalgeschwindigkeit  $h$  des Kübels während der ganzen Fahrt, also auch während des Durchfahrens der Krümmungen, entweder gleich groß hält oder doch mindestens ganz gleichmäßig vermindert oder vermehrt. Aus der Form der Bahn und der Art der Kübelaufhängung läßt sich nun ermitteln, welche Motorgeschwindigkeit an den verschiedenen Stellen vorhanden sein müßte, damit die Horizontalgeschwindigkeit des Kübels stets die gleiche ist. Abb. 452 stellt die erforderliche Motordrehzahl dar. Wenn der mit  $n$  bezeichnete Wert, welcher während der Fahrt auf der Schrägstrecke vorhanden sein muß, gleich der normalen Drehzahl des Antriebsmotors gewählt wird, so lehrt die Drehzahllinie, daß sowohl an der unteren, als auch an der oberen Bahnkrümmung eine Erhöhung der Geschwindigkeit nötig ist. Dieselbe ließe sich bei Gleichstrom-Nebenschlußmotoren zwar leicht durch eine Feldschwächung erreichen, da aber bei so hohen Geschwindigkeiten schon die geringste Ungenauigkeit dennoch ein Pendeln des Kübels verursachen würde, zieht man es vor, die Geschwindigkeiten auf der Schrägstrecke als die höchste festzulegen. Es ist klar, daß dann die Horizontalgeschwindigkeit nicht mehr dauernd konstant sein kann. Vielmehr muß man vor

der unteren Bahnkrümmung eine Strecke konstanter Verzögerung mit darauffolgender Beschleunigung einschalten. Ebenso muß beim Aufahren auf die Gicht eine Verzögerungsstrecke eingeschaltet werden. Es leuchtet ferner ein, daß man es nicht dem Führer überlassen darf, die Verzögerungen einzuschalten, weil doch Beginn und Stärke ganz genau stimmen müssen. Eine mechanische Zurückschiebung des Steuerschalters, wie wir es bei den Fördermaschinen kennen gelernt haben, ist hier nicht vorteilhaft, weil an verschiedenen anderen Stellen der Fahrt der Führer wieder die volle Herrschaft über den Aufzug haben muß. Man kuppelt deshalb mit dem Triebwerk einen sog. Fahrtbegrenzer, den Abb. 453 darstellt, und der ähnlich wie ein Kopierapparat bei Aufzügen wirkt. Die Trommel des Fahrtbegrenzers macht knapp eine Umdrehung, wenn der Aufzug einen ganzen Hub macht und hat auf ihrem

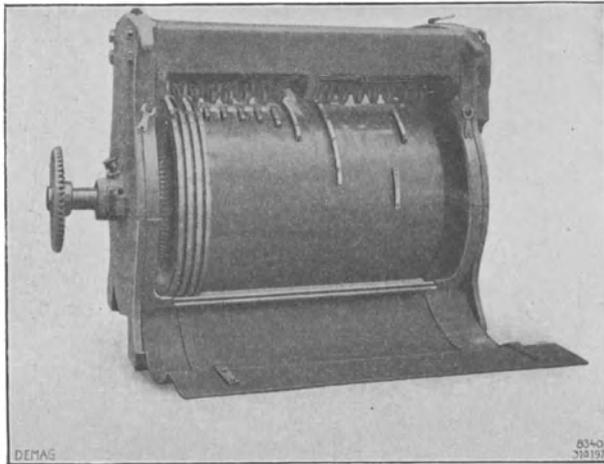


Abb. 453. Fahrtbegrenzer.

Umfang Segmente, welche bei der Drehung Schalter öffnen und schließen. Mit diesen kann man wegen der langsamen Bewegung zwar keine Motorströme schalten, wohl aber die Erregerströme in Leonardschaltung oder die Spulenströme von Schützen. Die Schaltung eines Schrägaufzugs in Leonardschaltung ist durch Abb. 454 dargestellt, und zwar ist links unten zunächst einmal ein Übersichtsschema für die Fahrt von der Gicht abwärts gezeichnet. In diesem Schema ist der von Hand bewegte Steuerschalter St einfach durch eine Reihe nebeneinander liegender Unterbrechungsstellen dargestellt, mit denen die Unterbrechungsstellen des Fahrtbegrenzers F hintereinander geschaltet sind. Hieraus geht hervor, daß bei verschiedener Stellung der beiden Schaltapparate, der Motor sich nach demjenigen richten muß, der die geringste Geschwindigkeit vorschreibt. Wenn z. B. alle Schalter des Fahrtbegrenzers F eingeschaltet sind, so kann der Führer mit allen Stufen des Steuerschalters St Widerstand in den Erregerstromkreis des Erzeugers D schalten;

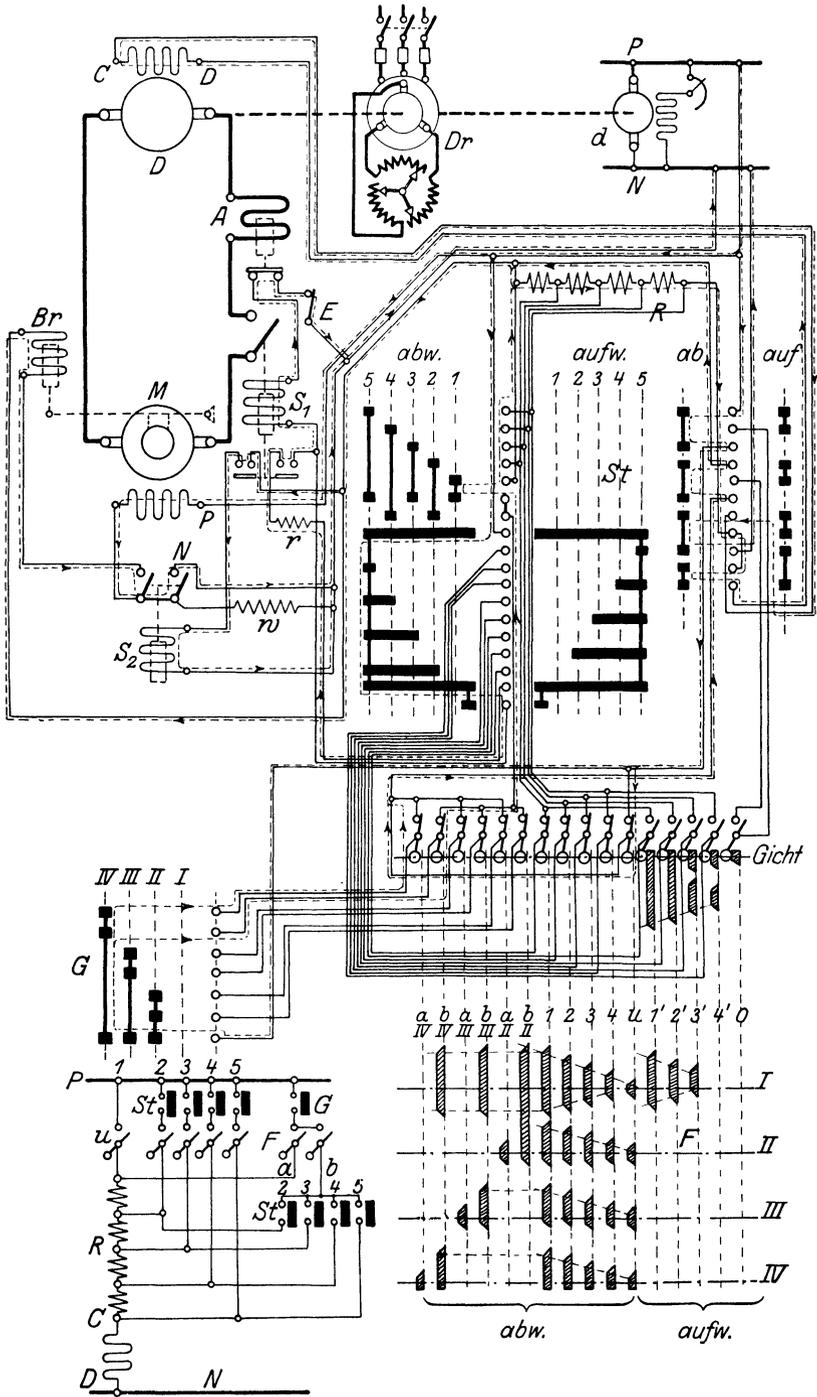


Abb. 454. Schaltung eines Hochofenschrägaufzugs.

sind aber vom Fahrtbegrenzer nur die in den Stufen 2 und 3 liegenden Schalter geschlossen, so kann der Führer zwar die Meisterwalze St über diese Stufen hinausdrehen, eine Abschaltung von Widerstand erfolgt aber dadurch nicht. Der Schalter u ist der Endschalter für Abwärtsfahrt. Er wird vor der Haltestelle I vom Fahrtbegrenzer geöffnet. Will man nun aber zur Haltestelle II oder noch weiter fahren, so muß der Schalter u überbrückt werden, sobald man an der Haltestelle I vorbeikommt. Zu diesem Zweck ist zunächst ein Gleiswähler G vorhanden, mit dem man die Haltestelle einstellt, ferner Fahrtbegrenzerschalter a, welche während des Vorbeifahrens an einer nicht gewünschten Haltestelle den Endschalter u überbrückt halten. Dann ist aber weiter noch ein Fahrtbegrenzerschalter b vorhanden, welcher, wenn er geschlossen ist, alle bisher betrachteten Schalter von St und F umgeht. Wenn also dieser Schalter b eingelegt ist kann man, unabhängig vom Fahrtbegrenzer, mit der Meisterwalze St, und zwar über die rechts gezeichneten Kontakte 2—5 Widerstand aus dem Erregerstromkreis abschalten. Der Fahrtbegrenzer ist in diesem Falle einfach ausgeschaltet. Wir wollen jetzt die eigentliche Schaltung Abb. 454 betrachten. Der Drehstrommotor Dr treibt den Erzeuger D und die Erregermaschine d. M ist der Antriebsmotor und Br der Bremsmagnet der Arbeitsbremse.  $S_1$  ist ein Schütz in Nullspannungsschaltung, welches den Motorstrom schaltet, während Schütz  $S_2$  den Bremsmagnet und die Motorerregung schaltet. E ist ein Endschalter, welcher von der einfallenden Notbremse geöffnet wird, wodurch verhindert wird, daß der Motor auf die festgebremste Winde arbeitet. Bei Überlastungen unterbricht der Höchststromauslöser A den Spulenstrom des Schützes  $S_1$ . Schütz  $S_2$  kann erst Strom bekommen, nachdem Schütz  $S_1$  angezogen ist, weil der Spulenstrom des ersteren über Hilfskontakte des letzteren geführt ist. Sobald  $S_2$  angesprungen ist, liegt die Motor-Erregerwicklung zwischen P und N, also an voller Spannung. Bei geöffnetem Schütz ist aber die Wicklung nicht ganz abgeschaltet, sondern sie liegt jetzt unter Vorschaltung des Widerstandes w zwischen P und N. Man erreicht durch diese Schaltung, daß sich der Motor in den Betriebspausen durch die Erregung nicht so sehr erwärmt. Eine völlige Abschaltung ist nicht zu empfehlen, weil es immer beim Einschalten einen Augenblick dauert, bis der Erregerstrom seine volle Höhe erreicht, und weil ferner beim Abschalten hohe Selbstinduktionsspannungen entstehen.

In der Nullstellung der Meisterwalze St ist alles bis auf die geschwächte Motorerregung abgeschaltet. Bei der Drehung der beiden miteinander gekuppelten Meisterwalzen bekommen vor der Stellung I die beiden untersten Finger Kontakt, so daß von N Verbindung über E, über A, durch die Spule von  $S_1$  und über die erwähnten unteren Kontakte nach P besteht. Schütz  $S_1$  springt an und bleibt auch nach dem Weiterdrehen der Meisterwalze eingeschaltet, weil durch seine Hilfskontakte unter Vorschaltung des Widerstandes r der Stromkreis geschlossen bleibt. Nur bei Ausbleiben der Spannung würde es abfallen. Auf Stellung I herrscht bei Abwärtsfahrt der punktiert angedeutete Stromlauf, wobei angenommen ist, daß der Gleiswähler G für die Fahrt nach Haltestelle IV eingestellt ist. Der Führer soll nun zu Beginn der Abwärtsfahrt die Meisterwalze langsam ganz einschalten und braucht sich weiter um nichts mehr zu kümmern. Sobald der Aufzug an die untere Bahnkrümmung gelangt, öffnet sich der b IV Schalter, wodurch der Fahrtbegrenzer eingeschaltet ist. Durch die weitere Öffnung von 1, 2, 3 und 4 wird die Geschwindigkeit derart vermindert, daß der Kübel nicht pendelt. Trotzdem der

Endschalter *u* sich bei I öffnet, bleibt der Aufzug aber nicht stehen, weil *u* über die vierte Stellung des Gleiswählers und den Schalter *a* IV überbrückt ist. Hinter der Stellung I schließen sich die Schalter 4, 3, 2 und 1 wieder, so daß der Aufzug wieder in schnellen Gang kommt. Die Stellungen II und III werden in voller Geschwindigkeit überfahren, weil der Umgehungsschalter *b* IV wieder geschlossen ist. Erst vor IV öffnet sich derselbe und gibt den Fahrtbegrenzer zur Bremsung frei, was durch Öffnung von 1, 2, 3 und 4 geschieht. Zum Schluß öffnen *u* und *a* IV und setzen den Aufzug still. Jetzt kann der Führer seine Meisterwalze in die Nullstellung bringen. Bei Aufwärtsfahrt treten die rechten Schalter des Fahrtbegrenzers *F* in Wirksamkeit, wobei *o* der Endschalter ist. Für diese Fahrtrichtung ist der Gleiswähler ausgeschaltet, weil nur eine obere Haltestelle vorhanden ist.

Mit Rücksicht auf die Wichtigkeit des Hochofenbetriebes wird meist noch ein Ersatzmotor mit Bremse vorgesehen. Mittels einer Umschaltwalze kann nun der eine oder der andere Motor zum Betriebe eingeschaltet werden.

Neben der Leonardsteuerung findet man bei Hochofenaufzügen auch vielfach den direkten Antrieb mit Drehstrommotoren oder Gleichstrommotoren. Während die letzteren noch einigermaßen eine richtige Bremsung gestatten, ist sie mit Drehstrommotoren nur unter Zuhilfenahme der mechanischen Bremsen möglich, also von der Geschicklichkeit des Führers abhängig.

Außer den Schrägaufzügen mit Pendelkübel findet man auch solche mit Kippkübel und Vertikalaufzüge. Die ersteren stimmen in ihrer elektrischen Einrichtung mit der beschriebenen ziemlich überein. Sie haben meist nur eine untere Haltestelle und entleeren in einen drehbaren Gichttrichter, der sich nach der Füllung in den Ofen entleert. Das Trichterdrehradwerk kann durch den Aufzug eingeschaltet werden, und der jeweilige Drehwinkel ist einstellbar, so daß eine gewünschte Verteilung des Fördergutes erreicht werden kann.

Die Berechnung der Antriebsleistung geschieht bei Hochofenaufzügen genau wie bei Fördermaschinen. Nachdem in der früher beschriebenen Weise die Anzahl der Fahrten festgelegt ist, wird eine Fahrgeschwindigkeit angenommen, die zwischen den Fahrten noch genügend Pausen zur Be- und Entladung läßt. Diese Geschwindigkeit darf jedoch keineswegs an die Geschwindigkeiten der Fördermaschinen heranreichen, vielmehr erlaubt die ganze Anordnung und die Kürze des Weges nur eine Geschwindigkeit von 1—1,5 m/Sek. Unter Zugrundelegung derselben werden die Fahrzeiten und Pausen berechnet, und es wird das Geschwindigkeitsdiagramm aufgezeichnet. Die Leistung bestimmt sich in der üblichen Weise nach Gleichung 65. Die stets wachsende Größe der Hochofen hat die Leistungen der Hochofenaufzüge natürlich stark beeinflußt. Es gibt neuerdings Hochofen mit einer Tagesleistung von 600 t Roheisen, welche gewaltige Ansprüche an die Förderung stellen. Da die Fahrgeschwindigkeit begrenzt ist, hat man das Fördergewicht erhöht und ist bis zu Kübelgrößen gegangen, die 22 t Erz bzw. 8 t Koks aufnehmen. Bei derartigen Lasten beträgt die Antriebsleistung bereits mehrere hundert kW.

Der Vorteil des Kübelfördersystems liegt darin, daß der Aufzugsführer allein die ganze Förderung in der Hand hat, und daß auf dem Ofen, wo es nie ganz ungefährlich ist, Leute überhaupt nicht benötigt werden. Auch an der Beladestelle hat man die Arbeiterzahl auf das

alleräußerste beschränkt. Es ist klar, daß dann die ganze Einrichtung derart sein muß, daß der Aufzugsführer auch alle denkbaren, den Betrieb störenden Zufälligkeiten beseitigen kann, ohne seinen Stand zu verlassen. Es kommt z. B. oft vor, daß sich zwischen die hochgehende Gichtglocke des Ofens ein Koksstück oder dgl. setzt und eine Schließung verhindert. Es geht dann nicht nur wertvolles Gichtgas verloren, sondern dasselbe entzündet sich auch, so daß die Eisenteile des Gichtverschlusses zum Erglühen kommen. Durch ein nochmaliges Aufsetzen des Kübels auf die Gicht kann das Hindernis beseitigt werden (s. Aufgabe 29 auf S. 446). Neuere Aufzüge mit großen Erzbunkeranlagen haben meistens eine größere Zahl unterer Haltestellen, an welchen also eine Kreuzung der Zubringergleisen mit den Aufzugsgleisen stattfindet. Da der Führer des Zubringerwagens weder den Aufzug, noch der Aufzugsführer die Zubringerwagen sehen kann, ist eine selbsttätig wirkende Sicherungsanlage unbedingt notwendig (s. Aufgabe 30 und 31 auf S. 447). Damit diese Vorkehrungen nur im Notfalle zur Wirkung kommen, zeigt man dem Aufzugsführer durch Merklampen an, wenn in dem einen oder anderen Zubringergleise ein Wagen in Aufzugsnähe kommt. Ebenso leuchten unter den Bunkern Lampen auf, sobald sich der Aufzugskübel nähert. Zur Kontrolle des Ofenganges und des Niederbrandes bedient man sich der Sonden, dies sind Stangen, die mittels kleiner Winden vom Führerhaus aus in den Ofen eingelassen werden können und durch ihre Eintauchtiefe den Materialniedergang anzeigen. Diese Sondierung kann ebenfalls von dem Aufzug selbsttätig eingeleitet werden, derart, daß nach jedem Förderhub die Sonden eintauchen und mittels einer Kontaktvorrichtung so auf einen Spannungsmesser einwirken, daß dessen Ausschlag direkt die Eintauchtiefe angibt. Das Instrument kann auch als Schreibinstrument ausgebildet sein.

Nebeneinander liegende Hochöfen erhalten zuweilen eine Transportvorrichtung, etwa einen Bockkran, zum Transport von einer Gichtbühne zur anderen, um bei einer Störung an einem Aufzug durch einen anderen begichten zu können. Zur Vermeidung von Gasvergiftungen ist es ratsam, derartige Krane mit zwei Führerständen auszurüsten, von denen dann immer der entgegen der Windrichtung liegende benutzt wird.

Die Zubringerwagen, welche am Fuß des Aufzugs Erz und Koks heranbringen, sind einfache Fahrzeuge, die normal nur ein Fahrwerk haben. Lediglich die Erzzubringerwagen werden oft mit einer Drehscheibe ausgerüstet, welche unter motorischem Antrieb den Kübel während der Füllung in Drehung versetzt, so daß die verschiedenen Erzsorten, die den einzelnen Bunkerverschlüssen entnommen werden, gut durchmischt werden.

Da die elektrische Ausrüstung des Aufzugswindwerks in einem geschlossenen Windenhaus untergebracht ist, können stets offene Motoren verwandt werden. Auch der Führerkontroller, der Gleiswähler und der Umschalter zum Wechseln der Motoren sind normale Steuerschalter. Die Leitungen können innerhalb des Hauses Panzeradern sein. Diejenigen nach den unteren Haltestellen (Blockierungsleitungen) sind am besten eisenhandbewehrte Bleikabel. Bei Leonardschaltung läßt

sich nur bei kleineren Leistungen der Umformer im Windenhaus aufstellen. Andernfalls errichtet man dafür ein besonderes Maschinenhaus in der Nähe des Aufzugs, in welchem die Umformer mehrerer Aufzüge untergebracht sind, wobei es dann möglich ist, mittels einer Umschaltvorrichtung jeden Umformer auf jeden beliebigen Aufzug zu schalten.

**3. In Stahlwerken.** Die *Mischer* dienen zur vorläufigen Aufnahme und Vorfrischung des von den Hochöfen in das Stahlwerk gelieferten Roheisens. Abb. 455 stellt eine Mischeranlage dar. Mittels eines Gießkranes wird das ankommende Roheisen eingefüllt und nach Bedarf

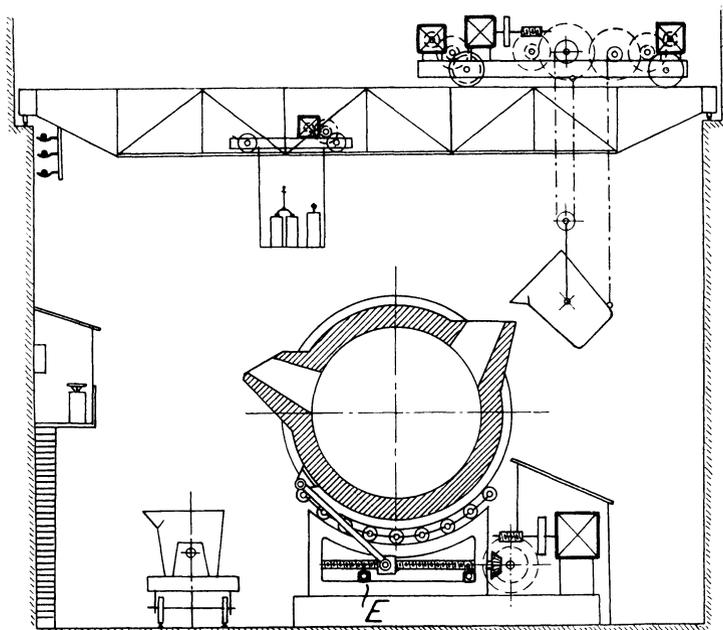


Abb. 455. Roheisenmischer.

durch Kippen des trommelförmigen Mischers in Gießpfannen entleert. Der elektromotorische Antrieb der Mischerkippbewegung muß äußerst betriebssicher sein, weil eine längere Störung zu einem Einfrieren des Mischers führen kann, und weil auch eine kürzere Störung schon einen gewaltigen Produktionsausfall im Stahlwerk zur Folge hat. Bei der Bewegung eines Mischers, dessen Fassungsvermögen mehr als 1000 t betragen kann, sind in der Hauptsache nur Reibungswiderstände zu überwinden. Es wird also im Anlauf ein sehr viel größeres Drehmoment erforderlich sein, als im Beharrungszustand. Während bei dem sehr selten in Stahlwerken vorkommenden Gleichstrom der Hauptschlusmotor verwendbar ist, kommt bei Drehstrom nur der normale Drehstrommotor in Frage. Sein Anzugsmoment reicht im vorliegenden Falle aus. Abb. 456 stellt die Leistungsaufnahme des Antriebsmotors eines Rundmischers von 500 t Fassungsvermögen bei verschiedenen

Füllungen dar. Zur vollständigen Kippung (etwa  $\frac{1}{4}$  Umdrehung) werden 240 Sek. gebraucht. Die Leistungslinie lehrt, daß die Anlaufleistung sehr viel größer ist als die Beharrungsleistung. Die Leistungen für die Füllungen von 130 und 530 t sind natürlich sehr viel größer, jedoch ist der Unterschied zwischen Anlauf- und Beharrungsleistung nicht mehr so groß. Immerhin beträgt bei ganzer Füllung die Anlaufleistung immer noch das dreifache der Beharrungsleistung. Die Leistungslinien bei gefülltem Mischer erstrecken sich nur über wenige Sekunden, weil doch stets nur bis zum Ausfluß des Eisens gekippt werden konnte. Damit der Mischer nicht zu weit gekippt wird ist eine Endschaltung erforderlich, die fast immer eine Hilfstromenschaltung mit Schütz ist. Die Endschalter E können entweder nach Abb. 455 angeordnet sein, oder man kuppelt in bekannter Weise mit dem Triebwerk einen Spindelenschalter.

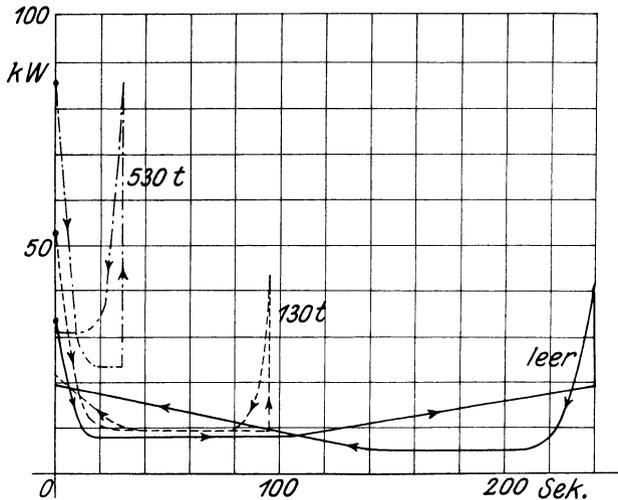


Abb. 456. Leistungsverbrauch eines Rundmischers von 500 t Fassung. Antrieb durch einen Drehstrommotor von 48 kW Stundenleistung bei 550 minutlichen Umläufen.

Der Führer des Mischers muß beim Steuern den Mischerausguß genau beobachten können, ohne der strahlenden Hitze sehr ausgesetzt zu sein. Diese Forderungen sind z. B. erfüllt, wenn man nach Abb. 455 an der gegenüberliegenden Wand, etwas seitlich vom Ausguß, ein Führerhäuschen anbringt. Da die Schalthäufigkeit nicht an diejenige der Stahlwerkskrane heranreicht, kommt man bei geringeren Leistungen mit einem Kontroller aus. Bei großen Leistungen kommen Kohlesteuerschalter, seltener Schützensteuerungen vor. Die Leitungen, welche den Motor mit dem Führerhaus verbinden, sind eisenbandbewehrte Bleikabel. Statt der Abschmelzsicherungen müssen Höchststromschalter verwandt werden, weil sonst beim Durchbrennen einer Sicherung der Mischer auslaufen könnte.

Der zum Einfüllen des Roheisens in den Mischer dienende Gießkran hat ein Hilfshubwerk, welches zum Kippen der Pfanne dient. In Abb. 455 ist der Führerkorb dieses Kranes mittels kleinen Motorantriebs beweglich,

so daß der Führer in der Lage ist, seine Stellung so zu wählen, daß er bei guter Sicht möglichst vor der Hitze verschont ist. Gießkrane für größere Leistungen erhalten für das Heben und Kranfahren Schützensteuerung.

Ein dem Mischerantrieb sehr ähnlicher Antrieb ist derjenige der kippbaren Martinöfen. In Martinöfen werden alte Eisenteile, Späne, sowie flüssiges Roheisen zu Stahl verarbeitet. Zur Beschickung dieser Öfen mit altem Eisen dienen besondere **Beschickungsmaschinen** nach Abb. 457. Dieselben haben außer den normalen drei Motoren eines Kranes noch einen Schwenkmotor S zur Schwenkung des Schwengels mit der Mulde, sowie einen Kippmotor K zur Drehung des Schwengels um seine eigene Achse, um das in der Mulde enthaltene Schrottmaterial entleeren zu können. Der Führer hat seinen Stand unten auf dem drehbaren Teil, wo auch die Schalttafel T, die am besten gekapselt ist, Aufstellung findet. Da derartige Maschinen nur einen geringen Vertikalhub

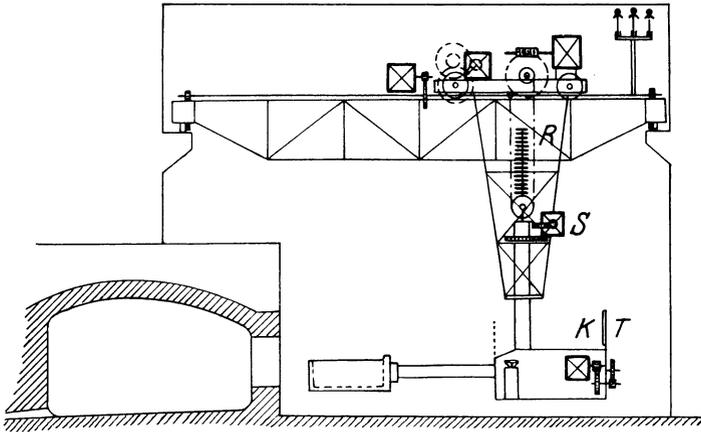


Abb. 457. Beschickungsmaschine für Martinöfen.

haben, kann die Leitungsverbindung zwischen festem Katzengerüst und beweglicher Säule mittels einer Kabelschere nach Abb. 418 erfolgen. Der Übergang des Stromes von dem drehenden Teil auf den festen erfolgt über Schleifringe R, die auf der Königssäule angebracht sind. Nehmen wir einmal nur Schleifringmotoren an, so bestimmt sich die Zahl der nötigen Schleifringe wie folgt: 3 Zuleitungen, 6 für den Hubmotor, 6 für den Kranfahrmotor, 6 für den Kranfahrmotor und 6 für den Schwenkmotor. Zusammen 27 Schleifringe. Im Kranträger werden ferner 9 Schleifleitungen benötigt. Die Bestimmung der Motorleistungen geschieht genau wie bei den Kranen in der früher mehrfach geübten Weise. Für eine Beschickungsmaschine für 1,5 t Muldeninhalt wurden z. B. folgende Motorleistungen gewählt:

|  |        |           |
|--|--------|-----------|
| Heben: 7 m minutliche Geschwindigkeit . . .    | 11 kW  | Stundenl. |
| Kranfahren: 90 m minutliche Geschwindigkeit .  | 11 kW  | „         |
| Katzefahren: 30 m minutliche Geschwindigkeit . | 5,5 kW | „         |
| Kippen: 12 mal in der Minute . . . . .         | 7,5 kW | „         |
| Schwenken: 5 mal in der Minute . . . . .       | 4 kW   | „         |

Gegenüber Kranen gleicher Beanspruchung sind bei den Beschickungsmaschinen die Motoren wesentlich reichlicher zu wählen, weil derartige Maschinen stets noch für alle möglichen Zwecke benutzt werden, für die sie gar nicht vorgesehen sind. So wird z. B. der Schwengel auch benutzt um die Einlaufrinne für das Roheisen anzusetzen, ferner zum Verschieben von Wagen auf dem Hüttenflur und besonders zum Ausbreiten des

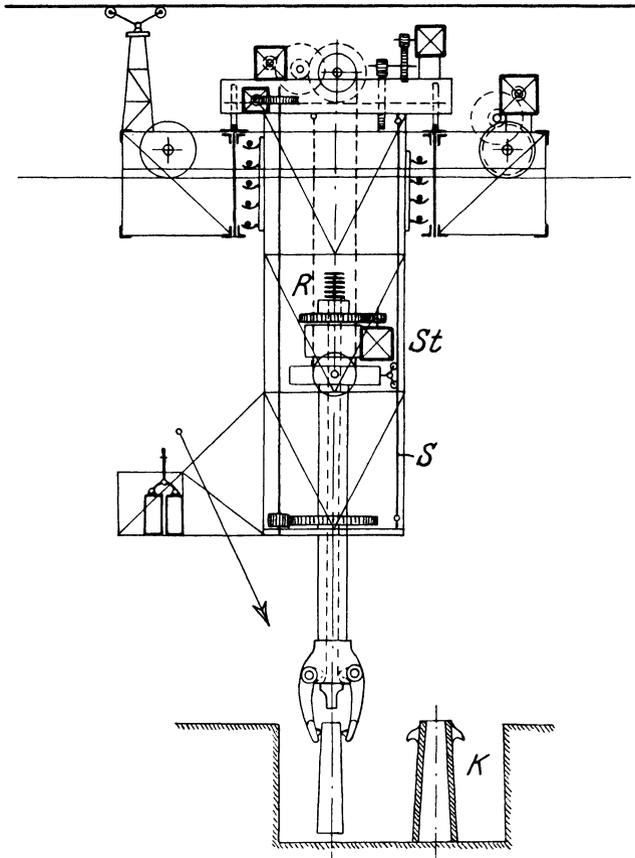


Abb. 458. Stripperkran.

Materials im Martinöfen. Da diese Arbeiten mit der Beschickungsmaschine am einfachsten und schnellsten ausgeführt werden können, ist dieselbe entsprechend auszuführen. Der gerade über den Martinöfen liegende Teil eines Kranes liegt in einem starken Wärmestrom, gegen den man die dort liegenden Leistungen schützen muß. Die Schleifleitung längs der Ofenhalle wird man immer an die den Öfen gegenüberliegende Seite legen.

Der in den Martinöfen und in den Bessemerbirnen gewonnene Stahl wird in eiserne Kokillen gegossen (s. K Abb. 458), in welchen er zu Blöcken

erstartet. Das Ausstoßen der Blöcke aus den Kokillen, was besonders dann nicht leicht ist, wenn etwas Stahl übergespritzt ist, geschieht durch kranähnliche Maschinen, die sog. **Stripperkran**. Abb. 458 veranschaulicht einen solchen Kran im Querschnitt. Außer den normalen drei Motoren eines Kranes hat dieser noch einen Drehmotor zur Drehung der mittleren heb- und senkbaren Zangensäule, ferner noch einen Strippermotor St, welcher mittels Übersetzung auf die Spindel eines Stempels arbeitet, mit welchem sowohl die Zange geöffnet und geschlossen als auch der Block nach Erfassung der Kokille ausgedrückt werden kann. Derartige Krane, von denen die Leistungsfähigkeit eines Stahlwerkes in hohem Maße abhängt, sind außerordentlich hoch beansprucht. Für den Hubmotor, den Kran- und Katzfahrmotor kann im allgemeinen eine Einschaltdauer von 0,35 zugrunde gelegt werden, wobei dieselben noch erhebliche Beschleunigungsarbeiten zu leisten haben. Während ferner bei den Hubmotoren normaler Krane die Größe der Last stark wechselt, ist die tote Last der Strippersäule im Verhältnis zum Block so groß, daß stets mit voller Belastung zu rechnen ist. Bei den ersten Stripperkränen, die in Deutschland gebaut wurden, hat man die tote Last wie bei einem Aufzug durch ein Gegengewicht ausgeglichen. Diese Lösung hat sich jedoch als grundfalsch erwiesen, weil das Gegengewicht die zu bewegendende Masse vergrößert, wodurch bei den häufigen Anläufen und sehr kurzen Hüben nicht nur der mechanische Teil des Kranes ganz unzulässig beansprucht wird, sondern auch der Hubmotor wegen der gewaltigen Beschleunigungsarbeit unnötig groß sein muß. Der Drehmotor eines Stripperkranes wird weit weniger in Anspruch genommen als die übrigen Motoren, und man kann bei ihm eine Einschaltdauer von 0,25 voraussetzen. Der Strippermotor hingegen wird derartig häufig benutzt, wie man es sonst bei aussetzendem Betrieb nirgends findet. Er muß nicht nur bei dem jedesmaligen Öffnen und Schließen der Zange anlaufen, sondern wird bei dem Strippen des Blockes regelmäßig stark überlastet. Bei großen Stripperkränen werden Stempeldrücke von mehr als 100 t benötigt, bei welchen der Motor noch durch Schwungmassen unterstützt werden kann. Bedenkt man nun, daß der Motor neben der Beschleunigungsarbeit im Anlauf, beim Auftreffen des Stripperstempels auf den Block noch erheblich überlastet wird, und daß der Führer den jeweiligen Stempelweg nicht länger wählt, als zur Erreichung der vollen Geschwindigkeit nötig ist, so sieht man ein, daß die wirkliche Belastung des Strippermotors die Beharrungsleistung weit übersteigt. Die Beanspruchung des Motors wird aber dadurch erst zu einer ganz außergewöhnlichen, daß bei festsitzenden Blöcken das Strippen oftmals ohne Pausen versucht wird, bis der Block nachgibt. In Ausnahmefällen hat man 75 Motoranläufe dafür gezählt. Auf eine Minute entfallen oft mehr als 15 Anläufe, während die Pause kaum eine Sekunde erreicht. Strippermotoren müssen deshalb sehr reichlich und mit besonders hohem Anzugsmoment gewählt werden. In besonders ungünstigen Fällen wird man Dauerbetriebsmotoren dafür vorsehen. Dieselben müssen in diesem Falle jedoch für ein hohes Anlaufmoment gebaut werden. Bei der hohen Beanspruchung der Stripperkrane sind zur Steuerung der großen Motoren mindestens Kohlesteuerschalter erforderlich, nur für das Drehen

und Katzfahren genügt ein Kontroller. Da jedoch bei der großen Zahl von Motoren und bei größeren Leistungen ein Mann unmöglich schnell genug die großen Steuerschalter bedienen kann, greift man zur Schützensteuerung. Der Führerstand muß so angeordnet werden, daß der Führer bequem seine Tätigkeit überblicken kann (Pfeilrichtung in Abb. 458). Dem Strippermotor wird der Strom über 6 Schleifringe R und über 6 vertikale Schleifleitungen oder Schienen zugeführt.

**Beispiel:** Ein Stripperkran hat folgende minutlichen Arbeitsgeschwindigkeiten: Heben 22 m, Katzfahren 50 m, Kranfahren 120 m und Drehen 5 mal. In Zeiten höchster Beanspruchung, besonders nach Feiertagen, wenn die Mischer gefüllt sind, wird von ihm eine Leistung von 200 Blöcken in 12 Stunden verlangt. Für einen Block stehen also 216 Sekunden zur Verfügung. In dieser Zeit hat der Kran folgende Bewegungen zu machen: 1. Heben über die gefüllte Kokille, 2. Drehen, 3. Senken auf Kokille, 4. Zange schließen, 5. Kokille heben, 6. Block strippen, 7. Stempel hochziehen, 8. Heben mit leerer Kokille, 9. Katzfahren, 10. Kranfahren, 11. Drehen, 12. Senken in Kühlbehälter, 13. Zange öffnen, 14. leer heben, 15. Katzfahren, 16. Kranfahren, 17. Heben über Block, 18. Drehen, 19. Senken auf Block, 20. Zange

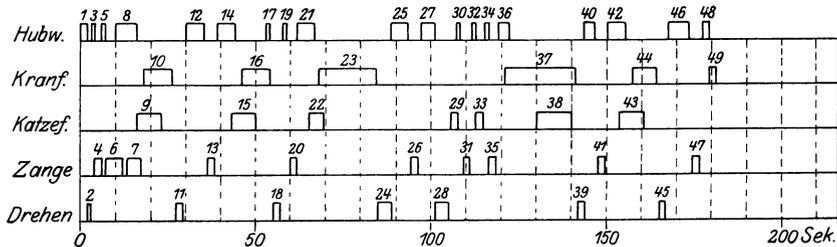


Abb. 459. Einschalttdiagramm für ein Blockspiel eines Stripperkranes.

schließen, 21. Block heben, 22. Katzfahren, 23. Kranfahren, 24. Drehen, 25. Senken in Wärmegrube, 26. Zange öffnen, 27. leer heben, 28. Drehen, 29. Katzfahren, 30. Senken auf Ofendeckel, 31. Zange schließen, 32. Deckel heben, 33. Katzfahren, 34. Deckel auf Ofen senken, 35. Zange öffnen, 36. leer heben, 37. Kranfahren, 38. Katzfahren, 39. Drehen, 40. Senken auf leere Kokille, 41. Zange schließen, 42. Kokille heben, 43. Katzfahren, 44. Kranfahren, 45. Drehen, 46. Kokille in Gießgrube senken, 47. Zange öffnen, 48. leer heben, 49. Kranfahren. — Nimmt man nach den örtlichen Verhältnissen an, daß der Kühlbehälter 8 m Kranfahrweg und 5 m Katzfahrweg von der Gießgrube entfernt ist, während die Wärmeöfen 25 m Kranfahrweg und 3 m Katzfahrweg abliegen, so kann man die Fahrzeiten angenähert festlegen. In Abb. 459 sind dieselben in der angegebenen Folge für ein Blockspiel aufgezeichnet. Für den Hubmotor beträgt die Summe aller Einschaltzeiten 58 Sekunden. Da die Zahl der wirklichen Einschaltungen wegen der unvermeidlichen Ungenauigkeit etwa das 3fache beträgt, kann man zu den gezeichneten 19 Einschaltungen noch 2 mal 19 von je  $\frac{1}{2}$  Sekunde Dauer hinzurechnen, so daß die Gesamteinschaltzeit  $58 + 19 = 77$  Sekunden beträgt. Die Einschalt-dauer ist demnach  $77 : 216 = 0,355$ . In gleicher Weise ergibt sich die Einschalt-dauer für den Kranfahrmotor zu 0,31, für den Katzfahrmotor zu 0,21, für den Drehmotor zu 0,16 und für den Drehmotor zu 0,11. Bei dem Strippermotor ist hier angenommen, daß der Block durch einen Druck gestrippt werde. Da häufig aber sehr viele Einschaltungen dazu nötig sind, muß die Einschalt-dauer mindestens 0,35 gewählt werden. Auch für die anderen schwach belasteten Motoren geht man besser nicht unter 0,25.

