

W. BLATZHEIM

Fachkunde für  
**Elektriker**

Teil 2



Teubners Berufs- und Fachbücherei







TEUBNERS BERUFS- UND FACHBÜCHEREI

---

Heft 19

# Fachkunde für Elektriker

Teil 2

**Elektrische Maschinen und Meßgeräte**  
(Fachkunde und Fachrechnen)

von

**WILHELM BLATZHEIM VDE**

Fachvorsteher der elektrotechnischen Abteilung  
an der gewerblichen Berufsschule II Köln

Siebente Auflage  
Mit 318 Abbildungen



1 9 4 2

---

Verlag und Druck von B. G. Teubner in Leipzig und Berlin

Best.-Nr. 9119



Das Deckelbild lieferte  
Bildberichterstatter Fr. A. Stenzel  
Leipzig C 1



## Vorwort

Dieser Teil 2 der „Fachkunde für Elektriker“ behandelt die besonders wichtigen Generatoren, Motoren, Akkumulatoren, Umspanner, Stromrichter und elektrischen Meßgeräte.

Auswahl und Gliederung des Stoffes sind den Erfordernissen der Berufsschulen angepaßt. Der Stoff ist aber so weitgehend behandelt, daß sich das Buch auch für Fortbildungs- und Meisterkurse eignet. Dadurch sollen die Schüler der Berufsschulen einesteils zur Weiterbildung angeregt werden; andererseits soll ihnen beim Besuch von Fortbildungs- und Meisterkursen die Anschaffung neuer Fachbücher erspart bleiben. Erfahrungsgemäß ist es beim Fachunterricht geradezu notwendig, daß der Schüler das im Unterricht Besprochene an Hand eines geeigneten Fachbuches zu Hause durcharbeitet.

Bei der Darstellung des Stoffes ist zur Veranschaulichung weitgehend von der Zeichnung, insbesondere vom Schaltplan, Gebrauch gemacht worden. Da der Elektriker besonders viel zu rechnen hat, um zu einer zahlenmäßig belegten Vorstellung der elektrischen Vorgänge zu kommen, spielt auch in diesem Teil 2 der Fachkunde das Rechnen eine wichtige Rolle.

Die siebente Auflage weist gegenüber der sechsten Auflage einige Änderungen und Erweiterungen auf. So z. B. sind in allen Schaltplänen die neuen Schaltzeichen für Starkstromanlagen berücksichtigt. Die Stromlaufpläne für Gleichstrommaschinen wurden des besseren Verständnisses wegen vierpolig (früher zweipolig) dargestellt.

Neben jedem Stromlaufplan ist der entsprechende Schaltplan mit Klemmenbezeichnung angegeben.

Der Abschnitt über Trockengleichrichter wurde neu bearbeitet.

Neu aufgenommen sind Darstellungen über den Kontaktumformer der SSW und Motoren für höhere Drehzahlen als 3000 U/min.

Köln, im Frühjahr 1942.

Der Verfasser.



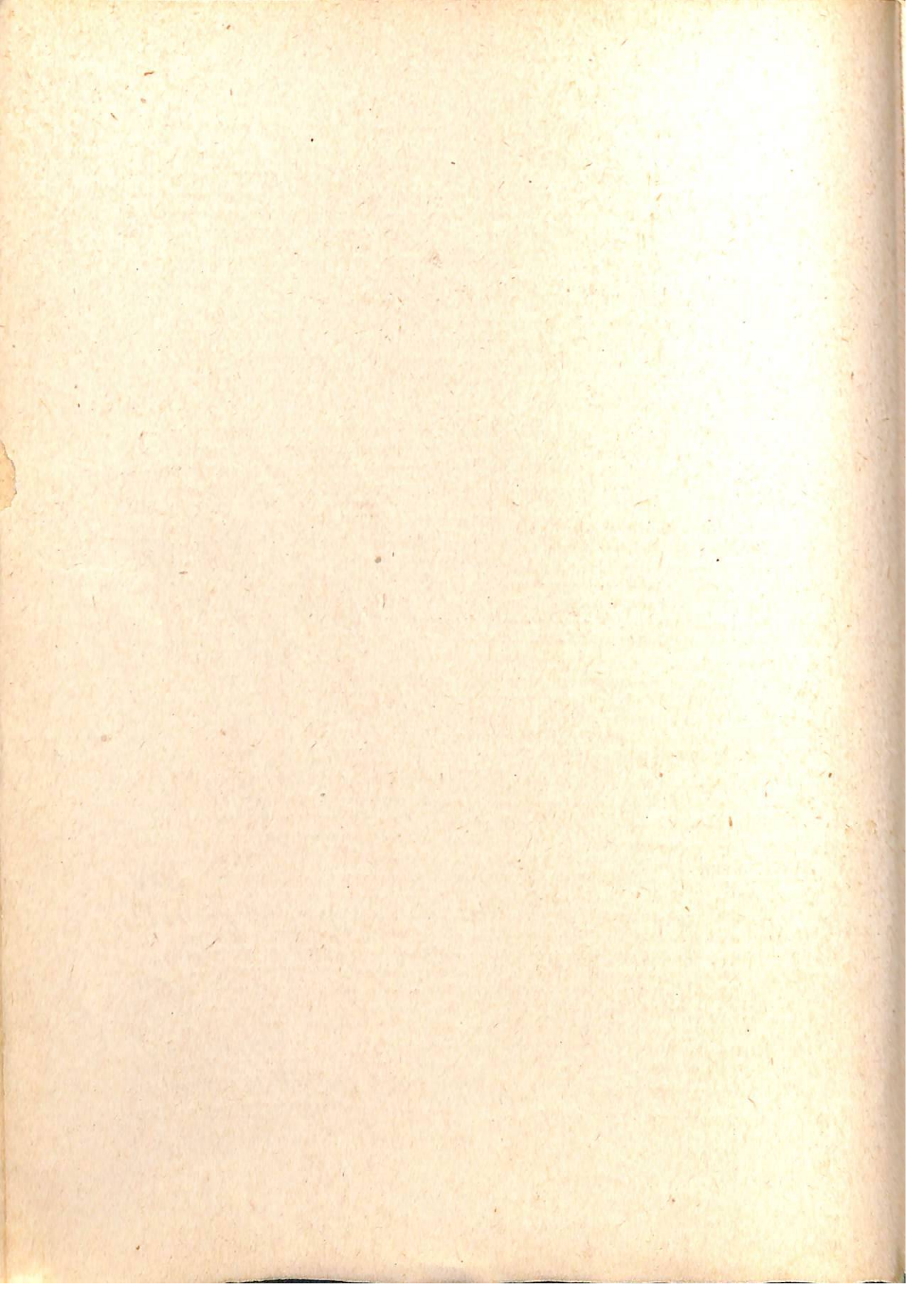
# Inhaltsverzeichnis

I. Die Erzeugung des elektrischen Stromes in Maschinen .....	1
1. Die Entstehung des Wechselstromes .....	2
2. Die Gleichrichtung des Wechselstromes bei Gleichstrom-Generatoren .....	6
II. Generatoren für Gleichstrom .....	9
1. Die Erregung der Generatoren für Gleichstrom .....	13
2. Die verschiedenen Schaltungen bei Generatoren mit Selbsterregung .....	14
3. Die Ankerrückwirkung .....	18
4. Die Stromwendung .....	19
5. Wendepole .....	20
6. Das Parallelschalten von Generatoren für Gleichstrom .....	22
III. Akkumulatoren (Sammler) .....	25
1. Der Bleiakкумулятор .....	26
2. Stahllakkumulatoren (Alkalische Akkumulatoren) .....	31
3. Betrieb .....	32
IV. Gleichstrommotoren .....	37
1. Wirkungsweise .....	37
2. Die gegenelektromotorische Kraft bei Gleichstrommotoren .....	40
3. Der Anlaßwiderstand .....	42
4. Das Drehmoment bei Motoren .....	44
5. Mechanische Arbeit und mechanische Leistung .....	45
6. Messung des Drehmoments und der mechanischen Leistung .....	47
7. Bestimmung des Wirkungsgrades bei Gleichstrommotoren .....	51
8. Die verschiedenen Motorarten bei Gleichstrom und ihre Eigenschaften .....	55
9. Gleichstrommotoren mit Wendepolen .....	61
10. Umkehr des Drehsinnes bei Gleichstrommotoren .....	63
11. Regelung der Drehzahl bei Gleichstrommotoren .....	65
12. Anschluß eines Gleichstrommotors an eine Netzspannung, die niedriger ist als die Nennspannung des Motors .....	69
13. Verwendung des Gleichstrommotors als Generator .....	71
14. Hilfseinrichtungen und Geräte für den Motorstromkreis .....	73
15. Anlasser .....	74
16. Störungen an Gleichstrommotoren .....	76
V. Generatoren für Wechselstrom (Synchrone Generatoren) .....	77
1. Einteilung der Wechselstrom-Generatoren .....	79
2. Aufbau der Wechselstrom-Generatoren .....	79
3. Die Anordnung der Ankerwicklung bei Wechselstrom-Generatoren .....	80
4. Das Parallelschalten von Wechselstrom-Generatoren .....	84
VI. Umspanner (Transformatoren) .....	87
1. Wirkungsweise des Umspanners .....	88
2. Aufbau der Umspanner .....	91
3. Drehstrom-Umspanner .....	92
4. Kühlung der Umspanner .....	93
5. Das Öl-Ausdehnungsgefäß (Ölkonservator) .....	94
6. Klingelumspanner .....	94
7. Sparumspanner .....	95
8. Parallelschalten von Umspannern .....	96
9. Wirkungsgrad der Umspanner .....	98



VII. Umformer .....	100
1. Motorgeneratoren .....	100
2. Einankerumformer .....	101
3. Kaskadenumformer .....	103
4. Der Kontaktumformer der SSW .....	103
VIII. Stromrichter .....	105
Gleichrichter .....	105
1. Quecksilberdampf-Gleichrichter .....	105
2. Glühkathodengleichrichter .....	113
3. Der Trockengleichrichter .....	114
Wechselrichter .....	116
Umrichter .....	116
IX. Motoren für Wechselstrom .....	116
1. Die Synchronmotoren .....	116
2. Die Asynchronmotoren .....	119
3. Der Drehstrommotor mit Kurzschlußläufer .....	122
4. Der Drehstrommotor mit Schleifringläufer .....	129
5. Stromverdrängungsmotoren .....	131
6. Änderung der Drehzahl durch Vergrößerung der Schlüpfung .....	133
7. Motoren für höhere Drehzahlen als 3000 U/min .....	136
8. Umkehr des Drehsinnes bei Asynchronmotoren für Drehstrom .....	138
9. Der Leistungsfaktor $\cos \varphi$ bei Asynchronmotoren .....	139
10. Der Einphasen-Asynchronmotor .....	141
11. Stromwendermotoren .....	148
12. Stromwendermotoren für Drehstrom .....	152
13. Drehmoment und mechanische Leistung bei Wechsel- und Drehstrommotoren .....	154
14. Hilfseinrichtungen und Geräte für den Motorstromkreis bei Wechsel- und Drehstrommotoren .....	160
15. Wirkungsgrad und Leistungsfaktor offener Drehstrommotoren .....	163
16. Störungen an Einphasenmotoren .....	165
17. Störungen an Drehstrommotoren .....	165
X. Elektrotechnische Meßgeräte .....	166
1. Allgemeines .....	166
2. Meßgeräte und ihre Teile .....	167
3. Einteilung der Meßgeräte .....	167
4. Indirekte Messung von Stromstärke und Spannung bei Wechselstrom .....	167
5. Das Dreheisenmeßgerät (Weicheisenmeßgerät) .....	169
6. Das Drehspulmeßgerät .....	172
7. Das Hitzdrahtmeßgerät (Thermisches Meßgerät) .....	177
8. Das elektrodynamische Meßgerät .....	178
9. Das Induktionsmeßgerät .....	180
10. Leistungsmessung .....	181
11. Meßgeräte zum Messen des Leistungsfaktors .....	187
12. Frequenzmesser (Vibrationsmeßgerät) .....	189
13. Elektrostatisches Meßgerät .....	190
14. Widerstandsmessung .....	191
15. Besondere Arten von Meßgeräten .....	197
16. Elektrizitätszähler (Messung des elektrischen Arbeitsverbrauchs) .....	198
Sachverzeichnis .....	209







# I. Die Erzeugung des elektrischen Stromes in Maschinen

Der in Generatoren (Dynamomaschinen) erzeugte elektrische Strom ist ein Induktionsstrom. Zur Erzeugung eines solchen Stromes sind ein magnetisches Feld und elektrische Leiter erforderlich. Sobald ein elektrischer Leiter die magnetischen Kraftlinien des Feldes schneidet, entsteht in dem Leiter eine EMK (Elektromotorische Kraft). Ist der Leiter zu einem Stromkreis geschlossen, dann wird durch die EMK im Leiter ein elektrischer Strom erzeugt. Diesen Vorgang nennt man Induktion und den so erzeugten Strom Induktionsstrom.

In Bild 1 ist *N* der Nordpol und *S* der Südpol eines Magneten. Die magnetischen Kraftlinien treten am Nordpol aus dem Magneten aus, durchsetzen die

Luft zwischen beiden Polen und treten am Südpol wieder in den Magneten ein. Im Luftraum zwischen beiden Polen entsteht infolgedessen ein magnetisches Feld. Seine Richtung ist durch Pfeilspitzen gekennzeichnet. In diesem magnetischen Feld befindet sich ein elektrischer Leiter. Die Enden dieses Leiters sind über ein Galvanometer zu einem Stromkreis verbunden. Wird der Leiter in Richtung der ausgezogenen Pfeile von links nach rechts bewegt, dann schneidet er Kraftlinien. Gleichzeitig schlägt der Zeiger des Galvanometers nach einer bestimmten Seite aus. Dieser Ausschlag beweist, daß durch den Leiterkreis ein Strom von bestimmter Richtung geflossen sein muß. Sobald der Leiter bei seiner Bewegung aus dem magnetischen Feld herausgekommen ist, geht der Zeiger des Galvanometers in seine Null-

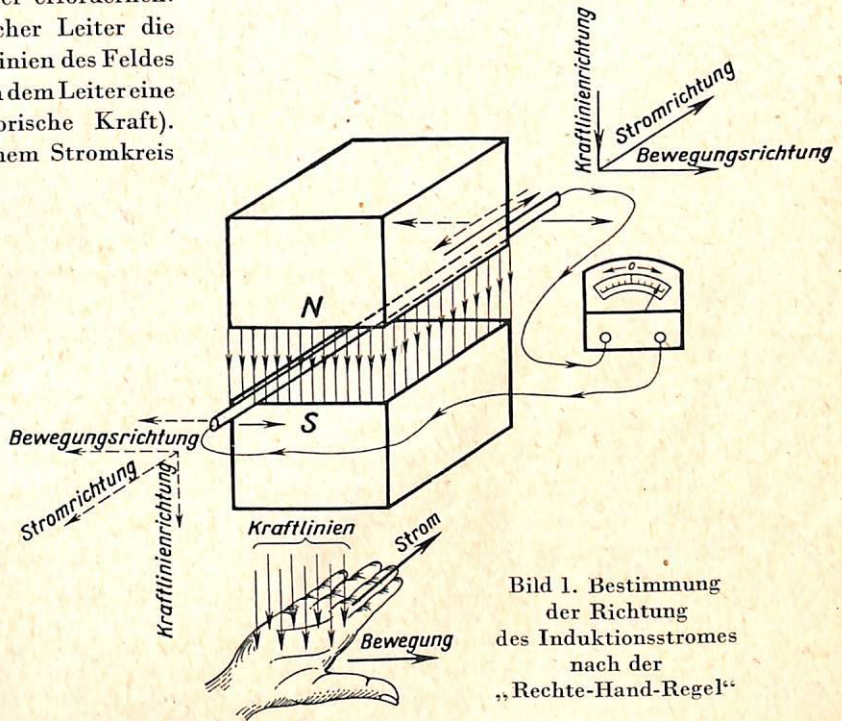


Bild 1. Bestimmung der Richtung des Induktionsstromes nach der „Rechte-Hand-Regel“



stellung zurück. Hieraus folgt, daß im Leiter nur dann Strom induziert wird, wenn er Kraftlinien schneidet.

Wird der Leiter in der entgegengesetzten Richtung wie vorher (gestrichelte Pfeile) zwischen den Polen bewegt, dann hat auch der Zeigerausschlag des Galvanometers die entgegengesetzte Richtung wie vorher. Eine Änderung der Bewegungsrichtung des Leiters hat infolgedessen auch eine Änderung der Stromrichtung zur Folge. Um die Richtung zu bestimmen, in welcher der erzeugte Induktionsstrom durch den Leiter fließt, kann man die **Rechte-Hand-Regel** anwenden:

*Hält man die rechte Hand so, daß die Kraftlinien in die innere Handfläche eintreten, und zeigt der abgespreizte Daumen die Richtung, in welcher sich der Leiter bewegt, dann fließt der Induktionsstrom in der Richtung der Fingerspitzen durch den Leiter (Bild 1).*

Durch Versuche läßt sich feststellen, daß die Höhe der im Leiter erzeugten EMK von der Zahl der in einer Sekunde geschnittenen Kraftlinien abhängt. Je mehr Kraftlinien ein Leiter in der Sekunde schneidet, um so höher ist die im Leiter erzeugte EMK. Um eine EMK von 1 V zu erzeugen, muß ein Leiter in der Sekunde 100 000 000 (hundert Millionen) Kraftlinien schneiden. Der magnetische Fluß (Kraftlinienmenge), der von einem Leiter in der Sekunde geschnitten wird, ist abhängig von der magnetischen Dichte  $B$  (Zahl der Kraftlinien, die auf 1 cm<sup>2</sup> entfallen), von der Geschwindigkeit, mit welcher sich der Leiter im magnetischen Feld bewegt, und von der Länge des Leiters im magnetischen Feld.

Beträgt die Länge des Leiters im magnetischen Feld  $l$  cm und seine Schnittgeschwindigkeit  $v$  cm/s, dann ist  $l \cdot v$  die Größe der Fläche in cm<sup>2</sup>, die der Leiter in einer Sekunde bestreicht. Wird jedes cm<sup>2</sup> dieser Fläche von  $B$  Kraftlinien durchsetzt, dann berechnet sich der vom Leiter in der Sekunde geschnittene magnetische Fluß (Kraftlinienmenge) aus  $\Phi = B \cdot l \cdot v$ . Dieser magnetische Fluß durch 100 000 000 geteilt ergibt die Höhe der induzierten EMK in Volt, so daß  $E = \frac{B \cdot l \cdot v}{100\,000\,000}$  V wird.

Beisp.: Ein magnetisches Feld hat eine magnetische Dichte von 12 000 Kraftlinien. Durch dieses Feld wird ein elektrischer Leiter mit einer Geschwindigkeit von 10 m in der Sekunde bewegt. Die Länge des Leiters im magnetischen Feld beträgt 40 cm. Wie hoch ist die induzierte EMK in Volt?  $E = \frac{B \cdot l \cdot v}{100\,000\,000} = \frac{12000 \cdot 40 \cdot 1000}{100\,000\,000} = 4,8$  V.

Aufg. 1: Magnetische Dichte  $B = 10\,000$ , Schnittgeschwindigkeit  $v = 25$  m in der Sekunde und Länge  $l = 25$  cm. Wie hoch ist die induzierte EMK in Volt?

Aufg. 2:  $B = 14\,000$ ,  $l = 50$  cm und  $v = 3000$  cm in der Sekunde. Wie hoch ist die induzierte EMK in Volt?

## 1. Die Entstehung des Wechselstromes

In Bild 2 ist eine Spule aus Kupferdraht zwischen den Polen eines Magneten drehbar gelagert. Die Spule hat nur eine Windung. Wird die Spule zwischen den Magnetpolen gedreht, dann schneiden die Spulenseiten Kraftlinien. Infolgedessen wird in den Spulenseiten eine EMK induziert. Diese EMK hat in Spulenseite  $a$  die



umgekehrte Richtung wie in Spulenseite *b* (Rechte-Hand-Regel). Da die beiden Spulenseiten in Reihe geschaltet sind, entsteht zwischen den Enden der Spule eine EMK, die doppelt so hoch ist wie die EMK in einer Spulenseite. Werden die Enden der Spule durch Schleifringe, Bürsten und äußere Leitung zu einem Stromkreis geschlossen, dann erzeugt diese EMK in der Spule einen Induktionsstrom.

Der Verlauf dieses Induktionsstromes ergibt sich aus Bild 3  $A_1$  bis  $A_2$ .

In Bild 3  $A_1$  ist angenommen, daß bei der Drehung der Spule die Spulenseiten in die Mitte zwischen die Polspitzen gekommen sind. In dieser Stellung schneiden die Spulenseiten keine Kraftlinien (Neutrale Zone). Infolgedessen entsteht auch kein Induktionsstrom. Man sagt, EMK und Stromstärke sind Null.

In Bild 3  $B$  ist die Spulenseite *a* unter den Nordpol und die Spulenseite *b* unter den Südpol gekommen. Beide Spulenseiten schneiden jetzt Kraftlinien. Der erzeugte Induktionsstrom ist schwach, weil in dieser Stellung die Spulenseiten verhältnismäßig wenig Kraftlinien schneiden. Seine Richtung in den Spulenseiten ergibt sich nach der Rechte-Hand-Regel. Sie ist durch  $\times$  und  $\cdot$  gekennzeichnet.

In Bild 3  $C$  sind die Seiten *a* und *b* unter die Polmitten gekommen. Hier schneiden die Spulenseiten die meisten Kraftlinien. Der erzeugte Induktionsstrom hat infolgedessen seine größte Stärke erreicht. Seine Richtung ist die gleiche wie in Bild 3  $B$ .

In Bild 3  $D$  schneiden die Spulenseiten weniger Kraftlinien als in Stellung 3  $C$ . Die Stärke des Stromes sinkt. Seine Richtung ist unverändert.

In Bild 3  $E$  sind die Spulenseiten wieder in die Mitte zwischen die Polspitzen gekommen (Neutrale Zone). Jetzt werden keine Kraftlinien geschnitten. Die Stromstärke ist auf Null gesunken. Zu beachten ist, daß beide Spulenseiten gegenüber der Stellung  $A_1$  ihre Lage vertauscht haben. Spulenseite *a* ist in die Ausgangsstellung der Spulenseite *b* gekommen. Mit Spulenseite *b* ist es umgekehrt.

In Bild 3  $F$  bewegt sich Spulenseite *a* unter dem Südpol von rechts nach links und Spulenseite *b* unter dem Nordpol von links nach rechts. Beide Spulenseiten schneiden wieder Kraftlinien. Infolgedessen wird Strom induziert. Die Stromrichtung in den Spulenseiten ist aber umgekehrt wie vorher. In der Stellung Bild 3  $E$  hat bei den beiden Spulenseiten demnach ein Wechsel sowohl in der Bewegungsrichtung als auch in der Stromrichtung stattgefunden.

In Bild 3  $G$  sind beide Spulenseiten wieder unter die Polmitten gekommen. Weil in dieser Stellung die meisten Kraftlinien geschnitten werden, wird auch der erzeugte Induktionsstrom am stärksten. Der Strom hat jetzt zum zweitenmal seine größte Stärke erreicht. Seine Richtung ist jedoch umgekehrt wie das erstmal.

In Bild 3  $H$  schneiden die Spulenseiten wieder weniger Kraftlinien. Die Stärke des Stromes ist gesunken.

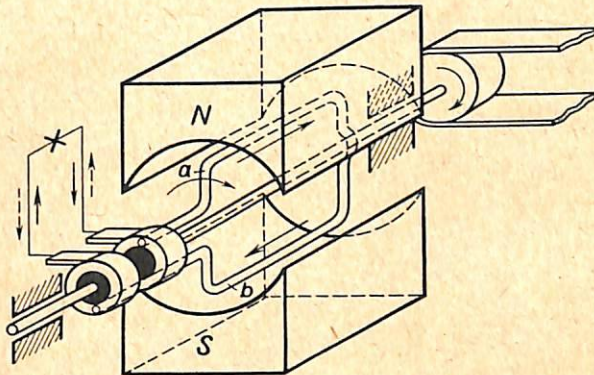


Bild 2  
Grundsätzlicher Aufbau eines Wechselstromerzeugers



In Bild 3  $A_2$  sind die Spulenseiten in ihre Ausgangsstellung zurückgekehrt. Der Induktionsstrom ist wieder auf Null gesunken. Er wechselt jetzt seine Richtung zum zweitenmal. Verbindet man jedes Spuleneinde mit einem Ring aus Metall (Schleifring) und werden die beiden Ringe gegeneinander und gegen die Welle gut isoliert, dann kann der in der Spule induzierte Strom mittels Bürsten in den äußeren Stromkreis geleitet werden (Bild 2).

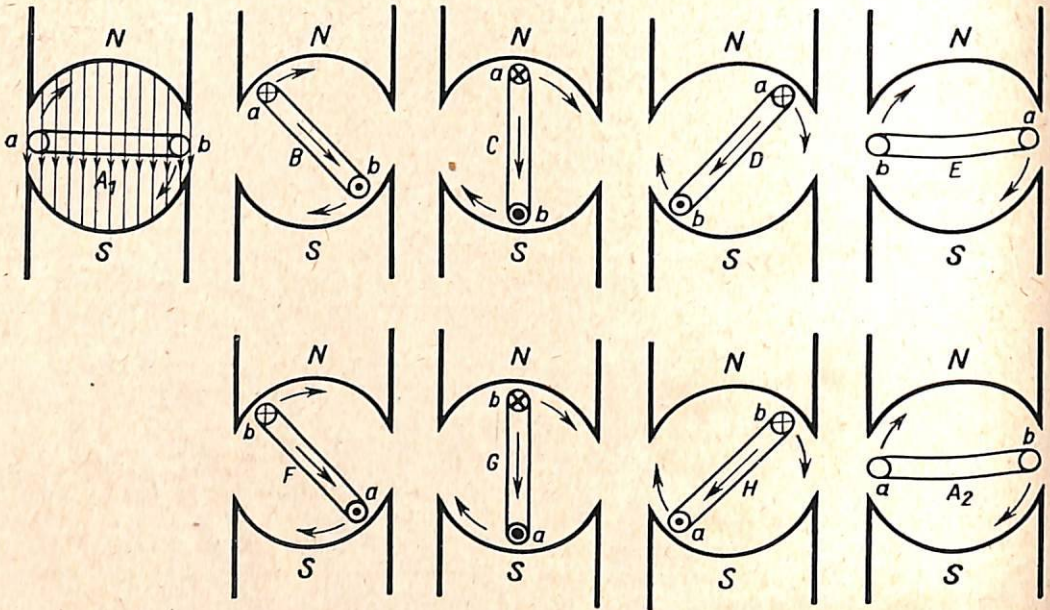


Bild 3. Richtung und Stärke des erzeugten Induktionsstromes in den Seiten einer Spule, die innerhalb eines gleichmäßig starken magnetischen Feldes gedreht wird

Aus vorstehendem erkennt man, daß sich die Stärke eines solchen Induktionsstromes dauernd ändert und daß seine Richtung dauernd wechselt. Der Verlauf dieses Stromes wird durch eine Wellenlinie dargestellt. Diese Wellenlinie verläuft nach einem Gesetz, das Sinusgesetz genannt wird. Infolgedessen wird eine solche Wellenlinie auch Sinuslinie genannt. In den Bildern 4 a und b ist ihre Form und die Art ihrer Entstehung dargestellt. Hierbei ist angenommen, daß das magnetische Feld zwischen den Polen überall gleichmäßig stark ist. In diesem Falle ist die Zahl der Kraftlinien, die von einem Leiter in der Sekunde geschnitten werden, nur abhängig von der Weglänge, die der Leiter in dieser Zeit in waagerechter Richtung zurücklegt.

In Bild 4 a ist angenommen, daß sich der Leiter in einer Sekunde von Stellung 0 nach Stellung 1 bewegt. Die vom Leiter zurückgelegte waagerechte Weglänge entspricht der Entfernung  $a$ . In der gleichen Zeit bewegt sich der Leiter um dieselbe Bogenlänge von 1 nach 2. Dieser Bogenlänge entspricht eine waagerechte Weglänge  $b$ , die erheblich größer ist als die in derselben Zeit zurückgelegte Weglänge  $a$ . Bei der Drehung des Leiters von 2 nach 3 wird die waagerechte Weglänge  $c$  zurückgelegt, die wieder erheblich größer ist als die in derselben Zeit zurückgelegte Weglänge  $b$ . Die bei der Drehung des Leiters von Stellung 3 nach Stellung 4 zurückgelegte waagerechte Weglänge  $d$  ist am größten.



Hieraus folgt, daß die Geschwindigkeit, mit der die Kraftlinien bei der Drehung des Leiters geschnitten werden (Schnittgeschwindigkeit), sich dauernd ändert.

Da in einem gleichmäßig starken magnetischen Feld die Höhe der in einem Leiter induzierten EMK nur von der Schnittgeschwindigkeit abhängt, muß auch die Höhe der induzierten EMK in jedem Augenblick eine andere sein.

In Stellung 0 ist die Schnittgeschwindigkeit Null, mithin auch die Höhe der induzierten EMK, d. h. es wird keine EMK induziert.

In Stellung 1 ist die Schnittgeschwindigkeit gering, infolgedessen auch die induzierte EMK.

In Stellung 2 ist die Schnittgeschwindigkeit gegenüber Stellung 1 gestiegen und damit auch die induzierte EMK.

In Stellung 3 hat die Schnittgeschwindigkeit eine weitere Steigerung erfahren. Die Höhe der induzierten EMK hat entsprechend zugenommen.

In Stellung 4 ist die Schnittgeschwindigkeit am höchsten. In diesem Augenblick hat die induzierte EMK ihren höchsten Wert erreicht.

Von Stellung 4 an nehmen Schnittgeschwindigkeit und EMK wieder ab, bis sie in Stellung 8 wieder auf Null gesunken sind. In dieser Stellung wechselt die EMK ihre Richtung.

Von Stellung 8 an nehmen Schnittgeschwindigkeit und EMK wieder zu, erreichen in Stellung 12 ihren höchsten Wert und sind in Stellung 0 wieder auf Null gesunken usw.

Die senkrechten Entfernungen zwischen den einzelnen Leiterstellungen und der waagerechten Mittellinie (neutralé Zone) sind ein Maß für die Höhe der im Leiter induzierten EMK.

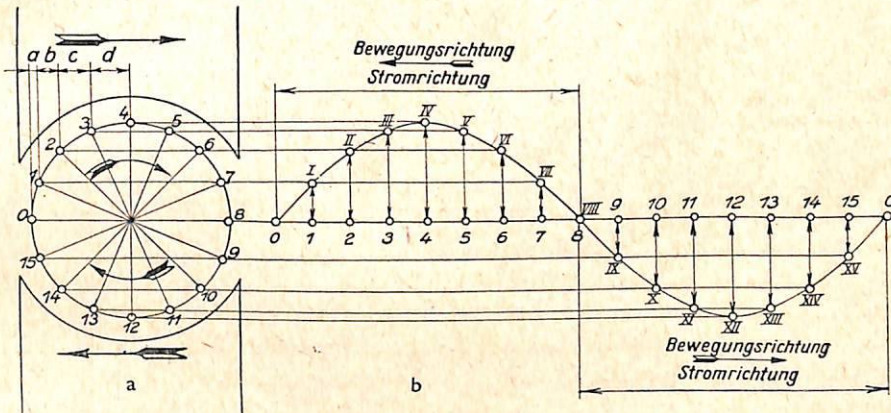


Bild 4. a Abhängigkeit der Höhe der induzierten EMK von der Schnittgeschwindigkeit, b Zeitlicher Verlauf der induzierten EMK (Wellen- oder Sinuslinie)

In Bild 4 b ist die Länge des Kreises, die der Leiter bei der Drehung zurücklegt, als gerade Linie gezeichnet. Auf dieser Waagerechten (Nulllinie) sind die senkrechten Entfernungen zwischen den einzelnen Stellungen des Leiters und der waagerechten Mittellinie aufgetragen. Die Endpunkte dieser Einzelstrecken sind mit den römischen Ziffern I bis XV gekennzeichnet. Durch Verbinden dieser Endpunkte erhält man die gesuchte Wellen- oder Sinuslinie.



Die halbe Welle 0, I, II, III bis VIII zeigt den Verlauf der EMK und des Stromes in der einen und die halbe Welle VIII, IX, X, XI bis 0 den Verlauf der EMK und des Stromes in der entgegengesetzten Richtung. Um kenntlich zu machen, daß während der Zeitdauer der ersten Halbwelle EMK und Strom die entgegengesetzte Richtung haben wie während der Zeitdauer der zweiten, wird die eine Halbwelle über und die andere unter die Nulllinie gezeichnet.

Den in Bild 4b dargestellten Verlauf eines Wechselstromes nennt man eine Periode. Während der Zeitdauer einer Periode wechselt der Strom zweimal seine Richtung. Der Verlauf des Wechselstromes von 0 über IV nach VIII wird als positiver Wechsel und der Verlauf von VIII über XII nach 0 als negativer Wechsel bezeichnet.

Um in einem Leiter Wechselstrom mit einer Periode zu erzeugen, muß sich der Leiter von der neutralen Zone an einem Pol vorbei bis zur neutralen Zone und von dieser am nächsten Pol vorbei wieder bis zur neutralen Zone bewegen.

Die Zahl der Perioden in einer Sekunde heißt Frequenz. Die Einheit der Frequenz wird Hertz (Hz) genannt.

Aufg. 3: In dem magnetischen Feld eines zweipoligen Wechselstromerzeugers wird eine Spule in der Minute 3000 mal gedreht. Wieviel Perioden hat der in der Spule erzeugte Wechselstrom? Wieviel Wechsel sind das? Wie hoch ist die Frequenz des erzeugten Wechselstromes?

Aufg. 4: Eine Spule dreht sich in dem magnetischen Feld eines vierpoligen Wechselstromerzeugers. In der Spule soll Wechselstrom mit 50 Perioden in der Sekunde entstehen. Wie oft muß sich die Spule in der Minute drehen?

Aufg. 5: Ein Wechselstromerzeuger hat 10 Pole. In seinem magnetischen Feld wird eine Spule gedreht. In der Spule soll Wechselstrom entstehen, dessen Frequenz 50 Hertz (Hz) ist. Wie oft muß sich die Spule in der Minute drehen?

## 2. Die Gleichrichtung des Wechselstromes bei Gleichstrom-Generatoren

Ein Strom, der dauernd seine Richtung wechselt und dauernd seine Stärke ändert (Wechselstrom), läßt sich nicht für alle Zwecke verwenden. Zum Laden von Akkumulatoren, zum Galvanisieren und für andere chemische Zwecke ist ein Strom erforderlich, der dauernd in gleicher Richtung fließt und dessen Stärke gleichmäßig bleibt. Ein solcher Strom wird Gleichstrom genannt.

In Bild 5 A ist jedes Spulenende mit einem halben Ring verbunden. Die beiden Ringhälften sind voneinander und von der Welle isoliert. Auf den Ringhälften schleifen die Bürsten, die mit den Leitungen des äußeren Stromkreises in Verbindung stehen.

In Bild 5 B ist angenommen, daß sich die Spulenseite  $a$  am Nordpol und die Spulenseite  $b$  am Südpol vorbeibewegt. Der induzierte Strom fließt dann aus der Spulenseite  $b$  ( $\cdot$ ) in die Ringhälfte  $R_2$ , von dieser über die Bürste  $B_1$  in die äußere Leitung, von der äußeren Leitung zurück zur Bürste  $B_2$ , dann durch die Ringhälfte  $R_1$  und von dieser in die Spulenseite  $a$  ( $\times$ ). Bei der Bürste  $B_1$  tritt der Strom aus der Spule in den äußeren Stromkreis ein. Sie wird zum positiven und Bürste  $B_2$  zum negativen Pol.

In Bild 5 C ist Spulenseite  $a$  unter die rechte Nordpolspitze und Spulenseite  $b$  unter die linke Südpolspitze gekommen. Die Stromrichtung ist unverändert.



In Bild 5 D befinden sich beide Spulenseiten in der neutralen Zone. Jetzt wird kein Strom induziert. In dieser Stellung der Spulenseiten berührt jede Bürste beide Ringhälften. Ringhälften und Spulenseiten sind in diesem Augenblick kurzgeschlossen. Gleichzeitig wechselt der Strom in den Spulenseiten seine Richtung. Einen Augenblick später ist Spulenseite *a*

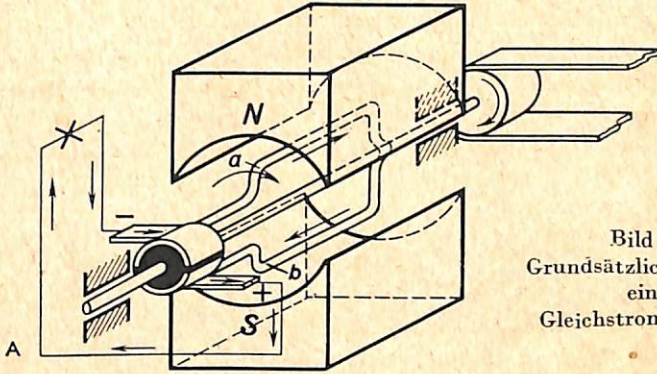


Bild 5 A  
Grundsätzlicher Aufbau  
eines  
Gleichstromerzeugers

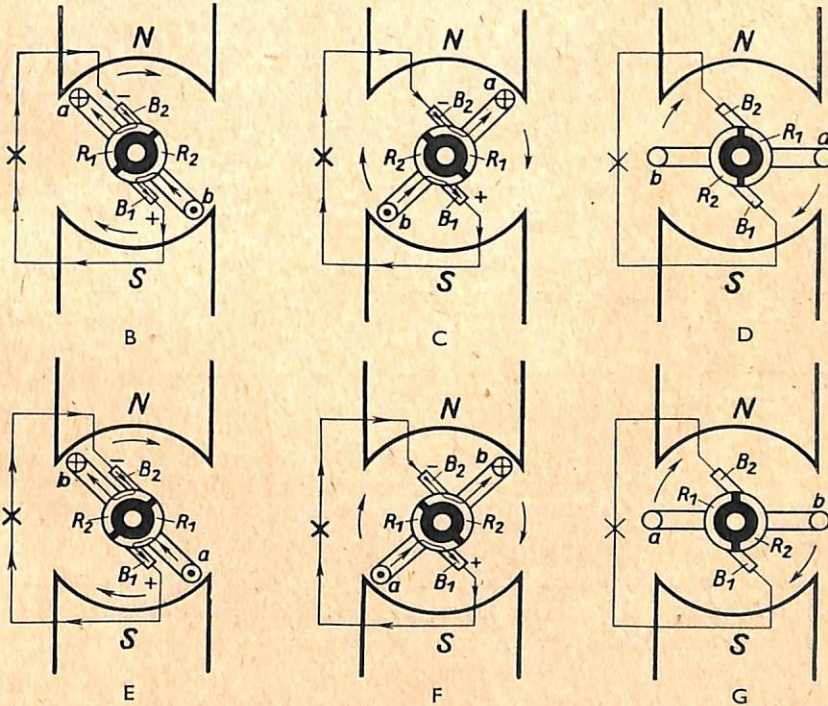


Bild 5 B bis 5 G. Wirkungsweise des Stromwenders

unter den Südpol und Spulenseite *b* unter den Nordpol gekommen (Bild 5 E und 5 F). Bürste *B*<sub>1</sub>, die früher auf der Ringhälfte *R*<sub>2</sub> lag, liegt jetzt auf der Ringhälfte *R*<sub>1</sub> und ist durch diese mit der Spulenseite *a* verbunden, während Bürste *B*<sub>2</sub> über die Ringhälfte *R*<sub>2</sub> mit der Spulenseite *b* in Verbindung steht. In beiden Spulenseiten wird wieder Strom induziert. Dieser Strom



fließt jetzt aus Spulenseite  $a$  ( $\cdot$ ) (Rechte-Hand-Regel) über Ringhälfte  $R_1$  durch Bürste  $B_1$  in den äußeren Stromkreis und von diesem über Bürste  $B_2$ , Ringhälfte  $R_2$  in Spulenseite  $b$  ( $\times$ ).

Trotzdem der Strom in den Spulenseiten seine Richtung gewechselt hat, fließt er im äußeren Stromkreis in der gleichen Richtung wie vorher. Bürste  $B_1$  bleibt Stromaustrittsstelle (Pluspol) und Bürste  $B_2$  Stromeintrittsstelle (Minuspol). Durch die Anwendung zweier Ringhälften wird erreicht, daß in dem äußeren Stromkreis

ein Strom von stets gleichbleibender Richtung fließt. Dieser Strom hat jedoch den Nachteil, daß er stoßweise auftritt (Bild 6). Seine Stärke ändert sich dauernd.



Bild 6. Verlauf der Spannung in den einzelnen Ankerspulen und im äußeren Stromkreis

Um einen Strom von genügender Gleichmäßigkeit zu erzeugen, wird statt einer Spule eine große Anzahl

Spulen verwendet. In jeder dieser Spulen entsteht dann eine wellenförmige Spannung. Die Spannungshalbwellen derjenigen Spulen, die sich gleichzeitig unter demselben Pol befinden, setzen sich zu einer Gesamtspannung zusammen. Die Höhe dieser Gesamtspannung schwankt so wenig, daß man von einer gleichmäßigen Spannung sprechen kann. Der von dieser gleichmäßigen Spannung erzeugte Strom hat dieselbe Gleichmäßigkeit wie seine Spannung.

In Bild 6 ist unten der wellenförmige Verlauf der Spannung in den einzelnen Spulen und oben der gleichmäßige Verlauf von Spannung und Stromstärke im äußeren Stromkreis angegeben.

Die beiden Halbringe  $R_1$  und  $R_2$  werden in soviel Einzelstücke (Stege) zerlegt, als Spulen vorhanden sind. Mit diesen Stegen werden die Enden der Spulen verbunden.

Weil diese Stege dann unter den Bürsten liegen, wenn der Strom in der betreffenden Spule seine Richtung wendet (wechselt), werden sie Stromwenderstege genannt.

Der Teil einer elektrischen Maschine, auf dem diese Stromwenderstege befestigt sind, heißt infolgedessen Stromwender. Er wurde früher Kommutator (Wender) oder auch Kollektor (Sammler) genannt.



## II. Generatoren für Gleichstrom

Generatoren für Gleichstrom bestehen aus dem Magnetgestell (Gehäuse) mit den Feldmagneten und aus dem Anker.

Das Magnetgestell wird in der Regel aus Stahlguß und nur selten aus Gußeisen hergestellt. Man stellt auch Magnetgestelle aus geschweißtem Walzstahl (Stahlgehäuse) her. Bei diesen Gehäusen sind die Füße aus Winkeleisen und die Lager-  
 schilde aus Gußeisen. Die Polkerne werden meist besonders angefertigt und mit dem Joch verschraubt. Man fertigt sie entweder aus Stahl oder Stahlguß oder aus einzelnen dünnen Blechen (Dynamoblech) an (Bild 7). Das Ende des Polkerns heißt Polschuh. Um die Entstehung von Wirbelströmen im Polschuh möglichst zu verhindern, wird er aus einzelnen dünnen Blechen angefertigt.

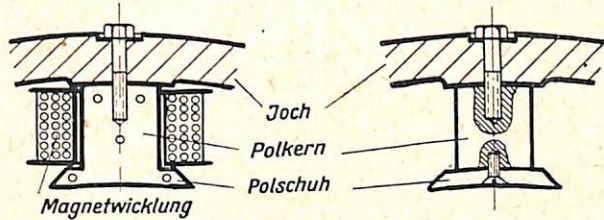


Bild 7 a

Polkern mit Polschuh aus einzelnen dünnen Eisenblechen

Bild 7 b

Polkern aus einem vollen (massiven) Stück Stahl

Die Polkerne erhalten eine Erregerwicklung (Magnetwicklung), die vom Erregerstrom durchflossen wird (Bild 7a).

Nach der Zahl der Magnetpole unterscheidet man zwei-, vier-, sechs-, achtpolige usw. Maschinen (Bild 8).

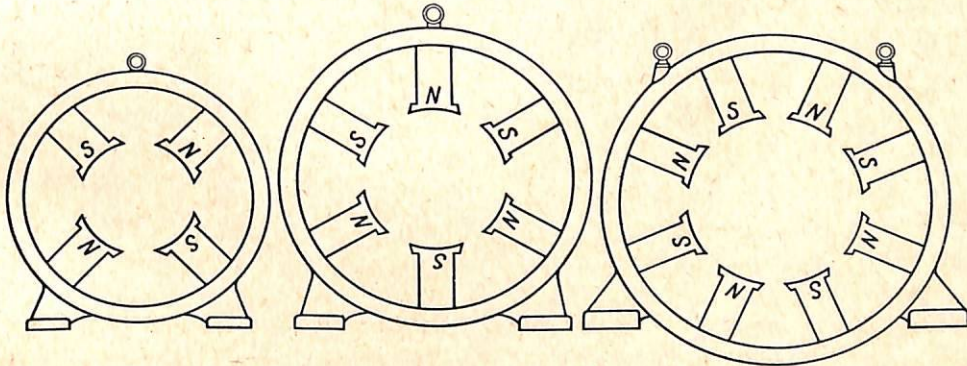


Bild 8. Magnetgestelle von Gleichstrommaschinen

Der Eisenkörper des Ankers wird aus einzelnen dünnen Blechen von 0,3 bis 0,5 mm Dicke zusammengebaut (Bild 9). Die Bleche müssen durch Lack, Seidenpapier oder eine isolierende Oxydschicht voneinander isoliert sein, damit im Ankereisen keine starken Wirbelströme entstehen. Starke Wirbelströme würden das Ankereisen erhitzen und große Leistungsverluste verursachen. Außerdem würde



die Isolation der Ankerwicklung gefährdet. Zwecks Kühlung des Ankers wird der Ankerkörper mit Lüftungsschlitzen versehen. Häufig werden zur besseren Kühlung des Ankers an dessen Stirnseiten Lüfter angebracht.

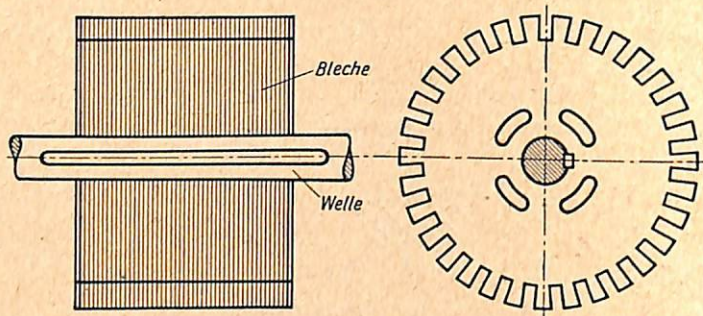


Bild 9. Ankerkörper mit offenen Nuten

Der Ankerkörper besitzt an seinem Umfang eine bestimmte Anzahl Nuten (Bild 9). In diese wird die Ankerwicklung eingelegt. Die Nuten sind entweder ganz offen oder teilweise geschlossen (Bild 10 und 11).

Um zu verhindern, daß bei der Drehung des Ankers die Ankerwicklung aus den Nuten herausgeschleudert wird, werden entweder die Nuten am oberen Ende keilförmig ausgebildet, um Keile aus Holz oder Fiber eintreiben zu können (Bild 10 und 11), oder es werden auf dem Ankerumfang Haltebänder aus Stahldraht angebracht (Bild 12).

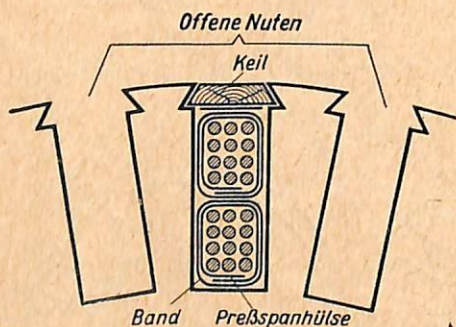


Bild 10

Offene Nuten mit Drahtwicklung



Bild 11

Halbgeschlossene Nuten mit Stabwicklung

Die Drähte der Ankerspulen sind mit Zellwolle mehrfach umspinnen. Mehrere Einzelspulen werden zu einem Spulenbündel zusammengefaßt und gemeinsam mit Band umwickelt. Zur Isolation der Ankernten werden Mikanit, Preßspan und andere besondere Papiersorten verwendet.

Der Stromwender (Bild 12 und 13) besteht aus einzelnen Kupferstreifen aus hartgezogenem Profilkupfer, die Stromwenderstege (Lamellen) genannt werden. Diese Stege müssen sowohl gegeneinander als auch gegen den Eisenkern des Ankers gut isoliert sein. Als Isolation dient fast ausschließlich Glimmer oder ein Glimmererzeugnis. Der untere Teil der Stege ist schwalbenschwanzförmig ausgebildet, um



sie auf einer Büchse aus Grau- oder Stahlguß durch einen Preßring mit Schrauben befestigen zu können.

Sind mehrere Stege metallisch verbunden, dann spricht man von Stegenschluß. Hat ein oder haben mehrere Stege Verbindung mit dem Ankerkörper, dann hat der Stromwender Körperschluß. In den Schlitz des Steghals werden die Enden der Ankerwicklung eingelötet.

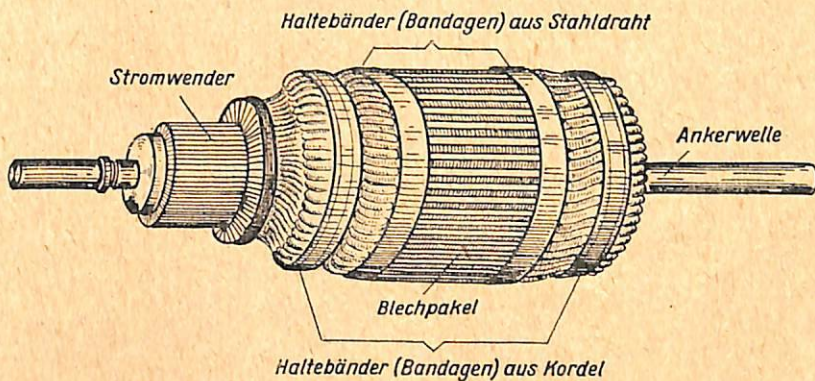


Bild 12. Gleichstromanker

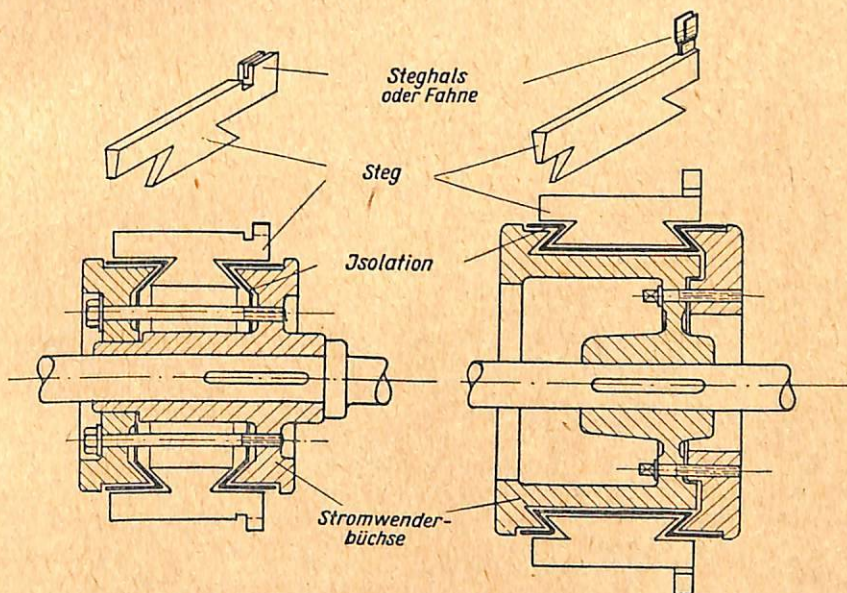


Bild 13. Bauformen von Stromwendern

In Bild 13 sind zwei Stromwender verschiedener Bauart im Schnitt dargestellt. Der Stromwender ist der empfindlichste Teil des Generators. Er muß infolgedessen besonders gut instand gehalten werden.



Auf dem Stromwender schleifen Bürsten, welche die Stromverbindung zwischen dem sich drehenden Stromwender und den festen (ruhenden) äußeren Leitungen herstellen.

Als Bürsten kommen harte Kohlen, Graphitkohlen, Elektrographitkohlen und metallische Kohlen zur Verwendung. Harte Kohlen sind aus gemahlener Gasretortenkohle unter Beimischung von Bindemitteln gepreßt. Sie werden insbesondere bei Kleinmaschinen, Elektrowerkzeugen und für Bahnmotoren verwendet. Wird die gepreßte Kohle geglüht, dann scheidet sich Graphit aus. Solche geglühten Kohlen werden Elektrographitkohlen genannt und heute am meisten verwendet.

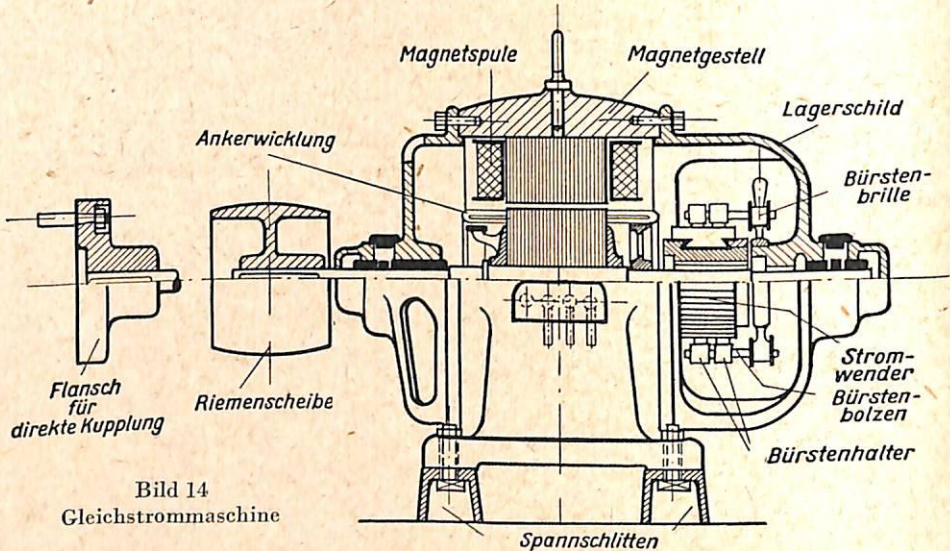


Bild 14  
Gleichstrommaschine

Bei Maschinen mit schwieriger Stromwendung verwendet man Kohlebürsten, die aus Naturgraphit hergestellt sind, die aber leicht zu Riefenbildung auf dem Stromwender führen.

Bei Niederspannungsmaschinen für große Stromstärken kommen metallhaltige Kohlen aus einer Mischung von Kupfer und Graphit zur Anwendung. Auf alten Niederspannungsmaschinen, die zur Stromlieferung für galvanische Bäder dienen, findet man noch Bürsten aus Kupfergewebe. Sie lassen sich nur in seltenen Fällen durch Kohlebürsten ersetzen.

Zum Halten der Bürsten dienen die Bürstenhalter. Sie besitzen Bürstenhalterkästen, in denen die Bürsten entweder senkrecht zur Lauffläche (Radialhalter) oder schräg (meist im Winkel von  $55^\circ$ ) geführt werden. Man nennt sie Schräg- oder Tangentialhalter. Die Bürsten dürfen nicht zu locker geführt sein, andererseits müssen sie vom Staub unbehindert im Kasten gleiten können. Die untere Kante des Halterkastens soll von der Stromwenderlauffläche etwa 2 mm Abstand haben. Der Bürstendruck sei 180 bis 200 g/cm<sup>2</sup>. Um eine gutleitende Verbindung zwischen Bürsten und Halter zu gewährleisten, werden die Bürsten durch Kupferlitzen und Kabelschuhe mit dem Bürstenhalter verbunden.

Zu beachten ist, daß bei Verwendung von Elektrographitkohlen der Glimmer zwischen den Stromwenderstegen etwa 1 mm tief ausgeschabt sein muß.

Zum Nachschleifen des Stromwenders verwendet man Glas- oder Schmirgelpapier.

Die Bürstenhalter sitzen meist zu mehreren nebeneinander auf Bürstenbolzen. Die Befestigung der Bürstenbolzen erfolgt isoliert an der Bürstenbrille, die auch Bürstenstern oder Bürstenbrücke genannt wird. Diese läßt sich verstellen, um die



Bürsten auf dem Stromwender verschieben zu können. Die richtige Bürstenstellung wird von der Fabrik durch besondere Kennmarken gekennzeichnet.

Die Zahl der Bürstenbolzen ist in der Regel gleich der Zahl der Magnetpole. Alle positiven Bürstenbolzen werden miteinander verbunden, ebenso alle negativen Bürstenbolzen. Dadurch entsteht ein Satz positiver und ein Satz negativer Bürsten (Bild 15 und folgende).

In Bild 14 ist ein Generator für Gleichstrom halb im Schnitt und halb in der Ansicht dargestellt.

### 1. Die Erregung der Generatoren für Gleichstrom

Unter Erregung versteht man die Erzeugung des notwendigen magnetischen Feldes. Zur Erzeugung dieses Feldes muß durch die Erregerwicklung der Elektromagnete Gleichstrom fließen. Dieser Gleichstrom kann entweder einer fremden Stromquelle (Gleichstromgenerator oder Akkumulatorenbatterie) entnommen oder von dem Generator selbst erzeugt werden. Bild 15 zeigt den Anschluß der Erregerwicklung an eine fremde Stromquelle (Akkumulatorenbatterie). Diese Erregungsart wird Fremderregung genannt.

Wird der Erregerstrom von dem Generator selbst erzeugt, dann spricht man von Selbsterregung (Bild 16).

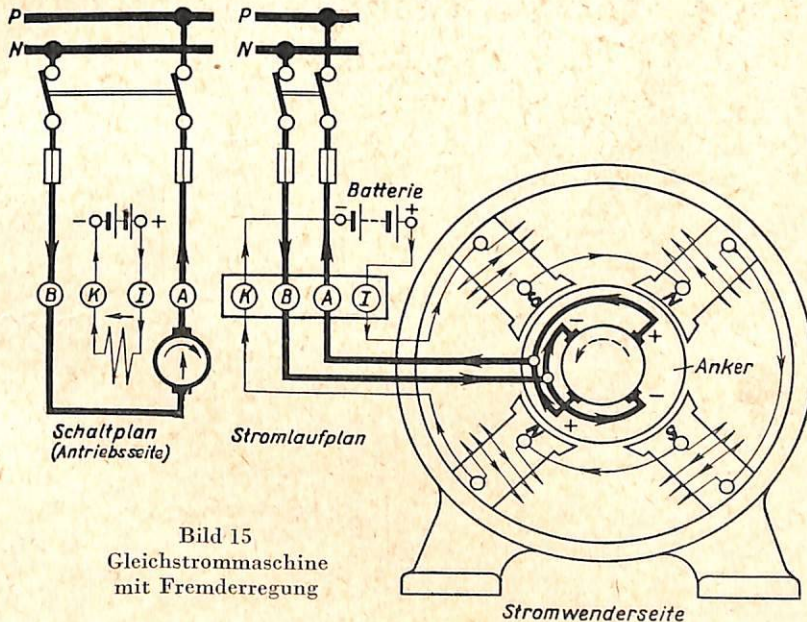


Bild 15  
Gleichstrommaschine  
mit Fremderregung

Die Selbsterregung ist am gebräuchlichsten. Sie wurde von Werner Siemens entdeckt und beruht darauf, daß ein Magnetkern, der einmal magnetisiert wird, auch nach dem Magnetisieren noch schwach magnetisch bleibt (Restmagnetismus oder



Remanenz). Dreht sich der Anker in diesem schwachen magnetischen Feld, dann schneidet die Ankerwicklung wenig Kraftlinien. Infolgedessen entsteht in der Ankerwicklung ein schwacher Induktionsstrom. Leitet man diesen schwachen

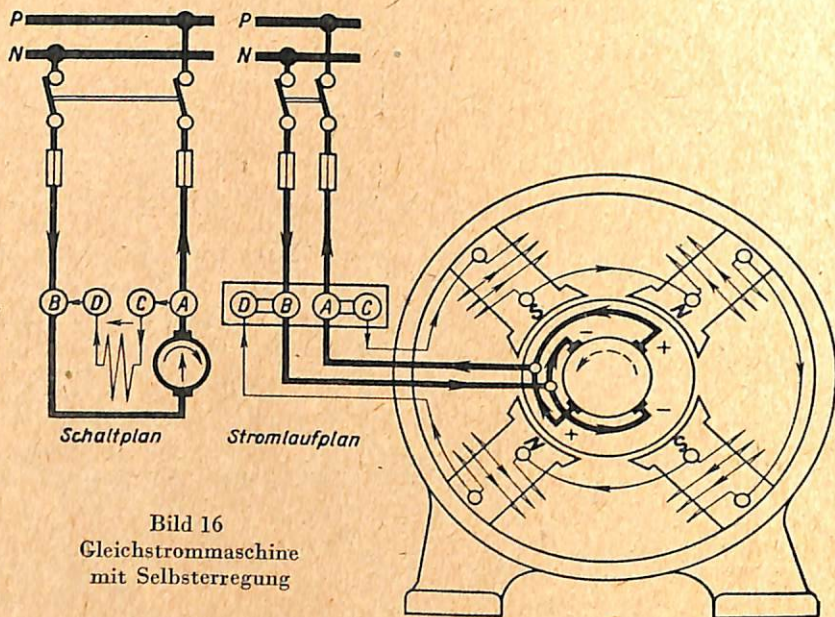


Bild 16  
Gleichstrommaschine  
mit Selbsterregung

Strom so durch die Erregerwicklung, daß der zurückgebliebene (remanente) Magnetismus verstärkt wird, dann schneiden die Ankerdrähte mehr Kraftlinien. Dadurch entsteht ein stärkerer Ankerstrom, der das magnetische Feld weiterverstärkt usw. Auf diese einfache Weise läßt sich der Generator mit einem von ihm selbst erzeugten Strom erregen. Man sagt, die Maschine erregt sich selbst.

## 2. Die verschiedenen Schaltungen bei Generatoren mit Selbsterregung

Nach der Art, wie die Magnetwicklung mit dem Anker verbunden ist, unterscheidet man:

1. Reihenschlußgeneratoren, 2. Nebenschlußgeneratoren, 3. Doppelschlußgeneratoren.

Beim **Reihenschlußgenerator** (Bild 17) sind Anker, Magnetwicklung und äußerer Stromkreis in Reihe geschaltet. Infolgedessen fließt der gesamte Ankerstrom auch durch die Magnetwicklung. Für die Erzeugung des notwendigen magnetischen Feldes ist eine bestimmte Amperewindungszahl erforderlich. Mit Rücksicht auf die große Amperezahl, die durch die Magnetwicklung fließt, genügt eine geringe Windungszahl. Eine hohe Amperezahl erfordert einen großen Drahtquerschnitt. Infolgedessen besteht die Magnetwicklung bei Reihenschlußgeneratoren aus wenig Windungen, aber dickem Draht.



Weil Anker, Magnetwicklung und äußerer Stromkreis in Reihe geschaltet sind, kann sich der Reihenschlußgenerator erst erregen, wenn der äußere Stromkreis geschlossen ist. Wird der äußere Stromkreis stark belastet, dann fließen viel Ampere durch die Magnetwicklung. Die Amperewindungszahl der Magnetwicklung ist jetzt hoch und das magnetische Feld stark. Bei gleichbleibender Drehzahl des Ankers hängt die Höhe der Generatorspannung von der Stärke des magnetischen Feldes ab. Bei starkem Feld ist die Spannung hoch, bei schwachem Feld niedrig. Hieraus folgt, daß die Spannung des Reihenschlußgenerators mit der Belastung steigt und fällt. Er läßt sich infolgedessen nur da verwenden, wo die Belastung dauernd gleichbleibt. Ein weiterer Nachteil des Reihenschlußgenerators besteht darin, daß er sich bei Rückstrom umpolt.

In Bild 17 ist der Generator vierpolig. Als üblicher Drehsinn gilt Rechtslauf von der Antriebsseite gesehen. Um den Stromlauf besser verfolgen zu können, ist der Generator von der Stromwenderseite gesehen dargestellt. Rechtslauf von der Antriebsseite gesehen entspricht Linkslauf von der Stromwenderseite gesehen. Der Drehrichtungspfeil im Anker beim Stromlaufplan ist gestrichelt gezeichnet, um darauf hinzuweisen, daß es sich um Rechtslauf von der Antriebsseite gesehen handelt.

Links neben dem Stromlaufplan ist der Schaltplan sowohl für Rechtslauf als auch für Linkslauf mit Klemmbrett und Klemmenbezeichnung angegeben. Dabei ist die Lage der Klemmen so gewählt, daß durch Umklemmen einer Leitung am Klemmbrett und Umschalten einer Klemmbrücke die Schaltung für Linkslauf gilt.