**4. In Walzwerken.** Mittels der Walzwerke werden die glühenden Stahlblöcke zu kleineren Blöcken, sowie zu Profileisen ausgewalzt. Man unterscheidet durchlaufende und Umkehrwalzwerke. Das Umkehr-

walzwerk, welches vor allem bei schweren Blöcken zur Verwendung kommt, hat zwei übereinanderliegende Walzen, deren Drehrichtung nach jedem Blockdurchgang umgekehrt wird. Bei den durchlaufenden Walzwerken sind meistens drei übereinanderliegende Walzen vorhanden, wobei das Walzgut zuerst zwischen den unteren Walzen hin-, und dann zwischen den oberen Walzen hergeht. Das dabei nötige Heben und Senken des Walzgutes besorgen Hebetische. Wir erkennen schon jetzt, daß man bei den Umkehrwalzwerken bestrebt sein muß, die umlaufenden Massen so klein wie möglich zu halten, damit eine schnelle Umkehr der Drehrichtung überhaupt möglich ist. Bei den durchlaufenden Walzen hingegen wäre die Kupplung eines Schwungrades mit den Walzen sogar erwünscht, damit die beim Walzen auftretenden Belastungsstöße vom Netz ferngehalten werden. Damit die beiden Walzen das mittels Rollgängen herangeführte Walzgut, z. B. einen Block, überhaupt erfassen, darf die Umlaufzahl derselben nicht zu groß sein. Von einer idealen Steuerung eines Walzmotors müßte man verlangen, daß es möglich ist,

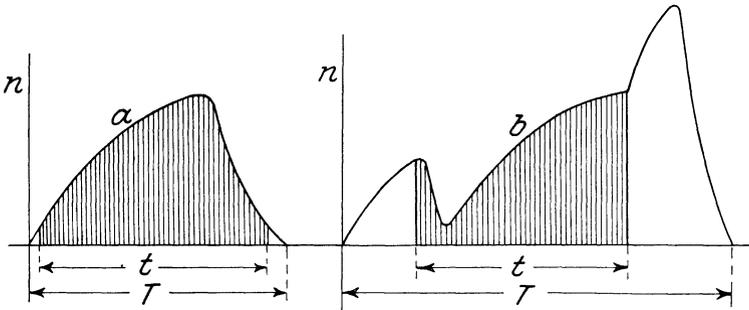


Abb. 460. a = richtige, b = schlechte Walzgeschwindigkeit.

den Block mit kleinster Geschwindigkeit zu erfassen, dann mit zunehmender Geschwindigkeit auszuwalzen und den Walzmotor so rechtzeitig abzuschalten, daß die Arbeitswucht der bewegten Massen das Walzgut bis ganz kurz hinter die Walzen bringt. Die Drehzahlkurve *a* in Abb. 460 stellt diesen erwünschten Verlauf der Geschwindigkeit dar, bei welcher sich die wirkliche Wälzzeit  $t$  nicht wesentlich von der im ganzen nötigen Zeit  $T$  unterscheidet. Bei unaufmerksamer Bedienung oder bei mangelhafter Steuerfähigkeit, ebenso auch bei Antrieb durch Dampfmaschine ergibt sich ein Geschwindigkeitsverlauf, den Linie *b* in Abb. 460 darstellt. Die Walzen haben beim Erfassen des Walzgutes bereits eine größere Geschwindigkeit erlangt, die jedoch infolge des sehr großen Anfangsmomentes fast wieder auf Null sinkt. Der dann stärker werdende Antrieb treibt dann das Walzgut beschleunigt durch die Walzen, es tritt mit großer Geschwindigkeit aus und wird ein erhebliches Stück hinter dieselben geschleudert. Im Augenblick des Austritts sind die Walzen entlastet und das noch wirkende Drehmoment wird eine plötzliche Drehzahlsteigerung zur Folge haben. In diesem Falle wird für einen Stich nicht nur wesentlich mehr Energie gebraucht, sondern die gesamte Betriebszeit  $T$  ist auch viel größer als die Wälzzeit  $t$ . Obwohl es sich

hierbei um ziemlich kleine Zeiten handelt, spielen dieselben dennoch eine große Rolle, weil die Temperatur des Walzgutes sich nicht sehr vermindern darf. Schon eine verhältnismäßig geringe Temperaturabnahme verringert die Güte des Eisens und bedingt einen erheblichen Mehraufwand an Walzenenergie. Eine Steuerung, die allen Anforder-

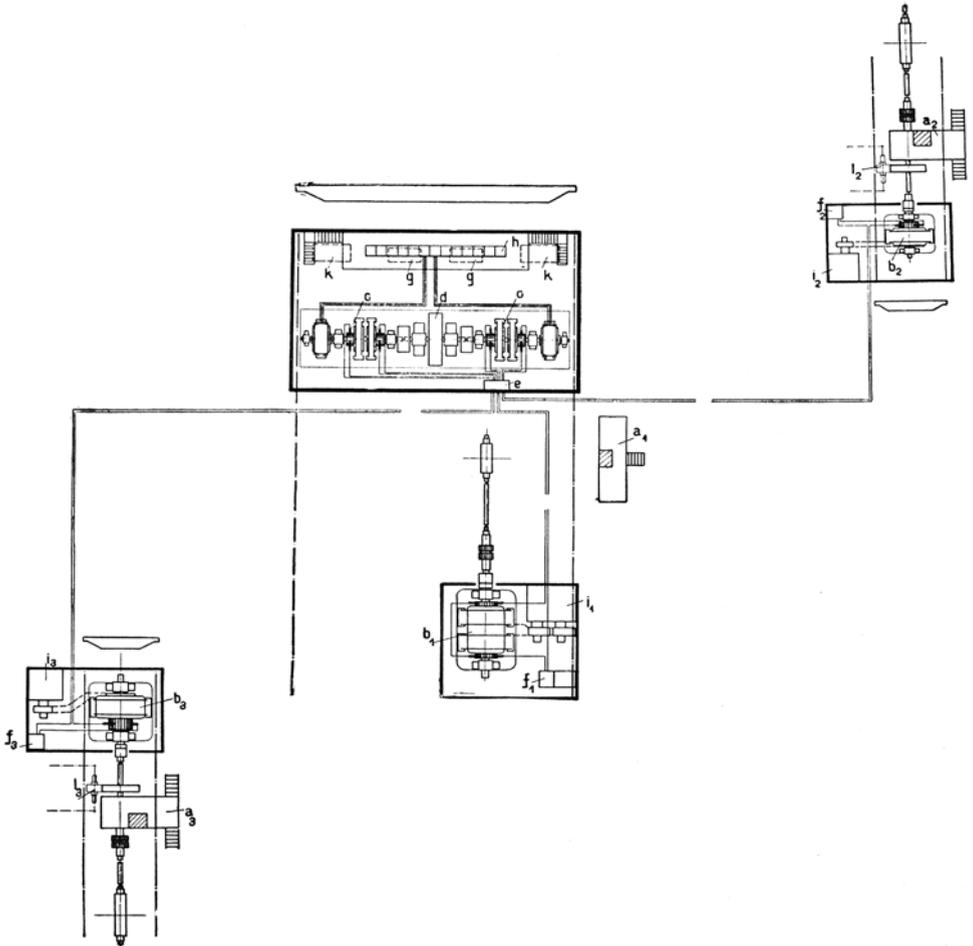


Abb. 461. Walzwerksanlage mit elektrischem Antrieb.

ungen eines Umkehrwalzwerkes gerecht wird, ist die bekannte Leonardschaltung mit Ilgnerumformer. Abb. 461 veranschaulicht eine derartige Anlage mit drei Walzenstraßen. Sowohl der Ilgnerumformer, als auch die Walzmotoren *b* sind in abgetrennten geschlossenen Räumen untergebracht, die mit Hilfe der Ventilatoren *i*, unter Vorschaltung von Filtern entlüftet werden. Der Umformer ist ein Doppelumformer mit gemeinsamem Schwungrad *d*. Die beiden an den Enden der Maschinen-

reihe stehenden Drehstrommotoren werden von der Hochspannungsanlage  $h$  gespeist. Das Anlassen derselben und die Regelung auf konstante Stromaufnahme geschieht durch die Anlasser und Schlupfregler  $g$ . Erregermaschinen sind an diesem Umformer nicht angebaut, vielmehr sind besondere Erregerumformer  $k$  zur Erzeugung des Erreger-Gleichstroms zur Aufstellung gekommen. Beide Gleichstromerzeuger  $c$  der Umformer sind als Doppelmaschinen ausgebildet. Die Maschinen brauchen dann nur die halbe Leistung zu haben und können für höhere Umlaufzahlen gebaut werden. Die Arbeitswucht des Schwungrades ist dann bei gleichem Gewicht sehr viel größer. Mittels eines Umschalterschranke  $e$  kann jeder der drei Walzmotoren auf einen der beiden Umformer geschaltet werden. Da die Gleichstromspannung der Walzmotoren mit Rücksicht auf den Kommutator nicht höher als 500 V gewählt wird, ist der Motorstrom bei den üblichen Motorleistungen von einigen tausend kW sehr groß. Die Leitungsverbindung zwischen Umformer und Walzmotor erfolgt deshalb entweder durch eine Anzahl parallel geschalteter Kabel, die nach Abb. 334 an den Wänden eines begehbaren Kanales angebracht werden, oder durch kräftige Flachkupfer- oder Aluminiumschienen, die von Isolatoren getragen werden. Im letzteren Falle muß der Kanal so hoch sein, daß die oben angeordneten Schienen nicht ohne weiteres berührt werden können. Jeder Walzmotor ist durch einen Höchststromausschalter  $f$  gegen unzulässige Überlastung geschützt. Um das Schwungmoment des Motorankers klein zu bekommen, wird der Antriebsmotor sehr häufig mit Doppelanker ausgeführt. Dies trifft z. B. bei dem mittleren Walzmotor der Abb. 461 zu. Aber nicht allein die bewegten Massen der Walzenstraße wirken einer schnellen Regelung entgegen, auch die Selbstinduktion der Erregerwicklung der Umformerdynamo ist hinderlich, weil sie einem schnellen Anstieg des Erregerstromes entgegenwirkt. Man führt deshalb meist eine sog. Schnellerregung aus, bei welcher die Erregerwicklung für eine verhältnismäßig kleine Spannung gewickelt ist, und mit dieser normal betrieben wird. Bei starker Änderung der Geschwindigkeit oder bei einer Umkehr der Drehrichtung wird jedoch mit einer wesentlich höheren Erregerspannung gearbeitet. Mit Hilfe einer solchen Schnellerregung ist es möglich, selbst die größten Walzmotoren in der Minute mehr als 30 mal umzusteuern und ein Geschwindigkeitsdiagramm zu erzielen, welches dem in Abb. 460 links dargestellten ähnelt. Die Steuerung der Walzmotoren erfolgt von brückenartigen Bühnen  $a$  aus, von denen aus der Walzvorgang genau beobachtet werden kann. Im allgemeinen ist eine direkte Regelung des Umformererregerstromes vom Führerstand aus nicht gut möglich. Denn wenn wir bei einer Leistung von 2500 kW einmal einen Erregerverlust von 1% annehmen, so sind dies immerhin 25 kW. Bei einer Erregerspannung von 250 V wären also von dem Führer 100 A zu schalten. Diese verhältnismäßig hohen Ströme lassen sich bei dem sehr angestregten Walzwerksbetrieb nur dadurch dauernd sicher schalten, daß man für sie eine Schützensteuerung verwendet, oder daß man einen zweiten kleinen Leonardumformer zur Aufstellung bringt. Der Erregerumformer würde im Umformerhaus aufzustellen sein, während man eine Schützensteuerung meist im Keller desselben unter-

bringt. Die außerordentlich hohen Anlaufmomente, die ein Walzmotor entwickeln muß, lassen es zuweilen ratsam erscheinen, die beiden Umformerndynamos im Augenblick des Anlaufs parallel zu schalten, damit der Motor den doppelten Strom erhält. Die Umschaltung der Maschinen muß in diesem Falle mittels großer Schütze geschehen, die von der Steuerbühne aus geschaltet werden. Es ist auch zuweilen angebracht, den Motor zur Erhöhung des Anzugsmomentes mit einer kleinen zusätzlichen Hauptschlußwicklung zu versehen. Bei der Motorumkehr müßte allerdings in diesem Falle die vom großen Motorstrom durchflossene Hauptstromwicklung mitumgepolt werden, was man dadurch vermeiden kann, daß man den Motor statt der Hauptschlußwicklung mit einer zweiten Nebenschlußwicklung versieht, deren Strom aber künstlich der Belastung proportional gehalten wird.

Die Antriebsleistung eines Walzwerkes wird bestimmt durch

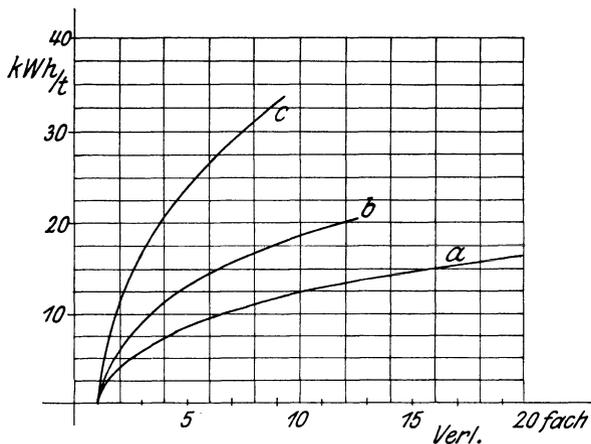


Abb. 462. Walzarbeit. a = Blöcke von 3 t mit Zweiwälzengerüst, b = schwerer Träger, 2 t, mit Zweiwälzengerüst, c = mittlerer Träger, 1 t, mit 4 Zweiwälzengerüsten.

die Querschnittsverminderung, bzw. durch die Verlängerung, welche das Walzgut erfährt, ferner durch dessen Festigkeit und Temperatur. Von wesentlichem Einfluß sind außerdem Reibungs- und Beschleunigungsarbeit. Die Querschnittsverminderung bei den einzelnen Stichen ist durch die Profilierung der Walzen vorgeschrieben und muß so sein, daß sich die Walzenergie annähernd gleichmäßig auf die Stiche verteilt. Verkehrte Profilierung verrät sich durch eine vorübergehend große Stromaufnahme des Motors. Diese eigentliche Walzarbeit läßt sich nicht berechnen, sondern es müssen Erfahrungswerte zugrunde gelegt werden. Um einen ungefähren Anhalt zu haben, sind in Abb. 462 einige Werte der für eine Tonne nötigen Walzarbeit in kWh in Abhängigkeit von der Verlängerung des Walzgutes aufgetragen. Die Walzarbeit wird um so größer, je weiter ein Block ausgewalzt wird und wächst ferner mit abnehmenden Profilen. Für die Bemessung eines Walzmotors sind umfangreichere Erfahrungswerte heranzuziehen, die auch die Profilierung, den Walzendurchmesser, die Walztemperatur u. dgl. berücksichtigen.

sichtigen. Der Wirkungsgrad des elektrischen Antriebs, also das Verhältnis der an die Walzenstraße abgegebenen Energie zur Energieaufnahme des Umformermotors kann bei voller Beschäftigung der Walzenstraße zu etwa 0,65 angenommen werden, bei halber Beschäftigung noch zu 0,5.

**Beispiel:** Auf einer Blockstraße sollen jährlich 300000 t Blöcke von je 3 t auf 6fache Verlängerung ausgewalzt werden.

Nach Abb. 462 sind etwa 9,5 kWh/t erforderlich. Es ergibt sich also ein Jahresverbrauch an der Walzenstraße von  $9,5 \cdot 300000 = 2850000$  kWh und unter Berücksichtigung eines durchschnittlichen Antriebswirkungsgrades ein Jahresverbrauch des Umformers von  $2850000 : 0,45 = 6300000$  kWh. Bei voller Beanspruchung der Straße kann ein Block in 10–12 Stichen, wozu etwa 90 Sekunden erforderlich sind, ausgewalzt werden. In einer Stunde lassen sich also 40 Blöcke durchwalzen, dies sind  $40 \cdot 3 = 120$  t. Hierzu verbraucht die Straße  $120 \cdot 9,5 = 1140$  kWh und der Umformer hat  $1140 : 0,65 = 1750$  kWh aufzunehmen. Da diese Energie in einer Stunde ziemlich gleichmäßig aufgenommen wird, beträgt die aufgenommene Leistung 1750 kW. Die Leistung des Walzmotors ist höher, weil sie aussetzend wirkt und übersteigt stoßweise die Durchschnittsleistung um ein Mehrfaches.

Die durchlaufenden Walzenstraßen erfordern wegen der ziemlich beträchtlichen Leerlaufarbeit größere Energiemengen, auch muß die Walzgeschwindigkeit oft sehr niedrig gehalten werden, damit das Walzgut noch sicher erfaßt werden kann. Man läßt deshalb neuerdings zuweilen die Schwungmassen fort und treibt in gleicher Weise wie bei den Umkehrstraßen mit regelbarem Motor und Ilgnerumformer an. Die mit Schwungmassen ausgerüsteten, durchlaufenden Walzenstraßen mit direktem Antrieb erfordern jedoch bei einer Änderung des Walzprogramms häufig auch eine andere Einstellung der Drehzahl. Um dies möglich zu machen, kann bei Drehstrom die Schaltung nach Abb. 288 benutzt werden. Der Gleichstrommotor wird dabei auf der Achse des Walzmotors angeordnet.

**Die Hilfsmaschinen des Walzwerks.** Der zum Walzen notwendige Energieaufwand hängt in hohem Maße auch von der Leistungsfähigkeit

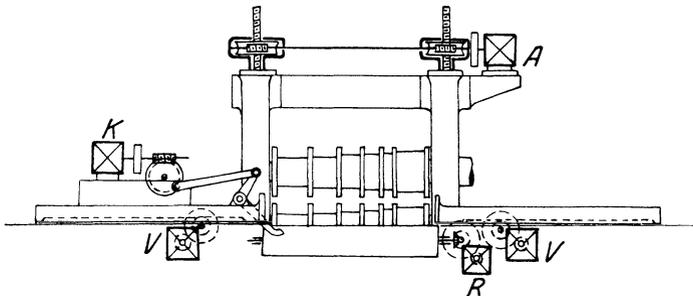


Abb. 463. Hilfsantriebe des Walzwerks.

der Hilfsmaschinen des Walzwerks ab, so daß dieselben nicht minder wichtig sind. Abb. 463 zeigt in schematischer Darstellung die hauptsächlichsten Antriebe. Zum Anstellen der schweren Walzen eines Blockgerüsts dient der Anstellmotor A. Die Heranführung des Walzgutes

an die Walzen geschieht durch einen vor und hinter dem Walzengerüst angeordneten Rollgang, von denen jeder aus einer größeren Anzahl hintereinander liegender Rollen besteht, die von einem Motor R angetrieben werden. Die Verschiebung des Walzgutes von einem Profil zum anderen erfolgt durch die Lineale der Verschiebevorrichtungen mit den Antriebsmotoren V. Die Drehung des Blockes um  $90^\circ$ , die ab und zu nötig ist, besorgt eine Kantvorrichtung mit dem Antriebsmotor K. Alle diese Antriebe werden von der erhöhten Steuerbühne aus gesteuert. Der Rollgangs Antrieb ist bei weitem der angestrengteste

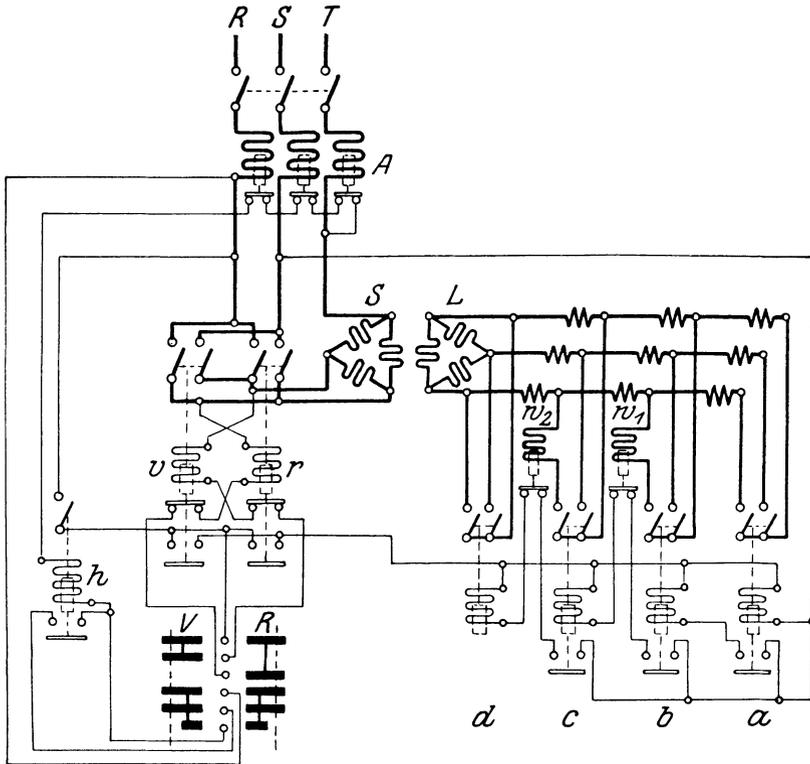


Abb. 464. Rollgangssteuerung mit Stromwächtern.

dieser Hilfsantriebe; denn während die anderen nicht bei jedem Stich in Tätigkeit zu treten brauchen und auch keine großen Massen zu beschleunigen haben, wird der Rollgang bei jedem Stich umgesteuert, wobei der Rollgangsmotor nicht nur sich selbst, sondern auch die zahlreichen schweren Rollen mit dem darauf ruhenden Block in aller kürzester Zeit beschleunigen muß. Von dem schnellen Arbeiten dieser Arbeitsrollgänge hängt vor allem der Wirkungsgrad der Walzenstraße ab, und wir müssen ihnen deshalb beim Entwurf besonders hohe Beachtung schenken. Die Reibungsarbeit, die der Rollgangsmotor zu leisten hat, beträgt nur einen geringen Bruchteil der ganzen aufzuwendenden Leistung, im

allgemeinen nur  $\sim 1/10$  derselben. Die Einschaltdauer ist wesentlich größer als diejenige der schweren Kranbetriebe und beträgt etwa 0,35—0,5. Dieselbe hängt natürlich in hohem Maße von der Länge des Walzgutes ab. Je kürzer dasselbe ist, um so häufiger muß die Umkehr der Rollgänge erfolgen. Bei Blockstraßen werden die Motoren der Rollgänge deshalb am höchsten beansprucht. Eine genaue Bestimmung der Größe der Rollgangsmotoren ist nur möglich, wenn man sich an Hand des Walzprogramms, welches bei voller Beschäftigung der Walzenstraße zu erwarten ist, ein Arbeitsdiagramm des Rollgangs aufstellt und aus demselben die Einschaltdauer ermittelt. Die Steuerung der Rollgangsmotoren kann bei kleineren Leistungen und geringerer Einschaltdauer durch Kontroller erfolgen. Normal werden Kohlesteuerschalter benutzt oder mit Rücksicht auf eine leichte Bedienung Schützensteuerungen. Bei derartigen Rollangantrieben, wie auch bei anderen hoch beanspruchten Antrieben mit großen Massen ist in neuerer Zeit von der A.E.G. eine Schaltung häufig verwandt worden, welche an die früher beschriebenen Selbstanlasser erinnert. Dieselbe soll verhüten, daß der Motor trotz schnellsten Schaltens doch nicht mehr Strom aufnimmt, als zur Entwicklung des verlangten Höchstmomentes nötig ist. Abb. 464 stellt eine solche A.E.G.-Schaltung dar, Abb. 465 einen Rollangantrieb.

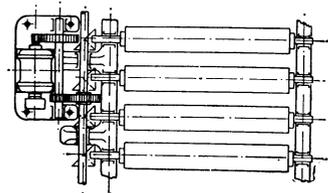


Abb. 465. Rollgang.

Der Ständer S wird durch die Schützen v und r für Vorwärts- bzw. Rückwärtslauf eingeschaltet. Die Widerstände des Läufers L werden durch die Schützen a, b, c und d abgeschaltet. Zur Abschaltung der Spulenströme sämtlicher Schützen dient das kleine Hilfsschütz h, welches in Nullspannungsschaltung geschaltet ist und auch von den Höchststromauslösern A zum Abschalten gebracht werden kann. Sobald das Hilfsschütz h eingeschaltet wird, wird auch der Ständer eingeschaltet, und sofort hinterher springt Schütz a an und schließt den Läufer. Einen kurzen Augenblick später zieht auch b an, dessen Erregerstrom über Hilfskontakte von a geführt ist. Der Motor ist jetzt in der Lage, den höchsten Strom, den man zulassen will, aufzunehmen. Da in die Zuleitungen zum Schütz b aber ein sogenannter Stromwächter  $w_1$  eingebaut, der mittels seines Kernes seine Kontakte so lange geöffnet hält, bis der Läuferstrom auf einen einstellbaren geringeren Wert gesunken ist, kann Schütz c, dessen Erregerstrom über die Stromwächterkontakte geleitet ist, nicht eher anspringen, bis  $w_1$  abfällt. In gleicher Weise kann Schütz d erst anziehen, wenn der Läuferstrom auf einen durch Stromwächter  $w_2$  einstellbaren Wert gesunken ist. Wenn die Größe der zu beschleunigenden Massen immer angenähert die gleiche ist, läßt sich mit einer derartigen Stromwächterschaltung ein ganz bestimmter, günstigster Anlauf vorschreiben. Die Ständerschützen v und r dürfen nie gleichzeitig eingeschaltet sein, weil dies einen Kurzschluß bedeuten würde. Dadurch daß die Erregerströme dieser Schützen wechselseitig über Hilfskontakte geführt sind, ist zwar scheinbar eine hinreichende Sperrung erreicht. Beim schnellen Schalten treten jedoch Lichtbögen an den Hauptkontakten der Schützen auf, und es wäre z. B. möglich, daß der Lichtbogen des Schützes v noch nicht verlöscht ist, obwohl es bereits abgefallen ist, daß aber das andere Schütz nun schon anspringt. Um in solchem Falle das Anziehen des zweiten Schützes unmöglich zu machen führt die A.E.G. eine sog. Lichtbogensperrung durch, bei welcher die Ständerschützen anfänglich über den Ständer von der Phase T Strom bekommen. Besteht jedoch noch ein Lichtbogen am anderen Schütz, z. B. an v, so liegt r vermöge dieses Lichtbogens mit dem Ende seiner Spule an der gleichen Phase, wie mit dem Spulenanzug. Es kann also unmöglich anziehen.

Die Steuerung der übrigen Hilfsantriebe einer Walzenstraße kann im allgemeinen noch mit Kontrollern bewirkt werden. Da bei den Anstellvorrichtungen der Walzen ein genaues Steuern unbedingt nötig ist, muß der Steuerschalter eine größere Stufenzahl haben als die übrigen Antriebe. Der Anstellantrieb ist ferner mit einer kurzhubigen Bremse auszurüsten.

Außer den beschriebenen Arbeitsrollgängen gibt es in den Stahlwerken noch Transportrollgänge, welche meist in gleicher Richtung und ferner auch dauernd laufen. Für sie kommen also Dauerbetriebsmotoren in Frage. Die Rollenzahl ist im allgemeinen eine sehr große, so daß wegen der im Anlauf sehr großen Beschleunigungsarbeit ein Schutz des Motors durch Stromwächter angebracht ist.

Eine weitere sehr wichtige Hilfsmaschine des Walzwerks ist der Hebetisch, welcher bei Dreiwalzwerken zum Anheben des Walzgutes zu den Oberwalzen dient. Abb. 466 zeigt schematisch die Anordnung

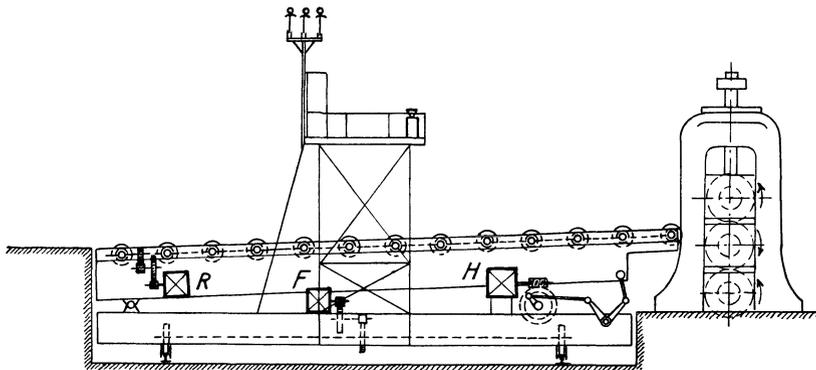


Abb. 466. Elektrisch angetriebener Hebetisch.

eines solchen mit der elektrischen Ausrüstung. Der auf der schwingenden Bühne umlaufende Rollgang mit dem Antriebsmotor R stimmt in seinem Verhalten und den Anforderungen vollkommen mit den bereits beschriebenen Arbeitsrollgängen überein. Auch das Fahrwerk des Hebetisches mit dem Motor F braucht nicht erneut betrachtet zu werden. Die schwingende Hubbewegung, welche durch den Hubmotor H erzeugt wird, muß jedoch ebenso wie die Umkehr der Rollgänge in aller kürzester Zeit vollzogen werden, wobei sehr erschwerend wirkt, daß zuweilen riesige Massen bewegt werden müssen. Dieselben können bei schweren Grobblechwalzwerken bis zu 100 t betragen, und dennoch darf die Hubzeit nicht länger als 1,5–2 Sekunden dauern. Die sachgemäße Bestimmung der Größe der Hebetischmotoren erfordert die Aufstellung eines genauen Arbeitsdiagramms. Die Steuerung des Hebetisches geschieht auch hier von einer erhöht angeordneten Steuerbühne aus, die aber in diesem Falle auf dem fahrbaren Tisch steht. Während man bei kleineren Leistungen noch mit Kohlesteuerschaltern auskommt, ist bei normalen und großen Leistungen wegen der leichteren Bedienung die Schützensteuerung vorzuziehen, zumal doch drei Motoren gleich-

zeitig zu steuern sind. Damit die Schützen von dem Walzstaub geschützt sind, bringt man sie in Schränken, die auf der Bühne stehen, unter.

**Beispiel:** Eine Grobblechschere zum Beschneiden gewalzter Bleche von 3500 mm Breite und 40 mm Stärke soll maximal stündlich 150 Schnitte und normal 50 Schnitte leisten. Es soll der Motor bestimmt werden.

Scheren und Pressen wurden bisher mit Schwungrädern ausgerüstet und zuweilen mit Hauptschlußmotoren angetrieben, um bei schwächeren Arbeiten eine höhere Geschwindigkeit zu haben. Neuerdings verwendet die A.E.G. regelbare

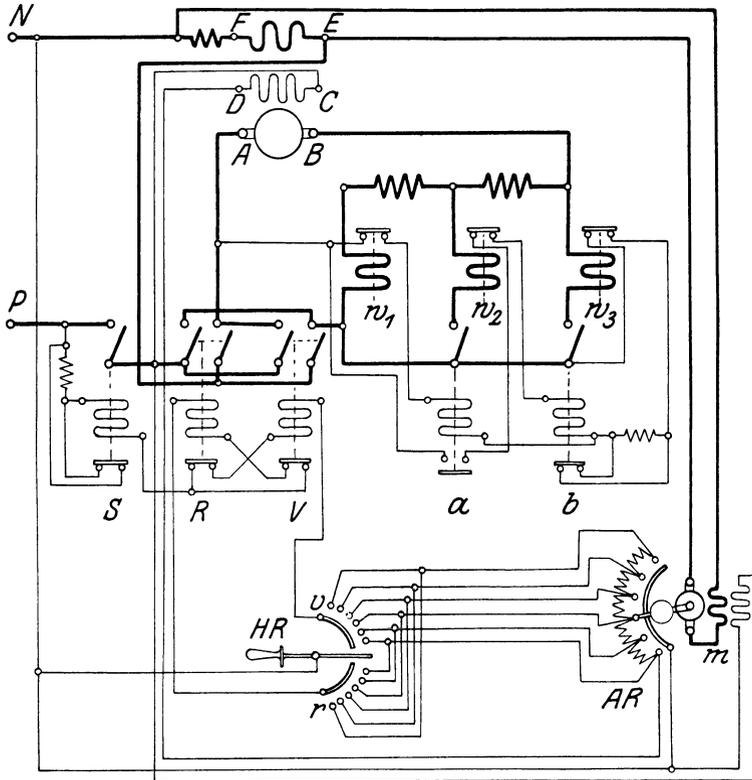


Abb. 467. AEG-Schaltung eines Scherenmotors.

Nebenschlußmotoren ohne Schwungrad<sup>1)</sup>. Der Schnitt kann dann leicht aufgehalten werden, wenn er verläuft, auch treten Brüche bei Überlastungen nicht so leicht auf. Ferner lehrt Abb. 158, daß das Drehmoment des Nebenschlußmotors bei Unterbelastung größer ist als dasjenige des Hauptschlußmotors, so daß letzterer seine Umlaufzahl nicht so stark ändert, als dies bei dem Nebenschlußmotor durch Feldschwächung möglich ist. Die Änderung der Erregung geschieht selbsttätig in Abhängigkeit von der jeweiligen Belastung. Abb. 467 stellt die A.E.G.-Schaltung eines Scherenmotors dar. Mittels der Umkehrschütze V und R kann der Antriebsmotor sowohl vorwärts, als auch bei Verlaufen des Schnittes rückwärts gesteuert werden. Das Abschalten der Anlaßwiderstände geschieht durch die Anlaßschütze a und b unter Kontrolle der Stromwächter  $w_1$ ,  $w_2$  und  $w_3$ , welche so eingestellt sind,

<sup>1)</sup> Pollok, Reguliermotoren mit Arbeitsregler für Pressen und Scheren. Z. d. V. d. I. 1920, S. 500.

daß nur ein bestimmter zulässiger Höchststrom den Motor durchfließen kann. Die Regelung des Motorerregers geschieht durch den Handregler HR und den Arbeitsregler AR, die beide parallel geschaltet sind. AR wird durch einen kleinen Doppelschlußmotor bewegt, dessen Haupt- und Nebenschlußwicklung sich entgegenwirken. Da die Hauptschlußwicklung parallel zur Hauptschlußwicklung des Hauptmotors liegt, wird bei Überlastung desselben die Hauptschlußerregung des Motors  $m$  überwiegen und den Reglerhebel nach unten bewegen, so daß der Hauptmotor langsam läuft. Bei Entlastung hingegen überwiegt die Nebenschlußwicklung von  $m$ , so daß der Hebel nach oben geht und die Umlaufzahl steigert.

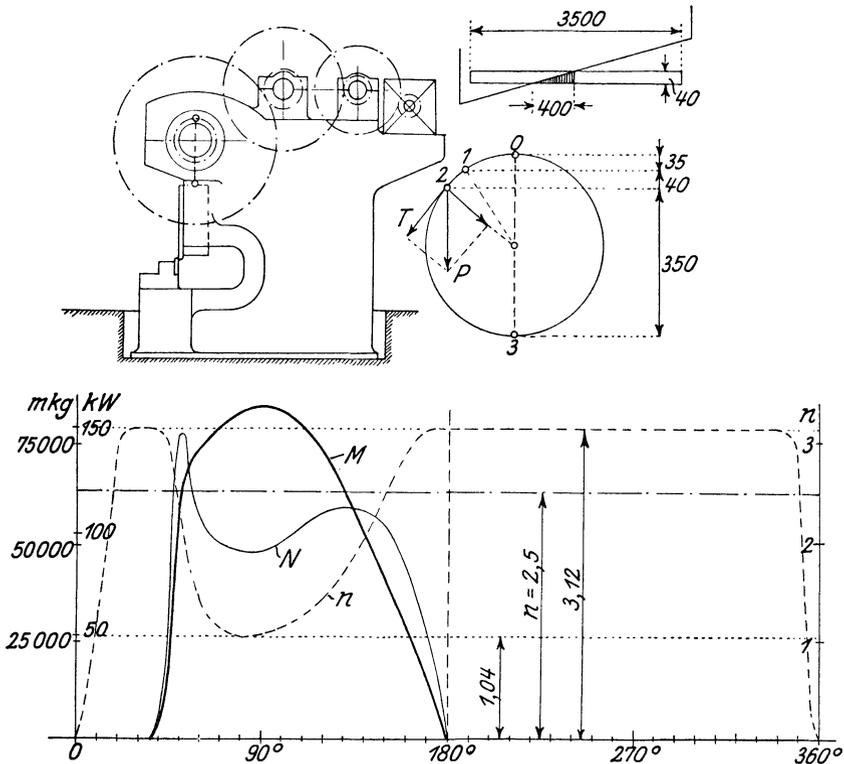


Abb. 468. Grobblechschere.

Unter Annahme einer Messereneigung von  $1:10$  ist ein Hub von  $(3500:10) + 40$  mm Blechstärke = 390 mm nötig. Zur Sicherheit werde 425 mm Hub gewählt. Abb. 468 stellt die allgemeine Anordnung dar. Bei maximal 150 Schnitten muß die minutliche Drehzahl der Kurbelwelle  $150:60 = 2,5$  sein. Nach Abb. 468 ist der augenblickliche Scherquerschnitt  $(400 \cdot 40):2 = 8000$  mm<sup>2</sup> und demnach unter Annahme einer Scherfestigkeit von  $50$  kg/mm<sup>2</sup> die gesamte Scherkraft  $8000 \cdot 50 = 400000$  kg. Die Arbeit, welche ein Schnitt erfordert, ist also:  $A = 400000 \cdot 0,35 = 140000$  mkg. Bei 50 stündlichen Schnitten ist also die Durchschnittsleistung:

$$N = \frac{140000 \cdot 50}{102 \cdot 60 \cdot 60} = 19 \text{ kW.}$$

Diese Leistung wird jedoch für die Bemessung des Motors nicht in Frage kommen, weil ein so kleiner Motor nicht die erforderlichen hohen Drehmomente bewältigen könnte. Wir berechnen uns nun nach Abb. 468 die an der Kurbel

notwendigen Tangentialkräfte  $T$ , wobei zu bedenken ist, daß erst bei Punkt 1 der Kurbelbewegung das Messer ansetzt. Bei 2 ist die volle Schnittstärke erreicht. Die Drehmomente, also Tangentialkraft  $T$  mal Kurbelradius sind in Abb. 468 unten durch die M-Linie in Abhängigkeit vom Kurbelweg dargestellt. Wir wollen nun annehmen, daß der Motor nach Abb. 467 geschaltet sei und seine Drehzahl der Belastung entsprechend einstelle. Dann wird dieselbe bei Annahme einer Regelbarkeit von 1:3 zunächst schnell auf den vollen Wert ansteigen, jedoch bei Schnittbeginn auf ein Drittel abfallen, um gegen Ende des Schnittes wieder anzusteigen. Aus M- und n-Linie ergibt sich dann die Nutz-Leistungslinie N, die wesentlich höhere Werte als den oben berechneten zeigt. Die mittlere zeitliche Geschwindigkeit kann nun angenähert ermittelt werden, wodurch sich ergibt, daß die tiefste Drehzahl der Kurbel etwa 1,04 je Minute ist. Da dann (90°-Stellung) das höchste Moment von 85000 mkg auftritt, ergäbe sich unter der Annahme, daß der Motor in diesem Augenblick das doppelte Drehmoment entwickeln soll, die normale Motorleistung zu

$$\frac{85000 \cdot 1,04}{2 \cdot 975 \cdot 0,7} = 65 \text{ kW,}$$

worin 0,7 der Getriebewirkungsgrad ist. Oft werden aus Herstellungsgründen und zur Verringerung der Schwungmomente zwei Motoren halber Größe gewählt. Die Leistungsspitze der N-Linie in Abb. 468 tritt in Wirklichkeit nicht auf, weil beim Ansetzen des Messers die Schwungenergie des Motorankers zum großen Teil mitverbraucht wird.

#### D. Der elektrische Antrieb der Werkzeugmaschinen.

Als man von dem Transmissionsantrieb der Werkzeugmaschinen zum Gruppenantrieb und Einzelantrieb überging, wurde an der Maschine selbst nichts geändert. Die Forderung, welche an den elektrischen Antrieb gestellt wurde, stimmte deswegen mit derjenigen überein, die man an jede Transmission stellt, nämlich konstante Antriebsgeschwindigkeit. Ein hohes Anzugsmoment war im allgemeinen nicht erforderlich, weil die meisten Werkzeugmaschinen unbelastet anliefen. Ein Motor für diese Forderung war bei Gleichstrom in dem Nebenschlußmotor und bei Drehstrom in dem Asynchronmotor gegeben. Beide haben bei wechselnder Last nahezu unveränderliche Drehzahl. Die Werkzeugmaschine ist bei dieser Entwicklung aber nicht stehen geblieben, lag es doch nahe, die veränderliche Geschwindigkeit, die eine jede Werkzeugmaschine an und für sich doch verlangt, und die in umständlicher Weise durch Rädervorgelege und Stufenscheiben erreicht wurde, durch den Antriebsmotor selbst zu erreichen. Die neueren Werkzeugmaschinen fordern deshalb von dem Antriebsmotor fast durchweg starke Regelbarkeit. Während der Gleichstrom-Nebenschlußmotor durch Änderung des Erregerstromes hinreichend regelbar ist, fehlt dem Drehstrommotor diese Eigenschaft vollkommen. Durch Widerstände im Läufer läßt sich bekanntlich zwar die Drehzahl vermindern, aber diese Regelart ist nicht nur verlustreich, sondern die Geschwindigkeit ändert sich auch stark mit der Größe der Belastung. Es bliebe nun anscheinend nichts übrig, als den Drehstromkommutatormotor zu verwenden, der als Nebenschlußmotor sowohl nahezu verlustlos regelbar ist, als auch bei den verschiedenen Geschwindigkeitsstufen seine Drehzahl bei wechselnder Last fast nicht ändert. Auch das Anlassen und Regeln durch Bürstenverschiebung würde als Vorteil anzuführen sein. Leider hat sich aber dieser Motor bis jetzt nicht einzuführen vermocht, weil hauptsächlich der hohe

Preis hindernd im Wege steht. Es steht somit heute nur der Gleichstrom-Nebenschlußmotor als Regelmotor für Werkzeugmaschinen zur Verfügung, und es muß erwogen werden, ob bei Vorhandensein von Drehstrom nicht ein Umformer aufzustellen ist, welcher diejenigen Werkzeugmaschinen, bei denen auf Regelbarkeit durch den Antriebsmotor erhöhter Wert zu legen ist, mit Gleichstrom versieht.

Der Grad der Regelbarkeit einer Werkzeugmaschine ergibt sich aus den Arbeitsgeschwindigkeiten. Bei einer Drehbank werde z. B. gefordert, daß ein Bolzen von geringem Durchmesser mit der hohen Schnittgeschwindigkeit, wie sie bei Rotguß erforderlich ist, abgedreht werde, und daß ferner ein Gußeisenkörper von einer Größe, welche die Spitzenhöhe der Bank noch eben aufzuspannen erlaubt, unter Verwendung geringerer Drehstahlsorten, also mit kleiner Schnittgeschwindigkeit abgedreht werden kann. Aus dem ersten Fall ergibt sich die höchste, aus dem letzten die geringste Umlaufzahl der Drehbankspindel. Werde bei einer Bohrmaschine z. B. gefordert, daß ein Loch von 8 mm  $\varnothing$  mit der höchsten üblichen Schnittgeschwindigkeit von 25 m minutlich gebohrt werde, und daß bei dem größten Bohrdurchmesser von 50 mm noch eine Schnittgeschwindigkeit von 8 m minutlich eingeschaltet werden kann, so berechnet sich für den ersten Fall eine Umlaufzahl der Bohrspindel von 1000 i. d. Minute, während sich für den zweiten Fall 51 Umdrehungen ergeben. Die Regelbarkeit beträgt demnach 1:20. Der Unterschied zwischen der kleinsten und größten Umlaufzahl ist um so größer, je vielseitiger der Verwendungszweck der Maschine ist. Maschinen für mechanische Werkstätten, in denen alle möglichen Arbeiten vorkommen, erfordern demnach eine starke Regelbarkeit, während man bei Maschinen für Sonderzwecke meistens mit wenigen Geschwindigkeitsstufen auskommt. Es ist nun aus dem Früheren bekannt, daß man nicht mit einem Motor die oben berechnete Regelung von 1:20 und noch weniger die häufig vorkommenden stärkeren Regelungen erreichen kann, daß also außer dem Motor noch Vorgelege erforderlich sind. Es fragt sich jetzt, wie groß die Regelbarkeit des Motors bei Benutzung von Vorgelegen sein muß. Wir wollen die gesamte Regelbarkeit der Werkzeugmaschine 1:Y und diejenige des Motors 1:x nennen. Wenn die kleinste Drehzahl der Spindel n ist, wobei das Vorgelege eingeschaltet und der Motor auf langsamste Geschwindigkeit eingestellt ist, so kann durch Schwächung der Erregung die Drehzahl auf  $n \cdot x$  gesteigert werden. Angenommen, durch Ausschalten des Vorgeleges und volle Erregung des Motors ergebe sich wieder die gleiche Drehzahl  $n \cdot x$ , dann könnte durch Feldschwächung wieder die Geschwindigkeit auf den x fachen Betrag, also auf  $n \cdot x \cdot x = n \cdot x^2$  gesteigert werden. Dies ist aber die höchste überhaupt erreichbare Drehzahl, die ja gleich  $Y \cdot n$  sein soll. Es ist also:

$$n \cdot x^2 = Y \cdot n$$

$$x^2 = Y,$$

also

$$x = \sqrt{Y}.$$

Bei zwei Vorgelegen könnte durch Abschalten des letzten Vorgeleges die Umlaufzahl  $n \cdot x^2$  eingestellt werden, die dann durch Feldschwächung

auf den Wert  $n \cdot x^3$  gesteigert werden kann. Bei zwei Vorgelegen ist also:

$$\begin{aligned} n \cdot x^3 &= Y \cdot n \\ x &= \sqrt[3]{Y}. \end{aligned}$$

Bei der oben erwähnten Bohrmaschine brauchten wir einen Gesamtregelbereich von 1:20. Bei Annahme eines Vorgeleges müßte demnach der Motor ein Regelverhältnis  $x = \sqrt{20} = 4,5$  haben. Ein Regelverhältnis von 1:4,5 ist jedoch sehr hoch und würde wegen der schlechten Materialausnutzung der Regelmotoren einen unverhältnismäßig großen Motor zur Folge haben. Man verwendet aus diesem Grunde meist Motoren, die eine Drehzahlerhöhung von nur 1:2 oder 1:3, ausnahmsweise auch 1:4 gestatten. In dem obigen Beispiel wären demnach zwei Vorgelege erforderlich, wobei das Regelverhältnis des Motors

$$x = \sqrt[3]{20} = 2,7$$

sein müßte.

Mit Hilfe der Leonardsteuerung wären wir in der Lage, jede beliebige Geschwindigkeit einzustellen, aber diese Schaltung kommt wegen der hohen Anlagekosten und der geringen Ausnutzung bei niedrigen Drehzahlen nur ausnahmsweise in Frage.

Bei der Verwendung regelbarer Motoren ist zu bedenken, daß die Abkühlung derselben bei den niedrigeren Umlaufzahlen ziemlich mangelhaft wird, so daß dann mit einer geringeren Belastungsfähigkeit zu rechnen ist. Da nun bei den Werkzeugmaschinen sehr häufig die Forderung gestellt wird, daß beispielsweise bei einer Drehbank stets ein gleich starker Span abgehoben wird, einerlei ob an einem großen oder an einem kleinen Drehdurchmesser gearbeitet wird, und daß dabei die Schnittgeschwindigkeit immer auf dem durch den Stahl vorgeschriebenen Höchstwert gehalten wird, müßte der Antriebsmotor bei allen Umlaufzahlen die gleiche Leistung entwickeln. Denn wenn an einem kleinen Durchmesser gearbeitet wird, ist der Motor auf große Geschwindigkeit eingestellt, aber der konstante Schneidwiderstand ergibt mit dem kleinen Halbmesser ein kleines Drehmoment, so daß sich die gleiche Leistung ergibt, als wenn bei großem Drehdurchmesser und geringer Motordrehzahl ein großes Drehmoment an der Bank erforderlich ist. Weil nun der Motor bei geringer Umlaufzahl weniger belastungsfähig ist, müßte man ihn so bemessen, daß er die von der Bank bei allen Geschwindigkeiten in gleicher Höhe verlangte Leistung noch bei der geringsten vorkommenden Motordrehzahl hergeben könnte. Bei den höheren Umlaufzahlen ist dann der Motor natürlich zu reichlich bemessen. Häufig wird ein Mittelweg eingehalten, bei welchem die sog. Durchzugsleistung der Motoren zugrunde gelegt wird, welche der Motor bei einer mittleren und bei allen höheren Drehzahlen konstant hergeben kann, während er bei den niedrigeren Umlaufzahlen nur schwächer belastet werden darf oder aussetzend betrieben werden muß, wenn dennoch die volle Leistung verlangt wird. Die Forderung, welche an den Antriebsmotor gestellt wird, kann aber auch anders lauten. Die Grenze der Leistungsfähigkeit einer Werkzeugmaschine ist durch das Drehmoment bestimmt, welches die Maschine noch erschütterungsfrei aushalten kann. Wenn

der Antriebsmotor so geregelt werden soll, daß die Werkzeugmaschine stets bis zur Grenze ihrer Leistungsfähigkeit ausgenutzt ist, so muß also stets auf dieses konstante Höchstmoment eingestellt werden. Es wird jetzt also nicht wie früher konstante Leistung von dem Motor verlangt, sondern gleiches Drehmoment bei allen Umlaufzahlen. Die Motorleistung ist demnach jetzt bei den geringeren Umdrehungszahlen gering und nimmt mit der Geschwindigkeit zu.

Mehr noch als die Stufenscheiben, die durch die regelbaren Motoren in Fortfall gekommen sind, bereiteten früher die Antriebe der Werkzeugmaschinen mit hin- und hergehender Bewegung Schwierigkeiten. Bei einer Hobelmaschine z. B. wurde gegen Ende des Hubes mittels eines Stiefelknechtes in der Weise umgesteuert, daß auf die treibende Scheibe statt eines offenen Riemens ein gekreuzter aufgeschoben wurde. Die Arbeitswucht der bewegten Massen wurde dabei durch das Gleiten des Riemens auf der Scheibe in Wärme umgesetzt, was nicht nur einen Energieverlust, sondern auch einen beträchtlichen Riemenverschleiß zur Folge hatte. Diese Nachteile fallen fort, wenn wir mit dem Triebwerk einen Motor festkuppeln und denselben am Ende eines jeden Hubes umsteuern. Wir vermeiden dadurch nicht nur jeden Verschleiß, sondern sind auch in der Lage, einen Teil der Arbeitswucht der bewegten Massen in Form von elektrischer Energie dem Netz zurückzugeben. Wenn wir z. B. einen im Verhältnis 1:4 regelbaren Motor zum Antrieb benutzen, so werden wir vor Hubende durch Verstärkung der Erregung auf den Höchstwert die Drehzahl auf den Mindestwert, d. i. auf  $\frac{1}{4}$  bringen. Nach Gleichung 57 ist aber die in einer bewegten Masse aufgespeicherte Energie nur noch  $\frac{1}{16}$ , wenn die Umlaufzahl auf  $\frac{1}{4}$  sinkt. Während der Feldverstärkung hat also der Motor, als Erzeuger wirkend,  $\frac{15}{16}$  der aufgespeicherten Energie abgegeben, wovon ein Teil allerdings auch nutzlos in Wärme verwandelt wird. Ganz so günstig, wie diese Zahlen angeben, verhält sich der Antrieb mit Umkehrmotor aber leider doch nicht. Der Hauptsitz der Arbeitswucht ist nämlich der Motoranker selbst, dessen Schwungmoment um so größer ist, je größer die Regelbarkeit ist. Wenn wir also einen durchlaufenden Motor verwenden und mit mechanischen Mitteln umsteuern würden, so wäre die Masse, die bei Hubbeginn zu beschleunigen und am Hubende zu verzögern wäre, wesentlich kleiner. Es wird deshalb von manchen ein durchlaufender Motor vorgezogen und die Umsteuerung durch elektromagnetische Kupplungen bewirkt. Der Stiefelknecht der Hobelmaschine schaltet dabei am einen Hubende die eine Spule, am anderen Hubende die andere Spule einer Doppelkupplung ein. Das Grundübel aller mechanischen Umsteuerungen, die Vernichtung der Arbeitswucht durch Reibung und der damit verbundene Verschleiß sind aber durch die magnetischen Kupplungen zwar vermindert, aber nicht beseitigt, außerdem besitzen die Kupplungen selbst auch ein nicht zu vernachlässigendes Schwungmoment. Aus allem ergibt sich, daß eine gute Lösung der Aufgabe nur mit dem Umkehrmotor zu erreichen, und daß es Aufgabe des Erbauers ist, mit allen Mitteln das Schwungmoment des Motorankers und der übrigen Teile klein zu halten. Auch die Masse der Umsteuervorrichtung und des Umschaltapparates ist so gering wie möglich zu bemessen, denn der

Zeitverlust für die Umsteuerung und der Nachlaufweg sollen möglichst klein sein.

Obwohl die meisten Werkzeugmaschinen aussetzenden Betrieb haben oder doch wenigstens wie bei dem Rücklauf der Hobelmaschinen zeitweise entlastet sind, kann dies bei der Bemessung der Motorleistung nicht berücksichtigt werden, weil die Betriebsverhältnisse zu stark wechseln. Es sind also Dauerbetriebsmotoren erforderlich. Bei größeren Werkzeugmaschinen wird zuweilen die Verstellung eines Supportes oder dgl. durch einen besonderen elektromotorischen Antrieb bewirkt. Derartige Motoren, die nur während des Einrichtens der Maschine vorübergehend im Betrieb sind, brauchen nur eine 15 bis 30 Minuten-Leistung zu haben. Man führt sie wegen des höheren Anzugsmomentes auch gern als Doppelschlußmotoren aus, da es bei diesem Antrieb ja nicht auf eine konstante Geschwindigkeit ankommt. Auch die Haupt-Antriebsmotoren erhalten, wenn sie stark regelbar sind, meistens eine ganz schwache Hauptschlußwicklung, deren Zweck aber lediglich der ist, bei stark geschwächtem Feld einen stabileren Lauf zu bekommen. Die regelbaren Motoren müssen natürlich Wendepole haben.

Die Größe der Antriebsleistung einer Werkzeugmaschine ist mehr als bei anderen Antrieben eine Erfahrungsgröße. Als ungefähren Anhalt mögen die nachstehenden Zahlen dienen.

|   |        |
|---|--------|
| Bohrmaschinen, bis 50 mm Lochdurchmesser . . . . .                | 3 kW   |
| „ „ „ 100 mm „ . . . . .  | 5 kW   |
| Drehbänke, bis 250 mm Spitzenhöhe . . . . .                       | 2 kW   |
| „ „ 500 mm „ . . . . .  | 3,5 kW |
| „ „ 1000 mm „ . . . . .   | 7,5 kW |
| Hobelmaschinen, 1500 mm Hobelbreite, 4000 mm Tischlänge . . . . . | 7,5 kW |
| Hobelmaschinen, 2500 mm Hobelbreite, 6000 mm Tischlänge . . . . . | 15 kW  |
| Bandsäge, 500 mm Schnitthöhe . . . . .                            | 2,5 kW |
| Abricht-Hobelmaschine für Holz . . . . .                          | 1—3 kW |
| Schleifstein, mittlerer Größe . . . . .                           | 2 kW   |

Bei Verwendung hochwertiger Schnelldrehstahls müssen die vorstehenden Leistungen der Metallbereitungsmaschinen um 50—100% erhöht werden.

**Beispiel:** In einer Maschinen-Reparaturwerkstätte sollen die umstehend verzeichneten Werkzeugmaschinen aufgestellt und von einer gemeinsamen Transmissionswelle angetrieben werden. Es sollen die jährlichen Stromkosten ermittelt werden, wenn mit dem Elektrizitätswerk eine feste Gebühr von 70 Mk. je angeschlossenes kW und 5 Pfg. für die verbrauchte kWh vereinbart worden ist (Vorkriegszeit).

Die voraussichtliche Betriebsstundenzahl in 8stündiger Schicht und die durchschnittliche Belastung sind in der Tabelle angegeben. Die im Jahr verbrauchten kWh (300 Arbeitstage) betragen:

$$49,6 \cdot 300 = 14800 \text{ kWh.}$$

Die *Benutzungsdauer*, d. i. das Verhältnis des wirklichen Jahresverbrauchs zur Gesamt-Höchstleistung ist also:

$$\frac{14800}{18} = 825 \text{ Stunden.}$$

In kleineren Maschinenfabriken werden bei 8stündiger Schicht 1000—1200 Stunden erreicht.

| Werkzeugmaschinen   | Lei-<br>stung<br>kW | Betr.-<br>Stunden<br>im Tag | durch-<br>schnittl.<br>Belastg. | kWh im Tag                    |
|---|---------------------|-----------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| 1 Plan-Drehbank 1,5 m Plansch. .                              | 3                   | 2                           | 60%                             | $3 \cdot 2 \cdot 0,6 = 3,6$   |
| 1 Drehbank, 250 mm Spitzenh. .                                | 2                   | 6                           | 70%                             | $2 \cdot 6 \cdot 0,7 = 8,4$   |
| 1 Klein-Drehbank. . . . .                                     | 0,5                 | 5                           | 80%                             | $0,5 \cdot 5 \cdot 0,8 = 2,0$ |
| 1 Bohrmaschine, bis 60 mm $\varnothing$ .                     | 4                   | 4                           | 60%                             | $4 \cdot 4 \cdot 0,6 = 9,6$   |
| 1 Bohrmaschine, bis 30 mm $\varnothing$ .                     | 2                   | 7                           | 70%                             | $2 \cdot 7 \cdot 0,7 = 9,8$   |
| 1 Schnellbohrmaschine . . . . .                               | 1                   | 7                           | 80%                             | $1 \cdot 7 \cdot 0,8 = 5,6$   |
| 1 Hobelmaschine, 800 $\times$ 2000 mm<br>Tischgröße . . . . . | 4                   | 2                           | 70%                             | $4 \cdot 2 \cdot 0,7 = 5,6$   |
| 1 Schmiedegebläse . . . . .                                   | 0,5                 | 6                           | 100%                            | $0,5 \cdot 6 \cdot 1 = 3,0$   |
| 1 Schleifstein . . . . .                                      | 1                   | 4                           | 50%                             | $1 \cdot 4 \cdot 0,5 = 2,0$   |
| 18 kW   |                     |                             |                                 | kWh 49,6                      |

Der *Belastungsfaktor*, d. i. das Verhältnis des wirklichen Jahresverbrauchs zum höchstmöglichen Verbrauch beträgt:

$$\frac{14800}{18 \cdot 8 \cdot 300} = 0,35.$$

In kleineren Maschinenfabriken wird 0,4—0,5 erreicht. Die durchschnittliche Antriebsleistung beträgt  $49,6 : 8 = 6,2$  kW. Gewählt werde nach Zuschlag von 15% für die Transmission und die Zwischenvorgelege und von 4% für den Transmissionsantrieb ein Motor von 8 kWh Dauerleistung. Der Wirkungsgrad desselben sei 0,87. Der Gesamtverbrauch im Jahr ist also:

|  |           |
|--|-----------|
| Werkzeugmaschinen . . . . .  | 14800 kWh |
| 15% Transmissionsverlust = $0,15 \cdot 6,2 \cdot 8 \cdot 300 =$ . . . . .    | 2230 kWh  |
| 4% Antriebsverlust = $0,04 \cdot 6,2 \cdot 8 \cdot 300 =$ . . . . .          | 600 kWh   |
| Motorverluste ( $9200 - 8000 = 1200$ W), $1,2 \cdot 8 \cdot 300 =$ . . . . . | 2780 kWh  |
| 2,5% Leitungsverlust $0,025 \cdot 8 \cdot 8 \cdot 300 =$ . . . . .           | 480 kWh   |
|  | 20890 kWh |

Die Jahresrechnung beträgt also:

|   |          |
|---|----------|
| Feste Gebühr $8 \cdot 70 =$ . . . . .               | 560 Mk.  |
| Veränderliche Kosten $20890 \cdot 0,05 =$ . . . . . | 1045 Mk. |
|   | 1605 Mk. |

Hätte man den Motor nach der Höchstleistung 18 kW bemessen, so wären neben geringem Mehrverbrauch durch den unterbelasteten Motor etwa 700 Mk. mehr zu zahlen.

**Beispiel:** Ein Kompressor für 10 m<sup>3</sup> minutliche Ansaugeluftmenge soll Druckluft von 6 Atm. Überdruck zum Betrieb von Preßluftwerkzeugen erzeugen. Er macht 175 minutliche Umläufe und sein Schwungrad, welches zugleich als Riemenscheibe dient, hat einen Durchmesser von 1800 mm. Es soll die elektrische Ausrüstung für 500 V Drehstrom bestimmt werden.

Nach der „Hütte“ sind zur adiabatischen Kompression (ungünstigster Fall) von 1 m<sup>3</sup> Luft auf 6 Atm. Überdruck 26100 mkg nötig, also für 10 : 60 = 0,167 m<sup>3</sup> je Sekunde:

$$0,167 \cdot 26100 = 4350 \text{ mkg/Sek.} = \frac{4350}{102} = 42,7 \text{ kW.}$$

Unter Annahme eines Kompressorwirkungsgrades von 0,8 und eines Riemenverlustes von 3% ergibt sich eine Antriebsleistung von:

$$\frac{42,7}{0,8 \cdot 0,97} = 55 \text{ kW.}$$

In der Motorenliste werde ein Drehstrommotor von 55 kW Dauerleistung bei 730 minutlichen Umläufen ausgewählt. Seine normale Riemenscheibe hat nach Liste einen Durchmesser von 560 mm, die kleinste zulässige Scheibe soll 500 mm haben. Hier ist jedoch eine Scheibe nötig von  $\frac{1800 \cdot 175}{730} = 432$  mm Durchmesser. Es wird deshalb ein langsamer laufender Motor gewählt von 585 Umdrehungen, dessen kleinste Scheibe 540 mm Durchmesser und 420 mm Breite haben soll. Erforderlich sind:

$$\frac{1800 \cdot 175}{585} = 540 \text{ mm } \varnothing.$$

Da mit einem Riemenschlupf von etwa 2% zu rechnen ist, wird der Scheibendurchmesser auf 550 mm erhöht. Das Motordrehmoment ist:

$$M = 0,975 \cdot \frac{55000}{585} = 91,7 \text{ mkg}$$

und die Zugkraft am Scheibenumfang:

$$P = M : d/2 = 91,7 : 0,275 = 333 \text{ kg.}$$

Läßt man eine Riemenbeanspruchung von 8,5 kg je cm Riemenbreite zu, so ergibt sich die Riemenbreite zu:

$$b = 333 : 8,5 = 392 \text{ mm} = \text{rund } 400 \text{ mm.}$$

Die Übersetzung des Riemetriebes beträgt:  $550 : 1800 = 1 : 3,27$ , also wesentlich unter der höchst zulässigen von  $1 : 5$ . Der Achsabstand der beiden Scheiben kann etwa gleich dem 4fachen der großen Scheibe, also rund 7 m gewählt werden. Falls dieser Abstand zu groß oder der Riemen zu teuer wird, muß ein Spannrollengetriebe eingebaut werden.

Der Motorwirkungsgrad ist nach Liste 0,91, der Leistungsfaktor 0,88. Demnach der Normalstrom:

$$I = \frac{55000 \cdot 1,73}{3 \cdot 500 \cdot 0,88 \cdot 0,91} = 80 \text{ A.}$$

Nach Liste ist die Läuferspannung bei Stillstand 230 V, folglich der Läuferstrom überschläglich:

$$I_2 = 80 \cdot \frac{500}{230} = 173 \text{ A.}$$

Als Motorsicherung werde 80 A gewählt. Dieselbe hält bekanntlich  $80 \cdot 1,25 = 100$  A noch dauernd aus. Wir müssen hier mit einem Anlaufstrom von etwa  $1,5 \cdot 80 = 120$  A rechnen. Nimmt man die Anlaßzeit zu 10 Sekunden an, so wird die 80 A-Sicherung noch aushalten. Der Schaltkasten ist für 100 A zu bestellen. Als *Anlasser* kommt am ehesten ein Ölanlasser in Frage, und zwar für Vollastanlauf, wegen des Anlaufs gegen den Druck und wegen der Massenbeschleunigung des Schwungrades. Die Anlaßhäufigkeit ist sehr gering. Die Kompressoren erhalten ein Umschalventil, welches bei Erreichung des Höchstdruckes die weitere Kompression ausschaltet, worauf der Kompressor leer weiterläuft. Bei Gleichstrom kann auch ein Regelmotor verwandt werden, der bei Erreichung des Höchstdruckes mittels Kontaktmanometers und Schützes auf stärkste Erregung und ganz langsamen Lauf oder ganz ausgeschaltet wird.

Die kurzen *Leitungen* für den Läufer brauchen nur der Erwärmungsbedingung zu genügen, also nach Tabelle  $70 \text{ mm}^2$ . Da ein zweiter Kompressor vorgesehen ist, sind für die Ständerzuleitung 160 A einzusetzen. Auf Erwärmung genügte ein Kupfer-Erdkabel  $3 \cdot 50 \text{ mm}^2$ . Bei einer Länge von 150 m vom Verteilungspunkt ergibt sich ein Widerstand von 0,0526 Ohm je Ader. Folglich ein Spannungsabfall von

$$\sqrt{3} \cdot 160 \cdot 0,0526 \cdot 0,88 = 12,8 \text{ V}$$

zulässig!

**Die Steuerung der Werkzeugmaschinen.** Für die Steuerung der Werkzeugmaschinenantriebe können normale Anlasser mit Luftkühlung verwandt werden. Ist die Drehzahl des Motors regelbar, so kommt ein Anlasser mit Feldregulierwiderständen nach Abb. 168 in Frage. Für nicht ganz trockene und staubfreie Räume sind Ölanlasser zu wählen. Dieselben sind auch in reinen Werkstätten angebracht, wenn mit einer roheren Bedienung zu rechnen ist. Bei Maschinen, welche in häufiger Folge angelassen werden, sind Walzenanlasser notwendig. Bei all diesen Anlassern muß der Arbeiter sowohl beim Anlauf, als auch beim Stillsetzen seine Arbeit an dem Werkstück verlassen, weil der Anlasser

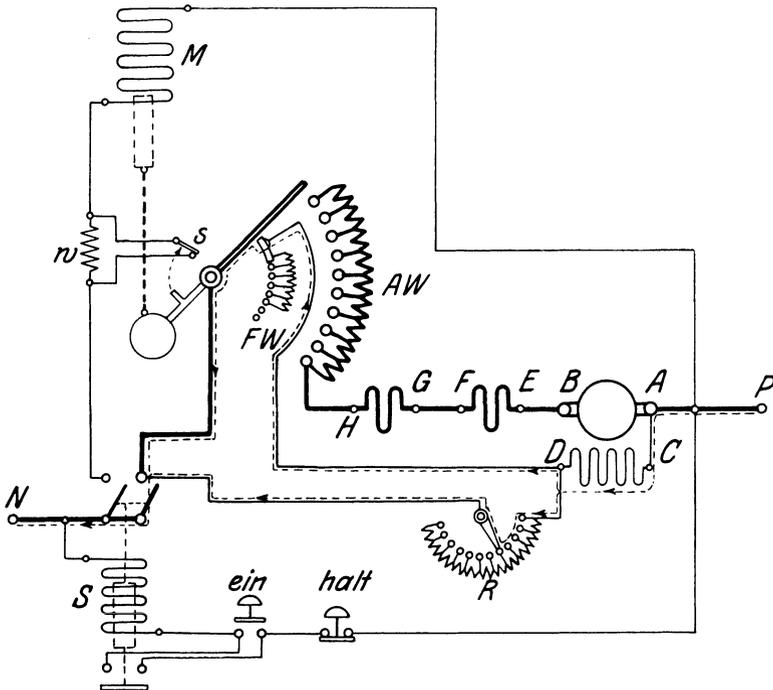


Abb. 469. Druckknopf-Anlaßsteuerung für Werkzeugmaschinen.

im allgemeinen nicht in handlicher Nähe angebracht werden kann. Man ist nun in neuerer Zeit bestrebt, dem Arbeiter seine Tätigkeit so bequem wie möglich zu machen, damit er seine ganze Aufmerksamkeit der Arbeit an dem Werkstück widmen kann. Aus diesem Grunde und um eine unsachgemäße Bedienung der Anlaßvorrichtung zu vermeiden, werden jetzt häufig Selbstanlasser mit Druckknopfsteuerung verwandt, wie wir sie bei den Aufzügen bereits kennen gelernt haben. Eine einfache Steuerung dieser Art zeigt Abb. 469. Der Anlasser besitzt einen Anlaßwiderstand AW und einen Feldwiderstand FW und wird wie derjenige in Abb. 393 durch einen Magneten M mit Dämpfung bewegt. Ein Schütz S, welches sowohl den Motorstrom, als auch den Strom des Schaltmagneten M schaltet, kann durch zwei Druckknöpfe ein- und ausgeschaltet werden.

Nach dem Einschalten durch den Einschaltedruckknopf hält es seinen Stromkreis durch seine den Druckknopf überbrückenden Hilfskontakte geschlossen. Dem durch die Erregerwicklung C—D fließenden Strom bieten sich zwei Wege, einmal über den Feldwiderstand FW des Selbstanlassers und ferner über den von Hand einstellbaren Widerstand R, wie punktiert eingezeichnet ist. Der erstere Stromlauf ist aber nur während des Anlassens vorhanden. Sobald die letzten Anlaßstufen erreicht sind, besteht nur noch der Stromweg über R, so daß mit diesem Widerstand die Motordrehzahl beliebig eingestellt werden kann. Der kleine Schalter s an dem Selbstanlasser öffnet sich, wenn die Kurbel die Einschaltstellung erreicht und schaltet dem Magneten den Widerstand w vor, damit kein unnötig hoher Strom verbraucht wird.

Um dem Arbeiter die Einstellung der richtigen Arbeitsgeschwindigkeit zu erleichtern, kann man nun noch einen Schritt weiter gehen und kann mittels Druckknopfs auch die Motorerregung verändern, wie dies durch Abb. 470 dargestellt ist. Diese Schaltung hat drei Druckknöpfe. Wird s erstmals kurz gedrückt, so setzt sich der Motor in Bewegung, und die Selbstanlasserkurbel wird durch den Hilfsmotor a langsam in die Stellung I gedreht, in welcher alle Anlaßwiderstände abgeschaltet sind, während der Motor voll erregt ist. In dieser Stellung macht also der Motor seine geringste Drehzahl. Drückt man dann s nochmals, so wird der Anlasser weiter gedreht, und durch die entstehende Feldschwächung läuft der Motor schneller. Sobald man den Druckknopf losläßt, bleibt die Anlasserkurbel in der erreichten Lage stehen. Der Druckknopf l hingegen wirkt gerade entgegengesetzt. Solange man ihn gedrückt hält, bewegt sich die Anlasserkurbel rückwärts, wodurch der Motor langsamer läuft. Der dritte Druckknopf h dient zur Stillsetzung der Maschine. In der Schaltung ist wie stets A—B der Anker, C—D die Nebenschlußwicklung und G—H die Wendepolwicklung des Antriebsmotors. Mit dem Selbstanlasser R ist ein Grenzscharter G fest gekuppelt. Das Schütz S 1 schaltet den Motorstrom. In seiner Aus-Stellung schließt es den Anker über einen Bremswiderstand Br kurz, damit beim Stillsetzen der Motor ohne unnötigen Zeitverlust rasch zur Ruhe kommt. Das Schütz S 2 schaltet den Erregerstrom des Motors, während Schütz S 3 nach einer Schaltung der A. E. G. beim Abschalten des Motors stufenweise den Feldwiderstand des Anlassers kurzschließt und damit die Bremsung verstärkt. Der Hilfsmotor a ist ein kleiner Hauptschlußmotor, der zum Vorwärts- oder Rückwärtslauf durch die Schütze v und r gesteuert wird. Ein kleiner Widerstand ist ihm dauernd vorgeschaltet.

Wenn wir nun den Druckknopf s drücken, so fließt von P ein Strom, wie gestrichelt angedeutet, durch die Spulen von S 1 und S 3, über den ersten und vierten Kontakt des Grenzscharter G und über den Druckknopf s nach N. Die Schütze S 1 und S 3 ziehen also an. Sie fallen auch nach dem Loslassen des Druckknopfs nicht ab, weil sowohl der Druckknopf als auch der Grenzscharter durch die Hilfskontakte des Schützes S 1 überbrückt worden sind, wie der punktierte Stromlauf angibt. Das Schütz S 3 hat durch seine Hilfskontakte weiter das Schütz S 2 eingeschaltet. Wie gestrichelt angegeben, fließt von P ein Strom über den Vorschaltwiderstand w 1, dann über die Überbrückung, welche sich in der Nullstellung am Grenzscharter G befindet, zu den Hilfskontakten an S 3 und schließlich durch die Spule S 2 nach N. Sobald der Grenzscharter aus seiner Nullstellung heraus und die Überbrückung von w 2 aufgehoben ist, kann S 2 nicht mehr anziehen, falls

es aus irgend einem Grunde abgefallen sein sollte. Durch das Anziehen von S 3 ist der Kurzschluß der Feldwiderstände des Anlассers aufgehoben, so daß dieselben nun zur Regelung mit der Anlассerkurbel bereit stehen. Durch das Drücken des Druckknopfs s ist aber auch der Hilfsmotor a in Betrieb gekommen. Es fließt von P, wie gestrichelt angedeutet, ein Strom zur Schützenspule v, über den dritten und zweiten Kontakt des Grenzsalters, dann über die mittleren Hilfskontakte von S 2 nach N. Das Schütz v schaltet den Hilfsmotor ein, und dieser dreht den Anlассer und Grenzsaltler langsam in der Richtung O—I. Sobald die Stellung I erreicht ist, verläßt der zweite Kontakt des Grenzsaltlers G seine Schiene und das Schütz v fällt ab. Durch weiteres Drücken von s kann man Schütz v wieder zum Anziehen bringen. Der von P kommende Strom fließt durch v, über den dritten und vierten Kontakt des Grenzsaltlers und über den Druckknopf s nach N. Um die Motorgeschwindigkeit zu vermindern drückt man l. Es fließt dann von P ein

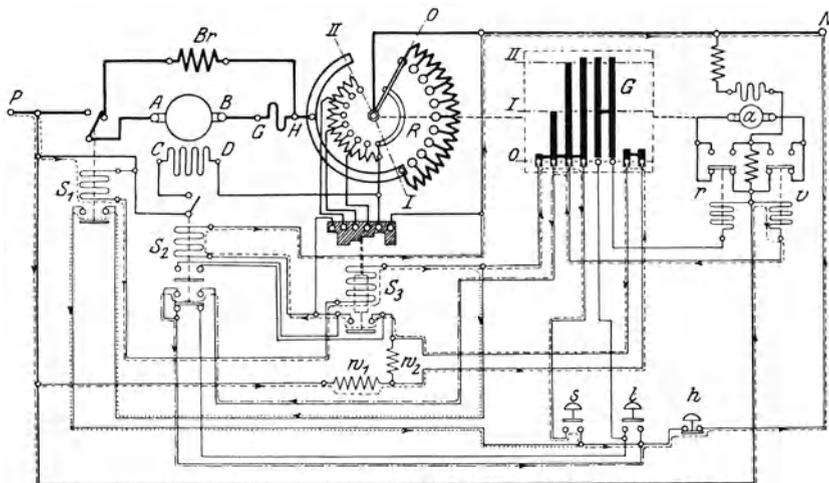


Abb. 470. Druckknopfsteuerung mit Feldregelung.

Strom durch die Spule r, über den fünften und sechsten Kontakt des Grenzsaltlers und über Druckknopf l nach N. Dieser Druckknopf ist durch die untersten Sperrkontakte des Schützes S 2 überbrückt. Sobald also dieses Schütz abgefallen ist, bekommt stets Schütz r Strom und sorgt dafür, daß der Anlассer in die Nullage zurückgedreht wird. Beim Drücken des Druckknopfs h fallen alle Schütze ab. Der Anker wird kurzgeschlossen und Schütz S 3 verstärkt die Erregung durch seinen Stufenschalter, falls die Erregung geschwächt sein sollte.