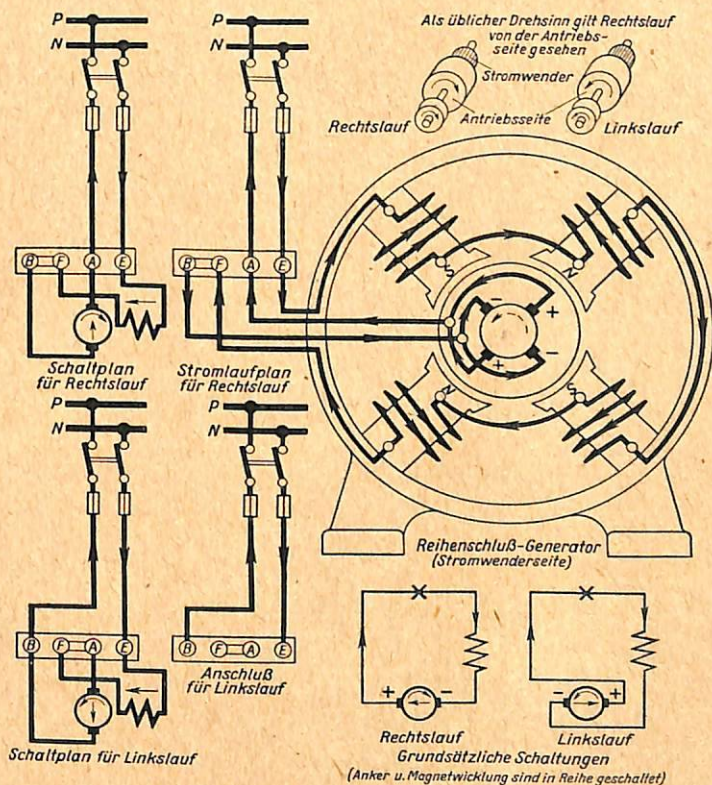


Bild 17. Schaltplan, Stromlaufplan und grundsätzliche Schaltungen des Gleichstrom-Reihenschlußgenerators ohne Wendepole

Schaltpläne werden in der Regel für spannungslosen Zustand der Anlage gezeichnet. In den Schaltplänen der Bilder 17, 18, 19 u. a. wurde von dieser Regel abgewichen, um den Stromlauf mit Hilfe eingezeichneter Strompfeile besser verfolgen zu können. Dabei schien es aus methodischen Gründen zweckmäßig, die Schalter nicht ganz eingeschaltet, sondern



nur angelehnt zu zeichnen, um den Schalter selbst und die Schalterichtung besser erkennen zu können.

Beim Nebenschlußgenerator (Bild 18) liegt die Magnetwicklung im Nebenschluß, d. h. parallel zum Anker. Infolgedessen fließt nur ein Teil des Ankerstromes durch

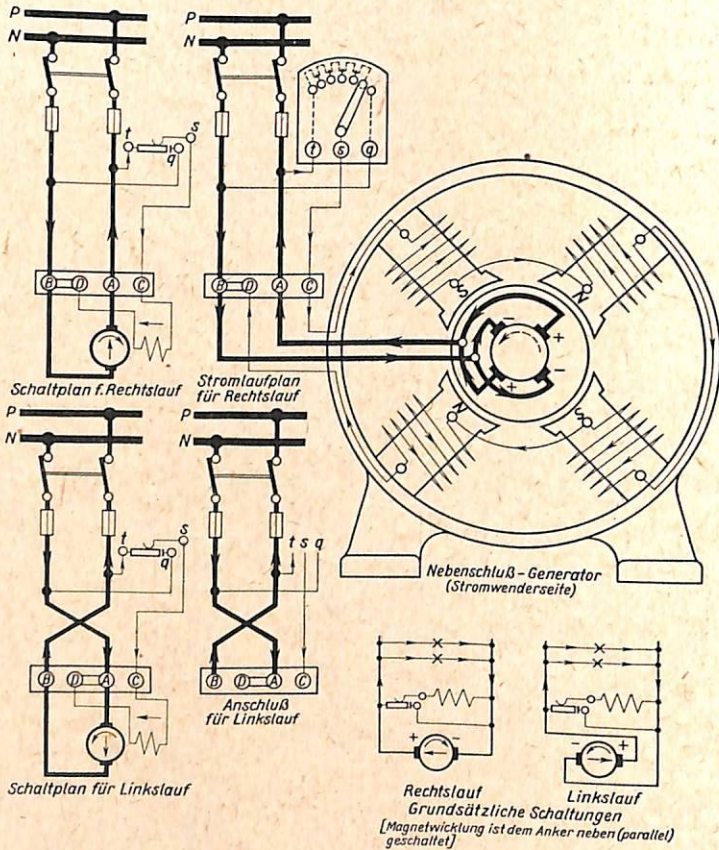


Bild 18. Schaltplan, Stromlaufplan und grundsätzliche Schaltungen des Gleichstrom-Nebenschlußgenerators ohne Wendepole

wicklung aus vielen Windungen, aber dünnem Draht. Der Widerstand dieser Wicklung ist infolge ihrer großen Drahtlänge und ihres kleinen Drahtquerschnittes verhältnismäßig groß.

Die Regelung der Spannung erfolgt durch einen regelbaren Widerstand, der mit der Magnetwicklung in Reihe geschaltet wird. Durch Zuschalten von Widerstand wird die Stromstärke in der Magnetwicklung kleiner, die Amperewindungszahl geringer und dadurch das magnetische Feld schwächer. Die Spannung des Generators sinkt.

Durch Abschalten von Widerstand wird der Widerstand im Magnetstromkreis kleiner. Die Magnetstromstärke steigt. Mit dieser steigt die Amperewindungszahl. Das magnetische Feld wird stärker und die Spannung des Generators höher.

die Magnetwicklung. Dieser Erregerstrom geht für den äußeren Stromkreis verloren. Er stellt einen Verlust dar, der möglichst klein sein soll. Seine Stärke beträgt in der Regel nur etwa 2 bis 3 v. H. des Gesamtstromes im Anker.

Um mit dieser geringen Amperezahl das erforderliche magnetische Feld erzeugen zu können, muß die Windungszahl der Magnetwicklung hoch sein. Der Querschnitt des Drahtes der Magnetwicklung kann wegen der geringen Amperezahl, die durch diese Wicklung fließt, klein sein. Infolgedessen besteht bei Nebenschlußgeneratoren die Magnet-



Dieser regelbare Widerstand wird Nebenschlußregler genannt. Er besitzt drei Anschlußklemmen, die mit den Buchstaben  $q$ ,  $s$ ,  $t$  bezeichnet werden. Die Klemmen  $s$  und  $t$  sind Widerstandsklemmen. Klemme  $s$  wird mit Klemme  $C$  der Magnetwicklung und Klemme  $t$  mit dem Pluspol (Klemme  $A$ ) des Generators verbunden. Klemme  $q$

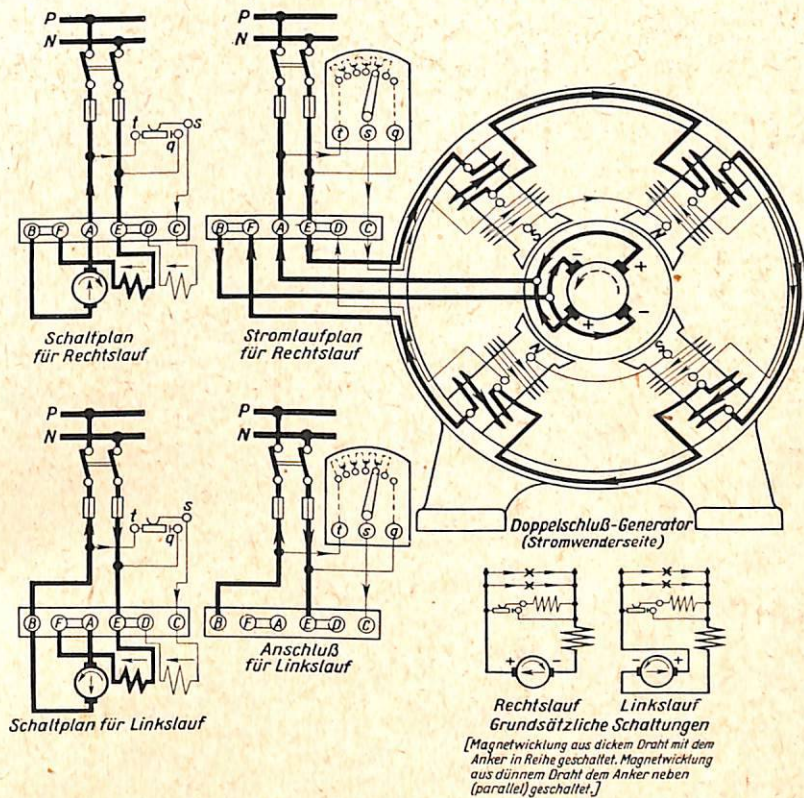


Bild 19. Schaltplan, Stromlaufplan und grundsätzliche Schaltungen des Gleichstrom-Doppelschlußgenerators ohne Wendepole

ist mit dem Ende der Magnetwicklung bzw. mit dem Minuspol des Generators zu verbinden. Mit Hilfe der Klemme  $q$  wird die Magnetwicklung beim Abschalten des Generators kurzgeschlossen. Man nennt sie infolgedessen auch Kurzschlußklemme. Das Kurzschließen der Magnetwicklung ist notwendig, um zu verhindern, daß beim Abschalten des Generators durch das Verschwinden des magnetischen Feldes in den Windungen der Magnetwicklung eine hohe Spannung induziert wird. Durch diese hohe Spannung, die wesentlich höher als die Generatorspannung ansteigen kann, würde die Isolation der Magnetwicklung gefährdet. Außerdem würde infolge dieser hohen Spannung am Unterbrecherkontakt des Nebenschlußreglers ein Unterbrechungsfunkle entstehen, der diesen Kontakt bald verschmorte.

Der beim Kurzschließen der Magnetwicklung entstehende Induktionsstrom läuft sich in der kurzgeschlossenen Wicklung bald tot, ohne irgendwelchen Schaden anzurichten.



- Die Vorteile des Nebenschlußgenerators bestehen hauptsächlich darin, daß
1. seine Spannung sich auch bei schwankender Belastung nur wenig ändert,
  2. seine Erregung auch bei offenem äußeren Stromkreis erfolgen kann,
  3. ein Umpolen der Magnetpole im allgemeinen nicht eintritt.

Ein Umpolen der Magnetpole kann ausnahmsweise bei Kurzschluß oder zu schnellem Abschalten vorkommen.

Nebenschlußgeneratoren werden ihrer Vorteile wegen viel verwendet.

Der **Doppelschlußgenerator** (Bild 19) besitzt zwei Magnetwicklungen. Die eine Wicklung besteht aus vielen Windungen dünnen Drahtes und ist als Nebenschlußwicklung dem Anker neben, d. h. parallel geschaltet. Die zweite Wicklung besteht aus wenigen Windungen dicken Drahtes. Sie ist als Reihenschlußwicklung mit dem Anker in Reihe geschaltet. Diese Reihenschlußwicklung ist eine Zusatzwicklung, deren Wirkung von der Belastung im äußeren Stromkreis abhängt. Reihenschluß- und Nebenschlußwicklung müssen im gleichen Sinne wirken.

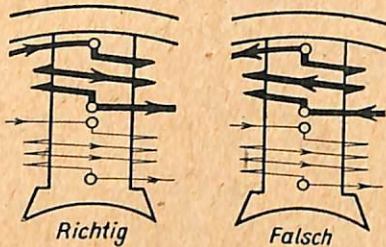


Bild 20 und 21. Richtige und falsche Schaltung der Reihenschlußwicklung beim Doppelschlußgenerator

Bild 20 zeigt die richtige und Bild 21 die falsche Schaltung der Reihenschlußwicklung. In Bild 20 unterstützen sich beide Wicklungen,

während in Bild 21 die Wirkung der Nebenschlußwicklung durch die Gegenwirkung der Reihenschlußwicklung geschwächt wird.

Durch die Anwendung einer Reihenschlußwicklung wird erreicht, daß auch bei starken Belastungsschwankungen die Generatorspannung gleich, d. h. unverändert bleibt.

Um bei Doppelschlußgeneratoren die Spannung regeln zu können, wird mit der Nebenschlußwicklung ein regelbarer Widerstand (Nebenschlußregler) in Reihe geschaltet.

### 3. Die Ankerrückwirkung

Beim unbelasteten Generator ist die Ankerwicklung stromlos. Die Kraftlinien des Feldes sind dann über die Pole gleichmäßig verteilt und durchsetzen den Anker in senkrechter Richtung. Beim belasteten Generator entstehen um die stromdurchflossenen Ankerdrähte Kraftlinien, die sich zu einem gemeinsamen Ankerfeld vereinigen. Bei der in Bild 22 angenommenen Stromrichtung treten die Kraftlinien des Ankerfeldes an der linken Ankerseite aus, durchsetzen die magnetisch gutleitenden Pole und treten an der rechten Ankerseite ein. Das Ankerfeld steht quer (senkrecht) zum Polfeld und wird Ankerquerfeld genannt. Polfeld und Ankerquerfeld vereinigen sich zu einem Hauptfeld. In Bild 25 ist gezeigt, wie die Zusammensetzung dieser beiden Felder zu erfolgen hat, um Größe und Richtung des Hauptfeldes zu finden. Durch die Einwirkung des Ankerquerfeldes wird der Anker von den Kraftlinien nicht mehr in senkrechter, sondern in schräger Richtung durchsetzt (Bild 23), außerdem wird durch das Ankerquerfeld das Polfeld nach einer Polkante hin abgedrängt. Dadurch entsteht an der einen Polkante eine Verstärkung und an der anderen eine Schwächung des Feldes.



Die Verstärkung muß an der Polkante eintreten, an der Pol- und Ankerfeld gleichgerichtet sind (ablaufende Polkante), während die Schwächung an der Polkante eintritt, an der Pol- und Ankerfeld entgegengerichtet sind (anlaufende Polkante). Mit der Richtung des Feldes verschiebt sich auch die Richtung der neutralen Zone um den Winkel  $\alpha$  (Bild 23). Da die Bürsten in der neutralen Zone stehen sollen, müssen sie ebenfalls um den Winkel  $\alpha$  in der Drehrichtung des Ankers verschoben werden. Die vom Winkel  $2\alpha$  (Bild 24) eingeschlossenen Ankerdrähte scheidet für die Erzeugung des Ankerquerfeldes aus. Der Strom in diesen Drähten erzeugt im Anker ein neues Feld, das dem Polfeld entgegengerichtet ist und dieses schwächt (Bild 24). Dieses Feld wird infolgedessen Gegenfeld genannt. Die Entstehung des Ankerquer- und Gegenfeldes bezeichnet man als Ankerrückwirkung.

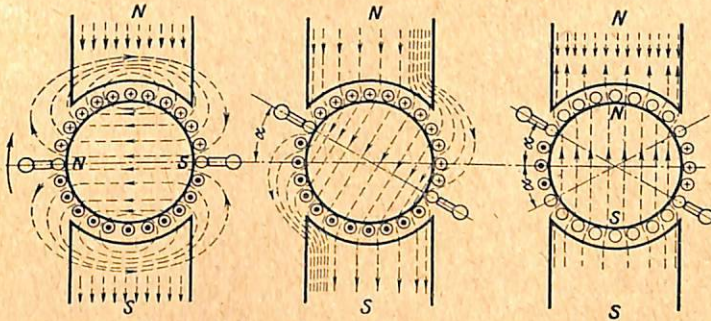


Bild 22, 23 und 24

Einfluß des Ankerfeldes auf Stärke und Richtung des Polfeldes

Bild 25  
Bestimmung  
von Stärke  
und Richtung  
des Hauptfeldes

#### 4. Die Stromwendung

Wenn bei der Drehung des Ankers die Stege einer Ankerspule unter die Bürsten kommen, wechselt der Strom in der betreffenden Ankerspule seine Richtung. Im gleichen Augenblick wird diese Spule durch die Bürsten kurzgeschlossen und stromlos. Mit dem Strom verschwindet auch das von diesem Strom in der Spule erzeugte magnetische Feld. Im nächsten Augenblick haben die Stege der kurzgeschlossenen Spule die Bürsten verlassen, die Spule ist dann nicht mehr kurzgeschlossen. In ihr fließt jetzt Strom in umgekehrter Richtung wie vor dem Kurzschluß. In der kurzgeschlossenen Spule entsteht durch die plötzliche, starke Stromänderung eine Selbstinduktion, die beim Öffnen des Kurzschlusses an der ablaufenden Bürstenkante einen kleinen Lichtbogen erzeugt. Man sagt, die Bürsten „feuern“. Damit dieses Bürstenfeuer verhindert wird, müssen die Bürsten bei Generatoren in der Drehrichtung über die neutrale Zone hinaus verschoben werden. Dadurch kommt die Spule im Augenblick des Kurzschlusses in den Bereich des nächsten Poles und schneidet dessen Kraftlinien. Infolgedessen entsteht in der kurzgeschlossenen Spule eine Spannung, die der Spannung der Selbstinduktion entgegengerichtet ist. Sind beide Spannungen gleich hoch, dann heben sie sich auf, und das Bürstenfeuer verschwindet.



### 5. Wendepole

Jeder Belastung entspricht eine bestimmte Bürstenstellung. Ändert sich die Belastung, dann müssen zur Vermeidung von Bürstenfeuer die Bürsten verschoben werden. Dies macht besonders bei solchen Generatoren, deren Belastung sich häufig und stark ändert, große Schwierigkeiten.

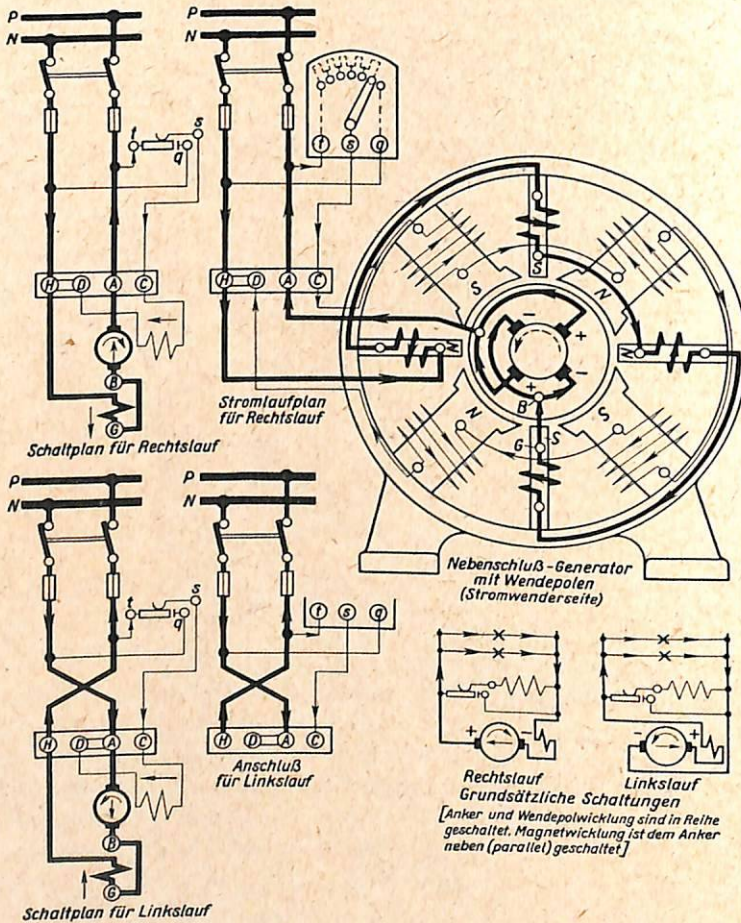


Bild 26. Schaltplan, Stromlaufplan und grundsätzliche Schaltungen des Gleichstrom-Nebenschlußgenerators mit Wendepolen

Ein wirksames Mittel, die Bürstenverschiebung zu vermeiden, bilden die Wendepole, die auch Hilfspole genannt werden. Es sind dies schmale Pole, die man in der Mitte zwischen den Hauptpolen anbringt (Bild 26). Sie besitzen eine Hauptstromwicklung. Diese Wicklung wird mit dem Anker in Reihe geschaltet, so daß der gesamte Ankerstrom durch die Wendepolwicklung fließt. Durch das magnetische Feld der Wendepole wird das Ankerfeld in der neutralen Zone aufgehoben

und außerdem im Augenblick der Stromwendung in der kurzgeschlossenen Ankerspule eine Spannung erzeugt, die der Spannung der Selbstinduktion entgegenwirkt und diese aufhebt. Dadurch werden Bürstenfeuer und Bürstenverschiebung vermieden.

Die Schaltung der Wendepolwicklung ist bei Generatoren dann richtig, wenn in der Drehrichtung des Ankers gesehen auf einen Nord-Hauptpol ein Süd-Wendepol folgt.



In Bild 26 sind Schaltplan, Stromlaufplan und grundsätzliche Schaltung eines Nebenschlußgenerators mit Wendepolen für Rechts- und für Linkslauf dargestellt. Die Klemme *B* des Ankers und die Klemme *G* der Wendepolwicklung werden in der Regel nicht zum Klemmbrett geführt, sondern im Gehäuse direkt miteinander ver-

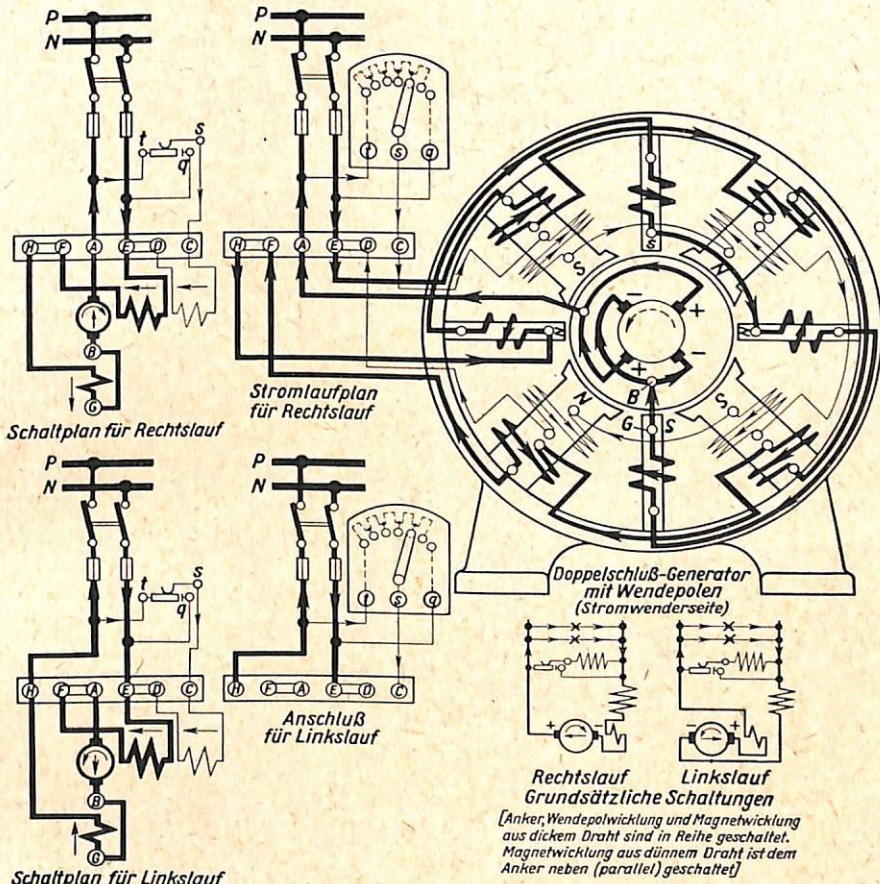


Bild 27. Schaltplan, Stromlaufplan und grundsätzliche Schaltungen des Gleichstrom-Doppelschlußgenerators mit Wendepolen

bunden. Das Klemmbrett hat infolgedessen nur vier Klemmen. An Stelle der Klemme *B* bei Maschinen ohne Wendepole befindet sich bei Maschinen mit Wendepolen die Klemme *H*.

Bild 27 zeigt die gleichen Pläne für einen Doppelschlußgenerator mit Wendepolen.

Die nachteiligen Folgen der Ankerrückwirkung treten besonders bei schnelllaufenden Generatoren (Turbogeneratoren) und solchen Generatoren in Erscheinung, die starken Stromstößen ausgesetzt sind (Generatoren in Bahnkraftwerken). Um



bei diesen die Ankerrückwirkung ganz aufzuheben, wird in den Polschuhen der Hauptpole eine besondere Hauptstromwicklung untergebracht, die mit dem Anker

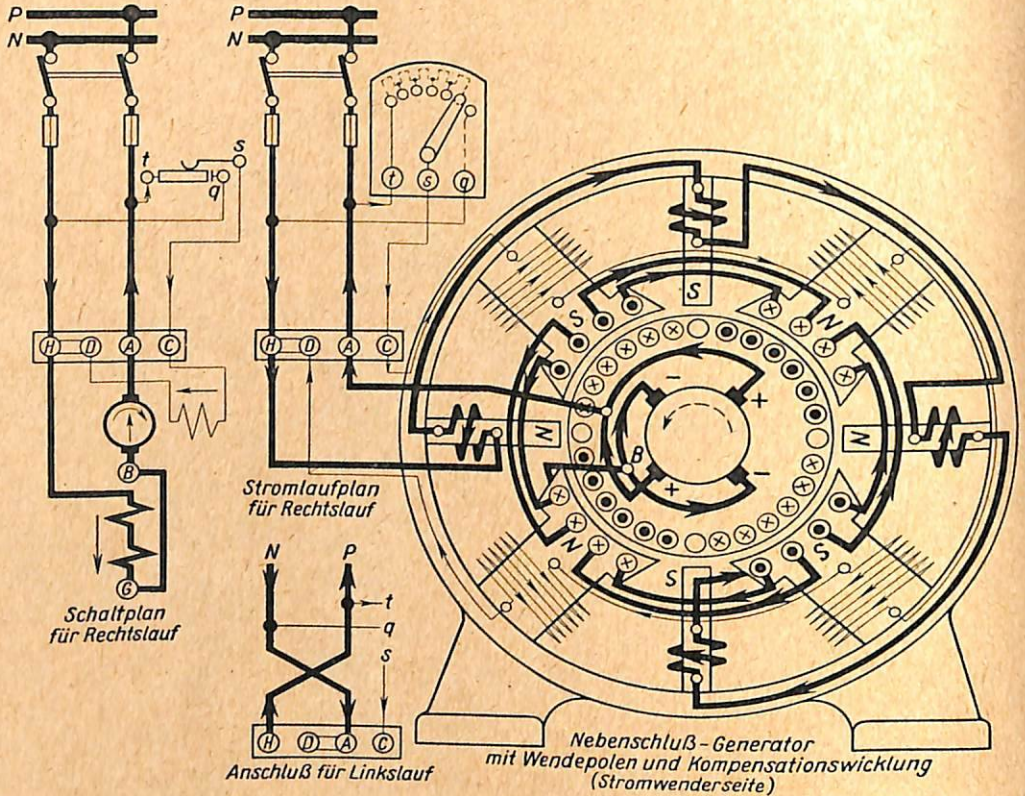


Bild 28. Schalt- und Stromlaufplan des Gleichstrom-Nebenschlußgenerators mit Wendepolen und Kompensationswicklung

und der Wendepolwicklung in Reihe geschaltet ist. Diese Wicklung heißt Kompensationswicklung. Die Stromrichtung in den Drähten dieser Wicklung ist umgekehrt wie die Stromrichtung in den Drähten der Ankerwicklung. Infolgedessen sind auch die Kraftlinienfelder beider Wicklungen entgegengerichtet und heben sich, da sie gleich stark sind, gegenseitig auf (Bild 28).

## 6. Das Parallelschalten von Generatoren für Gleichstrom

Nur Nebenschluß- und Doppelschlußgeneratoren lassen sich parallel schalten. Reihenschlußgeneratoren sind hierfür ungeeignet, weil sich ihre Spannung mit der Belastung ändert und nicht geregelt werden kann.

**Parallelschalten von Nebenschlußgeneratoren.** In Bild 29 ist Generator I auf die Sammelschienen geschaltet. Sein positiver Pol ist mit der Sammelschiene P und



sein negativer Pol mit der Sammelschiene *N* verbunden. Um Generator II zu Generator I parallel schalten zu können, müssen folgende zwei Bedingungen erfüllt sein:

1. die Spannung des Generators II muß genau so hoch wie die des Generators I sein,
2. der Generator II muß die gleiche Polarität wie Generator I haben, d. h. beim Einschalten des Generators II muß sein positiver Pol mit dem positiven Pol des Generators I und sein negativer Pol mit dem negativen Pol des Generators I verbunden werden.

Ist beim Einschalten des Generators II dessen Spannung genau gleich der Spannung des Generators I, dann läuft Generator II erst unbelastet, d. h. leer. Um ihn zu belasten, hat man nur beim Nebenschlußregler mit Hilfe des Handrades oder der Kurbel Widerstand abzuschalten. Seine Belastung wird in der Regel soweit gesteigert, bis er einen seiner Größe entsprechenden Teil der Gesamtbelastung übernommen hat.

Sinkt aus irgendeinem Grunde die Spannung des einen Generators unter die Spannung des anderen, dann erhält der Generator mit der niedrigeren Spannung Rückstrom. Dieser Generator wird vom Stromerzeuger zum Stromverbraucher, d. h. er nimmt Strom aus dem Netz und läuft als Motor in der gleichen Drehrichtung wie als Generator.

Zum Schutz gegen Rückstrom dienen Rückstrom-Selbstschalter. Sobald bei einem Generator Rückstrom auftritt, treten sie in Tätigkeit und schalten den betreffenden Generator ab.

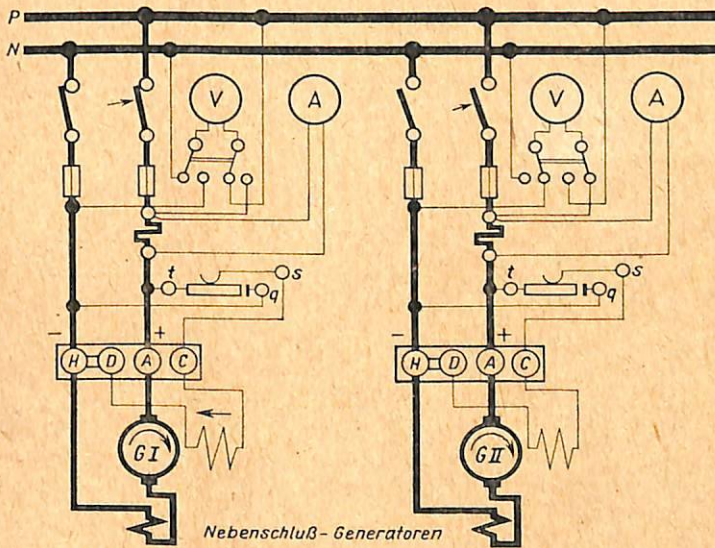


Bild 29. Schaltplan für die Parallelschaltung von Gleichstrom-Nebenschlußgeneratoren

Vor dem ersten Parallelschalten eines Generators und auch dann, wenn aus irgendeinem Grund die Verbindungen zwischen Generator und Sammelschienen am Klemmbrett oder an einer anderen Stelle getrennt werden mußten, kann die richtige Polarität des Generators auf folgende Weise gesichert werden:

Man hebt erst die Bürsten ab und schaltet die Kurbel des Nebenschlußreglers ganz ein (Widerstand aus), dann werden die Hauptschalter geschlossen. Die Magnete



müssen jetzt kräftig magnetisiert sein. Hierauf wird der Nebenschlußregler langsam ausgeschaltet. Erst nachdem der Nebenschlußregler abgeschaltet ist, werden die Hauptschalter geöffnet.

In neuen Anlagen verwendet man polarisierte Spannungsmesser (Drehspulmeßgeräte), deren Zeiger nur bei richtiger Polarität die Generatorspannung anzeigen. Ist die Polarität des Generators falsch, dann versucht der Zeiger nach der falschen Richtung auszuschlagen, woran ihn jedoch ein Anschlag hindert.

**Parallelschaltung von Doppelschlußgeneratoren.** Bei parallelgeschalteten Doppelschlußgeneratoren ist die Höhe der Generatorspannung nicht wie bei Nebenschlußgeneratoren allein von der Einstellung des Nebenschlußreglers, sondern auch von der Stärke der Belastung abhängig. Bei jeder Belastungsänderung tritt vielmehr durch den Einfluß der Reihenschlußwicklung, die ja vom Ankerstrom durchflossen wird, eine selbsttätige Spannungsänderung ein. Damit eine gleichmäßige Lastverteilung auf alle parallel arbeitenden Generatoren stattfindet, müssen die Klemmen *F* aller Generatoren durch eine gemeinsame Leitung miteinander verbunden werden. Diese dritte Leitung wird, weil sie zum Lastenausgleich dient, Ausgleichleitung genannt. Sie bewirkt eine gleichmäßige Spannungsänderung bei allen in Betrieb

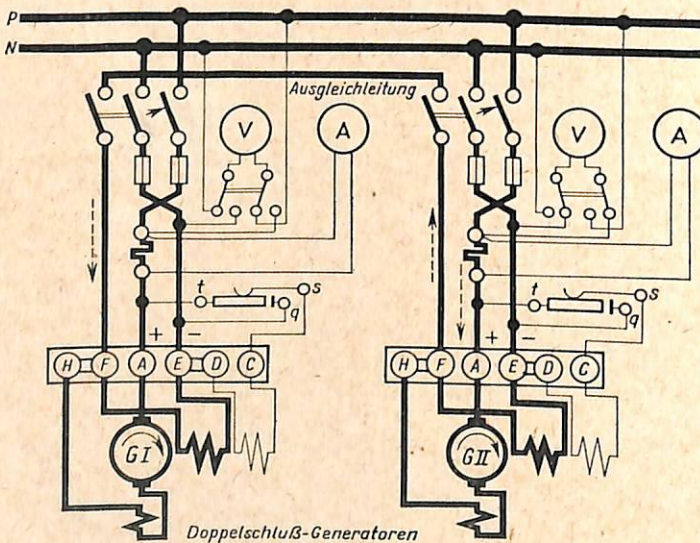


Bild 30. Schaltplan für die Parallelschaltung von Gleichstrom-Doppelschlußgeneratoren

beim Fehlen der Ausgleichleitung ein Parallelbetrieb von Doppelschlußgeneratoren nicht möglich. Sind z. B. zwei Doppelschlußgeneratoren ohne Ausgleichleitung parallel geschaltet, und erhält einer dieser Generatoren Rückstrom, dann fließt dieser Rückstrom in umgekehrter Richtung durch die Reihenschlußwicklung wie vorher der Ankerstrom. Die Reihenschlußwicklung wirkt jetzt der Nebenschlußwicklung entgegen. Dadurch wird das wirksame magnetische Feld dieses Generators schwächer und seine Spannung niedriger, während die Stärke des Rückstromes entsprechend steigt. Sobald die Gegenwirkung der Reihenschluß-

befindlichen Generatoren. Ist die Nennleistung der einzelnen Generatoren verschieden, dann sind die Reihenschlußwicklungen durch Parallelschalten von Widerständen aufeinander abzustimmen.

Das Ein- und Ausschalten der Ausgleichleitung geschieht zwangsläufig mit dem Ein- und Ausschalten der negativen Generatorleitung.

Wie nachfolgende Überlegung zeigt, ist



wicklung die Wirkung der Nebenschlußwicklung übersteigt, wird der Generator umgepolt. Ist dagegen eine Ausgleichleitung vorhanden (Bild 30), dann wird, wenn z. B. die Spannung des Generators II unter die Spannung des Generators I sinkt, ein Rückstrom (gestrichelter Pfeil) durch den Anker des Generators II nach dessen Klemme *F* und von dieser durch die Ausgleichleitung nach Klemme *F* des Generators I zurückfließen.

Soll ein Nebenschlußgenerator mit einem Doppelschlußgenerator parallel geschaltet werden, dann ist ebenfalls eine Ausgleichleitung erforderlich. Die beim Nebenschlußgenerator fehlende Reihenschlußwicklung muß durch einen entsprechenden Widerstand ersetzt werden.

### III. Akkumulatoren (Sammler)

Akkumulatoren dienen zum Aufspeichern elektrischer Energie.

Sie bestehen aus einem Gefäß, das mit einer bestimmten Flüssigkeit gefüllt ist. In die Flüssigkeit sind Platten aus Metall eingetaucht.

Ein solches Gefäß mit Flüssigkeit und Platten wird Akkumulatorenzelle genannt. Mehrere in Reihe geschaltete Zellen bilden eine Akkumulatorenbatterie.

Beim Akkumulator spricht man von Ladung und Entladung.

Bei der Ladung wird dem Akkumulator elektrische Energie zugeführt und von ihm aufgespeichert. Bei der Entladung gibt der Akkumulator diese aufgespeicherte elektrische Energie wieder ab.

Die Entladung kann unmittelbar nach erfolgter Ladung oder auch später erfolgen. Geladen wird mit Gleichstrom; auch der Entladestrom ist ein Gleichstrom.

**Einteilung.** Man unterscheidet ortsfeste (stationäre) Akkumulatorenbatterien, Fahrzeugbatterien und tragbare Batterien.

**Verwendung.** Ortsfeste Akkumulatorenbatterien werden innerhalb eines Gebäudes an einer bestimmten Stelle aufgestellt und betriebsmäßig von dieser in der Regel nicht mehr entfernt.

Sie finden in Gleichstrom-Kraftwerken Verwendung, um die Belastung auszugleichen. In Zeiten schwacher Belastung wird die Akkubatterie durch den Generatorstrom geladen, während in Zeiten starker Belastung (Belastungsspitzen) Generatoren und Akkubatterie den erforderlichen Strombedarf gemeinsam decken. In solchen Anlagen übernimmt die Akkubatterie außerdem die Lieferung des Strombedarfs während des Stillstandes der Generatoren in der Nacht und bei Störungen.

Auch in Straßenbahnkraftwerken werden ortsfeste Akkubatterien verwendet. Hier sind Generatoren und Akkubatterie dauernd nebeneinander (parallel) geschaltet. Bei starken Stromstößen fängt die Akkubatterie die Stromstöße auf und schützt so die Generatoren vor Überlastung.

Eine solche Akkubatterie wirkt ähnlich wie die Puffer bei Lokomotiven und Eisenbahnwagen. Sie wird infolgedessen Pufferbatterie genannt.

Ortsfeste Akkubatterien dienen außerdem zur Stromlieferung für den Betrieb von Notlicht-, Fernmelde-, Fernsprech-, Signalanlagen und andere.



**Fahrzeuggatterien.** Sie dienen zur Stromlieferung für den Antrieb aller Arten von Fahrzeugen, wie Lokomotiven, Triebwagen, Elektrokarren, Booten usw. Zu den Fahrzeuggatterien gehören auch Bordbatterien auf Schiffen und die Batterien für Zugbeleuchtung.

**Tragbare Batterien.** Sie lassen sich infolge ihrer Bauart in gefülltem und betriebsfähigem Zustand von einem Ort zu einem beliebigen anderen Ort tragen bzw. bringen. Zu ihnen gehören auch Anlasser- und Beleuchtungsbatterien für Kraftfahrzeuge sowie Zündbatterien, Heizbatterien und Anodenbatterien für Rundfunkzwecke.

**Bauarten.** Man unterscheidet Bleiakumulatoren und Stahllakkumulatoren.

Beim Bleiakkumulator sind die wirksamen Massen der Platten Bleiverbindungen, beim Stahllakkumulator Nickel-, Eisen- oder Kadmium-Verbindungen.

### I. Der Bleiakkumulator

**Wirkungsweise.** In Bild 31 ist ein Gefäß aus Glas mit verdünnter Schwefelsäure gefüllt. *a* und *b* sind Platten aus Blei. Platte *a* ist mit dem Pluspol und Platte *b* mit dem Minuspol einer Gleichstromquelle verbunden. Der Strom tritt bei Platte *a* ein, fließt durch die Flüssigkeit und tritt bei Platte *b* wieder aus. Platte *a* wird zur Strom-

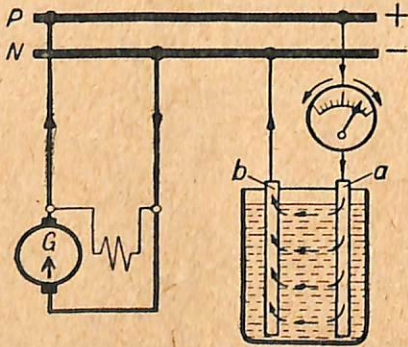


Bild 31. Ladung einer Bleiakkuzelle

eintrittsstelle (Anode) und Platte *b* zur Stromaustrittsstelle (Kathode). Beim Stromdurchgang entsteht an der Plusplatte (Anode) Sauerstoff. Dieser verbindet sich mit dem Blei zu Bleidioxid. Dadurch wird die Plusplatte allmählich chemisch verändert. Nach einiger Zeit des Stromdurchganges bildet sich auf der Plusplatte ein Überzug aus Bleidioxid, auf der Minusplatte ein Überzug aus reinem fein verteiltem schwammigem Blei. Zwischen zwei solchen chemisch verschiedenen Platten entsteht eine elektrische Spannung von rund 2 V. Die Akkuzelle ist geladen. Ihr kann jetzt Strom entnommen werden.

In Bild 32 ist die geladene Zelle mit Stromverbrauchern verbunden. Es fließt jetzt ein Entladestrom. Dieser hat die umgekehrte Richtung wie der früher geflossene Ladestrom.

Platte *a*, die bei der Ladung Strom Eintrittsstelle war, wird bei der Entladung Stromaustrittsstelle. Mit der Platte *b* ist es umgekehrt.

Bei der Entladung treten chemische Prozesse auf, die sowohl die wirksame Masse der Plus- als auch die der Minusplatte allmählich in schwefelsaures Blei (Bleisulfat) umwandeln. Schließlich sind beide Platten wieder von gleicher chemischer Beschaffenheit. Zwischen solchen chemisch gleichen Platten besteht keine Spannung. Die Akkuzelle ist vollständig entladen. Bevor jedoch die Akkuzelle vollständig entladen ist, muß mit der Neuladung begonnen werden.



Bei der Ladung wird Wasser gebunden und Schwefelsäure frei. Der Säuregehalt der Flüssigkeit nimmt zu, d. h. die Flüssigkeit wird schwerer, die Säuredichte steigt.

Bei der Entladung ist es umgekehrt; jetzt wird Schwefelsäure von der wirksamen Masse der Platten gebunden und Wasser frei. Infolgedessen nimmt der Säuregehalt der Flüssigkeit ab, d. h. die Flüssigkeit wird bei der Entladung mehr verdünnt und dadurch leichter, die Säuredichte sinkt.

**Plattenarten.** Jede Akkuzelle hat einen Satz Plusplatten und einen Satz Minusplatten.

**Plusplatten.** Bei den Plusplatten unterscheidet man Großoberflächenplatten, Gitterplatten und Panzerplatten.

**Großoberflächenplatten.** Sie werden aus reinem Weichblei gegossen. Um eine große Oberfläche zu erzielen, wird ihre Oberfläche mit Rippen versehen (Bild 33). Bei ihnen wird die wirksame Masse auf chemischem Wege (durch Formieren) auf der Oberfläche der Platten in dünner Schicht aus dem Blei der Platten selbst erzeugt.

Solche Platten sind sehr haltbar und eignen sich besonders für Entladung mit hoher Stromstärke und kurzer Entladezeit.

Die von der Akkumulatorenfabrik Aktiengesellschaft Berlin hergestellten Großoberflächenplatten für Fahrzeuge haben eine Lebensdauer von mehr als 1000 Entladungen.

**Gitterplatten.** Sie bestehen aus einem Gitter aus Hartblei mit Maschen.

In diese Maschen wird die wirksame Masse eingefüllt. Sie besitzen bei geringem Gewicht eine hohe Leistungsfähigkeit (Kapazität). Ihre Lebensdauer ist geringer als die der Großoberflächenplatten.

**Panzerplatten.** Diese Platten bestehen aus einer Anzahl nebeneinanderliegender geschlitzter Hartgummiröhrchen. In diese Röhrchen wird die wirksame Masse eingefüllt. Die Stromableitung erfolgt durch Bleistäbe, die in der Mitte der Röhrchen in die wirksame Masse eingebettet sind. Diese Bleistäbe sind oben und unten durch Bleileisten zu einer Platte verbunden.

Ihre Lebensdauer ist fast ebenso groß wie die der Großoberflächenplatten. Sie sind aber erheblich leichter als diese, jedoch schwerer als die Gitterplatten für die gleiche Leistung.

**Minusplatten.** Als Minusplatten werden entweder Kastenplatten oder Gitterplatten verwendet.

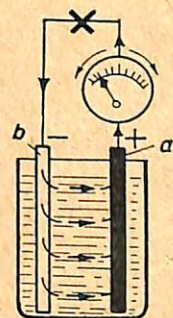


Bild 32. Entladung einer Bleiakkuzelle

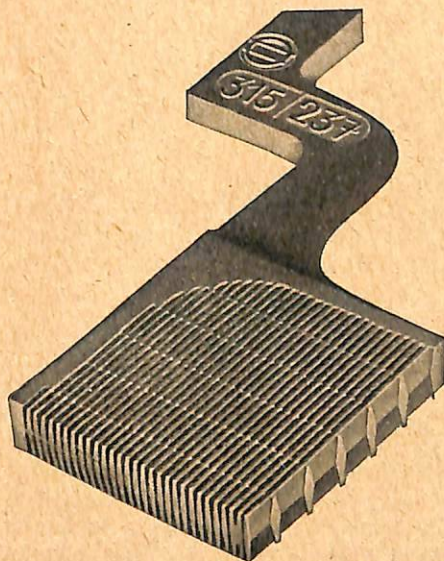


Bild 33. Großoberflächenplatte



**Kastenplatten.** Sie bestehen aus einem weitmaschigen Bleigitter, in dessen Maschen die wirksame Masse (Paste aus Bleisalzen) eingefüllt wird (Bild 34). Die Seiten dieses gefüllten Gitters werden durch feingelochte Bleibleche abgedeckt. Kastenplatten für Fahrzeuge halten zwei- bis dreimal solange wie die positiven Großoberflächenplatten.

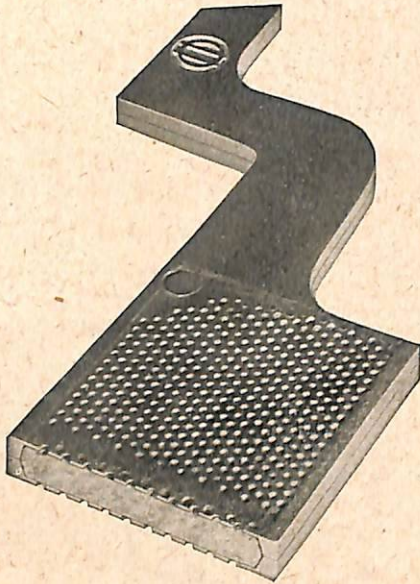


Bild 34. Kastenplatte

**Gitterplatten.** Die Minusgitterplatten haben einen ähnlichen Aufbau wie die Plusgitterplatten. Sie unterscheiden sich von diesen nur durch die Gitterform und die Füllmasse.

**Zellengefäße.** Gefäße für Akkuzellen müssen aus einem Werkstoff hergestellt sein, der von Schwefelsäure nicht angegriffen wird.

Für ortsfeste Akkuzellen werden Gefäße aus Glas, Holz, Hartgummi und Steinzeug verwendet. Die Holzgefäße sind zum Schutz gegen Schwefelsäure innen mit Bleiblech ausgeschlagen.

Bei den Fahrzeugbatterien sind die Gefäße meist aus Hartgummi.

Tragbare Batterien haben Gefäße aus Glas oder Hartgummi.

**Zellenaufbau.** Die Plusplatten einer jeden Zelle sind durch eine Bleileiste nebeneinander (parallel) geschaltet. Das gleiche gilt für die Minusplatten. Jede Plusplatte soll zwischen zwei Minusplatten hängen. Infolgedessen ist die erste und letzte Platte immer eine Minusplatte, so daß die Zahl der Minusplatten um eine höher ist als die Zahl der Plusplatten (Bild 35 und 36).

Plus- und Minusplatten dürfen einander nicht berühren. Deshalb werden sie durch Glasrohre, Hartgummistäbe, glatte Holzbrettchen, gerippte Holzbrettchen, gelochte und gewellte Hartgummibleche, hochporöse Gummischeiden oder Glaswollscheider voneinander getrennt. Zwischen dem Gefäßboden und der Unterkante der Platten muß genügend freier Raum sein, damit die im Laufe der Zeit abfallende Masse sich auf dem Boden ablagern kann, ohne die Platten zu berühren. Großoberflächenplatten besitzen seitliche Nasen zum Aufhängen auf den Gefäßrand bzw. bei Holzkästen mit Bleiblech ausschlag gläserne Stützscheiben. Die anderen Plattenarten, die meist für Fahrzeuge und tragbare Batterien verwendet werden, stehen entweder auf seitlichen Vorsprüngen der Gefäße oder auf prismenförmigen Stützen auf dem Boden der Gefäße.

Bei ortsfesten Batterien für Leistungen bis etwa 5000 Ah werden Gefäße aus Glas, für größere Leistungen Holzkästen, Hartgummikästen oder Steinzeugkästen verwendet.



Ortsfeste Batterien werden auf Holzgestellen untergebracht. Fahrzeugbatterien in Behältern, die gegen die Einwirkung der Säure geschützt sind oder in Batterietrögen; tragbare Batterien in Behältern oder Trögen.

Aus den Bildern 35 und 36 ist zu ersehen, wie die einzelnen Zellen zu einer Batterie in Reihe geschaltet werden.

**Zellenspannung.** Die Spannung einer geladenen Bleizelle beträgt im Ruhezustand, d. h. wenn sie weder geladen noch entladen wird, rund 2 V. Sie ist abhängig von der Säuredichte. Während der Entladung sinkt die Spannung allmählich und fällt gegen Ende der Entladung stark ab. Bei ortsfesten Bleizellen rechnet man mit einer Schlußspannung (geringste Entladungsspannung) von etwa 1,83 bis 1,7 V. Ihre Höhe hängt von der Größe der Zelle und

der Stärke des Entladestromes ab. Wird die Entladung unterbrochen, dann steigt die Zellenspannung wieder an und erreicht nach einiger Zeit die Ruhespannung, deren Höhe von der Säuredichte abhängt.

Die Höhe der Ruhespannung gibt daher keinen Anhalt, ob die Bleizelle mehr oder weniger stark entladen ist. Maßgebend für den Entladezustand einer Bleizelle ist die Spannung bei Belastung und die Säuredichte. Wenn z. B. bei einer Bleiakkubatterie mit 60 Zellen für 110 V Netzspannung bei der Entladung mit dem vorgeschriebenen Entladestrom die Batteriespannung dann, wenn alle 60 Zellen eingeschaltet sind, auf 110 V gesunken ist, ist die Batterie entladen.

Bei der Ladung steigt die Zellenspannung allmählich. Wenn sie auf 2,4 V gestiegen ist, beginnt die Gasentwicklung. Nach beginnender Gasentwicklung steigt die Zellenspannung bald auf 2,6 bis 2,65 V. Die höchste Ladespannung pro Zelle beträgt 2,75 V. Sie wird jedoch nur dann erreicht, wenn die Batterie bis zum Ende der Ladung mit dem vollen Ladestrom durchgeladen wird, was aber mit Rücksicht auf eine genügend große Lebensdauer nicht zulässig ist.

**Kapazität.** Die Leistungsfähigkeit oder Kapazität einer Akkuzelle wird in Amperestunden (Ah) gemessen. Unter Kapazität versteht man die Anzahl Ampere-

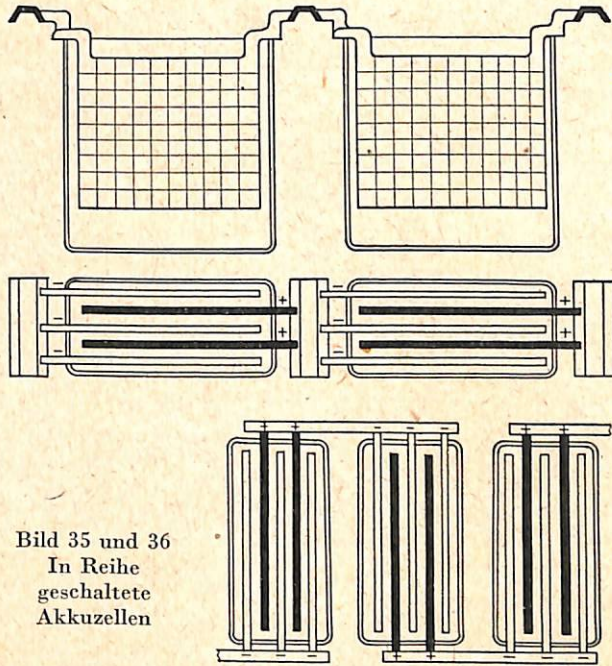


Bild 35 und 36  
In Reihe  
geschaltete  
Akkuzellen



stunden, die eine geladene Zelle abgeben kann, bis ihre Spannung auf die Schlußspannung (etwa 1,83 V) gesunken ist.

Bei Bleizellen ist die Kapazität wesentlich von der Entladestromstärke abhängig. Je geringer die Entladestromstärke, um so mehr Amperestunden können der Akkuzelle entnommen werden. Infolgedessen wird vom Hersteller der Akkubatterie eine bestimmte Kapazität für eine bestimmte Entladestromstärke gewährleistet. Die kürzeste Entladezeit hängt vom Verwendungszweck der Akkubatterie ab. Während bei Starterbatterien eine kürzeste Entladezeit in Minuten zulässig ist, rechnet man bei ortsfesten Batterien meist mit einer kürzesten Entladezeit von einer Stunde.

**Wirkungsgrad.** Bei Akkulatoren unterscheidet man einen Amperestundenwirkungsgrad und einen Wattstundenwirkungsgrad. Den Amperestundenwirkungsgrad erhält man, wenn man die Entlade-Amperestundenzahl durch die Lade-Amperestundenzahl teilt.

Er stellt sich auf etwa 90 v. H., so daß etwa 10 v. H. der aufgewendeten Amperestunden verlorengehen. Nicht so günstig ist der Kilowattstundenwirkungsgrad. Er stellt sich auf etwa 75 v. H.

**Füllflüssigkeit.** Die Bleizellen werden mit verdünnter Schwefelsäure ( $H_2SO_4$ ) gefüllt. Die Herstellerfirma gibt stets an, welche Dichte die Säure für die Füllung einer Zelle haben darf und wie hoch die Säuredichte am Schluß der Ladung sein soll. Die Säuredichte wird mit einem Dichtemesser (Aräometer) bestimmt. Ist die Dichte zu hoch, dann muß destilliertes Wasser, ist sie zu gering, dann muß verdünnte Schwefelsäure nachgefüllt werden.

Die Säure darf keine Stoffe enthalten, die das Blei angreifen, wie z. B. Chlor, Salpetersäure, organische Säuren u. dgl. Enthält die Säure Metalle, dann entsteht eine Selbstentladung, und zwar meist der Minusplatten

**Zellenzahl.** Die Zellenzahl muß so groß gewählt werden, daß die Batteriespannung bei entladener Batterie noch so hoch wie die niedrigst zulässige Netzspannung ist.

In der Regel wählt man

	bei 3- bis 10stündiger Entladung	bei 1- bis 2stündiger Entladung
für 110 V	60 Zellen	63 Zellen
„ 120 V	66 „	69 „
„ 220 V	120 „	126 „
„ 240 V	132 „	137 „

In Kleinspannungsanlagen rechnet man mit 2 V pro Zelle, so daß für 24 V 12 Zellen und für 32 V 16 Zellen erforderlich sind. In Fernsprechanlagen werden für 60 V 30 Zellen genommen. Bei Fahrzeugbatterien richtet sich die Zellenzahl in der Regel nach der vorhandenen Ladespannung. Bei einer höchsten Ladespannung von 2,75 V pro Zelle können mit Hilfe eines Ladewiderstandes bei 110 V 40 Zellen und bei 220 V 80 Zellen aufgeladen werden.



## 2. Stahlakkumulatoren (Alkalische Akkumulatoren)

Sie werden Stahlakkumulatoren genannt, weil ihre hauptsächlichsten Bauteile aus Stahl bestehen.

Je nach der wirksamen Masse unterscheidet man bei Stahlakkumulatoren Nickel-Eisen-Zellen und Nickel-Kadmium-Zellen.

**Verwendung.** Nickel-Eisen-Zellen wurden früher gewählt, wenn es sich um einen regelmäßigen Betrieb handelte und die Kapazität der Batterie immer voll ausgenutzt wurde.

Heute werden in der Mehrzahl Nickel-Kadmium-Zellen benutzt. Sie haben gegenüber den Nickel-Eisen-Zellen den Vorteil, daß Gasentwicklung und Selbstentladung geringer sind. Auch werden sie durch tiefe Temperatur geringer beeinflußt.

**Zellenaufbau.** Zellenkasten, Plattenrahmen, Massebehälter, Polbolzen und Muttern sind aus vernickeltem Stahl. Als **Plusplatten** werden entweder Röhrenplatten oder Taschenplatten verwendet. Bei den Röhrenplatten dienen Röhren aus feingelochtem vernickeltem Stahlblech zur Aufnahme der wirksamen Masse. Als wirksame Masse wird Nickelhydroxyd verwendet. Diese Masse wird unter hohem Druck in die Röhren gepreßt. Die Röhren werden in einem Stahlrahmen zusammengehalten und bilden so die Platten (Bild 37). Bei den Taschenplatten dienen rechteckige Taschen aus feingelochtem vernickeltem Stahlblech zur Aufnahme der wirksamen Masse (Bild 38).

**Minusplatten** haben den gleichen Aufbau wie die Plusaschenplatten. Sie unterscheiden sich von diesen nur durch die wirksame Masse. Bei den Minusplatten der Nickel-Eisen-Zellen wird als wirksame Masse Eisenhydroxydul, bei den Nickel-Kadmium-Zellen Kadmiumhydroxyd verwendet.

Jede Zelle enthält einen Satz Plus- und einen Satz Minusplatten. Die Platten eines jeden Satzes sind mit einer Polbrücke verbunden, die einen Polbolzen trägt. Dieser Bolzen ist durch den Deckel herausgeführt. Er ist gegen den Deckel isoliert. Der Deckel ist auf den Kasten aufgeschweißt.

Plus- und Minusplatten sind gegeneinander und gegen das Zellengefäß entsprechend isoliert.

Die Zellengefäße (Stahl) stehen durch den Elektrolyten unter Spannung. Sie müssen deshalb einzeln voneinander gut isoliert sein, um Kurzschluß zu vermeiden. Bei kleineren Batterien benutzt man als Isolation Gummitaschen zum Einsetzen der Zellen. Bei größerer Zellenzahl werden die Zellen in der Regel in Holzträger ein-

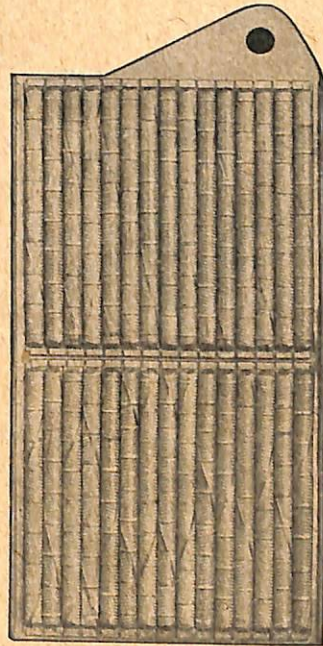


Bild 37  
Röhrenplatte für Stahlakku



gebaut. Ortsfeste Batterien können auch wie Bleizellen isoliert auf Holzgestellen untergebracht werden. Für besondere Fälle werden die Zellenkasten mit einer

Gummischicht umkleidet, wodurch ein direktes Aneinanderstellen der einzelnen Zellen ermöglicht wird.

**Füllflüssigkeit (Elektrolyt).** Als Füllflüssigkeit dient Kalilauge mit einem spezifischen Gewicht von 1,2 bei  $+ 20^{\circ} \text{C}$ . Nach der Ladung darf das spezifische Gewicht der Lauge schwanken zwischen 1,18 bis 1,2 bei  $+ 20^{\circ} \text{C}$ . Die Laugendichte ist jedoch kein Maß für den Ladezustand der Zelle.

Auf keinen Fall darf Schwefelsäure oder schwefel-säurehaltiges Wasser in Stahlzellen eingefüllt werden, denn Schwefelsäure zerstört jeden Stahlakku.

**Zellenspannung.** Die mittlere Entladespannung einer Zelle beträgt etwa 1,2 V, die Schlußspannung (geringste Entladespannung) etwa 1 V.

**Zellenzahl.** Für 12-V-Anlagen werden im allgemeinen 10 Zellen, für 24-V-Anlagen 20 Zellen, für 110-V-Anlagen 92—94 Zellen vorgesehen.

Bei Fahrzeugbatterien für 40 V Nennspannung, die aus einem 110-V-Netz geladen werden, wählt man 33—34 Zellen und bei Fahrzeugbatterien, die aus einem 220-V-Netz geladen werden, 64—66 Zellen.

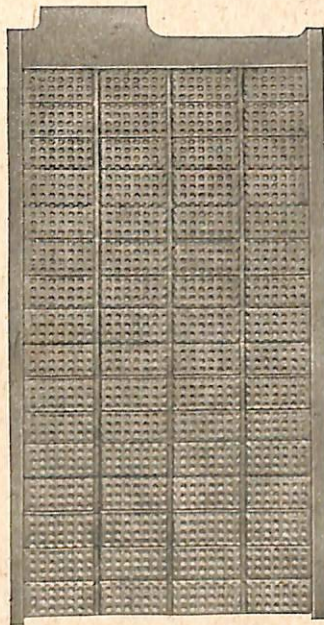


Bild 38

Taschenplatte für Stahlakku

mechanischen Haltbarkeit und ihrer elektrischen Unempfindlichkeit. Sie sind gegen Überladungen und zu starke Entladungen unempfindlich. Auch können sie mit erhöhter Stromstärke während der Betriebspausen geladen werden. Der Stahlakku kann im ungeladenen Zustand längere Zeit stehen ohne Schaden zu nehmen und sich selbst zu entladen.

### 3. Betrieb

**Zellenschalter.** In Niedervoltanlagen ist eine Regelung der Spannung der Akkubatterie meist nicht erforderlich. In Anlagen für 110 und 220 V dagegen ist eine Regelung der Spannung der Akkubatterie notwendig. Bei einer Bleiakkubatterie z. B. hat jede Zelle zu Anfang der Entladung rund 2 V Spannung, so daß die Batteriespannung bei 60 Zellen  $60 \cdot 2 = 120 \text{ V}$  beträgt. Sie ist 10 V höher als die Netzspannung. Es müssen infolgedessen  $10 : 2 = 5$  Zellen abgeschaltet werden, damit die Netzspannung 110 V beträgt. Sobald bei der Entladung die Batteriespannung unter die Netzspannung sinkt, werden die vorher abgeschalteten 5 Zellen nach und nach zugeschaltet.

Das Abschalten von nur 5 Zellen genügt dann, wenn während der Ladung kein Strom ins Netz geliefert zu werden braucht. Soll die Batterie auch während der



Ladung mit dem Netz verbunden bleiben, dann muß ein Drittel aller Zellen abgeschaltet werden können (bei 110 V 20 Zellen und bei 220 V 40 Zellen).

Die Schalter zum Ab- und Zuschalten der Zellen heißen Zellschalter.

Zellschalter mit nur einem Hebel werden Einfach-Zellschalter genannt. Dieser Hebel dient sowohl zum Laden als auch zum Entladen. Doppel-Zellschalter besitzen zwei Hebel, von denen der eine zum Laden und der andere zum Entladen dient.

Damit beim Schalten des Lade- und Entladehebels der Batteriestrom nicht unterbrochen wird, besitzt jeder Hebel zwei voneinander isolierte Kontaktfedern, die durch einen Widerstand  $R$  miteinander verbunden sind. Dieser Widerstand hat einen doppelten Zweck, denn er verhindert beim Zu- und Abschalten von Zellen sowohl das Unterbrechen des Stromes als auch das Kurzschließen der Schaltzellen.

Bild 39 zeigt den Zellschalterhebel in der Ruhestellung. In Bild 40 berühren beim Zuschalten einer Zelle die beiden Kontaktfedern des Zellschalterhebels zwei benachbarte Zellenkontakte. Die Zelle, die sich zwischen diesen beiden Kontakten befindet, ist für einen Augenblick über den Widerstand  $R$  geschlossen. Bild 41 zeigt den Augenblick, in dem nur die Hilfskontaktfeder  $Hi$  einen Zellschalterkontakt berührt.

**Ladung.** Zum Laden von Akkubatterien darf nur Gleichstrom verwendet werden. Der Pluspol der Batterie muß mit dem Pluspol des Generators verbunden sein. Zur Feststellung der Polarität dient Polreagenzpapier oder angesäuertes Wasser.

Bei Verwendung von Polreagenzpapier wird dieses angefeuchtet auf eine isolierende Unterlage (Holz) gelegt. Dann werden die blanken Enden zweier Leitungen, die mit den Klemmen des Generators verbunden sind, in geringem Abstand voneinander auf das Polreagenzpapier gehalten. Unter dem Draht, der mit dem Minuspol verbunden ist, färbt sich das Polreagenzpapier rot. In der gleichen Weise werden die Pole der Batterie festgestellt. Die blanken Drahtenden dürfen sich nicht berühren, da sonst Kurzschluß entsteht. Ein Kurzschluß kann nicht entstehen, wenn in eine der beiden Leitungen eine Glühlampe für die Netzspannung eingeschaltet wird (Bild 42).

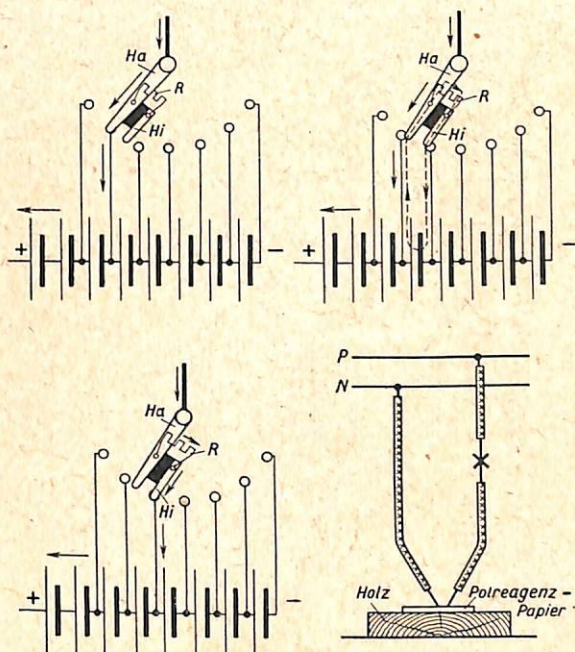


Bild 39 bis 41

Die Stellungen des Entladehebels beim Zu- und Abschalten von Schaltzellen

Bild 42

Feststellung der Strompole durch Polreagenzpapier



Werden die blanken Drahtenden in angesäuertes Wasser getaucht, dann entwickeln sich an beiden Drahtenden Bläschen. Der Draht, an dem die stärkere Gasentwicklung auftritt, ist mit dem Minuspol verbunden.