Damit dem Arbeiter jeder unnötige Weg erspart wird, kann man an einer größeren Maschine mehrere Druckknopftafeln anbringen (s. Schaltung 9 auf S. 437). Die Anordnung der elektrischen Ausrüstung einer großen Drehbank geht aus Abb. 471 hervor. A ist der Hauptantriebsmotor, während die Motoren B und C der Schnellverstellung des Reitstockes bzw. des Supportes dienen. Der Hauptmotor wird mit Selbstanlассer Aa und Druckknöpfen gesteuert, während der Reitstockmotor wegen der selteneren Benutzung einen Hand-Regelanlассer Ab besitzt. Motor C wird durch die Druckknöpfe dc und den Selbstanlассer Ac gesteuert. Wie man sieht, sind die Druckknöpfe mehrfach vorhanden, insbesondere diejenigen des Hauptmotors, die mit da bezeichnet sind. Der Reitstockmotor kann durch den Druckknopf db lediglich stillgesetzt werden. Der Support ist ferner mit Endschaltern ec und der Reitstock mit dem

Endschalter eb ausgerüstet, damit ein Anrennen gegeneinander ausgeschlossen ist. Beide Teile sind, weil sie beweglich sind, mit Stromabnehmern ausgerüstet, die an den Schleifleitungen L gleiten. Abschaltbar und gesichert ist die Maschine durch den Schaltkasten S.

Die Steuerung der durch Umkehrmotor angetriebenen Werkzeugmaschinen mit hin- und hergehender Bewegung, wie der Stoß- und Hobelmaschinen erfolgt meistens durch einen Steuerschalter, welcher am Ende eines jeden Hubes durch den Stößel oder Hobeltisch umgeschaltet wird. Bei derartigen Maschinen wünscht man die Geschwindigkeit während des Rücklaufs immer möglichst hoch, damit wenig Zeit verloren geht. Auf elektrischem Wege läßt sich diese Bedingung nicht nur leicht erfüllen, sondern man kann die Geschwindigkeit auch noch beliebig mit einem Feldwiderstand einstellen. Wir wollen nun die durch Abb. 472 dargestellte A.E.G.-Umkehrschaltung, welche für eine Stoßmaschine nach Abb. 473 Verwendung finden könnte, näher betrachten. Von dem hin- und hergehenden Stößel wird am Hubende die Umschaltwalze W

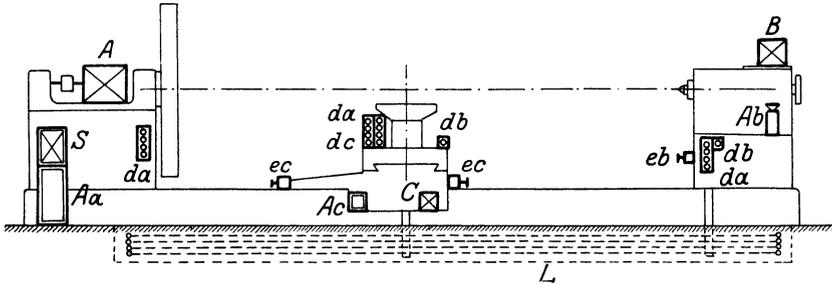


Abb. 471. El. Ausrüstung einer großen Drehbank.

aus der v-Stellung in die r-Stellung bewegt oder umgekehrt. Die Walze W ist mit dem Steuerschalter St unter Zwischenschaltung einer Dämpfung derart verbunden, daß W immer im stromlosen Zustand umgeschaltet wird. S ist ein Bremsschutz mit Nullspannungs- und Höchststromauslösung. DR ist ein Doppel-Feldregler, mit welchem links die Arbeitsgeschwindigkeit und rechts die Rücklaufgeschwindigkeit eingestellt wird. Die Verzögerung am Hubende erfolgt in der Weise, daß kurz vor der Umschaltung der Steuerwalzen W und St die Feldverstärkungsschalter V eingeschaltet werden, wodurch der Feldwiderstand DR überbrückt und dadurch die Motordrehzahl auf ihren niedrigsten Wert gebracht wird. Hierauf erfolgt die Umschaltung. Wenn das Schütz S aus irgend einem Grunde abfällt, schließt es den Anker über den Bremswiderstand Br kurz. Derselbe speist dann über den Umschalter U, welcher vom Antrieb umgeschaltet wird, die Erregung C—D. Die Schaltung wirkt nun in der Weise, daß die Ankerwiderstände R von den vier ersten Schaltern des Steuerschalters St geschaltet werden, während die Walze W die Umschaltung des Ankers bewirkt. Der Schalter v ist in der Nullstellung und während des Anlassens geschlossen und überbrückt auch den Feldwiderstand DR, damit der Anlauf bei voller Erregung erfolgt.

Drückt man den Einschaltedruckknopf, so fließt ein Strom von P wie gestrichelt gezeichnet über E—F zur Walze W, über den letzten Kontakt derselben und über den Druckknopf zur Spule S und dann nach N. Die Walze W muß dabei in der Nullstellung stehen. Nach dem Loslassen des Druckknopfes bleibt Schütz S angezogen, weil dann der Strom über den vorletzten Kontakt der Walze, über den Ausschaltedruckknopf, die Endschalter E und die Widerstände r zur Schützenspule S kann. Der Lauf des Erregerstromes ist ebenfalls gestrichelt eingezeichnet. Bei der umgekehrten Fahrtrichtung würde der linke Kontakt des Feldwiderstandes stromführend werden. Die Endschalter E sind nicht unbedingt nötig, weil der Hub doch schon durch die Umschaltung des Steuerschalters begrenzt ist, und weil

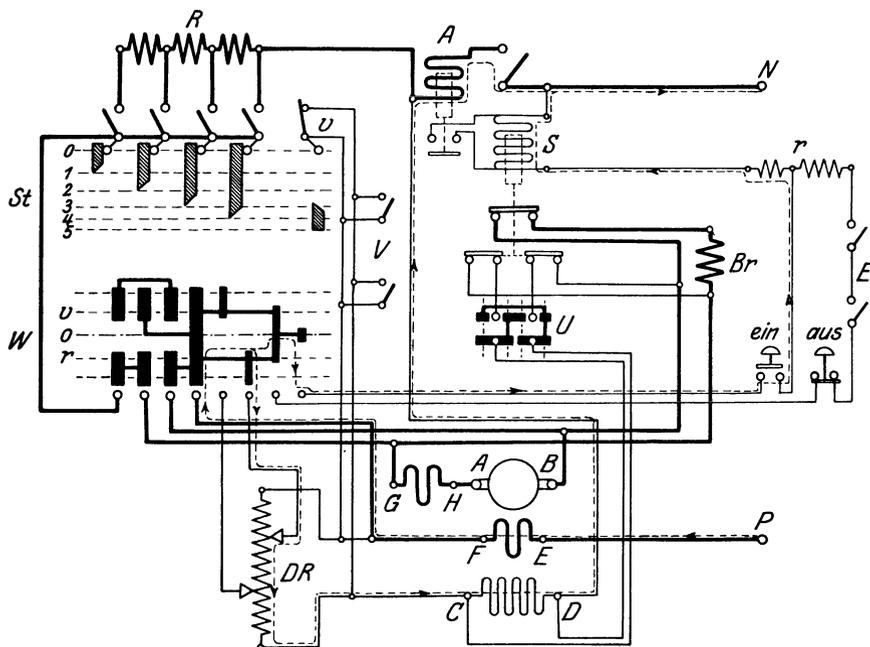


Abb. 472. Druckknopf-Umkehrschaltung.

bei einem Weiterdrehen der Steuerwalze über die Grenzstellen v und r hinaus auch Abschaltung erfolgt.

Die Anordnung der Apparate bei einer Stoßmaschine ist aus Abb. 473 zu erkennen. Oben auf der Wandstütze ruht der Steuerschalter, welcher die Walze W und die Schalter St enthält. Die runde Scheibe in der Mitte der Maschine ist mit dem Triebwerk gekuppelt und trägt einstellbare Knaggen, welche die Feldverstärkungsschalter V und nötigenfalls den Endschalter E betätigen. Durch Verstellen der Knaggen wird der Hub eingestellt. Unterhalb des Motors ist der Schaltkasten K erkennbar. D sind die Druckknöpfe.

Die übrigen Bezeichnungen stimmen mit denen des Schemas Abb. 472 überein.

Bei Hobelmaschinen kommt es zuweilen vor, daß der Hobelweg Lücken aufweist. Um Zeit zu sparen kann man diesen Leerweg mit erhöhter Geschwindigkeit zurücklegen, indem man einen Strecken-

schalter einbaut, welcher am Anfang des Leerweges die Erregung schwächt und am Ende wieder verstärkt. Die Steuerung einer Hobelmaschine stimmt genau mit derjenigen einer Stoßmaschine überein. Bei ihr wird der Steuerschalter durch den bekannten Stiefelknecht bewegt. Bei großen Hobelmaschinen findet man auch hin und wieder Leonardsteuerung angewandt.

Bei größeren Werkzeugmaschinen mit mehreren Antriebsmotoren ist es wünschenswert, daß die einzelnen, am gleichen Werkstück arbeitenden Antriebe in Abhängigkeit voneinander gesetzt werden, damit Zusammenstöße und Beschädigungen vermieden werden. Bei einem Fräs-

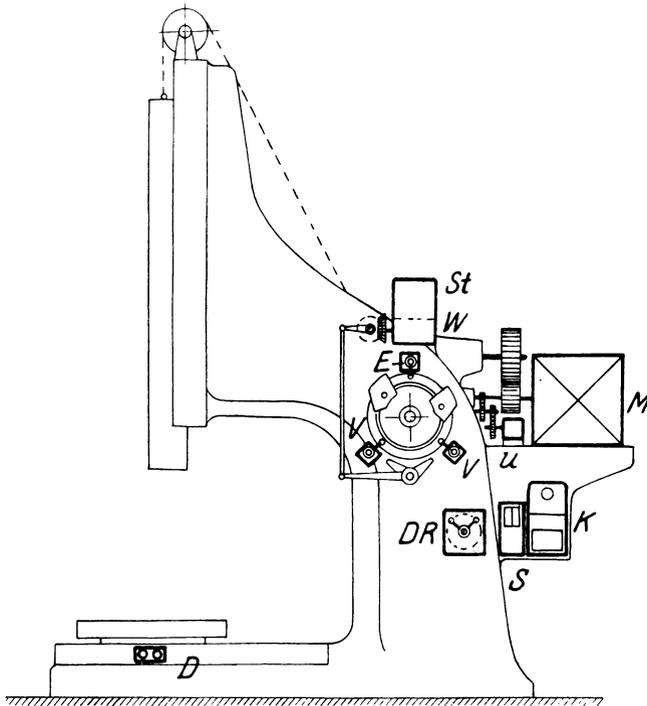


Abb. 473. Ausrüstung einer Stoßmaschine mit Umkehrmotor.

werk ist es z. B. ratsam, den Fräsmotor gegen den Antriebsmotor des Tisches derart zu verriegeln, daß letzterer stillgesetzt wird sobald der Fräsmotor aus irgend einem Grunde stehen bleibt, weil sonst ein Bruch des Fräasers unvermeidlich wäre. Schaltung 19 auf S. 441 stellt eine derartige Verriegelung dar.

Der Antrieb des Werkzeugvorschubs wurde bisher fast ausschließlich mit mechanischen Mitteln vom Hauptantrieb abgeleitet. Derselbe kann jedoch auch einen eigenen elektrischen Antrieb bekommen, den man außerdem noch in eine derartige Abhängigkeit vom Hauptantriebsmotor bringen kann, daß die Geschwindigkeit des Vorschubmotors der Belastung des Arbeitsmotors umgekehrt proportional ist, daß also bei starkem

Span nur ein geringer Vorschub vorhanden ist. Eine Überbeanspruchung von Werkzeug und Werkzeugmaschine ist damit ausgeschlossen.

Für die Installation der Werkzeugmaschinen kommen ebenso wie bei den Hebemaschinen hauptsächlich Panzeradern und Gummiadern in Stahlpanzerrohr in Frage. Insbesondere die letzteren werden wegen ihrer größeren mechanischen Festigkeit bevorzugt. Es steht jedoch auch nichts im Wege, an geschützten Stellen innerhalb des Maschinengestells die billigeren verbleiten Eisenrohre, wie sie für Zimmerverlegungen in Frage kommen, zu verwenden. Beweglichen Motoren und den auf den Supporten langer Drehbänke angeordneten Druckknöpfen muß der Strom durch Schleifleitungen zugeführt werden. Die Schaltung Abb. 470 hat z. B. drei Druckknöpfe mit je zwei Anschlußpunkten. Man brauchte zu ihrem Anschluß also eigentlich sechs Schleifleitungen. Da aber drei Punkte miteinander verbunden sind, also als einen gelten, verringert sich die Zahl der notwendigen Schleifleitungen auf vier. Die Unterbringung der Schleifleitungen erfordert besonders Aufmerksamkeit, weil dieselben sowohl vor den niederfallenden Spänen als auch vor Feuchtigkeit geschützt sein müssen. Wenn eine Verlegung innerhalb des Maschinenrahmens nicht möglich ist, bringt man sie meist in einem gut abgedeckten Kanal im Boden unter (s. auch Abb. 471).

**Beispiel:** Eine Schrupp-Drehbank von 300 mm Spitzenhöhe soll bei 10 m minutlicher Schnittgeschwindigkeit eine stündliche Spanleistung von 35 kg Maschinenstahl haben. Die Mindestschnittgeschwindigkeit soll 7,5 m, die Höchstgeschwindigkeit 20 m je Minute sein. Der kleinste vorkommende Drehdurchmesser ist 50 mm, der größte 600 mm. Es ist die elektrische Ausrüstung festzulegen.

Der Spanquerschnitt ergibt sich aus der Spanleistung von 35 kg und der Geschwindigkeit 10 m/min. zu:

$$\frac{35}{7,8 \cdot 100 \cdot 60} = 7,5 \text{ mm}^2.$$

Legt man bei Maschinenstahl einen Schnittwiderstand von 200 kg je mm<sup>2</sup> zugrunde, so ergibt sich unter Annahme eines Drehbankwirkungsgrades von 0,7 die Antriebsleistung zu:

$$\frac{P \cdot v}{102 \cdot \eta} = \frac{200 \cdot 7,5 \cdot 0,167}{102 \cdot 0,7} = 3,5 \text{ kW Dauerleistung,}$$

wegen der Schaltantriebe erhöht auf 3,7 kW.

Die Mindestdrehzahl der Bank ist vorhanden bei größtem Drehdurchmesser und kleinster Geschwindigkeit, also

$$n_{\text{min.}} = \frac{7,5}{0,6 \cdot 3,14} = 4 \text{ Umläufe/Min.}$$

Die Höchstdrehzahl ist:

$$n_{\text{max.}} = \frac{20}{0,05 \cdot 3,14} = 128 \text{ Umläufe/Min.}$$

Der notwendige Regelbereich muß also  $4 : 128 = 1 : 32$  sein. Dieser ist mit einem Motor allein nicht zu erreichen. Es wird ein Regelmotor mit  $1 : 3$  Regelung angenommen, weil der Motor sonst zu teuer werden würde. Nach Liste werde ein Motor gewählt mit minutlich 400 Umläufen, die durch Feldschwächung auf 1200 gesteigert werden können. Da die höchste Bankdrehzahl 128 ist, muß zwischen Motor und Bank ein nicht ausschaltbares Vorgelege von  $128 : 1200 = 1 : 9,4$  vorhanden sein. Diese Übersetzung ist für ein Vorgelege zu groß. Da aber zwei Vorgelege nötig sind, kann auch die Motordrehzahl höher gewählt werden, wodurch sich der Motor verbilligt. Gewählt: Motordrehzahl 580, steigerbar bis 1740. Die festen Vorgelege müssen also eine Übersetzung von  $128 : 1740 = 1 : 13,6$  haben, was mit zwei Vorgelegen zu erreichen ist.

Mit diesen festen Vorgelegen macht die Bank bei 1200 Motorumläufen 128 Umdrehungen. Bei zurückgeregeltem Motor ist die Bankdrehzahl demnach nur noch  $128 : 3 = 43$ . Wir wollen nun ein weiteres Vorgelege einschalten, so daß die Bank bei 1200 Motorumläufen nur 40 Umläufe macht. Die Übersetzung dieses Vorgeleges müßte  $40 : 128 = 1 : 3,2$  sein. Mit dem Motor kann dann weiter von 40 bis auf  $40 : 3 = 13,3$  geregelt werden. Dann werde ein zweites ausrückbares Vorgelege eingeschaltet, so daß die Bank bei 1200 Motorumläufen noch 12 Umdrehungen macht. Dessen Übersetzung ist demnach  $12 : 40 = 1 : 3,3$ . Von 12 Umläufen läßt sich die Bank alsdann mittels des Motors auf  $12 : 3$ , also auf die verlangte niedrigste Drehzahl 4 herabregeln.

*Anlasser*: Eine Schrupp-Drehbank wird im allgemeinen stets hoch beansprucht und macht verhältnismäßig viel Anläufe, auch mit voller Last. Es wird deshalb ein Walzenanlasser vorgesehen. Die Schaltung zeigt Abb. 474. Damit die Bank im Notfalle schnell stillgesetzt werden kann, wird beim Drücken des handlich anzubringenden Haltedruckknopfes H der Motor mittels des Schützes S auf einen

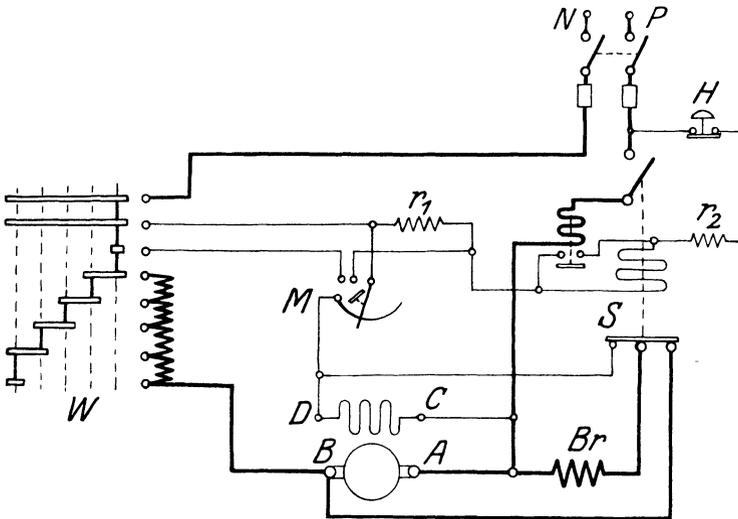


Abb. 474. Drehbankschaltung.

Bremswiderstand  $Br$  geschaltet. Das Hauptschütz S hat Nullspannungs- und Höchststromauslösung, und es kann nur anspringen, wenn die Anlaßwalze auf dem ersten Kontakt steht, und wenn der Magnetregler M auf volle Erregung geschaltet ist, weil nur auf dieser Stellung der Widerstand  $r_1$  überbrückt ist.

*Beispiel*: Eine Hobelmaschine wird durch einen S.S.W.-Nebenschlußmotor GM 244, 18,4 kW, 440 V angetrieben. Die Umlaufzahl ist bei Vollast von 500 auf 877 je Minute regelbar, kann im Leerlauf jedoch auf 1250 gesteigert werden. An der Maschine wurden die in Abb. 475 dargestellten Linien für Strom und Drehzahl oszillographisch aufgenommen. Dieselben gelten für das Hobeln von Gußeisen bei  $23 \cdot 3,2$  mm Spanquerschnitt und 0,132 m sekundlicher Geschwindigkeit. Der Rücklauf erfolgt mit der vollen Geschwindigkeit, also 1250 Motorumläufen. In Abb. 475 stellt A die Stromaufnahme beim Umschalten vom Arbeitshub zum Rückhub dar, wobei zunächst bei voller Erregung nur die niedrigste Drehzahl 500 erreicht wird. Durch Feldschwächung wird dann die Drehzahl auf 1250 gesteigert. Die dadurch notwendige Beschleunigungsenergie hat die Stromaufnahme B zur Folge. C stellt den Verbrauch für Reibung dar. Am Hubende wird durch Feldverstärkung zunächst die Geschwindigkeit auf den niedrigsten Wert 500 vermindert wodurch der Motor als Stromerzeuger den Strom D in das Netz zurückliefert. Man sieht, daß die Fläche D nicht sehr viel kleiner als B ist. Die beiden Spitzen der



nicht groß ist, erhalten dieselben meistens direkten elektrischen Antrieb über ein Rädervorgelege. Die Drehzahl braucht nicht verändert zu werden, es kann also bei Gleichstrom ein Nebenschlußmotor, bei Drehstrom ein Asynchronmotor verwandt werden. Das Anzugsmoment der Antriebsmotoren darf jedoch nicht zu klein sein, weil erfahrungsgemäß beim Anlauf die Gesamtmasse der Kugeln in der Trommel eine Strecke weit hoch gehoben werden muß, wozu ein höheres Drehmoment, etwa das doppelte des normalen erforderlich ist. Eine Kapselung der Mühlenmotoren, die mit Rücksicht auf den hohen Staubgehalt der Luft wünschenswert wäre, ist wegen der Größe der Motoren nicht durchführbar. Man beschreitet deshalb den bereits früher erwähnten Weg und setzt die Mühlenmotoren in einen vom Mühlenraum getrennten Raum. Die Antriebswellen der Motoren gehen durch die Wand, welche den Motorenraum vom dem Mühlenraum trennt, hindurch (Abb. 412). Bei einer größeren Zahl nebeneinander arbeitender Motoren wird ein besonderer Wärter

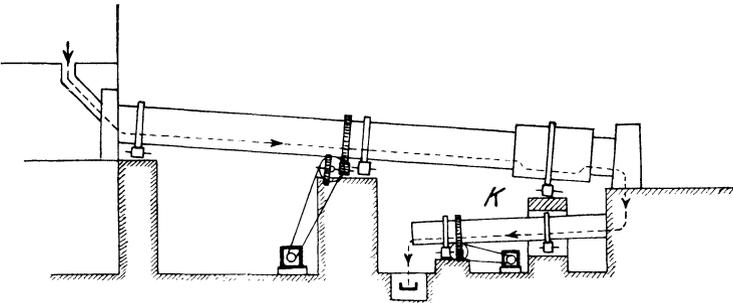


Abb. 476. Drehofen- und Kühltrommelantrieb.

erforderlich sein, welcher das Anlassen vom Motorstand aus bewerkstelligen kann. Das Abstellen muß jedoch auch von der Mühle selbst aus vorgenommen werden können. Man kann zu diesem Zweck an der Mühle einen Druckknopf anordnen, mit welchem man den Strom des meistens vorhandenen Nullspannungsmagneten am Motorschalter unterbricht. Zum Anlassen gibt der Müller dem Motorwärter ein Glockensignal, mit welchem in einem Fallklappenapparat gleichzeitig die Nummer der in Gang zu bringenden Mühle fällt. Bei geringerer Mühlenzahl kann man auch die Handräder des Anlagers und Schalters durch die Wand in den Mühlenraum ragen lassen, so daß von dort aus geschaltet werden kann.

Die **Drehöfen** sind leicht geneigte, auf Rollen gelagerte eiserne Trommeln, deren Länge zuweilen 60 m erreicht. Abb. 476 stellt einen solchen mit dem Antrieb schematisch dar. Das Material durchläuft den Ofen in der punktiert eingezeichneten Richtung, während derselbe sich langsam dreht. Die Einblasung des Kohlenstaubes oder des Gases zur Heizung geschieht an dem tiefer liegenden Ende, wo auch das gebrannte Material in die ebenfalls drehende Kühltrommel K fällt. Da eine gleichförmige Drehung des Ofens verlangt wird, kommen zum Antrieb Nebenschluß- bzw. gewöhnliche Drehstrommotoren in Frage. Nur ausnahms-

weise wird eine geringe Drehzahlregelung gewünscht, die bei Nebenschlußmotoren einfach durch eine Feldregelung, bei Drehstrommotoren nur durch eine Läufer-Widerstandsregelung möglich ist. Die höheren Verluste bei Drehstrom spielen jedoch keine große Rolle, weil es sich um Leistungen von kaum mehr als 50 kW handelt, und weil die Verminderung der Drehzahl meist selten ist. Das Anlaufmoment der Drehöfen ist groß, weil die ganze Antriebsleistung in Reibungswiderständen aufgebraucht wird, in welchem Falle ja der Anlauf wegen der Zähflüssigkeit des kalten Öles und des größeren Reibungskoeffizienten der Ruhe immer schwieriger ist. Beim Drehofen kommt noch hinzu, daß derselbe zuweilen nicht ganz gerade ist, so daß der Antrieb zeitweise klemmt. Wenn nämlich der warme Ofen aus irgend einem Grunde stehen bleibt, so kühlt er sich auf der unteren Seite stärker ab als oben, wodurch eine Krümmung eintritt. Auch der Anlasser ist für ein erhöhtes Anzugsmoment zu bemessen, um so mehr, als sich bei der Inbetriebsetzung des Ofens ein häufiges Anlassen kurz hintereinander nicht vermeiden läßt. Bei der Aufstellung der Motoren ist auf die strahlende Wärme des Ofens Rücksicht zu nehmen und zu beachten, daß bei warmem Gang des Ofens in einem Abstand von einem Meter von der Trommel noch eine Temperatur von 100° herrschen kann. Es empfiehlt sich deshalb, den Motor unten aufzustellen und mittels Riemens anzutreiben. Wegen des unvermeidlichen Staubes ist ein Schutz durch ein geräumiges Häuschen wünschenswert. Als rohe Anhaltspunkte für die Motorleistung, die natürlich Dauerleistung sein muß, können bei der üblichen Geschwindigkeit von etwa einer minutlichen Umdrehung folgende Angaben dienen:

|                 |                   |             |       |
|-----------------|-------------------|-------------|-------|
| 60 m Ofenlänge, | 2,5 m Durchmesser | . . . . .   | 35 kW |
| 40 m            | „ 2,2 m           | „ . . . . . | 20 kW |
| 30 m            | „ 2 m             | „ . . . . . | 15 kW |

Bei der Installation in der Ofenhalle sind alle elektrischen Leitungen oberhalb der Öfen gut gegen den von denselben aufsteigenden Wärmestrom zu schützen. Die übrigen in einer Zementfabrik vorkommenden Antriebe weisen nichts Besonderes auf.

In den chemischen Fabriken spielen die **Pumpenantriebe** eine Hauptrolle. Grundsätzlich ist bei den beiden Pumpenarten, der Kolbenpumpe und der Kreiselpumpe von vornherein zu beachten, daß bei einem Zudrehen des Druckschiebers der ersteren Pumpenart der Motorstrom wächst, während bei Kreiselpumpen das Zudrehen eine Abnahme des Motorstromes zur Folge hat. Es liegt dies daran, daß die Kolbenpumpe bei jedem Hub unbedingt die gleiche Wassermenge fördern muß, auch dann, wenn der Druckschieber nur noch wenig offen ist und dem Wasserdurchfluß einen großen Widerstand entgegengesetzt. Bei Kreiselpumpen aber bewirkt das Zudrehen des Druckschiebers eine Verminderung der geförderten Wassermenge und damit eine Verminderung der Leistung. Der Anlauf einer Kreiselpumpe erfolgt ja allgemein bei geschlossenem Druckschieber, also mit geringem Drehmoment, während die Kolbenpumpe im Gegenteil eine Öffnung des Druckschiebers vor dem Anlassen fordert und deshalb zum Anlauf ein hohes Drehmoment benötigt. Zum

Antrieb beider Pumpenarten eignen sich wegen der erforderlichen konstanten Umlaufzahl der Nebenschlußmotor (bei Kolbenpumpen auch Doppelschlußmotoren), bzw. der normale Drehstrommotor. Eine Regelung der Umlaufzahl zur Veränderung der Förderung ist allerdings bei letzterem Motor nur durch die unwirtschaftliche Läuferregelung möglich.

Bei der Regelung haben wir zwei Fälle zu unterscheiden. In dem einen Grenzfall nehmen wir an, daß die Pumpe keine Druckhöhe, sondern nur Rohrleitungswiderstände zu überwinden habe, daß also das Wasser nur in horizontalen Leitungen bewegt werde. In diesem Falle wachsen nach den Regeln der Mechanik die Widerstände mit dem Quadrat der Geschwindigkeit. Das erforderliche Drehmoment steigt also in derselben Weise an, wie es Abb. 450 für einen Ventilator veranschaulicht. Die erforderliche Antriebsleistung, die durch das Produkt aus Drehmoment und Umlaufzahl bestimmt ist, muß also mit der dritten Potenz der Drehzahl ansteigen. Wir sehen also, daß eine geringe Erhöhung der Drehzahl eine außerordentlich viel größere Beanspruchung des Motors zur Folge hat. Wir wollen uns nun den anderen Grenzfall denken, bei welchem

nur Druckhöhen von der Pumpe zu überwinden sind und die Reibungswiderstände in den Rohrleitungen wegen der Kürze und großen Weite der Leitungen vernachlässigbar klein seien. In diesem Falle lastet auf der Pumpe bei jeder Drehzahl der gleiche Wasserdruck, es ist also, wie dies Abb. 477 andeutet, stets das gleiche Drehmoment  $M$  erforderlich. Die Leistung hingegen als Produkt aus  $M$  und  $n$  steigt nach einer Geraden an. Es kann also die Motordrehzahl schon weiter gesteigert werden, ohne daß eine große Überlastung zu befürchten ist. Dieser Grenzfall mit reiner

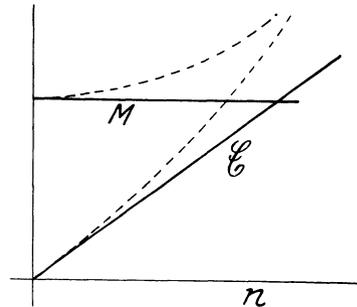


Abb. 477. Drehmoment und Pumpenleistung bei vorwiegend statischer Druckhöhe.

Druckhöhe ist praktisch nicht möglich, weil stets ein gewisser Druck zur Überwindung der Reibungs- und Beschleunigungswiderstände erforderlich sein wird. In diesem praktischen Falle würden sich die in Abb. 477 punktiert eingetragenen Linien ergeben. Kolbenpumpen werden fast immer für große Förderhöhe verwendet, gegenüber der die übrigen Widerstände in den Hintergrund treten. Bei diesen Pumpen ist also mit dem in Abb. 477 dargestellten Leistungsverlauf bei veränderlicher Umlaufzahl wahrscheinlich zu rechnen. Die Fördermenge wächst dabei proportional der Drehzahl. Bei Kreiselpumpen ist noch zu beachten, daß bei einer Verminderung der Drehzahl, und wenn die Pumpe gegen eine große statische Druckhöhe arbeitet, sehr bald die Förderung ganz aufhört, weil die Schleuderkraft der Pumpe den Wasserdruck nicht mehr überwinden kann. Die Drehzahl des Motors muß also genau stimmen.

Bei der Ausführung der Pumpenantriebe kommen normale Motoren und Apparate in Frage, es ist jedoch nötigenfalls auf die Feuchtigkeit oder auf ätzende Dünste Rücksicht zu nehmen. Bei direkter Kupplung des Motors mit der Pumpe ist zuweilen ein Trennblech vorteilhaft,

welches das Spritzwasser von dem Motor fernhält. Die Kupplung, welche elastisch sein sollte, muß bei sehr hohen Umlaufzahlen stets in guter Ordnung sein.

Der Leistungsbedarf der Pumpen berechnet sich in gleicher Weise wie bei den Hebemaschinen und beträgt in kW:

$$\mathcal{E} = \frac{9,81 \cdot Q \cdot H}{\eta} \dots \dots \dots 68$$

Hierin bedeutet  $Q$  die sekundlich geförderte Wassermenge in  $m^3$ ,  $H$  die gesamte Förderhöhe vom Saugspiegel bis zum Ausfluß in  $m$  und  $\eta$  den Pumpenwirkungsgrad. Der letztere ist bei Kreiselpumpen nicht sehr hoch und beträgt bei kleinen Pumpen nur 0,4; bei sehr großen Leistungen wird 0,8 erreicht. Kolbenpumpen haben einen wesentlich besseren Wirkungsgrad, nämlich 0,8—0,85. Bei der Leistungsbestimmung muß der Strömungswiderstand langer Leitungen und der Krümmer in Rechnung gesetzt werden.

**Beispiel:** Eine Kolbenpumpe soll bei einer gesamten Förderhöhe von 60 m stündlich 50  $m^3$  Wasser fördern. Wie groß muß die Motorleistung sein, wenn die ganze Rohrlänge 1200 m bei einem Durchmesser von 135 mm ist?

Die sekundliche Wassermenge beträgt

$$Q = \frac{50}{3600} = 0,0139 \text{ m}^3.$$

Da der Querschnitt des Rohres bei 135 mm Durchmesser  $0,0143 \text{ m}^2$  ist, beträgt die Wassergeschwindigkeit im Rohr:

$$v = \frac{0,0139}{0,0143} = 0,97 \text{ m/Sek.}$$

Aus den Taschenbüchern kann man entnehmen, daß bei dieser Geschwindigkeit in dem angegebenen Rohr auf 100 m Rohrlänge ein Druckabfall von 0,83 m entsteht. Bei unserer Rohrlänge tritt also ein zusätzlicher Druck von  $12 \cdot 0,83 = 10 \text{ m}$  auf, so daß als gesamte Förderhöhe  $H = 60 + 10 = 70 \text{ m}$  einzusetzen ist

$$\mathcal{E} = \frac{9,81 \cdot 0,0139 \cdot 70}{0,85} = 11,2 \text{ kW.}$$

Unter der Annahme, daß der Antriebsmotor mittels Riemens auf eine auf der Kurbelwelle sitzende Scheibe arbeitet, wobei ein Riemenverlust von nicht mehr als 4% auftritt, ergibt sich die Motorleistung zu:

$$11,2 : 0,96 = 11,7 \text{ kW, Dauerleistung.}$$

**Beispiel:** Eine Kreiselpumpe, welche bei 1450 minutlichen Umläufen und höchstens 15 m Gesamtdruckhöhe 3  $m^3$  Wasser je Minute fördert, soll elektrisch angetrieben werden. Die ganze Rohrlänge mit 220 mm Weite hat eine Länge von 150 m und enthält 3 Krümmer und ein Fußventil.

Die sekundliche Wassergeschwindigkeit im Rohr berechnet sich zu 1,32 m/Sek. Die tatsächliche Förderhöhe, also der Höhenunterschied zwischen Saugwasserspiegel und Hochbehälterspiegel ist 13 m.

Die Widerstandshöhe, die zur Überwindung der Rohrwiderstände nötig ist, kann aus folgender Beziehung berechnet werden:

$$h = \frac{v^2 \cdot l}{2 \cdot g \cdot d} \left[ 0,02 + \frac{0,0018}{\sqrt{v \cdot d}} \right],$$

hierin ist  $v$  die Wassergeschwindigkeit,  $d$  der Rohrdurchmesser und  $l$  die Rohrlänge, zu welcher man noch einen Zuschlag von 2,5 m für jeden Krümmer und 0,3 m für das Fußventil machen kann.

$$h = \frac{1,32^2 \cdot 157,8}{2 \cdot 9,81 \cdot 0,22} \cdot \left[ 0,02 + \frac{0,0018}{\sqrt{1,32 \cdot 0,22}} \right] = 1,5 \text{ m.}$$

Die ganze Druckhöhe beträgt also  $13 + 1,5 = 14,5$  m.  
Folglich die Antriebsleistung bei einem Pumpenwirkungsgrad von 0,75:

$$\frac{Q \cdot H}{102 \cdot \eta} = \frac{50 \cdot 14,5}{102 \cdot 0,75} = 9,5 \text{ kW Dauerleistung.}$$

Da die Pumpendrehzahl ziemlich hoch ist, wäre die direkte Kupplung des Antriebsmotors am vorteilhaftesten. Steht Drehstrom zur Verfügung, so muß man in diesem Falle aber die Gewißheit haben, daß der Motor bei voller Belastung mindestens noch die von der Pumpe vorgeschriebene Umlaufzahl hat, weil schon eine sehr geringe Verminderung ein Versagen der Pumpe zur Folge haben kann. Fehlt diese Gewißheit, so ist Riemenantrieb vorzusehen, bei welchem die Scheiben entsprechend zu bemessen sind. Bei Gleichstrom wähle man die Umlaufzahl des Nebenschlußmotors um 5–8% niedriger als diejenige der Pumpe und rüste den Anlasser mit Feldschwächkontakten zur genauen Einstellung der Drehzahl aus.

Der Anlauf der Pumpe erfolgt bei geschlossenem Schieber, wobei nur etwa 40% der Normalleistung verbraucht werden. Der Anlaufstrom wird also kaum mehr als 75% des normalen sein und es genügt ein Halblastanlasser. Die Anlaßhäufigkeit wird gewöhnlich kaum größer als 3–4 je Stunde sein, so daß ein normaler Flachbahn- oder Ölanlasser genügt. Die Anlaßzeit kann zu 10–12 Sekunden angenommen werden.

Von den zahlreichen weiteren Antrieben der chemischen Fabriken seien noch die der **Zentrifugen** erwähnt. Wegen der erheblichen Schwungmassen erfordern sie ein erhöhtes Drehmoment beim Anlauf und eine große Anlaufzeit. Bei Gleichstrom ist deshalb ein Doppelschlußmotor am Platze, bei Drehstrom bleibt keine andere Wahl als der normale Drehstrommotor. Damit das Anlassen langsam erfolgt, kann der Anlasser mit einer Sperrvorrichtung ausgerüstet werden, welche ein schnelles Einschalten verhindert. Dieselbe kann von dem Motorstrom derart beeinflußt werden, daß erst ein Weiterschalten des Anlassers möglich ist, wenn der Strom auf einen bestimmten Mindestwert gesunken ist. Am sichersten erfolgt das Anlassen durch Selbstanlasser. Das Stillsetzen erreicht man am schnellsten und besten durch Motorbremsung. Die Motorleistung ist hauptsächlich durch den Anlauf bestimmt, weil die Beharrungsleistung im allgemeinen nur  $\frac{1}{4}$  bis  $\frac{1}{5}$  der Anlaufleistung ist.

Ein weiterer recht häufig vorkommender Antrieb der chemischen Fabrik ist das **Rührwerk**. Dasselbe dient zum Durchrühren von Flüssigkeiten und wird im allgemeinen auf den Flüssigkeitsbehältern montiert, wie Abb. 478 zeigt. Bei warmen Flüssigkeiten ist bei der Bemessung

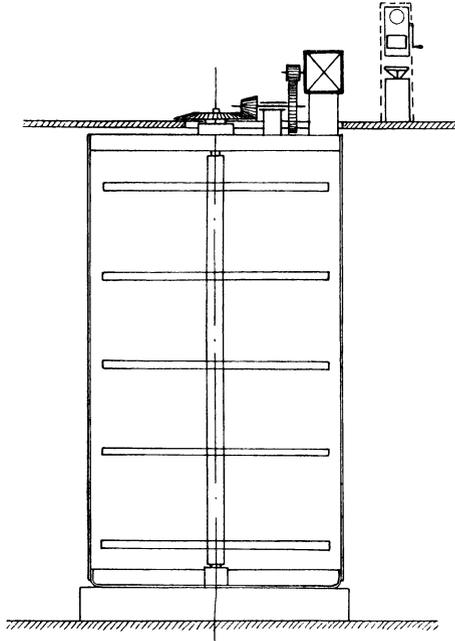


Abb. 478. Rührwerksantrieb.

der Motoren mit der erhöhten Außentemperatur zu rechnen, auch sind die Motoren gegen die aufsteigenden Dämpfe durch Kapselung zu schützen. Bei der Bemessung der Rührwerksmotoren ist ferner die Art der zu rührenden Flüssigkeit sehr wichtig, ferner ist bedeutsam, ob die ganze Masse durch das Rührwerk in eine kreisende Bewegung versetzt werden kann, oder ob durch Wellenbrecher starke Wirbelung erzeugt wird; im letzteren Falle und bei dickeren Flüssigkeiten sind erheblich größere Leistungen nötig. Rührwerke mit stark absetzenden Flüssigkeiten erfordern eine Signalvorrichtung, welche ein Stehenbleiben des Rührwerks anzeigt, weil ein nachheriger Anlauf des Motors bei hohem Bodenschlamm unmöglich ist. Man wird derartige Anlagen in besonders wichtigen Fällen auch nicht nur von einem einzigen Speisepunkt aus speisen. Als roher Anhalt für den Leistungsbedarf in kühlen Räumen können folgende Zahlen dienen:

|   |          |
|---|----------|
| Gefäß 11 m Höhe, 6 m $\varnothing$ , 25 minutl. Umläufe . . | 15—20 kW |
| „ 5 m „ „ 3 m $\varnothing$ , 50 minutl. Umläufe . . . . .  | 5 kW     |
| Zentrifugen, 600 mm $\varnothing$ . . . . .                 | 2 kW     |
| „ 1000 mm $\varnothing$ . . . . .                           | 7 kW     |
| „ 1500 mm $\varnothing$ . . . . .                           | 15 kW    |

**Beispiel:** Eine Zentrifuge für 730 minutliche Umläufe hat mit Füllung ein Schwungmoment von 800 kgm<sup>2</sup>. Sie erhält stündlich 4 Füllungen mit je 10 Minuten Betriebsdauer. Zur Überwindung der Reibungswiderstände ist durch Rechnung eine Leistung von 2 kW festgestellt worden. Welche Motorleistung ist erforderlich, wenn eine Anlaufdauer von nicht mehr als 2,5 Min. gewünscht wird?

Das Schwungmoment des Ankers kann hier gegenüber der Zentrifuge vernachlässigt werden. Da beide direkt miteinander gekuppelt sind, ergibt sich aus Gleichung 49 ein Beschleunigungsmoment von

$$M_1 = \frac{G \cdot D^2 \cdot n}{375 \cdot t_a} = \frac{800 \cdot 730}{375 \cdot 150} = 10,4 \text{ mkg.}$$

Das Reibungsmoment berechnet sich aus der Leistung von 2 kW zu:

$$M_2 = \frac{0,975 \cdot \mathcal{E}}{n} = \frac{0,975 \cdot 2000}{730} = 2,7 \text{ mkg.}$$

Im Anlauf sind also insgesamt zu leisten: 10,4 + 2,7 = 13,1 mkg. Nimmt man an, daß der Anlauf mit zweifachem Drehmoment erfolgt, so wäre das Normalmoment

$$M = \frac{13,1}{2} = 6,55 \text{ mkg,}$$

welches einer Leistung von

$$\mathcal{E} = \frac{730 \cdot 6,55}{0,975} = 4,9 \text{ kW entspricht.}$$

Für eine Füllung stehen 15 Minuten zur Verfügung. Hiervon werden 2,5 Min. für den Anlauf und 7,5 Min für den Betrieb gebraucht. Die effektive Motorleistung ist also:

$$\mathcal{E}_e = \sqrt{\frac{(2 \cdot 4,9)^2 \cdot 2,5 + 2^2 \cdot 7,5}{15}} = 4,25 \text{ kW.}$$

Die berechnete Leistung von 4,9 kW ist also auch hinsichtlich der Erwärmung hinreichend.

Die große Feuchtigkeit, die in chemischen Fabriken Regel ist, und die zahlreichen weiteren Angriffe, denen die Isolation der Leitungen ausgesetzt ist, zwingt zur Wahl einer möglichst niedrigen Spannung. Besonders die Lichtspannung wird man klein halten, vielleicht 110 V, weil die Beleuchtungskörper und Apparate wegen ihrer Kleinheit und mangelhafteren Dichtung besonders empfindlich sind.

## F. Die elektromotorischen Antriebe in der Textilindustrie.

In Spinnereien. Von den zahlreichen Maschinenarten der Spinnereien können hier nur die Ringspinnmaschinen erwähnt werden, deren Antrieb am wichtigsten ist. Die Arbeitsweise einer Ringspinnmaschine zum Spinnen von Baumwollgarn geht aus Abb. 479 hervor. Das leicht vorgesponnene Garn, welches noch keine Festigkeit besitzt, wird durch das oben gezeichnete Streckwerk zugeführt, geht durch eine feste Öse und dann durch eine lose umlaufende Läuferöse L zur Spindel. Dieselbe wird durch den Antrieb mit etwa 10000 Umläufen gedreht. Der Zweck der Spinnmaschine ist, dem Garn zur Erhöhung der Festigkeit eine Verdrehung zu erteilen, und es gleichzeitig auf die Spindel aufzuwickeln. Würde der Läufer feststehen, so würde das Garn nur aufgewickelt, aber nicht verdreht, würde der Läufer mit der Drehzahl der Spindel umlaufen, so würde hingegen nur eine Verdrehung des Garnes, aber keine Aufwicklung erfolgen. Nun wird der Läufer aber durch die Reibung mitgenommen und bleibt immer etwas hinter der Spindeldrehzahl zurück, so daß sowohl eine Verdrehung als auch ein Aufwickeln stattfindet. Je mehr der Läufer gegenüber der Spindel in der Geschwindigkeit zurückbleibt, um so mehr Garn wird aufgewunden, um so größer ist also auch die Fadenspannung, die den Faden durch das Streckwerk zieht. Das Aufspulen erfolgt nun nach Abb. 479 derart, daß der Ring R, welcher die Läuferöse L trägt, periodisch auf und abgeht und gleichzeitig nach jeder Periode etwas höher rückt, so daß der kegelförmige Abschluß der Spule B ebenfalls höher rückt, bis die Spindel voll ist. Bei einem Hingang des Ringes R wird demnach einmal auf den kleinen Durchmesser  $d$  und zuletzt auf den großen Durchmesser  $D$  aufgespult. Im letzteren Falle hat aber der auflaufende Faden einen viel größeren Hebelarm, so daß der Läufer viel leichter gedreht wird und deshalb keine so große Fadenspannung auftritt. Bei großem Spulendurchmesser kann deshalb mit einer höheren Drehzahl gearbeitet werden als bei geringem Durchmesser. Hieraus geht hervor, daß bei Spinnmaschinen eine periodisch wechselnde

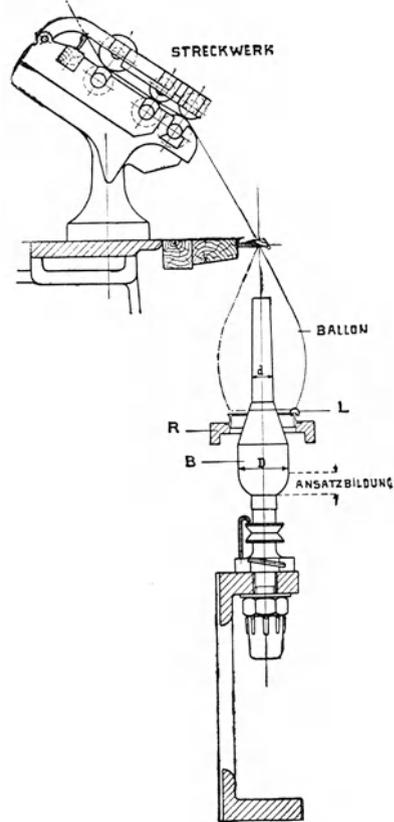


Abb. 479. Wirkungsweise der Ringspinnmaschine.

Antriebsgeschwindigkeit erwünscht ist, damit in jedem Augenblick die höchste Arbeitsgeschwindigkeit, welche die Fadenfestigkeit noch erlaubt, vorhanden ist. Auch bei Beginn des Spulens und zu Ende ist

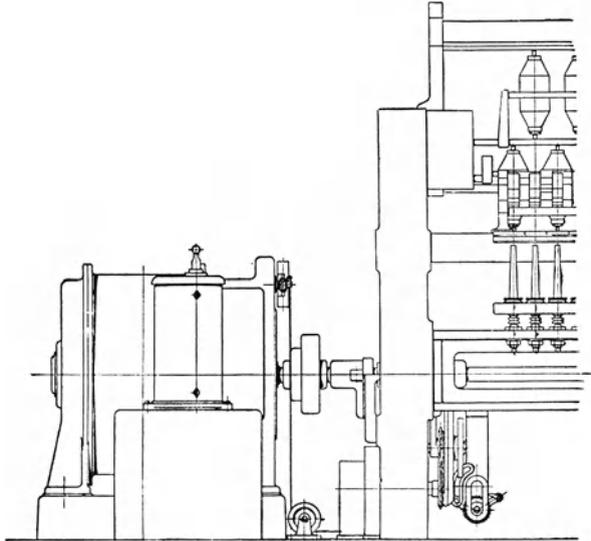


Abb. 480. Spinnmaschinenantrieb.

wegen der erhöhten Fadenspannung eine verminderte Geschwindigkeit nötig. Die Regelung der Motorumlaufzahl kann zwar von Hand erfolgen, sie wird am besten selbsttätig durch einen sog. Spinnregler gemacht,

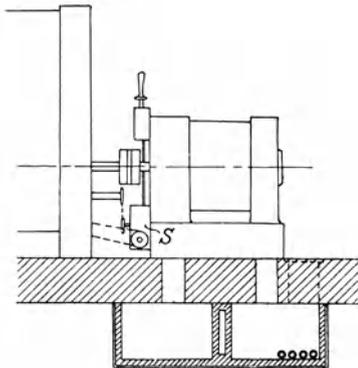


Abb. 481. S = Spinnregler.

welcher nach Abb. 480 z. B. eine Verschiebung der Bürsten des dort zum Antrieb benutzten Kollektormotors bewirkt. Durch eine Handregelung läßt sich etwa eine Mehrleistung der Ringspinnmaschine von 7–10%, bei Verwendung eines Spinnreglers von etwa 10–20% erzielen.

Bei der Motorwahl sind zwei Bedingungen zu beachten, nämlich wegen der großen Reibungswiderstände beim Anlauf die Notwendigkeit doppelten Anzugsmomentes und ferner Veränderlichkeit der Umlaufzahl. Die erste Bedingung wird von fast allen Motoren erfüllt, die letztere hingegen zwingt

uns bei Gleichstrom zur Verwendung des Nebenschlußmotors und bei dem viel häufiger vorkommenden Drehstrom zum Kommutatormotor. Da nun der Drehstromkommutatormotor noch sehr neu ist,

wurden bisher Einphasen-Kommutatormotoren verwandt, die auf die drei Phasen des Drehstromnetzes verteilt wurden. Bei der verhältnismäßig geringen Leistung der Spinnmaschinen und der großen Anzahl ist dies ohne weiteres möglich. Da die Luft in den Spinnereien stets mit Spinnfasern erfüllt ist, können nur gekapselte Motoren und Apparate verwandt werden. Die meist in langer Reihe aufgestellten Motoren werden alle an einen Frischluftkanal angeschlossen und werfen die warme Luft mittels eingebauter Ventilatorräder in einen Abluftkanal. Die Luftabzweigquerschnitte zu den Motoren müssen einstellbar sein, damit die Motoren am Kanalende wegen Luftmangels nicht warm werden (s. Abb. 481). Wenn die Zuführung von Frischluft unmöglich ist, kann auch den entsprechend gebauten Motoren Kühlwasser oder Druckluft zugeführt werden. Der Leistungsbedarf einer Ringspinnmaschine beträgt bei Baumwolle und etwa 10000 Spindelumdrehungen ungefähr 0,014 kW je Spindel, bei Wolle und 7000 Spindelumläufen etwa 0,019 kW je Spindel.

**Beispiel:** In einem Spinnsaal soll eine Reihe Ringspinnmaschinen aufgestellt werden. Es steht Drehstrom 500 V zur Verfügung. Für den Antrieb sind Einphasen-Kommutatormotoren von 7 kW-Leistung bei 1300 Umdrehungen vorgesehen, welche mittels selbsttätigen Spinnreglers durch Bürstenverschiebung

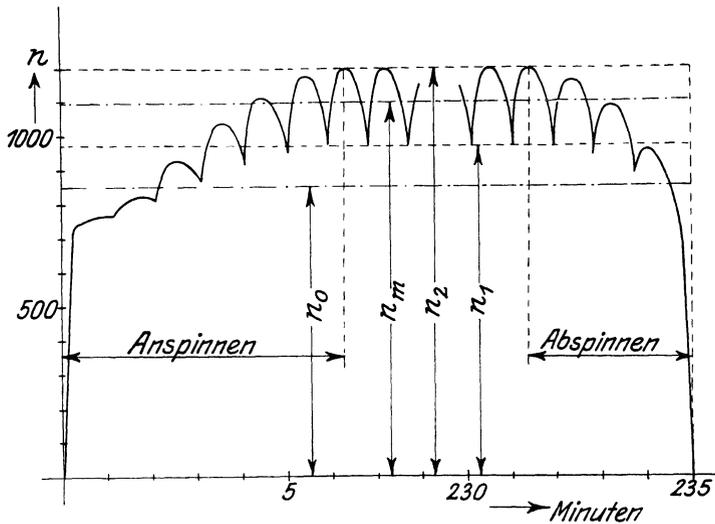


Abb. 482. Drehzahlregelung einer Ringspinnmaschine.

von 750–1300 Umdrehungen geregelt werden können. Man wird in zentraler Lage eine Hauptverteilung für den Spinnsaal vorsehen, welche des Faserfluges wegen am besten gekapselt ist. Von dieser Verteilung aus gehen über Schalter und Sicherungen die Verteilungsleitungen zu den Motoren, wobei mehrere Motoren an jede Leitung angeschlossen werden können. Die Zahl dieser zusammenhängenden Motoren wird man jedoch nicht zu groß wählen, damit bei einer Leitungsstörung der Ausfall nicht zu groß wird. Jeder Motor erhält jedoch noch ein Sicherungspaar und einen Ständerschalter, welche in das Motorgehäuse eingebaut werden können. Wir wollen für die Hauptverteilung 100 A Schalter vorsehen. Bei Verteilung der

Einphasenmotoren auf die drei Drehstromphasen würde bei 9 Motoren der Hauptschalter zu hoch belastet sein. Es werden deshalb 6 Motoren, also in jeder Phase zwei vorgesehen. Der Normalstrom jedes Motors berechnet sich zu 19,5 A. Der Leitungsstrom bei zwei Motoren ist demnach  $19,5 \cdot 2 \cdot \sqrt{3} = 68$  A. Nach der Belastungstabelle wäre mit Rücksicht auf die Erwärmung ein Kupferquerschnitt von 16 mm<sup>2</sup> erforderlich. Unter Annahme einer Leitungslänge von 50 m hätte diese Leitung einen Widerstand von 0,055 Ohm. Der auftretende Spannungsabfall beträgt demnach  $I \cdot R \cdot \cos \varphi \cdot \sqrt{3} = 68 \cdot 0,055 \cdot 0,85 \cdot 1,73 = 5,5$  V, welcher zulässig ist. Die Leitungen, als Kabel oder Gummiader in Isolierrohr, werden am besten in dem Abluftkanal untergebracht (Abb. 481).

**Beispiel:** Eine Ringspinnmaschine werde mittels Spinnreglers so geregelt, daß die Geschwindigkeit beim Anspinnen und Abspinnen geringer ist, ferner daß sie geringer ist beim Spinnen auf den kleinen Spindeldurchmesser  $d$  der Abb. 479, als beim Spinnen auf den großen Durchmesser  $D$ . Abb. 482 stellt die Motordrehzahl in Abhängigkeit von der Zeit für einen ganzen, etwa 235 Min. dauernden Abzug bei 36er Zettel dar.  $n_1$  ist die Drehzahl beim Spinnen auf den kleinen Durchmesser  $d$  und  $n_2$  beim Spinnen auf  $D$ . Die Motorleistung beträgt 9 PS. Ein Auf- und Abgang des Ringes  $R$  (Abb. 479) beansprucht etwa 54 Sekunden. Bildet man den Mittelwert der Geschwindigkeit, so erhält man  $n_m = 1100$  Umläufe. Würde man hingegen die Spinnmaschine mit konstanter Drehzahl antreiben, so dürfte mit Rücksicht auf die hohe Fadenbeanspruchung beim Anspinnen und beim Spinnen auf kleinen Durchmesser nur eine Drehzahl von etwa  $n_0 = 850$  gewählt werden. Durch die Verwendung eines Spinnreglers wird also in diesem Falle eine Mehrleistung der Maschine von 13% erzielt.

**In Webereien.** Ein Webstuhl kann nur ein gutes Gewebe liefern, wenn er mit vollständig konstanter Geschwindigkeit angetrieben wird. Jede Geschwindigkeitsverminderung würde den Schlag der Webstuhlschützen dämpfen, und das Gewebe würde an dieser Stelle etwas lockerer werden. Bei feineren Seidengeweben macht sich bereits der geringste Unterschied durch eine veränderte Schattierung bemerkbar. Diese Unveränderlichkeit der Geschwindigkeit ist besonders schwer beim Anlauf des Webstuhls, der doch im Laufe eines Tages sehr häufig stillgesetzt werden muß, zu erreichen. Damit nun nicht jeder Stillstand des Stuhles einen Streifen im Gewebe verursacht, muß von dem Antriebsmotor verlangt werden, daß er ohne Anlasser sofort auf seine volle Drehzahl anspringt. Da die bei Webstühlen in Frage kommenden Leistungen selten mehr als 1 kW betragen, ist im allgemeinen ein direktes Einschalten der Motoren zulässig. Während aber bei Gleichstrom der Hauptschlußmotor wegen seiner veränderlichen Drehzahl ausscheidet, ist der Nebenschlußmotor beim Einschalten ohne Anlasser anfangs zu schwach erregt, als daß der Anlauf, der doch etwa ein zweifaches bis dreifaches Drehmoment erfordert, schnell genug verlief. Fernerhin haben wir zu bedenken, daß alle Gleichstrommotoren bei Spannungsschwankungen, die doch in jedem Netz unvermeidlich sind, ihre Umlaufzahl merklich ändern. Wir müssen also die merkwürdige Tatsache feststellen, daß sich die Gleichstrommotoren alle nicht ganz den Anforderungen des Webstuhls anpassen. Man verwendet aus diesem Grunde fast ausschließlich Drehstrom-Kurzschlußmotoren, welche bekanntlich beim Einschalten mittels dreipoligen Schalters sehr schnell ihre volle Geschwindigkeit erreichen und auch von Spannungsschwankungen ziemlich unabhängig sind, weil die Umlaufzahl hauptsächlich nur von der Wellenzahl des zugeführten Drehstroms bestimmt wird. Die starke Unterteilung der Antriebs-

leistung in sehr viele kleine Motoren verlangt, daß man auf einen guten Motorwirkungsgrad hohen Wert legt, besonders dann, wenn die Kosten der Energie im Verhältnis zu den Anschaffungskosten des Motors hoch sind.

Die Verbindung zwischen Motor und Webstuhl kann durch Riemen oder Zahnräder erfolgen. Im ersteren Falle ist eine dauernd gute Spannung des Riemens erforderlich, damit durch ihn keine Geschwindigkeitsänderungen entstehen. Webstuhlmotoren mit Riemenantrieb werden deshalb meistens nach Abb. 487 federnd gelagert. Eine Umkehr der Motordrehrichtung ist nur bei Samtwebstühlen nötig.

**Beispiel:** Ein Webstuhl mit 110 cm Blattbreite und 92 cm Gewebebreite, Schußzahl 180 je Minute, wurde durch einen Drehstromkurzschlußmotor 0,3 kW, 220 V, der minutlich 930 Umdrehungen macht, angetrieben. Ein eingeschalteter Zähler zeigte nach 100 000 Schuß 3,88 kWh an, wenn der Motor mittels Riemens antrieb, während er bei Zahnradantrieb unter gleichen Verhältnissen nur 3,65 kWh angab. Der Zahnradantrieb ergibt also nicht nur einen gleichförmigeren Lauf, sondern auch eine Ersparnis von 0,23 kWh je 100 000 Schuß. Legt man eine durchschnittliche Betriebsstundenzahl von 1000 im Jahr zugrunde, so würde sich bei der normalen Schußzahl von 180 in der Minute eine jährliche Ersparnis von 25 kWh ergeben, ein Betrag, der bei hunderten von Stühlen ins Gewicht fallen kann. Die Anlagekosten des Zahnradantriebs sind jedoch höher, auch erfordert derselbe, daß zwischen Motor und Stuhl eine Rutschkupplung vorhanden ist, welche beim plötzlichen Anhalten des Stuhles gleitet. Abb. 483 läßt diese Kupplung am großen Zahnrad erkennen. Der Motor ist mittels Stellschraube einstellbar, damit beim Spinnen anderer Garnsorten andere Motorritzel zur Änderung der Geschwindigkeit aufgesteckt werden können.

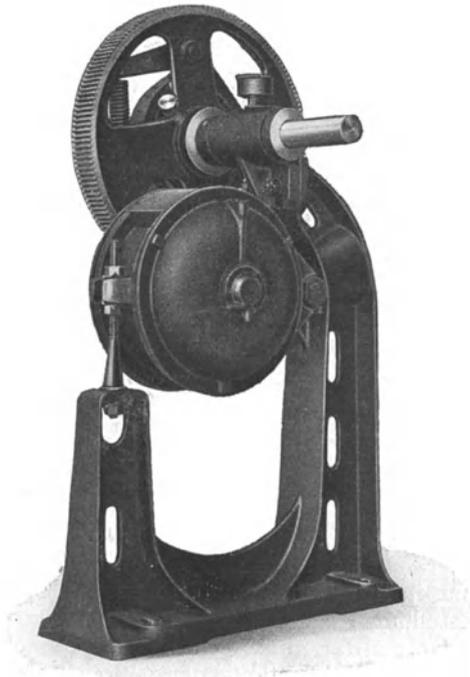


Abb. 483. Webstuhlantrieb.

**Beispiel:** Die sehr große Anzahl der Stühle in einer Weberei verlangt bei dem üblichen Einzelantrieb möglichst hohen Wirkungsgrad der Motoren, selbst wenn dadurch eine nicht unwesentliche Verteuerung der Motoren eintritt. Ein Webstuhl mit 182 cm Blattbreite und 115 Schuß je Minute hat einen Leistungsbedarf von 0,28 kW. Ein Motor normaler Bauart zeigte nach 1000 Schuß einen Verbrauch von 0,056 kWh, ein Spezialmotor der S.S.W. mit hohem Wirkungsgrad hingegen, dessen Wirkungsgrad ferner auch bei Unterbelastung ziemlich hoch bleibt, zeigte nur 0,05 kWh. Die Ersparnis beträgt also  $0,006 \text{ kWh}$ . Bei 1000 Betriebsstunden jährlich würde dieselbe für jeden Stuhl  $0,006 \cdot 6900 = 41 \text{ kWh}$  betragen.

## G. Der elektrische Antrieb in Papierfabriken und Druckereien.

In **Papierfabriken** gibt es zahlreiche Antriebe, deren Maschinen hauptsächlich der Herstellung und Vorbereitung der Papierfasern dienen, welche außer einer angenähert konstanten Geschwindigkeit keine besonderen Anforderungen an den Antriebsmotor stellen. Es ist also bei Gleichstrom ein Nebenschlußmotor und bei Drehstrom ein gewöhnlicher Drehstrommotor zu verwenden. Erwähnenswert ist der Antrieb der Schleifer, bei welchen Leistungen von mehr als 1000 kW vorkommen, und bei welchen die Anpressung der Schleifklötze in Abhängigkeit vom Motorstrom geregelt werden kann. Wichtiger ist die eigentliche Papiermaschine. Ihr fließt in dauerndem, breitem Strom Wasser zu, in welchem die Papierfasern schwimmen. Dieser Strom ergießt sich über ein feines Sieb, welches um zwei Rollen läuft, wobei das Wasser abläuft und auf dem Sieb die Papierschicht zurückbleibt. Diese Papierschicht läuft als endloses breites Band, zunächst wegen ihrer noch geringen Festigkeit von Filzstreifen getragen, durch zahlreiche Preßwalzen, welche das Wasser auspressen, dann durch verschiedene Trockenwalzen, die mit Dampf geheizt sind und schließlich noch durch Glättwalzen. Es ist einleuchtend, daß die Stärke des Papierses von der Geschwindigkeit der Papiermaschine abhängt. Je langsamer die Maschine läuft, um so mehr Papierstoff strömt eben auf die Flächeneinheit des Siebes. Da nun im Handel nur geringe Abweichungen im Papiergewicht, also auch in der Papierstärke zugelassen werden, etwa nur 2,5%, muß man von der Papiermaschine verlangen, daß sich ihre Geschwindigkeit noch wesentlich weniger als 2,5% ändert, weil ja doch auch aus anderen Ursachen Abweichungen der Papierstärke eintreten können. Die erste Forderung an einen Papiermaschinenmotor ist also völlig konstante Drehzahl. Nun wird aber weiterhin auf einer Papiermaschine nicht nur eine Papiersorte hergestellt. Dicke Packpapiere erfordern eine geringe Geschwindigkeit, dünne Papiere hingegen eine hohe Geschwindigkeit. Der Antriebsmotor muß also stark regelbar sein. Papiermaschinen für die verschiedensten Papiersorten erfordern oft eine Regelbarkeit von 1 : 20, Maschinen zur Herstellung von Zeitungspapier kommen mit einem Regulierungsverhältnis von 1 : 2 aus. Es muß ferner noch möglich sein, die Maschine zur Reinigung des Siebes und zur Einstellung ganz langsam laufen zu lassen. Auch das Anzugsmoment des Motors darf nicht unter dem zweifachen des normalen liegen, weil die Reibungswiderstände der zahlreichen Walzen den Anlauf erschweren. Die vorstehenden Forderungen werden bei Gleichstrom von dem Nebenschlußmotor erfüllt bis auf die starke Regelbarkeit bei Herstellung stark verschiedener Papiersorten. Bekanntlich lassen sich durch Feldschwächung keine höheren Regelungen als etwa 1 : 4 erzielen. Eine weitere Ausdehnung des Regelbereiches ließe sich noch durch Benutzung verschiedener Spannungen eines Mehrleiternetzes erreichen, eine Erhöhung auf 1 : 20 ist jedoch kaum ausführbar. Der Drehstrom-Nebenschlußmotor, der bei Drehstrom allein in Frage kommt, erlaubt ebenfalls keine höhere Regelbarkeit als der Gleichstrommotor. Hieraus geht hervor, daß bei Maschinen mit starker Regelbarkeit nur die Leonard-

schaltung den Anforderungen entspricht. Bei ihr kann die Motorumlaufzahl von Null an bis zum vollen Wert feinstufig durch Änderung des Erregerstromes der Steuermaschine geändert werden und durch Schwächung des Erregerstroms des Antriebmotors ist eine weitere Steigerung der Geschwindigkeit möglich.

Zur Erzielung einer vollständig gleichförmigen Geschwindigkeit, wie sie bei besseren Papiersorten erforderlich ist, sind besonders bei unruhigen Netzen besondere Einrichtungen zu treffen. In manchen Fällen genügt die träge Geschwindigkeitsregelung nach Abb. 381, eine wirklich einwandfrei arbeitende Vorrichtung zur Konstanthaltung der Geschwindigkeit ist jedoch nur die Schnellregelung nach Abb. 382. Da der Fabrikationsraum stets feucht ist, bringt man alle Apparate, welche nicht unbedingt in der Nähe der Maschine sein müssen, gern außerhalb an. Die Veränderung der Geschwindigkeit erfolgt dann, genau wie wir es bei den Werkzeugmaschinen gesehen haben, mittels Druckknöpfen, die an verschiedenen Stellen der Papiermaschine vorhanden sind. Der Leistungsbedarf der Papiermaschinen kann 40 kW bis 350 kW betragen.

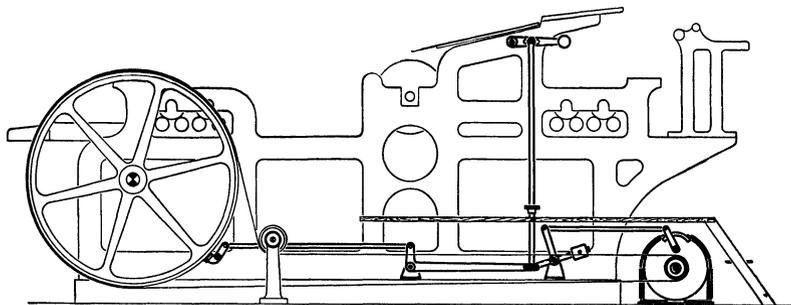


Abb. 484. Druckmaschine.

In Druckereien sind es vor allem die Druckmaschinen selbst, welche in ihrem elektrischen Antrieb Besonderheiten aufweisen. Sowohl die Schnellpressen als auch die viel wichtigeren Rotationsdruckmaschinen verlangen Antriebsmotoren, die mit Rücksicht auf die hohen Reibungswiderstände beim Anlauf mindestens das zweifache Anlaufmoment entwickeln können, und welche vor allem regelbar sind. Und zwar handelt es sich hier um eine von der Güte des Papiers und der Art des Druckes abhängige dauernd eingestellte Geschwindigkeit, deren Regelung verlustlos sein muß. Nur bei kleinen Antriebsleistungen und wenn die Anlagekosten klein gehalten werden müssen, kann die Hauptschlußregelung in Frage kommen. In allen anderen Fällen kommen regelbare Motoren, also bei Gleichstrom Nebenschlußmotoren und bei Drehstrom Kommutatormotoren zur Verwendung. Es ist jedoch auch möglich, die veränderte Geschwindigkeit mit Stufenscheiben einzustellen, so daß normale Motoren benutzt werden können. Damit man die Druckformen einlegen und das Papier einziehen kann, muß die Druckmaschine ganz langsam laufen, vielleicht mit  $\frac{1}{50}$  der normalen Geschwindigkeit. Da dieser langsame Lauf mit dem Antriebsmotor schwer zu erreichen ist, sieht

man häufig einen kleinen zweiten Antriebsmotor vor, der über ein großes Vorgelege die Maschine bewegt. Die Kupplung, welche den Hilfsmotor mit der Maschine verbindet, schaltet sich selbsttätig aus, wenn der Hauptmotor in Betrieb gesetzt wird. Der Drucker verlangt im allgemeinen, daß die Maschine nach dem Abschalten abgebremst wird. Diese Forderung wurde früher ausschließlich durch mechanische Bremsen erreicht, die mit dem Anlasser derart verbunden waren, daß beim Ausschalten des Anlassers die Bremse eingerückt wurde. Abb. 484 zeigt eine ähnliche Verbindung, bei der mit der oben gezeichneten Kurbel sowohl die Bürsterverschiebung eines Kommutatormotors, als auch die Bremse betätigt wird. Heute wird die Abbremsung vielfach mit dem Motor vorgenommen, in der gleichen Weise, wie wir es bei den Werkzeugmaschinen kennen gelernt haben. Man ist dann auch in der Lage, durch Anbringung von Halt-Druckknöpfen an verschiedenen Stellen, die Maschine jederzeit schnell zum Stillstand zu bringen. Auch die bei den Werkzeugmaschinen benutzte Druckknopfsteuerung, deren Schaltung Abb. 470 zeigt, kann für Druckmaschinen benutzt werden.

Zeugdruckmaschinen erfordern je nach der Art des Musters und der Dicke des Stoffes veränderliche Drehzahl. Beim Einstellen der Farbwalzen darf die Drehzahl nur etwa  $\frac{1}{5}$  der Betriebsdrehzahl sein, beim Reinigen der Walzen muß sie hingegen wesentlich höher sein. Im allgemeinen ist ein Regelbereich von 1:8 bis 1:10 erforderlich, welcher durch Regelmotoren in Verbindung mit einem Mehrleiternetz erreicht werden kann. Bei Drehstrom empfiehlt sich die Umformung in Gleichstrom. Kleinere Regelbereiche können auch mit Drehstrom-Kommutatormotoren erreicht werden.

## H. Übersicht über die wichtigeren elektrischen Antriebe unter Annahme normaler Durchschnitts-Verhältnisse.

| Antrieb                                | Motor      |                | Einschalt-<br>dauer | Drehzahl<br>des Motors | Regelbarkeit | Anlaß-<br>vorrichtung | Anlauf      | Anlaß-<br>widerstand | Leistungsart | Über-<br>tragungs-<br>mittel |
|--|------------|----------------|---------------------|------------------------|--------------|-----------------------|-------------|----------------------|--------------|------------------------------|
|  | Gleichstr. | Drehstr.       |                     |                        |              |                       |             |                      |              |                              |
| Abriethobelmaschine                    | N          | A <sub>s</sub> | 1                   | n                      | —            | Öl                    | 0,75—1      | I                    | GA           | Ri                           |
| Anstellvorrichtung                     | H          | A <sub>s</sub> | 0,25 ÷ 0,35         | n                      | u            | K                     | 1 ÷ 1,5     | III                  | KE           | Rä                           |
| Aufzüge: Lastenaufz.                   | D          | A <sub>s</sub> | 0,15 ÷ 0,5          | n                      | —            | K                     | 1,25 ÷ 1,75 | III ÷ IV             | PA           | Rä                           |
|  | N          | A <sub>s</sub> | 0,25 ÷ 0,6          | n                      | —            | S                     | 1,25 ÷ 1,75 | III ÷ IV             | PA           | Rä                           |
| Bandsäge                               | N          | A <sub>s</sub> | 1                   | n                      | —            | Öl                    | 0,75 ÷ 1,25 | I                    | GA           | Ri                           |
| Becherwerk                             | N          | A <sub>s</sub> | 1                   | n                      | —            | Öl                    | 1,25 ÷ 1,75 | I                    | GA           | Ri                           |
| Beschickungsmaschine<br>für Martinöfen | H          | A <sub>s</sub> | 0,25                | n                      | —            | K                     | 2           | IV                   | PA           | Rä                           |
| Blechbiegemaschine                     | D          | A <sub>s</sub> | 0,15 ÷ 0,25         | n                      | u            | K                     | 1—2         | II                   | KE           | Rä                           |
|  | H          |                |                     |                        |              |                       |             |                      |              |                              |

| Antrieb                           | Motor          |                | Einschalt-<br>dauer | Drehzahl<br>des Motors | Regelbarkeit | Anlaß-<br>vorrichtung | Anlauf      | Anlaß-<br>widerstand | Leistungsart | Über-<br>tragungs-<br>mittel |       |
|-----------------------------------|----------------|----------------|---------------------|------------------------|--------------|-----------------------|-------------|----------------------|--------------|------------------------------|-------|
|                                   | Gleichstr.     | Drehstr.       |                     |                        |              |                       |             |                      |              |                              |       |
| Blechkantenhobel-<br>maschine     | N <sub>r</sub> |                | 1                   | l                      | ± 1:3        | Sp                    | —           | I                    | GA           | Rä                           |       |
|                                   | A <sub>s</sub> |                | 1                   | n                      | —            | Öl                    | 0,75 ÷ 1,25 | I                    | GA           | Rä                           |       |
| Blockeinsetzmaschine              | H              | A <sub>s</sub> | 0,25                | n                      | —            | K                     | 2           | IV                   | PA           | Rä                           |       |
| Bohrmaschine                      | N              |                | 1                   | l                      | 1:3          | F — Öl                | 0,75        | I                    | GA           | Rä                           |       |
|                                   | A <sub>s</sub> |                | 1                   | n                      | —            | F — Öl                | 0,75        | I                    | GA           | Rä                           |       |
| Brecher für Steine                | D              | A <sub>s</sub> | 1                   | n                      | —            | Öl                    | 1,25 ÷ 1,75 | I                    | KE           | Ri                           |       |
| Brikettpresse                     | D              |                | 1                   | l                      | 1:2          | Öl<br>K               | 1,25 ÷ 1,75 | II                   | KE           | Ri                           |       |
|                                   | K              |                | 1                   | n                      | u            | —                     | —           | —                    | KE           | Ri                           |       |
| Drehbank                          | klein          | N              | A <sub>s</sub>      | 1                      | n            | —                     | F — Öl      | 0,75 ÷ 1,25          | I            | GA                           | Ri Rä |
|                                   | groß           | N <sub>r</sub> |                     | 1                      | l            | 1:3                   | F — Öl      | 0,75 ÷ 1,25          | I            | GA                           | Rä    |
| Drehofen                          | D              |                | 1                   | n                      | —            | Öl                    | 1,5         | I                    | KE           | Ri Rä                        |       |
|                                   | A <sub>s</sub> |                | 1                   | n                      | —            | Öl-Flü                | 1,5         | I                    | KE           | Ri Rä                        |       |
| Drehscheibe                       | H              | A <sub>s</sub> | 0,15                | n                      | u            | K                     | 1,5 ÷ 2     | II                   | KE           | Rä                           |       |
| Druckmaschine                     | N <sub>r</sub> |                | 1                   | l                      | ü<br>u       | K                     | 1,25        | I                    | GA           | Rä                           |       |
|                                   | K              |                | 1                   | n                      | ü<br>u       | —                     | —           | —                    | GA           | Rä                           |       |
| Eismaschine                       | D              | A <sub>s</sub> | 1                   | n                      | —            | Öl                    | 1—2         | I                    | KE           | Ri                           |       |
| Förderhaspel                      | D              | A <sub>s</sub> | 0,25 ÷ 0,35         | n                      | u            | K                     | 2           | III—IV               | KE           | Rä                           |       |
| Förderrinne                       | N              | A <sub>s</sub> | 1                   | n                      | —            | Öl-Flü                | 1—1,75      | I                    | GA<br>KE     | Ri                           |       |
| Förderschnecke                    | N              | A <sub>s</sub> | 1                   | n                      | —            | Öl-Flü                | 1—1,75      | I                    | GA<br>KE     | Ri Rä                        |       |
| Gattersäge                        | N              | A <sub>s</sub> | 1                   | n                      | —            | Öl                    | 1,5         | I                    | GA           | Ri                           |       |
| Gießwagen                         | Heben          | H              | A <sub>s</sub>      | 0,25                   | n            | u                     | K           | 2                    | IV           | PA                           | Rä    |
|                                   | Drehen         | H              | A <sub>s</sub>      | 0,25                   | n            | u                     | St          | 2 ÷ 3                | IV           | PA                           | Rä    |
| Fahren                            | H              | A <sub>s</sub> | 0,35 ÷ 0,5          | n                      | u            | Schü                  | 2 ÷ 3       | IV                   | KE           | Rä                           |       |
|                                   | N <sub>r</sub> |                | 1                   | n                      | 1:3          | F — Öl                | 0,75 ÷ 1,25 | I                    | GA           | Rä Ri                        |       |
| Hobelmaschine und<br>Stoßmaschine | A <sub>s</sub> |                | 1                   | n                      | —            | F — Öl                | 0,75 ÷ 1,25 | I                    |              |                              |       |
|                                   | N <sub>r</sub> |                | 1                   | l                      | ± 1:3        | Sp                    | —           | —                    | GA           | Rä                           |       |
| Kohlenwäscher                     | N              |                | 1                   | n                      | —            | Öl                    | 1,25 ÷ 1,75 | I                    |              |                              |       |
|                                   | A <sub>s</sub> |                | 1                   | n                      | —            | Flü                   | 1,25 ÷ 1,75 | I                    | KE           | Ri Rä                        |       |
| Koksausdrückmaschine              | H              | A <sub>s</sub> | 0,25                | n                      | u            | K                     | 2           | III                  | PAB          | Rä                           |       |
| Kolbenpumpe                       | D              | A <sub>s</sub> | 1                   | n                      | —            | Öl-Flü                | 1,5 ÷ 2     | I                    | KE           | Ri Rä                        |       |

| Antrieb               | Motor      |                  | Einschalt-<br>dauer | Drehzahl<br>des Motors | Regelbarkeit | Anlaß-<br>vorrichtung | Anlauf    | Anlaß-<br>widerstand | Leistungsart | Über-<br>tragungs-<br>mittel |    |
|-----------------------|------------|------------------|---------------------|------------------------|--------------|-----------------------|-----------|----------------------|--------------|------------------------------|----|
|                       | Gleichstr. | Drehstr.         |                     |                        |              |                       |           |                      |              |                              |    |
| Kompressor            | D          | A <sub>s</sub>   | 1                   | n                      | —            | Öl                    | 1,5÷2     | I                    | GA<br>KE     | Ri                           |    |
| Krane<br>Werkstattkr. | H          | A <sub>s</sub>   | 0,25                | n                      | u            | K                     | 1÷2       | II                   | PA           | Rä                           |    |
|                       |            | Kranf.           | A <sub>s</sub>      | 0,25                   | n            | u                     | K         | 2                    | III          | PA                           | Rä |
| Gießereikr.           | H          | A <sub>s</sub>   | 0,25                | n                      | u            | K                     | 1,5÷2     | III                  | PA           | Rä                           |    |
|                       |            | Kranf.           | A <sub>s</sub>      | 0,25                   | n            | u                     | K         | 2                    | III          | PA                           | Rä |
| Stripperkr.           | H          | A <sub>s</sub>   | 0,35                | n                      | —            | K<br>Schü             | 2÷3       | IV                   | PA           | Rä                           |    |
|                       |            | Strippen         | A <sub>s</sub>      | 0,35÷0,5               | l            | —                     | K<br>Schü | 1,5÷2                | IV           | PA                           | Rä |
|                       |            | Drehen           | A <sub>s</sub>      | 0,25                   | n            | —                     | K         | 1,5÷2                | III          | PA                           | Rä |
| Kugelmühle            | D          | A <sub>s</sub>   | 1                   | n                      | —            | Öl                    | 1,5÷2     | I                    | GA<br>KE     | Ri<br>Rä                     |    |
| Kreiselpumpe          | N          | A <sub>s</sub>   | 1                   | s                      | —            | Öl                    | 0,75÷1,25 | I                    | KE           | Ku                           |    |
| Mischer für Roheisen  | H          | A <sub>s</sub>   | 0,25                | n                      | u            | K<br>St               | 2         | III                  | KE           | Rä                           |    |
| Rollgang (Arbeits-)   | H          | A <sub>s</sub>   | 0,35÷0,5            | l                      | —            | K<br>Schü             | 2—3       | IV                   | KE           | Rä                           |    |
| Rührwerk              | D          | A <sub>s</sub>   | 1                   | n                      | —            | Öl<br>Flü             | 1,25÷2    | I                    | KE           | Rä Ri                        |    |
| Schere mit Schwungr.  | D          | A <sub>s</sub>   | 1                   | n                      | —            | F—Öl                  | 1,5÷2     | I                    | GA<br>KE     | Rä                           |    |
|                       |            | „ ohne Schwungr. | N <sub>r</sub>      | —                      | 1            | n                     | ü<br>u    | Sp                   | 0,75÷1,25    | II÷III                       | KE |
| Schiebebühne          | H          | A <sub>s</sub>   | 0,15÷0,25           | n                      | u            | K                     | 1,5÷2     | II                   | PA<br>PAB    | Rä                           |    |
| Spill                 | H          | A <sub>s</sub>   | 0,15÷1              | n                      | —            | K                     | 0,75      | II                   | PAB          | Rä                           |    |
| Spinnmaschine         | N          | K                | 1                   | n                      | 1:2,5        | Sp                    | 2         | I                    | GA<br>KE     | Ku                           |    |
| Ventilator            | N          | A <sub>s</sub>   | 1                   | s                      | —            | Öl                    | 0,75÷1,25 | I                    | GA<br>KE     | Ku                           |    |
| Waggonkipper          | D, H       | A <sub>s</sub>   | 0,15÷0,35           | n                      | —            | K<br>St               | 2         | III—IV               | KE           | Rä                           |    |
| Webstuhl              | —          | A <sub>k</sub>   | 1                   | n                      | —            | —                     | —         | —                    | GA           | Rä                           |    |
| Zentrifuge            | D          | A <sub>s</sub>   | 1                   | n                      | —            | Öl<br>K               | 1,75÷2    | I—II                 | KE           | Ri<br>Ku                     |    |