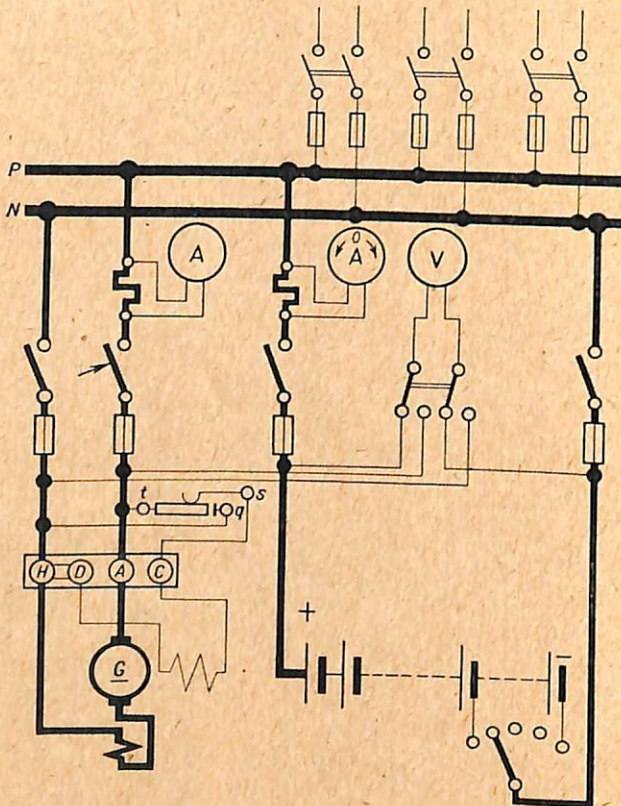


Bild 43. Gleichstromanlage mit Nebenschlußgenerator und Akkubatterie mit Einfachzellenschalter

Zum Laden werden ausschließlich Nebenschlußgeneratoren verwendet.

Das Laden kann entweder nur mit einem Generator oder mit zwei Generatoren erfolgen. Wird nur ein Generator verwendet, dann muß dieser eine besondere Lademaschine sein, deren Spannung bis zur höchsten Ladespannung gesteigert werden kann. Zum Laden von Bleiakubatterien für 110 V Betriebsspannung und 60 Zellen muß sich die Generatorspannung von 110 V auf  $60 \cdot 2,75 = 165$  V erhöhen lassen. Kann während der Ladung das Netz abgeschaltet werden, dann genügt ein Einfachzellenschalter (Bild 43). Soll jedoch auch während der Ladung Strom an das Netz

abgegeben werden, dann ist ein Doppelzellenschalter zu verwenden (Bild 44 u. 45).

Werden zum Laden zwei Generatoren verwendet, dann bleibt der eine als Hauptgenerator dauernd mit dem Netz verbunden, während der andere als Zusatzgenerator nur zum Batterieladen dient. Die höchste Spannung dieses Zusatzgenerators erhält man, wenn man von der höchsten Batterie-Ladespannung dieses Zusatzgenerators abzieht. Bei einem Bleiakku mit 60 Zellen und 110 V Netzspannung die Netzspannung abzieht. Die Spannung des Zusatzgenerators  $60 \cdot 2,75 - 110$  oder  $165 - 110 = 55$  V betragen. Bild 45 zeigt die Schaltung bei Verwendung eines Zusatzgenerators.

Damit der Generator beim Einschalten auf Ladung sofort Strom an die Batterie liefert, muß seine Spannung vor dem Einschalten etwas höher als die Batteriespannung sein. Man regelt infolgedessen die Generatorspannung etwa 5 bis 10 V höher als die Ladespannung der Batterie.







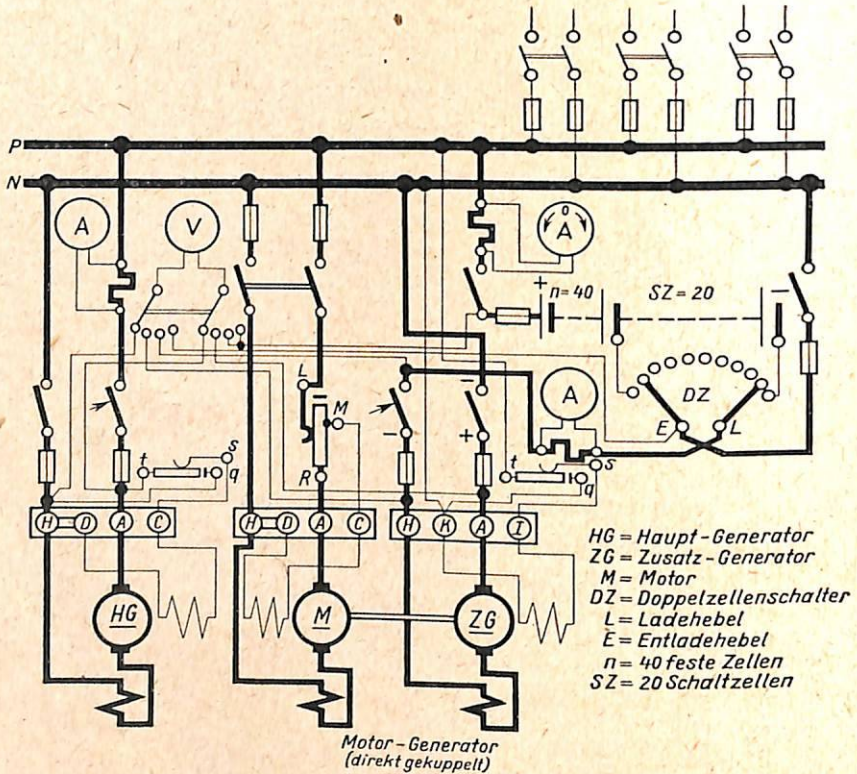


Bild 45. Gleichstromanlage mit Hauptgenerator (Nebenschlußgenerator), Zusatzgenerator und Akkubatterie mit Doppelzellenschalter

Kapazität hergeben soll. Entladungen mit höheren Stromstärken schaden nicht, doch verringert sich dann die Kapazität entsprechend.

Die Plusplatten einer gut geladenen Bleiakkuzelle sehen dunkelbraun (fast schwarz) und die Minusplatten grau und glänzend aus. Ungenügend geladene und zu stark geladene Plusplatten erkennt man an ihrer gelbbraunen Farbe.

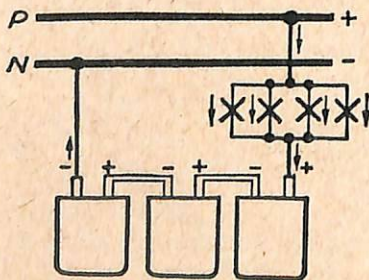


Bild 46  
Ladung von Klein-Akkubatterien

In Gleichstromnetzen können als Ladewiderstand zum Laden von Kleinakkubatterien, die nur aus einigen Zellen bestehen, auch Glühlampen verwendet werden (Bild 46). Es sind dabei so viele Lampen nebeneinander (parallel) zu schalten, daß die Summe aus den Lampenstromstärken gleich der Ladestromstärke der Batterie wird.

**Ladegeräte.** Als Ladegeräte zum Laden von Akkubatterien im Anschluß an Wechselstromnetze werden Quecksilberdampfgleichrichter, Glühkathodengleichrichter und Trockengleichrichter verwendet.



## IV. Gleichstrommotoren

### I. Wirkungsweise

In Bild 47 befindet sich zwischen den Polen *N* und *S* ein Leiter, dessen Enden mit einer Gleichstromquelle verbunden sind. Wenn durch Schließen des Leiterkreises Strom durch den Leiter fließt, bewegt sich der Leiter in einer bestimmten Richtung durch das magnetische Feld der Pole. Die Bewegung des Leiters hört auf, wenn entweder der Leiterkreis unterbrochen wird oder der stromdurchflossene Leiter aus dem magnetischen Feld gekommen ist. Hieraus folgt, daß ein stromdurchflossener Leiter nur innerhalb eines magnetischen Feldes eine Bewegung (Abstoßung) erfährt:

Durch Versuche läßt sich feststellen, daß die Bewegungsrichtung des Leiters von der Stromrichtung im Leiter und von der Richtung des magnetischen Feldes abhängt. Kehrt man die Stromrichtung im Leiter oder die Richtung des magnetischen Feldes um, dann bewegt sich der Leiter in umgekehrter Richtung wie vorher durch das magnetische Feld.

Zur Bestimmung der Bewegungsrichtung des Leiters kann die **Linke-Hand-Regel** benutzt werden:

Hält man die linke Hand so, daß die Kraftlinien in die innere Handfläche eintreten und der Strom in der Richtung der Fingerspitzen durch den Leiter fließt, dann wird der Leiter in der Richtung des abgestreckten Daumens durch das magnetische Feld bewegt (Bild 47).

Zur Erklärung ist in Bild 48 angenommen, daß der Strom vom Beschauer gesehen in den Leiter hineinfließt (+). Um den Leiter entstehen Kraftlinien, deren Richtung durch Pfeilspitzen gekennzeichnet ist. Auf der rechten Leiterseite haben die Leiterkraftlinien und die Feldkraftlinien der Pole die gleiche Richtung. Auf der linken

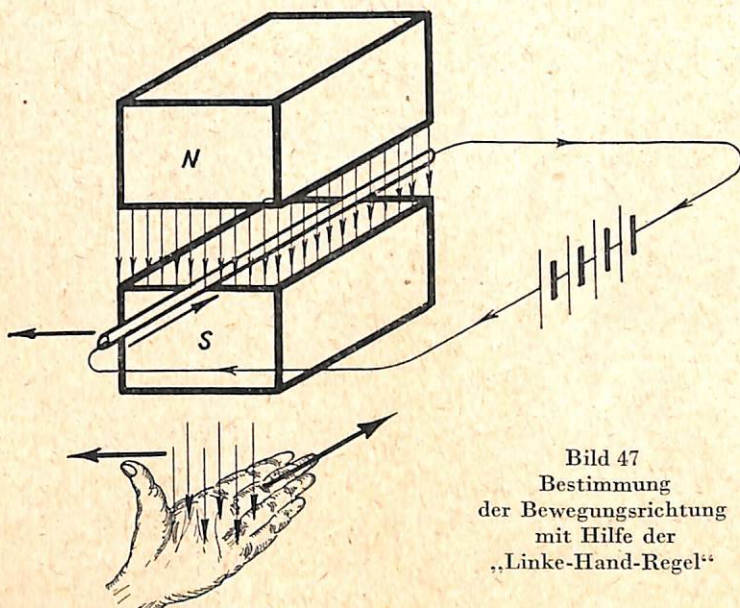


Bild 47  
Bestimmung  
der Bewegungsrichtung  
mit Hilfe der  
„Linke-Hand-Regel“



Leiterseite sind die Leiterkraftlinien den Feldkraftlinien entgegen gerichtet. Durch die entgegen gerichteten Leiterkraftlinien werden die Feldkraftlinien von der linken nach der rechten Leiterseite hin abgedrängt. Dadurch entsteht auf der linken Leiterseite ein kraftlinienfreier Raum, während die Kraftlinienzahl auf der rechten Leiterseite zunimmt (Bild 49). Man spricht Kraftlinien die Eigenschaft zu, sich gerade-zuziehen. Bei diesem Geradeziehen der Kraftlinien wird der Leiter von rechts nach

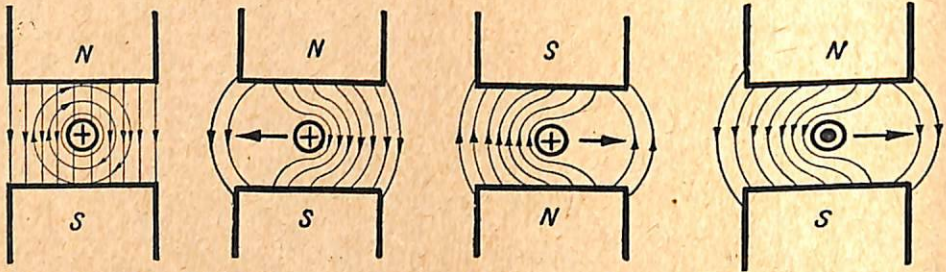


Bild 48 bis 51. Abhängigkeit der Bewegungsrichtung von Strom- und Feldrichtung

links bewegt. In Bild 50 hat der Strom im Leiter die gleiche und das magnetische Feld der Pole die umgekehrte Richtung wie in Bild 49. Der kraftlinienfreie Raum entsteht jetzt auf der rechten und die Kraftlinienvermehrung auf der linken Leiterseite.

Infolgedessen muß sich der Leiter von links nach rechts im magnetischen Feld bewegen.

In Bild 51 ist die Kraftlinienrichtung des magnetischen Feldes die gleiche wie in Bild 49, während der Strom im Leiter die umgekehrte Richtung wie in Bild 49

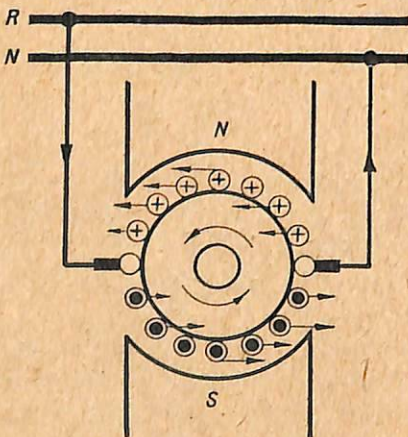


Bild 52. Abhängigkeit der Drehrichtung von Strom- und Feldrichtung

Nordpol von rechts nach links und die Ankerdrähte unter dem Südpol von links nach rechts bewegt. Da alle Drähte mit dem drehbaren Ankerkörper fest verbunden

hat. Auch jetzt entsteht wie in Bild 50 rechts vom Leiter ein kraftlinienfreier Raum und links vom Leiter eine Kraftlinienvermehrung. Der Leiter bewegt sich wie in Bild 50 von links nach rechts.

In Bild 52 sind der Einfachheit wegen die Ankerdrähte auf der Oberfläche des Ankers untergebracht. Außerdem ist der besseren Übersicht wegen angenommen, daß die Bürsten auf den blanken Enden der Ankerdrähte schleifen. Werden die Bürsten an eine Stromquelle angeschlossen, dann fließt durch die Ankerdrähte Strom. Dieser Strom hat in den Drähten der oberen Ankerhälfte die umgekehrte Richtung wie in den Drähten der unteren Ankerhälfte. Nach der „Linke-Hand-Regel“ werden die Ankerdrähte unter dem



sind, muß sich der Anker in der Pfeilrichtung drehen. Mit Hilfe der Bürsten bleibt die Stromrichtung in den Ankerdrähten, die sich unter dem gleichen Pol befinden, immer die gleiche. Infolgedessen wird sich der Anker fortdauernd in der gleichen Richtung drehen.

Die Kraft, mit der ein stromdurchflossener Leiter im magnetischen Feld bewegt wird, ist von der magnetischen Dichte, der Stromstärke im Leiter und der Länge des Leiters im magnetischen Feld abhängig.

Bedeutet  $B$  die magnetische Dichte in Gauß,  $I$  die Stromstärke in Ampere und  $l$  die Leiterlänge in cm, dann berechnet sich die Kraft  $P$  in Kilogramm aus

$$P_{\text{kg}} = \frac{B \cdot I \cdot l}{9810000}$$

Beisp.: In einem magnetischen Feld mit der magnetischen Dichte  $B = 10\,000$  G befindet sich ein Leiter von  $l = 25$  cm Länge, der von  $I = 30$  A durchflossen wird. Mit welcher Kraft  $P$  in kg wird der Leiter im magnetischen Feld fortbewegt?

$$P_{\text{kg}} = \frac{10\,000 \cdot 30 \cdot 25}{9810000} = 0,76 \text{ kg.}$$

Aufg. 6: Ein magnetisches Feld hat eine magnetische Dichte  $B = 12\,000$  G. In diesem Feld befindet sich ein Leiter von 50 cm Länge. Durch den Leiter fließen 50 A. Mit welcher Kraft  $P$  in kg wird der Leiter im magnetischen Feld fortbewegt?

Aufg. 7: In dem magnetischen Feld eines Elektromagneten mit der magnetischen Dichte  $B = 9000$  G befindet sich ein 40 cm langer Leiter, durch den 100 A fließen. Mit welcher Kraft  $P$  in kg wird der Leiter im magnetischen Feld fortbewegt?

Aufg. 8: Das magnetische Feld der Aufg. 7 wird durch stärkere Erregung der Elektromagnete so weit verstärkt, bis die magnetische Dichte auf  $B = 12\,000$  G gestiegen ist. Mit welcher Kraft  $P$  in kg wird der Leiter jetzt fortbewegt?

Aufg. 9: Das magnetische Feld der Aufg. 7 wird so weit geschwächt, bis die magnetische Dichte auf  $B = 9000$  G gesunken ist. Gleichzeitig wird die Stromstärke im Leiter von 100 auf 150 A erhöht. Mit welcher Kraft  $P$  in kg wird der Leiter fortbewegt?

Aufg. 10: Das magnetische Feld der Aufg. 7 wird auf eine magnetische Dichte  $B = 12\,000$  G verstärkt. Gleichzeitig wird die Stromstärke auf 150 A erhöht. Mit welcher Kraft  $P$  in kg wird der Leiter fortbewegt?

Beim Motor wird auf jeden stromdurchflossenen Ankerleiter, der sich im magnetischen Feld der Pole befindet, eine Zugkraft ausgeübt. Die Zugkräfte der einzelnen Ankerleiter bilden eine Drehkraft, die am Umfang des Ankers angreift. Diese Zug- oder Drehkraft wird infolgedessen auch Umfangskraft genannt. Die Stärke dieser Umfangskraft ist von der magnetischen Dichte  $B$ , der Stromstärke  $I$ , der Leiterlänge  $l$  und der Leiterzahl  $Z$  abhängig. Unter  $Z$  ist die Zahl der Ankerleiter zu verstehen, die sich gleichzeitig im magnetischen Feld befindet. Man kann im allgemeinen annehmen, daß  $\frac{2}{3}$  aller Ankerleiter gleichzeitig im magnetischen Feld sind.

Beisp.: Bei einem Gleichstrommotor hat das magnetische Feld der Pole eine magnetische Dichte  $B = 9000$  G. Auf dem Anker befinden sich 200 Drähte, von denen  $\frac{2}{3}$  gleichzeitig im magnetischen Feld der Pole sind. Durch jeden Draht fließen 5 A. Die Drahtlänge im magnetischen Feld beträgt 30 cm. Wie groß ist die Zugkraft am Umfang des Ankers?

$$P_{\text{kg}} = \frac{B \cdot I \cdot l \cdot z \cdot 2}{9810000 \cdot 3} = \frac{9000 \cdot 5 \cdot 30 \cdot 200 \cdot 2}{9810000 \cdot 3} = 18,3 \text{ kg.}$$



Aufg. 11: Das magnetische Feld eines Gleichstrommotors hat eine magnetische Dichte  $B = 10\,000$  G. Auf dem Anker befinden sich 200 Drähte, von denen  $\frac{2}{3}$  unter den Polen liegen. Durch jeden Draht fließen 4 A. Die Länge eines Drahtes im magnetischen Feld beträgt 25 cm. Wie groß ist die Zugkraft am Umfang des Ankers?

Aufg. 12: Bei dem Motor der Aufg. 11 wird die Stromstärke in den Ankerdrähten von 4 auf 7 A erhöht. Wie groß wird die Zugkraft am Umfang des Ankers?

Die Drehwirkung des Ankers ist von der Zugkraft am Umfang des Ankers und von dem Abstand der Ankerdrähte vom Ankermittelpunkt abhängig. Dieser Abstand ist gleich dem Halbmesser des Ankers. Das Produkt aus der Zugkraft und dem Ankerhalbmesser wird Ankerdrehmoment genannt. Die Zugkraft wird in Kilogramm und der Ankerhalbmesser in Meter gemessen.

Das gleiche Drehmoment kann mit großer Zugkraft und kleinem Ankerhalbmesser oder mit kleiner Zugkraft und großem Ankerhalbmesser erzeugt werden.

Beisp.: Am Ankerumfang eines Gleichstrommotors entsteht eine Zugkraft von  $P = 15$  kg. Der Anker hat einen Halbmesser von 0,25 m. Wie groß ist das Drehmoment des Motors in Kilogramm-meter? Bedeutet  $M$  das Drehmoment in Kilogramm-meter (kgm), dann wird  $M = P \cdot R = 15 \cdot 0,25 = 3,75$  kgm.

Aufg. 13: Das magnetische Feld eines Gleichstrommotors hat eine magnetische Dichte von  $B = 11\,000$  G. Auf dem Anker befinden sich 424 Drähte, von denen  $\frac{2}{3}$  gleichzeitig unter den Polen liegen. Durch jeden Draht fließen 6,5 A. Die Länge eines jeden Drahtes im magnetischen Feld beträgt 20 cm. Der Anker hat einen Durchmesser von 40 cm. Wie groß ist die Zugkraft  $P$ ? Wie groß ist das Drehmoment des Ankers?

## 2. Die gegenelektromotorische Kraft bei Gleichstrommotoren

Bei Dampfmaschinen, Gasmotoren, Dieselmotoren, Wasserturbinen usw. wird die erforderliche Menge Dampf, Gas, Wasser usw. durch einen besonderen Regler der jeweiligen Maschinenleistung angepaßt. Wird z. B. eine Dampfmaschine stärker belastet, dann werden durch den Regler die Dampfeinströmventile zu den Dampfzylindern weiter geöffnet. Es strömt jetzt mehr Dampf in die Zylinder. Die Leistung der Maschine steigt. Sinkt die Belastung der Dampfmaschine, dann werden die Dampfeinströmventile etwas geschlossen. In die Dampfzylinder strömt weniger Dampf. Die Leistung der Maschine sinkt. Der Regler wird von der Maschinenwelle aus durch einen Riemen oder durch Zahnräder angetrieben.

Bei Elektromotoren ist ein solcher mechanischer Regler, der während des Betriebes die Stromstärke der Belastung entsprechend ändert, nicht erforderlich. Die Stromstärke paßt sich der Belastung genau an, ohne daß besondere Hilfsmittel notwendig sind. Steigt die Belastung des Motors, dann steigt im gleichen Augenblick die Stromstärke auf einen Wert, der der neuen Belastung entspricht. Fällt die Belastung, dann sinkt die Stromstärke entsprechend. Läuft der Motor leer, dann entnimmt er dem Netz nur so viel Strom, wie notwendig ist, um den Anker auf seiner vollen Drehzahl zu halten. Dieses Anpassen der Stromstärke an die Belastung erklärt sich aus folgendem:

In jedem Leiter, der magnetische Kraftlinien schneidet, entsteht eine EMK. Wenn sich der Anker eines Motors dreht, schneiden die Ankerdrähte die Kraftlinien



des magnetischen Feldes der Pole. Infolgedessen entsteht auch in den Ankerdrähten des Motors eine EMK.

Die Richtung dieser EMK läßt sich nach der „Rechte-Hand-Regel“ bestimmen. In Bild 53 ist die Richtung der Klemmenspannung und des Stromes durch Kreuze (+) und Punkte (·) in die Querschnitte der Ankerdrähte eingetragen. Nach der „Linke-Hand-Regel“ muß sich der Anker links herum drehen. Bei dieser Drehrichtung wird nach der „Rechte-Hand-Regel“ in den Ankerdrähten eine EMK induziert, deren Richtung in den Drähten unter dem Nordpol oberhalb dieser Drähte durch Punkte (·) und in den Drähten unter dem Südpol unterhalb dieser Drähte durch Kreuze (+) gekennzeichnet ist. Diese EMK ist der Klemmenspannung des Motors entgegengerichtet. Man nennt sie infolgedessen Gegen-EMK. Klemmenspannung  $U$  und Gegen-EMK können mit zwei Kräften verglichen werden, die am selben Punkt angreifen, aber in entgegengesetzter Richtung wirken. In Bild 54 wird sich der Wagen nur dann in der Richtung der Kraft  $U$  fortbewegen, wenn diese Kraft größer ist als die entgegengesetzt gerichtete Gegen-EMK. Für die Fortbewegung des Wagens kommt nur der Unterschied zwischen der Kraft  $U$  und der Gegen-EMK in Betracht.

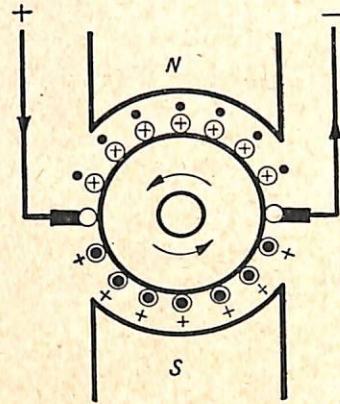


Bild 53. Richtung der EMK und Gegen-EMK in den Ankerleitern

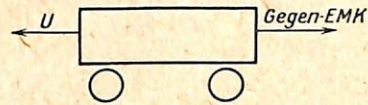


Bild 54. Mechanischer Vergleich der Wirkung von Klemmenspannung und Gegen-EMK

Bei einem Motor ist die Klemmenspannung  $U$  immer etwas höher als die Gegen-EMK. Infolgedessen fließt der Strom auch immer in der Richtung der Klemmenspannung durch die Ankerdrähte. Die Höhe der Gegen-EMK ist bei gleichbleibender Stärke des magnetischen Feldes nur von der Drehzahl des Ankers abhängig. Läuft der Motor leer (unbelastet), dann ist seine Drehzahl am höchsten. Die Gegen-EMK hat beim Leerlauf des Ankers ihren höchsten Wert. Wird der Motor belastet, dann sinkt die Drehzahl des Ankers und mit dieser auch die Gegen-EMK. Wenn der Motor anläuft, ist die Drehzahl des Ankers Null, mithin auch die Höhe der Gegen-EMK.

Die Gegen-EMK ist immer um den Spannungsabfall im Anker niedriger als die Klemmenspannung des Ankers. Bedeutet  $U_k$  die Klemmenspannung des Ankers,  $u_a$  den Spannungsabfall im Anker,  $I_a$  die Stromstärke im Anker,  $E_g$  die Gegen-EMK,  $R_a$  den Ankerwiderstand, dann erhält man die Höhe der Gegen-EMK aus der Formel

$$E_g = U_k - I_a \cdot R_a.$$

Beisp.: Ein Gleichstrommotor hat einen Ankerwiderstand von  $0,01 \Omega$ . Durch den Anker fließen bei einer Klemmenspannung von  $115 \text{ V}$   $500 \text{ A}$ . Wie hoch ist die Gegen-EMK?

Lös.:  $E_g = 115 - 500 \cdot 0,01 = 110 \text{ V}$ .



Aufg. 14: Ein Gleichstrommotor hat einen Ankerwiderstand von  $0,05 \Omega$ ,  $0,08 \Omega$ ,  $0,1 \Omega$ . Durch den Anker fließen  $300 \text{ A}$ ,  $280 \text{ A}$ ,  $250 \text{ A}$ . Die Klemmenspannung am Anker beträgt  $220 \text{ V}$ ,  $440 \text{ V}$ ,  $500 \text{ V}$ . Wie hoch ist die Gegen-EMK?

Aufg. 15: Ein Gleichstrommotor mit einem Ankerwiderstand von  $0,15 \Omega$  ist an  $220 \text{ V}$  angeschlossen. Durch den Anker fließen bei Leerlauf  $7 \text{ A}$  und bei voller Belastung  $75 \text{ A}$ . Wie hoch ist die Gegen-EMK bei Leerlauf und wie hoch bei voller Belastung?

Aufg. 16: Der Anker eines Gleichstrommotors hat  $0,08 \Omega$  Widerstand. Durch eine Belastungsänderung steigt die Ankerstromstärke von  $250$  auf  $325 \text{ A}$ . Um wieviel Volt sinkt die Gegen-EMK im Anker?

### 3. Der Anlaßwiderstand

Erst bei der Drehung des Ankers entsteht in der Ankerwicklung eine Gegen-EMK. Wird der Motor eingeschaltet, dann ist im ersten Augenblick die Gegen-EMK Null. Infolgedessen ist beim Einschalten des Motors die Stromstärke in der Ankerwicklung nur von der Spannung an den Klemmen des Ankers und von dem Widerstand der Ankerwicklung abhängig. Der Widerstand der Ankerwicklung ist sehr gering. Wegen der noch fehlenden Gegen-EMK und des sehr geringen Widerstandes der Ankerwicklung darf beim Einschalten des Motors der Anker nicht an die volle Netzspannung angeschlossen werden. Geschieht dies trotzdem, dann wird die Stromstärke im Ankerstromkreis gefährlich hoch (Kurzschluß), wie nachfolgendes Beispiel zeigt.

Ein Gleichstrommotor für  $7,5 \text{ kW}$  und  $220 \text{ V}$  Nennspannung hat einen Ankerwiderstand von  $0,1 \Omega$ . Die Stromstärke im Motor beträgt bei Vollast  $40 \text{ A}$ . Wird beim Einschalten des Motors der Anker sofort an die volle Netzspannung von  $220 \text{ V}$  angeschlossen, dann fließen durch die Ankerwicklung  $I = \frac{U}{R_a} = \frac{220}{0,1} = 2200 \text{ A}$  oder  $\frac{2200}{40} = 55$  mal so viel als zulässig ist.

Um diesen gefährlich hohen Stromstoß zu vermeiden, muß der Widerstand des Ankerstromkreises künstlich vergrößert werden. Dies geschieht in einfacher Weise dadurch, daß in den Ankerstromkreis ein Widerstand mit der Ankerwicklung in Reihe geschaltet wird. In diesem Widerstand, der vom Ankerstrom durchflossen wird, tritt ein erheblicher Spannungsabfall auf ( $u_w = I_a \cdot R_w$ ). Um diesen Spannungsabfall ist die Spannung an den Klemmen des Ankers niedriger als die Netzspannung.

Sobald sich der Anker dreht, entsteht in der Ankerwicklung die Gegen-EMK, die mit zunehmender Drehzahl steigt. Sie ersetzt den mit der Ankerwicklung in Reihe geschalteten Vorschaltwiderstand, so daß mit zunehmender Drehzahl des Ankers der Vorschaltwiderstand abgeschaltet werden kann. Zu diesem Zweck wird der Vorschaltwiderstand mit einer Anzahl Kontakten versehen, über die eine Kontaktkurbel schleift. Das Einschalten der Kontaktkurbel muß langsam erfolgen. Jede einzelne Kontaktstellung entspricht einer bestimmten Ankerdrehzahl. Beim Verschieben der Kontaktkurbel auf einen neuen Kontakt steigt die Drehzahl. Die Kurbel muß auf jedem neuen Kontakt so lange stehenbleiben, bis der Anker die diesem Kontakt entsprechende höhere Drehzahl erreicht hat. Wird die Kurbel zu schnell eingeschaltet, dann verbleibt dem Anker nicht genügend Zeit, seine Dreh-



zahl entsprechend zu steigern und die erforderliche Gegen-EMK zu erzeugen. Die Folge ist ein unzulässig hohes Ansteigen der Ankerstromstärke. Sobald der Anker seine volle Drehzahl erreicht hat, wird der Vorschaltwiderstand ganz abgeschaltet. Weil dieser Widerstand nur zum Anlassen des Motors dient, wird er Anlaßwiderstand oder kurz Anlasser genannt.

Die Anlasserkurbel darf nicht längere Zeit oder gar dauernd auf einem Widerstandskontakt stehenbleiben, weil sonst der noch eingeschaltete Teil des Anlaßwiderstandes durchbrennt. Die Querschnitte der Widerstandsdrähte sind so bemessen, daß sie den hohen Anlaufstrom nur während der verhältnismäßig kurzen Anlaßzeit aushalten.

Beim Abstellen des Motors muß die Anlasserkurbel schnell ausgeschaltet werden.

Die Größe des Anlaßwiderstandes  $R_w$  in  $\Omega$  ist von der Klemmenspannung  $U_k$  des Motors, der Anlaufstromstärke  $I_a$  im Anker und dem Ankerwiderstand  $R_a$  abhängig.

Nach dem Ohmschen Gesetz ist  $R = \frac{U_k}{I_a}$ , wenn  $R = R_a + R_w$  den Widerstand des Ankerstromkreises bedeutet, Infolgedessen wird  $R_a + R_w = \frac{U_k}{I_a}$ . Hieraus berechnet sich der Widerstand des Anlassers zu

$$R_w = \frac{U_k}{I_a} - R_a$$

oder in Worten:

Anlaßwiderstand in Ohm =  $\frac{\text{Klemmenspannung in Volt}}{\text{Anlaufstromstärke in Ampere}} - \text{Ankerwiderstand in Ohm.}$

Beisp.: Ein Gleichstrommotor für 2,2 kW und 110 V Klemmenspannung hat einen Ankerwiderstand von 0,16  $\Omega$ . Der Anlaufstrom darf 35 A betragen. Wieviel Ohm Widerstand muß der Anlasser haben?

$$R_w = \frac{U_k}{I_a} - R_a; \quad R_w = \frac{110}{35} - 0,16 = 3 \Omega.$$

Aufg. 17: Ein Gleichstrommotor für 11 kW und 440 V Klemmenspannung hat einen Ankerwiderstand von 1  $\Omega$ . Der Anlaufstrom darf bis auf 44 A ansteigen. Wieviel Ohm Widerstand muß der Anlasser haben?

Aufg. 18: Ein Motor für 4 kW und 110 V Klemmenspannung nimmt beim Anlauf 50 A auf. Durch die Magnetwicklung des Motors, die zum Anker parallel geschaltet ist, fließen 1,5 A. Der Anker hat 0,07  $\Omega$  Widerstand. Wie groß ist der Anlaufstrom im Anker? Wieviel Ohm Widerstand hat der Anlasser?

Aufg. 19: Bei einem Motor für 11 kW und 220 V Klemmenspannung darf der Anlaufstrom im Anker 90 A betragen. Der Anker hat einen Widerstand von 0,5  $\Omega$ . Diesem Motor wird irrtümlich ein Anlasser für 11 kW und 440 V vorgeschaltet, dessen Widerstand 8,5  $\Omega$  beträgt. Wieviel Ampere fließen beim Einschalten des Anlassers durch den Anker des Motors?

Aufg. 20: Dem Motor in Aufg. 19 wird irrtümlich ein Anlasser für einen Motor für 11 kW und 110 V vorgeschaltet, dessen Widerstand 0,6  $\Omega$  beträgt. Wieviel Ampere fließen beim Einschalten dieses Anlassers durch den Anker des Motors? Welche Folgerung ergibt sich hieraus?

Aufg. 21: Der Anker eines Gleichstrommotors für 4 kW und 110 V hat einen Widerstand von 0,08  $\Omega$ . Der Motor nimmt bei Vollast 40 A auf. Durch die Magnetwicklung, die zum Anker parallel geschaltet ist, fließen 1,5 A. Der Anlaufstrom des Motors darf 1,25 mal so hoch wie der Strom bei Vollast sein. Wieviel  $\Omega$  Widerstand muß der Anlasser haben?



#### 4. Das Drehmoment bei Motoren

Die vom magnetischen Feld auf die stromdurchflossenen Ankerdrähte ausgeübte Zugkraft  $K$  ist von der Stärke des magnetischen Feldes und von der Stärke des Stromes im Anker abhängig. Diese Zugkraft wirkt am Umfang des Ankers. Sie greift am Hebelarm  $\frac{D}{2}$  an und erzeugt ein drehendes Moment. Dieses Moment wird durch

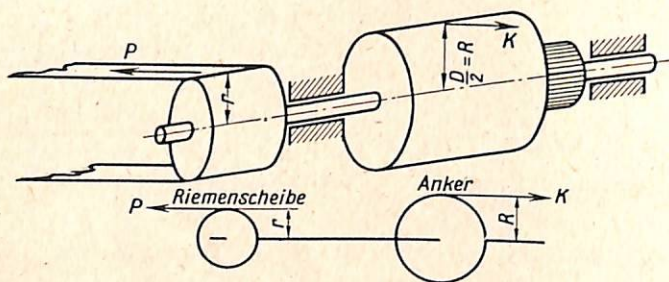


Bild 55. Abhängigkeit des Drehmoments von der Zugkraft und dem Ankerhalbmesser

die Ankerwelle auf die Riemenscheibe übertragen. Infolgedessen wirkt am Umfange der Riemenscheibe eine Kraft  $P$ , die am Hebelarm  $r$  angreift (Bild 55).  $r$  ist der Halbmesser (Radius) der Riemenscheibe. Das Produkt aus  $P \cdot r$  wird Drehmoment des Motors genannt

und mit dem Buchstaben  $M$  bezeichnet. Wird  $P$  in kg und  $r$  in m gemessen, dann erhält man das Drehmoment des Motors in Kilogramm-Meter (kgm).

Drehmoment in kgm = Umfangskraft in kg  $\times$  Radius in Meter oder

$$M = P \cdot r.$$

Bei Motoren unterscheidet man ein Nenndrehmoment, ein Kippmoment und ein Anlaufmoment, auch Anzugsmoment genannt.

Das Nenndrehmoment ist dann vorhanden, wenn der Motor seiner Nennleistung entsprechend belastet ist.

Das Kippmoment ist das höchste Drehmoment, das der Motor beim Lauf entwickeln kann. Es ist bei Wechsel- und Drehstrommotoren von Bedeutung.

Unter Anlaufmoment ist das Drehmoment zu verstehen, das der Motor beim Anlauf entwickelt.

Das Drehmoment  $P \cdot r$  ist vom Halbmesser der Riemenscheibe unabhängig. Ist der Halbmesser  $r$  groß, dann ist die Umfangskraft  $P$  klein, ist dagegen der Halbmesser  $r$  klein, dann ist die Umfangskraft  $P$  groß.

Aufg. 22: Welches Drehmoment entwickelt ein Motor mit einem Riemenscheibendurchmesser von 140 mm und einer Umfangskraft  $P = 10,8$  kg?

Aufg. 23: Wie groß muß das Drehmoment des Motors aus der vorigen Aufgabe bei einer Umfangskraft von 10,8 kg und einem Riemenscheibendurchmesser von 200 mm sein?

Aufg. 24: Ein Motor hat bei einem Riemenscheibendurchmesser von 200 mm eine Umfangskraft von 28,25 kg. a) Wie groß ist das Drehmoment dieses Motors? b) Wie groß ist bei diesem Drehmoment die Umfangskraft bei einem Riemenscheibendurchmesser von 180 mm? c) Wie groß wird die Umfangskraft bei einem Riemenscheibendurchmesser von 230 mm?

Aufg. 25: Wie groß ist das Anlaufmoment eines Motors bei einer Zugkraft  $P = 50$  kg und einem Riemenscheibenhalbmesser  $r = 350$  mm?



### 5. Mechanische Arbeit und mechanische Leistung

Unter mechanischer Arbeit versteht man das Produkt aus Kraft  $\times$  Weg. Kräfte und Lasten werden in Kilogramm (kg) und Wege in Meter (m) ausgedrückt. Das Produkt aus Kilogramm  $\times$  Meter gibt Kilogramm-Meter (kgm). Wird z. B. mittels einer Kraft von 50 kg eine Last 1000 m weit fortbewegt, dann ist eine mechanische Arbeit von  $50 \text{ kg} \times 1000 \text{ m} = 50\,000 \text{ kgm}$  geleistet worden. Dieselbe Arbeit wird mit einer Kraft von 10 kg auf einer Wegstrecke von 5000 m oder mit einer Kraft von 1 kg auf einer Wegstrecke von 50 000 m geleistet. Will man geleistete Arbeiten miteinander vergleichen, dann ist auch die Zeit zu berücksichtigen, innerhalb welcher die Arbeiten verrichtet werden. Braucht z. B. ein Arbeiter zum Fortschaffen einer Last von 40 kg Gewicht auf einer Wegstrecke von 50 m eine Zeit von 5 Minuten und ein anderer Arbeiter zum Fortschaffen derselben Last für dieselbe Wegstrecke 10 Minuten, dann haben wohl beide die gleiche Arbeit verrichtet, trotzdem hat der eine Arbeiter doppelt soviel geleistet wie der andere.

Bei Maschinen hat man als Zeitmaß für geleistete Arbeiten die Sekunde (s) gewählt. Die in einer Sekunde geleistete Arbeit wird mechanische Leistung genannt. Multipliziert man die Kraft  $P$  in kg mit dem von ihr in einer Sekunde zurückgelegten Weg in m, dann erhält man die mechanische Leistung in Kilogramm pro Sekunde (kgm/s).

Die Umfangskraft (Zugkraft)  $P$  des Motors wirkt am Umfang der Riemenscheibe, deren Halbmesser  $r$  ist. Ein beliebiger Punkt am Umfang der Riemenscheibe legt bei der Drehung der Riemenscheibe in jeder Sekunde einen bestimmten Weg zurück. Dieser Weg wird Umfangsgeschwindigkeit genannt und mit dem Buchstaben  $u$  bezeichnet. Um die Länge dieses Weges zu erhalten, hat man den Umfang der Riemenscheibe mit der Drehzahl der Scheibe in einer Sekunde zu multiplizieren. Den Umfang erhält man aus  $2 \cdot r \cdot 3,14$ , die Drehzahl in der Sekunde aus  $\frac{n}{60}$ , wenn  $n$  die Drehzahl in einer Minute bedeutet. Infolgedessen wird die Umfangsgeschwindigkeit

$$u = \frac{2 \cdot r \cdot 3,14 \cdot n}{60}$$

(der Halbmesser  $r$  muß in m eingesetzt werden).

Multipliziert man die Umfangsgeschwindigkeit in m/s mit der Umfangskraft  $P$  in kg, dann erhält man die mechanische Leistung  $N$  des Motors in kgm/s.

Infolgedessen wird  $N = \frac{P \cdot r \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot n}{60}$  kgm/s. Unter einer Pferdestärke (PS) versteht man die Leistung von 75 kgm/s. Um die mechanische Leistung des Motors in PS zu erhalten, muß die Leistung in kgm/s noch durch 75 geteilt werden, so daß

$$N_{\text{PS}} = \frac{P \cdot r \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot n}{60 \cdot 75} \text{ oder } N_{\text{PS}} = \frac{P \cdot r \cdot n}{716}$$

$$\text{Da } M = P \cdot r \text{ ist, wird } N_{\text{PS}} = \frac{M \cdot n}{716} \quad (I)$$

oder in Worten:

$$\text{Mechanische Leistung in PS} = \frac{\text{Drehmoment} \times \text{Drehzahl in der Minute}}{716}$$



Aus Formel (I) ergibt sich das Drehmoment zu

$$M = 716 \cdot \frac{N_{PS}}{n} \dots (\text{kgm}). \quad (\text{II})$$

In Worten: Drehmoment in kgm =  $716 \cdot \frac{\text{Leistung in PS}}{\text{Drehzahl in der Minute}}$ .

Aufg. 26: Ein Gleichstrommotor für 110 V leistet bei 1420 Umdrehungen in der Minute 1,5 PS. Die Riemenscheibe des Motors hat einen Durchmesser von 140 mm (Halbmesser 70 mm). a) Wie groß ist das Nenn Drehmoment des Motors? b) Wie groß ist die Zugkraft  $P$  am Umfang der Riemenscheibe bei einem kleinsten Riemenscheibendurchmesser von 80 mm?

Aufg. 27: Ein anderer Motor für 110 V leistet ebenfalls 1,5 PS und macht 2700 Umdrehungen in der Minute. a) Wie groß ist das Nenn Drehmoment  $M$  des Motors? b) Wie groß ist die Zugkraft  $P$  am Umfang der Riemenscheibe bei einem Scheibendurchmesser von 100 mm? c) Wie groß wird die Zugkraft  $P$  bei einem kleinsten Scheibendurchmesser von 70 mm?

Aufg. 28: Ein Gleichstrommotor für 1000 Umdrehungen in der Minute hat eine Riemenscheibe von 300 mm Durchmesser. Der Motor entwickelt bei voller Belastung eine Umfangskraft von 25 kg. Wieviel PS leistet der Motor?

Bei Elektromotoren wird die mechanische Leistung außer in PS auch in kW angegeben.  $1 \text{ kW} = \frac{75}{0,736} = 101,9$  oder rund 102 kgm/s.

Infolgedessen berechnet sich die mechanische Leistung in kW aus

$$N_{\text{kW}} = \frac{P \cdot r \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot n}{60 \cdot 102}$$

oder 
$$N_{\text{kW}} = \frac{M \cdot n}{975}. \quad (\text{III})$$

Mithin wird 
$$M = 975 \cdot \frac{N_{\text{kW}}}{n} \dots (\text{kgm}). \quad (\text{IV})$$

Die Berechnung der Zugkraft  $P$  ergibt sich aus Formel  $N_{PS} = \frac{P \cdot r \cdot n}{716}$  zu  $P = \frac{716 \cdot N_{PS}}{r \cdot n} \dots (\text{kg})$  und aus Formel  $N_{\text{kW}} = \frac{P \cdot r \cdot n}{975}$  zu  $P = \frac{975 \cdot N_{\text{kW}}}{r \cdot n} \dots (\text{kg})$ .

Aufg. 29: Ein Gleichstrommotor für 220 V leistet 5 kW bei 885 Umdrehungen in der Minute. Der Riemenscheibendurchmesser ist 200 mm. a) Wie groß ist das Nenn Drehmoment des Motors? b) Wie groß ist die Zugkraft  $P$  am Umfang der Riemenscheibe?

Aufg. 30: Der Motor der vorigen Aufgabe dient zum Antrieb einer Transmission. Um die Leistung der von dieser Transmission angetriebenen Arbeitsmaschinen zu erhöhen, soll die Drehzahl der Transmission entsprechend gesteigert werden. Zu diesem Zweck wird die Riemenscheibe des Motors von 200 mm Durchmesser gegen eine solche von 250 mm Durchmesser ausgetauscht. a) Wie groß ist das Drehmoment mit der neuen Riemenscheibe von 250 mm Durchmesser, wenn die Umfangskraft  $P$  dieselbe wie bei der Riemenscheibe von 200 mm Durchmesser sein muß? b) Wieviel kW müßte der Motor bei diesem Drehmoment leisten? c) Wieviel Prozent wäre der Motor überlastet? d) Welche Folgen würden sich hieraus ergeben?



Aufg. 31: Berechne das Nenndrehmoment folgender Gleichstrommotoren.

	Leistungsabgabe	Drehzahl in der Minute	Durchmesser der Riemenscheibe in mm	Nenndrehmoment in kgm
a)	4,3 kW	970	180	
b)	4,7 „	1050	180	
c)	5,8 „	1260	180	
d)	8,84 „	1110	200	
e)	9,79 „	1200	200	
f)	11,56 „	1390	200	
g)	44,9 „	1000	400	
h)	59,8 „	1360	400	

## 6. Messung des Drehmoments und der mechanischen Leistung

Die einfachste Vorrichtung zum Messen des Drehmomentes und der mechanischen Leistung ist der Pronysche Zaum. Er wird als Band- und als Backenbremse ausgeführt. Bei der Messung des Drehmoments mit der Bandbremse wird ein Band oder Seil so fest um den Umfang der Riemenscheibe des Motors geschlungen, daß es nicht gleitet. Das eine Ende des Bandes wird am Haken einer Federwaage befestigt. Hierbei ist zu beachten, daß die Federwaage senkrecht über dem Umfang der Riemenscheibe hängt, damit ein senkrecht gerichteter Zug entsteht. Beim Einschalten sucht sich der Motor zu drehen. Die vom Motor am Umfang der Riemenscheibe entwickelte Zugkraft  $P$  wird an der Federwaage abgelesen (Bild 56). Multipliziert man die abgelesene Zugkraft  $P$  in kg mit dem Halbmesser  $r$  der Riemenscheibe in m, dann erhält man das Anlaufmoment des Motors in kgm.

Um die mechanische Leistung des Motors zu messen, wird an Stelle der üblichen Riemenscheibe eine besondere Bremsscheibe auf der Motorwelle befestigt. Diese Bremsscheibe ist innen hohl, damit sie mit Wasser gekühlt werden kann. Das Bremsband wird um diese Bremsscheibe geschlungen und mit seinem oberen Ende an der Federwaage befestigt. Das untere Ende des Bremsbandes ist durch Gewichte zu belasten; durch Änderung des Gewichtes läßt sich die Leistung des Motors entsprechend verändern. Das Bremsband darf nicht zu fest angezogen werden, damit sich der Anker des Motors drehen kann.

Um die am Umfang der Bremsscheibe vom Motor entwickelte Zugkraft  $P$  zu finden, hat man das Gewicht  $G$  nebst dem Gewicht des freien Bandes vom Zeigerausschlag  $K$  der Federwaage abzuziehen (Bild 57).

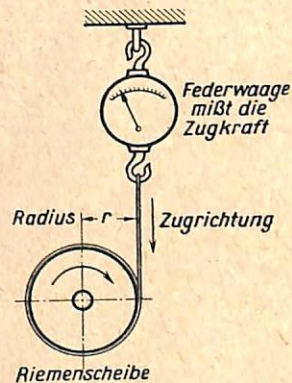


Bild 56  
Messung der Zugkraft  
mittels Federwaage



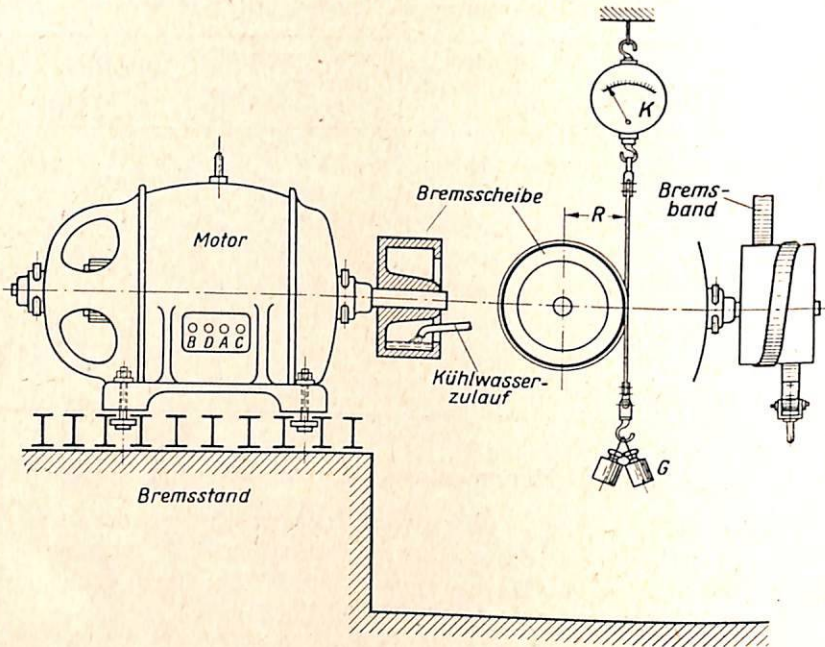


Bild 57. Abbremsen mittels Brems Scheibe, Bremsband und Federwaage

Die vom Motor während der Prüfung entwickelte mechanische Leistung wird am Umfang der Scheibe infolge der Reibung zwischen Bremsband und Brems Scheibe in Wärme umgesetzt. Zur Kühlung der Scheibe dient Wasser. Durch eine Rohrleitung wird so viel Wasser zugeführt, wie durch die Reibungswärme verdampft.

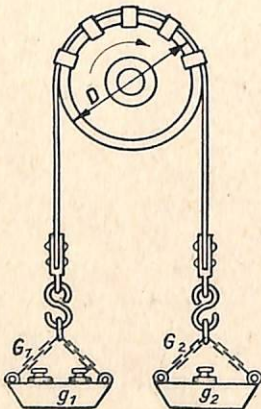


Bild 58. Abbremsen mittels Bremsband

Zum Abbremsen kleiner Motoren kann auch ein einfaches Bremsband (Bild 58) benutzt werden. Damit dieses Band nicht von der Brems Scheibe herabrutscht, wird es mit besonderen Führungswinkeln versehen. Bei der Bremsung sind beide Gewichtschalen so mit Gewichten zu belasten, daß zwischen den Schalen Gleichgewicht herrscht. Sind beide Schalen gleich schwer, dann erhält man die Zugkraft  $P$ , wenn man von dem größeren Gewicht  $G_1$  das kleinere Gewicht  $G_2$  abzieht ( $P = G_1 - G_2$ ).

Ist das Gewicht beider Schalen ungleich, dann erhält man die Zugkraft aus  $P = (G_1 + g_1) - (G_2 + g_2)$ .

Hierin bedeutet  $g_1$  das Eigengewicht der Schale, auf der das Gewicht  $G_1$  ruht, und  $g_2$  das Eigengewicht der anderen Schale.

Als Bremsband dient entweder ein Gurt oder ein Riemen.

Bei der Backenbremse (Bild 59) ist das Bremsband durch zwei Holzbacken ersetzt. Die eine Backe ist mit einem langen Hebelarm verbunden. Zwei Schrauben dienen zum Anpressen der Backen. Die unbelastete Bremse muß auf der Scheibe ausgeglichen sein. Diesem Zweck dient das Gegengewicht  $Q$  am linken Hebelende. Durch dieses Gegengewicht



läßt sich das Gewicht des Hebels und der Waagschale ausgleichen. Die Klemmbacken werden mit Seifenwasser benetzt, damit sie schlüpfrig bleiben. Die beiden Anschläge  $a-a$  verhindern ein Herumschlagen des Hebels.

Die Messung kann auch mittels einer Feder- oder Brückenwaage vorgenommen werden. Zu diesem Zweck wird das rechte Ende des Hebels mit einem Stift versehen, der senkrecht auf die Waage drückt (Bild 60).

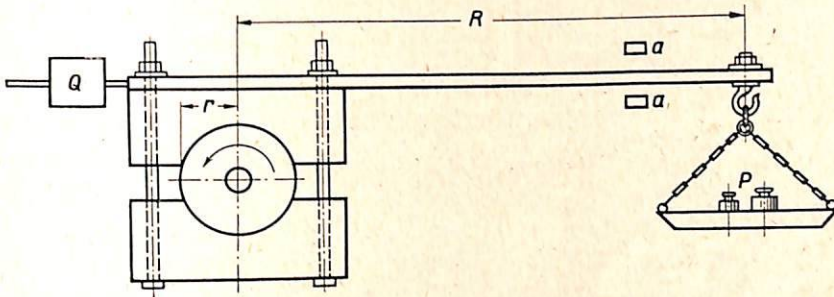


Bild 59. Grundsätzlicher Aufbau einer Backenbremse

Häufig wird am Hebelarm an Stelle der Gewichte eine Feder angebracht, deren Spannung in kg an einer Skala abgelesen werden kann.

Bei der Messung werden die Klemmbacken durch die Schrauben angezogen und die Waagschale so mit Gewichten beschwert, daß der Hebelarm zwischen den Anschlägen  $a-a$  einspielt, d. h. frei schwebt. Das Drehmoment des Motors ergibt sich dann aus der Multiplikation des Gewichtes  $P$  in kg mit der Länge des Hebelarmes  $R$  in m, so daß

Drehmoment in kgm = Gewicht in kg  $\times$  Länge des Hebelarmes in m

$$\text{oder} \quad M = P \cdot R \dots \text{kgm.}$$

Mithin wird die mechanische Leistung des Motors

$$N_{\text{PS}} = \frac{P \cdot R \cdot n}{716} \quad \text{oder} \quad N_{\text{PS}} = \frac{M \cdot n}{716} \dots \text{in PS}$$

$$\text{und} \quad N_{\text{kW}} = \frac{P \cdot R \cdot n}{975} \quad \text{oder} \quad N_{\text{kW}} = \frac{M \cdot n}{975} \dots \text{in kW.}^1)$$

Die vorbeschriebene Backenbremse hat den Nachteil, daß sie unruhig arbeitet. Bei der in Bild 60 dargestellten Backenbremse ist dieser Nachteil vermieden. Die Flügelschraube  $S$  dient zum Anpressen der Backen.

1) Macht man den Hebelarm  $R = 716$  mm lang, dann wird  $N_{\text{PS}} = \frac{P \cdot 716 \cdot n}{1000 \cdot 716}$  oder  $N_{\text{PS}} = \frac{P \cdot n}{1000} \dots \text{PS}$ , d. h. man hat das Produkt aus Gewicht  $\times$  Drehzahl durch 1000 zu teilen, um die mechanische Leistung in PS zu erhalten. In gleicher Weise erhält man bei einem Hebelarm von 975 mm Länge die mechanische Leistung in kW aus  $N_{\text{kW}} = \frac{P \cdot n}{1000}$ .



Will sich bei zu starkem Anpressen der Bremsbacken die Bremse mitdrehen, dann spannt sich das Seil. Durch den mit der Spannfeder  $F$  und dem Seil verbundenen zweiarmigen Hebel  $H$  wird jetzt die untere Bremsbacke etwas gelüftet.

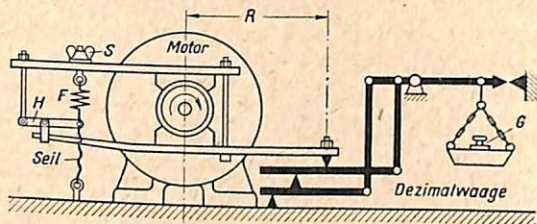


Bild 60. Abbremsen mittels Backenbremse und Dezi­malwaage

Wird zur Messung der Kraft  $P$  eine Dezi­malwaage benutzt, dann ist zur Bestimmung von  $P$  das auf der Waagschale aufgelegte Gewicht  $G$  mit 10 zu multiplizieren

$$P = 10 \cdot G.$$

Genauere Meßerge­b­nisse wie mit Band- und Backenbremse erhält man mit der Wirbelstrombremse. In Bild 61 ist eine solche Bremse dargestellt. Zwischen den Polen  $N$  und  $S$  eines Elektromagneten, der auf zwei Schneiden ruht, dreht sich eine Kupfer­scheibe  $S$ .

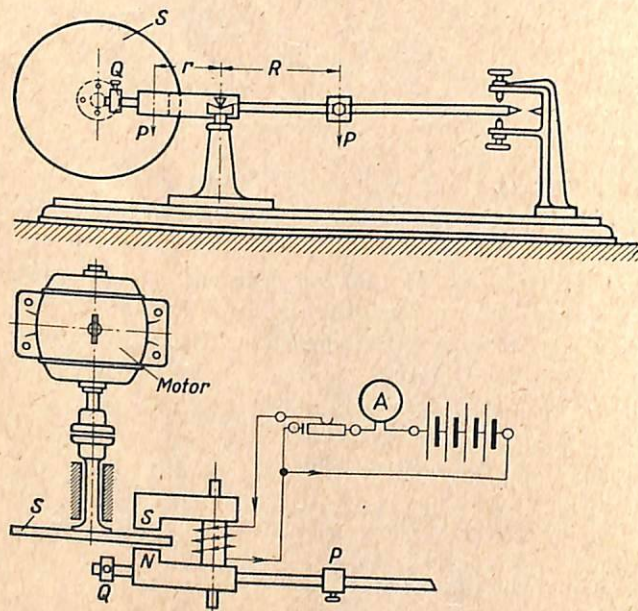


Bild 61. Grundsätzlicher Aufbau und Schaltung der Wirbelstrombremse

Diese Scheibe wird mit dem zu bremsenden Motor gekuppelt. Der Elektromagnet ist mit einem Hebel verbunden, auf dem sich ein Laufgewicht  $P$  befindet. Das Gegen­gewicht  $Q$  dient zum Ausgleichen.

Bei der Drehung der Scheibe schneidet diese die Kraftlinien des Elektromagneten. Dadurch entstehen in der Scheibe Wirbel­ströme, die auf den Elektromagneten eine Zugkraft ausüben und diesen im Drehsinn der Scheibe mitzudrehen suchen. Zwischen den Wirbelströmen und dem Elektromagneten entsteht ein Drehmoment  $p \cdot r$ , dem durch das Gegenmoment  $P \cdot R$  das Gleichgewicht gehalten wird. Infolgedessen ist das vom Motor entwickelte Drehmoment  $M = P \cdot R$ .

Die Erregung des Elektromagneten läßt sich in weiten Grenzen und sehr feinstufig regeln. Infolgedessen kann auch die Leistung des Motors in weiten Grenzen verändert und sehr genau eingestellt werden.



Für Leistungen bis 2 kW kann man massive Scheiben benutzen. Bei Leistungen von 2 bis 5 kW ist die von den Wirbelströmen erzeugte Wärme so groß, daß eine Kühlung der Scheibe erforderlich wird. Für solche Leistungen werden Scheiben benutzt, die innen hohl sind, um sie mit Wasser kühlen zu können.

Für größere Leistungen als 5 kW werden Wirbelstrombremsen besonderer Bauart oder Bremsdynamos oder Wasserbremsen verwendet.

Aufg. 32: Ein Gleichstrommotor wird mittels Bandbremse abgebremst. Die Bremscheibe hat einen Durchmesser von 350 mm. Der Motor entwickelt bei der Nenndrehzahl von 1200 Drehungen eine Zugkraft von 8,5 kg. a) Wie groß ist das Nenndrehmoment des Motors? b) Wie groß ist die Nennleistung des Motors in PS? c) Wie groß ist die Nennleistung des Motors in kW?

Aufg. 33: Zum Abbremsen eines Motors dient eine Backenbremse mit einer Hebellänge von  $R = 1000$  mm. Der Motor macht in der Minute 750 Drehungen. Das Gewicht auf der Waagschale beträgt bei ausgeglichenem Hebel 18 kg. Wie groß ist die mechanische Leistung des Motors a) in PS, b) in kW?

Aufg. 34: Ein Motor wird mit einer Backenbremse abgebremst, deren Hebel 716 mm lang ist. Der Motor macht in der Minute 1150 Drehungen. Das Gewicht auf der Waagschale beträgt 25 kg. Wieviel PS leistet der Motor?

Aufg. 35: Ein Motor wird mit einer Backenbremse abgebremst, deren Hebel 0,975 m lang ist. Der Motor macht in der Minute 1400 Drehungen. Das Gewicht auf der Waagschale beträgt 15 kg. Wieviel kW leistet der Motor?

Aufg. 36: Berechne aus den Angaben der vorigen Aufgabe die Zugkraft am Umfang der Bremscheibe, wenn die Bremscheibe 350 mm Durchmesser hat!

Aufg. 37: Ein Motor wurde mittels Backenbremse abgebremst. Der Motor entwickelte bei einer Drehzahl von 1040 in der Minute eine mechanische Leistung von 18,5 PS. Wieviel kg Gewicht mußten bei einer Hebellänge von 716 mm auf die Waagschale gelegt werden?

## 7. Bestimmung des Wirkungsgrades bei Gleichstrommotoren

Ein Elektromotor ist eine Maschine, die elektrische Leistung in mechanische Leistung umwandelt. Bei dieser Umwandlung entstehen Verluste, die sich auf einen kleinsten Wert beschränken, aber nie ganz vermeiden lassen. Die beim Gleichstrommotor auftretenden Verluste setzen sich zusammen aus Reibungsverlusten, Eisenverlusten und Stromwärmeverlusten.

Die Reibungsverluste entstehen durch Lagerreibung, Bürstenreibung und Lüftung;

die Eisenverluste durch Ummagnetisieren des Ankereisens und durch Wirbelströme im Ankereisen, in den Polschuhen und in den Ankerleitern;

die Stromwärmeverluste durch den elektrischen Strom, wenn er die Anker- und Magnetwicklung durchfließt und beim Übergang des Stromes von den Bürsten zum Stromwender.

Die Reibungsverluste sind nur von der Drehzahl des Ankers abhängig. Die Stärke der Belastung hat auf die Größe dieser Verluste keinen Einfluß.

Die Eisenverluste sind ebenfalls von der Drehzahl und außerdem noch von der Stärke des magnetischen Feldes abhängig. Bleibt die Stärke des magnetischen Feldes unverändert, dann ist für ihre Größe lediglich die Drehzahl maßgebend.



Reibungs- und Eisenverluste bilden die Leerlaufverluste, weil sie von der Belastung unabhängig sind und demnach bei Leerlauf dieselbe Größe wie bei Belastung haben.

Durch diese Verluste wird die Drehung des Ankers gebremst. Infolgedessen muß das Drehmoment des Ankers um dieses Bremsmoment größer sein als das nutzbare Motordrehmoment an der Riemenscheibe.

Die Stromwärmeverluste sind von der Belastung des Motors abhängig (Belastungsverlust). Die Erwärmung der Wicklungen darf eine bestimmte Grenze nicht überschreiten. So z. B. gilt für Maschinen, daß die Grenzerwärmung von Wicklungen nach Klasse Ah 80° C nicht übersteigen darf. Die Grenzerwärmung von Stromwendern darf nicht mehr als 60° C betragen. Diese höchstzulässigen Erwärmungen gelten unter der Voraussetzung, daß die höchste Temperatur der zur Kühlung der Wicklungen usw. dienenden Luft nicht mehr als 35° C beträgt.

Die Belastbarkeit eines Motors ist demnach von seiner Erwärmung abhängig. Ein Motor soll niemals längere Zeit oder gar dauernd über seine Nennleistung belastet werden. Geschieht dies trotzdem, dann besteht die große Gefahr, daß die Isolation der Wicklungen verbrennt. Das Neuwickeln eines Ankers ist mit hohen Kosten verbunden. Außerdem können durch das Fehlen des Motors während der Instandsetzung Betriebsstörungen entstehen, die große Zeit- und Geldverluste für den Betriebsführer und dessen Gefolgschaft haben.

Um die Leistung zu finden, die ein Motor an der Welle nutzbar abgibt, hat man von der zugeführten Leistung die Verluste abzuziehen. Diese Verluste werden in v. H. der Nennleistung ausgedrückt. Bei kleinen Motoren sind diese prozentualen Verluste größer als bei großen. Während z. B. bei einem Gleichstrommotor für 1 kW Nennleistung die Verluste etwa 30 v. H. der Nennleistung betragen, stellen sich die Verluste bei einem Motor für 100 kW Nennleistung auf nur 9 v. H. der Nennleistung. Motoren mit hoher Drehzahl haben bei gleicher Nennleistung geringere Verluste als solche mit niedriger Drehzahl.