**Bezeichnungen.**

|                                   |                                       |                                     |
|-----------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| <b>Motoren:</b>                   | <b>Anlaßvorrichtung:</b>              | III = für normalen aussetz. Betrieb |
| H = Hauptschlußmotor              | F = Flachbahnanlasser mit Luftkühlung | IV = für schweren aussetz. Betrieb  |
| N = Nebenschlußmotor              | Öl = Ölanlasser                       |                                     |
| D = Doppelschlußmotor             | Flü = Flüssigkeitsanlasser            |                                     |
| N <sub>r</sub> = Regelmotor       | K = Kontroller                        | <b>Leistungsart:</b>                |
| A <sub>s</sub> = Schleifringmotor | St = Kohlesteuerschalter              | GA = Gummiader                      |
| A <sub>k</sub> = Kurzschlußmotor  | S = Selbstanlasser                    | PA = Panzerader                     |
| K = Kommutatormotoren             | Sp = Spezialanlasser                  | PAB = Panzerbleikabel               |
|                                   | Schü = Schützensteuerung              | KE = bewehrtes Bleikabel            |
|                                   | <b>Anlauf:</b>                        |                                     |
| <b>Drehzahl:</b>                  | Anlaufstrom:                          |                                     |
| n = normal                        | Normalstrom                           | <b>Übertragungsmittel:</b>          |
| s = Schnellläufer                 |                                       | Ri = Riemen                         |
| l = Langsamläufer                 |                                       | Rä = Räder                          |
|                                   | <b>Anlaßwiderstand:</b>               | Ku = direkte Kupplung.              |
| <b>Regelbar:</b>                  | I = für seltenes Anlassen             |                                     |
| u = unterhalb der Normalen        | II = für schwachen aussetz. Betrieb   |                                     |
| ü = überhalb der Normalen         |                                       |                                     |

**I. Der Einbau der elektrischen Ausrüstung.**

**1. Des Motors.** Zur Übertragung der Motorenenergie auf die Arbeitsmaschine bedient man sich im allgemeinen eines Riemen, einer Zahnradübertragung oder der direkten Kupplung. Bei dem Riemenantrieb findet der Motor meistens auf einem kleinen Bodenfundament Aufstellung, dessen Höhe so zu bemessen ist, daß die Bürsten in handliche

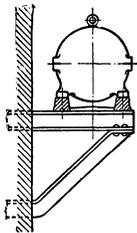


Abb. 485. Wandträger.

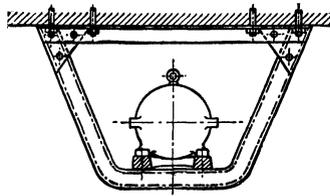


Abb. 486. Hängegerüst.

Höhe kommen. Kleinere Motoren, welche auf ein Deckenvorgelege oder dgl. arbeiten, werden auch mit Vorliebe auf ein Traggerüst an der Wand oder ein Hängegerüst an der Decke gesetzt, wie Abb. 485 und Abb. 486 darstellen. In sehr vielen Fällen ist es sogar möglich, die Motorfüße direkt an der Decke oder Wand festzuschrauben, wenn man nur dafür sorgt, daß die Lagerschilde so verdreht werden, daß die Ölbehälter wieder nach unten kommen. Der mittels Riemen treibende Motor muß auf Gleitschienen verstellbar sein, wenn nicht durch ein Spannrollengetriebe oder dgl. für eine dauernde Spannung des Riemen gesorgt ist. Es ist auch ein möglichst großer Abstand der Motorscheibe von der getriebenen Scheibe zu wählen, damit der Riemen genügend elastisch ist. Läßt dies der verfügbare Raum nicht zu, so ist ein Spannrollengetriebe anzuordnen. Bei kurzer Riemenlänge, besonders aber bei

vertikalem Riementrieb wird häufig die fehlende Riemen­spannung mit Gewalt durch starke Motorverrückung erzwungen, wobei die Motorlager ganz außerordentlich leiden. In solchen Fällen kann der Motor entweder nach Abb. 487 im Punkte A drehbar gelagert und mittels der Spann­federn B gespannt werden, oder man ordnet ein normales Spannrollen­getriebe an. Auch bei zu kleinem Durchmesser der Motorriemenscheibe werden die Lager zu hoch beansprucht. Man gehe deshalb mit dem Durchmesser nicht unter das in den Motorlisten angegebene Maß. Damit der Riemen richtig läuft, müssen Motorwelle und angetriebene Welle genau parallel liegen. Der Motor ist deshalb vor dem Vergießen genau auszurichten. Wenn ein Motor ohne Gleitschienen mit Stein­schrauben auf seinem Fundament befestigt wird, ist darauf zu achten,

daß die Füße nicht einzementiert werden, damit der Motor jederzeit leicht entfernt werden kann.

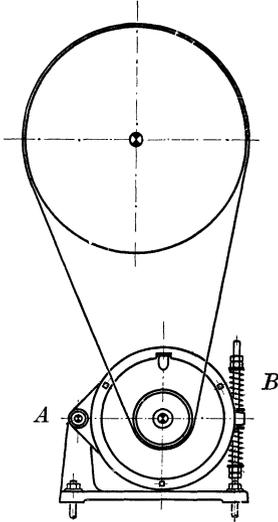


Abb. 487.  
Federnde Lagerung.

Die Übertragung der Motorenergie mittels Zahnrädern gestattet ebenso wie die direkte Kupplung einen engen Zusammenbau mit der Arbeitsmaschine. Motorritzel aus Stahl oder Bronze sind zwar bei großen Kräften vorteilhaft, sie laufen jedoch auch bei noch so gut geschnittenen Zähnen nicht vollständig geräuschlos. Für trockene Räume werden deshalb häufig Rohhaut- oder Papierritzel bevorzugt. Wo diese wegen vorkommender Feuchtigkeit oder wegen zu hoher Beanspruchung nicht gewählt werden können, Sorge man durch Herabsetzung des Übersetzungsverhältnisses dieses ersten Vorgeleges und durch Einbau in einen Ölkasten für einen ruhigeren Lauf. Auch die Zähnezahl des Ritzels darf nicht zu klein angenommen werden (nicht unter 16 Zähne).

Die höchste Übersetzung, welche man mit einem Rädervorgelege erreichen kann, beträgt etwa 1 : 8, mit einem Riemen jedoch nur 1 : 5, wenn kein Spannrollengetriebe angewandt wird. (Bei großer Riemenlänge und horizontaler Anordnung auch mehr.) Der Abstand der beiden Riemenscheiben sollte möglichst größer als das Vierfache der großen Scheibe sein. Bei der Bemessung der Scheiben ist zu beachten, daß der Riemen um 1—3% schlüpft. Der Wirkungsgrad der Riemenübertragung kann zu 0,93—0,96 angenommen werden. Für ein Zahnradvorgelege kann bei rohen Zähnen ein Wirkungsgrad von 0,9—0,93 und bei geschnittenen Zähnen von 0,94—0,96 zugrunde gelegt werden.

Große Übersetzungen lassen sich leicht mit Schneckengetrieben erreichen, deren Wirkungsgrad allerdings gering ist. Bei Schneckengetrieben mit Kugelstützlagern kann man bei eingängiger Schnecke einen Wirkungsgrad von 0,5—0,6, bei zweigängiger Schnecke von 0,7 bis 0,75 und bei dreigängiger Schnecke von 0,75—0,8 annehmen.

Zur direkten Kupplung eines Motors werden allgemein elastische Kupplungen bevorzugt, welche die im Triebwerk auftretenden Stöße vom Motor fernhalten, und welche die Gefahren mildern, welche sonst bei nicht ganz genauem Ausrichten des Motors vorhanden sind. Die auf dem Motorwellenstumpf sitzende Kupplungshälfte muß ausgewuchtet werden, und es ist ratsam, dieselbe dem Motorerbauer zum Aufpassen einzusenden. Auch hier ist darauf zu achten, daß der mit Steinschrauben befestigte Motorfuß nicht einzementiert wird. Allgemein stellt die leichte Auswechselbarkeit des Motors oder seiner empfindlichsten Teile einen wichtigen Punkt beim Zusammenbau mit der Arbeitsmaschine dar. Wo nicht an und für sich schon Hilfsmittel zum Ausbau vorhanden sind, ordne man über dem Motor einen Balken zum Anhängen eines Flaschenzuges an. Zum Anbringen von Motoren unter der Decke sieht man gern in derselben ein kleines Loch vor, durch welches vom darüberliegenden Stockwerk aus das Hochziehen erfolgen kann. Bei sehr beschränktem Raum für den Ausbau ist es üblich, in einer Axialebene geteilte Motoren zu verwenden, damit der Anker und die Lager ohne Lösung des Motorgehäuses nach oben herausgehoben werden können. Auch bei Drehstrommotoren ist eine axiale Teilung möglich, nur muß der Ständer-Eisenkörper, der schlecht geteilt werden kann, mit dem Läufer zusammen herausgehoben werden. Bei Aufbau eines Motors auf Eisenkonstruktionen ist es ratsam, unter dem Motorfuß Flacheisenstücke als Paßstücke vorzusehen. Der Motorfuß selbst darf keineswegs abgehobelt werden.

Bei Eisenkonstruktionen ist ferner darauf zu achten, daß der Motorunterbau sorgfältig versteift ist, damit der Motor nicht unnötig Erschütterungen ausgesetzt ist. Jeder Motor verlangt in axialer Richtung ein gewisses Spiel, je nach der Motorgröße etwa 3—10 mm, und man muß dem Anker die Freiheit lassen, sich beim Lauf in die Lage größter Felddichte einzustellen. Aus diesem Grunde muß entweder zwischen den Kupplungshälften ein ausreichender axialer Zwischenraum vorgesehen werden, oder die gekuppelte Welle muß mitbeweglich sein. Aus gleichem Grunde werden Motorritzel stets etwas breiter ausgeführt als ihr Gegenrad.

An Stellen, wo der Motor schädigenden Einflüssen wie Spritzwasser, strahlender Wärme usf. ausgesetzt ist, nehme man schon beim Zusammenbau hierauf Rücksicht, indem man durch geschickte Anordnung den Motor den Schädigungen zu entziehen strebt. Ist dies hingegen nicht möglich, so sehe man Schutzbleche oder dgl. vor. Im Freien arbeitende Motoren sind zum Schutze gegen Schlagregen mit einem Regendach zu versehen, da auch der gekapselte Motor nie vollkommen wasserdicht ist.

**2. Der Anlaßvorrichtung.** Der Anlasser eines Antriebs ist so anzuordnen, daß man von ihm aus den Arbeitsvorgang und wenn möglich auch den Motor gut übersehen kann. Es ergeben sich dann Anordnungen, wie sie durch Abb. 407 und 409 dargestellt sind. Vielfach ist es auch recht praktisch, wenn man den Anlasser nach Abb. 389 dem Motor anbaut. Sobald ein Führer gleichzeitig mehrere Anlaß- oder Schalt-

vorrichtungen zu bedienen hat, muß man der Anordnung derselben ganz besondere Beachtung schenken, damit das Steuern möglichst bequem und ohne Behinderung des freien Ausblicks möglich ist. Hierbei ist nicht zu vergessen, daß die Anlaßwiderstände guten Luftdurchzug brauchen. Bei getrennten Widerständen bringt man dieselben gern trotz der höheren Leitungskosten etwas abseits von der Anlaßwalze an, damit sie nicht wertvollen Raum in Anspruch nehmen und keine Heizung der Schaltkontakte bewirken. Die Befestigung der Widerstände muß derart erfolgen, daß die Luft bequem zwischen den Widerstandselementen hindurchströmen kann, wobei darauf zu achten ist, daß bei eintretender Wärmeausdehnung derselben ein Schluß unmöglich ist. Auf Holz dürfen die Anlaßwiderstände wegen der Feuergefahr nicht befestigt werden. Die Anlaßwalzen hingegen können auch mit Holzschrauben angeschraubt werden, wenn dieselben bei den fortwährenden Erschütterungen genügenden Halt bieten. Jede Anlaß- und Schaltvorrichtung, auch die Selbstanlasser und Grenzscharter müssen leicht zugänglich aufgestellt sein, weil sie einer ständigen Überwachung bedürfen. Vor denselben muß also nicht nur genug Raum bleiben, um Klappen und Deckel zu öffnen, sondern auch, um mindestens einer Person Bewegungsfreiheit zur Arbeit zu lassen.

**3. Der Leitungsanlage.** Bei jeder Maschine wird man bestrebt sein, die Legung der Leitungen in der Werkstatt vorzunehmen, weil dort die Herstellungskosten wesentlich niedriger ausfallen als am Montageort. Es ist dann auch möglich, bei gleichartigen Maschinen eine Normalisierung der Leitungsverlegung durchzuführen, derart, daß bestimmte Leitungswege ein für allemal festgelegt werden. Die Leitungslängen können dann mittels Stücklisten aufgegeben werden und können ohne Anpassung von vornherein gleich auf genaue Länge abgeschnitten werden. Leitungsabfälle bleiben also vermieden. Bei der Wahl der Leitungswege darf nicht allein die Kürze des Weges maßgebend sein, es kommt auch darauf an, daß die Leitungen geschützt liegen, und daß sie den Ausbau elektrischer oder mechanischer Teile nicht hindern. Zuweilen erfordert der Versand die Teilung einer Maschine, z. B. bei einem großen Kran oder einer großen Drehbank. In solchen Fällen müssen an den Trennstellen auch die elektrischen Leitungen geteilt werden. Dies geschieht allgemein in der Weise, daß dort Klemmleisten angeordnet werden, an denen die einzelnen Leitungen, die in der Werkstatt übereinstimmend bezeichnet wurden, dann am Montageort leicht und sicher durch Schraubklemmen verbunden werden. Der Unfallschutz erfordert natürlich eine vollständige Abdeckung der Klemmen. Komplizierte Leitungsanlagen, etwa diejenige eines größeren Aufzugs nach Abb. 454 bieten oft große Schwierigkeiten, wenn es sich um die Aufsuchung eines Schaltungsfehlers oder einer Störungsquelle handelt. Man tut deshalb gut, in ihr alle Verbindungs- und Abzweigstellen von Leitungen in besonderen Klemmkasten zu vereinigen, die dort genau dem Schaltschema entsprechend zu bezeichnen sind. Die Prüfung der Leitungen geschieht dann von diesen an zugänglicher Stelle angeordneten Kasten aus.

## K. Die Prüfung und Instandhaltung elektrischer Antriebe.

**Die Prüfung.** Ein jeder Antrieb muß nach seiner Fertigstellung einer eingehenden Prüfung unterzogen werden. Durch dieselbe soll nicht nur die richtige Arbeitsweise des elektrischen Antriebs mit der Arbeitsmaschine festgestellt werden, sondern auch die einwandfreie Beschaffenheit und Verarbeitung aller elektrischen Materialien. Der Motor ist bereits im Prüffeld der liefernden Firma eingehend erprobt worden, so daß sich bei der Inbetriebnahme die Untersuchung auf eine Prüfung der Lager, der leichten Beweglichkeit des Ankers und auf die Messung des Isolationszustandes beschränken kann. Die letztere Messung ist besonders dann wichtig, wenn der Motor keinen ganz trockenen Stand gehabt hat. Es ist nämlich zu bedenken, daß die Isolation der Motoren um so weniger vollkommen ist, je feuchter sie ist, daß also von dem Kupfer eines Motors zum Eisen des Gestells durch den *Isolationswiderstand* ein kleiner Strom fließen kann, wenn zwischen diesen Teilen eine Spannung herrscht. Dieser Verluststrom ist um so kleiner, je größer der Isolationswiderstand ist, und wir haben dafür zu sorgen, daß der Isolationswiderstand eines Motors dauernd ein hoher ist. Es bestehen keine bestimmten Vorschriften über die Höhe dieses Widerstandes, weil derselbe in feuchten Räumen mit dem besten Willen oft nicht hochzuhalten ist, man kann aber, um einen allgemeinen Anhalt zu haben, etwa annehmen, daß derselbe das 1000fache der Betriebsspannung in Volt nicht sehr unterschreiten darf. Die Messung wird in den meisten Fällen mit einem Kurbelinduktor vorgenommen, mit welchem durch Kurbelantrieb eine Spannung in der Größenordnung der Betriebsspannung erzeugt wird. Das Instrument wird mit seiner einen Klemme an das Kupfer der Wicklung, mit der anderen an das Eisen des Gestells angeschlossen. Auch mit einem Spannungsmesser, dessen Widerstand bekannt ist, kann die Widerstandsmessung vorgenommen werden, indem man denselben in Hintereinanderschaltung mit einer Stromquelle bekannter Spannung zwischen Kupfer und Eisen legt. Der Isolationswiderstand läßt sich dann aus der angezeigten Spannung und den übrigen bekannten Größen leicht berechnen. Man sollte stets den Isolationswiderstand des Ankers getrennt von demjenigen des Magnetgestells oder des Ständers bestimmen, wobei zu beachten ist, daß bei der Messung Anker und Feldwicklung elektrisch vollständig voneinander zu trennen sind. Bei Drehstrommotoren braucht der Isolationswiderstand des Läufers nicht hoch zu sein, weil dessen Spannung im allgemeinen sehr niedrig gewählt wird. Die Inbetriebsetzung eines Motors darf nicht erfolgen, wenn der gemessene Isolationswiderstand zu niedrig ist. Beträgt er etwa  $\frac{1}{4}$ — $\frac{1}{2}$  des obengenannten Wertes, so kann man durch einen Dauerbetrieb den Motor erwärmen und austrocknen, so daß sein Isolationswiderstand dadurch auf normalen Wert steigt. Hochspannungsmotoren sollte man stets vor der ersten Inbetriebsetzung austrocknen, und zwar entweder dadurch, daß man warme Luft durch den Motor leitet, oder daß man den Motor längere Zeit an eine niedrigere Spannung anschließt. Dieselbe muß aber so hoch sein, daß eine nennenswerte Erwärmung des Motors eintritt, also mindestens  $\frac{1}{10}$  der Betriebsspannung. Die weitere Prüfung des Antriebs hat sich

auf die Schalt- und Anlaßvorrichtung, sowie auf die Leitungsanlage zu erstrecken, wobei die leichte Bewegbarkeit der Apparate und die sichere Auflage aller Gleitkontakte festgestellt werden muß. Ferner ist zu prüfen, ob die Leitungsart und ihre Querschnitte den Verbandsvorschriften entsprechen, ob nichts gegen die Güte der Materialien einzuwenden ist, und ob die Sicherung des Motors und der Leitungen gegen Überströme richtig ist. Bei Drehstrommotoren ist zu beachten, daß im allgemeinen die Läuferleitungen, wegen der meistens sehr viel geringeren Läuferspannung wesentlich stärker sein müssen als die Ständerleitungen. Schließlich ist auch eine Isolationsmessung der Leitungsanlage vorzunehmen. Um nicht zu viel Mühe damit zu haben, genügt es im allgemeinen, wenn man den Widerstand der zusammenhängenden Schaltung gegen Erde (Eisen der Arbeitsmaschine) mißt, wie z. B. in Abb. 488 mit dem Kurbelinduktor  $K_1$  angedeutet ist. Nur wenn der Isolationswiderstand des Motors niedrig ist, ist es angebracht, den Motor von der Leitungsanlage während der Messung zu trennen. Sehr geringer Isolationswiderstand der Leitungsanlage deutet auf einen Isolationsfehler hin, der gesucht und entfernt werden muß. Bei der Aufsuchung sind nötigenfalls einzelne Leitungstrecken und Apparate abzutrennen. Nach Durchführung aller Messungen überprüfe man noch einmal schnell die wichtigsten Punkte, wie Lager, Bürsten und überzeuge sich, daß alle Hindernisse beseitigt und alle Arbeiter aus der Arbeitsmaschine heraus sind. Dann kann der Anlauf erfolgen. Man mache sich jedoch zur Regel, nur dann die Inbetriebnahme vorzunehmen, wenn der für den mechanischen Teil der Arbeitsmaschine Verantwortliche anwesend ist.

Alle Ergebnisse der Prüfung sind in übersichtlicher Weise in ein Prüfprotokoll einzutragen, welches ferner auch die Leitungsart, die Querschnitte, Sicherungsgrößen usw. enthalten soll. Wenn es irgendwie möglich ist, sollten nach der Inbetriebsetzung auch Leistungsmessungen vorgenommen werden, auch ist festzustellen, ob die Arbeitsmaschine die geforderte Geschwindigkeit hat. Auch alle diese Werte nebst den zugehörigen Nutzbelastungen der Arbeitsmaschine sind in das Protokoll einzuschreiben. Außerdem ist noch ein genaues Schaltungsschema anzufertigen, welches sich durch Übersichtlichkeit auszeichnen, und welches alles Wissenswerte der Leitungsanlage enthalten muß.

**Die Instandhaltung.** Elektromotorische Antriebe bedürfen um so mehr einer fortlaufenden Aufsicht, je schmutziger der Aufstellungsort und je schwieriger der Betrieb ist. Man muß von dem Bedienenden verlangen, daß er vor allem das Innere der Motoren, Schaltkasten und Anlasser dauernd sauber und betriebsfähig erhält. Zur Reinigung von Staub muß ein Blasebalg und ein Pinsel, bei starken Verschmutzungen möglichst ein Anschluß an eine Druckluftleitung vorhanden sein. Der Druck ist beim Ausblasen stark zu mäßigen, weil sonst bei häufiger Reinigung die Isolation leidet. Wo eine Luftleitung fehlt, kann man die Luft in Stahlflaschen hinbringen, auch findet man hin und wieder fahrbare Kompressoren angewandt. Da nicht alle Ecken ausgeblasen werden können, ist mit trockenem Tuch und Pinsel weiter zu reinigen, dabei dürfen die Ableiter zum Kollektor und die Fahnen der Drehstromläufer

nicht verbogen werden. Nötigenfalls kann man sich auch ein geeignetes Werkzeug aus Holz anfertigen, mit dem man aus engen Zwischenräumen den Staub entfernen kann. Bei Drehstrommotoren ist besonders auf gleichen Luftspalt an allen Stellen des Umfanges zu achten, weil Lagerverschleiß sehr schnell zu einem Schleifen des Läufers führt. Kollektor, Schleifringe und Kurzschlußvorrichtung sind sorgfältig von Brandstellen freizuhalten. Motoren in feuchten Räumen erfordern erhöhte Aufmerksamkeit, weil die Feuchtigkeit, besonders als Dampf, die Isolation vermindert. Sobald bei einem Motor ein zu geringer Isolationswiderstand festgestellt wird, muß derselbe getrocknet werden. Diese Trocknung kann in leichten Fällen einfach dadurch geschehen, daß man den Motor längere Zeit in Betrieb nimmt, so daß die Eigenwärme die Austrocknung besorgt. Bei Hochspannung ist vorsichtigerweise mit einer niedrigeren Spannung zu trocknen. In größeren Betrieben ist es ratsam, sich für die leichte Austrocknung an Ort und Stelle einen sogenannten Föhn zu beschaffen (tragbarer Ventilator mit Luftheizung), welcher, vor dem feuchten Motor aufgestellt, seine warme Luft hineinbläst. Auch durch Glühlampen läßt sich natürlich eine Trocknung bewirken. In ernsten Fällen jedoch muß der Motor ausgebaut und im Trockenofen getrocknet werden. Unter Umständen ist dann nachher noch eine Lackierung der Wicklung nötig. Hierbei darf aber durch wiederholtes Lackieren die Lackschicht nicht zu dick werden, weil dieselbe die Wärmeabfuhr nicht unerheblich vermindert. Motoren für hohe Spannungen in feuchten Räumen oder Gruben erhält man zuweilen dadurch bei gutem Isolationswiderstand, daß man sie in den Betriebspausen an eine kleinere Spannung legt, die zwar zum Antrieb nicht hinreicht, aber den Motor warm erhält. Eine sorgfältige Überwachung erfordern ferner auch die Lager. Niemals darf mehr Öl eingefüllt werden als die Marke angibt, weil das Öl sonst überläuft, die Schleifringe oder den Kollektor überzieht und auf die Wicklung zerstörend einwirkt. Bei kühlem Wetter sehe man sofort nach dem Anlauf nach, ob nicht das dicke Öl die Ölringe am Laufen hindert. In gewissen Zeitabständen prüfe man auch an einem Öltropfen auf weißem Löschpapier, ob das Öl noch hinreichend rein ist. Verschmutzte Lager müssen mit Petroleum oder auch Benzol ausgewaschen werden, aber natürlich nicht etwa während des Laufs. Höchste Aufmerksamkeit ist den Motoren mit sehr hohen Drehzahlen, z. B. denen mit minutlich 3000 Umläufen zu schenken. Die geringsten Erschütterungen bewirken bei ihnen schon eine rasche Zerstörung der Lager. Wenn etwa ein Eisenstäbchen, welches mit dem einen Ende auf das Motorgehäuse gesetzt und mit dem anderen Ende gegen die Zähne gehalten wird, unerträglich zittert, so sollte man den Motor nachsehen lassen.

Damit bei dem Wiederanschießen eines ausgebauten Motors die Drähte nicht verwechselt werden, ist es ratsam, die Zuleitungen und die zugehörigen Motorklemmen gleichfarbig zu bezeichnen, denn es ist nicht nur unangenehm, sondern auch gefährlich, wenn plötzlich die Arbeitsmaschinen verkehrt umlaufen.

In größeren Betrieben mit zahlreichen Motoren und schwierigen Betriebsverhältnissen ist eine regelmäßige Prüfung der einzelnen Motoren dringendes Erfordernis. Dieselbe soll nicht nur eine Kontrolle des

bedienenden Arbeiters sein und ihn zur Pflichterfüllung anhalten, sondern auch Störungen voraussehen und damit den Motor vor ernststen Schäden bewahren. Über die Prüfungen ist Buch zu führen, damit eine Verschlechterung des Motorverhaltens sogleich auffällt, und damit stets die Vergangenheit des Motors nachgeschlagen werden kann. Es ist ferner ratsam, die Motoren mit einer eigenen Numerierung zu versehen, und eine Karthothek darüber anzulegen. Auf den Karten, die sowohl nach den eigenen Nummern, als auch nach den Fabriknummern der Motoren auffindbar sein müssen, sind nicht nur alle Angaben des Leistungsschildes niederzuschreiben, sondern ferner auch der jeweilige Standort des Motors, die Antriebsverhältnisse, sowie auch sämtliche Reparaturen, die er bis dahin durchgemacht hat.

Es bleibt noch zu erwähnen, daß man in großen Betrieben die Wartung der Motoren usw. nicht dem Führer der Arbeitsmaschine überlassen kann. Denn dieser ist im allgemeinen nur an einer möglichst hohen Erzeugung interessiert. Es sind deshalb besondere Maschinenwärter anzustellen, welche nach einem bestimmten Programm die Maschinen nachsehen und auch die regelmäßige Schmierung besorgen. Durch Prämien kann man ihren Eifer fördern.

## L. Die Störungen an elektromotorischen Antrieben und das Aufsuchen der Fehlerquelle.

Eine Störung kann sich dadurch bemerkbar machen, daß der Motor bei der Anlaßbewegung nicht anläuft, oder auch, daß der Überstromschutz anspricht. Vorausgesetzt, daß der mechanische Teil der Maschine in Ordnung ist, kann die Ursache der Störung entweder im Motor oder in den Anlaß- und Schaltapparaten, oder schließlich auch in der Leitungsanlage gesucht werden. Zunächst beschränkt man sich bei der Aufsuchung des Fehlers auf eine äußere Untersuchung und erst wenn diese fehlschlägt, geht man zur eingehenden Untersuchung über. Bei letzterer sind im allgemeinen Meßinstrumente erforderlich, auch muß der Motor und die Anlaßvorrichtung meistens von der Leitungsanlage getrennt werden.

Läuft der Motor, ohne daß sich sonst etwas zeigt, bei Ausführung der Anlaßbewegung nicht an, so ist eine Unterbrechung vorhanden. Wir haben diese zunächst dort zu suchen, wo die Wahrscheinlichkeit am größten ist, nämlich an den Sicherungen. Wenn diese unversehrt sind, gehen wir weiter und suchen Merkzeichen, die uns den Ort der Unterbrechung verraten können. Handelt es sich um einen Nebenschlußmotor, so kann die Unterbrechung nicht im Erregerstromkreis liegen, weil dann ja doch beim Weiterschalten der Ankerstrom immer größer würde und die Sicherungen durchbrennen müßten, was hier nicht der Fall sein sollte. Um nun zu entscheiden, ob die Unterbrechung im Ankerstromkreis oder in der gemeinsamen Zuleitung zum Anker und Feld liegt, beobachte man die Unterbrechungsstellen beim Drehen der Anlaßvorrichtung. Zeigen die Kontakte, welche den Erregerstrom schalten, Ausschaltfeuer, die Ankerstromkontakte hingegen nicht, dann liegt der

Fehler im Ankerstromkreis. Wir prüfen jetzt diesen Stromkreis durch genaue Besichtigung und Befühlen aller Kontakte im ausgeschalteten Zustand. Vor allem muß festgestellt werden, ob die Kontakte der Anlaßvorrichtung ordentlich aufliegen, ob keine Lockerung von Schraubkontakten stattgefunden hat, und ob die Motorbürsten aufliegen. Bei einem Hauptschlußmotor läßt sich natürlich eine solche getrennte Untersuchung von Anker- und Erregerstromkreis nicht durchführen, weil Anker und Feld einen einzigen Stromkreis bilden. Handelt es sich hingegen um einen Antrieb mit Drehstrommotor, so zeigt uns wieder das Ausschaltfeuer an den Ständerkontakten am Schalter, ob eine derselben unterbrochen ist. Der Motor brummt dann auch. Läuft der Motor nicht an, obwohl die drei Ständerleitungen Strom führen, so muß der Läufer unterbrochen sein. In den Anlaßwiderständen kann eine Unterbrechung nur dann gesucht werden, wenn nach Überschreiten einer bestimmten Anlaßstufe der Motor mit großer Heftigkeit anspringt oder die Sicherungen durchbrennen.

In dem zweiten Falle, daß beim Anlassen die Sicherungen durchbrennen, gibt es noch mehr Fehlermöglichkeiten. Vorausgesetzt, daß der Motor nicht überlastet ist, könnte bei einem Nebenschlußmotor z. B. eine Unterbrechung im Erregerstrom vorhanden sein, was am lichtbogenfreien Abschalten der Erregerstromkontakte des Anlассers erkennbar sein müßte. Es wäre jedoch auch möglich, daß der Anker kurzgeschlossen, also irgendwie überbrückt wäre. Bei Antrieb durch Hauptschlußmotor könnte sowohl die Erregerwicklung, als auch der Anker kurzgeschlossen sein. Ein Kurzschluß innerhalb der Anlaßwiderstände würde sich dadurch bemerkbar machen, daß der Motor mit einem Ruck anzulaufen versucht. Bei dem Drehstrommotor läßt ebenfalls das Durchbrennen der Sicherungen beim Anlassen verschiedene Möglichkeiten zu. Es kann z. B. eine Ständerphase stromlos sein, was wiederum an dem Fehlen des Ausschaltlichtbogens erkennbar sein müßte. Es könnten jedoch auch eine oder mehrere Phasen kurzgeschlossen sein. In diesem Falle würden sich an den Schaltkontakten Lichtbogen bilden, und es müßte eine eingehende Untersuchung folgen. Am häufigsten werden bei Drehstrommotoren, die einen vom Ständerschalter getrennten Anlассer haben, die Sicherungen beim Anlauf dadurch durchgebrannt, daß der Anlассer bei dem vorhergehenden Stillsetzen vergessen wurde, in seine Nullstellung zu drehen.

Die Zahl der Störungsmöglichkeiten wächst naturgemäß außerordentlich, wenn noch weitere Schalt- und Steuerapparate in die Schaltung eingefügt sind, und es ist dann unbedingt notwendig, daß man sich an Hand des Schaltungsschemas klar macht, welche Fehlermöglichkeit man zuerst nachprüft. Wenn beispielsweise in Abb. 436 der Motor beim Drücken des Druckknopfes  $D_3$  nicht anläuft, wohl aber beim Drücken der anderen Druckknöpfe, so geht hieraus hervor, daß lediglich der Stromkreis, in welchem  $D_3$  und  $S_3$  liegen, nicht in Ordnung ist. Läuft hingegen der Motor nur bei niedergedrücktem Druckknopf an und bleibt beim Loslassen desselben wieder stehen, so liegt der Fehler nur an den Hilfskontakten des betreffenden Schützes  $S$ . Bei Kran- und Aufzugsmotoren läuft der Motor, während die Sicherungen durchgehen, zuweilen

deshalb nicht an, weil der Bremslüftmagnet die Haltebremse nicht lüftet. Durch Anheben des Bremshebels von Hand läßt sich feststellen, ob der Magnet die Ursache des Versagens ist.

Bei dem Absuchen der Apparate und Leitungen nach der Fehlerquelle hat man stets an den Orten größerer Wahrscheinlichkeit zuerst nachzusehen. Ein Steuerschalter kann z. B. leicht dadurch versagen, daß seine Kontaktfinger nicht aufliegen, weil sie längere Zeit nicht nachgestellt wurden, oder auch, daß dieselben zu stark nachgestellt und dann durch die Walzenbewegung abgebogen wurden. Schützen und Bremsmagnete mit Nebenschlußspulen versagen oft infolge Bruchs der dünnen Spulendrähte an der Austrittsstelle. Diese Apparate fallen auch zuweilen trotz des Ausschaltens nicht ab, weil noch genügend Dauermagnetismus zurückbleibt. Es ist dann der Luftspalt im angezogenen Zustand durch Zwischenfügung einer unmagnetischen Schicht zu vergrößern. Besonders störend können sich Wechsel- oder Drehstrom-Bremsmagnete oder Schützen verhalten. Während Gleichstrom-Magnete, einerlei, ob der Kern angezogen ist oder nicht, stets den gleichen, durch das Ohmsche Gesetz bestimmten Strom aufnehmen, hängt bei Wechselstrom die Stromaufnahme bekanntlich von der Größe des Luftspaltes ab (s. S. 132). Im ersten Augenblick des Einschaltens, während also der Kern noch nicht angezogen ist, nimmt die Spule einen vielmal größeren Strom auf als nachher. Wenn nun der Magnet zu stark belastet ist oder etwas klemmt, so wird der länger fließende große Strom die Sicherungen durchbrennen, oder gar den Magneten beschädigen. Zuweilen kommt es auch vor, daß durch eine stärkere Erwärmung der Lack der Spule flüssig wird und die Bewegung hemmt.

*Die eingehende Untersuchung.* Dieselbe verlangt eine gründliche Vertiefung in die Schaltung und ihre Wirkungsweise. Um ein ungefähres Bild der Untersuchung zu geben, wollen wir eine bestimmte Schaltung betrachten. Abb. 488 stellt eine Umkehrschaltung für einen Nebenschlußmotor mit zwei Notenumschaltern  $E_1$  und  $E_2$  dar.  $R$  ist der Anlaßwiderstand und  $r$  ein Parallelwiderstand zum Schutze der Erregerwicklung gegen zu hohe Ausschaltspannung (s. S. 46). Durch die Voruntersuchung sei festgestellt worden, daß bei Drehung des Anlassers wohl die unteren Erregerkontakte einen Ausschaltlichtbogen zeigen, nicht aber die übrigen Kontakte. Es muß also eine Unterbrechung im Ankerstromkreis vorhanden sein. Nachdem man dann geprüft hat, daß alle Kontaktfinger dieses Stromkreises im Anlasser gut aufliegen, könnte man bei abgeschaltetem Steuerschalter einen Kurbelinduktor  $K$  wie gezeichnet an die Klemmen  $a$ — $b$  halten. Derselbe würde voraussichtlich bei Drehung seiner Kurbel keinen Ausschlag zeigen und damit beweisen, daß in dem an  $a$ — $b$  angeschlossenen Ankerstromkreis, also außerhalb des Steuerschalters eine Unterbrechung vorhanden ist. Schlägt das Instrument jedoch voll aus, so liegt die Unterbrechung im Anlasser. Statt des Kurbelinduktors läßt sich in gleicher Weise auch ein sogenanntes Galvanoskop verwenden, es ist dies ein empfindliches Stromanzeigeelement, welches mit einer kleinen Batterie zusammengebaut ist. Auch eine Klingel mit einigen Elementen kann benutzt werden. Nehmen wir nun weiter an, die Unterbrechung liege im äußeren Stromkreis,

so prüfen wir jetzt in ähnlicher Weise die einzelnen Apparate dieses Stromkreises. Während der Anlasser in der Nullstellung steht, legen wir den Kurbelinduktor nacheinander an A und B, e und f, sowie g und h. Das Instrument muß in jedem Falle voll ausschlagen. Tut es dies in einem Falle nicht, so liegt dort der Fehler. Zeigen aber alle drei Stellen keinen Fehler, so müssen die Leitungen selbst geprüft werden. Z. B. die Leitung a—e, indem man an ihre Enden a und e den Induktor anschließt und kurbelt. Bei langen Leitungen ist es in diesem Falle nötig, eine der anderen Leitungen, von der man weiß, daß sie unbeschädigt ist, als Meß-Rückleitung zu benutzen. Wird nun die Unterbrechung im Anker des Motors festgestellt, so ist nicht ohne weiteres anzunehmen, daß dieselbe in der Wicklung liegt, weil dies wegen der mehrfachen

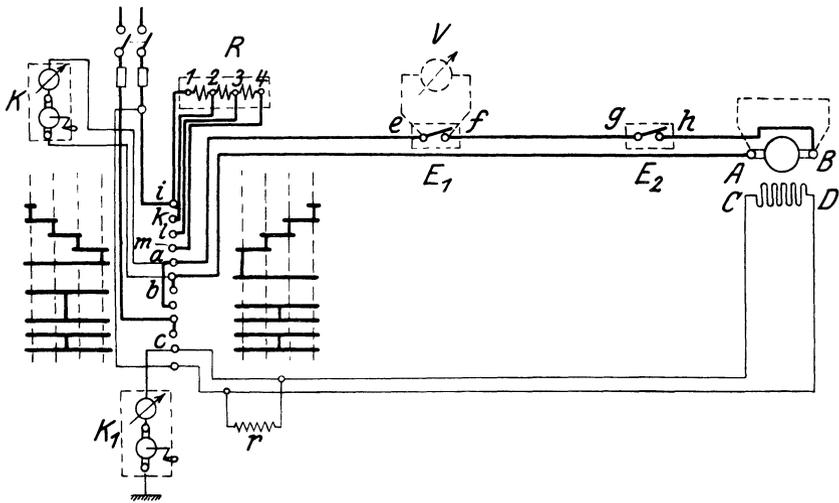


Abb. 488. Untersuchung einer Schaltung.

Parallelschaltung nicht wahrscheinlich ist. Es ist vielmehr eher anzunehmen, daß eine Verbindungsleitung im Motor unterbrochen ist.

Man kann die Untersuchung auch ohne einen Kurbelinduktor ausführen, indem man nacheinander den Anker und die Endschalter, wie bei A—B punktiert angedeutet, mit einem Leiter überbrückt. Der Anlasser müßte dann, wenn die Unterbrechungsstelle gerade überbrückt ist, Ausschaltfeuer bei a—b zeigen, wenn derselbe kurz auf die erste Schaltstellung und zurück gedreht wird. Auch mit einem Spannungsmesser läßt sich die Prüfung durchführen, den man wie den Kurbelinduktor aufeinanderfolgend an den Anker und die Endschalter anschließt, während der Anlasser eingerückt ist. Abb. 488 zeigt bei  $E_1$  die Schaltung. Der Spannungsmesser würde die volle Spannung zeigen, wenn er gerade die Unterbrechungsstelle überbrückt, sonst aber nicht ausschlagen. Sobald einwandfrei festgestellt ist, daß der Fehler im Motor liegt, ohne daß er äußerlich zu erkennen ist, muß der Motor ausgebaut und für sich untersucht werden, wie dies bereits früher gelehrt wurde (s. S. 77).

**Beispiel:** Der Motor nach Abb. 488 laufe beim Anlassen zwar an, aber man gewinnt den Eindruck, daß derselbe schon vor dem letzten Kontakt ohne Vorschaltwiderstand läuft, während bei voller Einschaltung noch Widerstand eingeschaltet ist. Es scheint also, daß der Anlaßwiderstand  $R$  nicht richtig mit dem Anlasser verbunden ist. Da die Leitungen in dem Schutzrohr nicht direkt verfolgt werden können, und da ferner einmal angenommen sei, daß der Widerstand so weit entfernt stehe, daß eine besondere Prüflitung nicht gezogen werden kann, werden die Leitungsenden 1, 2, 3 und 4 von dem Widerstand gelöst und wie nachstehend angegeben miteinander verbunden. Der Kurbelinduktor (oder auch ein Element mit Klingel) wurde an die Anlasserklemmen  $i$ ,  $k$ ,  $l$  und  $m$  gehalten und der Ausschlag beobachtet.

|                                 |   |
|---------------------------------|---|
| Kurbelinduktor zwischen $i-k$ , | kein Ausschlag, wenn 1 mit 2 verbunden, |
| „ „ „ „ „ „                     | 1 „ 3 „                                 |
| „ „ „ „ „ „                     | 1 „ 4 „                                 |
| „ „ $i-l$ , „ „                 | 1 „ 3 „                                 |
| „ „ $l-m$ , „ „                 | 2 „ 3 „                                 |
| „ „ $l-m$ , kein „ „            | 3 „ 4 „                                 |
| „ „ $k-m$ , voller „ „          | 2 „ 4 „                                 |

Wo ist die falsche Verbindung?

### XIII. Schaltlehre in Beispielen.

Eine elektrische Schaltung läßt sich nicht wie eine mathematische Aufgabe durch einen rechnerischen Gang eindeutig festlegen. Besonders bei größeren Schaltungen mit vielen Schaltelementen ist neben den Überlegungen ein Probieren nicht zu vermeiden. Dieses Probieren darf aber nicht die Oberhand gewinnen, weil sonst die Arbeit ziellos wird und vielleicht eine zwar richtige, aber viel zu umständliche Schaltung herauskommt. Vor Beginn des Entwurfes stelle man sich zusammen, welche Bedingungen die Schaltung erfüllen muß. Dann zeichne man sich zuerst ein Gerippe der Schaltung, indem man die Hauptstromkreise, z. B. denjenigen eines Motors, festlegt. Hierauf geht man zu den einzelnen Bedingungen über, und nimmt sich zuerst die wichtigste und für die Schaltung einflußreichste vor. Durch Einfügung von Schaltelementen ist diese Bedingung zu befriedigen. Wenn dies geschehen ist, macht man dasselbe der Reihe nach mit den anderen Bedingungen, prüft aber bei jeder Änderung, die man vornimmt, ob nicht durch sie die richtige Wirkungsweise der bisherigen Schaltung gestört wird. Bei richtiger Überlegung und etwas Geschick erhält man auf diese Weise schnell die bestmögliche Schaltung.

1. Eine Türschelle soll so eingerichtet werden, daß sie zeitweise abgestellt werden kann.

Zur Lösung dieser Aufgabe brauchen wir außer dem bereits vorhandenen Druckknopfschalter  $D$  einen weiteren Schalter  $S$ , welcher mit  $D$  hintereinander

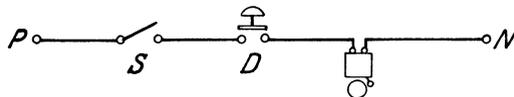


Abb. 489.

geschaltet werden muß, denn nur in dieser Schaltung kann durch Öffnen des Schalters  $S$  eine Benutzung der Schelle verhindert werden (Abb. 489).

2. Eine Schelle soll von zwei verschiedenen Stellen aus eingeschaltet werden können.

Um von einer zweiten Stelle aus die Schelle einschalten zu können, genügte es, wenn man von dort aus den ersten Druckknopf überbrückte. Diese Über-

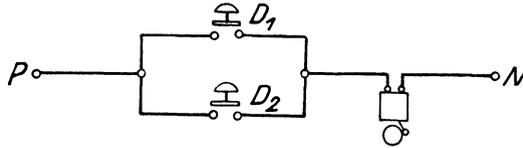


Abb. 490.

brückung kann durch einen zweiten Druckknopf  $D_2$  erfolgen, der also parallel zu  $D_1$  liegen muß (Abb. 490).

3. Zwei Lampen sollen sowohl einzeln, als auch zu zweien eingeschaltet werden können.

Am einfachsten wäre es, wenn nach Abb. 491 a jede Lampe ihren eigenen Schalter hätte, die beliebig ein- und ausgeschaltet werden könnten. Um eine handlichere Schaltweise zu bekommen, bedenke man, daß zur Erzielung der gewünschten Schaltung nur nacheinander die Punkte 1 und 2, dann 1 und 3 und zuletzt 1, 2 und 3 miteinander verbunden werden müßten. Dies erreicht man nach Abb. 491 b sehr einfach durch den drehbaren Kontaktwinkel. In der gezeichneten Stellung brennt keine Lampe. Nach einer Drehung um  $90^\circ$  rechts herum brennt  $L_2$ , nach weiteren  $90^\circ$  brennen beide Lampen und in der dritten Stellung nur  $L_1$ .

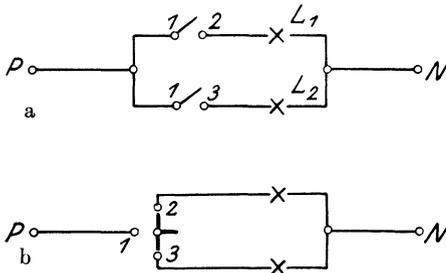


Abb. 491.

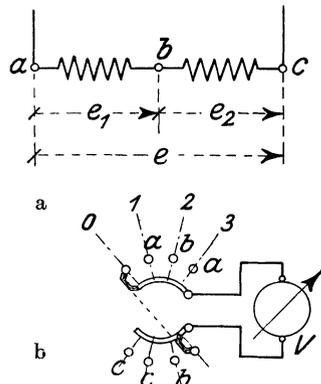


Abb. 492.

4. Ein Spannungsmesser soll derart umschaltbar sein, daß nacheinander verschiedene Spannungen gemessen werden können.

Es sollen nacheinander die Spannungen  $e_1$ ,  $e_2$  und  $e$  der Abb. 492 a gemessen werden. Wenn es sich um eine einmalige Messung handelte, würde man vielleicht in jede Hand einen der isolierten Spannungsmesserdrähte nehmen und würde nun einmal die Punkte a und b, dann b und c und zuletzt a und c berühren. Genau die gleichen Verbindungen müßte ein Schalter machen. Wir benutzen deshalb am besten einen Schalter nach Abb. 492 b, an dessen mittlere Schienen der Spannungsmesser anzuschließen ist. Wenn nun in der ersten Stellung die Spannung zwischen a und b gemessen werden soll, so ist der obere Kontakt dieser Stellung mit a, der untere mit b zu verbinden. Entsprechend ist bei den Stellungen 2 und 3 zu verfahren, wobei jedoch darauf zu achten ist, daß in allen Stellungen der Strom in der gleichen Richtung durch den Spannungsmesser fließt, weil derselbe sonst verkehrt ausschlagen müßte.

5. Der Wärter einer Pumpe soll durch ein Merkzeichen darauf aufmerksam gemacht werden, wenn der zu füllende Behälter voll ist.

Hier ist ein Schallzeichen einem Lichtzeichen vorzuziehen, weil es eher beachtet wird. Die Abhängigkeit von dem Flüssigkeitsstand läßt sich am besten durch einen Schwimmer *S* erreichen, welcher in seiner höchsten Stellung einen Kontakt schließt. Damit der Wecker aber bei Erreichung des Höchststandes nicht dauernd weckt, darf man ihn nicht durch einen Schalter abschaltbar machen, weil derselbe einmal versehentlich ausgeschaltet bleiben könnte, sondern man tut gut, den Weckerstrom über einen Klingeltransformator *T* hinter dem Motorschalter abzunehmen (Abb. 493).

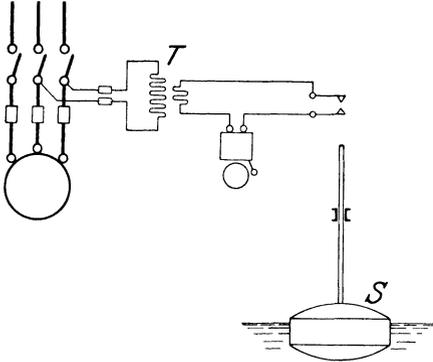


Abb. 493.

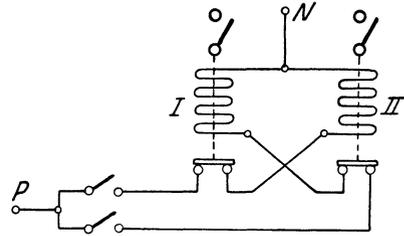


Abb. 494.

6. Zwei Schütze sollen mit zwei Schaltern ein- und ausgeschaltet werden, es soll jedoch unmöglich sein, daß beide Schütze gleichzeitig angezogen haben.

Diese Bedingung kann auf elektrischem Wege dadurch erfüllt werden, daß jedes Schütz in dem Augenblick, in dem es anzieht, den Stromkreis des anderen unterbricht. In Abb. 494 haben die beiden Schütze I und II deshalb Hilfskontakte, über welche der Spulenstrom des anderen Schützes geführt ist.

7. Eine Anzahl Schützen sollen derart voneinander abhängig gemacht werden, daß sie nur in vorgeschriebener Reihenfolge anspringen können.

Diese Aufgabe ist mit den gleichen Mitteln wie die vorige zu lösen. Der Spulen-

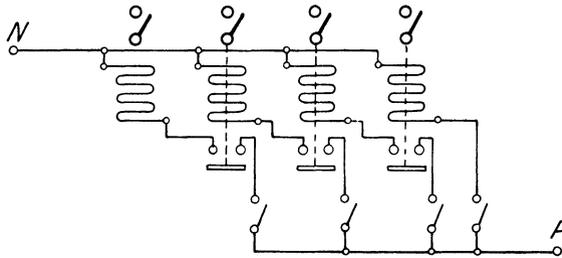


Abb. 495.

strom eines jeden Schützes ist über Hilfskontakte desjenigen Schützes geführt, welches vorher anzuziehen hat (Abb. 495).

8. Die Nullspannungsauslösung Abb. 397 soll so abgeändert werden, daß bei Ausschaltung des Schützes kein unnötiger Strom verbraucht wird.

Bei der Nullspannungsauswahl nach Abb. 398 wird im ausgeschalteten Zustand kein Strom verbraucht, im eingeschalteten Zustand wird hingegen mehr Strom als in Abb. 397 verbraucht, weil kein Widerstand vor der Spule liegt. Man kann nun die Vorteile beider Schaltungen nach Abb. 496 vereinen, indem man den Widerstand  $R$  in die Überbrückungsleitung legt.

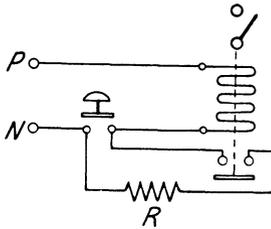


Abb. 496.

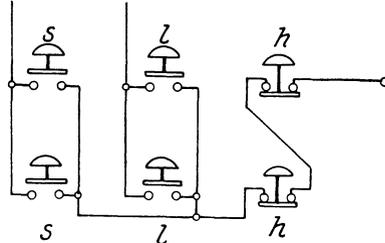


Abb. 497.

9. In der Schaltung Abb. 470 sollen zur Erhöhung der Bequemlichkeit zwei Druckknopftafeln angebracht werden.

Wenn man die Einschaltedruckknöpfe  $s$  und  $l$  von einer zweiten Stelle aus einschalten will, so müssen sie überbrückt werden. Die zweiten Druckknöpfe  $s$  und  $l$  sind also parallel zu schalten. Die Unterbrechung des Stromes durch zwei Halt-druckknöpfe ist jedoch nur möglich, wenn dieselben hintereinander geschaltet werden (Abb. 497).

10. Eine Lampe soll von zwei Stellen aus unabhängig voneinander ein- und ausgeschaltet werden können.

Wenn man nach Abb. 498 a die Schalter an den beiden Stellen einfach hintereinander schaltet, ist die Aufgabe nicht gelöst, denn wenn z. B. 4–5 geöffnet ist, kann man mit 1–2 nicht einschalten. Damit man dies doch könnte, müßte man die punktierte Leitung ziehen, so daß durch die Schalterstellung 1–3 Strom nach

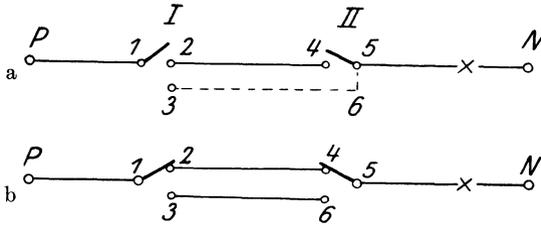


Abb. 498.

der Lampe gelangen könnte. Die so eingeschaltete Lampe läßt sich aber dann nicht mehr von der rechten Stelle aus ausschalten. Um dies nun möglich zu machen, muß 5 und 6 trennbar sein. Man sieht, daß einmal 4 und 5, das andere Mal 6 und 5 verbunden sein müssen, daß man also am besten den Drehpunkt des Umschalters bei 5 annimmt, wie dies Abb. 498 b zeigt.

11. Eine Lampe soll von drei Stellen aus unabhängig voneinander ein- und ausgeschaltet werden können.

Wenn die Lampe nach Abb. 499 a zunächst nur von den Stellen I und III aus schaltbar wäre, könnte man bei der gezeichneten Schalterstellung die Lampe von II aus dadurch zum Brennen bringen, daß man die punktierte Verbindung 1–2 machte. Wenn die Schalter umgekehrt ständen, müßte man hingegen die Verbindung 3–4 machen. Um also bei II unabhängig von den anderen Stellen schalten

zu können, muß man dort entweder die Verbindung Abb. 499 b oder c machen können, was am einfachsten mit dem in Abb. 499 d dargestellten Drehschalter geschieht.

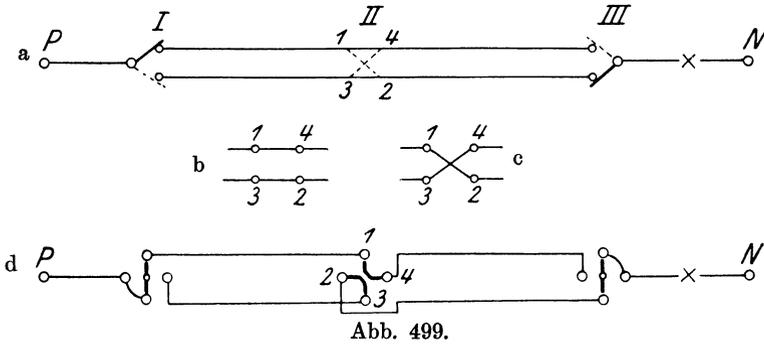


Abb. 499.

In genau gleicher Weise kann die Lampe noch von weiteren Stellen geschaltet werden.

12. Statt der zwei Strommesser in Abb. 500 a soll ein umschaltbarer verwandt werden.

Aus der Abb. 500 b ersehen wir, daß wir durch Herstellung der Kreuzverbindung 1—4 und 2—3 den Strommesser aus dem einen in den anderen Parallelzweig bringen

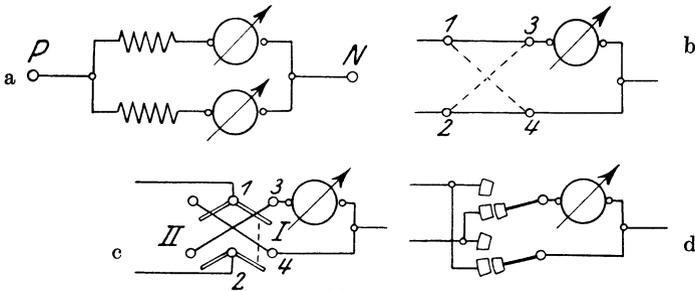


Abb. 500.

können. Diese Umschaltung können wir aber durch einen zweipoligen Umschalter nach Abb. 500 c bewirken, oder, wenn die Umschaltung ohne Unterbrechung der Stromkreise vor sich gehen soll, nach Abb. 500 d.

13. Statt der drei Strommesser der Abb. 501a soll ein umschaltbarer verwandt werden.

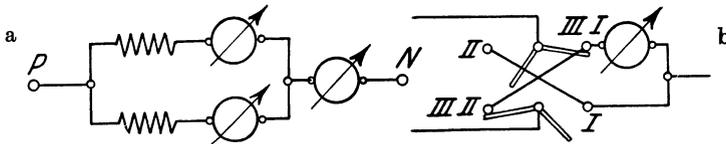


Abb. 501.

Um den Gesamtstrom der beiden Zweige mit dem Strommesser auch noch messen zu können müßte man in Abb. 500 b außer der Verbindung 1—3 noch die

Verbindung 2—3 machen. Man erkennt, daß dies nicht mit einem zweipoligen Umschalter, sondern nur mit zwei einpoligen Umschaltern möglich ist, wie Abb. 501 b andeutet. Bei der gezeichneten Schalterstellung mißt der Strommesser den Gesamtstrom.

14. Die Zweiwattmeterschaltung nach Abb. 502 a soll mit einem umschaltbaren Wattmeter durchgeführt werden.

Nach Abb. 502 b beschränkt sich die Aufgabe darauf, die Stromspule von 1—2 fortzunehmen und nach 3—4 zu legen, wobei die Spannungsspule mit umgelegt wird. Da die Umlegung ohne Unterbrechung vor sich gehen soll, sind vier Stellungen zu unterscheiden: Die in Abb. 502 b gezeichnete, dann wird 1 mit 2 kurzgeschlossen,

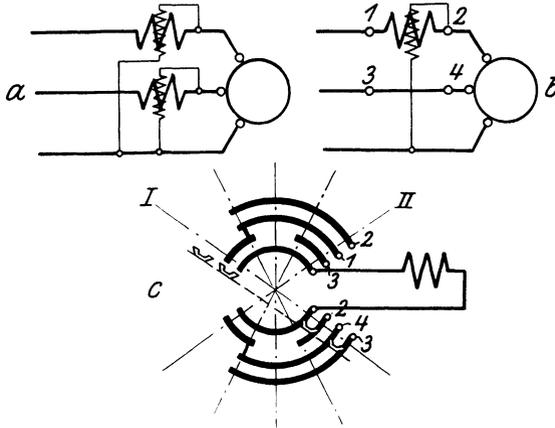


Abb. 502.

hierauf erfolgt die Umlegung der Spule von 1—2 nach 3—4 und zuletzt wird der Kurzschluß von 3—4 aufgehoben. Es ist nun nicht schwer, einen Schalter nach Abb. 502 c zu entwerfen, welcher diese Verbindungen nacheinander herstellt.

15. In eine gerade Elektrohängebahnstrecke mündet eine andere Strecke über eine ausrückbare Weiche ein. Es soll eine Sicherung geschaffen werden, welche verhindert, daß die in der Pfeilrichtung kommenden Wagen bei ausgerichteter Weiche abstürzen.

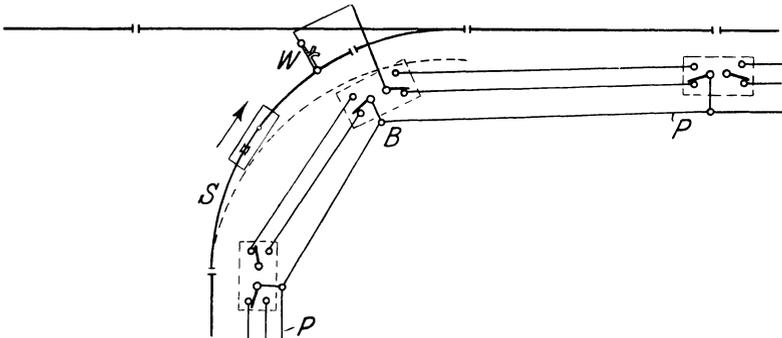


Abb. 503.

Es liegt nahe, für die Lösung dieser Aufgabe die vorhandene Blockierschaltung zu benutzen. Damit die Stellung der Weiche die Schaltung beeinflussen kann, muß notwendig mit der Weiche ein Kontakt verbunden werden. Abb. 503

löst die Aufgabe derart, daß der Blockschalter B nicht, wie es bei der normalen Blockschaltung der Fall ist, direkt die vor der Weiche liegende Blockstrecke S speist, sondern erst über den Weichenschalter W. Solange die Weiche ausgerückt ist (wie punktiert), bekommt S keinen Strom, weil W geöffnet ist, und jeder ankommende Wagen muß auf S stehen bleiben.

16. Ein Motor einer größeren Transportvorrichtung soll von der Materialaufgabestelle aus stillgesetzt werden können.

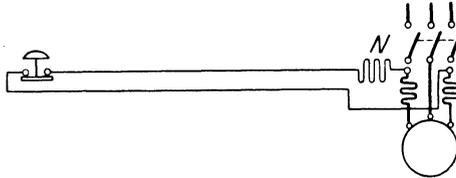


Abb. 504.

zur Aufgabestelle führt. Es ist dann auch nicht möglich, den kurzgeschlossenen Motor von der Aufgabestelle aus einzuschalten (Abb. 504).

17. Zwischen einem Schütz in Nullspannungsausschaltung und dem Steuerschalter eines Motors soll eine Schaltung derart hergestellt werden, daß es immer notwendig ist, den Steuerschalter in die Nullstellung zurückzuführen, wenn aus irgend einem Grunde das Schütz abgefallen ist.

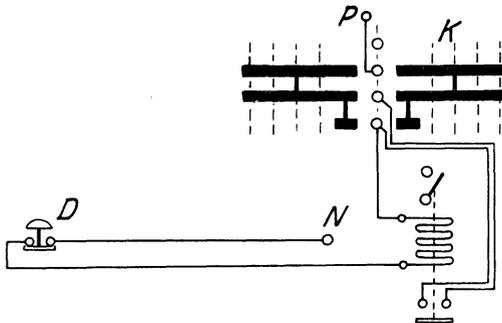


Abb. 505.

dienen die beiden untersten Kontakte der Steuerwalze K diesem Zweck. Beim Schalten von 0 nach 1 fließt von P ein Strom über die beiden untersten Kontakte zur Schützenspule. Beim Weiterdrehen der Walze bleibt das Schütz angezogen, weil seine Hilfskontakte die unteren Walzenkontakte überbrücken. Nur wenn das Schütz abfallen sollte, müßte die Walze in die Nulllage zurückgedreht werden, um das Schütz erneut zum Anziehen zu bringen. Eine Ausschaltung von entfernter Stelle kann durch den Druckknopf D geschehen. Um wieder einzuschalten, muß die Walze zurückgedreht werden.

18. Um bei einem Drehstrommotor die Gefahr zu beseitigen, daß bei kurzgeschlossenem Anlasser eingeschaltet werden könnte, soll eine Sicherung eingebaut werden.

Die Motorschalter haben bei höheren Spannungen meist Höchststrom- und Nullspannungsausschaltung. Die Nullspannungsspule S werde nach Abb. 506 über den Spannungswandler T gespeist. Man wird nun in der Nullstellung des Anlassers K Kontakte anordnen, über welche man den Nullspannungsstrom führt.

Man könnte die Abschaltung in der Weise vornehmen, daß man den Motorstrom zur Aufgabestelle hinführte. Diese Ausführung würde aber bei großen Entfernungen zwischen Motor und Aufgabestelle zu teuer werden, weshalb man besser nur den schwachen Strom der Nullspannungsspule des meist ohnehin vorhandenen Nullspannungsschalters

Außerdem soll der Motor von einer entfernten Stelle aus stillgesetzt werden können.

Die Aufgabe könnte einfach dadurch gelöst werden, daß statt des Druckknopfs in der Nullspannungsschaltung Abb. 398 ein Kontakt im Steuerschalter die Einschaltung des Schützes besorgte. Dieser Einschaltkontakt dürfte aber nur beim Schalten des Steuerschalters von Null zum ersten Kontakt geschlossen sein. In Abb. 505

Die Hilfskontakte von S überbrücken die Anlasserkontakte, damit auch beim Weiterdrehen des Anlassers der Schalter eingeschaltet bleibt. Ein mit dem Haupt-

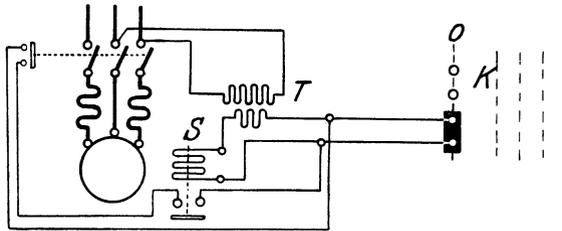


Abb. 506.

schalter gekuppelter Hilfskontakt sorgt dafür, daß S abfällt, wenn der Hauptschalter bei eingerücktem Anlasser ausgeschaltet wird.

19. Die drei Motoren einer großen Werkzeugmaschine sollen derart gegeneinander verriegelt werden, daß alle Motoren selbsttätig zum Stillstand kommen, sobald einer derselben stehen bleibt, daß aber trotzdem alle einzeln betrieben werden können.

Man wird auch hier am besten jedem Motor ein Schütz in Nullspannungsschaltung geben, welches nötigenfalls den Motorstrom abschaltet. Damit nun aber die beiden anderen Motoren mit stehen bleiben, muß man den Spulenstrom dieses

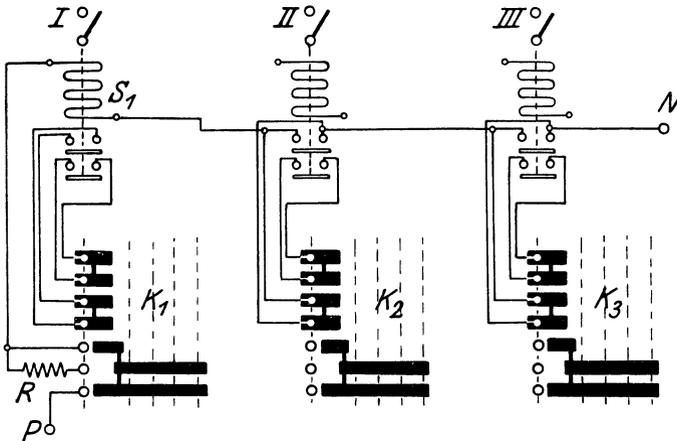


Abb. 507.

Schützes über Hilfskontakte der beiden anderen Schütze führen. Diese Hilfskontakte müssen aber von den Anlassern überbrückt sein, solange dieselben in der Nullstellung stehen, weil man sonst die Motoren nicht einzeln anlassen könnte. In Abb. 507 ist die Schaltung für einen Motor durchgeführt. R ist der Widerstand, welcher nach dem Anziehen vor der Spule  $S_1$  liegt.  $K_1$  ist der eine der Anlasser.

20. Die drei Motoren eines Stahlwerkskranes sollen an Stelle von Abschmelzsicherungen durch Höchststromauslöser in Verbindung mit einem Schütz gesichert werden.

Höchststromauslöser sind billige Apparate mit einer Hauptschlußspule, die bei Überschreitung der zulässigen Stromstärke einen Hilfsstrom unterbrechen können. Wir werden in jede der Motorenleitungen oder auch nur zwei derselben einen

Auslöser A einbauen und den Spulenstrom des Sicherheitsschützes S über sämtliche Auslöserkontakte führen. Sobald einer der Auslöser öffnet, fällt das Schütz ab und setzt alle Motoren still. Damit es nicht eher wieder zum Anziehen

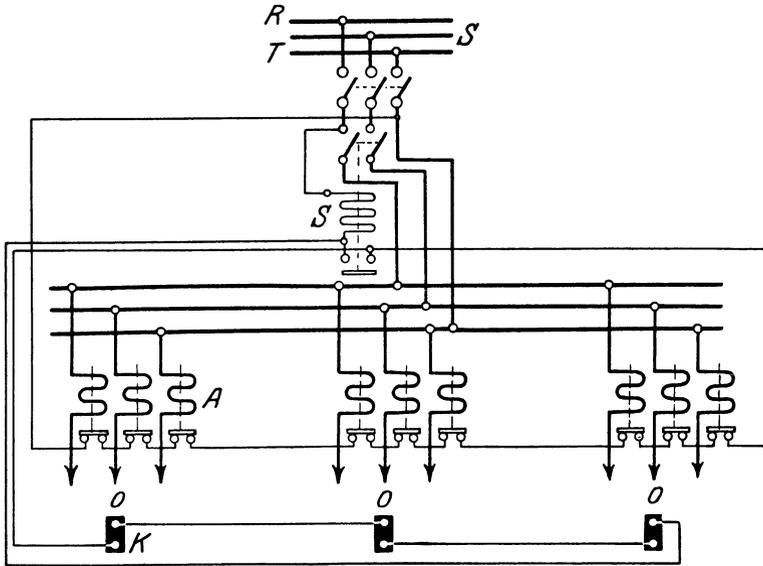


Abb. 508.

gebracht werden kann, bis alle Steuerschalter in ihre Nullstellung gebracht sind, ist der Schützenstrom auch noch über die Steuerwalzenkontakte K geführt, die nur in der Nulllage der Walzen Verbindung herstellen, die bei angezogenem Schütz durch dessen Hilfskontakte überbrückt sind (Abb. 508).

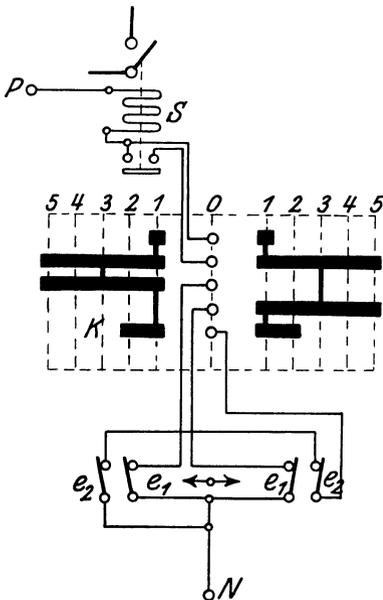


Abb. 509.

21. Endschalter müssen so früh ausschalten, daß bei höchstem Nachlauf noch keine Anstoßgefahr besteht. Um den Hub dennoch möglichst weit auszunutzen soll ein zweifacher Endschalter nach jeder Richtung angeordnet werden. Der erste Endschalter öffnet frühzeitig und schaltet nur dann den Motor ab, wenn die Steuerwalze in diesem Augenblick noch weiter als über etwa die zweite Stellung eingerückt ist. Wenn dieselbe aber schon zurückgestellt und damit die Geschwindigkeit ermäßigt ist, so soll der Motor weiterlaufen können, bis er durch Öffnen des zweiten Endschalters kurz vor Hubende stillgesetzt wird (A.E.G.-Sicherheitsendschaltung, Abb. 509).

In Abb. 509 sind die zuerst geöffneten Endschalter  $e_1$  genau wie bei der früheren Hilfsstrom-Endschaltung geschaltet. Wenn nun diese Endschalter bei zurückgestelltem Steuerschalter unwirksam gemacht werden sollen, so müssen die zuletzt zu öffnenden Endschalter  $e_2$  die ersteren überbrücken und in der Steuerwalze über Kontaktschienen geführt sein, die nur über die beiden ersten Stellungen reichen.

22. Ein Motor soll mittels Umschalters an zwei Stromquellen verschiedener Spannung gelegt werden können, es soll jedoch dafür gesorgt werden, daß die Umschaltung nur bei vorgeschaltetem Anlasser erfolgt.

Die Lösung auch dieser Aufgabe kann mit einem Schütz in Nullspannungsschaltung erfolgen. Man führt am besten den Spulenstrom des Schützes  $S$  der

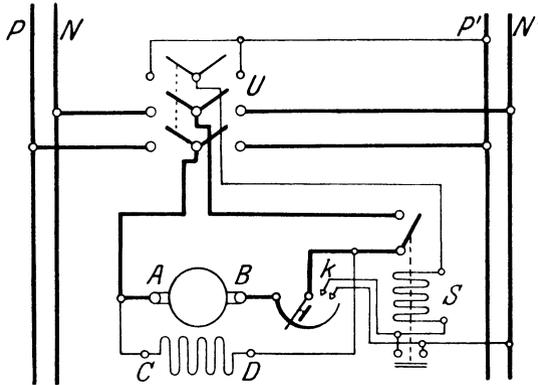


Abb. 510.

Abb. 510 auch über den Umschalter  $U$ , so daß das Schütz beim Umschalten abfallen muß. Von selbst kann es nach dem Umschalten nicht mehr anziehen, weil seine Hilfskontakte, welche vorher als Stromweg dienten, geöffnet sind. Nur wenn wir durch Ausschalten des Anlassers den Kontakt  $k$  schließen, kann das Schütz wieder anziehen.

23. Eine Pumpen- oder Kompressorenanlage mit kleinem Motor soll mittels Manometerschalters bei niedrigem Druck ein- und bei hohem Druck ausgeschaltet werden.

Der Manometerschalter  $M$  in Abb. 511 schaltet bei zu niedrigem Druck den Kontakt 1 und bei zu hohem Druck den Kontakt 2 ein. Mit diesen schleichend bewegten Kontakten kann man aber keinen Motor, sondern höchstens den Spulenstrom eines kleinen Schützes  $S$  schalten. Wenn 1 geschlossen ist muß das Schütz anziehen. Denselben ist dann nur der Widerstand  $w$  vorgeschaltet. Steigt dann der Druck und Kontakt 1 öffnet sich, so fällt das Schütz nicht ab, weil es über den weiteren Vorschaltwiderstand  $r$  Strom bekommt. Sobald aber der höchste Druck erreicht und der Manometerkontakt 2 geschlossen ist, ist die Schützspule kurzgeschlossen. Das Schütz fällt ab und bleibt auch ausgeschaltet, wenn sich der Kontakt 2 wieder öffnet, weil es mit beiden Widerständen  $w$  und  $r$  nicht anspringen kann. Das Anlaufdrehmoment darf aber nicht groß sein, weil der Motor anfänglich nur schwach erregt ist,

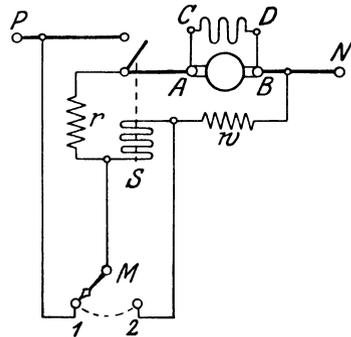


Abb. 511.

24. Ein elektrisch betriebener Wagen soll so eingerichtet werden, daß er bei Ausbleiben der Spannung selbsttätig elektrisch abgebremst wird.

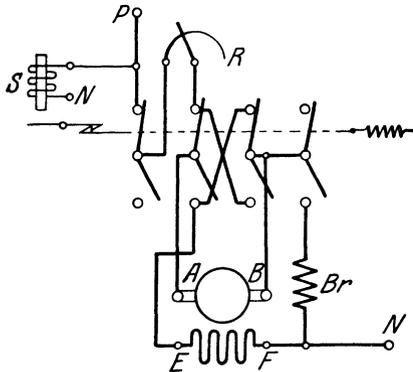


Abb. 512.