Einem Motor, dessen Verluste 20 v. H. der Nennleistung betragen, müssen  $100 + 20 = 120$  v. H. der Nennleistung zugeführt werden. Nennleistung + Verluste ergibt die aufgenommene Leistung und

$$\frac{\text{Nennleistung}}{\text{Nennleistung} + \text{Verluste}} = \text{Wirkungsgrad.}$$

Die Nennleistung gibt der Motor als mechanische Leistung in PS oder kW an der Welle ab, während er die Nennleistung + Verluste als elektrische Leistung in Watt (W) bzw. Kilowatt (kW) an den Klemmen aufnimmt. Infolgedessen erhält man den Wirkungsgrad aus:

$$\text{Wirkungsgrad} = \frac{\text{abgegebene Leistung}}{\text{aufgenommene Leistung}}$$

oder  $\eta = \frac{N_2}{N_1}$ , wenn  $\eta^1$ ) (Eta) den Wirkungsgrad,  $N_1$  die aufgenommene und  $N_2$  die abgegebene Leistung in W oder kW bedeutet.

1)  $\eta$  ist das griechische e und der Anfangsbuchstabe von Effekt und bedeutet so viel wie Wirkung.



Ein Gleichstrommotor nimmt elektrische Leistung in Watt bzw. Kilowatt auf und gibt mechanische Leistung in PS oder kW ab. 1 PS mechanische Leistung entspricht 736 W oder 0,736 kW elektrischer Leistung. Die aufgenommene elektrische Leistung berechnet sich bei Gleichstrom aus  $N = U \cdot I \dots$  Watt, während man die abgegebene mechanische Leistung in Watt aus  $N_{PS} \cdot 736$  erhält. Infolgedessen wird der

Wirkungsgrad  $= \frac{\text{abgegebene Leistung in PS} \times 736}{\text{aufgenommene Leistung in Watt}}$  oder  $\eta = \frac{N_{PS} \cdot 736}{U \cdot I}$ , wenn  $N_{PS}$  die abgegebene mechanische Leistung in PS bedeutet, und  $\eta = \frac{N_{kW} \cdot 1000}{U \cdot I}$ , wenn  $N_{kW}$  die abgegebene mechanische Leistung in kW bedeutet.

Die von einem Gleichstrommotor aufgenommene elektrische Leistung läßt sich durch Einschalten eines Spannungs- und Strommessers leicht feststellen. Zur Ermittlung der vom Motor abgegebenen mechanischen Leistung in PS oder kW kann eine der vorher besprochenen Bremsen benutzt werden.

Aufg. 38: Ein Gleichstrommotor (Bild 62) wird mittels Backenbremse abgebremst. Der Hebelarm  $R$  der Backenbremse ist 716 mm lang. Das Gewicht  $P$  auf der Waagschale beträgt 45 kg. Der Motor macht in der Minute  $n = 1000$  Umdrehungen. Mit einem genau zeigenden Spannungsmesser wird an den

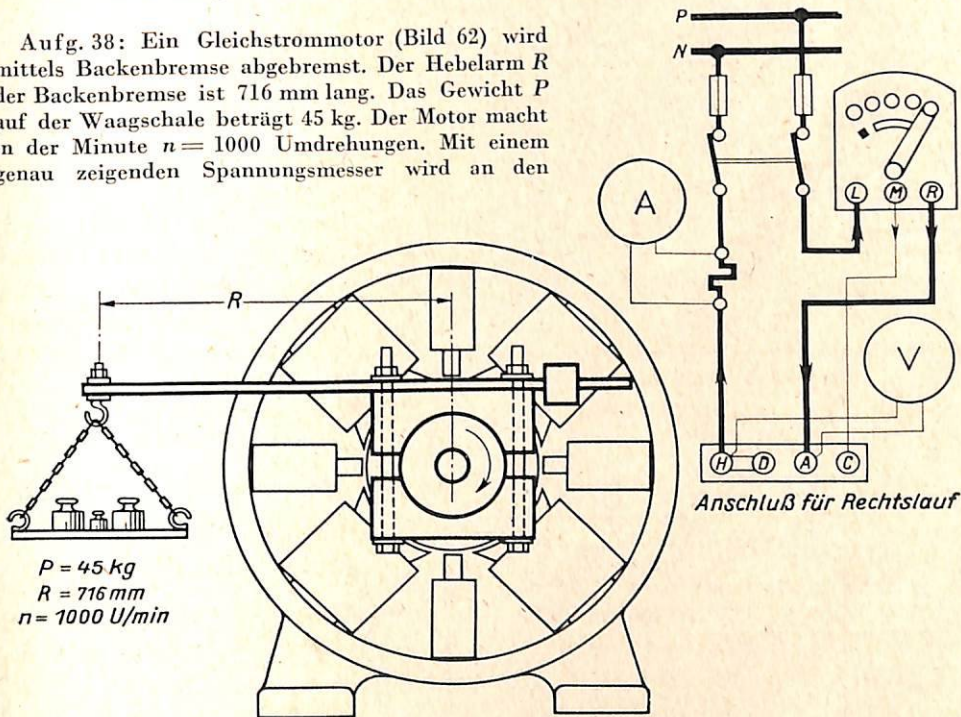


Bild 62. Abbremsen eines Gleichstrommotors mittels Backenbremse

Klemmen des Motors eine Spannung von  $U = 225 \text{ V}$  und mit einem Strommesser eine Motorstromstärke von  $I = 165 \text{ A}$  gemessen. a) Wieviel PS und wieviel kW mechanische Leistung gibt der Motor an der Welle ab? b) Wieviel kW elektrische Leistung nimmt der Motor auf? c) Wie groß ist der Wirkungsgrad des Motors?



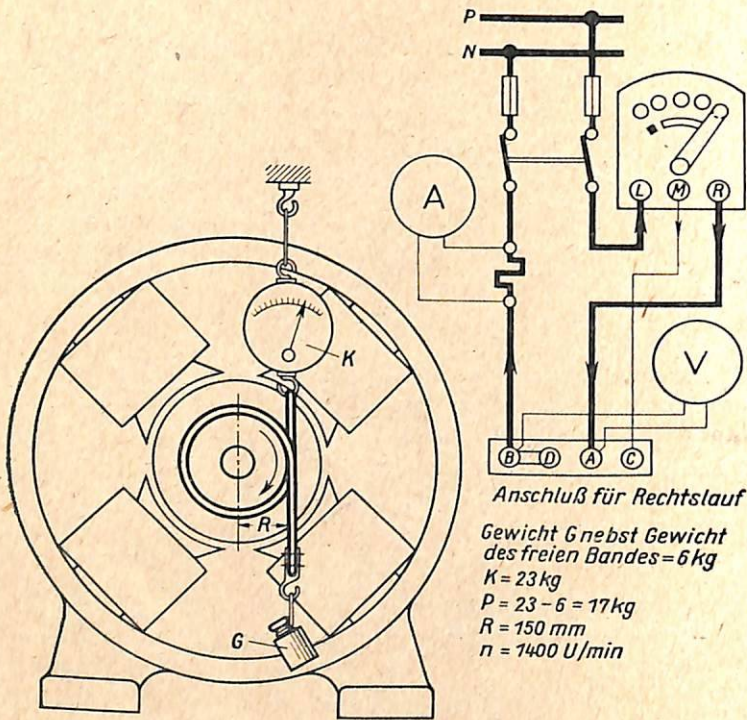


Bild 63. Abbremsen eines Gleichstrommotors mittels Bandbremse

Aufg. 39: Zum Abbremsen eines Gleichstrommotors dient eine Bandbremse (Bild 63). Der Zeiger des Zugmessers (Federwaage) zeigt einen Zug von  $K = 23 \text{ kg}$  an. Das Gewicht  $G$  nebst dem Gewicht des freien Bandes beträgt  $6 \text{ kg}$ . Der Motor macht  $n = 1400$  Umdrehungen in der Minute. Am Spannungsmesser wird eine Klemmenspannung von  $U = 445 \text{ V}$  und am Strommesser eine Motorstromstärke von  $I = 10 \text{ A}$  abgelesen. a) Wie groß ist die vom Motor an der Welle abgegebene mechanische Leistung  $N_{PS}$  bzw.  $N_{kW}$ ? b) Wie groß ist die vom Motor aufgenommene elektrische Leistung in Watt? c) Wie groß ist der Wirkungsgrad dieses Motors?

Nennspannung in Volt	<i>n</i> etwa 2000				<i>n</i> etwa 1500				<i>n</i> etwa 1000							
	Nennleistung		<i>n</i>	$\eta$	Nennleistung		<i>n</i>	$\eta$	Nennleistung		<i>n</i>	$\eta$				
	kW	PS etwa			kW	PS etwa			kW	PS etwa						
110 und 220	0,2	0,27	2000	67	0,125	0,17	1400	64	0,125	0,17	910	59				
	0,3	0,4	2000	69	0,2	0,27	1400	66								
	0,45	0,6	2000	71	0,33	0,45	1400	69					0,2	0,27	920	62
	0,7	1	2000	74	0,5	0,7	1400	71					0,3	0,4	920	65
110 220 und 440	1,1	1,5	2000	76	0,8	1,1	1410	74	0,5	0,7	930	68				
	1,5	2	2000	77	1,1	1,5	1410	75	0,7	1	930	70				
	2,2	3	2000	79	1,5	2	1410	77	1	1,4	935	72				
	3	4	2000	80,5	2,2	3	1420	78	1,4	1,9	935	74				
440	4	5,5	2000	81,5	3	4	1420	80	1,8	2,5	940	75				
	5,5	7,5	2000	82,5	4	5,5	1430	81	2,4	3,3	940	77				
	7,5	10	2000	83,5	5,5	7,5	1430	82	3,3	4,5	950	78				
	10	13,5	2000	84	7,5	10	1440	83	4,5	6	950	79,5				
					11	15	1440	84	7	9,5	950	81,5				



In vorstehender Zahlentafel ist für offene Gleichstrom-Nebenschlußmotoren üblicher Ausführung der Wirkungsgrad  $\eta^1$ ) angegeben, den solche Motoren bei einer bestimmten Nennspannung in V, Nennleistung in kW und Drehzahl  $n$  haben sollen. ( $n$  bedeutet die Drehzahl in der Minute.)

### 8. Die verschiedenen Motorarten bei Gleichstrom und ihre Eigenschaften

Nach der Schaltung der Magnetwicklung zum Anker unterscheidet man Reihenschlußmotoren, Nebenschlußmotoren und Doppelschlußmotoren.

Beim **Reihenschlußmotor** sind Anker und Magnetwicklung in Reihe (hintereinander) geschaltet (Bild 64). Infolgedessen fließt der gesamte Ankerstrom (Hauptstrom) auch durch die Magnetwicklung. Dieser Motor wird auch Hauptstrommotor genannt.

Für die Erzeugung des magnetischen Feldes ist eine bestimmte Amperewindungszahl (Aw) erforderlich. Ist die Amperezahl groß, dann kann die Windungszahl klein sein. Da beim Reihenschlußmotor der gesamte Strom durch die Windungen der Magnetwicklung fließt, genügt eine geringe Windungszahl. Der Leiterquerschnitt dieser Windungen muß wegen der großen Stromstärke groß sein. Infolgedessen hat der Reihenschlußmotor eine Magnetwicklung aus wenig Windungen und dickem Draht.

Die Stromstärke im Anker ist von der Belastung des Motors abhängig. Sie steigt mit zunehmender und fällt mit abnehmender Belastung. Nimmt die Stromstärke durch Mehrbelastung

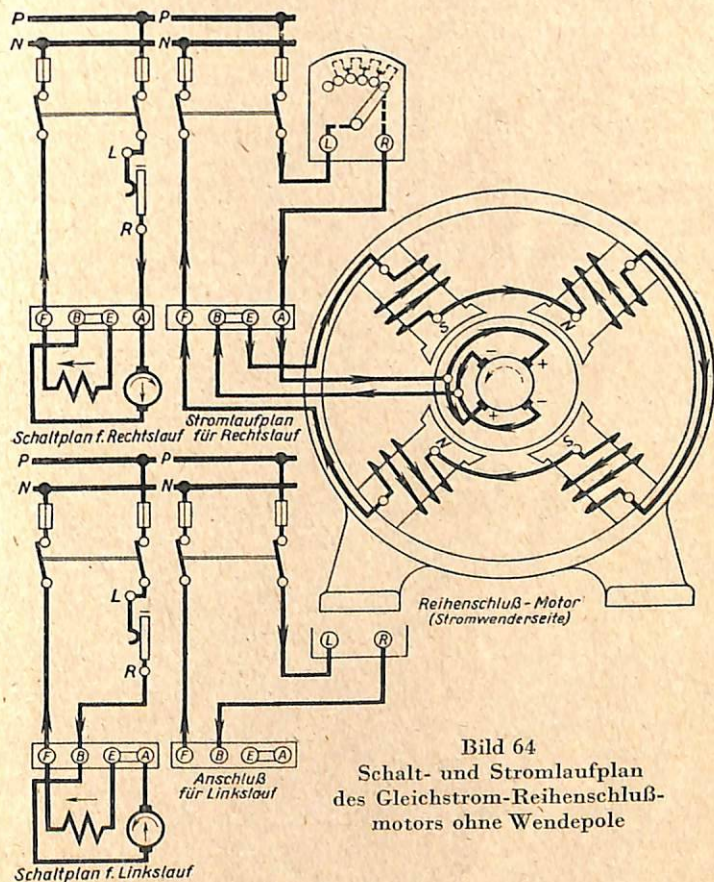


Bild 64  
Schalt- und Stromlaufplan  
des Gleichstrom-Reihenschluß-  
motors ohne Wendepole

<sup>1)</sup> In der Zahlentafel ist  $\eta$  in v. H. angegeben, so daß man z. B. für  $\eta = 84$  auch  $\frac{84}{100}$  oder 0,84 schreiben kann.



zu, dann fließen auch mehr Ampere durch die Magnetwicklung. Dadurch wird die Zahl der Amperewindungen größer und das magnetische Feld stärker.

Sinkt durch Abnahme der Belastung die Stromstärke, dann wird auch die Amperewindungszahl der Magnetwicklung kleiner und damit das magnetische Feld schwächer. Die Drehzahl des Ankers hängt von der Stärke des magnetischen Feldes ab. Wird das magnetische Feld stärker, dann nimmt die Drehzahl des Ankers ab; wird das magnetische Feld schwächer, dann steigt die Drehzahl. Läuft der Reihenschlußmotor unbelastet (leer), dann ist die Stromstärke in der Magnetwicklung sehr gering und das magnetische Feld sehr schwach. Dadurch steigt die Drehzahl des Ankers gefährlich hoch an. Man sagt, der Motor „geht durch“.

Beim „Durchgehen“ besteht die große Gefahr, daß der Anker auseinanderfliegt. Infolgedessen dürfen Reihenschlußmotoren nie unbelastet, d. h. leer laufen. Sie werden entweder mit der anzutreibenden Welle direkt gekuppelt oder der Antrieb erfolgt durch Zahnräder oder Ketten. Für Riemenantrieb sind Reihenschlußmotoren ungeeignet, weil Riemen reißen oder während des Betriebes von den Riemenscheiben abrutschen können, so daß bei diesem Antrieb die Möglichkeit des „Durchgehens“ besteht.

Daß der Reihenschlußmotor seine Drehzahl mit der Belastung ändert, hat seinen Grund in der Abhängigkeit der Drehzahl von der Gegen-EMK im Anker. Die Höhe dieser Gegen-EMK ist von der Stärke des magnetischen Feldes und von der Geschwindigkeit abhängig, mit der die Ankerdrähte das magnetische Feld schneiden. Weil bei starker Belastung des Motors auch das magnetische Feld stark ist, kann die Geschwindigkeit der Ankerdrähte gering sein, d. h. es genügt eine geringe Drehzahl des Ankers, um in dessen Wicklung die erforderliche Gegen-EMK zu erzeugen. Diese Gegen-EMK ist nur wenig niedriger als die Klemmenspannung  $U$ , an die der Motor angeschlossen ist (Gegen-EMK = Klemmenspannung — Spannungsabfall im Anker). Bei schwachem magnetischem Feld muß sich der Anker entsprechend schneller drehen, um die notwendige Zahl von Kraftlinien zu schneiden. Bei Leerlauf ist das magnetische Feld des Reihenschlußmotors infolge der geringen Stromstärke in der Magnetwicklung sehr schwach. Die Folge hiervon muß ein gefährlich hohes Ansteigen der Drehzahl sein, um auch bei dieser geringen Zahl von Kraftlinien die erforderliche Gegen-EMK erzeugen zu können.

Läuft der Reihenschlußmotor belastet an, dann fließt durch den Anker und die Magnetwicklung ein starker Strom. Die Zugkraft des Motors ist sowohl von der Stärke des Stromes im Anker als auch von der Stärke des magnetischen Feldes abhängig. Da beide beim Anlauf des Motors stark sind, zieht der Reihenschlußmotor kräftig an. Man sagt, der Reihenschlußmotor entwickelt beim Anlauf eine hohe Anzugskraft.

Wegen dieser guten Eigenschaft und weil er seine Drehzahl der Belastung anpaßt, verwendet man diesen Motor zum Antrieb von Fahrzeugen und Kranen.

Das Anlassen erfolgt durch einen Anlasser, dessen Widerstand beim Anlauf mit dem Anker und der Magnetwicklung in Reihe geschaltet ist (Bild 64). Die Netzleitung  $P$  wird mit der Klemme  $L$  des Anlassers, die Klemme  $R$  des Anlassers mit der Klemme  $A$  des Klemmbretts und die Netzleitung  $N$  mit der Klemme  $F$  des Klemmbretts verbunden. Die Klemmen  $B$  und  $E$  werden durch eine Brücke miteinander verbunden.



Besondere Eigenschaften des Reihenschlußmotors. 1. Er entwickelt ein großes Anlaufmoment. 2. Er paßt seine Drehzahl der Belastung an, d. h. er läuft bei schwacher Belastung schneller als bei starker (weiche Drehzahl). 3. Er geht bei Leerlauf durch.

Verwendungsmöglichkeit. Er ist überall da zu verwenden, wo ein großes Anlaufmoment erforderlich und bei Belastungsänderung eine Drehzahländerung erwünscht ist, wie z. B. bei Straßenbahnen, Vollbahnen, Elektromobilen, Elektrokarren, Kranen, Lokomotivdreh scheiben, Fahrbühnen, Aufzügen.

Beim Nebenschlußmotor ist die Magnetwicklung zum Anker parallel, d. h. im Nebenschluß geschaltet (Bild 65). Die Magnetwicklung ist infolgedessen dauernd an die volle Netzspannung  $U$  angeschlossen. Um zu verhindern, daß durch die Magnetwicklung große Leistungsverluste entstehen, darf nur ein ganz geringer Teil des Hauptstromes

durch diese Wicklung fließen. Damit die notwendigen Amperewindungen ( $A_w$ ) zur Erzeugung des magnetischen Feldes entstehen, muß wegen der geringen Amperezahl die Windungszahl der Magnetwicklung hoch sein. Infolgedessen besteht die Magnetwicklung bei Nebenschlußmotoren aus vielen Windungen und dünnem Draht. Da die Enden der Magnetwicklung direkt an die volle Netzspannung angeschlossen werden, ist die Stromstärke in der Magnetwicklung bei Leerlauf genau so groß wie bei Vollast. Dadurch bleibt die Stärke des magnetischen Feldes bei allen Belastungen dieselbe. Belastungsschwankungen haben infolgedessen keinen

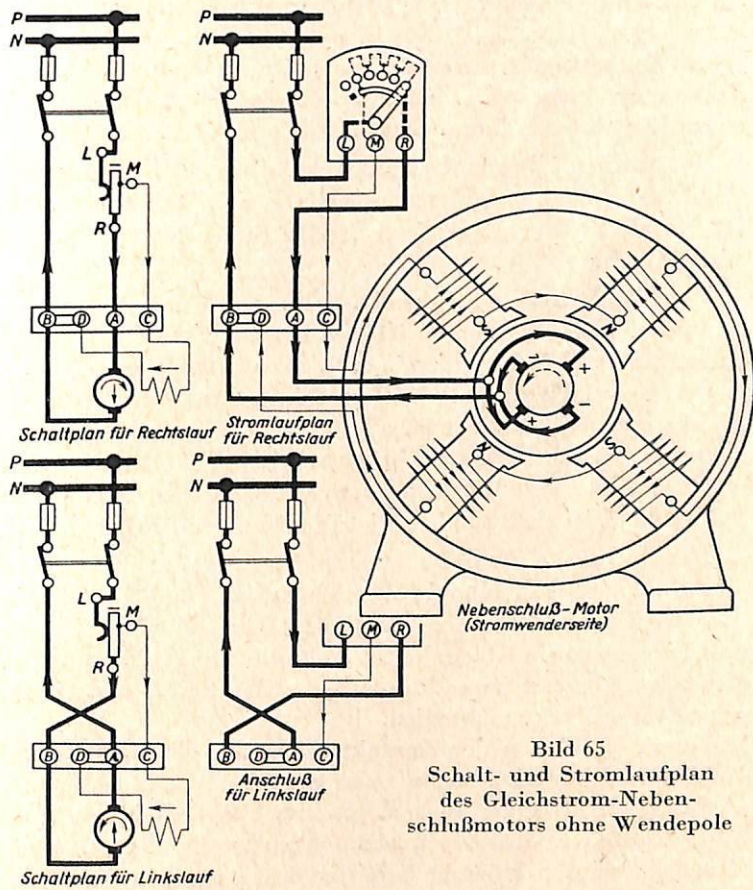


Bild 65  
Schalt- und Stromlaufplan  
des Gleichstrom-Nebenschlußmotors ohne Wendepole

Einfluss. Die Magnetwicklung ist infolgedessen dauernd an die volle Netzspannung  $U$  angeschlossen. Um zu verhindern, daß durch die Magnetwicklung große Leistungsverluste entstehen, darf nur ein ganz geringer Teil des Hauptstromes durch diese Wicklung fließen. Damit die notwendigen Amperewindungen ( $A_w$ ) zur Erzeugung des magnetischen Feldes entstehen, muß wegen der geringen Amperezahl die Windungszahl der Magnetwicklung hoch sein. Infolgedessen besteht die Magnetwicklung bei Nebenschlußmotoren aus vielen Windungen und dünnem Draht. Da die Enden der Magnetwicklung direkt an die volle Netzspannung angeschlossen werden, ist die Stromstärke in der Magnetwicklung bei Leerlauf genau so groß wie bei Vollast. Dadurch bleibt die Stärke des magnetischen Feldes bei allen Belastungen dieselbe. Belastungsschwankungen haben infolgedessen keinen



Einfluß auf die Stärke des magnetischen Feldes. Die Drehzahl des Ankers ist von der Stärke des magnetischen Feldes abhängig. Da dies sich nicht ändert, bleibt auch die Drehzahl bei allen Belastungen praktisch unverändert. Während beim Reihenschlußmotor die Drehzahl mit der Belastung fällt oder steigt, haben beim Nebenschlußmotor Belastungsänderungen praktisch keinen Einfluß auf die Drehzahl. Der Nebenschlußmotor geht bei Leerlauf nicht durch. Ein Durchgehen des Ankers ist bei Leerlauf nur dann möglich, wenn die Magnetwicklung unterbrochen wird oder falsch angeschlossen ist.

Beim Reihenschlußmotor wird beim Anlauf mit Last das magnetische Feld und auch der Ankerstrom erheblich stärker als beim Anlauf ohne Last. Anders ist es beim Nebenschlußmotor. Sein magnetisches Feld ist beim Anlauf mit Last nicht stärker als beim Anlauf ohne Last. Nur der Ankerstrom wird beim Anlauf erheblich stärker.

Die Anzugskraft ist aber nicht nur vom Ankerstrom, sondern auch von der Stärke des magnetischen Feldes abhängig. Hieraus folgt, daß der Nebenschlußmotor nicht so kräftig anziehen kann wie der Reihenschlußmotor.

Besondere Eigenschaften des Nebenschlußmotors. 1. Er entwickelt ein nicht so großes Anlaufmoment wie der Reihenschlußmotor. 2. Seine Drehzahl ist bei allen Belastungen fast dieselbe (harte Drehzahl). 3. Er geht bei Leerlauf nicht durch.

Verwendungsmöglichkeit. Er ist überall da zu verwenden, wo kein sehr großes Anlaufmoment erforderlich ist und die Drehzahl bei allen Belastungen praktisch unverändert bleiben muß, wie z. B. beim Antrieb von Transmissionen, Werkzeugmaschinen und anderen Arbeitsmaschinen für gleiche Drehzahl. Weil er bei Leerlauf nicht durchgeht, kann er für alle Antriebe Verwendung finden.

Spannungsschwankungen haben sowohl auf die Drehzahl als auch auf die Zugkraft bedeutenden Einfluß. Infolgedessen soll der Querschnitt der Zuleitungen zu Nebenschlußmotoren nicht zu klein sein. Dies ist besonders bei großen Motoren zu beachten.

Der Anlasser für Nebenschlußmotoren besitzt drei Anschlußklemmen, die mit den Buchstaben *L*, *M* und *R* bezeichnet sind (Bild 65). Die Klemme *L* wird mit der Netzleitung *P*, die Klemme *M* mit der Klemme *C* am Klemmbrett und die Klemme *R* mit Klemme *A* am Klemmbrett verbunden. Die Netzleitung *N* wird an die Klemme *B* des Klemmbrettes angeschlossen. Die Klemmen *B* und *D* am Klemmbrett werden durch eine Brücke verbunden.

Durch Verbinden der Kontaktschiene für die Magnetwicklung mit dem ersten Widerstandskontakt des Anlassers wird die Magnetwicklung beim Ausschalten des Anlassers nicht unterbrochen, sondern bleibt über den Widerstand des Anlassers und den Anker geschlossen. Dadurch wird verhindert, daß beim Ausschalten in der Magnetwicklung eine hohe Selbstinduktion entsteht. Das Abschalten des Anlassers erfolgt infolgedessen funkenfrei.

Zwei Schaltungsfehler, die beim Anschließen von Nebenschlußmotoren vorkommen, sind in den Bildern 66 und 67 angegeben. In Bild 66 ist durch falsches Anschließen der Zuleitungen am Anker die Magnetwicklung zum Anlasser parallel geschaltet. Ein so angeschlossener Motor läuft zwar gut an, weil die Magnetwicklung beim Anlauf erst fast an der



vollen Netzspannung liegt. Beim Weiterschalten der Anlasserkurbel nach rechts wird die Spannung an den Klemmen der Magnetwicklung immer geringer und damit das magnetische Feld schwächer. Ist die Anlasserkurbel ganz eingeschaltet, dann ist die Magnetwicklung kurzgeschlossen. Läuft der Motor leer, dann geht er durch. Ist er belastet, dann wird die Ankerstromstärke sehr hoch, was zu einem Durchschmelzen der Sicherungen oder Abschalten des Motorschutzschalters führt. Sind die Schmelzsicherungen durch starke Kupferdrähte überbrückt, dann wird die Ankerwicklung verbrennen.

In Bild 67 ist die Zuleitung zum Anlasser statt an Klemme *L* an Klemme *R* und die Verbindungsleitung zum Anker an Klemme *L* angeschlossen. Bei dieser Schaltung ist die Magnetwicklung beim Anlauf parallel zum Anker geschaltet. Die Ankerspannung ist im Augenblick

des Anlaufs sehr klein ( $U_A = I_A \cdot R_A$ ). Infolgedessen ist auch das magnetische Feld sehr schwach. Beim Weiterschalten der Anlasserkurbel nach rechts wird die Ankerspannung und damit auch die Klemmenspannung der Magnetwicklung immer höher. Das magnetische Feld wird stärker. Wenn die Anlasserkurbel ganz eingeschaltet ist, liegt die Magnetwicklung an der vollen Netzspannung. Der Strom in der Magnetwicklung hat jetzt seine volle Stärke. Damit hat auch das magnetische Feld seine volle Stärke erreicht.

Ein so angeschlossener Motor nimmt auch beim Anlauf ohne Last einen sehr starken Ankerstrom auf. Während des Betriebes läuft er mit seiner richtigen Stromstärke.

Wird die Anlasserkurbel ausgeschaltet, dann bleibt die Magnetwicklung über den Widerstand des Anlassers an die volle Netzspannung angeschlossen. Die Magnetwicklung läßt sich jetzt nur durch den Hauptschalter vom Netz abschalten. Beim Ausschalten des Haupt-

schalters entsteht an dessen Kontakten ein starker Unterbrechungsfunke. Ein einfaches Mittel, den richtigen Anschluß der Leitungen am Anlasser festzustellen, besteht nach vorstehendem darin, daß man nach dem Abschalten der Anlasserkurbel beobachtet, ob beim Ausschalten des Hauptschalters an dessen Kontakten Unterbrechungsfunken auftreten. Man kann auch, nachdem der Anlasser ausgeschaltet ist, mit einem Stück Eisen feststellen, ob die Polkerne noch stark magnetisch sind. Bei falscher Schaltung wird das Stück Eisen kräftig angezogen und festgehalten. Häufig wird der Motor nur durch Ausschalten des Anlassers stillgesetzt. Der Hauptschalter bleibt eingeschaltet. In solchen Fällen ist bei falschem Anschluß des Anlassers die Magnetwicklung dauernd an die volle Netzspannung angeschlossen. Dies bedeutet besonders dann, wenn der Motor täglich nur wenige Stunden läuft, einen großen Verlust und damit unnötige Kosten. Außerdem besteht die Gefahr, daß die Magnetwicklung bei ruhendem Anker nicht genügend gekühlt und dadurch übermäßig heiß wird. Infolgedessen trocknet die Isolation aus, wird brüchig und schlecht. Es kann sogar vorkommen, daß die Magnetwicklung, nachdem der Motor längere Zeit durch den Anlasser abgeschaltet ist, verbrennt.

Der **Doppelschlußmotor (Kompondmotor)** besitzt zwei Magnetwicklungen (Bild 68). Die eine ist mit dem Anker in Reihe (Reihenschlußwicklung), die andere

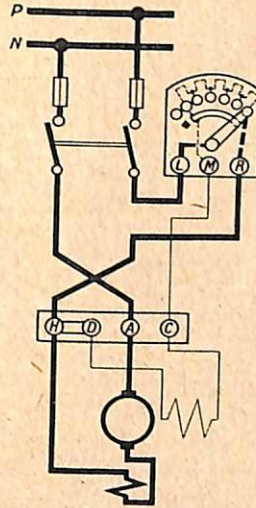


Bild 66  
Falscher Anschluß  
der Netzleitungen  
am Klemmbrett

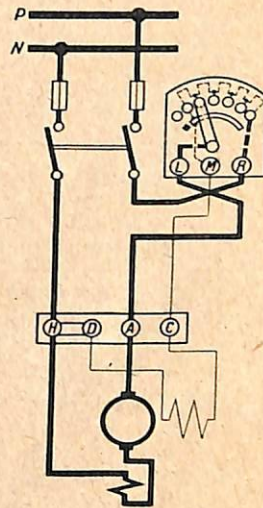


Bild 67  
Falscher Anschluß  
des Anlassers



dem Anker neben (Nebenschlußwicklung) geschaltet. Man kann die Reihenschlußwicklung so schalten, daß sie entweder die Wirkung der Nebenschlußwicklung unterstützt (Bild 69) oder schwächt (Bild 70). Doppelschlußmotoren, deren Nebenschlußwicklung durch die Reihenschlußwicklung unterstützt wird, haben den Vorteil, daß

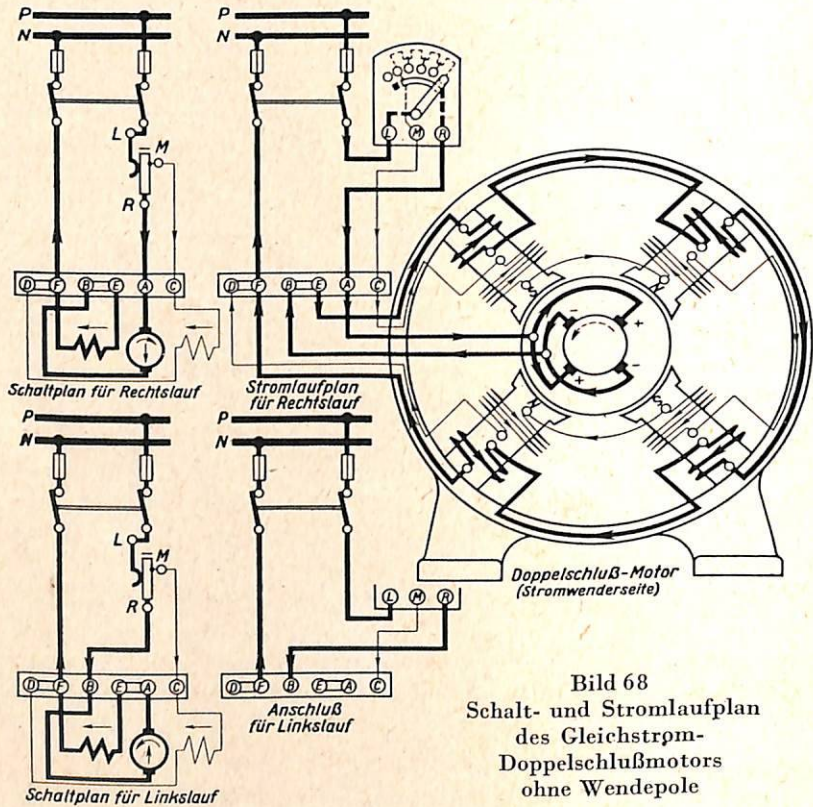


Bild 68  
Schalt- und Stromlaufplan  
des Gleichstrom-  
Doppelschlußmotors  
ohne Wendepole

sie beim Anlauf kräftiger anziehen als Nebenschlußmotoren. Außerdem sind sie gegen Belastungsstöße unempfindlicher als diese. Wenn sie auch nicht so kräftig anziehen wie Reihenschlußmotoren, so haben sie diesen gegenüber doch den Vorteil, daß sie bei Leerlauf nicht durchgehen, weil durch das magnetische Feld der Nebenschlußwicklung die Drehzahl des Ankers nach oben begrenzt wird.

Die Drehzahl solcher Doppelschlußmotoren ändert sich bei Belastungsschwankungen stärker als bei Nebenschlußmotoren. Infolgedessen verwendet man sie hauptsächlich zum Antrieb von Arbeitsmaschinen mit Schwungrädern, damit die in den Schwungrädern aufgespeicherte Energie beim Sinken der Drehzahl, hervorgerufen durch Belastungsstöße, voll zur Auswirkung kommt (schwere Scheren, Stanzen, Walzenstraßen usw.).

Soll der Motor nur beim Anlauf kräftig anziehen, während des Betriebes aber als Nebenschlußmotor mit praktisch gleichbleibender Drehzahl laufen, dann ist die



Reihenschlußwicklung nur für die Zeit des Anlaufs einzuschalten. Sie wird ausgeschaltet, sobald der Motor seine volle Drehzahl erreicht hat.

Wird die Reihenschlußwicklung so geschaltet, daß sie die Wirkung der Nebenschlußwicklung schwächt, dann bleibt, wenn die Zahl der Reihenschlußwindungen richtig gewählt ist, die Drehzahl zwischen Leerlauf und Vollast unverändert. Diese Eigenschaft wird nur selten für bestimmte Zwecke gefordert. Ihr steht der Nachteil gegenüber, daß ein so geschalteter Motor nicht so kräftig anzieht wie der Nebenschlußmotor. Außerdem besteht bei dieser Schaltung die Gefahr, daß der Motor bei Überlastung durchgehen will, weil in diesem Falle das magnetische Feld der Nebenschlußwicklung durch die starke Gegenwirkung der Reihenschlußwicklung zu sehr geschwächt wird. Diese Schaltung wird infolgedessen nur selten angewendet. Ein weiterer Nachteil dieser Gegenschaltung besteht noch darin, daß in besonderen Fällen bei kurzzeitiger starker Überlastung des Motors die Stromstärke im Anker und damit die Stromstärke in der Reihenschlußwicklung so groß wird, daß ein Umpolen der Magnete eintritt. Der Motor ändert dann während des Betriebes seine Richtung, was unter Umständen betriebsgefährlich ist.

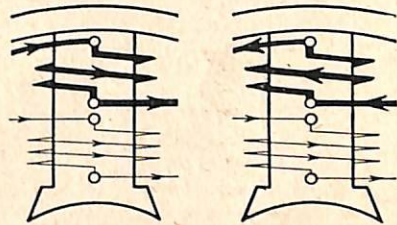


Bild 69 und 70

Schaltung der Reihenschlußwicklung beim Gleichstrom-Doppelschlußmotor

Besondere Eigenschaften des Doppelschlußmotors (Nebenschluß- und Reihenschlußwicklung im gleichen Sinne geschaltet).

1. Sein Anlaufmoment ist größer als beim Nebenschlußmotor, aber nicht so groß wie beim Reihenschlußmotor. 2. Bei Belastungsänderungen ändert sich seine Drehzahl stärker als beim Nebenschlußmotor, aber nicht so stark wie beim Reihenschlußmotor (Drehzahl weicher als beim Nebenschlußmotor). 3. Er geht bei Leerlauf nicht durch.

Verwendungsmöglichkeit. Er ist zum Antrieb von Arbeitsmaschinen mit Schwungmassen (Schwungrädern), wie großen Scheren, Stanzen, Walzenstraßen usw., gut geeignet.

## 9. Gleichstrommotoren mit Wendepolen

Aus den gleichen Gründen wie bei Generatoren wendet man auch bei Motoren für Gleichstrom Wendepole an, die als Hilfspole in der Mitte zwischen den Hauptpolen befestigt sind. Ihre Magnetwicklung ist mit dem Anker in Reihe geschaltet. Weil sie vom gesamten Ankerstrom durchflossen wird, besteht sie aus wenig Windungen dicken Drahtes. Bei Gleichstrommotoren muß die Wendepolwicklung so geschaltet werden, daß in der Drehrichtung des Ankers gesehen auf jeden Hauptpol ein gleichpoliger Wendepol folgt, d. h. auf einen Nord-Hauptpol muß ein Nord-Wendepol folgen. (Bei Generatoren umgekehrt.)

Falsche Schaltung der Wendepolwicklung macht sich durch starkes Bürstenfeuer bemerkbar. Die richtige Polarität der Wendepole kann bei kleineren Motoren



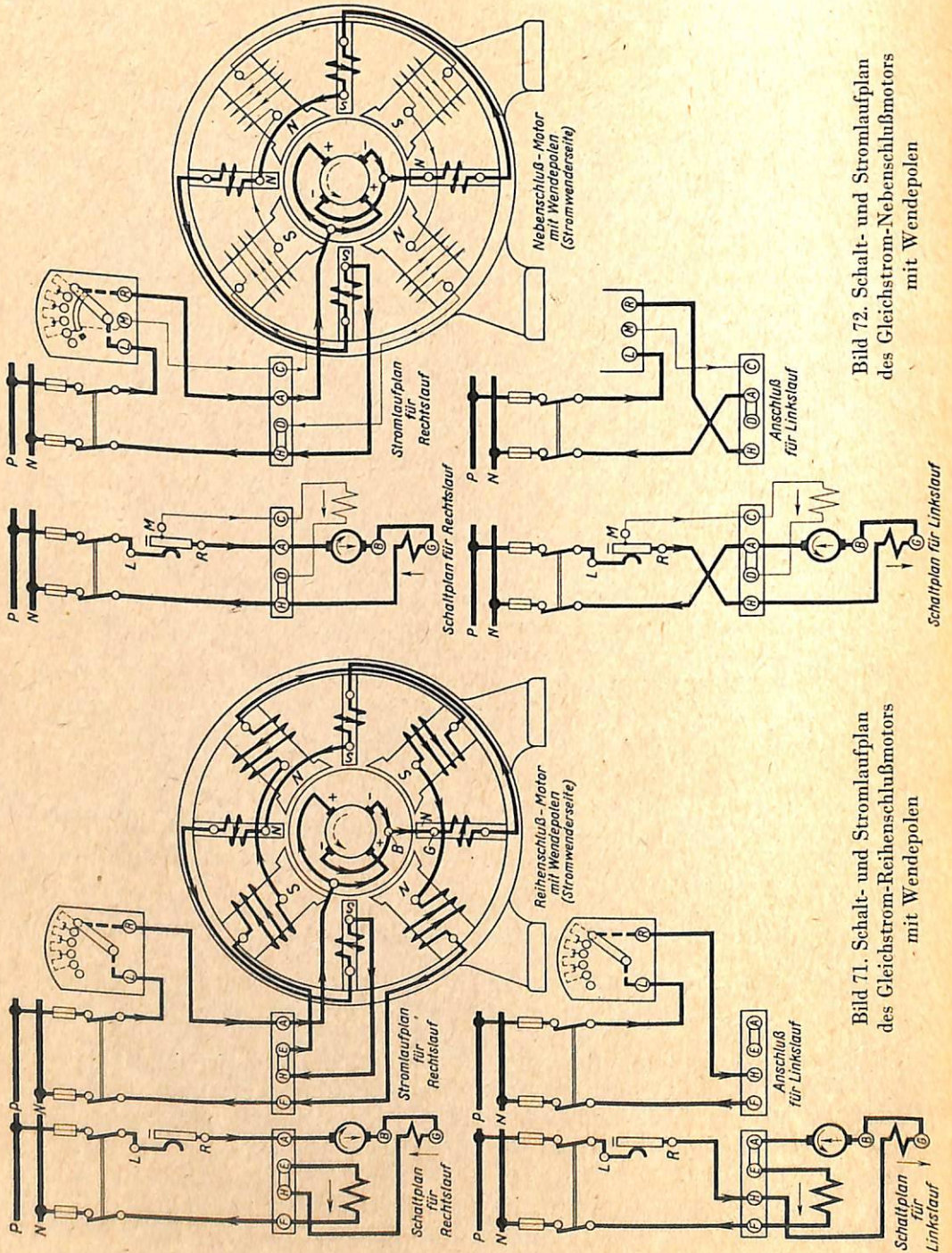


Bild 72. Schalt- und Stromlaufplan des Gleichstrom-Nebenschlußmotors mit Wendepolen

Bild 71. Schalt- und Stromlaufplan des Gleichstrom-Reihenschlußmotors mit Wendepolen



durch Festhalten des Ankers bei eingeschalteter Haupt- und Wendepolwicklung mit einem Kompaß bestimmt werden.

Motoren mit Wendepolen sind zu verwenden, wenn starke und häufige Belastungsänderungen und Überlastungen auftreten. Sie sind außerdem für solche Betriebe besonders geeignet, in denen große Drehzahländerungen und häufiges Umkehren der Drehrichtung verlangt wird. Infolgedessen werden Motoren zum Antrieb von Straßen- und Vollbahnen, Elektromobilen, Hebezeugen, Walzwerken, Transportanlagen, Werkzeugmaschinen usw. immer mit Wendepolen ausgerüstet.

In Bild 71 ist ein Reihenschlußmotor mit Wendepolen, in Bild 72 ein Nebenschlußmotor mit Wendepolen und in Bild 73 ein Doppelschlußmotor mit Wendepolen dargestellt.

### 10. Umkehr des Drehsinnes von Gleichstrommotoren

Der Drehsinn des Ankers ist von der Richtung des magnetischen Feldes der Pole und von der Richtung des Stromes im Anker abhängig (Linke-Hand-Regel). Wird eine von beiden umgekehrt, dann muß sich auch der Drehsinn des Ankers umkehren. Werden Richtung des Feldes und Richtung des Ankerstromes gleichzeitig umgekehrt, dann bleibt der Drehsinn der gleiche.

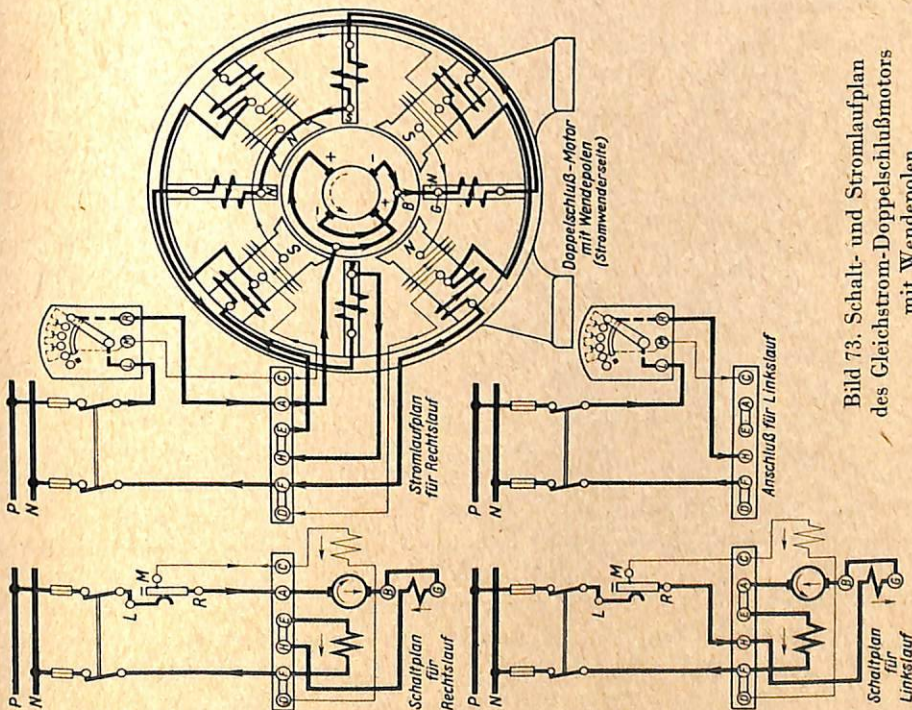


Bild 73. Schalt- und Stromlaufplan des Gleichstrom-Doppelschlußmotors mit Wendepolen



Die Richtung des magnetischen Feldes hängt von der Stromrichtung in der Magnetwicklung ab. Infolgedessen gilt für die Umkehr des Drehsinnes folgende Regel:

*Bei Gleichstrommotoren wird der Drehsinn des Ankers dadurch geändert, daß man entweder die Stromrichtung im Anker oder in der Magnetwicklung umkehrt.*

Bei Motoren, die häufig ihren Drehsinn wechseln müssen, ist der Drehsinn immer durch Umkehrung der Stromrichtung im Anker zu ändern (Bild 71 bis 73).

Die Stromrichtung in der Wendepolwicklung hängt von der Stromrichtung im Anker ab. Infolgedessen ist bei Motoren mit Wendepolen sowohl die Stromrichtung im Anker als auch in der Wendepolwicklung umzukehren. In der Regel ist Klemme *B* des Ankers mit Klemme *G* der Wendepolwicklung innerhalb des Motorgehäuses verbunden und nur Klemme *H* der Wendepolwicklung herausgeführt, so daß mit der Umkehrung der Stromrichtung im Anker auch die Umkehrung der Stromrichtung in der Wendepolwicklung erfolgt.

Die Feststellung des Drehsinnes eines Motors erfolgt von der Antriebsseite aus (Riemenscheibenseite, Kupplungsseite). Als üblicher Drehsinn gilt der Rechtslauf (Uhrzeigersinn).

#### Bedeutung der Stromrichtungspfeile in den Schaltplänen für Gleichstrommaschinen.

In den Schaltplänen für Gleichstrommaschinen ist die gegenseitige Lage der Wicklungen so gewählt, daß der Stromrichtungspfeil in der Richtung der Achse der Wicklung gleichzeitig die Richtung des magnetischen Feldes der betreffenden Wicklung angibt. Bei Motoren z. B. ist der Ankerstrom bei Rechtslauf von oben nach unten (von *A* nach *B*) gerichtet (Bild 74), weil für Motoren die Regel gilt, daß der

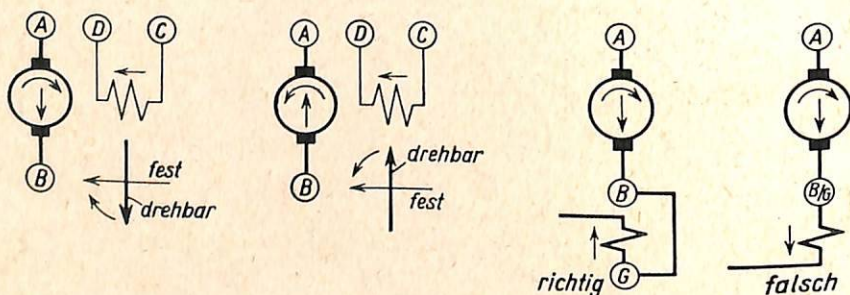


Bild 74—77. Bedeutung der Stromrichtungspfeile in den Schaltplänen für Gleichstrommaschinen

Strom bei Rechtslauf in der alphabetischen Buchstabenfolge fließen soll, also von *A* nach *B*, von *C* nach *D*, von *E* nach *F* und von *G* nach *H*. Dieser Stromrichtungspfeil gibt sowohl die Richtung des Ankerstromes als auch die Richtung des von der Ankerwicklung bei dieser Stromrichtung erzeugten Ankerfeldes an. Der Strom in der Feldwicklung ist von *C* nach *D* gerichtet. Feldstrom und das von diesem erzeugte Magnetfeld stehen senkrecht zur Richtung des Ankerstromes und Ankerfeldes. Ströme, die senkrecht zueinander stehen, suchen sich gleichzurichten. Da die Feld-



wicklung feststeht, muß sich der drehbar gelagerte Anker rechtsherum, d. h. im Drehsinn des Uhrzeigers drehen (Rechtslauf). Ist der Ankerstrom von unten nach oben (von *B* nach *A*) gerichtet (Bild 75), dann muß sich der Anker linksherum, d. h. entgegen dem Drehsinn des Uhrzeigers drehen (Linkslauf).

Der Stromrichtungspfeil in der Wendepolwicklung muß dem Stromrichtungspfeil im Anker stets entgegen gerichtet sein, weil ja das Wendepolfeld das Ankerquerfeld aufheben soll. Bild 76 zeigt den richtigen und Bild 77 den falschen Anschluß.

## II. Regelung der Drehzahl bei Gleichstrommotoren

Die Drehzahl eines Gleichstrommotors ist einmal von der Klemmenspannung am Anker und außerdem von der Stärke des magnetischen Feldes abhängig. Bleibt die Netzspannung  $U$  unverändert, was in der Regel der Fall ist, dann läßt sich die Ankerspannung durch Vorschalten von Widerstand in den Ankerstromkreis unter die Netzspannung herabmindern. Eine Steigerung der Ankerspannung über die Netzspannung ist bei der Annahme, daß die Netzspannung unverändert bleibt, nicht möglich. Infolgedessen kann durch Einschalten von Widerstand in den Ankerstromkreis die Drehzahl des Ankers wohl unter die Nenndrehzahl herabgemindert, aber nicht über die Nenndrehzahl gesteigert werden.

In Bild 78 ist der Anschlußplan eines Nebenschlußmotors mit Anlasser, der auch gleichzeitig zum Regeln der Drehzahl dient, dargestellt. Ein solcher Widerstand wird Regelanlasser genannt. Steht die Kurbel des Widerstandes auf dem Endkontakt 6, dann liegt der Anker an der vollen Netzspannung. Seine Drehzahl entspricht in diesem Falle, wenn der Motor voll belastet ist, der Nenndrehzahl. Wird die Kurbel auf den Kontakt 5 zurückgedreht, dann ist der Widerstand zwischen Kontakt 5 und 6 dem Anker vorgeschaltet. Durch diesen Widerstand entsteht ein Spannungsabfall  $u_w = I_a \cdot R_w$ . Um diesen Abfall wird die Ankerspannung vermindert. Die Drehzahl des Ankers sinkt jetzt angenähert um denselben Prozentsatz wie die Klemmenspannung am Anker. Beträgt z. B. der Spannungsabfall im Vorschaltwiderstand 10 v. H. der Nennspannung, dann nimmt auch die Drehzahl des Ankers um 10 v. H. der Nenndrehzahl ab. Wird die Kurbel auf den Widerstandskontakt 4 zurückgeschaltet, dann wird der Spannungsabfall im Vorschaltwiderstand höher und die Ankerspannung um denselben Betrag niedriger, was ein weiteres Sinken der Drehzahl zur Folge hat.

Das Einschalten von Widerstand in den Ankerstromkreis ist zwar ein einfaches Mittel, um die Drehzahl unter die Nenndrehzahl herabzuregulieren, es hat aber den Nachteil, daß ein entsprechend großer Teil der elektrischen Leistung durch den

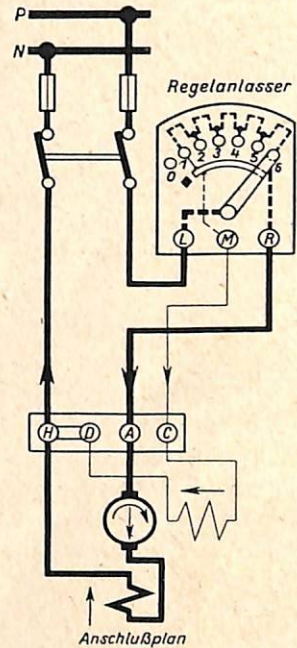


Bild 78. Anschlußplan für einen Gleichstrom-Nebenschlußmotor mit Regelanlasser



Vorschaltwiderstand nutzlos verbraucht wird. Trotzdem der Motor die volle elektrische Leistung dem Netz entnimmt, wird nur ein Teil dieser Leistung im Motor in mechanische Leistung umgewandelt. Der andere Teil wird durch den Vorschaltwiderstand in Wärme umgesetzt. Infolgedessen müssen die Drähte oder Bänder des Vorschaltwiderstandes reichlich bemessen sein, damit sie bei Dauereinschaltung nicht zu heiß werden.

Werden bei einem Gleichstrommotor für 220 V und 40 A durch den Vorschaltwiderstand 70 V vernichtet, dann entsteht durch den Widerstand ein Leistungsverlust von  $70 \cdot 40 = 2800$  W. Für den Motor bleiben von der aufgenommenen Leistung, die  $220 \cdot 40 = 8800$  W beträgt, nur  $8800 - 2800 = 6000$  W verfügbar. Die Drehzahl sinkt um etwa  $\frac{70 \cdot 100}{220} = 31,8$  oder rund 32 v. H. Die Herabsetzung der Drehzahl um 32 v. H. muß demnach mit einem Leistungsverlust von 2,8 kW erkauft werden.

Die Regelung der Drehzahl durch Vorschalten von Widerstand in den Ankerstromkreis kommt infolgedessen nur für Motoren kleiner Leistung in Frage.

Eine fast verlustlose Regelung der Drehzahl über die Nenndrehzahl läßt sich durch Schwächung des magnetischen Feldes bewirken.

Wird das magnetische Feld geschwächt, dann muß der Anker, um die notwendige Gegen-EMK erzeugen zu können, seine Drehzahl entsprechend steigern. Die Schwächung des magnetischen Feldes ist durch Verringern der Feld-Aw leicht zu erreichen. Durch Einschalten von Widerstand in den Stromkreis der Magnetwicklung bei Nebenschlußmotoren wird die Stromstärke und damit auch die Zahl der Aw (Amperewindungen) geringer. Der Widerstand zum Regeln der Stromstärke in der Magnetwicklung wird bei Nebenschlußmotoren mit der Magnetwicklung in Reihe geschaltet. In Bild 79 sind Anlasser und Feldregler getrennte Geräte, während in Bild 80 Anlaßwiderstand und Feldregler in einem Gerät vereinigt sind (Feldregelanlasser). Damit die Magnetwicklung nicht unterbrochen werden kann, darf der Feldregler nicht ausschaltbar sein (Bild 79). Bei Nebenschlußmotoren kann durch Feldschwächung die Drehzahl um etwa 20 v. H. der Nenndrehzahl gesteigert werden. Die mechanische Leistung des Motors bleibt unverändert. Werden größere Drehzahlsteigerungen verlangt, dann ist dies bei der Bestellung des Motors besonders anzugeben.

Bei Reihenschlußmotoren kann zur Schwächung des magnetischen Feldes ein Regelwiderstand zur Magnetwicklung parallel geschaltet werden.

Dienen mehrere Reihenschlußmotoren zum Antrieb eines Fahrzeuges (Straßenbahn, Elektromobil), dann läßt sich die Drehzahl in einfachster Weise dadurch ändern, daß beide Motoren in Reihe oder parallel geschaltet werden. Beim Anlauf sind beide Motoren unter Vorschaltung von Widerständen in Reihe geschaltet, durch Abschalten von Widerstand steigt die Spannung an den Klemmen der Motoren. Sind die gesamten Widerstände ausgeschaltet, dann liegt jeder Motor an der halben Netzspannung. Ihre Drehzahl ist bis auf die halbe Nenndrehzahl gestiegen. Werden jetzt beide Motoren unter Vorschaltung von Widerstand parallelgeschaltet, dann läßt sich durch Abschalten dieses Widerstandes die Drehzahl bis



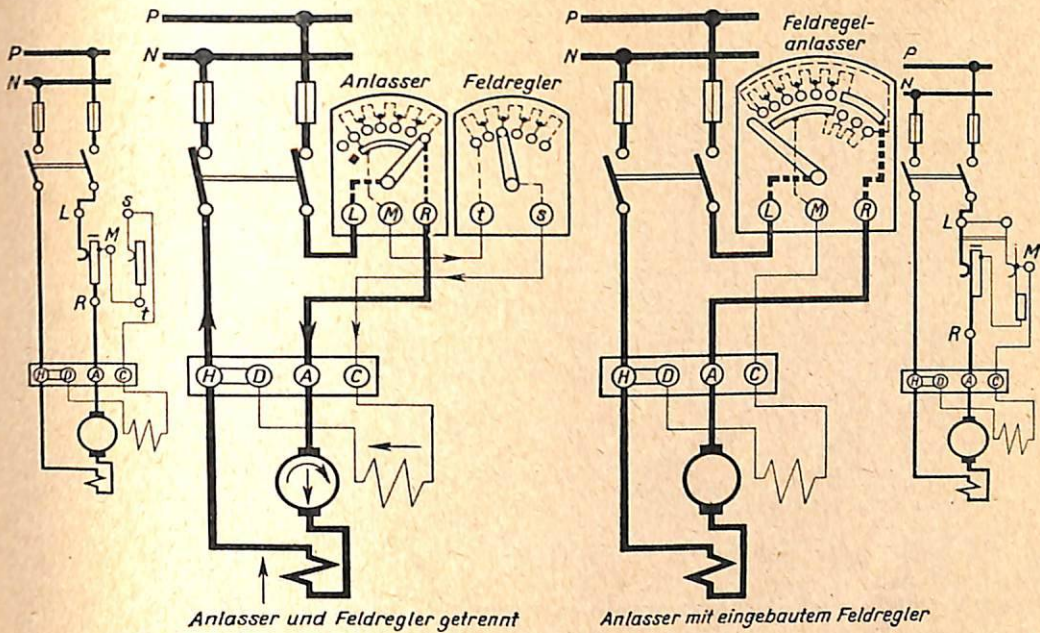


Bild 79 u. 80. Erhöhung der Drehzahl bei Nebenschlußmotoren durch Feldschwächung

auf die volle Nenn Drehzahl steigern. Bei dieser Schaltung entwickeln die Motoren beim Anlauf ihre höchste Zugkraft. Sie besitzt den Vorteil, daß der Vorschaltwiderstand wesentlich kleiner als beim Anlauf in Parallelschaltung sein kann.

**Die Leonard-Schaltung.** Handelt es sich um weitgehende Drehzahlregelung, dann werden besondere Regelsätze in Leonard-Schaltung verwendet. Ein solcher Regelsatz besteht aus einem Motorgenerator für Gleichstrom und einem Gleichstromantriebsmotor. Bei dieser Schaltung wird als Hauptantriebsmotor ein Nebenschlußmotor verwendet, dessen Ankerklemmen mit den Ankerklemmen des Gleichstrom-Generators direkt verbunden sind. Die Magnetwicklung sowohl des Antriebsmotors als auch des Generators wird an eine besondere Gleichstromquelle angeschlossen (Fremderregung). Während der Antriebsmotor dauernd voll erregt bleibt und infolgedessen mit gleichmäßig starkem magnetischem Feld arbeitet, läßt sich die Stromstärke in der Magnetwicklung des Generators durch einen Regelwiderstand von Null bis auf ihren vollen Wert beliebig ändern. Durch Änderung der Stärke des magnetischen Feldes beim Generator ändert sich die Ankerspannung sowohl beim Generator als auch beim Antriebsmotor. Mit der Ankerspannung ändert sich die Drehzahl des Motors, so daß sich durch Änderung der Erregung des Generators die Drehzahl des Motors zwischen Null und der vollen Nenn Drehzahl beliebig regeln läßt. Die Umkehrung des Drehsinnes des Antriebsmotors erfolgt durch Umkehrung der Stromrichtung im Anker, indem die Nebenschlußwicklung des Generators umpolt wird.



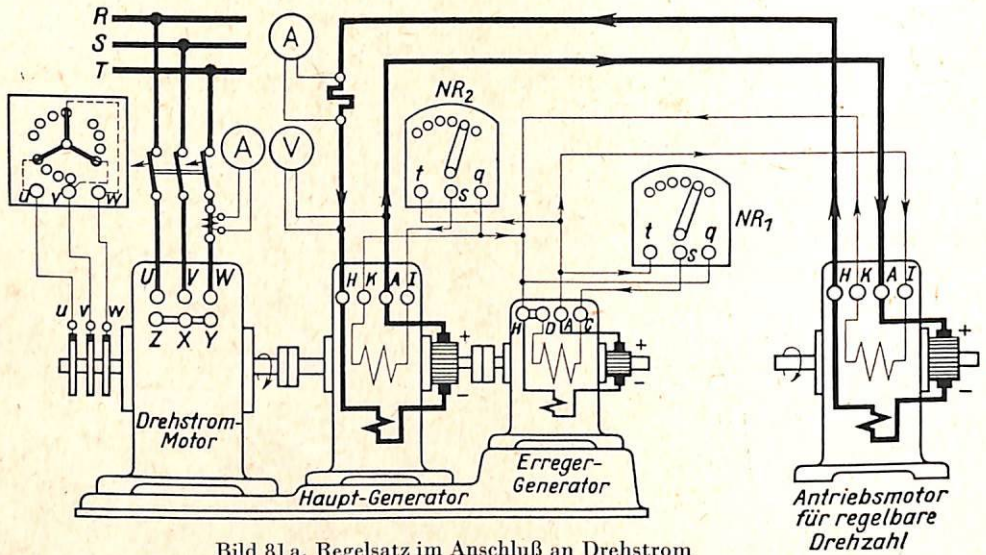


Bild 81 a. Regelsatz im Anschluß an Drehstrom

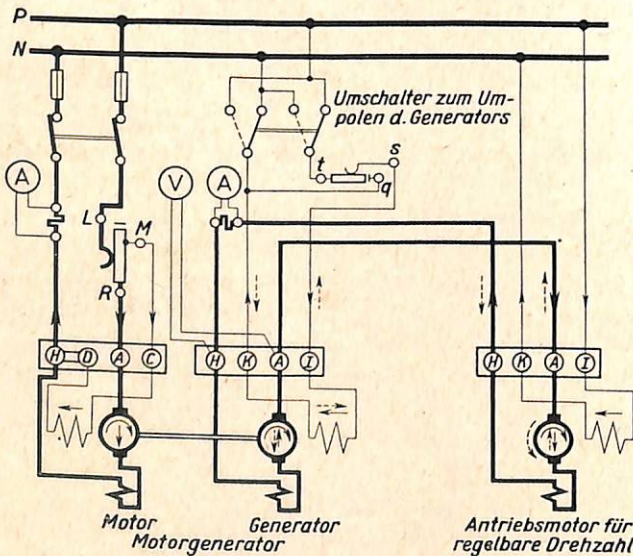


Bild 81 b. Regelsatz im Anschluß an Gleichstrom

Der Antrieb des Generators kann entweder durch einen Drehstrommotor oder durch einen Gleichstrommotor erfolgen. Bild 81 a zeigt den Schaltplan für einen Regelsatz im Anschluß an Drehstrom. Der Gleichstrom für die Erregung sowohl des Gleichstromgenerators als auch des regelbaren Gleichstrommotors wird durch eine besondere Erregermaschine erzeugt, die mit dem Gleichstromhauptgenerator gekuppelt ist. Der Nebenschlußregler  $NR_1$  dient zur Regelung der Spannung der

Erregermaschine und  $NR_2$  zur Regelung der Spannung des Hauptgenerators.

In Bild 81 b steht Gleichstrom zur Verfügung. Hier erfolgt der Antrieb des Gleichstromgenerators durch einen Gleichstrommotor.

**Schwungrad-Umformer (Ilgner-Umformer).** Bei Antrieben, die starken Belastungsstößen ausgesetzt sind (Antrieb von Walzenstraßen und Förderanlagen), wird zum



Ausgleich der Belastungsstöße zwischen Motor und Generator des Umformers ein Schwungrad angebracht (Bild 82). Bei Inbetriebnahme des Umformers muß dessen Motor außer dem Anker des Generators auch noch das Schwungrad vom Stillstand auf die volle Nennzahl bringen.

Dies bedeutet für den Motor eine Mehrarbeit, die jedoch als mechanische Arbeit im Schwungrad aufgespeichert wird. Tritt ein Belastungsstoß auf, dann gibt das

Schwungrad einen Teil der in ihm aufgespeicherten mechanischen Arbeit zur Unterstützung des Motors ab und fängt damit den Belastungsstoß auf. Nach dem Belastungsstoß nimmt das Schwungrad wieder so viel mechanische Arbeit auf, wie es vorher abgegeben hat. Infolgedessen stellt sich der Motor auf eine mittlere Leistung ein. Die ausgleichende Wirkung des Schwungrades setzt jedoch voraus,

daß zum Antrieb des Generators ein Motor verwendet wird, dessen Drehzahl bei Belastung fällt und bei Entlastung steigt. Erfolgt der Antrieb durch einen Gleichstrommotor, dann ist ein Doppelschlußmotor zu nehmen. Beim Anschluß an Drehstrom wird ein Asynchronmotor mit Schlupf Widerstand im Läuferkreis verwendet. Der Schlupf Widerstand bewirkt ein stärkeres Abfallen der Drehzahl bei Belastungszunahme und ein stärkeres Ansteigen der Drehzahl bei Belastungsabnahme. Je größer die Drehzahländerung, um so wirkungsvoller ist der Einfluß des Schwungrades.

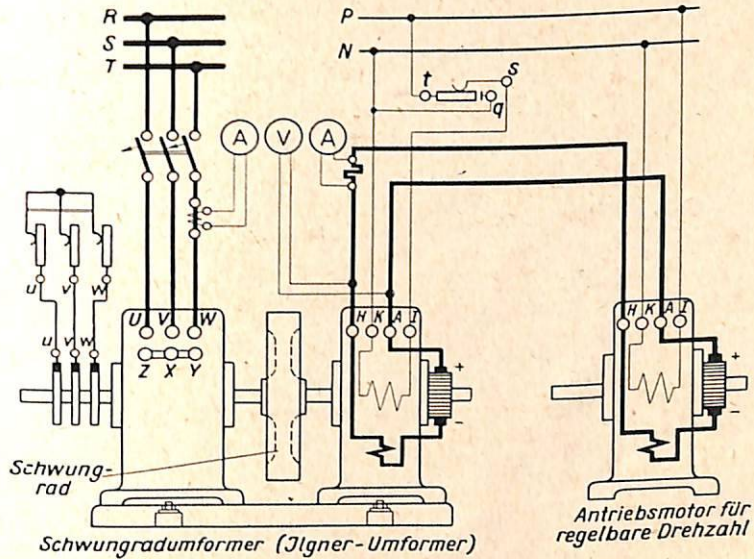


Bild 82. Schwungradumformer im Anschluß an Drehstrom

## 12. Anschluß eines Gleichstrommotors an eine Netzspannung, die niedriger ist als die Nennspannung des Motors

Es kann vorkommen, daß ein Motor für 440 V an 220 V, oder ein Motor für 220 V an 110 V Netzspannung angeschlossen werden muß. Bei einem Nebenschlußmotor sind für einen solchen Fall zwei Möglichkeiten gegeben. Die eine besteht darin, daß der Motor ohne Änderung seiner Schaltung an die halbe Nennspannung angeschlossen wird. In diesem Falle liegen Anker und Magnetwicklung an der halben Spannung. Während jetzt durch den Anker die normale Stromstärke







Mithin muß bei halber Nenndrehzahl und normaler Zugkraft die Leistung des Motors auf die halbe Nennleistung zurückgehen.

Beim Reihenschlußmotor ist ein Umschalten der Magnetwicklung nicht erforderlich, weil Anker und Magnetwicklung in Reihe geschaltet sind. Ankerstrom, Magnetstrom und Zugkraft bleiben auch beim Anschluß an die halbe Nennspannung normal. Die Drehzahl sinkt auf die Hälfte der Nenndrehzahl.

Infolgedessen kann der Reihenschlußmotor, weil er bei der normalen Zugkraft nur die halbe Drehzahl hat, auch nur mit der halben Nennleistung belastet werden. Sein Anlaufmoment ist genau so hoch wie beim Anschluß an die volle Nennspannung.

### 13. Verwendung des Gleichstrommotors als Generator

Jeder Gleichstrommotor läßt sich als Generator verwenden. Der Anlaßwiderstand fällt dann fort.

Der Nebenschlußmotor kann ohne Änderung der Schaltung als Generator verwendet werden, wenn seine Drehrichtung als Generator dieselbe ist wie die als Motor (Bild 84). Die Maschine wird jetzt vom Stromverbraucher zum Stromerzeuger. Trotzdem der Strom im Anker die umgekehrte Richtung hat wie beim Betrieb als Motor, bleibt die Polarität der Ankerklemmen unverändert, allerdings mit dem Unterschied, daß die frühere Stromeintrittsstelle zur Stromaustrittsstelle wird und umgekehrt.

Die Gegen-EMK ist beim Motor um den Spannungsabfall im Anker niedriger als die Netzspannung  $U$ , während die EMK des Generators um den Spannungsabfall im Anker ( $u_a = I_a \cdot R_a$ ) höher sein muß als die Netzspannung  $U$ . Infolgedessen muß die EMK der Maschine beim Betrieb als Generator um mindestens den zweifachen Spannungsabfall im Anker höher sein als die Gegen-EMK beim Betrieb als Motor. Dieser Unterschied kann entweder durch erhöhte Ankerdrehzahl oder durch Verstärkung des magnetischen Feldes erzeugt werden. Da letzteres bei der Schaltung der Maschine für Selbsterregung nicht möglich ist, bleibt nur die Steigerung der Drehzahl übrig. Infolgedessen muß bei einem Motor, der als Generator verwendet werden soll, die Ankerdrehzahl um 15 bis 25 v. H. der Motor-Nenndrehzahl erhöht werden.

Besitzt der Nebenschlußmotor Wendepole, dann bleibt die Schaltung dieser Polwicklung unverändert, weil sich mit der Stromrichtung im Anker auch die Stromrichtung in der Wendepolwicklung umkehrt. Letzteres ist notwendig, da beim Motor in der Drehrichtung gesehen nach jedem Nordhauptpol ein Nordwendepol und beim Generator nach jedem Nordhauptpol ein Südwendepol sitzen muß.

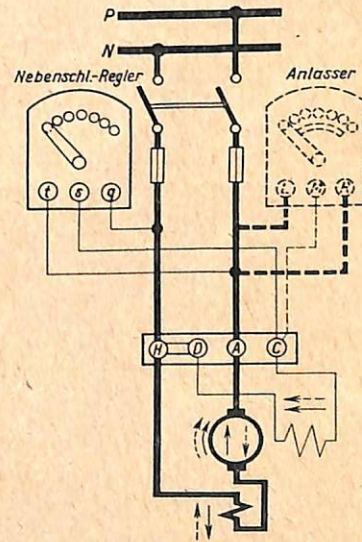


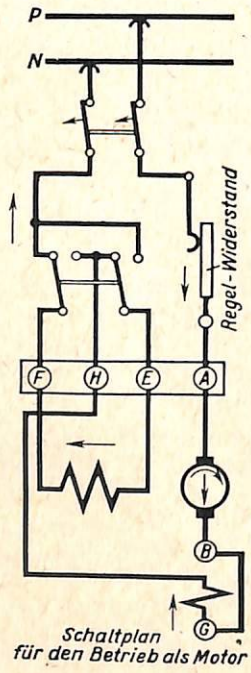
Bild 84. Gleichstrom-Nebenschlußmotor als Generator



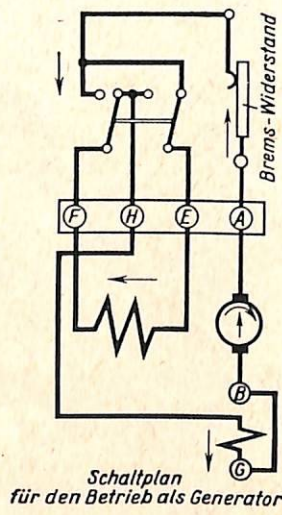
15-18 =  
 15  
 125  
 72

Soll ein normal geschalteter Doppelschlußmotor als Generator benutzt werden, dann muß bei dieser Maschine mit Rücksicht auf die Änderung der Stromrichtung im Anker die Reihenschlußwicklung der Magnete umgeschaltet werden. Wird diese Umschaltung nicht ausgeführt, dann arbeitet die Reihenschlußwicklung der Nebenschlußwicklung entgegen. Sobald eine so geschaltete Maschine belastet wird, tritt durch die falsch geschaltete Reihenschlußwicklung starke Feldschwächung ein, wodurch ein großer Spannungsabfall und starkes Bürstenfeuer entsteht.

Der Reihenschlußmotor wird lediglich zum Bremsen als Generator geschaltet. Zu diesem Zweck werden die Leitungen zum Motor vom Netz abgeschaltet und über einen Bremswiderstand geschlossen. Der Motor wird jetzt als Generator vom Fahrzeug angetrieben. Motor und Fahrzeug haben ihre Rollen vertauscht. Während die Maschine als Motor elektrische Leistung aufnahm und mechanische Leistung abgab, nimmt sie als Generator mechanische Leistung auf und erzeugt elektrische Leistung.



Schaltplan für den Betrieb als Motor  
 Bild 85. Betrieb einer Gleichstrom-Reihenschlußmaschine als Motor



Schaltplan für den Betrieb als Generator  
 Bild 86. Betrieb einer Gleichstrom-Reihenschlußmaschine als Generator

im Anker umkehrt, ist es notwendig, die Magnetwicklung beim Übergang vom Motor zum Generator umzuschalten (weil Anker und Magnetwicklung in Reihe geschaltet sind). In Bild 85 ist der Schaltplan für den Betrieb als Motor und in Bild 86 für den Betrieb als Generator dargestellt. Hierbei ist angenommen, daß der Regelwiderstand gleichzeitig als Bremswiderstand benutzt wird, was in den meisten Fällen zutrifft.

Aufg. 40: Ein Nebenschlußmotor hat eine Nennzahl  $n = 1000$  in der Minute, eine Nennspannung  $U = 440$  V und eine Nennstromstärke  $I = 10$  A. Der Motor soll als Generator verwendet werden. Zu diesem Zweck soll die Nennzahl des Motors um 20 v. H. gesteigert werden. Die Antriebsmaschine des Motors macht in der Minute 200 Drehungen und hat einen Riemenscheibendurchmesser von 1,5 m. Wie hoch ist die Drehzahl des Motors als Generator? Welchen Durchmesser muß die Riemenscheibe des Motors beim Betrieb als Generator haben?



Aufg. 41: Ein Nebenschlußmotor mit einer Nenndrehzahl  $n = 1200$  muß als Generator  $n = 1380$  Drehungen machen. Wieviel v. H. liegt die Drehzahl als Generator über der Nenndrehzahl als Motor?

Aufg. 42: Die Drehzahl eines Doppelschlußmotors muß bei Verwendung als Generator 18 v. H. höher als die Nenndrehzahl als Motor sein. Die Motor-Nenndrehzahl ist  $n = 850$  U/min. Wie hoch ist die Drehzahl als Generator? Welche Wicklung muß umgeschaltet werden? Zeichne den Schaltplan dieser Maschine für den Betrieb als Motor und als Generator!

#### 14. Hilfseinrichtungen und Geräte für den Motorstromkreis

Für den Motorstromkreis kommen folgende Hilfseinrichtungen und Geräte in Frage: Schmelzsicherungen, Schalter, Motorschutzschalter, Nullspannungsschalter, Anlasser, Strommesser und in besonderen Fällen auch Zähler.

Die Zuleitungen für Motoren sind durch Schmelzsicherungen oder Überstromschalter gegen Überlastung und Kurzschluß zu schützen.

Bei Verwendung von Schmelzsicherungen ist darauf zu achten, daß

1. die Stärke der Schmelzsicherung der Betriebsstromstärke des Motors angepaßt ist;
2. bis 60 A nur Schmelzsicherungen mit geschlossenem Schmelzeinsatz verwendet werden dürfen;
3. Schmelzsicherungen beim Auswechseln der Schmelzstreifen nach Möglichkeit spannungslos gemacht werden.

Schmelzsicherungen, die nicht spannungslos gemacht werden können, sollen so gebaut oder angeordnet sein, daß sie auch unter Spannung, gegebenenfalls mit geeigneten Hilfsmitteln, von unterwiesenen Personen ungefährlich ausgewechselt werden können.

Streifensicherungen kommen erst von 60 A an aufwärts in Frage. Bis 60 A sollen nur Patronen- oder Stöpselsicherungen Verwendung finden. Über 60 A sind beide Bauarten zulässig.

Werden zum Schutze der Zuleitungen Patronen- oder Stöpselsicherungen verwendet, dann kann das Auswechseln der Patronen oder Stöpsel jederzeit ohne Gefahr für Personen auch dann vorgenommen werden, wenn das Sicherungselement unter Spannung steht. Solche Sicherungen können ohne Bedenken vom Motor gesehen vor oder hinter dem Hauptschalter in die Zuleitungen eingeschaltet werden (Bild 87). Wenn in einer Abzweigleitung Schalter und Sicherungen mit offenen Schmelzeinsätzen (Streifensicherungen) unmittelbar hintereinander liegen, dann soll die Stromzuführung an den Schalter angeschlossen werden (Bild 87 rechts).

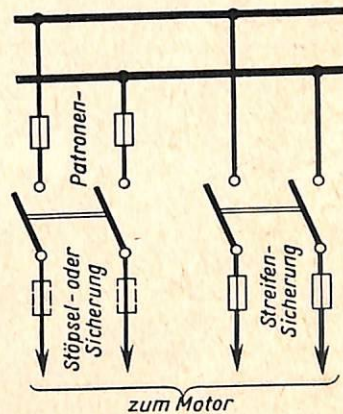


Bild 87. Anschluß von Stöpsel- und Streifensicherungen

Überstromschalter sind Selbstschalter, die in der Regel eine elektromagnetische Auslösevorrichtung zum Schutz gegen Kurzschluß und Wärmeauslöser zum Schutz gegen gefährlichen Überstrom haben. Die Wicklung für den Auslösemagnet ist mit dem Motor



in Reihe geschaltet und wird vom gesamten Motorstrom durchflossen. Die Bilder 88, 89 und 90 zeigen die grundsätzliche Anordnung dieses elektromagnetischen Überstromschutzes.

Nullspannungsschalter haben den Zweck, den Motor vom Netz abzuschalten, wenn die Netzspannung aus irgendeinem Grund plötzlich ausbleibt oder unter einen bestimmten Wert sinkt. Sehr häufig wird in solchen Fällen vergessen, den Anlasser in die Ausschaltstellung zurückzuschalten. Wenn jetzt, nachdem die Drehzahl des Motors stark gesunken oder der Motor zum Stillstand gekommen ist, die Netzspannung wieder eingeschaltet wird, entsteht infolge des geringen Ankerwiderstandes ein sehr starker Stromstoß (Kurzschluß). Sind die Sicherungen durch starke Drähte überbrückt, dann wird in den meisten Fällen die Ankerwicklung beschädigt.

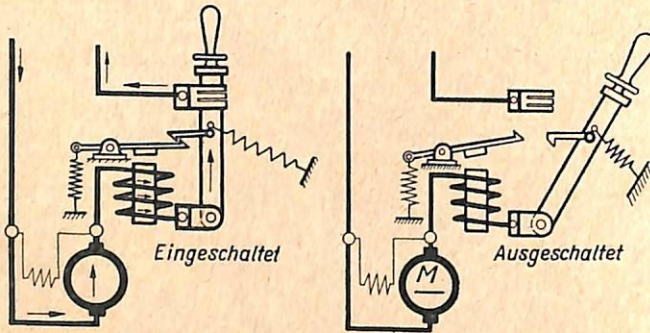


Bild 88 u. 89. Einpoliger Überstromschalter

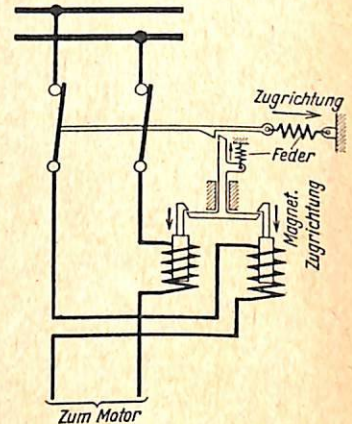


Bild 90. Zweipoliger Überstromschalter

An Stelle getrennter Überstrom- und Nullspannungsschutzeinrichtungen werden heute Motorschutzschalter verwendet, bei denen Überstrom- und Spannungsrückgangsauslösung in einem Schalter vereinigt sind.

Motorschutzschalter sind auf S. 161 näher beschrieben.

Bei Gleichstrom müssen beide Pole der Zuleitung abschaltbar sein, damit der Motor allpolig vom Netz getrennt werden kann. Die einpolige Abschaltung des Motors durch Ausschalten des Anlassers genügt nicht. Werden Schmelzsicherungen zum Schutz der Zuleitungen verwendet, dann benutzt man zum Ein- und Ausschalten zweipolige Hebel- oder besser Walzenschalter.

## 15. Anlasser

Kleine Gleichstrommotoren bis 1,1 kW können durch einen zweipoligen Schalter direkt, d. h. ohne vorgeschalteten Widerstand, angelassen werden. Der beim Einschalten auftretende Stromstoß ist erheblich und beträgt bei Reihenschlußmotoren das 2,5 fache des Nennstromes, während er bei Nebenschlußmotoren noch bedeutend höher ansteigt. Infolgedessen müssen die Motoren entweder wesentlich stärker abgesichert werden, als der Nennstromstärke der Motoren entspricht, oder es müssen träge Sicherungspatronen verwendet werden, damit beim Einschalten der Motoren die Sicherungen nicht durchschmelzen.

In der Regel werden die Gleichstrommotoren durch besondere abschaltbare Anlasser angelassen, die verhindern, daß der Anlaufstrom über die zulässigen Grenzen ansteigt. Bei Ver-



wendung solcher Anlasser muß die Stärke der Schmelzsicherungen der Nennstromstärke des Motors angepaßt sein.

Nach der Schwere des Anlaufs unterscheidet man Halbblatanlauf, Vollatanlauf und Schweranlauf. In der Regel kommt Vollatanlauf in Frage.

Die Anlasser werden in Metallanlasser und Flüssigkeitsanlasser eingeteilt.

Bei den Metallanlassern unterscheidet man Flachbahn-, Trommelbahn- und Walzenbahnanlasser.

Flachbahnanlasser haben feststehende Widerstandskontakte, die in einer Ebene angeordnet sind und von einem beweglichen Kontakt bestrichen werden.

Die Widerstandsdrähte oder Bänder werden in der Regel auf Porzellanzylinder gewickelt und durch Luft oder Öl gekühlt. Bei den Anlassern mit Ölkühlung befinden sich die Widerstände in einem geschlossenen Gefäß aus Stahlblech, das mit Öl gefüllt ist. Die Wärmeabgabe des Öls ist gering. Infolgedessen kann es vorkommen, daß bei häufigem aufeinanderfolgendem Anlassen, oder wenn die Anlasserkurbel längere Zeit auf einem Zwischenkontakt stehen gelassen wird, das Öl sich stark erhitzt und schließlich überkocht. Das Öl soll harz- und säurefreies Mineralöl sein, wie es für Umspanner und Ölschalter verwendet wird. Reines Transmissionsöl ist ebenfalls geeignet. Die Verwendung von Ölanlassern ohne Ölfüllung ist in der Regel nur gestattet, wenn die einzuschaltende Leistung nicht über  $\frac{3}{4}$  der höchstzulässigen Anlaßleistung liegt. Häufig werden die Anlasser mit Spannungsrückgangsauslösung ausgerüstet, durch welche die Anlasserkurbel beim Ausbleiben der Netzspannung oder wenn die Spannung auf 35 v. H. der Netzspannung zurückgeht, durch die Kraft einer Feder selbsttätig in die Ausschaltstellung zurückbewegt wird.

Zum Schutz gegen Spannungsrückgang und Überstrom dienen Spannungsrückgangs- und Überstromauslöser, die ein Ausschalten des Anlassers sowohl bei Spannungsrückgang als auch bei Überstrom bewirken.

Bei den Trommelbahnanlassern bilden die feststehenden Kontaktstücke einen Zylinder und werden von einem beweglichen Kontaktstück bestrichen.

Bei den Walzenbahnanlassern wird die Kontaktfläche durch eine bewegliche zylindrische Walze gebildet, auf der Kontaktfinger schleifen.

Man unterscheidet Walzenbahnanlasser leichter und schwerer Bauart.

Die Walzenbahnanlasser leichter Bauart werden an Stelle von Flachbahnanlassern verwendet, wenn es sich um häufiges Schalten oder besondere Schaltvorgänge (z. B. Wendebetrieb) handelt. Die Widerstände sind im gleichen Gehäuse wie die Schaltwalze untergebracht. Die Kühlung der Widerstände erfolgt durch Öl.

Walzenbahnanlasser schwerer Bauart kommen für schwere und raue Betriebe in Frage, in denen häufiges Schalten durch ungeschulte Personen erfolgt.

Die Vorschaltwiderstände werden von der Schaltwalze getrennt in besonderen Schutzgehäusen untergebracht und durch Leitungen mit den Kontaktfingern der Schaltwalze verbunden. Walzenbahnanlasser können wie Flachbahnanlasser entweder mit selbsttätiger Spannungsrückgangs- oder Spannungsrückgangs- und Überstromauslösung eingerichtet werden.

Flüssigkeitsanlasser kommen nur für große Leistungen in Frage. Für das Ein- und Ausschalten der Magnetwicklung ist ein besonderer Schalter erforderlich, der mit dem Anlasser zwangsläufig verbunden wird, damit ein rechtzeitiges Ein- und Ausschalten der Magnetwicklung gewährleistet bleibt. Als Flüssigkeit dient eine Pottasche- oder Sodalösung (2 v. H. Soda). Um die Flüssigkeit gegen Einfrieren zu schützen, wird ihr Glycerin zugesetzt.



In jedem Motorstromkreis soll ein Strommesser dauernd eingeschaltet sein, damit unzulässige Überlastungen vermieden oder doch so rechtzeitig erkannt werden, daß eine Beschädigung der Ankerwicklung nicht eintritt. Die Kosten für Beschaffung eines Strommessers sind gering im Vergleich zu den Kosten für die Instandsetzung einer durchgebrannten Ankerwicklung. Bei Gleichstrommotoren mit Anlassern für normale Antriebe ist die Größe des Strommessers zweckmäßig so zu wählen, daß der Zeiger des Strommessers bei Vollast nicht unterhalb der Skalenmitte steht.

Besondere Spannungsmesser zur ständigen Überwachung der Betriebsspannung werden nur bei großen Motoren angeschlossen.

Im allgemeinen wird der elektrische Arbeitsverbrauch der Motoren durch den Hauptzähler der Anlage gemessen. Nur in Sonderfällen, wenn ein besonderer Tarif für den elektrischen Arbeitsverbrauch für Kraftzwecke besteht, ist es notwendig, einen Kraftzähler für den Motor anzuschließen.

## 16. Störungen an Gleichstrommotoren

Die meisten Störungen an Gleichstrommotoren sind auf mangelhafte Aufstellung und unsachgemäße Wartung der Motoren und deren Hilfseinrichtungen zurückzuführen.

Die hauptsächlichsten Störungen sind folgende:

### 1. Der Motor läuft nicht an.

Mögliche Ursache: Unterbrechung in der Zuleitung zum Motor; Sicherungen sind durchgebrannt; die Magnetwicklung ist unterbrochen oder falsch geschaltet.

### 2. Der Motor läuft ruckweise an.

Mögliche Ursache: Die Ankerwicklung hat Windungsschluß oder der Stromwender hat Schluß zwischen Stegen.

### 3. Starke Funkenbildung am Stromwender.

Mögliche Ursache: Die Bürsten liegen schlecht auf; die Kohlen sind feucht; die Kohlenmarke ist nicht richtig; der Stromwender ist unrund; die Isolation zwischen den Stegen steht vor, so daß die Bürsten dauernd springen; der Bürstenstern ist falsch eingestellt; der Abstand der einzelnen Bürstenreihen ist ungleich; eine oder mehrere Bürsten derselben Bürstenreihe stehen zu weit vor oder zurück; die Bürstenhalter sind ungeeignet; der Motor ist überlastet; das Magnetfeld ist geschwächt; das Magnetfeld ist durch Windungsschluß in einer oder mehreren Magnetspulen ungleich; die Ankerwicklung ist unterbrochen; die Wendepole sind falsch geschaltet oder zu stark oder zu schwach.

### 4. Zu hohe Erwärmung.

Mögliche Ursache: Der Motor ist überlastet; die Bürsten feuern; der Erregerstrom ist infolge falscher Schaltung der Magnetwicklung zu stark.

### 5. Falsche Drehzahl.

Mögliche Ursache: Die Klemmenspannung ist zu hoch (zu hohe Drehzahl); die Klemmenspannung ist zu gering (zu geringe Drehzahl); der Bürstenstern steht falsch; der Anlasser ist falsch angeschlossen.

### 6. Die Lager werden heiß.

Mögliche Ursache: Der Riemen ist zu stark gespannt; der Motor ist schlecht aufgestellt; das Öl ist schlecht oder zum Schmieren ungeeignet; die Ölringe im Lager drehen sich nicht; es ist Staub oder Schmutz in die Lager gekommen, die Schmiernuten sind dicht; Wälzlager haben ungeeignetes oder zuviel Fett (sollen halb gefüllt sein).



## V. Generatoren für Wechselstrom (Synchrone Generatoren)

In der Ankerwicklung eines jeden Generators entsteht Wechselstrom. Wie dieser Wechselstrom erzeugt wird, ergibt sich aus den Erklärungen auf Seite 3 bis 6. Um den Wechselstrom aus der sich drehenden Ankerwicklung in den ruhenden äußeren Stromkreis überleiten zu können, sind zwei Schleifringe mit Bürsten erforderlich. Die Verwendung von Schleifringen ist jedoch nur bei Abgabe geringer Leistungen und niedriger Spannung möglich. Sobald die Generatorleistung groß oder die Generatorspannung hoch ist, macht die Stromabgabe über Schleifringe und Bürsten Schwierigkeiten. Außerdem wird bei einer sich drehenden Ankerwicklung für Hochspannung die Isolation durch die Erschütterungen leicht beschädigt.

Für die Erzeugung des Stromes ist es gleichgültig, ob sich der Anker dreht und die Pole stehen oder ob sich die Pole drehen und der Anker steht, denn in beiden Fällen werden die Leiter des Ankers in gleicher Weise von Kraftlinien geschnitten. Der Vorteil bei der Anordnung mit stehendem Anker und drehenden Polen liegt in der einfachen Stromentnahme durch feste Klemmen und in dem besseren Schutz der Ankerisolation. Mit Rücksicht auf diese und andere Vorteile werden Generatoren zur Erzeugung von Wechselstrom fast nur mit drehenden Polen und stehendem Anker ausgeführt. Weil sich bei dieser Anordnung die Pole innerhalb des feststehenden Ankers drehen, werden solche Maschinen als Innenpolmaschinen bezeichnet (Bild 91). Nur für kleine Leistungen und geringe Spannung findet man noch die alte Anordnung mit festen Polen und drehendem Anker (Außenpolmaschine).

Die Erregung der Magnetpole zur Erzeugung des magnetischen Feldes erfolgt bei Wechselstromgeneratoren durch Gleichstrom, der entweder 110 oder 220 V Spannung hat. Um diesen Gleichstrom der sich drehenden Magnetwicklung zuführen

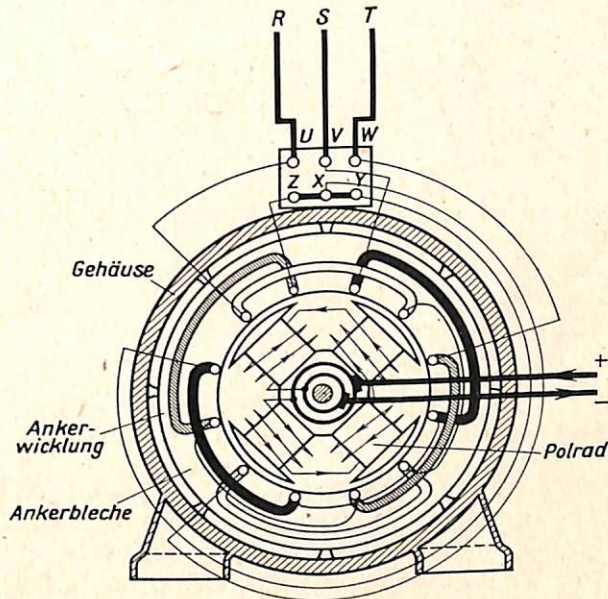


Bild 91. Synchrongenerator für Drehstrom



zu können, sind zwei Schleifringe mit Bürsten erforderlich. Diese Art der Übertragung macht bei der geringen Erregerleistung und Spannung keine Schwierigkeiten.

Der Gleichstrom für die Erregung wird entweder einem Gleichstromnetz oder einem besonderen Gleichstromgenerator entnommen. In der Regel dient diese Gleichstrommaschine lediglich zur Erzeugung des Erregerstromes (Bild 92). Sie wird

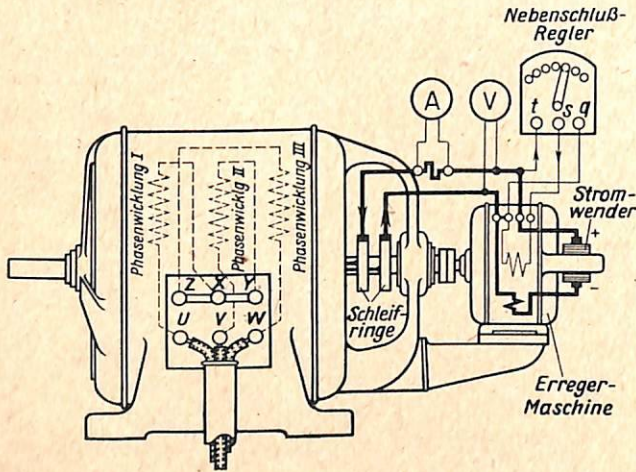


Bild 92. Synchrongenerator für Drehstrom mit Erregermaschine

Instandsetzungen an der einen die andere betriebsbereit ist. Bei Generatoren mit hoher Drehzahl (Turbogeneratoren) erhält in der Regel jeder Generator eine besondere Erregermaschine, deren Anker auf dem freien Ende der Generatorwelle befestigt wird (Eigenerregung). Die Drehzahl der Erregermaschine ist in diesem Falle gleich der Drehzahl des Generators.

Um die Spannung des Wechselstromgenerators regeln zu können, muß die Stromstärke in der Magnetwicklung des Generators geregelt werden. Zu diesem Zweck wird bei Fremderregung in eine der beiden Verbindungsleitungen zwischen Generator und Gleichstromnetz ein regelbarer Widerstand geschaltet. Dieser Regler wird Magnet- oder Hauptstromregler genannt. Er besitzt außer den beiden Widerstandsklemmen *s* und *t* noch eine Kurzschlußklemme *q*. Fehlt die Kurzschlußklemme, dann muß der Regler so eingerichtet sein, daß er sich nicht ausschalten läßt.

Wird durch Abschalten von Widerstand die Stromstärke in der Magnetwicklung des Generators größer, dann steigt die Generatorspannung. Sie sinkt, wenn durch Zuschalten von Widerstand die Stromstärke in der Magnetwicklung abnimmt.

In Bild 92 ist der Anschlußplan eines Drehstromgenerators mit angeschlossener Erregermaschine für Eigenerregung dargestellt. Der Nebenschlußregler bei der Erregermaschine dient zur richtigen Einstellung der Generatorspannung durch Regelung des Erregerstromes.

infolgedessen Erregermaschine genannt. Bei Wechselstromgeneratoren mit geringer Drehzahl kann die Erregermaschine entweder durch einen besonderen Elektromotor oder durch einen Riemen von der Generatorwelle aus angetrieben werden. Es kann auch für mehrere oder alle Generatoren desselben Kraftwerkes eine gemeinsame Erregermaschine aufgestellt werden (Fremderregung). Eine zweite, gleiche Erregermaschine dient dann zur Reserve, damit bei



Bei Generatoren, deren Belastung sich häufig und schnell ändert, erfolgt die Regelung der Generatorspannung nicht von Hand, sondern durch selbsttätige (automatische) Eil- oder Schnellregler. Diese arbeiten so genau und schnell, daß bei Belastungsänderungen die richtige Spannung in weniger als einer Sekunde wiederhergestellt ist.

### 1. Einteilung der Wechselstrom-Generatoren

Nach der Zahl der Wechselströme, die in einem Generator erzeugt werden sollen, richtet sich die Zahl der einzelnen Ankerwicklungen. Jede einzelne Ankerwicklung besteht aus einer Gruppe von in Reihe geschalteten Spulen. Eine solche Spulengruppe wird Phasenwicklung oder kurz Phase oder auch Wicklungsstrang genannt.

Der Einphasengenerator besitzt nur eine Spulengruppe (Phase) mit einem Anfang und einem Ende. Am Anker des Generators sind infolgedessen nur zwei Anschlußklemmen angebracht, die durch die Buchstaben  $U$  und  $V$  gekennzeichnet werden.

Beim Zweiphasengenerator besteht die Ankerwicklung aus zwei getrennten Spulengruppen (Phasen), die um  $\frac{1}{2}$  Polentfernung (Polteilung) oder 90 elektrische Grade gegeneinander verschoben sind. Der Anker dieses Generators hat vier Anschlußklemmen. Die Klemmen der I. Phase werden mit den Buchstaben  $U-X$  und die der II. Phase mit  $V-Y$  bezeichnet.

Der Dreiphasen- oder Drehstromgenerator hat eine Ankerwicklung, die aus drei getrennten Spulengruppen oder Phasen mit sechs Anschlußklemmen besteht. Die einzelnen Phasen sind um  $\frac{2}{3}$  Polteilung oder 120 elektrische Grade gegeneinander verschoben. Die Anschlußklemmen der Phase I werden durch die Buchstaben  $U-X$ , die der Phase II durch  $V-Y$  und die der Phase III durch  $W-Z$  gekennzeichnet.

### 2. Aufbau der Wechselstrom-Generatoren

Der Aufbau der Einphasen-, Zweiphasen- und Dreiphasengeneratoren ist der gleiche. Sie unterscheiden sich nur durch die Ankerwicklung.

Der feststehende Anker eines Wechselstromgenerators besteht aus dem Gehäuse, dem wirksamen oder aktiven Eisen und der Ankerwicklung.

Das Gehäuse wird aus Gußeisen oder aus geschweißtem Walzstahl hergestellt. Es dient als Traggestell für das Ankereisen und die Wicklung. Bei kleineren Generatoren wird es außerdem zum Befestigen und Tragen der Lager benutzt.

Der eigentliche Ankerkörper ist ein Eisenzylinder, der wie der Ankerkörper bei Gleichstrommaschinen aus einzelnen dünnen Blechen zusammengebaut wird. Diese Bleche werden zur Vermeidung von starken Wirbelströmen durch Papier, Lack oder eine Oxydschicht voneinander isoliert. Der Eisenzylinder wird innen mit Nuten zum Einlegen der Ankerwicklung versehen.

Der Läufer wird entweder als Volltrommelläufer oder als Einzelpolläufer (Polrad) ausgeführt.



Volltrommelläufer (Bild 93) kommen für hohe Drehzahlen (Turbogeneratoren) in Frage. Bei ihnen bestehen Welle und Körper entweder aus einem vollen Stück Stahl oder es werden über die Welle kreisförmige Stahlplatten geschoben, wodurch ein Vollzylinder aus Stahl entsteht.

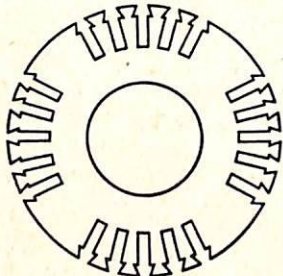


Bild 93. Stahlplatte für einen vierpoligen Volltrommelläufer

Die Nuten für die Erregerwicklung werden entweder eingehobelt oder es werden besondere Zähne aus Stahl eingesetzt.

Beim Einzelpolläufer besteht der Läufer aus einem nabenförmigen Joch mit aufgesetzten (ausgeprägten) Polen (Bild 101).

Die Polkerne sind aus einem vollen Stück Stahl. Die Polschuhe werden entweder wie die Kerne aus einem vollen Stück Stahl oder aus einzelnen Blechen hergestellt.

Die Zahl der Pole ist von der Drehzahl des Generators und von der Periodenzahl des zu erzeugenden Wechselstromes abhängig (Halbe Polzahl  $p = \frac{60 \cdot f}{n}$ ).

Ist die Drehzahl des Generators niedrig, dann ist die Polzahl hoch. Der Einzelpolläufer wird wegen seiner Form auch als Polrad bezeichnet.

### 3. Die Anordnung der Ankerwicklung bei Wechselstrom-Generatoren

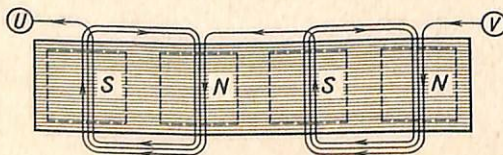
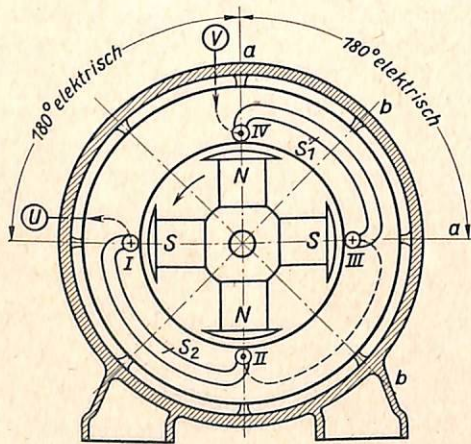


Bild 94  
Synchrongenerator mit Einphasenwicklung

**Einphasenwicklung.** Der Einfachheit wegen ist angenommen, daß der in Bild 94 dargestellte Generator nur eine Nut pro Pol hat. Infolgedessen hat der Anker bei vier Feldpolen auch vier Nuten. In jeder Nut ist die gleiche Zahl von Ankerdrähten untergebracht. Die Drähte der Nuten I und II sind ebenso wie die Drähte der Nuten III und IV in Reihe geschaltet, so daß zwei gleiche Ankerspulen entstehen. Der Anfang der Spule  $S_1$  in Nute III ist mit dem Ende der Spule  $S_2$  in Nute II verbunden. Auf diese Weise

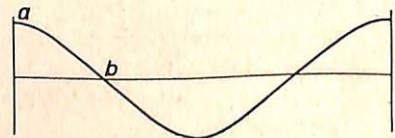


Bild 95  
Zeitlicher Verlauf des Wechselstromes



entsteht eine Einphasenwicklung, deren Anfang die Klemme  $U$  und deren Ende die Klemme  $V$  ist.

In Bild 94 ist außerdem angenommen, daß sich die Pole entgegen dem Uhrzeigersinn drehen und die Polmitten unter den Nuten vorbeigehen. In dieser Polstellung werden die Drähte in den Ankernten von den meisten Kraftlinien geschnitten. Infolgedessen hat die in diesen Drähten induzierte EMK ihren höchsten Wert und der durch diese EMK erzeugte Strom seine größte Stärke. Die Richtung des Stromes in den Drähten der einzelnen Nuten läßt sich nach der „Rechte-Hand-Regel“ bestimmen. Da diese Regel davon ausgeht, daß sich die Leiter bewegen und die Pole stehen, ist die rechte Hand so zu halten, als wenn sich die Drähte in entgegengesetzter Richtung wie die Pole bewegten. Da sämtliche Ankerwindungen in Reihe geschaltet sind, ist die Spannung an den Anschlußklemmen  $U-V$  gleich der Summe der Spannungen in den einzelnen Ankerwindungen.

Bei der Weiterdrehung der Pole aus Stellung  $a$  nach  $b$  (90 elektrische Grade) nimmt die Zahl der die Leiter schneidenden Kraftlinien immer mehr ab. EMK und Stromstärke in den Ankerdrähten sinken und werden in Polstellung  $b$  Null, weil in dieser Stellung die Ankerdrähte keine Kraftlinien schneiden. Drehen sich die Pole um weitere 90° (elektrisch), dann sind die Nordpole unter die Ankernuten gekommen, unter denen in Stellung  $a$  die Südpole standen. In den Ankerdrähten haben EMK und Strom wieder ihren höchsten Wert erreicht, jedoch mit dem Unterschied, daß ihre Richtung die umgekehrte ist wie in Polstellung  $a$ . Infolgedessen entsteht bei der Drehung der Pole in den Drähten der Ankernuten ein Wechselstrom, der in der bekannten Weise verläuft (Bild 95). In der Regel werden die Ankerspulen nicht in einer, sondern in mehreren Nuten pro Pol untergebracht.

Ein Nachteil des Einphasengenerators besteht darin, daß nur  $\frac{2}{3}$  des Ankers bewickelt werden können, so daß  $\frac{1}{3}$  unbewickelt bleibt. Weil es für die Herstellung einfacher ist, wird der Anker über seinen ganzen Umfang gleichmäßig genutzt. Ein Teil dieser Nuten bleibt leer oder wird durch Keile ausgefüllt.

**Zweiphasenwicklung.** Bringt man in der Mitte zwischen den Nuten der ersten Phasenwicklung weitere Nuten an, die in der gleichen Weise wie die Nuten der ersten Phase bewickelt und untereinander verbunden sind, dann entsteht eine zweite Phasenwicklung mit einem besonderen Anfang und Ende. Beide Phasenwicklungen sind um  $\frac{1}{2}$  Polteilung oder

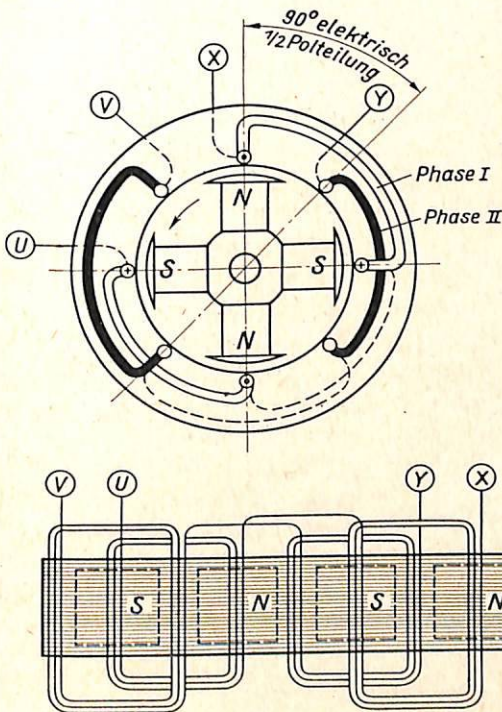


Bild 96

Synchrongenerator mit Zweiphasenwicklung

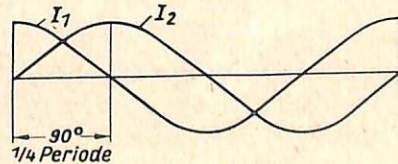
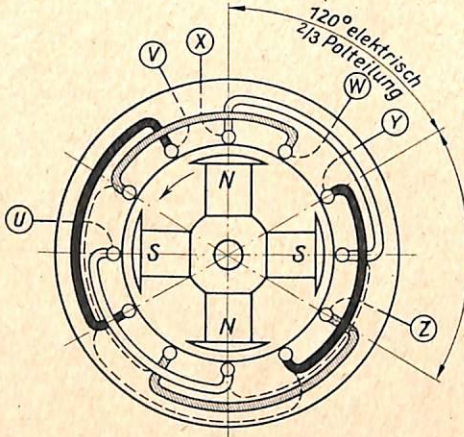


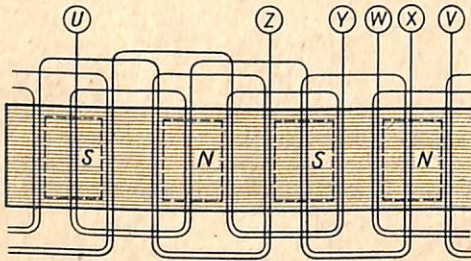
Bild 97. Zeitlicher Verlauf der beiden Wechselströme



90 elektrische Grade gegeneinander versetzt. Infolgedessen wird bei der Drehung der Pole in jeder dieser beiden Wicklungen ein Wechselstrom induziert, so daß zwei getrennte Wechselströme entstehen, die um  $90^\circ$  oder  $\frac{1}{4}$  Periode gegeneinander verschoben sind. Aus Bild 96 und 97 ist leicht zu erkennen, daß im selben Augenblick, wenn der Wechselstrom der ersten Phase seinen höchsten Wert erreicht hat, der Strom in der zweiten Phase Null ist und umgekehrt.



Die Wicklung eines solchen Zweiphasengenerators hat zwei Anfänge und zwei Enden und dementsprechend vier Anschlußklemmen, die mit  $U-X$  (erste Phase) und  $V-Y$  (zweite Phase) bezeichnet werden. Durch Verbinden der beiden Klemmen  $X-Y$  werden die beiden Phasenwicklungen verkettet, so daß zur Fortleitung der zwei Ströme nicht vier, sondern nur drei Leitungen erforderlich sind.



**Dreiphasen- oder Drehstromwicklung.** In Bild 98 ist eine Dreiphasenwicklung mit einer Nut für jeden Pol und jede Phase dargestellt. Die einzelnen Phasenwicklungen sind um  $\frac{2}{3}$  Polteilung oder um  $\frac{1}{3}$  der doppelten Polteilung =  $120^\circ$  Grad (elektrisch) gegeneinander versetzt. Infolgedessen ist jeder der drei Wechselströme den beiden anderen gegenüber um  $120^\circ$  oder  $\frac{1}{3}$  Periode verschoben (Bild 99). Die Anfänge und Enden der einzelnen Phasenwicklungen werden zu einem Klemmbrett geführt, um die Wicklungen entweder in Stern oder in Dreieck schalten zu können (Bild 100). In der Regel werden die Wicklungen

Bild 98

Synchrongenerator mit Dreiphasenwicklung

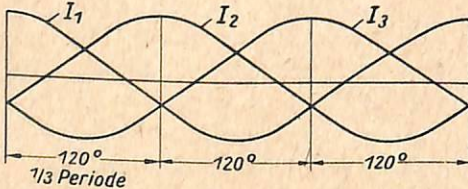


Bild 99. Zeitlicher Verlauf der 3 Wechselströme

in Stern geschaltet und die drei Enden  $X-Y-Z$  miteinander verbunden. Der Anschluß der drei Hauptleitungen erfolgt dann an den freien Klemmen  $U-V-W$ .

Bild 101 zeigt die Anordnung einer Dreiphasenwicklung mit drei Nuten für jeden Pol und jede Phase (ihre Schaltung ist in Bild 100 angegeben).

Die aus dem Ankereisen herausragenden Spulenköpfe können auf den Stirnseiten des Ankers übereinander angeordnet werden, so daß immer eine Spule zwei andere übergreift. Bei dieser Anordnung besteht jede einzelne Phasenwicklung aus langen und kurzen Spulen,



die abwechselnd aufeinanderfolgen. Generatoren mit gerader Polzahl (2, 4, 6, 8 usw. Polpaare mit 4, 8, 12, 16 usw. Polen) haben ebensoviel kurze wie lange Spulen. Ist die Polzahl ungerade (3, 5, 7 usw. mit 6, 10, 14 usw. Polen), dann muß eine Spule unsymmetrisch, d. h. gekröpft ausgeführt werden. Die gekröpfte Spule besteht aus einer halben langen und einer halben kurzen Spule. Die Zahl der Spulen einer Phase ist gleich der Polpaarzahl bzw. gleich der Zahl der Nordpole (Südpole). Außer der in Bild 101 angegebenen Anordnung der Ankerspulen gibt es noch eine Anzahl andere Ausführungsmöglichkeiten.

Die Windungszahl der Ankerspulen ist von der Höhe der Spannung abhängig, die im Generator erzeugt werden soll. Hohe Spannung erfordert hohe Windungszahl. Bei Generatoren für niedrige Spannung und große Leistung ist die Windungszahl niedrig und der Querschnitt der einzelnen Windungen infolge der hohen Stromstärke groß. Infolgedessen verwendet man zur Herstellung solcher Ankerspulen Kupferstäbe und bezeichnet diese Wicklung als Stabwicklung.

Bei Generatoren für große Leistungen treten in den Spulenköpfen (besonders bei Kurzschluß) sehr starke elektro-magnetische Kräfte auf. Um zu verhindern, daß durch diese Kräfte ein Verbiegen und Beschädigen der Spulenköpfe eintreten kann, müssen diese besonders gut befestigt bzw. abgestützt werden.

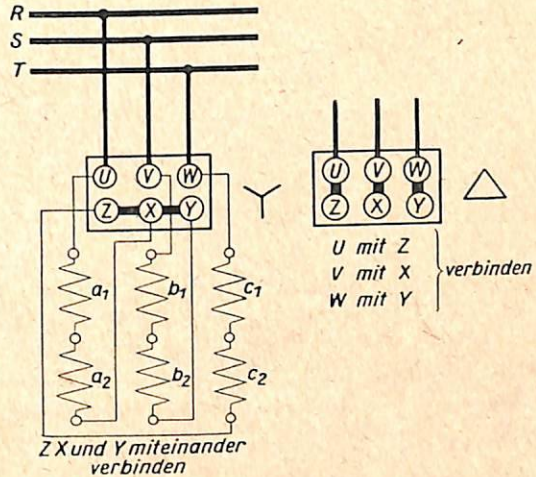


Bild 100. Schaltung der 3 Wicklungen beim Dreiphasengenerator

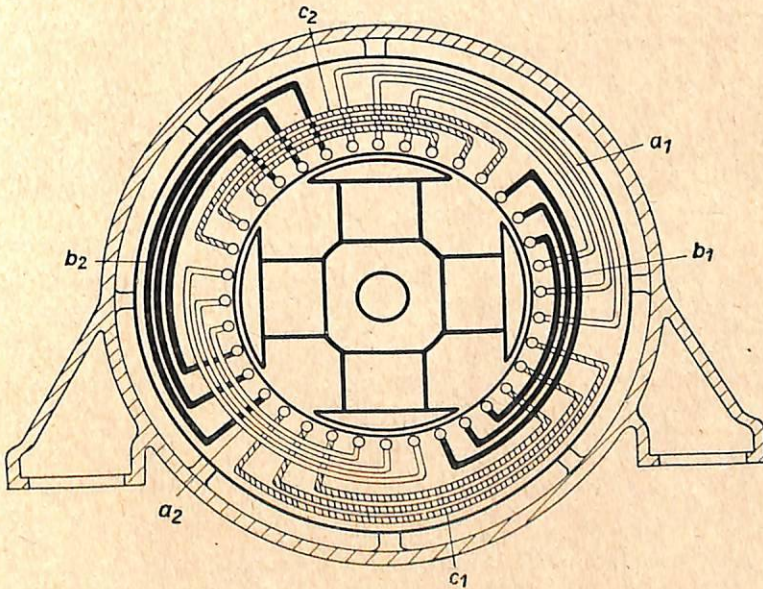


Bild 101. Synchron-generator für Drehstrom mit 3 Nuten pro Pol und Phase



#### 4. Das Parallelschalten von Wechselstrom-Generatoren

Ein Wechselstromgenerator kann zu einem im Betrieb befindlichen Generator erst parallel geschaltet werden, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

1. beide Generatoren müssen gleiche Spannung haben,
2. beide Generatoren müssen dieselbe Frequenz haben,
3. beide Generatoren müssen phasengleich sein, d. h. die Spannungen beider Generatoren müssen im selben Augenblick ihren positiven höchsten Wert erreichen, im selben Augenblick durch Null gehen (ihre Richtung wechseln), im selben Augenblick ihren negativen höchsten Wert erreichen usw.

Hierbei ist Voraussetzung, daß der Verlauf der EMK (Kurvenform) beider Generatoren wenigstens annähernd gleich ist. Sind die Forderungen unter 2. und 3. erfüllt,

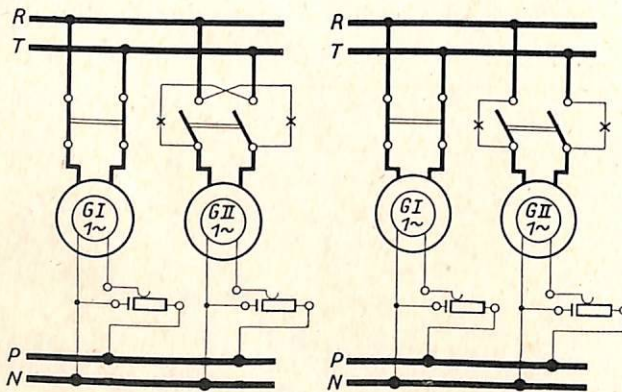


Bild 102. Hellschaltung

Bild 103. Dunkelschaltung

dann ist Synchronismus (Gleichzeitigkeit) vorhanden. Man sagt, beide Generatoren laufen „synchron“ (die Generatoren sind im Tritt). Beim synchronen Lauf haben Generatoren mit der gleichen Polzahl genau gleiche Drehzahl. Ist die Polzahl beider Generatoren verschieden, dann verhalten sich ihre Drehzahlen umgekehrt wie ihre Polzahlen, d. h. der Generator mit der ge-

ringeren Polzahl hat eine der geringeren Polzahl entsprechende höhere Drehzahl. Hat z. B. der eine Generator nur halb so viele Pole wie der andere, dann muß seine Drehzahl in der Minute doppelt so hoch wie die des anderen sein.

Zur Feststellung des Synchronismus benutzt man eine Synchronisiervorrichtung, die auch Phasenindikator genannt wird. Eine solche Einrichtung besteht aus einer oder mehreren Glühlampen, die entweder für Hell- oder Dunkelschaltung angeschlossen werden können. In Bild 102 sind die Phasenlampen des Generators II über Kreuz so an die Klemmen des Hauptschalters angeschlossen, daß bei offenem Schalter beide Generatoren über die Lampen in Reihe geschaltet werden. Haben beide Generatoren bei gleicher Spannung verschiedene Frequenz, dann brennen die Lampen abwechselnd hell und dunkel. Durch Verstellen des Reglers bei der Dampfmaschine (Turbine) für Generator II ändert sich dessen Drehzahl und Frequenz. Je mehr sich Generator II dem Synchronismus (phasengleich und gleiche Frequenz) nähert, um so langsamer wird das Aufleuchten und Dunkelwerden der Phasenlampen, bis sie schließlich für kurze Zeit aufleuchten. In diesem Augenblick ist Synchronismus vorhanden und Generator II einzuschalten.

Werden die Lampen nach Bild 103 angeschlossen, dann sind bei offenem Hauptschalter beide Generatoren über die Phasenlampen gegeneinander geschaltet. Bei Synchronismus sind die Spannungen beider Generatoren gleich hoch, aber entgegengesetzt gerichtet. In diesem



Augenblick ist die Spannung an den Klemmen der Phasenlampen Null, d. h. die Lampen sind für kurze Zeit dunkel. Wenn dieser Zustand erreicht ist, muß Generator II eingeschaltet werden.

Weil bei der Hellschaltung der richtige Zeitpunkt für das Einschalten des neu zuzuschaltenden Generators besser zu erkennen ist als bei der Dunkelschaltung, werden die Phasenlampen in der Regel für Hellschaltung angeschlossen.

Häufig wird noch ein Spannungsmesser parallel zu den Lampen angeschlossen. Bei der Hellschaltung und Synchronismus zeigt der Spannungsmesser die volle Lampenspannung an, während bei der Dunkelschaltung der Zeiger des Spannungsmessers bei Synchronismus für kurze Zeit auf Null steht.

Bei Generatoren für hohe Spannung werden die Phasenlampen an die Sekundärwicklungen kleiner Spannungswandler angeschlossen. Die Sekundärwicklungen dieser Spannungswandler werden über die Glühlampen entweder in Reihe (Hellschaltung) oder gegeneinander (Dunkelschaltung) geschaltet.

Bei Drehstrom genügen ebenfalls zwei Phasenlampen, die in der gleichen Weise wie bei Wechselstromgeneratoren angeschlossen werden. Wird der eine Schalterhebel anstatt durch eine Phasenlampe durch einen Draht überbrückt, dann genügt zur Feststellung des

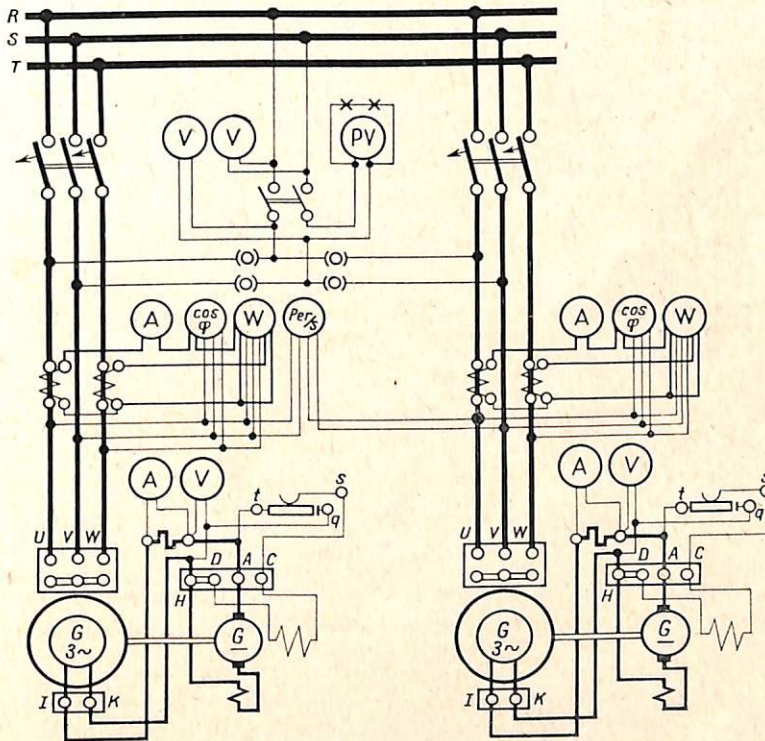


Bild 104. Parallelschaltung von Drehstromgeneratoren für Niederspannung (Dunkelschaltung)

Synchronismus nur eine Lampe, die aber für die doppelte Generatorspannung eingerichtet sein muß. Statt einer Lampe für die doppelte Generatorspannung können auch zwei Lampen für die einfache Generatorspannung in Reihe geschaltet werden (siehe Bild 104).



In Bild 104 ist der Schaltplan für Niederspannungsgeneratoren und in Bild 105 der Schaltplan für Hochspannungsgeneratoren angegeben. In beiden Fällen sind die Phasenlampen für Dunkelschaltung angeschlossen. (Hellschaltung ist für Dreiphasengeneratoren nicht gebräuchlich.)

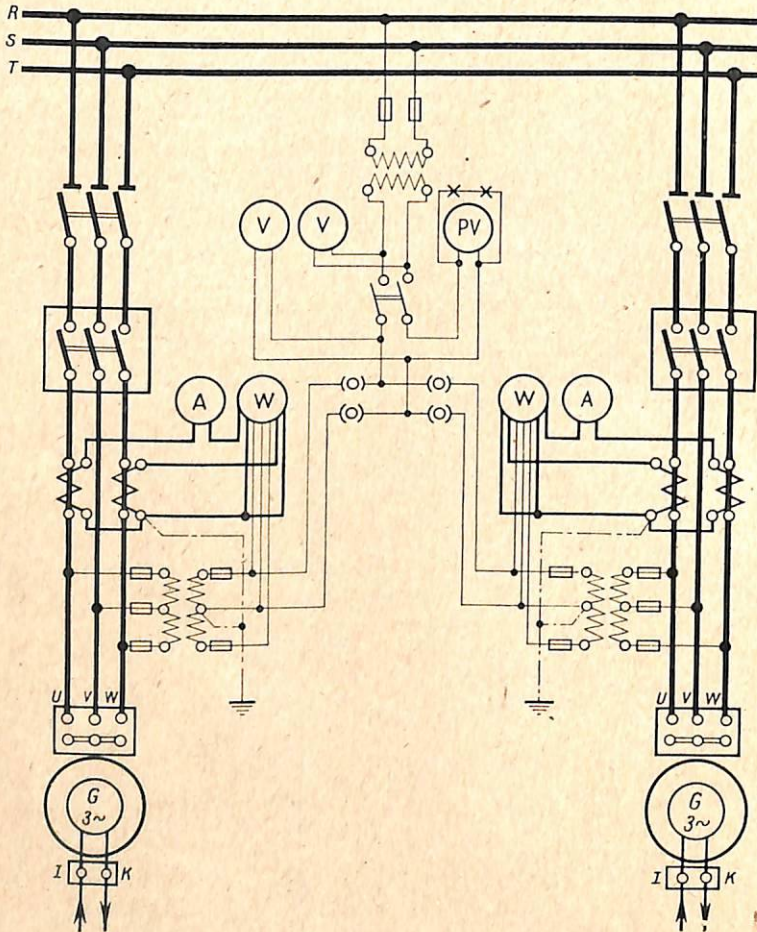


Bild 105. Parallelschaltung von Drehstromgeneratoren für Hochspannung (Dunkelschaltung)

Vielfach wird zum Parallelschalten an Stelle von Phasenlampen und Phasenspannungsmesser ein Phasenvergleichler (Synchronoskop) verwendet, mit dem die Phasengleichheit genauer zu erkennen ist. Dieses Gerät zeigt gleichzeitig an, ob der zuzuschaltende Generator zu schnell oder zu langsam läuft.

Es werden auch selbsttätige Parallelschalteneinrichtungen verwendet (Synchronisator). Sie kommen nur für größere Anlagen und auch hier nur dann in Frage, wenn häufiges Parallelschalten notwendig ist.

Bevor ein Drehstromgenerator nach seiner Aufstellung oder Instandsetzung zum erstenmal parallel geschaltet wird, ist festzustellen, ob seine Phasenfolge richtig ist.



Die richtige Phasenfolge (Drehfeldrichtung) läßt sich am einfachsten durch einen Drehfeldrichtungsanzeiger feststellen. Steht ein solcher nicht zur Verfügung, dann schließt man bei abgeschalteten Generatoren einen kleinen Drehstrommotor an die Sammelschienen an. Nach dessen Anschluß wird erst der eine Generator auf die Sammelschienen geschaltet und festgestellt, in welcher Richtung sich der Drehstrommotor dreht. Dann wird der erste Generator wieder abgeschaltet und danach der zweite Generator auf die Sammelschienen geschaltet.

Ist die Drehrichtung des Motors in beiden Fällen dieselbe, dann hat der neue Generator richtige Phasenfolge. Im anderen Falle, d. h. wenn der Motor beim Anschluß an den einen Generator z. B. rechts- und beim Anschluß an den anderen Generator links-herum läuft, sind zwei beliebige Hauptleitungen des neuen Generators zu vertauschen.

Bei parallel geschalteten Generatoren wird die im Netz verbrauchte Leistung so auf die einzelnen Generatoren verteilt, daß jeder Generator seiner Größe entsprechend belastet ist. Um die Größe der abgegebenen Leistung bei jedem einzelnen Generator jederzeit feststellen zu können, wird für jeden Generator ein besonderer Leistungsmesser (Wattmeter) angeschlossen. Bei Wechselstromgeneratoren kann die Belastung nur dadurch vergrößert oder verringert werden, daß die Leistung der Antriebsmaschine vergrößert oder verringert wird. Soll z. B. ein Generator stärker belastet werden, dann muß der Regler der Antriebsmaschine auf größere Dampfzufuhr (Leistung) eingestellt werden. Antriebsmaschine und Generator versuchen jetzt schneller zu laufen, d. h. vorzueilen, wodurch die Leistung des Generators gesteigert wird. Durch Einstellen des Reglers der Antriebsmaschine auf geringere Dampfzufuhr (Leistung), sinkt die Leistung des Generators.

Das Abschalten eines im Betrieb befindlichen Generators erfolgt in der Weise, daß der Regler der Antriebsmaschine so weit verstellt wird, bis die Generatorleistung auf Null gesunken ist; dann wird durch den Magnetregler auch die Stromstärke des Generators auf Null herabgeregelt. Sind Leistung und Stromstärke Null, dann wird der Generator durch den Hauptschalter vom Netz abgeschaltet.

## VI. Umspanner (Transformatoren)

Dampf- und Wasserkraftwerke zur Erzeugung elektrischer Energie werden heute in unmittelbarer Nähe von Steinkohlen- oder Braunkohlenbergwerken und geeigneten Wasserkraften (Talsperren, Wasserfällen) errichtet. Die in diesen Kraftwerken erzeugte elektrische Energie wird nach den oft sehr weit entfernt gelegenen Verbrauchsgebieten durch Überlandleitungen übertragen. Die Querschnitte solcher Übertragungsleitungen sind in der Hauptsache von der Stromstärke abhängig, d. h. große Stromstärken erfordern auch große Querschnitte. Die Stromstärke hängt wieder von der Höhe der Spannung ab. Wollte man z. B. eine Leistung von  $1000 \text{ kW} = 1\,000\,000 \text{ W}$  mit einer Spannung von nur  $500 \text{ V}$  auf eine größere Entfernung übertragen, dann müßten bei Drehstrom und induktionsfreier Belastung ( $\cos \varphi = 1$ ) die Leiterquerschnitte für eine Stromstärke von  $\frac{1\,000\,000}{500 \cdot 1,73} = 1155 \text{ A}$  bemessen werden. Selbst bei einer Spannung von  $1000 \text{ V}$  würde die Stromstärke noch  $1155 : 2 = 577 \text{ A}$  betragen. Leitungen für solche Stromstärken und große Längen sind abgesehen von anderen Gründen schon mit Rücksicht auf die Werkstoffkosten



unausführbar. Wird dagegen die Spannung auf 10 000 V erhöht, dann sinkt die Stromstärke auf  $\frac{1\,000\,000}{10\,000 \cdot 1,73} = 57,7$  oder rund 58 A. Bei einer Spannung von 100 000 V würde die zu übertragende Stromstärke nur noch  $\frac{1\,000\,000}{100\,000 \cdot 1,73} = 5,8$  A betragen. Aus vorstehenden Beispielen erkennt man den großen Vorteil, der sich bei Anwendung hoher Spannungen für die Leiterquerschnitte ergibt.

Die Generatoren in den Kraftwerken erzeugen in der Regel Strom mit einer Spannung von 5000 bis 10000 V. Diese Spannung genügt in den meisten Fällen nicht. Es müssen daher besondere Geräte vorhanden sein, mit deren Hilfe man für Fernübertragung die Spannung erhöhen und die Stromstärke entsprechend erniedrigen kann. Diese hohe Spannung muß in den Verbrauchsgebieten durch gleiche Geräte auf die Gebrauchsspannung von z. B. 220/127 bzw. 380/220 V herabgesetzt und die Stromstärke entsprechend erhöht werden. Solche Geräte nennt man Umspanner (Transformatoren). Ein Umspanner ist demnach ein Gerät, das elektrische Wechselstromleistung in elektrische Wechselstromleistung umwandelt.