Zur Ausschaltung bei Ausbleiben der Spannung brauchen wir einen Nullspannungsausschalter. Hier soll aber nach dem Ausschalten der Motor als Erzeuger auf Bremswiderstände geschaltet werden. Es ist also ein Nullspannungsumschalter nötig. In Abb. 512 ist S die Nullspannungsspule, deren Kern beim Ausbleiben der Spannung die Halteklinke öffnet. Br ist der Bremswiderstand und R soll schematisch den normalen Anlaßwiderstand darstellen. Bei der Umschaltung muß beachtet werden, daß sich die Maschine auch wirklich selbst erregt, es muß also nach S. 115 der Anker umgepolt werden.

25. Die Aufzugsschaltung Abb. 436 soll so eingerichtet werden, daß der Aufzug immer von selbst in das untere Stockwerk zurückkehrt.

Um den Aufzugskorb normal in das unterste Stockwerk zu holen, hat man den Druckknopf 1 zu drücken. Wenn nun der Fahrkorb selbsttätig zurückkehren soll, muß ein selbsttätiger Kontakt notwendig die gleiche Schaltung ausführen,

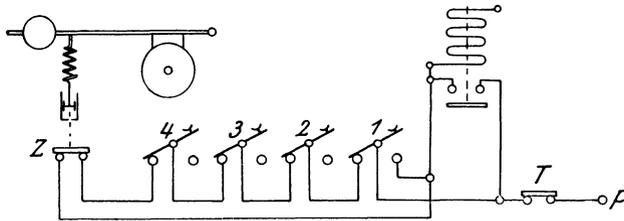


Abb. 513.

wie der erste Druckknopf. Wir werden also nach Abb. 513 in die Reihe der Druckknöpfe einen weiteren Kontakt Z legen, welcher den Druckknopf 1 überbrückt, sobald er geschlossen ist. Es ist jedoch nötig, daß der Aufzug nach dem Anhalten etwas wartet, ehe er die Rückfahrt beginnt. Der Zeitschalter Z muß deshalb eine Dämpfung haben und wird am besten beim Einfallen der mechanischen Bremse geschlossen. Der Aufzug muß jedoch unbedingt Türkontakte T haben, damit nicht der Aufzug seine Rückfahrt beginnen kann, während Personen aussteigen.

26. Die Antriebsmotoren einer Reihe hintereinander arbeitenden Transportvorrichtungen, von denen immer eine der nächsten das Fördergut übergibt, sollen so voneinander abhängig gemacht werden, daß bei Stillsetzung eines Motors alle hinter demselben arbeitenden ebenfalls stehen bleiben.

Diese Forderung ist bei Förderrinnen und Schnecken berechtigt, weil beim Stehenbleiben einer derselben eine Stauung des Materials eintreten würde, welche bei der Förderung von Explosivstoffen nicht nur die Transportvorrichtung gefährden würde. Zur Lösung der Aufgabe versieht man die Motoren mit selbsttätigen Ausschaltern, die Nullspannungs- und Höchststromauslösung besitzen. Die Nullspannungsspule schließt man aber nicht, wie es normal der Fall ist, an die Zuleitungen dieses Motors an, sondern an diejenigen des voraufgehenden Motors.

Wenn dieser stehenbleibt, kommt auch jener zur Ruhe (Abb. 514). Auch mit den Ausschaltknöpfen kann die Stillsetzung erfolgen.

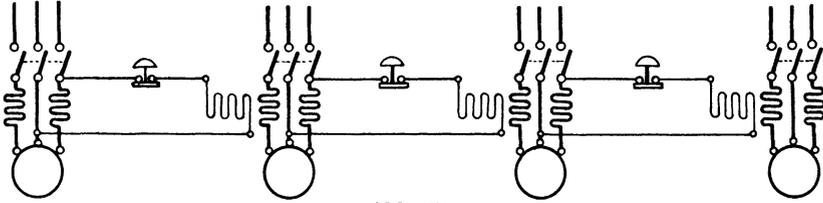


Abb. 514.

27. Eine Eisenbahnweiche soll durch einen Weichen-Antriebsmotor, der mittels Schnecke und Zahnstange mit der Weiche gekuppelt ist, vom Stellwerk aus ein- und ausgerückt werden können.

Ein umkehrbarer Motor verlangt bekanntlich vier Zuleitungen. Wenn aber der Motor zwei umgekehrt gewickelte Erregerwicklungen besitzen würde, die man abwechselnd einschalten könnte, so käme man mit drei Zuleitungen aus. Da man nun bei Weichenschaltungen großen Wert auf eine geringe Leiterzahl legt, wird die letztgenannte Motorausführung gewählt, und außerdem wird die Schiene als Leiter benutzt. Wir brauchen zur Lösung der Aufgabe im Stellwerk einen Weichen-

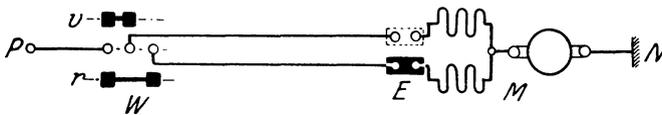


Abb. 515.

schalter W mit den beiden Stellungen v und r, wie Abb. 515 zeigt. Damit aber der Motor nach dem Umschalten nicht unter Strom stehen bleibt, muß der Motor sich selbst abschalten. Dies kann durch den Endschalter E geschehen, der nach erfolgter Weichenstellung von der Weiche umgelegt wird. Wird z. B. der Weichenschalter W auf r gestellt, so bekommt die untere Erregerwicklung des Motors M Strom und derselbe legt die Weiche um. Zuletzt geht der Schalter E in die punktiert gezeichnete Lage und schaltet den Motor ab.

28. Der Weichenantrieb der vorigen Aufgabe soll mit einer Überwachung versehen werden, welche im Stellwerk anzeigt, daß die Umlegung der Weiche tatsächlich erfolgt ist.

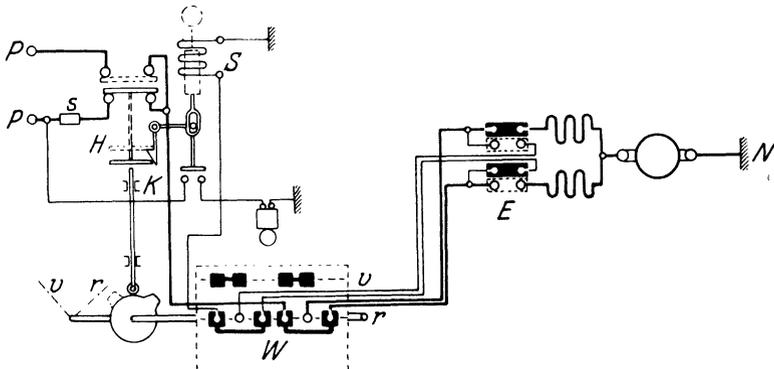


Abb. 516.

Als Merkzeichen kann man eine farbige Kreisscheibe, die von einer Magnetspule S bewegt wird (s. Abb. 516) und einen Wecker benutzen. Für die Spule S

braucht man nicht die für den Weichenmotor nötige hohe Spannung. Ein Umschalter H schaltet deshalb einmal auf eine höhere Spannung P und das andere Mal auf die untere, kleine Spannung p. Angenommen, der Weichenschalter W werde, während der Endschalter an der Weiche in der punktiert gezeichneten Lage ist, aus der v-Stellung in die Stellung r gebracht. Bei dieser Umlegung wird der Umschalter H gehoben und durch eine Klinke gehalten. Nun fließt von P Strom über den Weichenschalter W, über den Endschalter E zur unteren Erregerwicklung und zum Anker. Nach erfolgter Weichenumstellung geht der Endschalter E in die ausgezogen gezeichnete Lage über und schaltet damit die Spule S ein, welche durch Hebung ihres Kerns den Weckerstrom unterbricht und die Scheibe hebt. Zugleich wird die Klinke K ausgelöst und damit die Stromquelle geringer Spannung zur Überwachung eingeschaltet. Wird die Weiche aufgeschnitten, durch einen Wagen gewaltsam umgelegt, so kommen die Endschalter E wieder in die punktierte Lage, in welcher der Motor dann an der Stromquelle p liegt. Die in diese Leitung eingeschaltete Sicherung s ist aber nur für ganz kleine Ströme bemessen und brennt durch. Hierdurch wird die Spule ausgeschaltet, die Scheibe fällt und der Wecker ertönt.

29. Bei der Begichtung eines Hochofens kann sich Fördergut zwischen den Gichtverschluß setzen, so daß er nicht schließt und Gas entweicht. Schaltung 454 soll so eingerichtet werden, daß der Führer in solchen Fällen gezwungen ist, nochmals den Kübel auf die Gicht aufzusetzen, um dadurch das Hindernis zu beseitigen.

Es ist nötig, daß wir mit der Gichtglocke eine Kontaktvorrichtung in Verbindung bringen, welche sich mit der Glocke öffnet und schließt. Dieselbe läßt sich am besten an jeder der auf dem Hochofen in Abb. 451 angedeuteten Gegengewichts-säulen anbringen. Die Schaltung Abb. 454 wäre nun so zu erweitern, daß nach

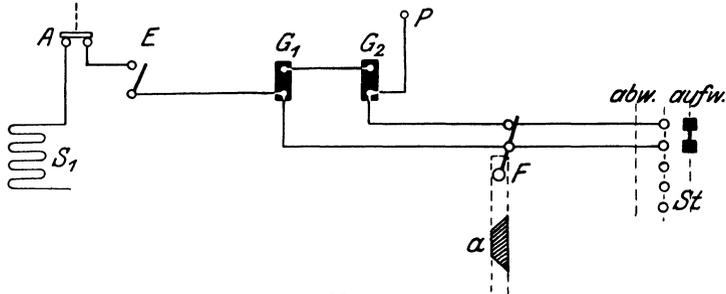


Abb. 517.

Abb. 517 auch diese Gichtschalter  $G_1$  und  $G_2$  den Spulenstrom des Sicherheits-schützes  $S_1$  unterbrechen. Da aber die Gichtschalter nur wirksam sein sollen, wenn sich der Förderkübel in einiger Entfernung von der Gicht befindet, müssen dieselben normal überbrückt sein. Nur an der Stelle a nächst der Gicht löst der Fahrtbegrenzer F die Überbrückung. Da schließlich aber die Gichtschalter an der Stelle a nur beim Verlassen der Gicht, also bei Abwärtsfahrt wirksam sein sollen, muß der Fahrtbegrenzerschalter bei Aufwärtsfahrt durch den Steuerschalter St umgangen sein.

30. Der abwärtsfahrende Kübel eines Hochofen-Schrägaufzugs kann mit dem Zubringerwagen, auf den er abgesetzt werden soll, zusammenstoßen, wenn der Wagen nicht in Aufzugsmitte steht. Er kann auch mit anderen Zubringerwagen zusammenstoßen, die sich in den vorherliegenden Quergleisen aufhalten. Diese Gefahren sollen durch eine Sperrschaltung beseitigt werden.

Es liegt nahe, in den Zubringergleisen Blockschalter anzubringen, welche von den Zubringerwagen betätigt werden. Sobald ein Wagen in die Aufzugsbahn ragt sei der betreffende Blockschalter B aus der Nullstellung in die Stellung 1 gedreht (Abb. 518). Steht aber der Wagen genau in Aufzugsmitte, so seien die Schalter in die Stellung 2 gestellt. Wenn nun der Führer zur Fahrt nach Gleis I seinen Gleiswähler G eingestellt hat, so soll in diesem Gleise der Zubringerwagen richtig, d. h. der Blockschalter  $B_1$  in Stellung 2 stehen. Der Strom für das Sicherheitsschutz  $S_1$  ist deshalb über den mittleren Kontakt des Gleiswählers G und dann über die beiden unteren Kontakte des Blockschalters  $B_1$  geführt. Damit aber der Zubringerwagen nicht während der ganzen Fahrt dort stehen muß, ist der erwähnte Kontakt in  $B_1$  durch den Schalter 1 im Fahrtbegrenzer F überbrückt und nur kurz vor Erreichung der Haltestelle I wird die Brücke gelöst. Zur Fahrt nach Gleise II steht der Gleiswähler in der zweiten Stellung. Dann sollte  $B_1$  in der Nullstellung und  $B_2$  in der Stellung 2 sein. Der Schützenspulenstrom ist deshalb über die oberen Kontakte von  $B_1$  und die beiden von  $B_2$  geführt. Damit diejenigen von  $B_1$  aber nur wirksam sind, wenn der Aufzug an Stelle I vorbeifährt, überbrückt Fahrtbegrenzerschalter 3 sie an allen anderen Stellen. Schalter 2 überbrückt entsprechend den Blockschalter  $B_2$ .

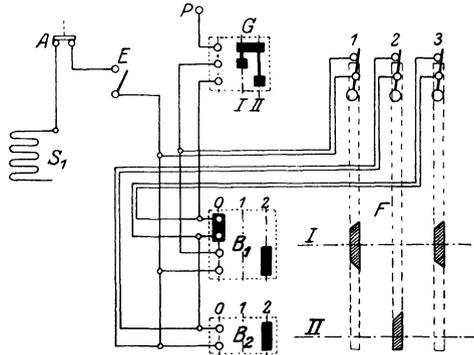


Abb. 518.

31. Bei einer Begichtungsanlage soll verhindert werden, daß Zubringerwagen gegen den Aufzugskübel fahren können.

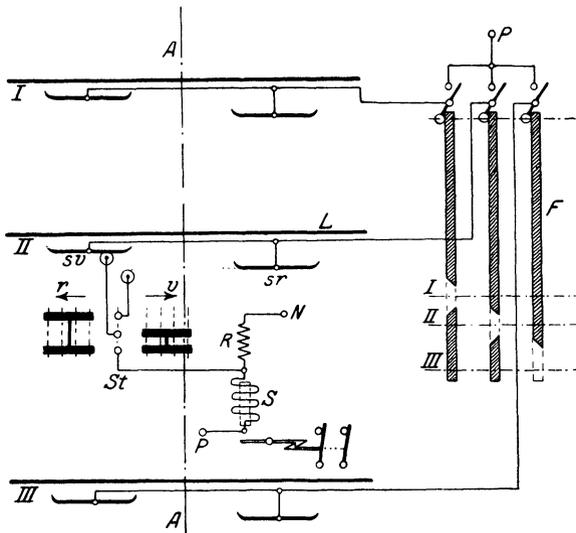


Abb. 519.

Nach Abb. 519 sollen drei Zubringergleise I, II und III die Aufzugsbahn A—A kreuzen. Um einen Zubringerwagen stillzusetzen kann man denselben mit einem

Nullspannungsausschalter versehen, der im Gefahr Falle ausgelöst wird. Die Auslösung muß von der Aufzugssteuerung erfolgen, und zwar nur dann, wenn sich der Aufzugskübel an einer Kreuzung befindet und der Zubringerwagen auf die Kreuzung zufährt. Hieraus geht hervor, daß man den Fahrtbegrenzer F zur Betätigung heranziehen muß. Nach Abb. 519 kann man in den Zubringergleisen neben der Hauptschleifleitung L noch Hilfsschienen sv und sr anbringen, und zwar nur vor und hinter der Kreuzungsstelle. Sobald diese Hilfsschienen vom Fahrtbegrenzer Spannung bekommen, was nur dann der Fall ist, wenn der Aufzug in der Nähe der Kreuzung ist, wird die Nullspannungsspule S des Wagens kurzgeschlossen, weil dann doch Anfang und Ende derselben an P liegen, und der Schalter schaltet aus. Die Nachlaufbremsung geschieht durch mechanische Bremsen oder nach Schaltung Abb. 512. Damit der Zubringerwagen nur bei einer Fahrtrichtung auf die Kreuzung zu stillgesetzt wird, brauchen wir zu den Hilfsschienen sv und sr zwei getrennte Stromabnehmer, deren Leitungen über die Steuerwalze St des Fahrmotors geführt sind.

32. Für zwei Dampfkessel soll eine selbsttätig wirkende Wasserstandsregelung geschaffen werden, welche bei abnehmendem Wasserstand die Speisung ein- und bei steigendem Stand ausschaltet.

Es liegt nahe, hierfür einen Schwimmer mit Kontaktvorrichtung zu benutzen. Derselbe würde aber eine unzulässig große Reibung zu überwinden haben, wenn man die Schwimmerstange durch eine Stopfbüchse nach außen führen würde. Ebenso unzulässig wäre es, wenn man die Kontaktvorrichtung in das Innere des Dampfkessels legen wollte. Die Hanomag löst die Aufgabe in der Weise, daß sie

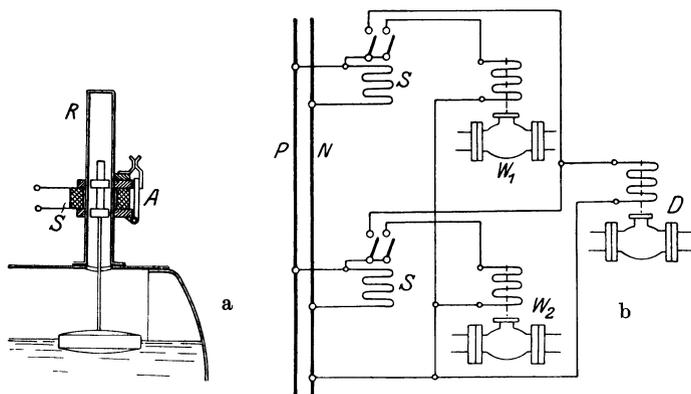


Abb. 520.

auf den Kessel nach Abb. 520 a ein geschlossenes Standrohr R aus Messing aufschraubt, in welchem der Schwimmer eine dünne Messingstange mit aufgesetztem Eisenkörper bewegt. Um das Standrohr liegt eine Spule S, die dauernd unter Spannung steht. Der Anker A, welcher einen Kontakt schließt, kann aber erst dann angezogen werden, wenn der innere Eisenkern in die gezeichnete Lage kommt und den magnetischen Kraftfluß schließt. Bei steigendem Wasserstand fällt der Anker wieder ab. Die weitere Schaltung ist sehr einfach (Abb. 520 b). Die Spule S schaltet sowohl die Magnete  $W_1$  und  $W_2$ , welche die Speisewasserschieber bewegen, als auch den Magnet D zur Betätigung des Dampfschiebers der gemeinsamen Pumpe.

## Sachverzeichnis.

|  | Seite              |   | Seite    |                                  | Seite   |
|--|--------------------|---|----------|----------------------------------|---------|
| Abschmelzsicherungen                         | 19                 | Delta-Isolatoren                          | 222      | Endschaltungen                   | 310     |
| Abteufpumpen                                 | 364                | Deri-Motor                                | 202      | Energie                          | 14      |
| Akkumulatoren                                | 24                 | Doppelschlußmaschine                      | 65       | Energiemesser                    | 56      |
| Amperestundenzähler                          | 56                 | Doppelschlußmotor                         | 82       | Erdschluß                        | 77, 219 |
| Ankerrückwirkung                             | 85                 | Doppeltarifzähler                         | 215      | Erdschlußanzeiger                | 219     |
| Anlassen der Gleichstrommotoren              | 82                 | Drehbänke                                 | 401, 404 | Erdschlußspule                   | 225     |
| Anlassen der Drehstrommotoren                | 191                | Drehfeld                                  | 174      | Erdung                           | 220     |
| Anlasser                                     | 296                | Drehfeld - Meßinstrumente                 | 198      | Fahrtbegrenzer                   | 370     |
| Anleger nach Dietze                          | 172                | Drehöfen                                  | 407      | Fahrzeuge                        | 351     |
| Anstellmotor                                 | 385                | Drehschalter                              | 253      | Fehlersuchen bei Antrieben       | 430     |
| Asynchronmotoren                             | 174                | Drehschaltinstrumente                     | 51       | Feld, magnetisches               | 3       |
| Aufspannfutter                               | 35                 | Drehstrom                                 | 140      | Feld, elektrisches               | 48      |
| Aufzüge                                      | 343                | Drehstromerzeuger                         | 149      | Feldregelung                     | 111     |
| Ausgleich von Belastungsstößen               | 271                | Drehstrom-Leistung                        | 147      | Fernbahnen                       | 353     |
| Auslösungen                                  | 240                | Drehstrommotor                            | 174      | Fernleitungen                    | 218     |
| Ausnutzungsfaktor                            | 210                | Drehtransformator                         | 197      | Ferraris-Instrumente             | 198     |
| Aussetzender Betrieb                         | 277                | Dreiecksschaltung                         | 145      | Flachbahnanlasser                | 297     |
| Auswahl der Motoren                          | 284                | Dreileiternetz                            | 208      | Flüssigkeitsanlasser             | 299     |
| Autotransformatoren                          | 170                | Drosselspule                              | 131, 223 | Fördermaschinen                  | 358     |
| Batterieausgleich                            | 272                | Druckknopfsteuerung für Aufzüge           | 346      | Freiauslösungen                  | 242     |
| Belastungsfaktor                             | 396                | Druckknopfsteuerung für Werkzeugmaschinen | 398      | Freileitungen                    | 229     |
| Belastungstabelle                            | 228                | Druckknopf-Umkehrsteuerung                | 402      | Funkenlöschung                   | 300     |
| Beleuchtungsanlagen                          | 247                | Druckmaschinen                            | 419      | Gegenstrombrems-schaltung        | 334     |
| Benutzungsdauer                              | 215, 395           | Effektive Leistung                        | 278      | Giechtglockensicherung           | 374     |
| Bereitstellungsgebühr                        | 216                | Effektivwert des Stromes                  | 118      | Gleichrichter                    | 156     |
| Bergmannrohr                                 | 255                | Einanker-Umformer                         | 155      | Gleichstrommaschinen             | 58      |
| Beschickungsmaschinen                        | 377                | Einbau der elektr. Ausrüstung             | 423      | Gleichstrommotoren               | 79      |
| Blockierung                                  | 355                | Einführung der Freileitungen              | 231      | Glühlampen                       | 17      |
| Blockkrane                                   | 379                | Einschaltdauer                            | 278      | Grenzschaltungen                 | 310     |
| Bremslüftmotor                               | 330                | Elektrohängebahnen                        | 354      | Grubenventilatoren               | 365     |
| Bremsmagnete                                 | 328, 330, 340      | Elektrolyse                               | 20       | Hängeisolatoren                  | 222     |
| Bremsung                                     | 113, 190, 329, 331 | Elektromagnet                             | 29       | Halbwattlampe                    | 17      |
| Bürsten                                      | 76                 | Elektromagnetische Instrumente            | 50       | Hartgummirohr                    | 256     |
| Bürstenabhebevorrichtung                     | 187                | Elektrodynamometrische Instrumente        | 51       | Hauptschlußmaschine              | 64      |
| Bürstenhalter                                | 76                 | Elemente                                  | 20       | Hauptschlußmotor für Gleichstrom | 82      |
| Chemische Wirkungen des elektrischen Stromes | 19                 |   |          | Hauptschlußmotor für Drehstrom   | 204     |
|  |                    |   |          | Hebelschalter                    | 238     |

|                        | Seite   |                        | Seite    |                        | Seite |
|------------------------|---------|------------------------|----------|------------------------|-------|
| Hebetische .....       | 388     | Krane .....            | 327      | Nebenschlußmotor,      |       |
| Hebezeuge .....        | 327     | Kreiselpumpen . 408,   | 410      | Gleichstrom .....      | 82    |
| Heizapparate .....     | 17      | Kuhlodrähte .....      | 258      | — Drehstrom .....      | 206   |
| Heylanddiagramm ..     | 181     | Kühlung der Motoren    | 273      | Nennstrom .....        | 239   |
| Hilfsstromendschal-    |         | Kurbelinduktor . 427,  | 432      | Nullspannungsauslö-    |       |
| tung .....             | 312     | Kurzschluß e. Ele-     |          | sungen .....           | 241   |
| Hintereinanderschalt-  |         | mentes .....           | 22       | Nullspannungsaus-      |       |
| tung .....             | 23      | — e. Drehstromerzeu-   |          | schaltungen .....      | 306   |
| Hobelmaschinen 402,    | 405     | gers .....             | 153      |                        |       |
| Hochofenaufzüge ....   | 368     | Kurzschlußläufer ...   | 177      | Ölanlasser .....       | 298   |
| Hochspannung .....     | 220     |                        |          | Öl für Transforma-     |       |
| Höchststromaus-        |         | Lastmagnet .....       | 35       | toren .....            | 164   |
| schalter .....         | 309     | Laufdrehkran .....     | 337      | Ölschalter .....       | 238   |
| Hörnerableiter .....   | 224     | Läufererregung ....    | 202      | Ohmsches Gesetz ...    | 4     |
| Hysteresis .....       | 33, 74  | Legierte Bleche ....   | 74       |                        |       |
|                        |         | Legung der Leitungen   |          | Panzeradern .....      | 315   |
| Ilgnerumformer . 359,  | 382     | .....                  | 254, 317 | Papiermaschinen ...    | 418   |
| Induktion, magne-      |         | Leistung, elektrische  | 15       | Parallelschaltung ...  | 23    |
| tische .....           | 1       | — des Wechselstroms    | 129      | — von Drehstrom-       |       |
| — elektrische .....    | 39      | Leistungsfaktor . 131, | 189      | transformatoren .      | 168   |
| Induktionsapparat ..   | 44      | Leistungsmesser ....   | 54       | — von Transforma-      |       |
| Induktionsregler ....  | 197     | Leitfähigkeit .....    | 8        | toren .....            | 166   |
| Induktionsöfen .....   | 172     | Leistungsarten .....   | 252      | — von Stromerzeu-      |       |
| Instandhaltung der     |         | Leistungsstützen ....  | 325      | gern .....             | 210   |
| Antriebe .....         | 427     | Lenzches Gesetz ....   | 41       | Phasenlampen .....     | 212   |
| Isolationswiderstand . | 427     | Leonardschaltung ...   | 110      | Piranischaltung ....   | 272   |
| Isolatoren .....       | 222     | Lichtbedarf .....      | 248      | Pole, magnetische ...  | 1     |
|                        |         | Lichtbogen .....       | 19       | Prüfleistung .....     | 283   |
|                        |         | Lichtbogensperrung .   | 387      | Prüfung der Antriebe   | 427   |
| Kabellegung .....      | 231     | Linkehandregel .....   | 38       | Pufferbatterie .. 272, | 352   |
| Kantvorrichtung .....  | 386     | Lokomotiven .....      | 354      | Pumpen .....           | 408   |
| Kapazität der Akkum.   | 25      | Löschspule .....       | 224      |                        |       |
| — der Kondensatoren    | 48      | Lux .....              | 247      | Räderantrieb .....     | 424   |
| — im Wechselstrom-     |         |                        |          | Rechtehandregel ...    | 42    |
| kreis .....            | 126     | Magnetische Wirkun-    |          | Regelsatz für Dreh-    |       |
| Kerntransformatoren    | 162     | gen des elektrisch.    |          | strommotor .....       | 195   |
| Klingel, elektrische.. | 35      | Stromes .....          | 27       | Regeltransformator ..  | 172   |
| Kochapparate .....     | 17      | Magnetisierungslinien  | 32       | Regelung der Gleich-   |       |
| Kohlenfadenlampe ..    | 17      | Magnetismus .....      | 1        | strommotoren ...       | 107   |
| Kohlesteuerschalter .  | 301     | Manteltransforma-      |          | — der Drehstrom-       |       |
| Kolbenpumpen . 408,    | 410     | toren .....            | 162      | motoren .....          | 194   |
| Kollektor .....        | 75      | Martinofenbeschik-     |          | Reihenschlußmotor      |       |
| Kommutator .....       | 75      | kung .....             | 377      | für Wechselstrom       | 198   |
| Kommutatormotoren      |         | Massenwirkung ....     | 262      | Repulsionsmotor ....   | 200   |
| für Wechsel- und       |         | Mastschalter .....     | 223      | Resonanz .....         | 128   |
| Drehstrom .....        | 198     | Maststationen .....    | 233      | Riemenantrieb .....    | 423   |
| Kommutierung .....     | 87      | Meßinstrumente ...     | 50       | Ringanker .....        | 59    |
| Kompensationswick-     |         | Meßtransformatoren .   | 171      | Ringspinnmaschinen .   | 413   |
| lung .....             | 91, 199 | Metalldrahtlampen ..   | 17       | Rohrdrähte .....       | 258   |
| Kompressor .....       | 396     | Mischer .....          | 375      | Röhrenwicklung ...     | 163   |
| Kondensator .... 48,   | 126     | Motorenübersicht ...   | 293      | Rollenstromabnehmer    | 325   |
| Konservator .....      | 165     | Motorstrom, Berech-    |          | Rollgänge .....        | 386   |
| Kontroller .....       | 299     | nung .....             | 80, 184  | Rührwerke .....        | 411   |
| Kopierapparat .....    | 348     | Mühlen .....           | 406      |                        |       |
| Kraftfluß .....        | 1       |                        |          | Sacken der Last ....   | 332   |
| Kraftlinien, magne-    |         | Nachlaufbremsung ..    | 114      | Sättigung, magnetische | 2     |
| tische .....           | 1       | Nebenschlußmaschine    | 65       |                        |       |
| — elektrische .....    | 48      |                        |          |                        |       |
| Kraftliniendichte .... | 1       |                        |          |                        |       |

|                       | Seite    |                        | Seite   |                       | Seite    |
|-----------------------|----------|------------------------|---------|-----------------------|----------|
| Schaltkasten ...      | 245, 317 | Tachograph .....       | 360     | Walzenanlasser .....  | 299      |
| Schaltlehre .....     | 434      | Temperatur und Mo-     |         | Walzwerke .....       | 380      |
| Scheibenwicklung ...  | 163      | torgröße .....         | 290     | Wärmewirkungen des    |          |
| Schere .....          | 326      | thermoelektrizität ..  | 49      | elektrischen Stro-    |          |
| Scherenantrieb .....  | 389      | Tragkraft von Ma-      |         | mes .....             | 14       |
| Schleifenwicklung ... | 68       | gneten .....           | 3       | Wasserhaltungen ...   | 364      |
| Schleifleitungen ...  | 325      | — von Wechselstrom-    |         | Wattmeter .....       | 54       |
| — an Kranen .....     | 338      | magneten .....         | 136     | Wattstundenzähler ..  | 57       |
| Schleifringe .....    | 326      | Träge Regelung ...     | 294     | Webstühle .....       | 416      |
| Schleifstromabnehmer  | 325      | Transformatoren ...    | 156     | Wechselstrom .....    | 116      |
| Schlupf .....         | 178, 188 | Transformatoren-       |         | — Asynchronmotor .    | 196      |
| Schnallenisolator ... | 325      | stationen .....        | 233     | — -Erzeuger .....     | 136      |
| Schnellregelung ..... | 295      | Trennschalter .....    | 237     | Weicheiseninstru-     |          |
| Schrägaufzüge .....   | 368      | Trommelanker .....     | 59      | mente .....           | 50       |
| Schutznetze .....     | 229      | Überspannungsschutz    | 223     | Wellenwicklung ....   | 70       |
| Schützensteuerungen.  | 302      | Überstromauslösun-     |         | Wendepole .....       | 89       |
| Schwungmoment ...     | 264      | gen .....              | 241     | Wendeselbstanlasser . | 345      |
| Schwungradausgleich   | 271      | Überstromausschal-     |         | Werkzeugmaschinen .   | 391      |
| Selbstanlasser .....  | 303      | tungen .....           | 308     | Wheatstonesche        |          |
| Selbstinduktion ..... | 46       | Umformer .....         | 155     | Brücke .....          | 13       |
| — im Wechselstrom-    |          | Universalsteuerung ..  | 300     | Wicklungen, Herstel-  |          |
| kreis .....           | 120      | Unveränderliche        |         | lung derselben ...    | 34       |
| Senkbremsung ..       | 113, 331 | Drehzahl .....         | 294     | — der Gleichstrom-    |          |
| Sicherungen ...       | 239, 254 | Vektoren .....         | 119     | anker .....           | 68       |
| Spannungseinheit ...  | 6        | Ventilatoren .....     | 365     | Widerstand, spezi-    |          |
| Spannungsmesser ...   | 53       | Verhalten der Gleich-  |         | scher .....           | 7        |
| Spannungsregler ..... | 13       | stromerzeuger ...      | 97      | Widerstandseinheit .. | 6        |
| Spannungsregelung ..  | 107      | — der Gleichstrom-     |         | Widerstandszunahme    | 8        |
| Spannungswandler ..   | 171      | motoren .....          | 102     | Windungsschluß ....   | 78       |
| Spartransformator ..  | 170      | Verluste der Gleich-   |         | Winter-Eichberg-Mo-   |          |
| Spill .....           | 343      | strommaschinen .       | 92      | tor .....             | 203      |
| Spinnmaschinen ...    | 413      | Verlustfaktor für Mo-  |         | Wirbelisolator .....  | 325      |
| Spinnregler .....     | 414      | toren .....            | 95, 189 | Wirbelströme .....    | 45, 73   |
| Stahlpanzerrohr ...   | 256      | Verlustziffer des Ei-  |         | Wirkungen des elek-   |          |
| Stallschalter .....   | 253      | sens .....             | 134     | trischen Stromes .    | 4        |
| Sterndreiecksschalter | 191      | Verschiedenheitsfak-   |         | Wirkungsgrad bei ver- |          |
| Sternschaltung .....  | 142      | tor .....              | 210     | änderlicher Bela-     |          |
| Stockwerksschalter .. | 348      | Verteilung der Energie | 216     | stung .....           | 94       |
| Stöpselsicherung ...  | 239      | Verteilungsleitungen . | 225     | — Messung des ....    | 96       |
| Störungen an An-      |          | Verteilungspunkte ...  | 242     | Zähler .....          | 56       |
| trieben .....         | 430      | Voltmeter .....        | 20      | Zangenkrane .....     | 378      |
| Stoßmaschine .....    | 403      | Vorzüge des elektri-   |         | Zeitleistung .....    | 283      |
| Straßenbahnen .....   | 351      | schen Antriebs ..      | 258     | Zellenschalter .....  | 27       |
| Streckenhaspel .....  | 362      | Wagenkipper .....      | 350     | Zentrifugen ....      | 411, 412 |
| Streifensicherung ... | 239      | Wahl der Motoren ..    | 284     | Zeugdruckmaschinen    | 420      |
| Streukraftlinien ..   | 30, 139  | Walzarbeit .....       | 384     | Zugmagnete .....      | 36       |
| Stripperkrane .....   | 378      |                        |         | Zu- und Gegenschal-   |          |
| Stromeinheit .....    | 6        |                        |         | tung .....            | 108      |
| Strommesser .....     | 50       |                        |         | Zweiwattmeterschal-   |          |
| Stromverzweigung ..   | 11       |                        |         | tung .....            | 148      |
| Stromwandler .....    | 171      |                        |         |                       |          |
| Synchronmotor .       | 154, 172 |                        |         |                       |          |

**Kurzer Leitfaden der Elektrotechnik** für Unterricht und Praxis in allgemeinverständlicher Darstellung. Von Ing. **Rud. Krause**. Vierte, verbesserte Auflage herausgegeben von Prof. **H. Vieweger**. Mit 375 Textfiguren. 1920. Gebunden Preis M. 20.—

---

**Aufgaben und Lösungen aus der Gleich- und Wechselstromtechnik.** Ein Übungsbuch für den Unterricht an technischen Hoch- und Fachschulen sowie zum Selbststudium. Von Prof. **H. Vieweger**. Sechste, vermehrte Auflage. Mit 210 Textfiguren und 2 Tafeln. 1921. Gebunden Preis M. 36.—

---

**Elektrische Starkstromanlagen.** Maschinen, Apparate, Schaltungen, Betrieb. Kurzgefaßtes Hilfsbuch für Ingenieure und Techniker sowie zum Gebrauch an technischen Lehranstalten. Von Studienrat Dipl.-Ing. **Emil Kosack** (Magdeburg). Fünfte, durchgesehene Auflage. Mit 294 Textfiguren. 1921. Gebunden Preis M. 32.—

---

**Schaltungen von Gleich- und Wechselstromanlagen.** Ein Lehr- und Hilfsbuch. Von Dipl.-Ing. **Emil Kosack**, Studienrat an den Staatl. Vereinigt. Maschinenbauschulen zu Magdeburg. Mit etwa 226 Textabbildungen. Erscheint im März 1922.

---

**Kurzes Lehrbuch der Elektrotechnik.** Von Prof. Dr. **A. Thomälen** (Karlsruhe). Neunte, verbesserte Auflage. Mit 555 Textbildern. Erscheint im März 1922.

---

**Die wissenschaftlichen Grundlagen der Elektrotechnik.** Von Prof. Dr. **Gustav Benischke** (Berlin). Fünfte, vermehrte Auflage. Mit 602 Abbildungen im Text. 1920. Preis M. 66.—, gebunden M. 76.—

---

**Hilfsbuch für die Elektrotechnik.** Unter Mitwirkung namhafter Fachgenossen bearbeitet und herausgegeben von Dr. **K. Strecker** (Berlin). Neunte, umgearbeitete Auflage. Mit 552 Textabbildungen. 1921. Gebunden Preis M. 70.—

---

**Ankerwicklungen für Gleich- und Wechselstrommaschinen.** Ein Lehrbuch. Von Prof. **Rudolf Richter** (Karlsruhe). Mit 377 Textabbildungen. 1920. Gebunden Preis M. 78.—

---

**Die Transformatoren.** Von Prof. Dr. techn. Milan Vidmar. Mit 297 Textabbildungen. 1921. Preis M. 110.—; geb. M. 120.—.

---

**Arnold-la Cour, Die Gleichstrommaschine.** Ihre Theorie, Untersuchung, Konstruktion, Berechnung und Arbeitsweise. Dritte, vollständig umgearbeitete Auflage. Herausgegeben von J. L. la Cour. In 2 Bänden. Erster Band: Theorie und Untersuchung. Mit 570 Textfiguren. Unveränderter Neudruck 1921. Gebunden Preis M. 120.—. Zweiter Band: Konstruktion, Berechnung und Arbeitsweise. In Vorbereitung.

---

**Elektromotoren.** Ein Leitfaden zum Gebrauch für Studierende, Betriebsleiter und Elektromonteur. Von Dr.-Ing. Johann Grabscheid (Wien). Mit 72 Textabbildungen. 1921. Preis M. 15.—.

---

**Die Berechnung der Anlaß- und Regelwiderstände.** Von Ingenieur Erich Jasse. Mit 65 Textabbildungen. 1921. Preis M. 27.—.

---

**Die Hochspannungs-Gleichstrommaschine.** Eine grundlegende Theorie. Von Elektroingenieur Dr. A. Bolliger (Zürich). Mit 53 Textfiguren. 1921. Preis M. 18.—.

---

**Elektrotechnische Meßkunde.** Von Dr.-Ing. P. B. A. Linker. Dritte, völlig umgearbeitete und erweiterte Auflage. Mit 408 Textfiguren. 1920. Gebunden Preis M. 54.—.

---

**Messungen an elektrischen Maschinen.** Apparate, Instrumente, Methoden, Schaltungen. Von Rud. Krause. Vierte, gänzlich umgearbeitete Auflage. Von Georg Jahn, Ingenieur. Mit 256 Textfiguren und einer Tafel. 1920. Gebunden Preis M. 28.—.

---

**Die Berechnung von Gleich- und Wechselstromsystemen.** Neue Gesetze über ihre Leistungsaufnahme. Von Dr.-Ing. Fr. Natalis. Mit 19 Textfiguren. 1920. Preis M. 6.—.

---

**Die symbolische Methode zur Lösung von Wechselstromaufgaben.** Einführung in den praktischen Gebrauch. Von Hugo Ring, Ingenieur der Firma Blohm & Voß (Hamburg). Mit 33 Textfiguren. 1921. Preis M. 12.—.

---