Es wird benützt, um die Wechselstromspannung zu erhöhen oder herabzusetzen. Wird die Spannung erhöht, dann wird die Stromstärke entsprechend geringer. Wird die Spannung herabgesetzt, dann steigt die Stromstärke entsprechend.

### 1. Wirkungsweise des Umspanners

**Induktionsgerät und Induktionsspule.** In Bild 106 ist der Leiter I an Gleichstrom angeschlossen. Die Enden des Leiters II sind mit einem Galvanometer verbunden.

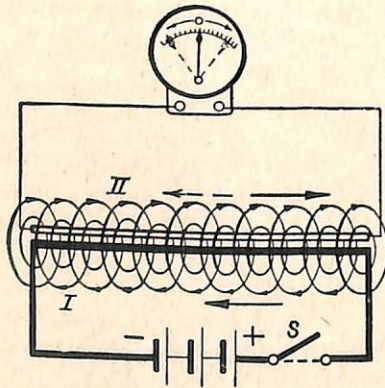


Bild 106

Einwirkung eines vom Strom erzeugten magnetischen Feldes veränderlicher Stärke auf benachbarten Leiter

Wird der Schalter S im Stromkreis I geschlossen, dann fließt durch Leiter I Strom. Im selben Augenblick entstehen um den Leiter I Kraftlinien, die durch den Strom gewissermaßen aus dem Leiter herausgedrückt werden (bildlich gemeint). Beim Öffnen des Schalters verschwindet der Strom im Leiter I und mit ihm auch die Kraftlinien. Man kann sich diesen Vorgang so vorstellen, daß der Strom beim Verschwinden die Kraftlinien in den Leiter zurücksaugt. Würde man den Schalter S nacheinander schließen und öffnen, dann würden um den Leiter I dauernd Kraftlinien entstehen und wieder verschwinden. Die Kraftlinien des Leiters I schneiden bei ihrem Entstehen und Verschwinden den Leiter II. Nach dem Induktionsgesetz entsteht in einem Leiter immer dann eine EMK, wenn der Leiter von Kraftlinien geschnitten wird. Infolgedessen muß auch im Leiter II eine EMK induziert werden. Diese EMK erzeugt im Stromkreis II einen Induktionsstrom von



wechselnder Richtung. Dies erkennt man daran, daß die Nadel des Galvanometers beim Schließen des Schalters *S* nach der einen und beim Öffnen nach der anderen Seite ausschlägt. Durch Versuch läßt sich feststellen, daß beim Schließen des Schalters *S* der Induktionsstrom im Leiter II die umgekehrte Richtung hat wie der Strom im Leiter I. Wird der Schalter geöffnet, dann hat der Induktionsstrom im Leiter II dieselbe Richtung, die der Strom im Leiter I hatte.

Die Induktionswirkung läßt sich wesentlich erhöhen, wenn man beide Leiter zu Spulen aufwickelt, beide Spulen übereinanderschiebt und in den Hohlraum der inneren Spule einen Eisenkern bringt (Bild 107). Der Unterbrecher in Bild 108 ist mit der Spule I

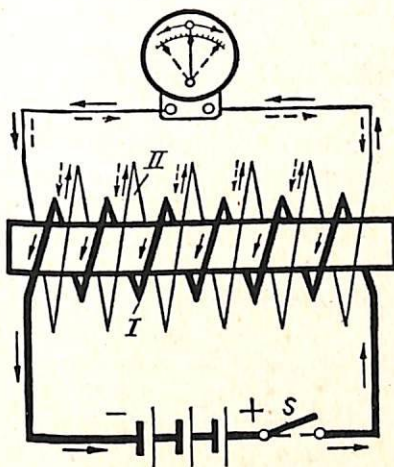


Bild 107. Induktionsgerät mit Eisenkern

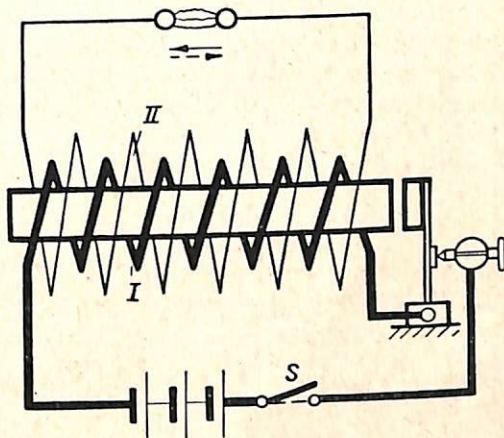


Bild 108. Induktionsgerät mit Eisenkern und Unterbrecher

in Reihe geschaltet. Schließt man den Schalter *S*, dann wird durch den Unterbrecher der Stromkreis der Spule I dauernd geöffnet und wieder geschlossen. Mit dem Strom in Spule I entstehen und verschwinden im Eisenkern Kraftlinien, die in Spule II einen Strom von wechselnder Richtung induzieren. Die EMK an den Enden der Spule II ist um so höher, je mehr Windungen die Spule II im Verhältnis zur Spule I hat. Mit einer solchen Vorrichtung lassen sich in Spule II hohe Spannungen erzeugen. Sie ist unter der Bezeichnung Induktionsgerät allgemein bekannt.

Läßt man den Unterbrecher fort und schaltet an dessen Stelle einen Widerstand mit Spule I in Reihe, der sich fortwährend verändert, dann fließt durch Spule I ein Gleichstrom, dessen Stärke sich ebenfalls ändert. Infolgedessen muß auch die Zahl der Kraftlinien im Eisenkern dauernd eine andere sein; die Induktionswirkung einer solchen Vorrichtung ist die gleiche wie bei Verwendung eines Unterbrechers. Sie stellt die einfachste Form eines Umspanners dar, der sich jedoch nur für Fernmeldeanlagen verwenden läßt. Sie wird Induktionspule genannt und bei Fernsprengeräten verwendet.

**Umspanner für Starkstrom.** In Bild 109 a ist ein geschlossener Eisenkern (ohne Luftspalt) auf dem einen Schenkel mit einer Spule bewickelt. Die Enden dieser Spule sind an Wechselstrom mit 50 Perioden in der Sekunde angeschlossen. Während der Zeitdauer eines Wechsels, d. h. während  $\frac{1}{100}$  Sekunde hat dieser Wechselstrom eine bestimmte Richtung. In der nächsten  $\frac{1}{100}$  Sekunde hat er die entgegengesetzte



Richtung wie vorher und so fort. Richtung und Stärke eines solchen Stromes ändern sich dauernd. Infolgedessen entstehen durch diesen Wechselstrom im Eisenkern magnetische Kraftlinien, deren Richtung mit der Richtung des Stromes wechselt und deren Zahl sich mit der Stärke des Stromes in Spule I ändert (magnetisches Wechselfeld). Ändert sich aber die Zahl der Kraftlinien innerhalb einer Spule, dann

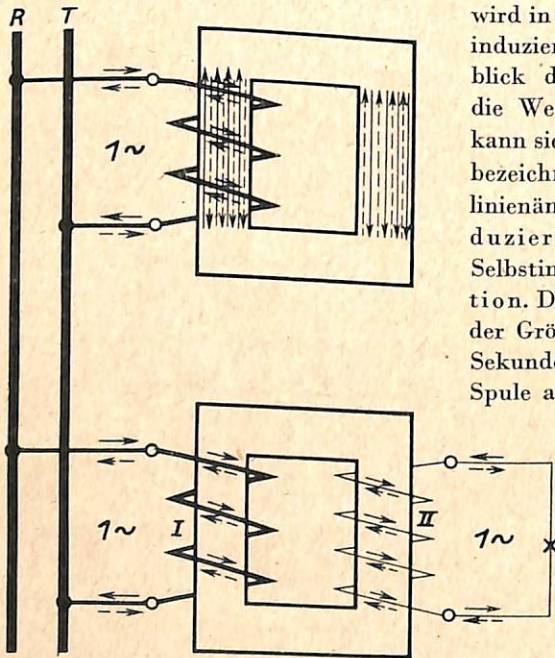


Bild 109 a u. b

Wirkungsweise des Umspanners für Starkstrom

von Kraftlinien zur Erzeugung der Selbstinduktion entsteht.

Nimmt man an, daß Spule I aus 100 Windungen besteht und an 100 V Wechselspannung angeschlossen ist, dann entfällt auf jede der 100 in Reihe geschalteten Windungen eine Spannung von 1 V. Die EMK der Selbstinduktion wird pro Windung ebenfalls fast 1 V betragen, da sie fast ebenso hoch ansteigt wie die Wechselspannung.

Bringt man auch auf den zweiten Schenkel des Eisenkerns eine Spule (Bild 109b), dann geht durch diese Spule II in jedem Augenblick dieselbe Zahl von Kraftlinien wie durch Spule I. Infolgedessen muß durch diese magnetischen Kraftlinien genau wie in jeder Windung der Spule I auch in jeder Windung der Spule II eine EMK von etwa 1 V induziert werden. Hat die Spule II z. B. 250 Windungen und wird in jeder Windung 1 V induziert, dann entsteht an den Enden dieser Spule II eine EMK von  $250 \cdot 1 = 250$  V. Würde die Spule II nicht 250, sondern 3000 Windungen haben, dann müßte die in dieser Spule induzierte EMK 3000 V betragen. Bei 10 000 Windungen würde man eine EMK von 10 000 V erhalten. Hieraus ergibt sich, daß, wenn die Spule II zehnmals so viel Windungen wie Spule I hat, ihre EMK auch zehnmals so hoch wie die in Spule I wird. Wenn dagegen die Spule II nur den zehnten Teil der Windungen von Spule I hat, dann muß die in ihr induzierte EMK auch zehnmals so niedrig wie die EMK der Spule I werden. Solange an die Enden der Spule II nichts angeschlossen

wird in den Windungen der Spule eine EMK induziert. Diese EMK hat in jedem Augenblick die entgegengesetzte Richtung wie die Wechselspannung in der Spule. Man kann sie infolgedessen auch als Gegen-EMK bezeichnen. Weil diese EMK bei jeder Kraftlinienänderung in der Spule selbst induziert wird, nennt man sie EMK der Selbstinduktion oder kurz Selbstinduktion. Die Höhe der Selbstinduktion ist von der Größe der Kraftlinienänderung in der Sekunde und von der Windungszahl der Spule abhängig. Sie ist nur um den Spannungsabfall in der Spule niedriger als die Wechselspannung, so daß die Selbstinduktion fast genau so hoch ansteigt wie die Wechselspannung. Der Strom zur Erzeugung der Kraftlinien ist schwach, weil schon durch einen schwachen Strom in Spule I so viel Amperewindungen entstehen, daß in dem geschlossenen Eisenkern eine genügende Zahl



ist, verhalten sich die elektromotorischen Kräfte beider Spulen wie ihre Windungszahlen oder  $\frac{E_2}{E_1} = \frac{w_2}{w_1}$ . Hierin bedeutet  $E_1$  die EMK an den Klemmen der Spule I,  $E_2$  die EMK an den Klemmen der Spule II,  $w_1$  die Windungszahl der Spule I und  $w_2$  die Windungszahl der Spule II.

Hat die Spule II z. B. 10 000 Windungen, dann entsteht an ihren Enden eine EMK von 10 000 V, d. h.  $E_2$  ist 100 mal so hoch wie  $E_1$ . Schließt man an die Enden der Spule II einen Stromverbraucher an, durch den 1 A fließt, dann entstehen in Spule II  $10\,000 \cdot 1 = 10\,000$  Aw. Diese Aw erzeugen ebenfalls Kraftlinien. Die Stromrichtung ist in Spule II umgekehrt wie in Spule I. Infolgedessen haben auch die Kraftlinien der Spule II die umgekehrte Richtung wie die der Spule I. Dadurch wird die Kraftlinienzahl innerhalb der Spule I um die Kraftlinienzahl der Spule II geschwächt. Das Sinken der Kraftlinienzahl innerhalb der Spule I hat ein Sinken der Gegenspannung (Selbstinduktion) in dieser Spule zur Folge. Die Wechselspannung findet jetzt in Spule I weniger Gegenspannung und kann einen stärkeren Strom durch diese Spule schicken. Damit der frühere magnetische Zustand wieder hergestellt wird, muß die Zahl der Aw von Spule I um die Zahl der Gegen-Aw von Spule II erhöht werden. Da Spule I nur 100 Windungen hat und die Zahl der Gegen-Aw von Spule II 10 000 ist, müssen in Spule I  $\frac{10\,000}{100} = 100$  A fließen. Während also durch Spule II mit 10 000 V nur 1 A fließt, fließen durch Spule II mit 100 V 100 A, d. h. in der Spule mit der 100 mal so kleinen Spannung fließt ein 100 mal so starker Strom.

Wird durch Einschalten weiterer Stromverbraucher die Stromstärke in Spule II auf 5 A erhöht, dann müssen im selben Augenblick durch Spule I  $100 \cdot 5 = 500$  A fließen. Wenn dagegen durch Ausschalten von Stromverbrauchern die Stromstärke in Spule II auf  $\frac{1}{10}$  A verringert wird, dann sinkt die Stromstärke in Spule I auf  $100 \cdot \frac{1}{10} = 10$  A usw. Hieraus folgt, daß sich die Stromstärken in beiden Wicklungen umgekehrt verhalten wie ihre Spannungen, d. h.  $\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1}$ . Es bedeutet  $I_1$  die Stromstärke in Spule I,  $I_2$  die Stromstärke in Spule II,  $U_1$  die Spannung an den Enden der Spule I und  $U_2$  die Spannung an den Enden der Spule II. Die Stromstärke in Spule I stellt sich ohne jede besondere Regelvorrichtung, d. h. selbsttätig auf den richtigen Wert ein, so daß dem Netz der Spule I je nach Belastung der Spule II viel oder wenig Strom entnommen wird.

## 2. Aufbau der Umspanner

Ein Umspanner besteht aus einem Eisenkern und zwei getrennten Wicklungen. Damit im Eisenkern keine starken Wirbelströme entstehen, wird er aus einzelnen dünnen Blechen zusammengebaut. Diese Bleche werden einseitig durch Papier oder doppelseitig durch Wasserglasüberzug voneinander isoliert.

Bei Verwendung eines Eisenkerns aus einem vollen (massiven) Stück Eisen würden in diesem starke Wirbelströme induziert, die den Eisenkern und durch diesen auch die Wicklungen stark erhitzen. Die Folge wäre ein Verbrennen der Isolation der Wicklungen.

Die eine der beiden Wicklungen eines Umspanners wird primäre Wicklung und die andere sekundäre Wicklung genannt.

Als primäre Wicklung wird die Wicklung bezeichnet, die elektrische Leistung aufnimmt. Sekundäre Wicklung ist die Wicklung, die elektrische Leistung abgibt.

Nach der Netzspannung unterscheidet man zwischen Oberspannungswicklung und Unterspannungswicklung. Oberspannungswicklung ist die mit dem Netz der



höchsten Spannung verbundene Wicklung. Unterspannungswicklung ist die mit dem Netz der niederen Spannung verbundene Wicklung.

Bei einem Umspanner, der von 6000 auf 25 000 V umspannt, ist die 6000-V-Wicklung die primäre und gleichzeitig die Unterspannungswicklung, während die 25 000-V-Wicklung sekundäre und Oberspannungswicklung ist.

Bei einem Umspanner dagegen, der von 6000 auf 220 V umspannt, ist die 6000-V-Wicklung die primäre und gleichzeitig die Oberspannungswicklung, während die 220-V-Wicklung sekundäre und Unterspannungswicklung ist.

Das Verhältnis der Spannung der Wicklung mit der größeren Windungszahl zur Spannung der Wicklung mit der kleineren Windungszahl bei Leerlauf wird Übersetzung des Umspanners genannt.

Ein Umspanner, dessen Primärspannung bei Leerlauf 5000 V und dessen Sekundärspannung 25 000 V beträgt, hat demnach eine Übersetzung von  $\frac{25\,000}{5000} = \frac{5}{1}$  oder 5 : 1.

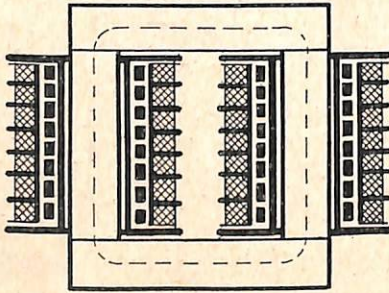


Bild 110

Kernumspanner für Einphasenstrom

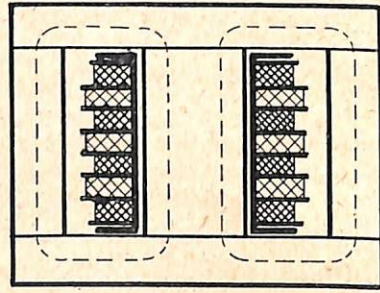


Bild 111

Mantelumspanner für Einphasenstrom

Nach der Bauart unterscheidet man Kernumspanner und Mantelumspanner. Beim Einphasenkernumspanner werden primäre und sekundäre Wicklungen je zur Hälfte auf dem einen und je zur Hälfte auf dem anderen der beiden Kerne untergebracht. Jede Wicklung besteht aus einer mehr oder weniger großen Zahl Einzelspulen. Primär- und Sekundärwicklung müssen sowohl gegeneinander als auch gegen Eisen gut isoliert sein. In Bild 110 ist ein Kernumspanner dargestellt, dessen beide Wicklungen in Form von Zylindern auf den Kernen angebracht sind, während Bild 111 einen Mantelumspanner mit scheibenförmig übereinander angeordneten Primär- und Sekundärspulen zeigt.

### 3. Drehstrom-Umspanner

Drehstrom (Dreiphasenstrom) läßt sich durch drei Einphasenumspanner oder mittels besonderer Drehstromumspanner umspannen. In der Regel werden besondere Drehstromumspanner verwendet, bei denen drei Eisenkerne durch Jochstücke verbunden sind. Auf jedem der drei Kerne ist die primäre und sekundäre Wicklung einer Phase untergebracht. Die primären und sekundären Wicklungen der einzelnen Phasen werden entweder in Stern oder in Dreieck geschaltet. Alle sechs Enden



der primären sowohl wie auch der sekundären Wicklung werden herausgeführt. Man bezeichnet die Anfänge der Oberspannungswicklung mit den großen Buchstaben  $U-V-W$  und die Enden mit  $X-Y-Z$ . Die Anfänge der Unterspannungswicklung werden durch die kleinen Buchstaben  $u-v-w$  und ihre Enden durch  $x-y-z$  gekennzeichnet (Bild 112).

#### 4. Kühlung der Umspanner

Die Kühlung der Umspanner erfolgt entweder durch Luft oder durch Öl. Man unterscheidet infolgedessen zwischen Trockenumspannern (mit Luftkühlung) und Ölumspannern. Bei den Ölumspannern steht der Umspanner in einem Eisenkessel, der mit Öl gefüllt ist (Bild 113). Das Öl nimmt die vom Umspanner erzeugte Wärme viel leichter auf als Luft. Außerdem wird durch das Öl die Isolation der Wicklungen verbessert.

Die Umspannerkessel werden entweder aus glatten oder aus rippenförmig gebogenem Blech hergestellt (Bild 113 und 114). Durch die Rippen wird die Kesseloberfläche wesentlich vergrößert und die im Öl enthaltene Wärme besser abgeführt. Bei großen Umspannern wird das warme Öl künstlich gekühlt. Zu diesem Zweck werden entweder im Umspanner Rohrschlangen angebracht, die von Wasser

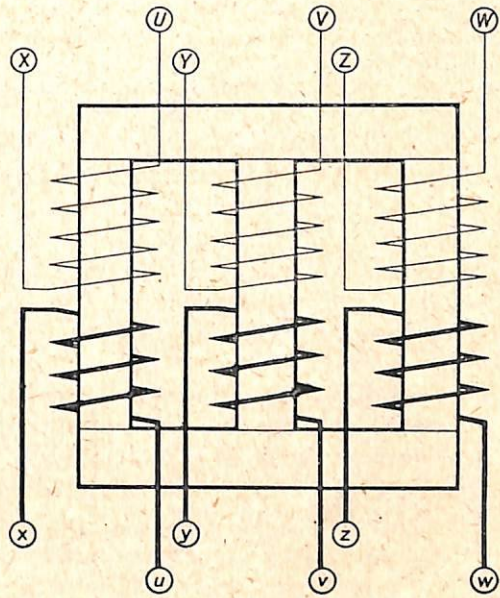


Bild 112. Kernumspanner für Drehstrom

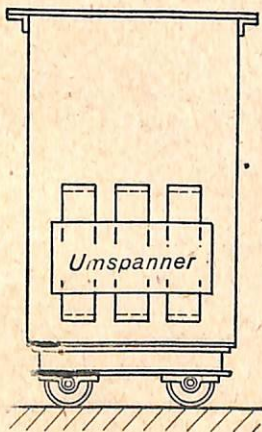


Bild 113  
Glatter Umspannerkessel

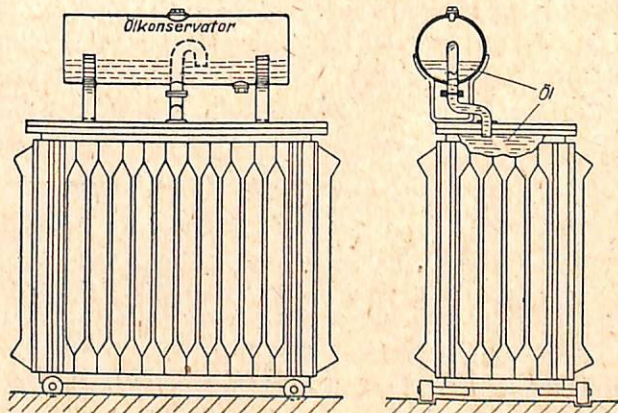


Bild 114  
Rippenförmiger Umspannerkessel mit Ölausdehnungsgefäß



durchflossen werden, oder das erwärmte Öl wird durch eine Pumpe aus dem Kessel durch außerhalb des Kessels befindliche Kühlschlangen und von diesen in den Umspannerkessel zurückgepumpt.

Für das zu verwendende Öl gelten besondere Vorschriften.

### 5. Das Öl-Ausdehnungsgefäß (Ölkonservator)

Um das warme Öl im Umspanner vor Zersetzung zu schützen und um zu verhindern, daß Feuchtigkeit aus der Luft in das Öl übertritt, wird über dem Umspannerkessel ein zylindrisches Gefäß angebracht (Bild 114). Dieses Gefäß ist durch ein Rohr mit dem Innenraum des Umspannerkessels verbunden. Das obere Ende des Rohres ist so ausgebildet, daß ein Umlaufen des warmen Öls aus dem Umspannerkessel in das Gefäß vermieden wird.

Wird der Umspanner belastet, dann erwärmt sich das Öl im Umspannerkessel und dehnt sich aus. Das warme Öl steigt dann in das über dem Umspannerkessel befindliche Gefäß. Die Ausdehnung des Öls geht langsam vor sich. Infolgedessen wird das warme Öl, bis es aus dem Umspannerkessel durch das Verbindungsrohr in das Gefäß gekommen ist, bereits abgekühlt sein oder sich beim Eintritt in das Gefäß abkühlen. Das im Gefäß befindliche Öl bleibt daher kalt. Dieses kalte Öl schließt das im Umspannerkessel befindliche Öl gegen die Luft ab und verhindert dadurch dessen Zersetzung. Gleichzeitig wird verhindert, daß beim Abkühlen des Öls im Umspanner Feuchtigkeit in das Innere des Umspannerkessels gesaugt wird und sich Kondenswasser bildet.

Durch das Gefäß über dem Umspanner wird infolgedessen das Umspanneröl in gutem Zustande erhalten. Statt Erhalten sagt man auch Konservieren. Daher wird das über dem Umspannerkessel befindliche Ölausdehnungsgefäß auch Ölkonservator genannt.

Die Anbringung des Ölkonservators hat den weiteren Vorteil, daß der Umspannerkessel immer bis unter den Deckel mit Öl gefüllt ist. Dadurch wird verhindert, daß sich unter dem Deckel des Umspannerkessels ein Gemisch aus Ölgasen und Luft ansammelt. Ein solches Gemisch ist sehr gefährlich, weil es zum Zerknallen (Explodieren) des Umspannerkessels führen kann, wenn Überschlüge zünden.

### 6. Klingelumspanner

Klingelumspanner sind kleine Umspanner (Kleinumspanner), die in Wechselstromnetzen an Stelle von galvanischen Elementen zum Betriebe von Fernmeldeanlagen verwendet werden. Sie eignen sich z. B. für Hausklingelanlagen, Ruftafeln (Tableaus), elektrische Türöffner, Feuermelderanlagen, Induktionsgeräte usw. Ihr Vorteil gegenüber galvanischen Elementen besteht darin, daß sie keinerlei Wartung und Ersatz bedürfen und infolgedessen stets betriebsbereit sind. Sie besitzen zwei getrennte Wicklungen, die auf getrennten Spulenkörpern untergebracht sein müssen. Zum Anschluß der Starkstromleitungen dienen zwei Anschlußklemmen, die gegen Berührung geschützt sind und plombiert werden können.



Da für kleine Klingelanlagen 3 V, für größere 5 V und für ausgedehnte Anlagen 8 V genügen, sind auf der Sekundärseite der Klingelumspanner drei Anschlußklemmen für 3, 5 und 8 V angebracht. Für besonders lange Klingelleitungen werden Umspanner gebaut, deren Sekundärspannung 6—10—16 V beträgt. Es werden sowohl Klingelumspanner für eine sekundäre Dauerstromstärke von 0,5 als auch für 1 A geliefert. Stromstärken von mehr als 1 A werden in Signalanlagen nur selten benötigt.

Die Klingelumspanner werden für eine primäre Netzspannung von 100 bis 130 und für 200 bis 250 V bei 40 bis 60 Perioden gebaut.

Die Zuleitungen zu Klingelumspannern müssen als Starkstromleitungen verlegt und durch Stromsicherungen geschützt sein.

Klingelumspanner verbrauchen auch dann elektrische Leistung, wenn sie sekundär nicht belastet sind. Dieser Leistungsverlust wird als Leerlaufverlust oder als Leerlauf bezeichnet. Der Leerlauf ist gering. Er beträgt etwa 0,5 bis 1 W. Da die meisten Zähler weder diesen Leerlauf noch den geringen Leistungsverbrauch bei Belastung anzeigen, erheben viele Elektrizitätswerke für den Anschluß von Klingelumspannern eine Pauschgebühr. Bei solchen Klingelumspannern ist der Anschluß von Kleinbeleuchtung verboten. (Stromdiebstahl!)

## 7. Sparumspanner

Sparumspanner besitzen nur eine Wicklung. Sie werden hauptsächlich zum Anlassen und Regeln von Wechselstrommotoren benutzt. Außerdem können sie zum Herabsetzen der Spannung einzelner Bogenlampen an 110 und 220 V Netzspannung verwendet werden. Sie sind kleiner und billiger als Umspanner mit zwei getrennten Wicklungen.

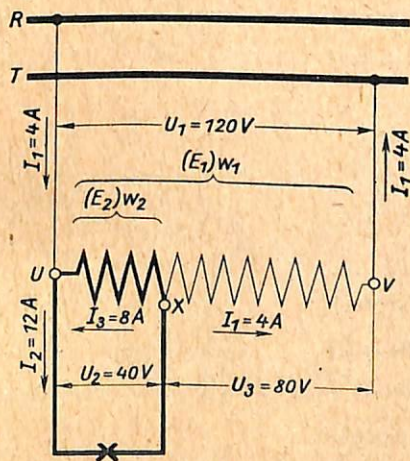


Bild 115. Sparumspanner zum Herabsetzen der Spannung

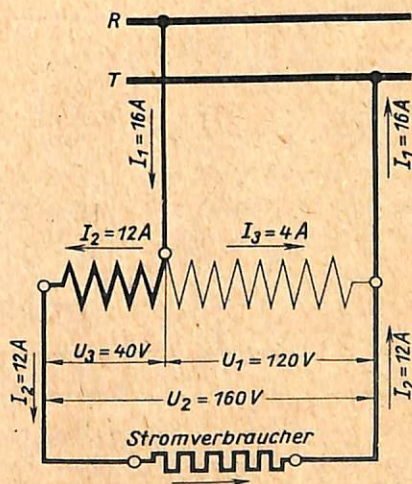


Bild 116. Sparumspanner zum Heraufsetzen der Spannung

Bild 115 zeigt die grundsätzliche Schaltung eines Sparumspanners für 120 V Primär- und 40 V Sekundärspannung. Durch den angeschlossenen Stromverbraucher sollen 12 A fließen. Die primäre Spannung  $U_1$  wird an die Klemmen U und V angeschlossen. Der Stromverbraucher



wird mit den Klemmen  $U$  und  $X$  verbunden. Die Klemme  $U$  ist sowohl Primär- als auch Sekundärklemme. Bei Leerlauf verhält sich die EMK zwischen den Klemmen  $U-V$  zu der EMK zwischen den Klemmen  $U-X$  wie die gesamte Windungszahl ( $w_1$ ) zwischen  $U-V$  zur Windungszahl ( $w_2$ ) zwischen  $U-X$ , so daß  $\frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}$ .

Die primäre Stromstärke  $I_1$  verhält sich zum Gesamtstrom  $I_2$  des Stromverbrauchers umgekehrt wie die primäre Spannung  $U_1$  zur sekundären Spannung  $U_2$ . Es verhält sich also  $\frac{I_1}{I_2}$  wie  $\frac{U_2}{U_1}$ , so daß die primäre Stromstärke  $I_1 = I_2 \cdot \frac{U_2}{U_1}$  wird. Im vorstehenden Beispiel ist

$I_2 = 12 \text{ A}$ ,  $U_1 = 120 \text{ V}$  und  $U_2 = 40 \text{ V}$ . Mithin wird  $I_1 = 12 \cdot \frac{40}{120} = 4 \text{ A}$ . Durch den sekundären Wicklungsteil müssen demnach  $12 - 4 = 8$  Ampere fließen. Dieser Wicklungsteil muß infolgedessen einen größeren Querschnitt als der primäre haben.

Wird ein solcher Umspanner mit nur einer Wicklung noch mit einer Zusatzwicklung versehen, dann kann man ihn in gleicher Weise auch zum Heraufsetzen der Netzspannung benutzen (Bild 116).

### 3. Parallelschalten von Umspannern

**Umspanner für Einphasenstrom.** In Bild 117 sind zwei Einphasenumspanner mit ihren primären Wicklungen an dasselbe Netz angeschlossen. Die sekundären Wicklungen sind mit voneinander getrennten Sammelschienen verbunden. Solche Umspanner sind nur primär parallel geschaltet. Diese Parallelschaltung ist bei Umspannern für dieselbe Primärspannung immer ohne weiteres möglich.

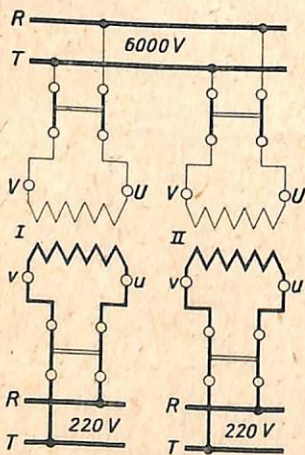


Bild 117  
Einphasenumspanner  
primär parallel geschaltet

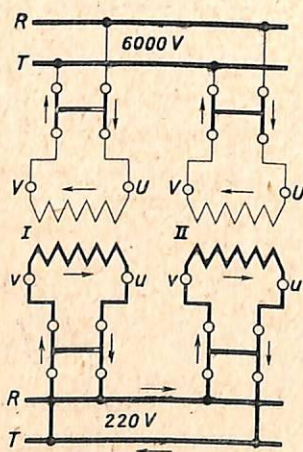


Bild 118. Falscher Anschluß  
der Sekundärwicklung  
des Umspanners II

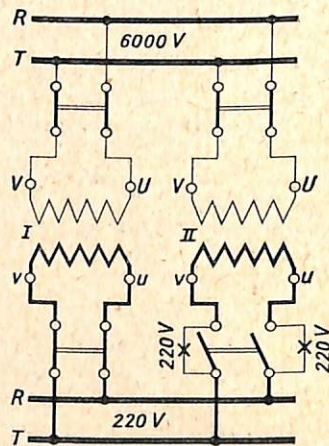


Bild 119  
Prüfung auf richtigen Anschluß  
mittels Prüflampe

Sollen jedoch mehrere Einphasenumspanner nicht nur primär, sondern auch sekundär parallel geschaltet werden, dann müssen sie primär und sekundär für die gleiche Nennspannung gebaut sein und außerdem gleiche Kurzschlußspannung haben.



Vor dem ersten Einschalten eines neuen Umspanners auf das Sekundärnetz ist festzustellen, daß zwischen den zu verbindenden Klemmen keine Spannung auftritt.

In Bild 118 sind die Klemmen der Sekundärwicklung des Umspanners II falsch angeschlossen. Die Sekundärwicklungen beider Umspanner sind nicht gegeneinander (parallel), sondern in Reihe geschaltet. Beim Einschalten der Sekundärwicklung des Umspanners II entsteht ein Kurzschluß.

Um festzustellen, ob die Sekundärklemmen des zuzuschaltenden Umspanners richtig angeschlossen sind, sind mit den Schalterklemmen des Sekundärschalters zwei Glühlampen verbunden (Bild 119). Der Anschluß ist richtig, wenn beim Einschalten des Primärschalters die Glühlampen dunkel werden. Leuchten dagegen die Glühlampen hell auf, dann ist der Anschluß falsch. In diesem Falle sind die beiden Anschlüsse der Sekundärwicklung zu vertauschen.

Die Prüfung kann auch mit einem Spannungsmesser vorgenommen werden (Bild 120).

**Umspanner für Drehstrom.** Die Umspanner für Drehstrom werden in vier verschiedene Schaltgruppen eingeteilt. Man unterscheidet eine Schaltgruppe *A*, eine Schaltgruppe *B*, eine Schaltgruppe *C* und eine Schaltgruppe *D*.

Es lassen sich nur solche Drehstromumspanner primär und sekundär ohne weiteres parallel schalten, die

1. primär und sekundär gleiche Nennspannung haben,
2. gleiche Kurzschlußspannung haben,
3. der gleichen Schaltgruppe angehören.

Das Nennleistungsverhältnis soll möglichst nicht größer als 3:1 sein.

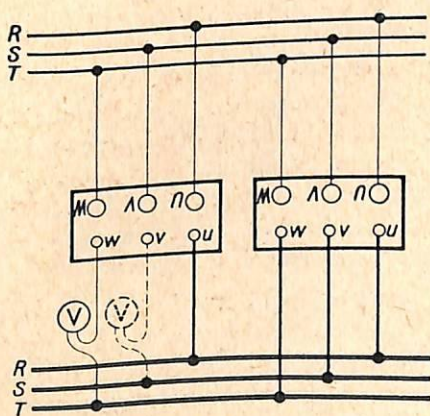


Bild 120. Prüfung auf richtigem Anschluß mittels Spannungsmesser (Dreileiteranlagen)

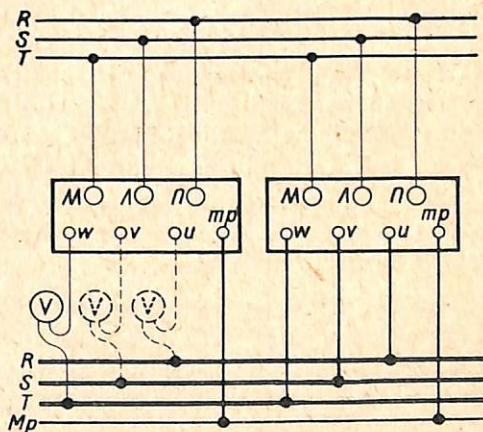


Bild 121. Prüfung auf richtigem Anschluß mittels Spannungsmesser (Vierleiteranlagen)

Vor dem ersten Einschalten der Sekundärwicklung eines parallel zu schaltenden Drehstrom-Umspanners ist festzustellen, daß zwischen den zu verbindenden Klemmen keine Spannung auftritt. Diese Feststellung kann durch einen Spannungsmesser oder durch eine Glühlampe erfolgen.



Bei der Prüfung ist immer erst eine der drei Sekundärklemmen des zu prüfenden Umspanners mit der entsprechenden Netzleitung des Sekundärnetzes direkt zu verbinden. Dann wird zwischen den noch freien Klemmen der Sekundärwicklung und den entsprechenden Netzleitungen des Sekundärnetzes der Spannungsmesser geschaltet (Bild 120). Die Schaltung ist richtig, wenn der Spannungsmesser beim Anlegen an die Klemmen  $u - R$ ,  $v - S$ ,  $w - T$  keine Spannung zeigt. Der Spannungsmesser muß für die doppelte Sekundärspannung ausreichen, da diese bei fehlerhafter Schaltung auftreten kann.

Bei Umspannern für Vierleiteranlagen (mit Nulleiter) muß während der Prüfung der Sternpunkt  $m_p$  des zu prüfenden Umspanners mit dem Nulleiter  $M_p$  des Sekundärnetzes verbunden sein (Bild 121). Die Schaltung ist richtig, wenn zwischen den Klemmen  $u - R$ ,  $v - S$ ,  $w - T$  keine Spannung herrscht. Der Spannungsmesser muß bei dieser Schaltung für die verkettete Spannung ausreichen.

Bei der Prüfung mit einer Glühlampe muß diese dunkel bleiben. Sie muß für die doppelte bzw. verkettete Spannung ausreichen.

### 9. Wirkungsgrad der Umspanner

Die von der Sekundärwicklung abgegebene elektrische Leistung ist immer kleiner als die von der Primärwicklung aufgenommene elektrische Leistung. Zieht man die Verluste des Umspanners.

Man unterscheidet Leerlaufverluste und Wicklungsverluste.

Ist ein Umspanner sekundär nicht belastet, dann „läuft er leer“. Durch die Primärwicklung fließt auch bei Leerlauf Strom. Ein geringer Teil dieses Stromes erzeugt elektrische Leistung. Dieser Leistungsverbrauch entsteht hauptsächlich durch das Ummagnetisieren des Eisens und durch Wirbelströme, die sich im Eisenkern bilden. Er stellt mithin einen Verlust dar und wird, weil er bei Leerlauf auftritt, als Leerlaufverlust bezeichnet. Statt Leerlaufverlust sagt man auch Eisenverlust. Der Leerlaufverlust (Eisenverlust) wird in Watt angegeben.

Wird der Umspanner sekundär belastet, dann erzeugen die Ströme in den Kupferwindungen der primären und sekundären Wicklungen Wärme. Ein Teil der elektrischen Leistung wird mithin in Wärme umgesetzt. Dieser Teil geht ebenfalls verloren. Man bezeichnet diesen Verlust als Wicklungsverlust oder auch, weil er in der Kupferwicklung entsteht, als Kupferverlust.

Der Wicklungsverlust wird in v. H. der Nennleistung (Vollast) des Umspanners ausgedrückt. Der Leerlaufverlust (Eisenverlust) ist bei allen Belastungen fast gleich groß, während der Wicklungsverlust (Kupferverlust) mit steigender Belastung zu- und mit abnehmender Belastung abnimmt.

Bei Umspannern wird die Leistung in kVA (Kilovoltampere) und bei sehr großen Leistungen in MVA (Megavoltampere) angegeben.



Bedeutet  $N_1$  die aufgenommene Leistung,  $N_2$  die abgegebene Leistung und  $\eta$  den Wirkungsgrad, dann ist

$$\text{Wirkungsgrad} = \frac{\text{abgegebene Leistung}}{\text{aufgenommene Leistung}}$$

$$\eta = \frac{N_2}{N_1}.$$

Aufg. 43: Bei einem Umspanner werden bei Leerlauf 220 V Oberspannung und 110 V Unterspannung gemessen. Wie groß ist die Übersetzung?

Aufg. 44: Die Oberspannungswicklung eines Umspanners ist an 6000 V Spannung angeschlossen. Seine Unterspannung beträgt bei Leerlauf 225 V. Wie groß ist die Übersetzung?

Aufg. 45: Ein Umspanner für 25 000 V Oberspannung hat bei Leerlauf eine Unterspannung von 380 V. Wie groß ist seine Übersetzung?

Aufg. 46: In einem Großkraftwerk wird die Generatorspannung durch Umspanner von 5500 V auf 25 000 V und die Spannung von 25 000 V auf 110 000 V umgespannt. Die angegebenen Spannungen sind Leerlaufspannungen. Wie groß sind die Übersetzungen bei den Umspannern?

Aufg. 47: Ein Umspanner für 5 kVA und 5000 V Oberspannung verbraucht bei Leerlauf 60 W. Der Umspanner läuft jährlich 7000 Stunden leer. Die kWh kostet 0,35 *R.M.* a) Wieviel kWh elektrische Arbeit verbraucht dieser Umspanner jährlich durch Leerlauf? b) Wie hoch stellen sich die jährlichen Kosten für Leerlauf?

Aufg. 48: In einer Fabrik ist ein Umspanner für 75 kVA und 6000 V Oberspannung aufgestellt, der bei Leerlauf 475 W verbraucht. Der Umspanner wird morgens um 7 Uhr sekundär ein- und abends um 21 Uhr sekundär ausgeschaltet. a) Wieviel Stunden läuft der Umspanner täglich leer? b) Wieviel kWh verbraucht der Umspanner am Tage durch Leerlauf? c) Wie hoch stellen sich die täglichen Kosten für Leerlauf, wenn die kWh 0,32 *R.M.* kostet?

Aufg. 49: Ein Umspanner für 100 kVA, 6000/380 V ist durch Motoren (induktiv) mit seiner Nennleistung belastet. Der Leistungsfaktor auf der Sekundärseite ist  $\cos \varphi = 0,8$ . Die Wicklungsverluste dieses Umspanners stellen sich auf 2 v. H. der Nennleistung. Die Leerlaufverluste betragen 600 W. a) Wie hoch stellen sich die Wicklungsverluste in kW? b) Wie hoch stellen sich die Wicklungs- und Leerlaufverluste? c) Wieviel kW nimmt der Umspanner primär auf und wieviel gibt er sekundär ab? d) Wie groß ist der Wirkungsgrad des Umspanners?

Aufg. 50: Ein Umspanner nimmt primär 7,2 kW auf und gibt sekundär 6,8 kW ab. Wie groß ist sein Wirkungsgrad?

Aufg. 51: Ein Umspanner für 10 kVA, 6000/225 V ist sekundär induktionsfrei mit seiner Nennleistung belastet. Der Umspanner hat einen Leerlaufverlust von 100 W. Sein Wicklungsverlust beträgt 2,5 v. H. der Nennleistung. Wie groß ist der Wirkungsgrad dieses Umspanners?

Aufg. 52: Ein Umspanner für 20 kVA 25 000/380/220 V hat nach den Zählerangaben in einem Jahr 65 350 kWh aufgenommen und 45 750 kWh abgegeben. Wie groß ist der Jahreswirkungsgrad bei diesem Umspanner?



## VII. Umformer

Zum Laden von Akkumulatoren, zum Galvanisieren und für andere chemische Zwecke (wie z. B. die elektrolytische Gewinnung von Aluminium, Magnesium, Chlor, Wasserstoff usw.) kann nur Gleichstrom verwendet werden. Für Scheinwerfer und Projektionslampen ist Gleichstrom vorteilhafter als Wechselstrom. Auch zum Betrieb von Straßenbahnen ist der Gleichstrom dem Wechselstrom überlegen. In verschiedenen Staaten, wie z. B. in Amerika, Frankreich, Süditalien, Holland u. a., wird zum Betrieb von Fernbahnen fast ausschließlich Gleichstrom benutzt.

Von der gesamten in Deutschland verbrauchten elektrischen Energie dürften immer noch etwa 15 v. H. auf Gleichstrom entfallen.

Es ist daher in sehr vielen Fällen notwendig, den zugeführten Wechselstrom in Gleichstrom umzuformen. Diese Umformung kann durch Motorgeneratoren, durch Umformer oder durch Gleichrichter erfolgen.

### I. Motorgeneratoren

Ein Motorgenerator ist ein Maschinensatz, der aus einem direkt gekuppelten Motor und Generator besteht (Bild 122 und 123). Es können auch mehrere Generatoren mit einem gemeinsamen Motor direkt gekuppelt sein (Bild 124). Bei einem Motorgenerator sind Motor und Generator nur mechanisch verbunden. Beide Maschinen sind elektrisch voneinander unabhängig.

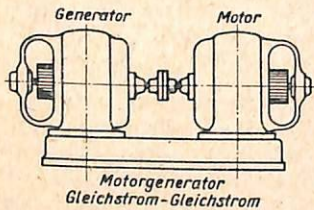


Bild 122. Motorgenerator für Gleichstrom-Gleichstrom

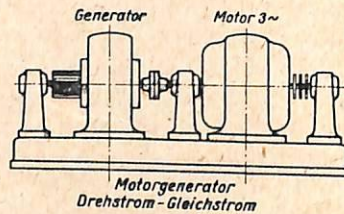


Bild 123 Motorgenerator für Drehstrom-Gleichstrom

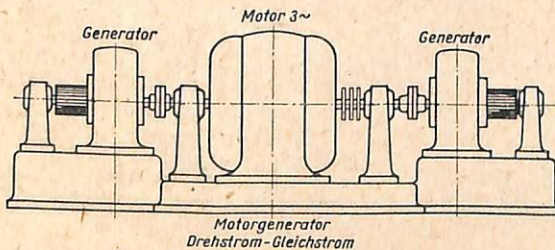


Bild 124. Motorgenerator für Drehstrom-Gleichstrom (2 Gleichstromgeneratoren)

Soll Drehstrom in Gleichstrom umgeformt werden, dann muß als Motor ein Drehstrommotor und als Generator ein Gleichstromgenerator verwendet werden. Der Antriebsmotor kann in diesem Fall ein Synchron- oder ein Asynchronmotor sein. Steht außer Drehstrom auch Gleichstrom zur Verfügung, dann



wird bei Motorgeneratoren für große Leistungen als Antriebsmotor meistens ein Synchronmotor verwendet. Das Anwerfen des Synchronmotors kann in solchem Falle durch den direkt gekuppelten Gleichstromgenerator erfolgen, in dem dieser für die Zeit des Anlaufs als Gleichstrommotor betrieben wird.

## 2. Einankerumformer

Einankerumformer sind elektrische Maschinen, bei denen die Umformung der einen Stromart in die andere in einem Anker erfolgt. Ihre Bauart ist die gleiche wie die der Gleichstrommaschinen. Sie besitzen jedoch außer einem Stromwender noch mehrere Schleifringe. Stromwender und Schleifringe sind mit derselben Ankerwicklung verbunden. Beim Umformen von Drehstrom in Gleichstrom sind entweder 3 oder 6 Schleifringe auf der Ankerwelle isoliert befestigt (Bild 125 u. 126). Durch die Schleifringe wird der Ankerwicklung der zum Antrieb des Umformers notwendige Wechselstrom zugeführt, während der Stromwender zur Entnahme des Gleichstromes dient. Die Umformung der einen Stromart in die andere erfolgt rein elektrisch, während sie beim Motorgenerator auf mechanischem Wege stattfindet. Der Umweg über die mechanische Gleichrichtung fällt beim Einankerumformer fort, infolgedessen hat dieser Umformer einen erheblich besseren Wirkungsgrad als der Motorgenerator.

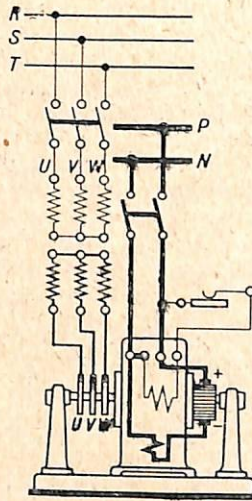


Bild 125  
Einankerumformer  
mit 3 Schleifringen

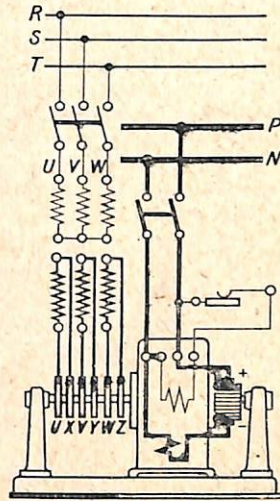


Bild 126  
Einankerumformer  
mit 6 Schleifringen

Beim Einankerumformer wird die Ankerwicklung von Gleich- und von Wechselströmen durchflossen. Diese Ströme heben sich zum Teil gegenseitig auf. Infolgedessen kann der Werkstoff des Ankers besser ausgenutzt werden, wodurch die Maschine verhältnismäßig klein und leicht wird. Einankerumformer benötigen weniger Raum und leichtere Fundamente als Motorgeneratoren.

Beim Einankerumformer werden wie beim Synchronmotor die Pole mit Gleichstrom erregt und der Anker mit Wechselstrom gespeist. Er hat infolgedessen die gleichen Eigenschaften wie der Synchronmotor. Seine Drehzahl hängt wie bei diesem von der Polzahl und der Periodenzahl ab. Sie berechnet sich aus

$$\text{Drehzahl} = \frac{60 \times \text{Periodenzahl}}{\text{halbe Polzahl}}$$



Mit Hilfe des Nebenschlußreglers läßt sich sein Leistungsfaktor  $\cos \varphi$  auf 1 einstellen. Bei  $\cos \varphi = 1$  sind die Stromverluste in den Wechselstromzuleitungen und in der Ankerwicklung am geringsten.

**Gleichstrom- und Wechselstromspannung.** Zwischen der Gleich- und der Wechselstromspannung des Umformers besteht ein bestimmtes, festes Abhängigkeitsverhältnis. Dieses Verhältnis ist von der Drehzahl unabhängig und ändert sich mit der Belastung nur wenig. Die am Stromwender entnommene Gleichspannung ist immer höher als die zugeführte effektive Wechselspannung.

Bei Dreiphasenumformern mit 3 Schleifringen zur Umwandlung von Drehstrom in Gleichstrom beträgt die effektive Drehstromspannung etwa das 0,65fache der Gleichspannung. Soll z. B. eine Gleichspannung von 230 V entnommen werden, dann muß die zugeführte effektive Drehstromspannung etwa  $0,65 \times 230 \approx 150$  V betragen.

Bei Sechspannumformern mit 6 Schleifringen muß die effektive Wechselspannung einer jeden Phase etwa das 0,73fache der Gleichspannung sein. Infolgedessen wird bei einem Sechspannumformer für 450 V Gleichstrom die Phasenspannung  $0,73 \times 450 \approx 330$  V betragen. Zur Erzeugung der erforderlichen Wechselspannung ist ein Umspanner nötig. Dieser Umspanner wird bei Sechspannumformern außer zur Umspannung auch zur Umwandlung von Drehstrom in Sechspanstrom benutzt.

Die Stromstärke in jedem Schleifring ist bei Dreiphasenumformern etwa 0,95 und bei Sechspannumformern etwa 0,5mal so groß wie auf der Gleichstromseite.

Einankerumformer bis 50 kW werden in der Regel als Dreiphasenumformer und solche über 50 kW als Sechspannumformer gebaut.

**Regelung der Spannung.** Die Gleichspannung des Umformers ist von der Erregung fast unabhängig. Sie hängt nur von der Spannung des zugeführten Wechselstromes ab. Um die Gleichspannung verändern zu können, muß die Wechselspannung geregelt werden. Die Regelung der Wechselspannung kann entweder durch einen Umspanner oder durch Vorschalten von Drosselspulen erfolgen.

**Spannungsteilung.** Für Gleichstromdreileiteranlagen wird der Mittelleiter an den Sternpunkt (Nullpunkt) der Sekundärwicklung des Dreiphasenumspanners angeschlossen.

Bei Sechspannumformern werden die drei Mittelpunkte des Umspanners durch einen dreipoligen Umschalter zu einem Sternpunkt verbunden. Dieser Schalter darf erst nach erfolgtem Hochlaufen des Umformers eingeschaltet werden.

Das Anlassen des Einankerumformers geschieht mittels Gleichstrom von der Gleichstromseite aus durch einen besonderen Anlasser oder von der Drehstromseite aus (asynchroner Anlauf). Eine dritte Möglichkeit besteht darin, daß ein besonderer kleiner Drehstrommotor zum Anlassen benutzt wird (Anwurfmotor), der entweder direkt oder durch ein ausrückbares Vorgelege mit dem Umformer gekuppelt ist. Die Polzahl dieses Motors kann gleich oder höher sein als die des Umformers. Beim Anlassen durch Anwurfmotor ist Synchronisierung erforderlich.

**Fliehkraftschalter.** Arbeitet der Umformer mit anderen Gleichstrommaschinen parallel, dann wird beim plötzlichen Ausbleiben des Wechselstromes der Umformer gleichstromseitig als Motor arbeiten. In diesem Falle besteht die große Gefahr, daß die Drehzahl des Umformers zu hoch ansteigt. Damit der Umformer nicht durchgehen kann, wird mit der Motorwelle ein Fliehkraftschalter verbunden, der beim



Übersteigen der Nenndrehzahl einen Selbstschalter betätigt, der den Umformer auf der Gleichstromseite ausschaltet.

Der Einankerumformer kann auch zur Umwandlung von Gleichstrom in Drehstrom verwendet werden. Hierfür sind besondere Maßnahmen erforderlich.

### 3. Kaskadenumformer

Außer den Einankerumformern werden noch sogenannte Kaskadenumformer zur Umformung von Drehstrom in Gleichstrom verwendet. Ein solcher Kaskadenumformer besteht aus einem Drehstromasynchronmotor und einem Gleichstromgenerator, deren Anker auf derselben Welle sitzen. Der Läufer des Motors ist mit dem Anker des Generators mechanisch gekuppelt. Läufer- und Ankerwicklung sind außerdem durch Leitungen verbunden. Der Läufer des Motors speist infolgedessen den Anker des Generators. Läufer und Anker sind mithin sowohl mechanisch als auch elektrisch gekuppelt. Die Umformung von Drehstrom in Gleichstrom erfolgt teilweise auf mechanischem und teilweise auf elektrischem Wege. Der Kaskadenumformer bildet infolgedessen eine Zwischenstufe zwischen der rein mechanischen Umformung (Motorgenerator) und der rein elektrischen Umformung (Einankerumformer).

### 4. Der Kontaktumformer der SSW

Bei Maschinenumformern (Motorgenerator, Einankerumformer, Kaskadenumformer) dient zur Erzeugung der Gleichspannung ein Stromwender mit Bürsten. Ein solcher Stromwender mit Bürsten ist eine Schaltvorrichtung, die durch Umschalten eine größere Zahl phasenverschobener Wechselspannungen nacheinander in den Gleichstromkreis schaltet. Dabei bleibt jede dieser Wechselspannungen immer nur so lange auf den Gleichstromkreis geschaltet, solange sie die gewünschte Richtung hat. Damit keine Unterbrechung des Gleichstromes eintritt, muß die Phase der neuen Wechselspannung eingeschaltet sein, bevor die Phase der alten Wechselspannung abgeschaltet wird. Während der Zeit, daß beide Phasen gleichzeitig eingeschaltet sind, werden diese Phasen über die Bürsten kurzgeschlossen. Der dabei entstehende Kurzschlußstrom muß von der Schaltvorrichtung in dem Augenblick unterbrochen werden, in dem er in der alten Phase Null wird und seine Richtung wechseln will. Durch Verwendung einer großen Zahl von Wechselphasen mit niedriger Spannung und durch Verwendung geeigneter Hilfsmittel wie Bürsten aus Kohle und Wendepole findet eine sichere, funkenfreie Unterbrechung der Wechselphasen statt.

Der Stromwender mit Bürsten hat jedoch als Schaltvorrichtung den Nachteil, daß er bei großen Stromstärken entsprechend groß ausfällt und die Verluste durch

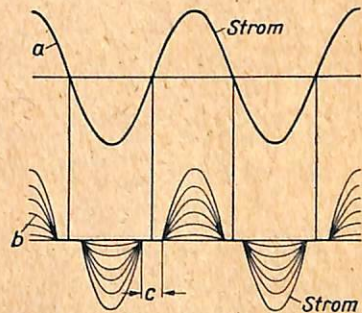


Bild 127 a  
Einfluß der Schaltdrossel  
auf den Verlauf des Wechsel-  
stromes beim Kontaktumformer



Stromwärme und mechanische Reibung beträchtlich werden. Dies wirkt sich auf den Wirkungsgrad der Umformung ungünstig aus.

Nun besteht seit langem das Bestreben, die Umschaltung der Wechselphasen auf den Gleichstromkreis mit Hilfe einfacher mechanischer Schalter (Trennschalter) durchzuführen. Dies macht jedoch Schwierigkeiten, weil es sich in diesem Falle nur um wenige Phasenspannungen handelt, so daß bei jeder einzelnen Umschaltung Spannungen in der Höhe der vollen Gleichspannung gesperrt werden müssen. Auch darf bei der Umschaltung kein Lichtbogen entstehen, weil sonst die Schalterkontakte abbrennen. Lichtbogen entstehen beim Umschalten einfacher mechanischer Schalter mit Druckkontakten dann nicht, wenn entweder der zu unterbrechende Strom sehr schwach oder die bei der Unterbrechung sich bildende Spannung (Sperrspannung) sehr niedrig ist. Diese Bedingungen werden beim Kontaktumformer der SSW durch Einschaltung geeigneter Schaltdrosseln besonderer Bauart erfüllt. Durch den Einfluß dieser

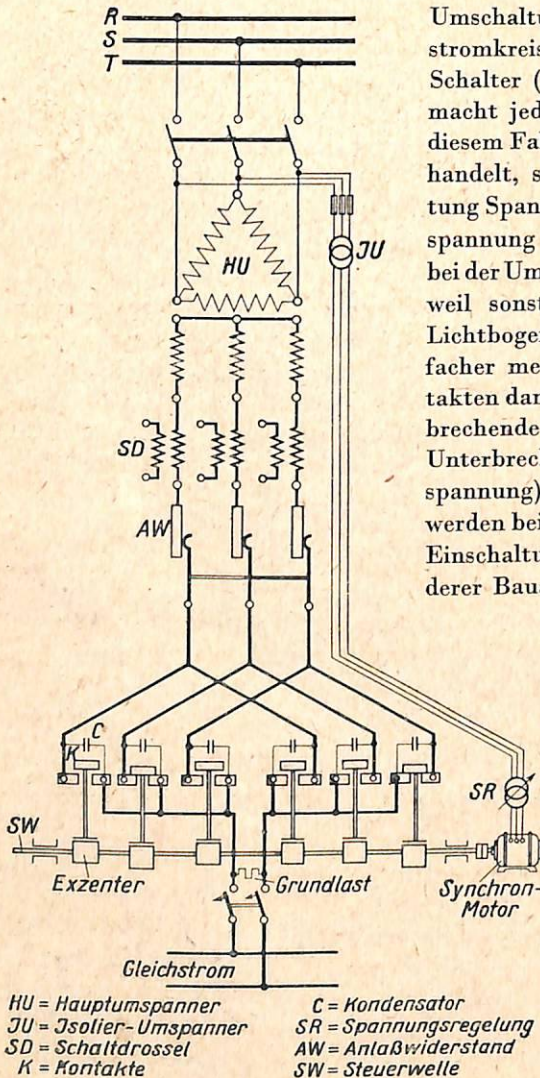


Bild 127b. Schaltplan des Kontaktumformers

stromlosen Zeit unterbrochen, wodurch ein lichtbogenfreies Umschalten gewährleistet bleibt. Damit die Schalterkontakte spannungsfrei bleiben, werden zu ihnen Kondensatoren parallel geschaltet.

Wesentlich ist noch, daß durch die Wirkung der Schaltdrosseln die stromlose

Stromhalbwellen des Wechselstromes eingeschnürt. Dadurch wird die Zeit des Stromnulldurchganges verlängert, d. h. beim Nulldurchgang des Stromes entsteht eine stromlose Zeit. Der Nulldurchgang erfolgt jetzt nicht mehr in einem Punkt (Bild 127a, Kurve a), sondern in einer Nullpause von endlicher Dauer (Bild 127a, Kurve b). Das Öffnen der Schalterkontakte ist so gelegt, daß es in der Mitte der stromlosen Zeit  $c$  erfolgt. Aber selbst dann, wenn der Öffnungszeitpunkt etwas schwankt, werden die Schalterkontakte immer noch in der



Zeit bei allen Strombelastungen gleich groß bleibt. Dies ist in Bild 127 a (Kurve *b*) durch die übereinander gezeichneten Stromkurven angedeutet.

Die von der SSW verwendeten Druckschalter haben Kontakte aus Kupfer mit Silberauflage. Ihr Widerstand ist sehr gering. Infolgedessen ist der in ihnen entstehende Verlust auch sehr gering. Dadurch wird der Wirkungsgrad hoch. So z. B. hat ein K-Umformer für 300 V und 5000 A bei Vollast einen Wirkungsgrad von 99 v. H. (ohne Umspanner).

Der SSW-Kontaktumformer (grundsätzlicher Schaltplan Bild 127b) besteht aus einem dreiphasigen Umspanner üblicher Bauart und drei Schaltdrosseln besonderer Bauart. Die Druckschalter arbeiten in Brückenschaltung und sind in ihrem Takt um  $120^\circ$  versetzt. Ihre Betätigung erfolgt mechanisch durch eine Steuerwelle mit Nocken, die durch einen kleinen Synchronmotor angetrieben wird. Die Regelung der Spannung geschieht in der Weise, daß der Einschaltzeitpunkt gegenüber der Wechselspannung verschoben wird. Dies kann z. B. durch einen Phasendreher geschehen, der in der Zuleitung zum antreibenden Synchronmotor liegt. Das Anlassen erfolgt durch einen dreipoligen Widerstand auf eine Grundlast.

Die Vorteile des Kontaktumformers sind sein hoher Wirkungsgrad, seine kleine Anlaßzeit, sein geringes Gewicht (geringer Werkstoffaufwand), sein geringer Platzbedarf und die leichte Auswechselbarkeit aller dem Verschleiß unterworfenen Teile.

Der K-Umformer kommt insbesondere für Spannungen zwischen 30 und 600 V in Frage.

## VIII. Stromrichter

Zu den Stromrichtern gehören Gleichrichter, Wechselrichter und Umrichter.

Gleichrichter dienen zum Umformen von Wechselstrom in Gleichstrom. Wechselrichter dienen zum Umformen von Gleichstrom in Wechselstrom. Umrichter verwandeln Wechselstrom einer bestimmten Frequenz in Wechselstrom einer anderen Frequenz (z. B. von 50 auf  $16\frac{2}{3}$  Perioden).

### Gleichrichter

#### 1. Quecksilberdampf-Gleichrichter

Die Umformung von Wechselstrom in Gleichstrom kann außer mit Maschinen und Kontaktumformern auch mit Gleichrichtern erfolgen. Die größte Bedeutung haben die Quecksilberdampf-Gleichrichter. Solche Gleichrichter sind Geräte mit einem Gleichrichtergefäß aus Glas oder Stahl. Sie besitzen gegenüber Maschinenumformern erhebliche Vorteile. Solche Vorteile sind geringer Platzbedarf, einfache Bedienung, geringe Wartung, hohe Überlastbarkeit, hoher Wirkungsgrad, Unempfindlichkeit gegen Spannungs- und Frequenzschwankungen usw. Sie sind für selbsttätigen Betrieb gut zu gebrauchen und eignen sich wegen ihrer hohen Überlastbarkeit und Unempfindlichkeit gegen Spannungsschwankungen besonders zum Umformen von Drehstrom in Gleichstrom für den Betrieb elektrischer Bahnen.

**Wirkungsweise.** In einem Gefäß aus Glas oder Stahl (Bild 128) befinden sich die beiden Elektroden *A* und *K*. Beide Elektroden sind an der Gefäßwand luftdicht



abgeschlossen, damit keine Luft in das Gefäß eindringen kann. Aus dem Gefäß ist fast alle Luft entfernt worden, so daß der Luftdruck im Gefäß nur noch etwa  $\frac{1}{1000}$  mm Quecksilbersäule oder rund  $\frac{1}{1000000}$  Atmosphäre beträgt. Elektrode *A* ist mit dem einen Ende der Sekundärwicklung des Umspanners verbunden. Das andere

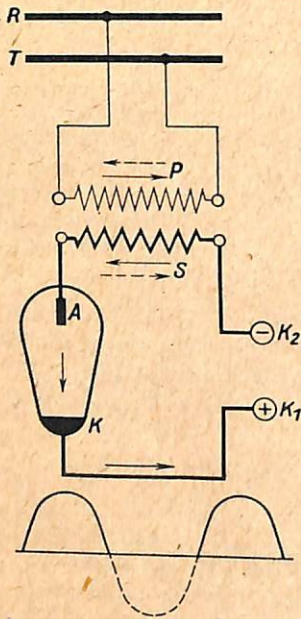


Bild 128. Einphasengleichrichter mit einer Anode

Ende dieser Wicklung ist an die Klemme  $K_2$  angeschlossen. Die untere Elektrode *K* ist mit der Klemme  $K_1$  verbunden. Solange beide Elektroden kalt sind, ist der Sekundärstromkreis des Umspanners offen, d. h. durch das Gefäß fließt kein Strom. Wird die untere Elektrode *K* auf Weißglut erhitzt, während die obere Elektrode *A* kalt (unter Weißglut) bleibt, dann treten aus der glühenden Elektrode *K* negativ geladene Elektronen und wandern von dieser zur kalten Elektrode *A*. Dieser Elektronenstrom bildet gewissermaßen eine Brücke für eine bestimmte Richtung des Umspannerstromes, denn es fließt jetzt im Gefäß ein Strom nur in der Richtung von der kalten zur glühenden Elektrode. Die entgegengesetzte Stromrichtung bleibt für den Umspannerstrom nach wie vor gesperrt. Eine solche Einrichtung wirkt infolgedessen wie ein Rückschlagventil, das Wechselstrom nur in einer Richtung durchläßt.

Die kalte Elektrode *A* wird zur Stromeintrittsstelle (Anode) und die weißglühende Elektrode *K* zur Stromaustrittsstelle (Kathode) für den gleichgerichteten Strom.

Die Anode *A* wird aus Metall oder Graphit hergestellt. Ihre Temperatur beträgt während des Betriebes etwa  $600^\circ\text{C}$  und bleibt unter Weißglut. Sie wird im Gegensatz zur weißglühenden Kathode *K* als kalt bezeichnet.

Als Kathode wird Quecksilber verwendet, weil Quecksilber und sein Dampf für die Gleichrichtung besonders gute Eigenschaften besitzen.

Wenn Strom von der Anode zur Kathode fließt, entsteht auf dem Quecksilber ein hell leuchtender Fleck, der die für die Strombrücke erforderlichen Elektronen aussendet. Dieser Fleck wird Kathodenfleck genannt. Seine Temperatur beträgt etwa  $3000^\circ\text{C}$ . Infolge dieser hohen Temperatur wird dauernd Quecksilber verdampft. Dieser Quecksilberdampf verdichtet sich im oberen Gefäßteil zu Quecksilber, das an den Gefäßwänden entlang der Kathode wieder zufließt und diese selbsttätig erneuert. Ein Verbrauch an Quecksilber findet infolgedessen nicht statt.

Durch die Quecksilberdämpfe wird der Spannungsabfall im Gleichrichtergefäß erheblich vermindert.

Die Verwendung von nur einer Anode hat den großen Nachteil, daß nur die eine Hälfte der Stromperiode ausgenutzt wird, während die andere abgesperrt bleibt (Bild 128).

Damit beide Hälften ausgenutzt werden, sind für Einphasenstrom zwei Anoden erforderlich.



In Bild 129 ist der grundsätzliche Schaltplan eines Quecksilberdampf-Gleichrichters für Einphasenstrom gezeichnet. Die beiden Anoden sind an die Enden der Sekundärwicklung angeschlossen. Der Nullpunkt der Sekundärwicklung ist mit dem Minuspol des Gleichstromnetzes verbunden. Durch jede der beiden Anoden wird eine halbe Stromperiode in das Gleichstromnetz übergeleitet. Wechselstrom- und Gleichstromnetz sind elektrisch verkuppelt.

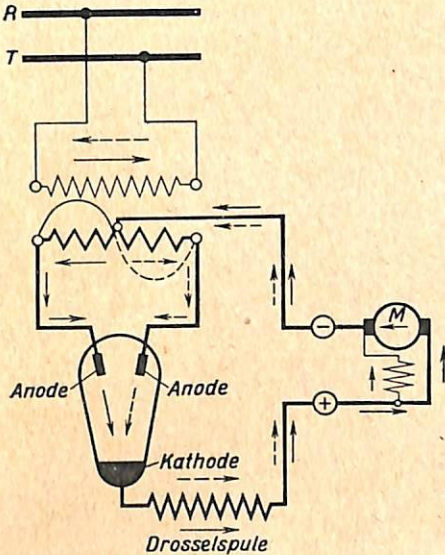


Bild 129. Einphasengleichrichter mit 2 Anoden



Bild 130



Bild 131



Bild 132

Bild 130—132. Stromverlauf bei Ein- und Dreiphasengleichrichtern

Der nach der Schaltung Bild 129 gleichgerichtete Wechselstrom besteht aus einzelnen Stromstößen, deren Zahl gleich der Wechselzahl des zugeführten Wechselstroms ist. Nach jedem Wechsel würde die Stromstärke auf Null sinken (Bild 130). Der gleichgerichtete Strom wird um so gleichmäßiger, je mehr Phasen vorhanden sind. Er ist bei Dreiphasenstrom (Bild 132) wesentlich gleichmäßiger als bei Einphasenstrom. Noch gleichmäßiger wird er bei Sechsphasenstrom.

Um auch bei Einphasenstrom einen für technische Zwecke genügend gleichmäßigen Strom zu erhalten, wird auf der Gleichstromseite hinter die Kathode eine Drosselspule eingeschaltet. Durch die Selbstinduktion dieser Drosselspule wird das Ansteigen und Abfallen des Stromes auf der Gleichstromseite verzögert. Die Stromhalbwellen überdecken sich jetzt teilweise (Bild 131). Dadurch wird der Gleichstrom geglättet (Glättungsdrosselspule).

Bild 133 zeigt den grundsätzlichen Schaltplan eines Gleichrichters für Dreiphasenstrom. Die Primärwicklung des Umspanners

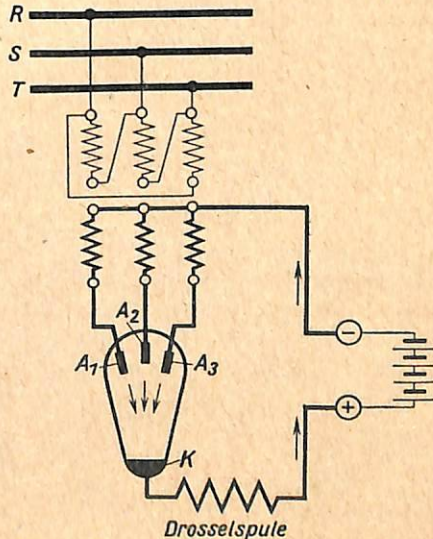


Bild 133. Grundsätzlicher Schaltplan eines Gleichrichters für Dreiphasenstrom



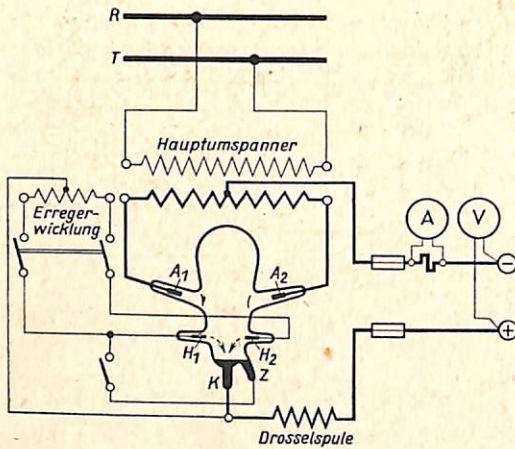


Bild 134. Gleichrichter für Einphasenstrom mit Kippzündung

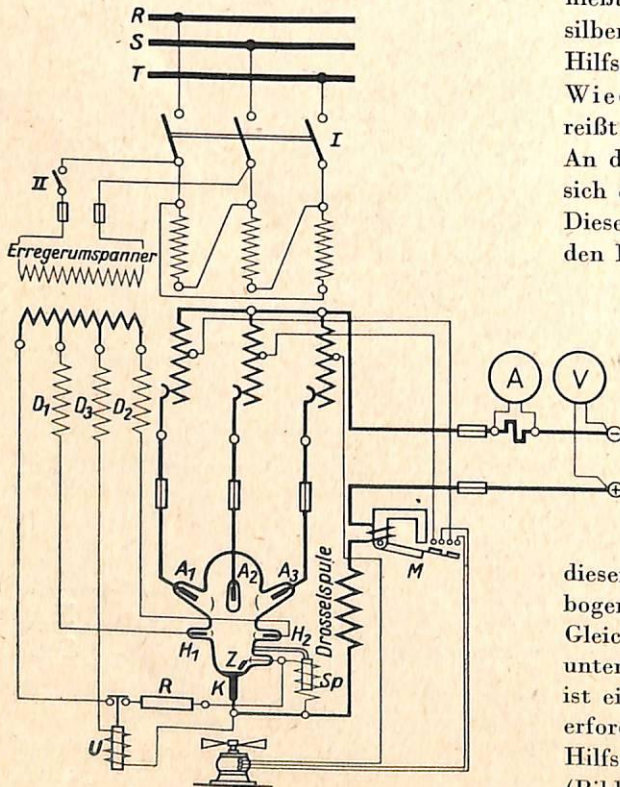


Bild 135. Gleichrichter für Dreiphasenstrom mit Kippzündung

ist in Dreieck geschaltet, die Sekundärwicklung dagegen in Stern, um die Gleichstromrückleitung an den Nullpunkt anschließen zu können.

Das Einschalten des Gleichrichters geschieht durch Bildung des erforderlichen Quecksilberlichtbogens. Dieser Lichtbogen entsteht zwischen Kathode und Anode. Er verbindet die Quecksilberkathode abwechselnd mit den einzelnen Anoden.

Zur Erzeugung des Hauptlichtbogens dient eine Hilfsanode, die aus Quecksilber sein kann. Durch Kippen des Glasgefäßes (Bild 134) fließt von der Hilfsanode Z Quecksilber zur Kathode K über. Der Hilfsstromkreis ist geschlossen. Beim Wiederaufrichten des Gefäßes reißt dieser Quecksilberfaden ab. An der Unterbrechungsstelle bildet sich ein Unterbrechungslichtbogen. Dieser Hilfslichtbogen erzeugt den Hauptlichtbogen. Die Zündung ist eingeleitet, und der Hilfslichtbogen kann durch Öffnen des Hilfsstromkreises wieder ausgeschaltet werden.

Zur Aufrechterhaltung des Hauptlichtbogens ist eine Mindeststromstärke von etwa 5 Ampere erforderlich. Sobald die Stromstärke unter

diesen Wert sinkt, reißt der Lichtbogen ab und erlischt. Damit der Gleichrichter auch bei Belastungen unter 5 Ampere eingeschaltet bleibt, ist eine besondere Hilfserrregung erforderlich, die aus den beiden Hilfelektroden  $H_1$  und  $H_2$  besteht (Bild 134). Nach der ersten Zündung beim Einschalten des Gleichrichters bildet sich zwischen diesen



Hilfselektroden ein Hilfslichtbogen, der dauernd bestehen bleibt. Sobald der Hauptstromkreis geschlossen wird, erregt dieser Hilfslichtbogen augenblicklich den Hauptlichtbogen auch dann, wenn die Stromstärke im Hauptstromkreis weniger als 5 A beträgt. Eine besondere Kippbewegung ist nicht mehr erforderlich.

In Bild 135 ist der grundsätzliche Schaltplan eines Glasgleichrichters mit Kippzündung für Dreiphasenstrom (Drehstrom) angegeben. Die drei Anoden  $A_1 - A_2 - A_3$  sind mit der Wicklung eines Umspanners verbunden.

Die Inbetriebsetzung des Gleichrichters geschieht durch Einschalten des Hauptschalters I beim Hauptumspanner und des Schalters II für den Erregerumspanner. Nach dem Einschalten dieser Schalter wird die Kippspule  $Sp$  von Strom durchflossen. Sie zieht den Eisenkern nach unten und kippt den mit diesem verbundenen Glaskolben nach rechts. Das Quecksilber der Kathode  $K$  kommt jetzt mit der Graphitelektrode  $Z$  der Zündanode in Berührung. Die Kippspule, die zur Kathode  $K$  und Elektrode  $Z$  parallel liegt, wird im Augenblick der Berührung von  $K$  und  $Z$  stromlos. Infolgedessen kippt der Glaskolben nach links zurück. Die Verbindung zwischen Kathode  $K$  und Elektrode  $Z$  wird unterbrochen. An der Unterbrechungsstelle entsteht ein Unterbrechungsfunke (Zündfunke), der den Lichtbogen zwischen den Hilfselektroden  $H_1$  und  $H_2$  einleitet. Sobald der Erregerstrom zwischen den Hilfselektroden  $H_1 - H_2$  fließt, wird der Zündstromkreis durch den Unterbrecher  $U$  selbsttätig ausgeschaltet.

Der Motorschalter  $M$  dient zum Einschalten eines Lüfters, der eine gleichmäßige Kühlung des Glaskolbens bewirkt.

**Tauchzündung.** Während die Tauchzündung früher nur bei Quecksilberdampfgleichrichtern mit Stahlgehäuse Verwendung fand, wird sie heute auch bei Quecksilberdampfgleichrichtern mit Glasgehäuse allgemein verwendet.

In Bild 136 ist der grundsätzliche Schaltplan eines AEG-Quecksilberdampfgleichrichters mit Glasgehäuse und Tauchzündung angegeben.

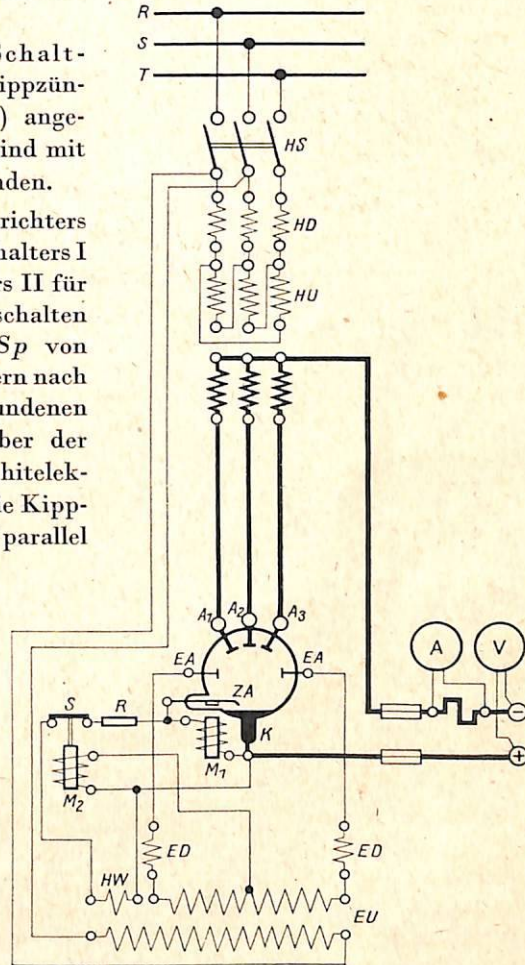


Bild 136. Gleichrichter für Dreiphasenstrom mit Tauchzündung



Beim Einschalten des Hauptschalters *HS* werden Hauptumspanner *HU* und Erregerumspanner *EU* unter Spannung gesetzt. Von der sekundären Hilfswicklung *HW* fließt jetzt ein Strom durch die Magnetwicklung des Zündmagneten  $M_1$ , über den Widerstand *R* und die Schalterbrücke *S* zur Hilfswicklung zurück. Der Zündmagnet  $M_1$  wird erregt und zieht den Anker der Zündanode nach unten, bis die Zündanode das Quecksilber der Kathode berührt. Sobald die Zündanode das Quecksilber berührt, wird die Wicklung des Zündmagneten  $M_1$  überbrückt. Der Zündmagnet wird unmagnetisch und läßt die Zündanode los. Diese schnell nach oben zurück. Dadurch entsteht ein Abreißfunke, der die Zündung der Erregeranode *EA* einleitet. Vom Mittelpunkt der Sekundärwicklung des Erregerumspanners *EU* fließt jetzt Strom durch die Magnet-

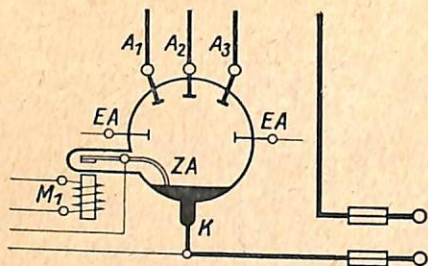


Bild 137. Gleichrichter für Dreiphasenstrom mit Tauchzündung

wicklung  $M_2$  zur Kathode und von dieser über die Erregeranode *EA* zur Sekundärwicklung zurück. Der Magnet  $M_2$  zieht seinen Anker nach oben und unterbricht damit den Zündstromkreis für die Dauer des Betriebes.

Diese Anordnung hat den Vorteil der sicheren Zündung, weil die Zündanode beim Stromloswerden des Zündmagneten  $M_1$  in Schwingungen gerät und dabei wiederholt mit dem Quecksilber der Kathode in Berührung kommt, so daß nacheinander mehrere Abreißfunken entstehen. *ED* sind Erregerdrosselspulen.

Bei einer anderen Anordnung (Bild 137) berührt die Zündanode das Quecksilber der Kathode solange der Gleichrichter ausgeschaltet ist. Beim Einschalten wird die Zündanode vom Magneten  $M_1$  links nach unten und damit rechts nach oben gezogen. An der Unterbrechungsstelle zwischen Zündanode und Kathode entsteht der erforderliche Zündfunke. Der Anker des Zündmagneten bleibt während des Betriebes dauernd angezogen.

**Rückzündung.** Bei starker Überlastung, die längere Zeit dauert, und bei nicht genügender Kühlung des Gleichrichtergefäßes wird die Temperatur im Gleichrichtergefäß zu hoch. Bei zu hoher Temperatur verliert der Gleichrichter seine Ventilwirkung. Der Strom wird dann nicht mehr gezwungen, nur in der Richtung von der Anode zur Kathode zu fließen. Er kann jetzt seinen Weg von Anode zu Anode nehmen. In diesem Fall werden die entsprechenden Phasen der Sekundärwicklung des Hauptumspanners kurzgeschlossen. Dieser gefürchtete Kurzschluß wird Rückzündung genannt.

Infolge der guten Kühlung moderner Gleichrichter kommen Rückzündungen kaum noch vor.

**Wirkungsgrad.** Der Spannungsabfall im Gleichrichter ist von der Stromstärke unabhängig. Er beträgt etwa 15 bis 30 Volt.

Der Wirkungsgrad wird um so besser, je höher die Gleichspannung ist. Bei einer Gleichspannung von 115 V und einem Spannungsabfall von 18 V im Gleichrichtergefäß ergibt sich ein Wirkungsgrad von  $115 : (115 + 18) = 86,4$  v. H., während bei einer Gleichspannung von 550 V und 20 V Spannungsabfall der Wirkungsgrad  $550 : 570 = 96,5$  v. H.



beträgt. Der Gesamtwirkungsgrad einer Gleichrichteranlage ist von den Verlusten im Umspanner, im Gleichrichtergefäß und im Hilfsstromkreis für die Erregung abhängig. Man rechnet im Mittel mit folgenden Werten:

Gleichspannung in Volt	Wirkungsgrad
60	75 v. H.
115	78 "
230	85 "
470	90 "
550	91 "

Quecksilberdampfgleichrichter mit Glasgefäßen werden für Stromstärken bis 500 A gebaut.

Bei größeren Stromstärken werden entweder mehrere Gleichrichter parallel geschaltet oder es werden Quecksilberdampf-Großgleichrichter in Stahlgehäuse verwendet. Großgleichrichter werden für Stromstärken bis 10 000 A und mehr gebaut.

**Zahl der Anoden.** Die Zahl der Anoden eines Gleichrichters richtet sich nach der Höhe der Stromstärke. Es gibt Gleichrichter mit 6, 12 und 24 Anoden.

**Regelung der Spannung mittels Gittersteuerung.** Durch die Anwendung der Gittersteuerung läßt sich die Gleichspannung bei Quecksilberdampf-Gleichrichtern von ihrem höchsten mittleren Wert stufenlos und praktisch verlustlos bis auf Null herabregeln. Das Gitter wurde erstmalig bei den Rundfunkröhren angewandt. Es wird als Drahtgitter oder gelochtes Blech isoliert in die Strombahn zwischen Anode und Kathode angeordnet.

Eine positive Gitterladung hat eine Anziehung, eine negative Gitterladung eine Abstoßung der von der Kathode ausgehenden Elektronen zur Folge. Bei positiver Gitterladung wird der Anodenstrom stärker, bei negativer Gitterladung schwächer. Durch eine entsprechend hohe negative Gitterspannung läßt sich bei Hochvakuumröhren (Rundfunkröhren) der Anodenstrom jederzeit ganz sperren. Auch bei dampf- und gasgefüllten Gefäßen (Gleichrichtern) kann durch ein negativ geladenes Gitter die Zündung verhindert, d. h. der Anodenstrom gesperrt werden. Hat aber bei diesen die Gitterspannung auch nur für einen Augenblick einen bestimmten Wert (kritische Spannung) überschritten, dann zündet die Anode. Der Anodenstrom setzt jetzt mit seiner vollen Stärke ein und bleibt während der positiven Halbwelle auch dann bestehen, wenn die Gitterspannung während dieser Halbwelle wieder negativ wird.

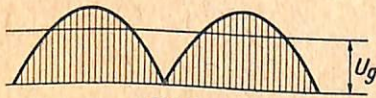


Bild 138

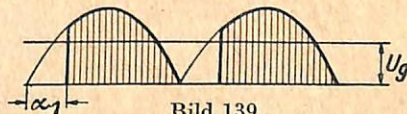


Bild 139

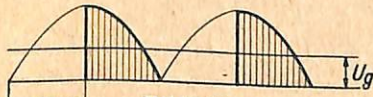


Bild 140

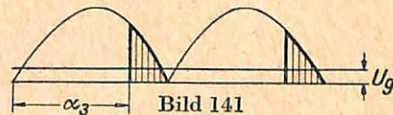


Bild 141

Bild 138—141. Einfluß des Gitters auf die Höhe der Gleichspannung

Während also bei der Rundfunkröhre durch Änderung der Gitterspannung entsprechende Änderungen in der Stärke des Anodenstromes entstehen und der Anodenstrom jederzeit gesperrt werden kann, läßt sich durch das Gitter beim Quecksilberdampf-Gleichrichter nur der Zeitpunkt der Zündung verschieben. Eine Änderung oder



gar Sperrung des einmal fließenden Anodenstromes ist während einer Stromhalb-  
welle nicht möglich. Der Anodenstrom wird erst Null, wenn die betreffende Strom-

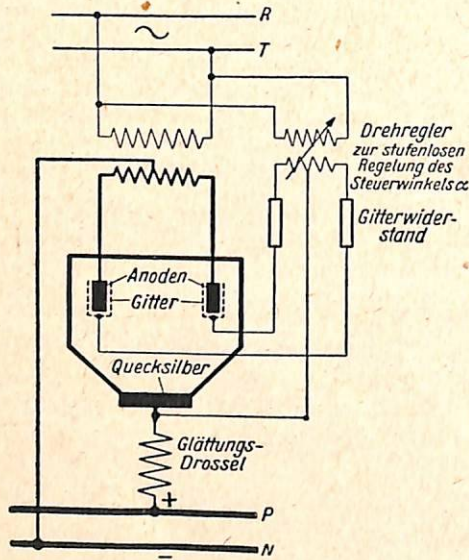


Bild 142. Schaltplan eines gittergesteuerten Einphasengleichrichters

Bild 142 ist der grundsätzliche Schaltplan eines gesteuerten Einphasengleichrichters dargestellt, bei der die Gitter mit Wechselspannung gesteuert werden. Dabei wird die Gitterspannung dem gleichen Wechselstromnetz entnommen wie die Anoden-  
spannung.

Zu jedem Augenblickswert der Anodenwechselspannung gehört eine bestimmte kritische Gitterspannung. Die Höhe dieser kritischen Gitterspannung ist in Bild 143

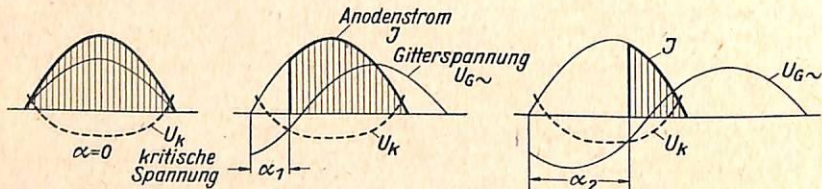


Bild 143. Einfluß der kritischen Gitterspannung auf die Zündung

durch die gestrichelte Linie  $U_k$  dargestellt. Solange die Gitterspannung unterhalb der Linie  $U_k$  liegt, tritt keine Zündung ein. Sobald jedoch die Gitterspannung die Linie  $U_k$  schneidet, erfolgt im gleichen Augenblick die Zündung.

Mit Hilfe eines Drehreglers läßt sich der Steuerwinkel  $\alpha$  vergrößern und damit die Höhe der mittleren Gleichspannung stufenlos herabregeln.

halbwelle durch Null geht (Bild 138). Durch die Verschiebung des Zündzeitpunktes läßt sich die mittlere Gleichspannung in ihrer Höhe verändern, d. h. regeln. Die Regelung kann stufenlos von der höchsten mittleren Gleichspannung bis auf Null erfolgen.

In Bild 138 ist die Zündung nicht verzögert. Der Steuerwinkel ist Null.

In Bild 139 dagegen ist die Zündung um den Winkel  $\alpha_1$  verzögert. Teilt man den Inhalt der schraffierten Fläche einer Halb-  
welle durch die Länge einer Halb-  
welle, dann erhält man die Höhe der mittleren Gleichspannung  $U_g$ . Je mehr die Zündung verzögert wird, um so kleiner wird die schraffierte Fläche (Bild 140 und 141) und um so niedriger ist die Höhe der mittleren Gleichspannung.

Die Gittersteuerung kann mit Gleich- oder mit Wechselspannung erfolgen. In

Bild 142 ist der grundsätzliche Schaltplan eines gesteuerten Einphasengleichrichters dargestellt, bei der die Gitter mit Wechselspannung gesteuert werden. Dabei wird die Gitterspannung dem gleichen Wechselstromnetz entnommen wie die Anoden-  
spannung.

Zu jedem Augenblickswert der Anodenwechselspannung gehört eine bestimmte kritische Gitterspannung. Die Höhe dieser kritischen Gitterspannung ist in Bild 143

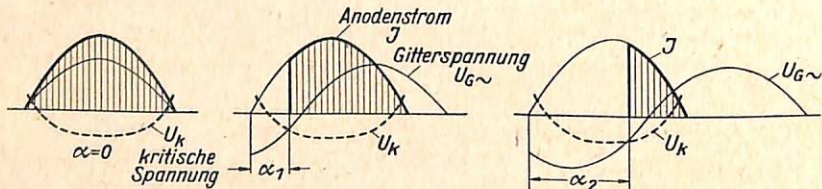


Bild 143. Einfluß der kritischen Gitterspannung auf die Zündung

durch die gestrichelte Linie  $U_k$  dargestellt. Solange die Gitterspannung unterhalb der Linie  $U_k$  liegt, tritt keine Zündung ein. Sobald jedoch die Gitterspannung die Linie  $U_k$  schneidet, erfolgt im gleichen Augenblick die Zündung.

Mit Hilfe eines Drehreglers läßt sich der Steuerwinkel  $\alpha$  vergrößern und damit die Höhe der mittleren Gleichspannung stufenlos herabregeln.



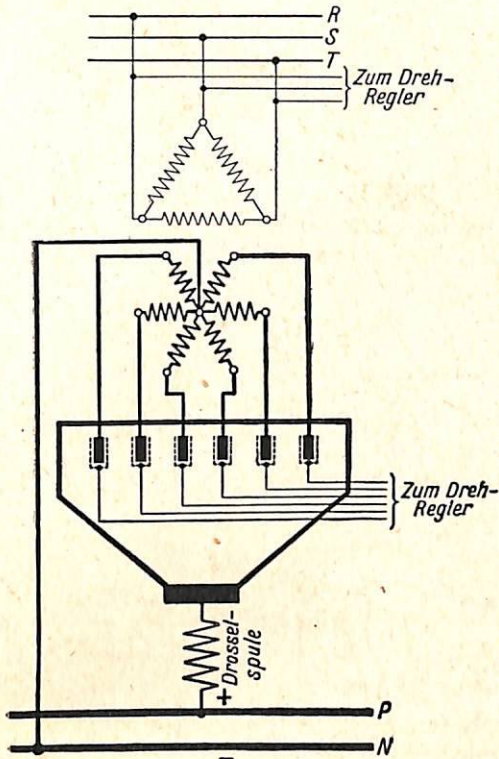


Bild 144. Schaltplan eines gittergesteuerten Sechphasengleichrichters

## 2. Glühkathodengleichrichter

### a) Glühkathoden-Niederspannungsgleichrichter

Zum Laden von Kleinbatterien für Elektrokarren u. dgl. wird außer dem Quecksilberdampfgleichrichter der Glühkathodengleichrichter mit Edelgasfüllung verwendet. Seine Bauart ist einfach, sein Eigenverbrauch gering und sein Anschaffungspreis verhältnismäßig niedrig.

In Bild 146 ist der grundsätzliche Schaltplan eines Glühkathodengleichrichters dargestellt.  $T_1$  ist der Hauptumspanner mit zwei getrennten Wicklungen. Die Anzapfungen an der Sekundärwicklung ermöglichen die Entnahme verschieden hoher Spannungen.  $T_2$  ist der Heizumspanner für die Heizung der Glühkathode  $K$ . Dieser Umspanner hat ebenfalls

Die zur Gittersteuerung erforderliche elektrische Energie ist sehr gering und beträgt nur wenige Watt. Sie ist im Verhältnis zur gesteuerten Leistung bedeutungslos, so daß die Gittersteuerung eine praktisch verlustlose Regelung darstellt.

Bild 144 zeigt den grundsätzlichen Schaltplan eines gittergesteuerten Sechphasengleichrichters und Bild 145 die Abhängigkeit der Höhe der Gleichspannung von der Größe des Steuerwinkels  $\alpha$ .

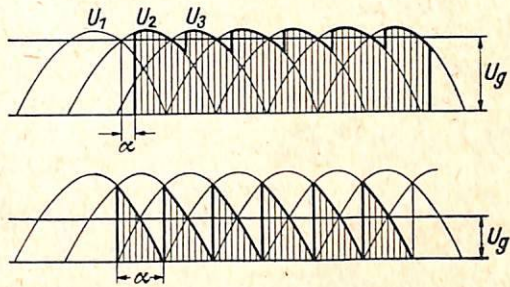


Bild 145. Einfluß des Steuerwinkels auf die Höhe der Gleichspannung

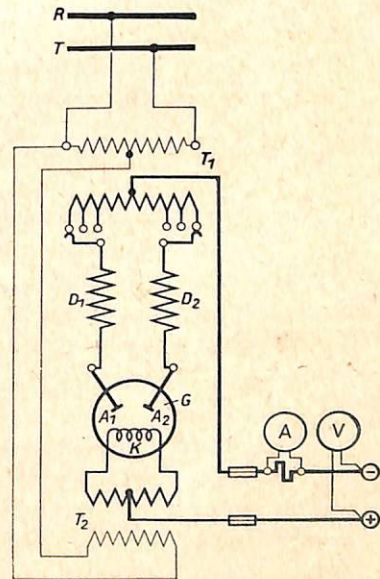


Bild 146. Schaltplan eines Glühkathodengleichrichters



getrennte Wicklungen.  $D_1$  und  $D_2$  sind Anodendrosselspulen. Glühkathoden-Niederspannungsgleichrichter kommen für Stromstärken bis 120 A bei Spannungen von 20 bis 250 V in Frage.

### b) Glühkathoden-Hochspannungsgleichrichter

Diese Gleichrichter werden in der Gleichstrom-Hochspannungstechnik verwendet (Sendeanlagen, Prüfeinrichtungen). Sie enthalten an Stelle des Edelgases Quecksilber, das während des Betriebes verdampft. Man baut sie für Stromstärken bis 50 A bei Spannungen von 1000 bis 30 000 V.

## 3. Der Trockengleichrichter

Zu den Trockengleichrichtern gehören der Kupferoxydulgleichrichter und der Selengleichrichter.

Das Grundelement beider Gleichrichter ist die Gleichrichterscheibe. Sie setzt dem Wechselstrom in der einen Richtung nur sehr geringen Widerstand entgegen, während ihr Widerstand in der anderen Richtung sehr groß ist.

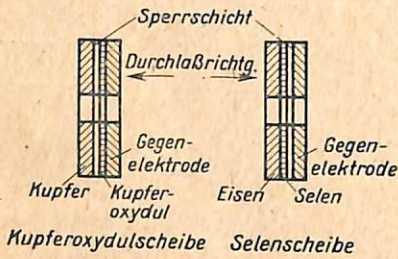


Bild 147/148. Gleichrichterscheiben

Bild 147 zeigt den grundsätzlichen Aufbau der Kupferoxydulgleichrichterscheibe und Bild 148 den der Selengleichrichterscheibe.

Bei der Gleichrichterscheibe des Kupferoxydulgleichrichters ist die Elektrode aus Kupfer. Durch ein besonderes Glühverfahren wird auf der einen Elektroden-seite eine Schicht Kupferoxydul von etwa 0,05 mm Dicke erzeugt. Zwischen dem Kupfer und der Kupferoxydulschicht bildet sich eine außerordentlich dünne Sperrschicht, deren Dicke man auf etwa  $\frac{1}{10000}$  mm schätzt. Der Widerstand dieser Sperrschicht ist in der Richtung vom Kupferoxydul zum Kupfer nur gering, in der umgekehrten Richtung dagegen sehr groß. Diese Schicht läßt den Strom infolgedessen nur in der Richtung vom Kupferoxydul zum Kupfer durch (Flußrichtung), die entgegengesetzte Richtung ist für den Strom so gut wie gesperrt (Sperrichtung). Damit guter Kontakt entsteht, wird auf die Kupferoxydulschicht eine dünne Schicht Graphit aufgebracht. Auf diese Graphitschicht ist als Gegenelektrode eine Scheibe aus Blei aufgepreßt.

Bei der Selengleichrichterscheibe ist auf die eine Seite der Elektrode eine dünne gleichmäßige Schicht Selen aufgeschmolzen. Auf diese Selenschicht ist als Gegenelektrode eine Sonderlegierung aufgespritzt. Die Sperrschicht liegt auf der Seite der Gegenelektrode. Infolgedessen erfolgt der Stromdurchlaß in der entgegengesetzten Richtung wie bei der Kupferoxydulscheibe.

Die Gleichrichterscheiben werden zu Gleichrichtersäulen zusammengebaut (Bild 149). Die Zahl der Scheiben richtet sich nach der erforderlichen Spannung und nach der Stärke des Stromes. Eine Kupferoxydulscheibe vermag 5 bis 20 V dauernd



zu sperren. Die Höhe der jeweils zu sperrenden Spannung hängt von der Herstellung ab. Bei Selenscheiben beträgt die Sperrspannung 14 bis 18 V.

Man unterscheidet bei Trockengleichrichtern zwei Bauarten. Die eine Bauart bezeichnet man als Druckplattenbauart, die andere als Freiflächenbauart.

Bei der Druckplattenbauart für Starkstrom werden runde Scheiben von 20 bis 40 mm Durchmesser auf einen isolierten Bolzen aufgereiht (Bild 149) und durch Druckmuttern zusammengehalten. Die Stromzuführung erfolgt durch zwischengelegte Anschlußbleche, die gleichzeitig zur Kühlung dienen. Bei größeren Stromstärken werden zur besseren Kühlung noch besondere Kühlbleche und Zwischenstücke zwischengelegt. Weil die Leistung solcher Gleichrichter wesentlich von der Kühlung abhängt, werden Gleichrichter für größere Leistung durch besondere Lüfter fremd gekühlt. Die Freiflächenbauart kommt in der Hauptsache für Stromstärken von 50 A und mehr in Frage.

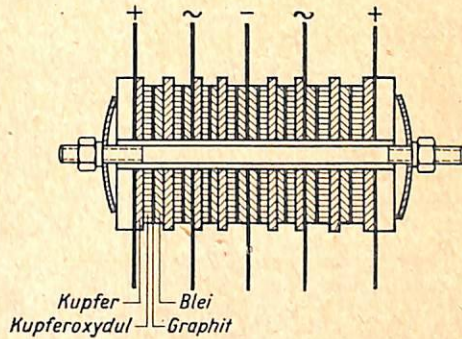


Bild 149. Druckplattensäule

Trockengleichrichter werden für Meßzwecke, Sendeanlagen, Batterieladung, Kinobogenlampen, Lichtbogenschweißung, galvanische Anlagen usw. verwendet. Es sind Kupferoxydulgleichrichteranlagen bis zu 30 000 A in Betrieb. Ihre Lebensdauer ist sehr groß.

Bild 150 zeigt den Schaltplan eines Kleinladegeräts, Bild 151 den eines Dauerladegeräts und Bild 152 den eines Drehstromladegeräts in Graetzschaltung.

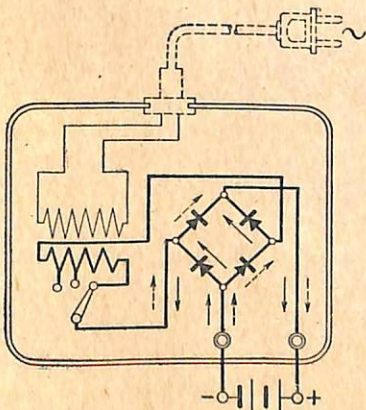


Bild 150. Kleinladegerät

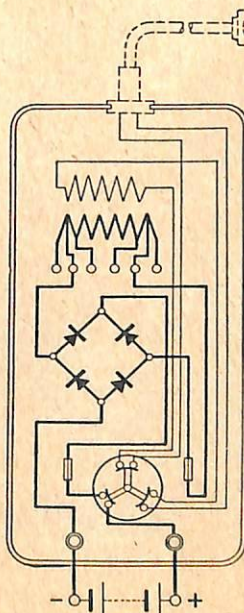


Bild 151. Dauerladegerät

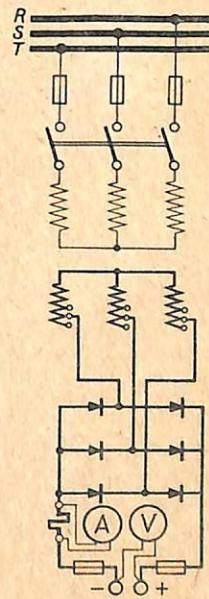


Bild 152. Drehstromladegerät



## Wechselrichter

Die Gittersteuerung der Stromrichter bietet auch die Möglichkeit, Gleichstrom in Wechselstrom umzuformen.

Von dieser Möglichkeit kann z. B. dann Gebrauch gemacht werden, wenn ein Gleichstrommotor zum Antrieb einer Walzenstraße von einem gittergesteuerten Gleichrichter gespeist wird. Die beim Abbremsen eines solchen Motors freiwerdende Energie kann über einen Wechselrichter an das speisende Drehstromnetz zurückgewonnen werden. Bei Gleichstrombahnen, die über Stromrichter gespeist werden, besteht die Möglichkeit, die Energie der talwärts fahrenden Züge über Wechselrichter an das speisende Drehstromnetz zurückzugewinnen. Auch ist es möglich, denselben Gleichrichter abwechselnd vom Gleichrichterbetrieb auf Wechselrichterbetrieb umzuschalten.

## Umrichter

Mit Hilfe der Gittersteuerung ist es weiterhin möglich, Drehstrom (Dreiphasenstrom) mit 50 Per/s in Einphasenstrom mit  $16\frac{2}{3}$  Per/s umzurichten. Dies kommt z. B. zum Betrieb von Wechselstrombahnen in Frage. Zum Umrichten dienen zwei Entladungsgefäße, von denen das eine die positive und das andere die negative Spannungshalbwelle des Einphasensystems liefert.

## IX. Motoren für Wechselstrom

Die Motoren für Wechselstrom werden in Synchronmotoren und in Asynchronmotoren eingeteilt.

### 1. Die Synchronmotoren

Jeder Wechselstromgenerator läßt sich als Motor verwenden. Zu diesem Zweck muß die ruhende Magnetwicklung an Wechselstrom angeschlossen und die Magnetwicklung des Polrades mit Gleichstrom gespeist werden.

**Wirkungsweise.** Die Wirkungsweise eines solchen Motors beruht auf der Kraftwirkung, die stromdurchflossene Leiter auf ein magnetisches Feld ausüben. Für das Entstehen dieser Kraftwirkung ist es gleichgültig, ob sich die Leiter bewegen und die Pole feststehen (Gleichstrommotoren) oder ob sich die Pole bewegen und die Leiter feststehen (Synchronmotoren).

In Bild 153 sind *a* und *b* die Leiter einer Einphasenwicklung. Der Nordpol *N* des Polrades steht mit seiner Mitte unter dem Leiter *a* und der Südpol unter dem Leiter *b*. Während der Zeitdauer eines Wechsels hat der Wechselstrom in den Leitern eine bestimmte Richtung. Bei der angenommenen Stromrichtung, die durch Kreuz und Punkt gekennzeichnet ist, wird nach der Rechte-Hand-Regel der Nordpol von rechts nach links und der Südpol von links nach rechts abgestoßen. [Bei feststehenden Polen und beweglichen Leitern (Gleichstrommotoren) ist die linke Hand, bei feststehenden Leitern und beweglichen Polen (Synchronmotoren) die rechte Hand zur Feststellung der Bewegungsrichtung zu nehmen.



Im nächsten Augenblick (bei 50 Perioden nach  $\frac{1}{100}$  Sekunde) hat der Strom in den Leitern *a* und *b* seine Richtung gewechselt (Bild 154). Die Pole *N* und *S* werden jetzt in umgekehrter Richtung wie vorher abgestoßen.

Hieraus folgt, daß bei 50 Perioden oder 100 Wechslen die Pole in einer Sekunde 50 mal nach rechts und ebensooft nach links abgestoßen werden. Infolgedessen ist ein Umlaufen des Polrades ausgeschlossen.

Wird jedoch das Polrad erst künstlich so schnell links herum gedreht, daß sich die Pole während der Zeitdauer eines Wechsels um genau eine Polentfernung weiterbewegen, dann befindet sich der Nordpol immer unter Leitern, die in der gleichen Richtung ( $\oplus$ ) von Strom durchflossen werden (Bild 155). Das gleiche trifft für den Südpol ( $\ominus$ ) zu. Die Kraftwirkung zwischen den stromdurchflossenen Leitern und den Magnetpolen ist jetzt so gerichtet, daß die Pole dauernd in der gleichen Drehrichtung abgestoßen werden. Das Polrad bewegt sich mit gleichbleibender Drehzahl und ist in der Lage, mechanische Leistung abzugeben. Wird das Polrad statt links herum rechts herum angedreht, dann läuft es rechts herum weiter.

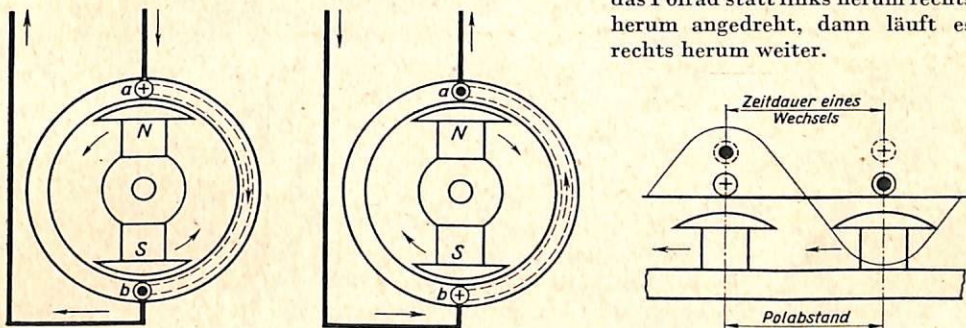


Bild 153—155. Wirkungsweise des Synchronmotors

Die Polmitten müssen sich immer in dem Augenblick unter der Mitte der Leiter befinden, wenn der Wechselstrom in den Leitern seine größte Stärke erreicht hat.

**Drehzahl.** Die Zeitdauer für einen Stromwechsel ist immer gleich der Zeitdauer, die ein Pol für die Zurücklegung eines Polabstandes benötigt. Während der Zeitdauer eines Wechsels muß sich also das Polrad um einen Polabstand weiterdrehen. Bei 2 Wechslen oder einer Periode um 2 Polabstände. Bei einem zweipoligen Motor entsprechen 2 Polabstände einer vollen Umdrehung. Das Polrad eines solchen Motors wird in der Sekunde so viel Drehungen machen, wie der Wechselstrom Perioden hat. Das sind bei 50 Perioden 50 Drehungen in der Sekunde und in der Minute  $60 \cdot 50 = 3000$ . Bei der doppelten Polzahl (4) ist die Drehzahl nur  $\frac{1}{2}$  so hoch, bei 6 Polen nur  $\frac{1}{3}$ , bei 8 Polen nur  $\frac{1}{4}$  usw. Die Drehzahl eines Synchronmotors ist infolgedessen nur von der Periodenzahl des Wechselstromes und der Polzahl des Motors abhängig. Zur Berechnung der Drehzahl in der Minute gilt die gleiche Formel wie für Wechselstromgeneratoren  $n = \frac{60 \cdot f}{p}$ , worin *n* die Drehzahl in der Minute, *f* die Periodenzahl in der Sekunde und *p* die halbe Polzahl bedeutet. Diese Drehzahl wird als synchrone Drehzahl bezeichnet.

Ist die Polzahl gering, dann ist die Drehzahl hoch und umgekehrt.

**Überlastung.** Ein Stromwechsel entsteht, wenn sich bei den Generatoren im Kraftwerk die Pole um einen Polabstand weiterbewegen. In derselben Zeit müssen



sich auch bei allen an diese Generatoren angeschlossenen Synchronmotoren die Pole um einen Polabstand drehen. Motoren und Generatoren sind „im Tritt“ ähnlich wie Personen, die im Gleichschritt marschieren, d. h. abwechselnd im selben Augenblick den rechten und den linken Fuß auf den Erdboden setzen.

Wird ein Synchronmotor stark überlastet, dann „fällt er aus dem Tritt“ und bleibt stehen. Er muß wieder neu angeworfen und wie ein Synchrongenerator zum Netz parallel geschaltet werden.

**Anlassen.** Synchronmotoren laufen nicht von selbst an. Sie müssen vielmehr durch besondere Hilfsmittel auf ihre synchrone Drehzahl gebracht werden. Zum Anlassen kann ein besonderer kleiner Motor dienen (Anwurfmotor). Bei Motor-Generatoren und Umformern zum Umformen von Wechselstrom in Gleichstrom kann der Synchronmotor durch die Gleichstromseite angelassen werden, sofern der erforderliche Gleichstrom zur Verfügung steht.

Synchronmotoren werden auch für Selbstanlauf ohne Last gebaut. Es werden auch Synchronmotoren für Selbstanlauf mit Last gebaut, die als Asynchronmotoren anlaufen.

Beim Parallelschalten der Synchronmotoren ist das auf Seite 84 für Generatoren Gesagte zu beachten.

**Der Synchronmotor als Phasenschieber.** Die Magnetwicklung des Polrades bei Synchronmotoren wird von Gleichstrom durchflossen. Die Stärke dieses Erregerstromes läßt sich so regeln, daß der Motor entweder untererregt, normal erregt oder übererregt wird. Bei Untererregung ist das magnetische Feld des Motors zu schwach und bei Übererregung zu stark.

Bei normaler Erregung ist der Leistungsfaktor  $\cos \varphi$  des Motors = 1. Die Stromstärke in den Wechselstromzuleitungen zum Motor und in der Ständerwicklung des Motors ist jetzt am kleinsten, weil der Motor weder Blindstrom (Magnetisierungsstrom) dem Netz entnimmt, noch solchen an das Netz abgibt. Bei Untererregung nimmt der Motor Blindstrom (Magnetisierungsstrom) aus dem Netz. Der Motor bildet jetzt eine induktive Belastung. Sein Leistungsfaktor  $\cos \varphi$  wird kleiner als 1.

In diesem Fall ist die Stromstärke in den Zuleitungen zum Motor und in der Ständerwicklung erheblich größer als bei normaler Erregung und  $\cos \varphi = 1$ .

Wird die Stärke des Erregerstromes in der Magnetwicklung des Polrades über den normalen Wert gesteigert, dann ist der Motor übererregt. Er gibt jetzt Blindstrom an das Wechselstromnetz ab. Dieser Blindstrom braucht dann nicht von den Generatoren im Kraftwerk erzeugt und durch die oft sehr langen Fernleitungen den Blindstromverbrauchern (Asynchronmotoren) zugeleitet zu werden. Generatoren und Hauptzuleitungen werden von Blindstrom ganz oder doch teilweise entlastet. Dadurch wird der Leistungsfaktor des Netzes erheblich verbessert, d. h. die Phasenverschiebung zwischen Spannung und Stromstärke verkleinert oder ganz aufgehoben. Durch die Hauptleitungen des Netzes läßt sich jetzt erheblich mehr Wirkleistung übertragen, was sowohl im Interesse der Stromerzeuger als auch der Stromverbraucher liegt.



**Vorteile des Synchronmotors:**

1. Sein guter Leistungsfaktor.
2. Sein guter Wirkungsgrad.
3. Seine hohe Überlastbarkeit.
4. Seine Unempfindlichkeit gegen Spannungsschwankungen.

**Nachteile des Synchronmotors:**

1. Er läuft nicht von selbst an.
2. Er muß durch Gleichstrom erregt werden, so daß außer Wechselstrom auch Gleichstrom nötig ist.
3. Seine Drehzahl bleibt bei allen Belastungen dieselbe und läßt sich nicht ändern.
4. Bei zu starker Überlastung fällt er aus dem Tritt und bleibt stehen. Um ihn wieder belasten zu können, muß er von neuem angelassen und parallel geschaltet werden.

Synchronmotoren werden für Einphasenstrom und für Dreiphasenstrom gebaut.

Die Wirkungsweise des Synchronmotors für Dreiphasenstrom ist die gleiche wie die des Synchronmotors für Einphasenstrom.

## 2. Die Asynchronmotoren

Das Wort asynchron bedeutet soviel wie „nicht synchron“. Während der Synchronmotor dauernd mit der synchronen Drehzahl laufen muß, handelt es sich beim Asynchronmotor um einen Wechselstrommotor, dessen Drehzahl geringer als die synchrone Drehzahl ist. Beim Synchronmotor ist die Drehzahl unveränderlich und von der Belastung völlig unabhängig. Der Asynchronmotor dagegen ändert seine Drehzahl mit der Belastung, wenn auch nur wenig.

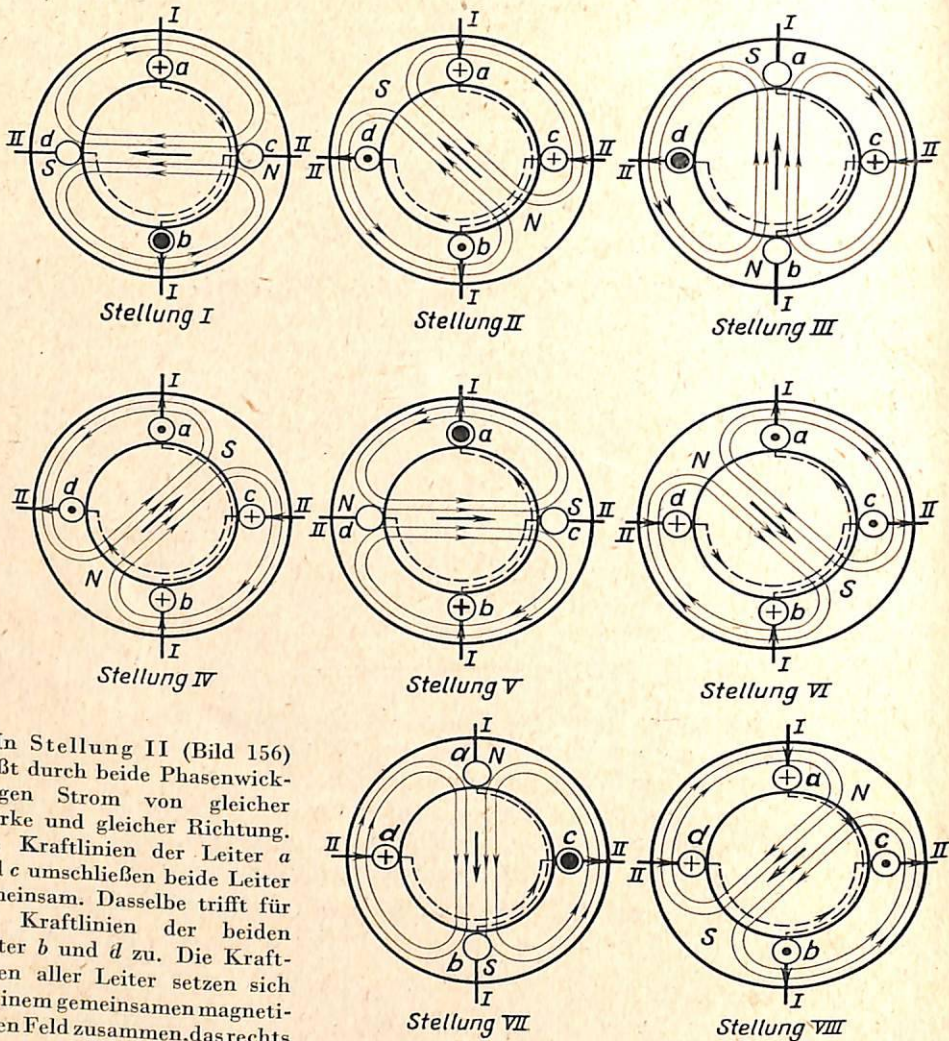
Die Wirkungsweise des Asynchronmotors beruht auf der Erzeugung eines magnetischen Drehfeldes durch mehrphasigen Wechselstrom.

**Das magnetische Drehfeld.** Zur Erzeugung eines magnetischen Drehfeldes sind wenigstens zwei Wechselströme erforderlich, die gegeneinander verschoben sein müssen.

In Bild 156 ist ein Hohlzylinder, der aus einzelnen dünnen Blechen zusammgebaut ist, mit einer Zweiphasenwicklung versehen. Die Leiter *a* und *b* gehören zur I. und die Leiter *c* und *d* zur II. Phase. Wird eine solche Wicklung an Zweiphasenstrom angeschlossen, dann entsteht innerhalb des Hohlzylinders ein magnetisches Drehfeld auf folgende Weise:

In Stellung I (Bild 156) hat der Strom  $I_I$  in Phase I seine größte Stärke. Im gleichen Augenblick ist die Stromstärke  $I_{II}$  in Phase II Null, d. h. durch die Leiter dieser Phase fließt kein Strom. Die Stromrichtung im Leiter *a* ist durch ein Kreuz ( $\oplus$ ) und die im Leiter *b* durch einen Punkt ( $\odot$ ) gekennzeichnet. Um die Leiter *a* und *b* entstehen magnetische Kraftlinien, die sich zu einem magnetischen Feld vereinigen. Nach der Uhrzeiger- oder Korkzieherregel treten die Kraftlinien dieses Feldes auf der rechten inneren Zylinderseite aus und auf der linken inneren Seite wieder ein. Infolgedessen entsteht rechts ein Nord- und links ein Südpol.





In Stellung II (Bild 156) fließt durch beide Phasenwicklungen Strom von gleicher Stärke und gleicher Richtung. Die Kraftlinien der Leiter *a* und *c* umschließen beide Leiter *b* und *d* zu. Die Kraftlinien aller Leiter setzen sich zu einem gemeinsamen magnetischen Feld zusammen, das rechts unten aus- und links oben in den Hohlzylinder eintritt. Der Nordpol ist um  $\frac{1}{8}$  Drehung nach unten und der Südpol um das gleiche Stück nach oben gewandert.

In Stellung III ist die Stärke des Stromes in Phase I Null, d. h. er wechselt seine Richtung. Zur selben Zeit hat der Strom in Phase II seine größte Stärke erreicht. Der Strom  $I_{II}$  ist jetzt allein wirksam und erzeugt ein magneti-

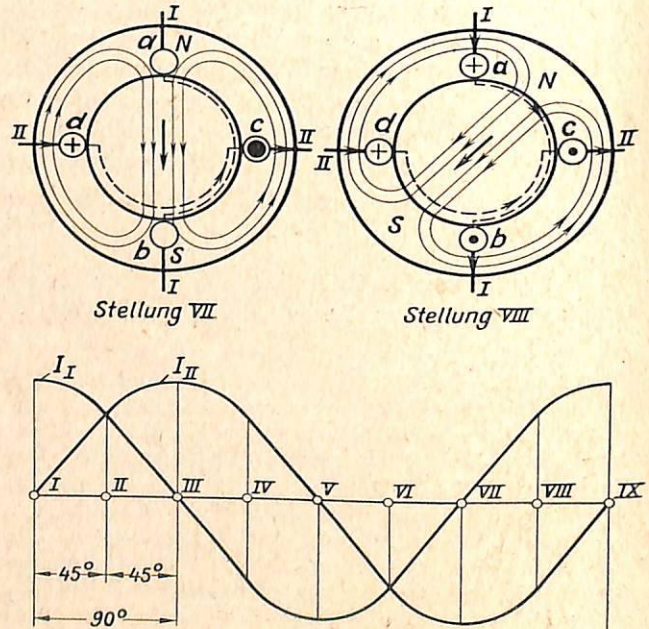


Bild 156. Magnetisches Drehfeld bei Zweiphasenstrom



sches Feld, dessen Nordpol sich unten und dessen Südpol sich oben befindet. Die beiden Pole *N* und *S* sind wieder um  $\frac{1}{8}$  Drehung weitergewandert.

In Stellung IV haben beide Ströme gleiche Stärke, aber entgegengesetzte Richtung. Die Stromrichtung in den Leitern *c* und *d* ist die gleiche geblieben, dagegen ist die Stromrichtung in den Leitern *a* und *b* umgekehrt wie in Stellung II. Das magnetische Feld ist jetzt von links unten nach rechts oben gerichtet. Die Pole sind um  $\frac{1}{8}$  Drehung weitergewandert.

In Stellung V ist der Strom  $I_{II}$  Null, während der Strom  $I_I$  seinen höchsten negativen Wert erreicht hat. Strom  $I_I$  ist allein wirksam und erzeugt jetzt ein magnetisches Feld, das von links nach rechts gerichtet ist. Die Pole sind wieder um  $\frac{1}{8}$  Drehung weitergewandert.

In Stellung VI haben beide Ströme die gleiche Stärke und auch die gleiche negative Richtung. Das magnetische Feld ist jetzt von links oben nach rechts unten gerichtet, was eine Weiterbewegung der Pole um  $\frac{1}{8}$  Drehung bedeutet.

In Stellung VII ist Strom  $I_I$  Null. Er wechselt wieder seine Richtung. Gleichzeitig hat der Strom  $I_{II}$  seine größte negative Stärke erreicht. Das magnetische Feld ist jetzt senkrecht von oben nach unten gerichtet. Die Pole sind um  $\frac{1}{8}$  Drehung weitergewandert.

In Stellung VIII sind beide Ströme wieder gleich stark. Strom  $I_I$  ist positiv, Strom  $I_{II}$  dagegen negativ gerichtet. Der Nordpol ist nach rechts oben, der Südpol nach links unten gewandert. Die Weiterbewegung der Pole beträgt wieder  $\frac{1}{8}$  Umdrehung.

Die Stellung IX entspricht der Stellung I, d. h. der Strom  $I_I$  hat seine größte positive Stärke erreicht, während im gleichen Augenblick die Stärke des Stromes  $I_{II}$  Null ist.

Bei einer solchen zweipoligen Anordnung entsteht ein magnetisches Feld, das sich während der Zeitdauer einer Periode einmal dreht. Ein solches sich drehendes magnetisches Feld wird kurz Drehfeld genannt.

Bei 50 Perioden in der Sekunde wird sich ein solches Drehfeld in einer Sekunde 50 mal und in einer Minute  $60 \cdot 50 = 3000$  mal drehen.

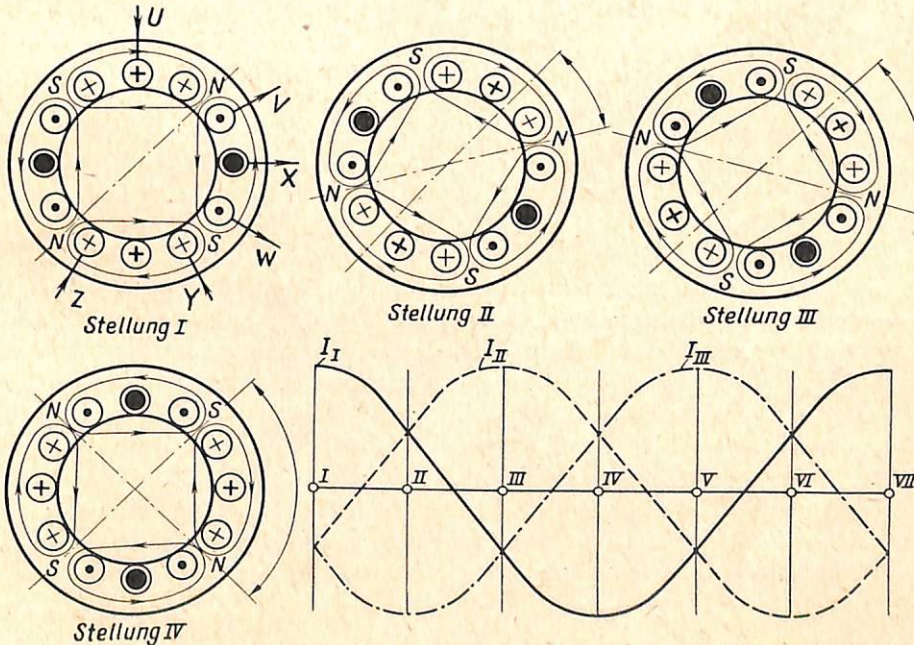


Bild 157/158. Magnetisches Drehfeld bei Dreiphasenstrom



Ist die Anordnung nicht zweipolig, sondern vierpolig, dann dreht sich das Drehfeld während der Zeitdauer einer Periode nur  $\frac{1}{2}$  mal, bei sechspoliger Anordnung nur  $\frac{1}{3}$  mal, bei achtpoliger Anordnung nur  $\frac{1}{4}$  mal usw. Die Drehzahl des Drehfeldes ist demnach nur von der Polzahl und der Periodenzahl abhängig. Wie im Kapitel „Synchronmotoren“ bereits erwähnt wurde, werden Drehzahlen, die nur von der Polzahl und der Periodenzahl abhängen, *synchrone Drehzahlen* genannt. Infolgedessen dreht sich das Drehfeld immer mit der synchronen Drehzahl, die aus der bekannten Formel  $n = \frac{60 \cdot f}{p}$  berechnet wird und worin  $n$  die synchrone Drehzahl des Drehfeldes in der Minute,  $f$  die Frequenz (Periodenzahl in einer Sekunde)

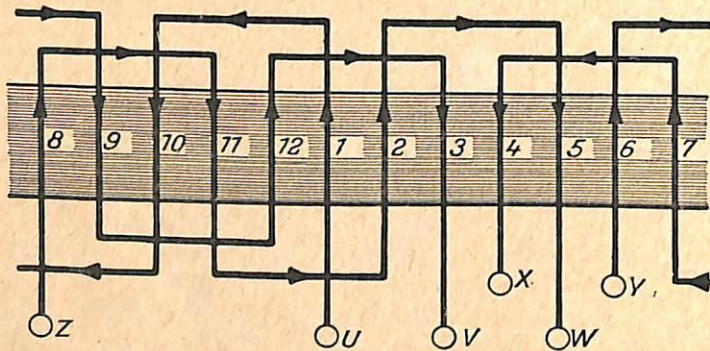


Bild 159. Schaltung der Dreiphasenwicklung von Bild 157

und  $p$  die halbe Polzahl bedeutet. Die Stärke des magnetischen Feldes ist bei Verwendung von Dreiphasenstrom gleichmäßiger als bei Zweiphasenstrom. In Bild 157 ist der Kraftlinienverlauf der vier Einzelfelder einer vierpoligen Dreiphasenwicklung dargestellt. Die Verbindung der einzelnen Leiter einer jeden Phase ist aus der Abwicklung in Bild 159 erkenntlich.  $U, V, W$  sind die Anfänge,  $X, Y, Z$  die Enden der drei Phasenwicklungen. Die Richtung der Ströme in den Leitern der einzelnen Phasen ergibt sich aus den Stromwellen des Bildes 158

### 3. Der Drehstrommotor mit Kurzschlußläufer

Der einfachste Motor ist der Drehstrommotor mit Kurzschlußläufer. Er besteht aus einem feststehenden und einen umlaufenden Teil. Der feststehende Teil ist aus einzelnen dünnen Blechen aufgebaut. Er ist an seinem inneren Umfang mit Nuten versehen. In diese Nuten wird die Wicklung zur Erzeugung des magnetischen Drehfeldes eingezogen. Dieser feststehende Teil wird *Ständer* genannt. Man bezeichnet ihn auch als *Primäranker*, weil er wie der primäre Teil eines Umspanners zur Erzeugung des notwendigen magnetischen Feldes dient.

Der umlaufende Teil eines solchen Motors heißt *Läufer*. Man nennt ihn auch *Sekundäranker*, weil in seiner Wicklung in gleicher Weise wie in der Sekundärwicklung eines Umspanners Ströme induziert werden.

Der Eisenkörper des Läufers wird, wie der Eisenkörper des Ständers, aus dünnen Blechen aufgebaut. Die einzelnen Bleche werden durch Lack oder Papier voneinander isoliert.



Der Läufer ist an seinem Umfang mit Löchern versehen. Diese Löcher (Nuten) werden wie beim Ständer gestanzt. In diesen Löchern liegen Stäbe aus Kupfer oder Aluminium. Sämtliche Stäbe sind sowohl an der einen als auch an der anderen Stirnseite durch Ringe (Kurzschlußringe) untereinander verbunden. Dadurch entsteht eine in sich kurzgeschlossene Stabwicklung. Für sich allein betrachtet hat

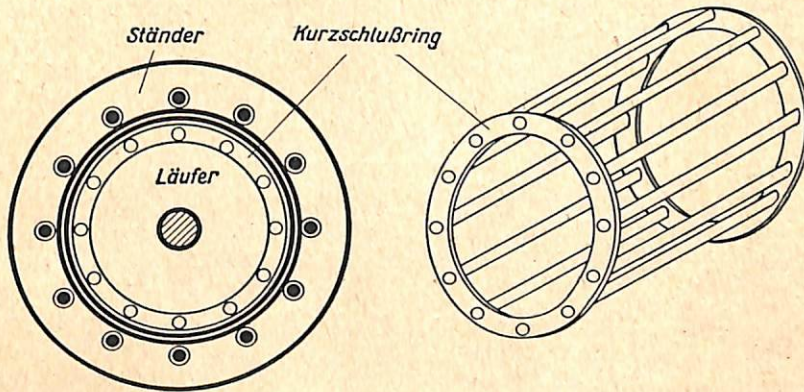


Bild 160. Läufer mit Käfigwicklung

diese Wicklung die Form eines Käfigs (Bild 160). Sie wird infolgedessen auch Käfigwicklung genannt. Weil der Läufer eine kurzgeschlossene Wicklung besitzt, ist die Bezeichnung: Kurzschlußläufer oder Kurzschlußanker allgemein üblich. Ein Motor mit Kurzschlußläufer hat außer den Lagern keine Teile, die einem Verschleiß unterworfen sind. Er ist daher der einfachste, dauerhafteste und billigste Motor.

**Wirkungsweise.** Beim Einschalten der Ständerwicklung entsteht ein magnetisches Drehfeld, dessen Kraftlinien die Wicklung des stillstehenden Läufers schneiden. Dadurch wird in der Läuferwicklung eine EMK induziert, die in den Stäben der kurzgeschlossenen Läuferwicklung starke Ströme erzeugt. Das magnetische Drehfeld übt auf die stromdurchflossenen Stäbe des Läufers eine Zugkraft aus. Infolgedessen wird der Läufer in der Drehrichtung des Drehfeldes mitgezogen. Die Drehrichtung des Läufers ist mithin die gleiche wie die des Drehfeldes (Bild 161). Hieraus folgt, daß die Drehrichtung des Läufers nur dadurch geändert werden kann, daß die Drehrichtung des Drehfeldes geändert wird.

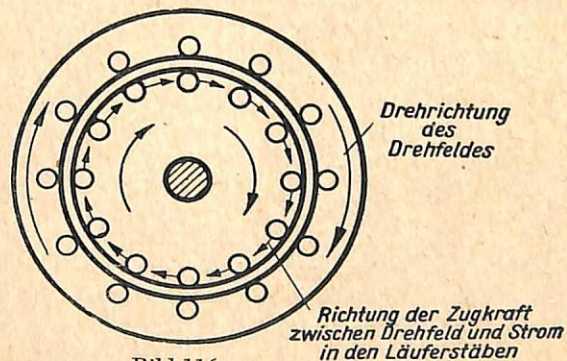


Bild 116

Einfluß des Drehfeldes auf die Läuferwicklung



**Schlüpfung.** Der Läufer wird vom Drehfeld mitgezogen und hat das Bestreben, sich genau so schnell zu drehen wie das Drehfeld. Er muß jedoch mit seiner Drehzahl immer etwas hinter der Drehzahl des Drehfeldes zurückbleiben, damit in der Läuferwicklung Strom induziert werden kann. Würde der Läufer die gleiche Drehzahl wie das Drehfeld erreichen, dann hätten Kraftlinien und Läuferstäbe die gleiche Drehgeschwindigkeit, die Läuferstäbe würden dann nicht mehr von Kraftlinien geschnitten. Es könnte jetzt in den Läuferstäben kein Strom entstehen. Damit dauernd Strom in den Läuferstäben induziert wird, muß auch bei Leerlauf des Motors die Drehzahl des Läufers etwas hinter der synchronen Drehzahl des Drehfeldes zurückbleiben. Der Läufer läuft nicht synchron, sondern asynchron. Infolgedessen werden solche Motoren Asynchronmotoren genannt. Weil ihre Wirkungsweise auf der Entstehung eines magnetischen Drehfeldes beruht, werden sie auch als Drehfeldmotoren bezeichnet. Der Strom in der Läuferwicklung entsteht durch Induktion. Man kann infolgedessen solche Motoren auch Induktionsmotoren nennen.

Die Namen: Asynchronmotor, Drehfeldmotor und Induktionsmotor sind demnach verschiedenartige Bezeichnungen für die gleiche Motorart.

Der Unterschied zwischen der synchronen Drehzahl des Drehfeldes und der asynchronen Drehzahl des Läufers wird Schlupfdrehzahl oder kurz Schlüpfung oder Schlupf genannt. Der Schlupf wird immer in v. H. der synchronen Drehzahl angegeben und nach folgender Formel berechnet:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1},$$

worin  $s$  der Schlupf in v. H.,  $n_1$  die synchrone Drehzahl des Drehfeldes und  $n$  die asynchrone Drehzahl des Läufers bedeutet.

Beisp.:  $n_1 = 1000$ ;  $n = 950$ ,  $s = ?$

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{1000 - 950}{1000} = \frac{5}{100} \text{ oder } 5 \text{ v. H.}$$

Der Schlupf bei Wechselstrommotoren kann mit dem Rutschen eines Riemen verglichen werden, der z. B. zum Antrieb einer Transmission dient. Läuft die Transmission leer, dann rutscht der Riemen nur wenig auf der Riemenscheibe. Mit zunehmender Belastung nimmt auch der Riemenrutsch zu. Er ist bei voller Belastung der Transmission am größten.

**Stärke des Stromes im Läufer.** Die Drehung des Läufers kommt dadurch zustande, daß das Drehfeld auf die stromdurchflossenen Leiter in der Läuferwicklung eine Zugkraft ausübt. Diese Zugkraft ist von der Stärke des Drehfeldes und von der Stärke des Läuferstromes abhängig. Die Stärke des wirksamen Drehfeldes ist bei allen Belastungen fast gleich. Infolgedessen muß sich mit der Belastung die Stärke des Läuferstromes ändern. Bei schwacher Belastung genügt ein schwacher Läuferstrom. Der Läuferstrom ist bei der Nennleistung (voller Belastung) des Motors am größten. Er wird am kleinsten bei Leerlauf.

Die Stärke des Läuferstromes ist von der Läuferspannung und diese wieder von der Geschwindigkeit abhängig, mit der die Leiter des Läufers von den Kraft-



linien des Drehfeldes geschnitten werden. Bei Leerlauf genügt ein geringer Läuferstrom. Mithin kann auch die Schnittgeschwindigkeit der Kraftlinien gering sein. Der Läufer hat jetzt fast die gleiche Drehzahl wie das Drehfeld. Die Drehzahl des Läufers ist bei Leerlauf am höchsten, d. h. der Schlupf ist am kleinsten und beträgt bei kleineren Motoren etwa 0,5 bis 1 v. H.

Mit steigender Belastung muß auch die Läuferspannung und damit die Schnittgeschwindigkeit der Kraftlinien steigen, damit ein stärkerer Läuferstrom entsteht. Um diese größere Schnittgeschwindigkeit zu erreichen, muß der Läufer entsprechend langsamer laufen. Die Drehzahl des Läufers sinkt. Bei Vollast sind Läuferstrom und Schnittgeschwindigkeit am größten. Die Drehzahl ist jetzt am kleinsten. Der Läufer schlüpft bei voller Belastung am stärksten. Bei Vollast stellt sich der Schlupf je nach der Größe des Motors auf etwa 3 bis 8 v. H.

**Anlauf.** Wird der Motor eingeschaltet, dann steht im ersten Augenblick der Läufer noch still, während sich das Drehfeld mit der synchronen Drehzahl dreht. Die Schnittgeschwindigkeit des Drehfeldes ist in diesem Augenblick gleich seiner Drehgeschwindigkeit. Infolge dieser hohen Schnittgeschwindigkeit der Kraftlinien entsteht in der Läuferwicklung eine hohe Spannung, die infolge des geringen Widerstandes der Läuferwicklung in dieser Wicklung einen sehr starken Induktionsstrom (Kurzschluß) erzeugt. Dieser Strom erzeugt im Läufer ein magnetisches Feld, das dem magnetischen Feld des Ständers entgegenwirkt, wodurch dessen Kraftwirkung auf den Läuferstrom erheblich geschwächt wird. Das Anlaufmoment eines solchen Motors ist daher trotz des sehr hohen Anlaufstromes verhältnismäßig gering.

Durch den hohen Anlaufstrom entstehen im Leitungsnetz starke Stromstöße, die erhebliche Spannungsschwankungen bewirken. Die Folge dieser Spannungsschwankungen ist, daß die Helligkeit der an dasselbe Netz angeschlossenen Glühlampen ebenfalls stark schwankt, was besonders dann sehr störend wirkt, wenn das Anlassen des Motors häufiger erfolgt.

An öffentliche Elektrizitätswerke dürfen infolgedessen im allgemeinen nur Kurzschlußmotoren bis zu Leistungen von 4 kW angeschlossen werden, wenn das Anlassen mittels Sterndreieckschalters erfolgt.

**Das Anlassen von Kurzschlußmotoren.** Das Anlassen von Kurzschlußmotoren kann erfolgen a) durch direktes Einschalten, b) mittels Sterndreieckschalters, c) durch Gehäuseanlasser, d) durch Anlaßumspanner, e) durch Fliehkraftriemenscheiben oder -kupplungen, die auch mechanische Anlasser heißen.

a) Das Anlassen durch direktes Einschalten ohne besondere Anlaßvorrichtung

Bei Drehstrom-Kurzschlußmotoren bis einschließlich 1,1 kW Nennleistung sind Anlaßschalter ohne Anlaßstufe an Stelle eines Anlassers zulässig (Bild 162/163). Die im Augenblick des Einschaltens auftretende Stromstärke ist bei diesen kleinen Motoren etwa 6 mal so hoch wie der Nennstrom.



Flinke Sicherungen sind für den 2,5fachen Nennstrom zu bemessen. Flinke Sicherungen für den Nennstrom würden infolge des hohen Anlaufstromes bei längerer Anlaufzeit während des Anlaufs durchschmelzen. Bei Verwendung von trägen Sicherungen genügen Sicherungen für die Nennstromstärke.

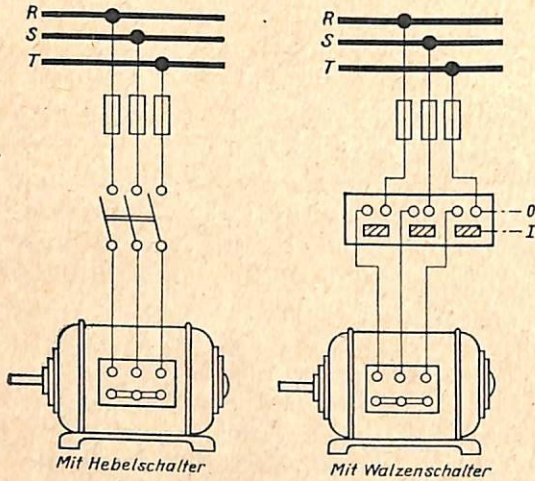


Bild 162/163  
Drehstrommotoren für direktes Einschalten

gemeinen am Klemmbrett des Motors durch Umklemmen der Verbindungen zwischen den einzelnen Anschlußklemmen. Um Irrtümer nach Möglichkeit zu vermeiden, sind auf dem Klemmbrett die Anfänge der drei Phasenwicklungen in der Reihenfolge *U, V, W* und deren Enden in der Reihenfolge *Z, X, Y* angeordnet. Bei der Sternschaltung sind die drei nebeneinanderliegenden Klemmen *Z, X, Y* (oder *U, V, W*) miteinander zu verbinden. An die drei freien Klemmen *R, S, T* angeschlossene Umzuschalten, ist erst die Verbindung zwischen den drei nebeneinanderliegenden Klemmen (*U* mit *Z, V* mit *X, W* mit *Y*) zu entfernen. Dann sind je zwei übereinanderliegende Klemmen (*U* mit *Z, V* mit *X, W* mit *Y*) zu verbinden. Die

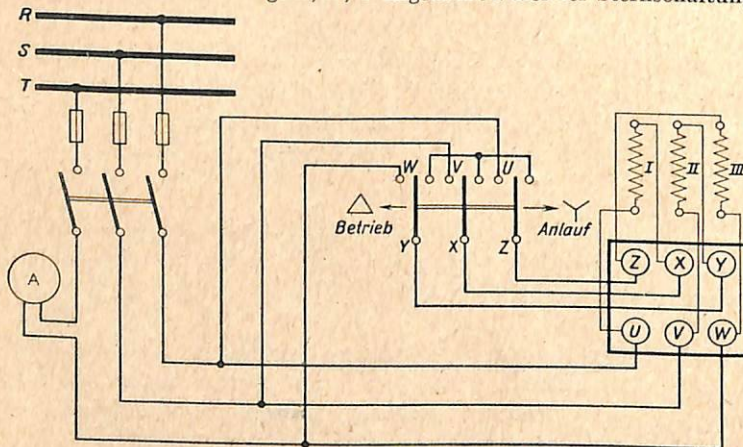


Bild 164. Anlassen mittels Stern-Dreieckschalters

drei Netzleitungen *R, S, T* können entweder an die nebeneinanderliegenden Klemmen *U, V, W* oder *Z, X, Y* angeschlossen werden.

Um den hohen Anlaufstrom bei Kurzschlußmotoren herabzudrücken, schaltet man die Ständerwicklung während des Anlaufs in Stern. Sobald der Motor seine Nennzahl erreicht hat, wird die Ständerwicklung in Dreieck umgeschaltet (Bild 164 und 165).

#### b) Das Anlassen mittels Sterndreieckschalters

Die Ständerwicklung eines Drehstrommotors wird entweder in Stern oder in Dreieck geschaltet. Die erforderliche Sternspannung ist  $\frac{1}{\sqrt{3}}$  oder 1,73 mal so hoch wie die Dreieckspannung. Infolgedessen läßt sich jeder Drehstrommotor für zwei verschiedene Spannungen verwenden. Ein Motor für 220 V Dreieckspannung kann mit  $220 \cdot 1,73 = 380$  V Sternspannung betrieben werden. Ebenso läßt sich ein Motor für 190 V Sternspannung bei  $\frac{190}{1,73} = 110$  V Dreieckspannung verwenden. Leistung und Drehzahl sind bei Stern- und Dreieckschaltung gleich hoch.

Das Umschalten von Dreieck in Stern und umgekehrt erfolgt im all-

anderliegenden Klemmen *Z, X, Y* (oder *U, V, W*) miteinander zu verbinden. An die drei freien Klemmen *R, S, T* angeschlossene Umzuschalten, ist erst die Verbindung zwischen den drei nebeneinanderliegenden Klemmen (*U* mit *Z, V* mit *X, W* mit *Y*) zu entfernen. Dann sind je zwei übereinanderliegende Klemmen (*U* mit *Z, V* mit *X, W* mit *Y*) zu verbinden. Die



Beim Anlauf ist die Phasenspannung der Ständerwicklung 1,73 mal so klein wie im Betrieb. Infolge dieser geringeren Phasenspannung und der Schaltung der Phasen in Stern sinkt die Anlaufstromstärke in den Zuleitungen zum Motor auf  $\frac{1}{3}$  derjenigen bei Dreieckschaltung. Sie ist infolgedessen nur noch 1,5 bis 2 mal so hoch wie die Nennstromstärke. Flinke Sicherungen sind mindestens für den 2fachen Nennstrom zu bemessen. Träge Sicherungen dagegen für den Nennstrom.

Bei der Verwendung von Stern-Dreieckschaltern ist das Anlaufmoment des Motors gering. Sie können infolgedessen nur für Anlauf ohne oder mit geringer Last Verwendung finden.

In Bild 164 ist der grundsätzliche Schaltplan eines Motors mit Stern-Dreieckschalter angegeben. Bild 167 (S. 128) zeigt die Schaltpläne bei Verwendung eines Stern-Dreieckschalters in Walzenform für nur eine Drehrichtung und für beide Drehrichtungen.

Bei der Auswahl der Motoren für Stern-Dreieckschaltung ist darauf zu achten, daß die Motoren für eine Sternspannung gewickelt sein müssen, die 1,73 mal so hoch wie die zur Verfügung stehende Betriebsspannung ist. Für eine Betriebsspannung von 110 V ist ein Motor für 110/190 V, für 220 V Betriebsspannung ein Motor für 220/380 V und für 380 V Betriebsspannung ein Motor für 380/660 V zu nehmen.

c) Das Anlassen mittels Ständeranlassers

Ein Ständeranlasser besteht aus drei einzelnen Widerstandsgruppen, von denen jede in eine der drei Hauptleitungen zur Ständerwicklung geschaltet wird. Ist die Ständerwicklung in Stern geschaltet, dann ist es zweckmäßig, den Ständeranlasser in den Sternpunkt zu legen, in dem die Brücke Z—X—Y entfernt und an

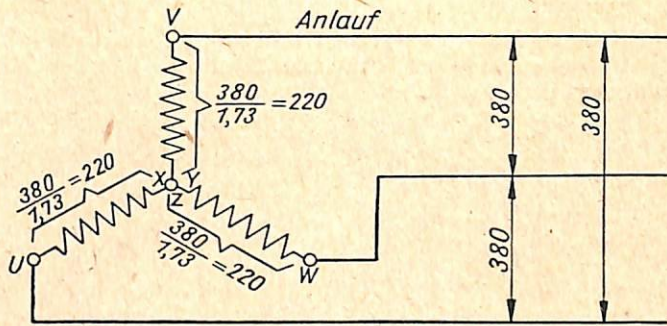


Bild 165 a. Sternschaltung

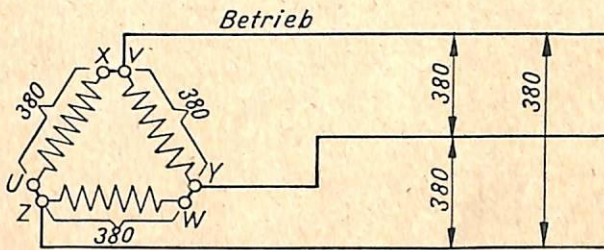


Bild 165 b. Dreieckschaltung

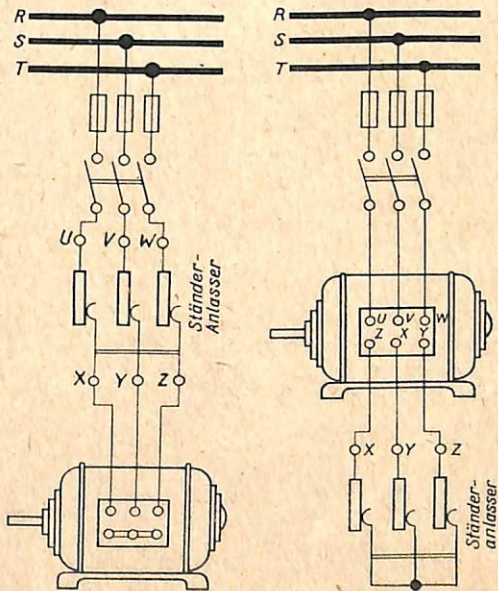


Bild 166 a. Ständeranlasser zwischen Netz und Motor angeschlossen

Bild 166 b. Ständeranlasser im Sternpunkt angeschlossen



diese Klemmen der Ständeranlasser angeschlossen wird. Die drei freien Enden des Ständeranlassers sind kurzzuschließen. Jede Widerstandsgruppe ist mit einer Phasewicklung in Reihe geschaltet (Bild 166, S. 127). Beim Anlassen werden diese Widerstände langsam stufenweise abgeschaltet.

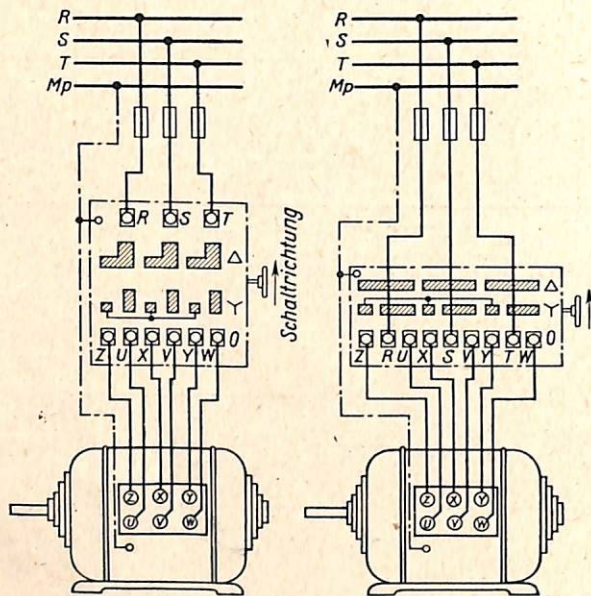


Bild 167 a

Motor mit Stern dreieckschalter für eine Drehrichtung

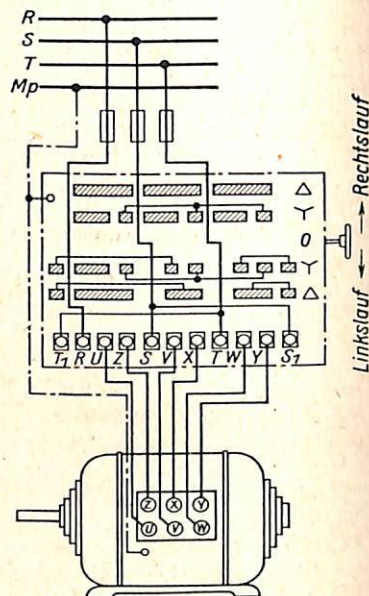


Bild 167 b

Motor mit Stern dreieckschalter für Rechts- und Linkslauf

Ständeranlasser erzeugen beim Anlassen einen geringeren Stromstoß als Stern dreieckschalter. Diesem Vorteil steht der Nachteil gegenüber, daß die Anzugskraft des Motors in der ersten Stellung des Ständeranlassers wesentlich geringer ist als beim Stern dreieckschalter in der Sternschaltung. Ständeranlasser werden nur selten (für sanften Anlauf) verwendet.

#### d) Das Anlassen mittels Anlaufumspanners

Bei Kurzschlußmotoren für große Leistungen wird der Ständerwicklung ein besonderer Anlaufumspanner vorgeschaltet. Durch den Anlaufumspanner wird die Netzspannung auf etwa  $\frac{1}{3}$  vermindert, so daß der Motor mit geringer Spannung anläuft. Sobald er seine Nenn-drehzahl erreicht hat, wird er auf die volle Netzspannung umgeschaltet.

#### e) Fliehkraftriemenscheibe

Der hohe Anlaufstrom bei Kurzschlußmotoren führt hauptsächlich deshalb zu unangenehmen Erscheinungen im Leitungsnetz, weil der Anlauf mit Vollast bei solchen Motoren mehrere Sekunden, also längere Zeit dauert. Besonders in Leitungsnetzen mit zu schwachen oder stark belasteten Leitungen treten dadurch bei den Glühlampen ganz erhebliche, Sekunden dauernde Lichtschwankungen auf, die bei häufigem Vorkommen so störend wirken, daß ein Arbeiten bei Licht ausgeschlossen ist.

Läuft ein Kurzschlußmotor ohne jede Belastung, d. h. leer an, dann beträgt die Anlaufzeit bei kleineren Motoren bis etwa 5 kW Leistung nur etwa  $\frac{2}{10}$  Sekunde. Der hohe Anlaufstrom



tritt infolgedessen nur einen Augenblick auf, wodurch störende Lichtschwankungen usw. vermieden werden. Um einen solchen Leeranlauf auch bei Antrieben zu erreichen, die mit Vollast anlaufen müssen, werden selbsttätig wirkende Fliehkraftriemenscheiben bzw. -kupplungen verwendet. Das Anlassen des Motors erfolgt durch ein besonderes Schaltgerät. Der Motor läuft leer, d. h. ohne mit der anzutreibenden Maschine verbunden zu sein, in kürzester Zeit auf seine volle Drehzahl hoch. Sobald er diese erreicht hat, tritt die Fliehkraftriemenscheibe in Tätigkeit und schaltet die anzutreibende Arbeitsmaschine sanft und gleichmäßig ein. Das Abschalten der Arbeitsmaschine erfolgt bei einer Drehzahl, die nur wenig unter der Nennzahl liegt.

Bei unzulässiger Überlastung sinkt die Drehzahl unter die Einschaltzahl, was ein Abschalten der Arbeitsmaschine zur Folge hat. Die Riemenscheibe wirkt also gleichzeitig als Sicherung gegen Überlastung.

#### 4. Der Drehstrommotor mit Schleifringläufer

Der hohe Stromstoß beim Einschalten von Kurzschlußmotoren hat seine Ursache in dem geringen Widerstand der Läuferwicklung. Wird der Läuferwicklung Widerstand vorgeschaltet, dann wird der Einschaltstromstoß kleiner. Man kann der Läuferwicklung so viel Widerstand vorschalten, daß die Einschaltstromstärke nicht größer als die normale Vollaststromstärke (Nennstrom) wird. Bei dieser ge-

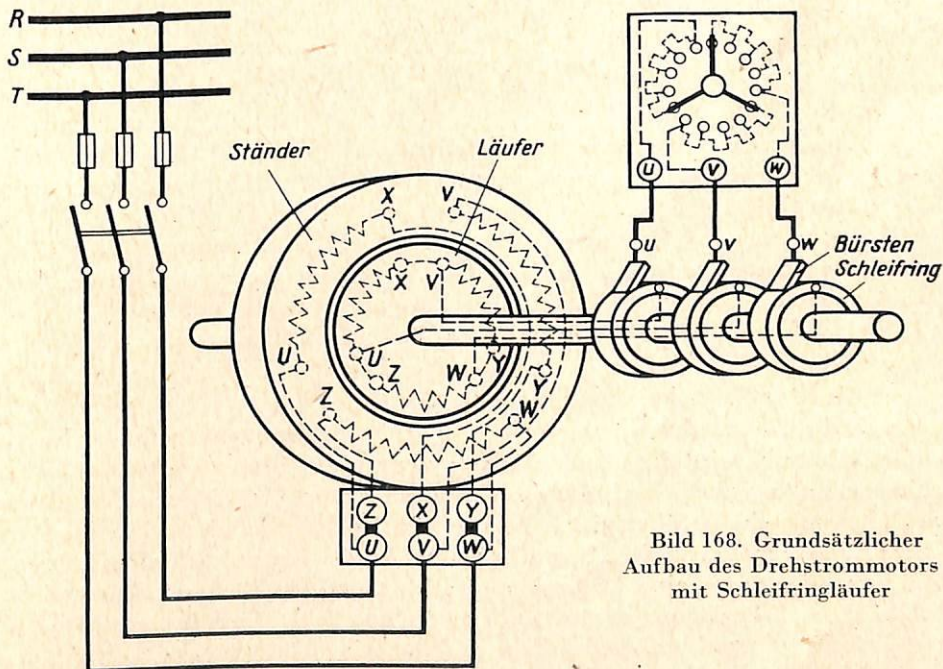


Bild 168. Grundsätzlicher Aufbau des Drehstrommotors mit Schleifringläufer

ringen Anlaufstromstärke entwickelt der Läufer beim Anlauf eine Zugkraft, die fast ebenso groß wie die normale Zugkraft während des Betriebes mit Vollast ist. Weil der vorgeschaltete Widerstand nur zum Anlassen des Motors dient, wird er Anlaßwiderstand oder kurz Anlasser genannt.



Läufer mit vorgeschaltetem Anlasser müssen in gleicher Weise wie der Ständer mit einer Mehrphasenwicklung versehen sein. Bei kleineren Motoren wird diese Phasenwicklung aus Draht (Drahtwicklung) und bei großen Motoren aus Stäben (Stabwicklung) hergestellt. Die drei Phasen der Läuferwicklung werden entweder in Stern oder in Dreieck geschaltet (Bild 169 und 170). Die Läuferwicklung kann auch zweiphasig sein. In diesem Falle hat der Anlasser nur zwei Widerstandsgruppen.

Um die sich drehende Läuferwicklung mit dem feststehenden Anlasser verbinden zu können, werden auf der Läuferwelle 3 Schleifringe aus Hartkupfer befestigt.

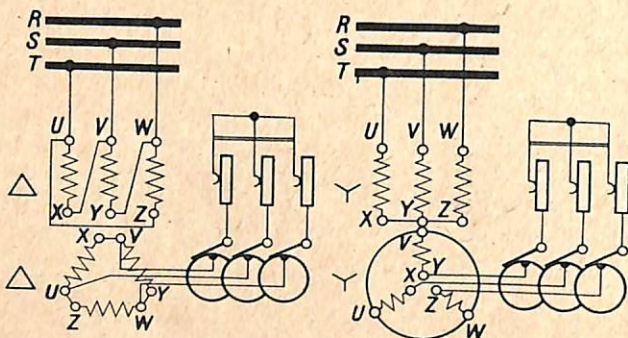


Bild 169. Ständer und Läuferwicklung in Dreieck geschaltet

Bild 170. Ständer und Läuferwicklung in Stern geschaltet

Diese Schleifringe müssen gegeneinander und gegen die Wellenut isoliert sein. Auf jedem dieser Schleifringe gleiten eine oder mehrere Bürsten, die entweder aus Graphit, Kupfergaze oder Bronze hergestellt sind. Die Bürsten eines jeden Schleifringes werden unter sich parallel geschaltet und durch eine gemeinsame

Leitung mit einer beliebigen Anschlußklemme des feststehenden Anlassers verbunden. Entsprechend der Zahl der Schleifringe genügen zur Verbindung der Läuferwicklung mit dem Anlasser 3 Leitungen (Bild 168).

Dementsprechend besitzt der Anlasser 3 Anschlußklemmen, die mit den kleinen Buchstaben *u*, *v*, *w* bezeichnet sind. Es ist gleichgültig, an welche dieser 3 Klemmen die einzelnen Verbindungsleitungen angeschlossen werden.

Der eigentliche Vorschaltwiderstand besteht aus 3 einzelnen Widerstandsgruppen, die bei Flachbahnanlasser in der Regel in drei Kontaktreihen (Bild 168), seltener in einer Kontaktreihe angeordnet sind.

Durch die Anlasserkurbel werden die 3 Widerstandsgruppen miteinander verbunden. Dadurch wird die Läuferwicklung unter Vorschaltung von Widerstand geschlossen. Im Augenblick des Einschaltens ist der gesamte Anlaßwiderstand der Läuferwicklung vorgeschaltet. Mit zunehmender Drehzahl wird der Vorschaltwiderstand langsam stufenweise abgeschaltet. Wenn die Anlasserkurbel auf dem letzten Kontakt steht, ist der gesamte Vorschaltwiderstand abgeschaltet und die Läuferwicklung über die Anlasserkurbel, Verbindungsleitungen, Bürsten und Schleifringe kurzgeschlossen.

Drehstromanlasser dürfen nicht ausschaltbar sein. Wären sie ausschaltbar, dann bestünde die Möglichkeit, den Motor allein durch Ausschalten des Anlassers stillzusetzen, ohne den Motorschalter auszuschalten. Die Ständerwicklung bliebe dann eingeschaltet. Bei einem solchen stillstehenden Motor mit eingeschalteter Ständerwicklung besteht aber die Gefahr, daß die Ständerwicklung wegen mangelnder Kühlung verbrennt.



**Kurzschluß- und Bürstenabhebevorrichtung.** Bürsten, Schleifringe, Verbindungsleitungen und Anlasser sind Störungsquellen. Durch schlechtes Aufliegen der Bürsten, durch unrunde oder angeschmorte Schleifringe entsteht schlechter Kontakt und durch diesen Bürstenfeuer. Tritt während des Betriebes an den Anschlußstellen der Verbindungsleitungen schlechter Kontakt auf oder an irgendeiner Stelle der Verbindungsleitungen Unterbrechung ein, dann sinkt die Drehzahl des Motors ganz erheblich. Um Bürstenverschleiß und Störungen während des Betriebes möglichst zu vermeiden, werden bei größeren Motoren nach erfolgtem Anlauf erst die Schleifringe kurzgeschlossen und dann die Bürsten abgehoben.

Das Kurzschließen der Schleifringe und Abheben der Bürsten geschieht durch eine Vorrichtung, die mittels Hebel oder Handrad betätigt wird.

Bei Motoren, deren Läuferdrehzahl während des Betriebes durch Drehzahlregler verändert werden soll, müssen die Bürsten dauernd aufliegen.

**Das Anlassen und Stillsetzen der Motoren mit Schleifringläufer.** Vor dem Anlassen eines Motors mit Schleifringläufer muß man sich überzeugen, daß 1. die Kurzschlußvorrichtung ausgerückt ist und die Bürsten gut aufliegen, 2. der Anlasser ausgeschaltet ist. Die Reihenfolge der Handgriffe beim Einschalten ist folgende:

1. Hauptschalter einschalten. 2. Kurbel des Anlassers langsam von Kontakt zu Kontakt bis in die Endstellung (Betriebsstellung) drehen. (Dies muß sofort nach dem Einschalten des Hauptschalters geschehen.) 3. Kurzschluß- und Bürstenabhebevorrichtung einrücken (Bürsten sind jetzt abgehoben).

Beim Stillsetzen des Motors verfährt man wie folgt: 1. Hauptschalter ausschalten. 2. Kurbel des Anlassers in die Ausschaltstellung drehen. (Dies muß unmittelbar nach dem Ausschalten des Hauptschalters geschehen.) 3. Kurzschluß- und Bürstenabhebevorrichtung ausrücken (Bürsten liegen jetzt auf).

### 5. Stromverdrängungsmotoren

Der Kurzschlußläufer ist betriebssicherer und einfacher zu bedienen als der Schleifringläufer. Infolgedessen geht das Bestreben dahin, für alle Antriebe, bei denen kein besonders schwerer Anlauf zu überwinden ist, nur noch Kurzschlußläufer zu verwenden. Das Bemühen, Kurzschlußläufer mit genügend großem Anlaufmoment bei geringstem Anlaufstrom zu bauen, führte zu besonderen Einstab- und Mehrstabwicklungen. Die heute bei Kurzschlußläufern gebräuchlichen Stabformen zeigt Bild 171.

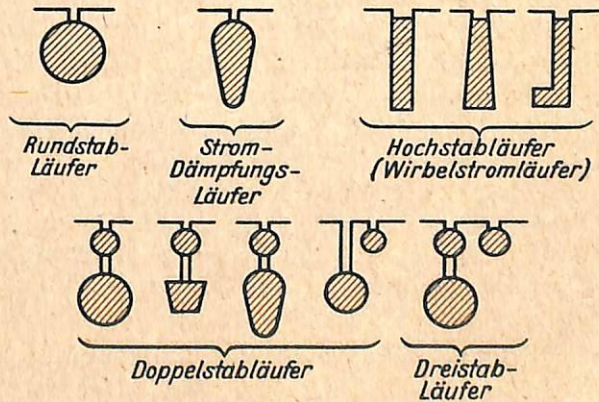
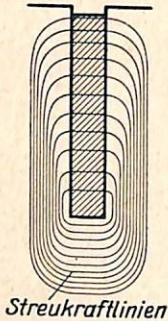


Bild 171. Gebräuchliche Stabformen



a) Rundstabläufer kommen im allgemeinen nur noch für kleinere und mittlere Leistungen bis etwa 20 kW in Frage. Sie eignen sich für Leer- und Leichtanlauf (Werkzeugmaschinen, Transmissionen usw.). Ihr Anlaufstrom darf bei direktem Einschalten das 6- bis 8fache des Nennstromes nicht überschreiten. Beim Anlassen mittels Sterndreieckschalters beträgt der Anlaufstrom je nach Leistung und Drehzahl des Motors etwa das 1,8- bis 2,5fache des Nennstromes.

b) Stromdämpfungsläufer kommen für die gleichen Leistungen und Antriebe wie die Rundstabläufer in Frage. Ihr Anlaufstrom ist geringer als der bei den Rundstabläufern und beträgt bei direktem Einschalten etwa das 5fache und beim Anlassen mittels Sterndreieckschalters etwa das 1,6fache des Nennstromes.



Streukraftlinien

Bild 172  
Streufeld  
beim  
Hoch-  
stabläufer

c) Das Bestreben, die Anlaufverhältnisse des Einstabläufers zu verbessern, führte zum Hochstabläufer, der auch Wirbelstrom-, Tiefnut-, Stromverdrängungs- oder Strombegrenzungsläufer genannt wird.

Wirkungsweise. Im Augenblick des Anlaufs ist in der Läuferwicklung die Frequenz hoch (50 Hertz) und die Streuung groß. Dabei wird der untere Teil des Stabes (Bild 172) von wesentlich mehr Kraftlinien umschlossen als der mittlere und obere Teil des Stabes. Infolgedessen wird der induktive Widerstand im unteren Stabteil wesentlich größer als im oberen. Dadurch wird der Strom vom unteren Stabteil nach oben abgedrängt, so daß in der Hauptsache nur im oberen Stabteil Strom fließt. Die Wirkung ist die gleiche, als wäre der Widerstand des Stabes vergrößert worden. Durch diese scheinbare Vergrößerung des Widerstandes der Läuferwicklung wird das Anlaufmoment größer und gleichzeitig der Anlaufstrom herabgesetzt. Mit zunehmender Drehzahl sinken Frequenz und induktiver Widerstand im Stab. Bei voller Drehzahl ist die Frequenz im Stab nur gering. Dadurch wird der induktive Widerstand so klein, daß er gegenüber dem Ohmschen Widerstand keine Rolle spielt. Der Strom verteilt sich jetzt gleichmäßig über den ganzen Querschnitt des Läuferstabes.

Beim Stromdämpfungsläufer (Bild 171) ist die Wirkungsweise die gleiche, die Wirkung aber schwächer.

Hochstabläufer kommen auch für Lastanlauf in Frage und werden nur direkt eingeschaltet. Ihr Anlaufstrom beträgt etwa das 4,5fache des Nennstromes. Sie werden im allgemeinen für Leistungen ab 10 kW aufwärts bis zu mehreren 1000 kW gebaut.

d) Doppelstabläufer kommen ebenfalls für Lastanlauf in Frage. Sie können direkt eingeschaltet oder mittels Sterndreieckschalters angelassen werden. Sie werden im allgemeinen für Leistungen ab 10 kW gebaut. Ihr Anlaufstrom beträgt bei direktem Einschalten je nach Leistung und Drehzahl etwa das Fünffache und beim Anlassen mittels Sterndreieckschalters etwa das 1,6fache des Nennstromes. Es werden auch Doppelstabläufer gebaut, die bei direktem Einschalten etwa das 3fache und beim Anlassen mittels Sterndreieckschalters etwa den einfachen Nennstrom aufnehmen.

Wirkungsweise des Doppelstabläufers. Im Augenblick des Anlaufs werden die Leiterstäbe der Wicklung II (Bild 173) von mehr Streulinien umschlossen als die



Stäbe der Wicklung I. Dadurch entsteht beim Anlauf infolge der hohen Frequenz (50 Hertz) in den Leiterstäben der Wicklung II ein wesentlich größerer induktiver Widerstand als in den Stäben der Wicklung I. Infolgedessen wird der Läuferstrom aus Wicklung II nach Wicklung I abgedrängt. Der Motor verhält sich jetzt ungefähr so, als ob auf dem Läufer nur die äußere Wicklung I mit großem Ohmschen und kleinem induktiven Widerstand vorhanden wäre. Dadurch wird das Anlaufmoment kräftiger und der Anlaufstrom schwächer. Mit zunehmender Drehzahl sinkt die Frequenz des Läuferstromes und damit auch der induktive Widerstand der Wicklung II. Sobald der Läufer seine volle Drehzahl erreicht hat, wird die Läuferfrequenz und als Folge hiervon auch der induktive Widerstand der Wicklung II fast Null. Der Läuferstrom verteilt sich jetzt entsprechend den Leiterquerschnitten auf Wicklung I und II. (Anschlußplan siehe Bild 174.)

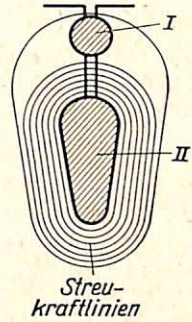


Bild 173  
Streufeld  
beim Doppelstabläufer

### 6. Änderung der Drehzahl durch Vergrößerung der Schlüpfung

Die Drehzahl kann geändert werden a) durch Änderung des Schlupfes, b) durch Änderung der Polzahl, c) durch Regelmanipulationen.

a) Die Änderung der Drehzahl durch Änderung des Schlupfes

Sie läßt sich bei jedem Motor mit Schleifringläufer anwenden. Zu diesem Zweck wird an Stelle des Anlagers ein regelbarer Widerstand mit den Bürsten verbunden. Die Widerstände

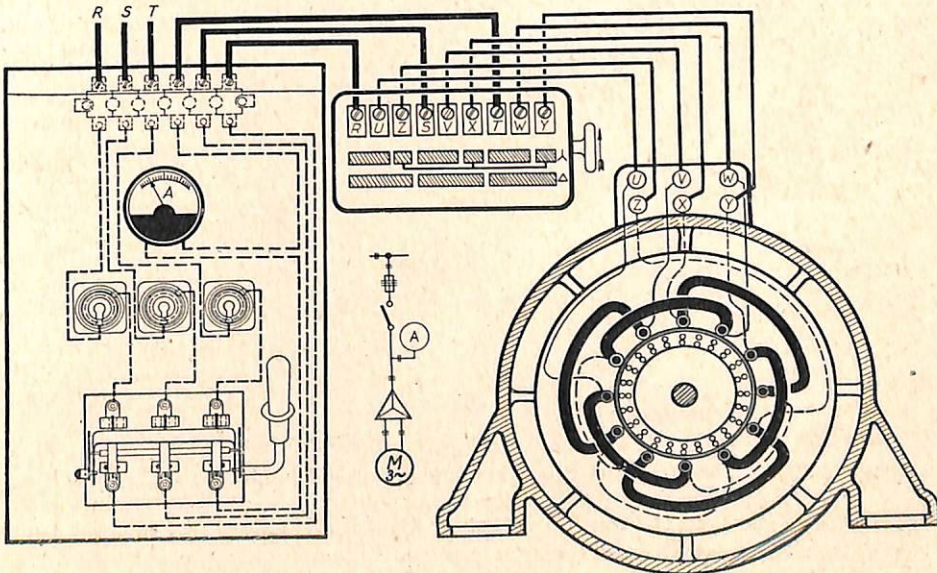


Bild 174. Anschlußplan für einen Doppelstabläufer mit Sterndreieckschalter



der drei Widerstandsgruppen müssen so stark bemessen sein, daß sie bei Dauereinschaltung nicht zu warm werden. Die Schleifkontakte der Kurbel des Reglers können auf jedem Zwischenkontakt beliebig lange stehenbleiben.

Diese Art der Drehzahländerung hat den Nachteil, daß ein großer Teil der vom Motor aus dem Netz entnommenen elektrischen Leistung in den Widerständen des Reglers nutzlos verlorengeht und lediglich in Wärme umgesetzt wird (Stromwärmeverluste). Eine solche Drehzahlregelung hat außerdem noch den Nachteil, daß die Drehzahl von der Belastung abhängt. Ist die Kurbel des Reglers bei einer bestimmten Belastung für eine bestimmte Drehzahl eingestellt, dann wird beim Sinken der Belastung die Drehzahl steigen und beim Steigen der Belastung die Drehzahl sinken.

### b) Die Änderung der Drehzahl durch Änderung der Polzahl

Die Drehzahl des Drehfeldes ist außer von der Periodenzahl auch von der Polzahl abhängig ( $n = \frac{60 \cdot f}{p}$ ). Die Drehzahl des Läufers hängt wieder von der Drehzahl des Drehfeldes ab, so daß jede Änderung der Drehzahl des Drehfeldes eine Änderung der Drehzahl des Läufers zur Folge hat.

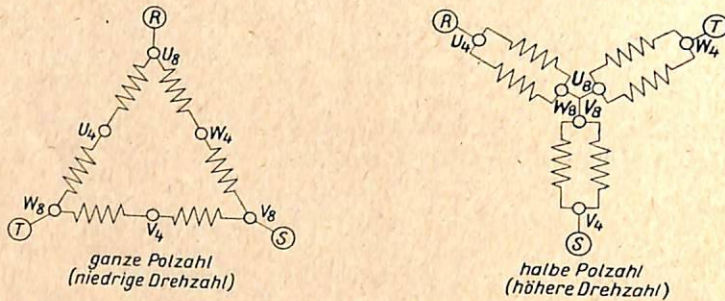


Bild 175/176. Schaltung der Ständerwicklung für gleichbleibende Leistung

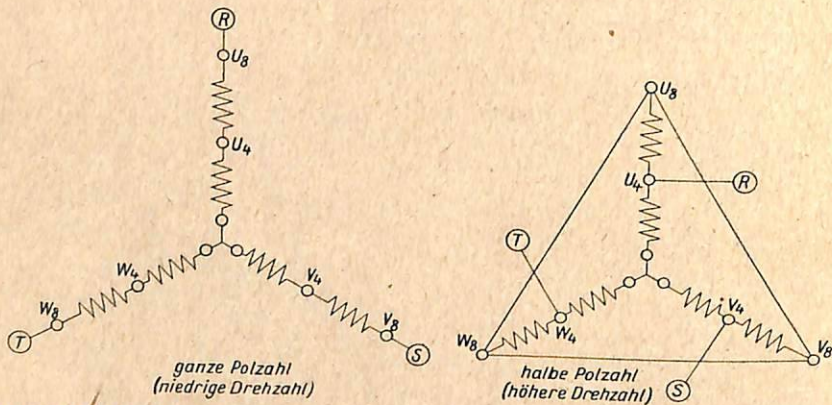


Bild 177/178. Schaltung der Ständerwicklung für gleichbleibendes Drehmoment

Die Änderung der Polzahl kann entweder durch Umschalten der Wicklung oder durch Einschalten einer zweiten Wicklung erfolgen, die von der ersten unabhängig ist.

Das Umschalten der Ständerwicklung kann entweder so erfolgen, daß die Leistung bei allen Drehzahlen gleichbleibt (Bild 175 und 176) oder so, daß das Drehmoment bei allen



Drehzahlen gleichbleibt (Bild 177 und 178). Im ersten Fall handelt es sich um eine Polumschaltung für gleiche Leistung, im zweiten Fall um eine Polumschaltung für gleiches Drehmoment. Bei der Polumschaltung für gleiches Drehmoment ist die Leistung des Motors bei der halben Drehzahl auch nur halb so groß wie bei der vollen Drehzahl.

Wird der Ständer mit zwei getrennten Wicklungen versehen, dann kann der Motor entweder für drei Drehzahlen (750, 1500, 3000 oder für 1000, 1500, 3000 U/min) oder für vier Drehzahlen (375, 500, 750, 1000 oder für 500, 750, 1000, 1500 oder für 500, 1000, 1500, 3000 U/min) umgeschaltet werden.

Bei der Schaltung nach Bild 176 ist die Polzahl  $\frac{1}{2}$  mal so groß und die Drehzahl 2 mal so hoch wie bei der Schaltung nach Bild 175. Je weniger Pole, um so höher die Drehzahl, je mehr Pole, um so niedriger die Drehzahl.

Besitzt der Läufer eine Phasenwicklung, dann muß gleichzeitig mit der Ständerwicklung auch die Läuferwicklung umgeschaltet werden.

Bei der Drehzahländerung durch Polumschaltung sind die Verluste im Motor gering (verlustlose Drehzahländerung); außerdem ist die Drehzahl von der Belastung unabhängig.

Das Umschalten von der einen Polzahl auf die andere geschieht mittels besonderer Polumschalter (Bild 179).

c) Die Änderung der Drehzahl durch Regelmaschinen

Regelmaschinen kommen für große Leistungen zum Antrieb von Walzenstraßen in Walzwerken in Frage. Es wurde bereits darauf hingewiesen, daß die Änderung der Drehzahl bei Asynchronmotoren durch Einschalten von Widerstand in den Läuferkreis (Widerstands- oder Schlupfregelung) sehr verlustreich ist. Bei dieser Regelung geht Leistung verloren, die dem Schlupf des Läufers verhältnismäßig ist, d. h. bei einem auf halbe Drehzahl geregelten Asynchronmotor (Schlupf 50 v. H.) wird im Regelwiderstand rund 50 v. H. der vom Motor aufgenommenen Leistung vernichtet. Durch diese großen Verluste und durch den Nachteil, daß die Drehzahl von der Belastung abhängt, kommt die Widerstandsregelung für Motoren großer Leistung nicht in Frage. Für solche Zwecke verwendet man Regelsätze, die aus mehreren Maschinen bestehen.

Bild 180 zeigt einen mechanisch gekuppelten Regelsatz, der aus dem Vordermotor, einem Einankerumformer und dem Hintermotor besteht. Der Vordermotor ist ein Asynchronmotor, der Hintermotor ein Gleichstrommotor. Beide Motoren sind direkt gekuppelt.

Bei diesem Regelsatz wird die Läuferleistung (Schlupfleistung) des Vordermotors durch den Einankerumformer in Gleichstrom umgeformt und an den Hintermotor abgegeben. Die Läuferleistung des Vordermotors wird infolgedessen nicht vernichtet, sondern durch den Hintermotor auf die Läuferwelle des Vordermotors nutzbar übertragen. Die Regelung

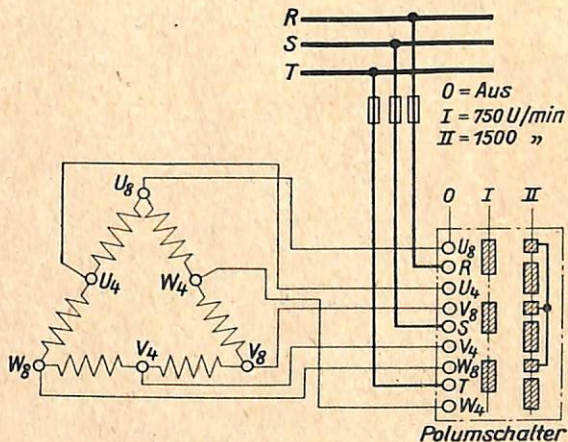


Bild 179. Anschluß eines Polumschalters



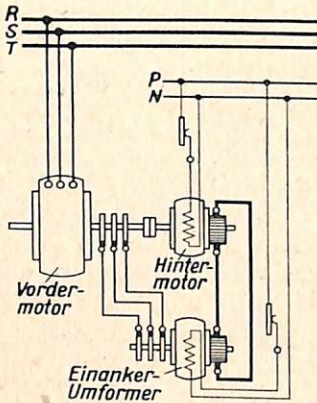


Bild 180  
Mechanisch gekuppelter  
Gleichstrom-Regelsatz

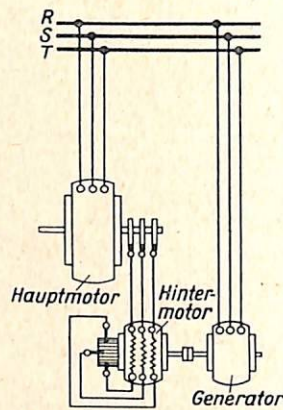


Bild 181  
Elektrisch gekuppelter  
Drehstrom-Regelsatz

der Drehzahl unter die synchrone Drehzahl erfolgt durch entsprechende Einstellung der Erregung beim Hintermotor durch dessen Nebenschlußregler. Die jeweils eingestellte Drehzahl ist fest, d. h. unabhängig von der Belastung.

Der elektrisch gekuppelte Regelsatz (Bild 181) besteht aus dem Hauptmotor, einem Stromwendermotor als Hintermotor und aus einem Drehstromgenerator. Bei diesem Regelsatz wird die Läuferleistung des Hauptmotors mit Hilfe des Hintermotors und des mit diesem gekoppelten Generators an das Netz zurückgegeben. Die Drehzahl

des Hintermotors ist unabhängig von der Drehzahl des Hauptmotors. Bei allen Drehzahlen ist das Drehmoment des Hauptmotors verhältnismäßig seiner Leistungsaufnahme.

An Stelle von Regelsätzen werden heute Gleichstrommotoren im Anschluß an gittergesteuerte Gleichrichter für stufenlose Drehzahlregelung mit gutem Erfolg verwendet.

## 7. Motoren für höhere Drehzahlen als 3000 U/min

Bei Holzbearbeitungsmaschinen kommen Drehzahlen bis zu 20 000 U/min vor. Da der übliche Drehstrommotor bei 50 Per/s nur für Drehzahlen bis 3000 U/min verwendet werden kann, müssen zur Erreichung höherer Drehzahlen andere Wege beschritten werden. So z. B. kann zum Antrieb von Holzbearbeitungs-, Polier- und Schleifmaschinen mit Drehzahlen bis 6000 U/min der Doppelläufermotor Verwendung finden. Ein solcher Motor besteht aus zwei ineinander geschachtelten Drehstrommotoren ähnlich dem Bild 182.  $W_1$  ist die ruhende Ständerwicklung für den Außenläufer  $L_1$ . Dieser Außenläufer trägt die Ständerwicklung  $W_2$  für den Innenläufer  $L_2$ .

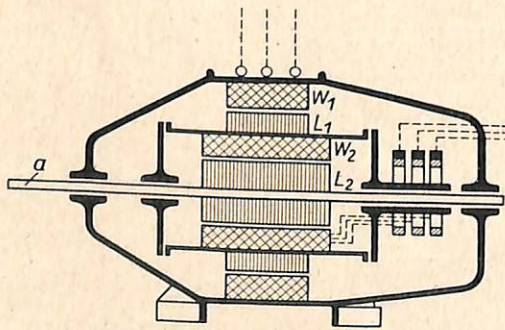


Bild 182  
Motor für höhere Drehzahl als 3000 U/min

Während die ruhende Ständerwicklung  $W_1$  direkt an das Netz angeschlossen wird, erhält die sich drehende Ständerwicklung  $W_2$  ihren Strom über Schleifringe. Die Drehzahl des Innenläufers ist von der Polzahl der ruhenden Ständerwicklung  $W_1$  und von der Polzahl der umlaufenden Ständerwicklung  $W_2$  abhängig. Ist z. B. die Wicklung  $W_1$  zweipolig und die Wicklung  $W_2$



vierpolig, dann macht der Innenläufer, wenn die Wicklung  $W_1$  allein eingeschaltet ist, 3000 und dann, wenn Wicklung  $W_1$  und Wicklung  $W_2$  eingeschaltet sind,  $3000 + 1500 = 4500$  U/min. Sind beide Wicklungen zweipolig, dann kann der Innenläufer entweder 3000 oder  $3000 + 3000 = 6000$  U/min machen. Durch Polumschaltung der Wicklung  $W_1$  lassen sich weitere Drehzahlstufen erreichen (1500, 3000, 4500 und 6000 U/min).

Müssen mehrere oder viele solcher Arbeitsmaschinen mit einer höheren Drehzahl als 3000 bei einer Grundfrequenz von 50 Per/s betrieben werden, dann verwendet man Frequenzwandler und Motoren für höhere Frequenz. Ein solcher Frequenzwandler besteht aus einem Drehstrom-Asynchronmotor mit Schleifringläufer als Generator und einem Kurzschlußläufer als Antriebsmotor. Ist die Ständerwicklung des Frequenzwandlers an das Netz mit 50 Per/s angeschlossen, dann wird in der Läuferwicklung, solange der Läufer stillsteht, ein Wechselstrom von ebenfalls 50 Per/s induziert. Wird jedoch der Läufer des Frequenzwandlers durch den Antriebsmotor gegen das Drehfeld des Frequenzwandlers angetrieben, dann steigen Läuferfrequenz und Läuferspannung mit zunehmender Drehzahl. In diesem Fall berechnet sich die Läuferfrequenz aus  $f_2 = f_1 \cdot \frac{n_1 + n_2}{n_1}$ . Hierin bedeutet  $f_1$  die Netzfrequenz,  $f_2$  die Läuferfrequenz,  $n_1$  die synchrone Drehzahl des Frequenzwandlers

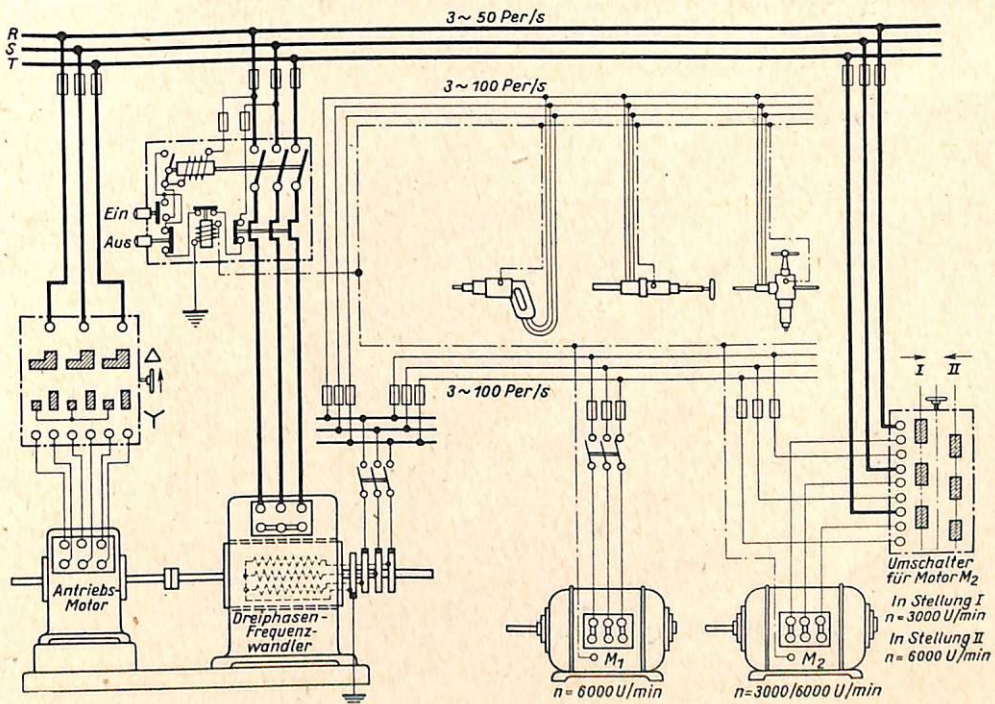


Bild 183. Schaltplan einer Anlage mit Frequenzwandler für Motoren hoher Drehzahl



und  $n_2$  die Antriebsdrehzahl des Läufers. Die Spannung des Läufers erhöht sich im gleichen Verhältnis wie die Frequenz.

Die Leistung des Antriebmotors ist immer kleiner als die Nennleistung des Frequenzumformers, weil ein Teil der Leistung transformatorisch dem Netz entnommen wird.

Die vom Antriebsmotor aufzubringende Leistung berechnet sich aus

$$N_M = N_G \cdot \frac{f_2 - f_1}{f_2}$$

Hierin bedeutet  $N_G$  die Wirkleistung auf der Sekundärseite des Umformers.

In Bild 183 ist der Schaltplan einer Anlage mit Werkzeugmaschinen für hohe Drehzahl im Anschluß an einen Frequenzwandler dargestellt.

Zum Schutz gegen gefährliche Berührungsspannung ist der Sternpunkt der Läuferwicklung des Frequenzwandlers über einen Schleifring herausgeführt und an Erde gelegt. Als Schutzmaßnahme ist die Schutzschaltung gewählt, die sich zum Schutz von Elektrowerkzeugen gut bewährt hat.

### 8. Umkehr des Drehsinnes bei Asynchronmotoren für Drehstrom

Der Drehsinn des Läufers ist vom Drehsinn des Drehfeldes abhängig. Um den Drehsinn des Drehfeldes zu ändern, hat man von den 3 Zuleitungen zum Klemmbrett des Ständers 2 beliebige Leitungen durch Umklemmen miteinander zu vertauschen. Geben in Bild 184 die Ziffern 1, 2, 3 die Reihenfolge an, in welcher

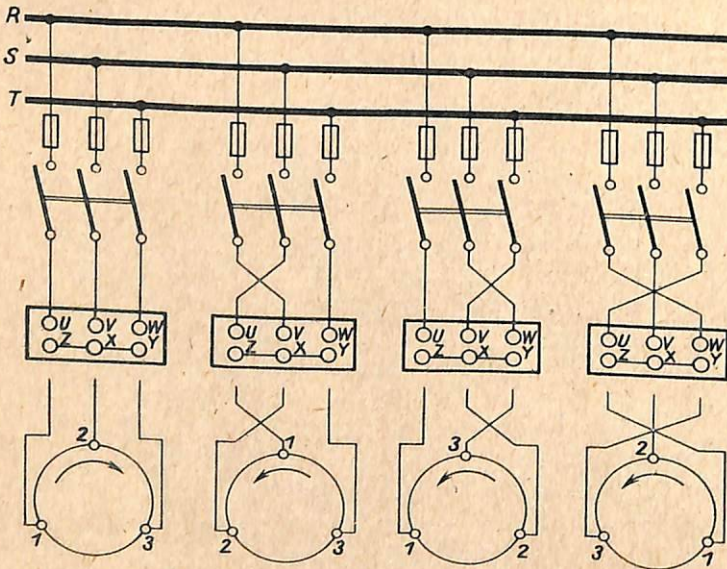


Bild 184  
Umkehr des Drehsinnes  
bei Asynchronmotoren für Drehstrom

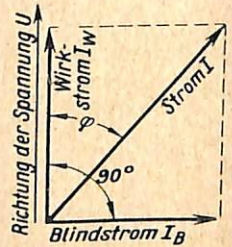


Bild 185. Zerlegung  
des Stromes in Wirk-  
strom und Blindstrom



die 3 Wechselströme die Phasen I, II, III der Ständerwicklung durchfließen, dann dreht sich das Drehfeld ebenfalls in der Richtung 1-2-3. Mit dem Umklemmen zweier beliebiger Leitungen ändert sich die Richtung dieser Reihenfolge und damit auch der Drehsinn. Das Umklemmen der Leitungen erfolgt bei Motoren mit Schleifringläufer zweckmäßig am Klemmbrett des Motors. Es kann auch an jeder beliebigen anderen Stelle der Zuleitungen zwischen Netz und Ständer erfolgen. Bei Motoren mit Kurzschlußläufer und Stern dreieckschalter ist es einfacher, das Umklemmen der beiden Leitungen vom Netz gesehen vor dem Stern dreieckschalter vorzunehmen.

### 9. Der Leistungsfaktor $\cos \varphi$ bei Asynchronmotoren

Den von der Ständerwicklung eines Asynchronmotors dem Netz entnommenen Gesamtstrom  $I$  zerlegt man in zwei Einzelströme. Der eine dieser beiden Ströme dient zur Erzeugung des magnetischen Feldes. Dieser Magnetisierungsstrom wird Blindstrom  $I_B$  genannt. Der andere Strom ist der eigentliche Arbeitsstrom. Er dient in der Hauptsache zur Erzeugung der wirksamen mechanischen Leistung, die vom Motor an die Läuferwelle abgegeben wird. Man hat ihn infolgedessen Wirkstrom  $I_W$  genannt (Bild 185).

Der Blindstrom eilt dem Wirkstrom um  $90^\circ$  oder  $\frac{1}{4}$  Periode nach.

Durch den nacheilenden Blindstrom  $I_B$  wird eine Phasenverschiebung zwischen dem durch die Leitungen fließenden Gesamtstrom  $I$  und der Netzspannung  $U$  erzeugt. Die Größe dieser Phasenverschiebung ist von dem Verhältnis zwischen Wirkstrom und Gesamtstrom abhängig.

$$\text{Leistungsfaktor} = \frac{\text{Wirkstrom}}{\text{Gesamtstrom}} \text{ oder } \cos \varphi = \frac{I_W}{I}$$

Aus dem Stromdreieck in Bild 186 ist zu erkennen, daß die Phasenverschiebung um so größer wird, je stärker der Blindstrom im Verhältnis zum Wirkstrom ist.

Bei gleichbleibendem Blindstrom  $I_B$  und veränderlichem Wirkstrom  $I_W$  ändert sich der Leistungsfaktor und die Größe des Gesamtstromes  $I$ .

Bei Asynchronmotoren ist die Stärke des Blindstromes  $I_B$  vom Rauminhalt des

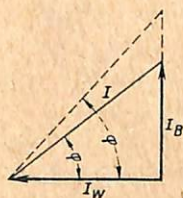
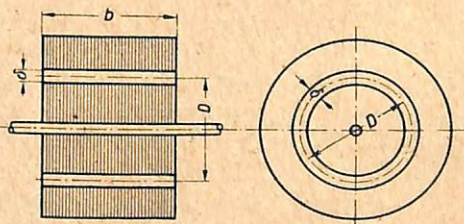


Bild 186  
Stromdreieck



Rauminhalt des Luftspaltes =  $D \cdot \pi \cdot b \cdot \delta$

Bild 187. Einfluß des Luftspaltes auf die Stärke des Blindstromes

Luftspaltes zwischen Läufer und Ständer abhängig (Bild 187).

Bei langsam laufenden Motoren ist der Durchmesser des Läufers und damit auch die Länge des Luftspaltes größer als bei schnell laufenden. Hieraus folgt, daß schnell laufende Motoren bei gleicher Luftspaltweite weniger Blindstrom verbrauchen und



dadurch einen besseren Leistungsfaktor haben als langsam laufende gleicher Leistung (siehe Zahlentafel auf S. 163 und 164).

Um den Blindstrom möglichst klein und damit den Leistungsfaktor möglichst hoch zu halten, macht man die Luftspaltweite so klein wie aus mechanischen Gründen möglich. Bei kleinen Motoren geht man bis auf 0,2 mm Luftspaltweite herab.

Die Stärke des Blindstromes ist bei Asynchronmotoren nahezu unabhängig von der Belastung, d. h. sie ist bei Leerlauf fast ebenso groß wie bei Vollast. Infolgedessen ist besonders bei leer laufenden Asynchronmotoren das Verhältnis von Wirkstrom zu Gesamtstrom sehr ungünstig und dadurch der Leistungsfaktor sehr schlecht. Der Leistungsfaktor wird mit zunehmender Belastung besser.

**Nachteile des Blindstromes.** Durch den Blindstrom wird der Gesamtstrom in den Leitungen erheblich vergrößert. Besonders dann, wenn an das Leitungsnetz viele leer laufende oder schwach belastete Asynchronmotoren angeschlossen sind, übersteigt die Stärke des Blindstromes die des Wirkstromes ganz erheblich. Bei dem verhältnismäßig günstigen Leistungsfaktor von  $\cos \varphi = 0,8$  wird der Blindstrom bereits 75 v. H. des Wirkstromes. Er wird bei  $\cos \varphi = 0,7$  ebenso stark wie der Wirkstrom. Sinkt der Gesamtleistungsfaktor einer Drehstromanlage auf  $\cos \varphi = 0,5$ , dann ist der Blindstrom 1,75 mal und der Gesamtstrom 2 mal so stark wie der Wirkstrom. Dies bedeutet, daß bei  $\cos \varphi = 0,5$  die Leiterquerschnitte und das Gewicht der Leitungen doppelt so groß wie bei  $\cos \varphi = 1$  werden. Ein weiterer Nachteil des Blindstromes ist der, daß die Generatoren in den Kraftwerken für eine erheblich größere Scheinleistung gebaut sein müssen, als der erforderlichen Wirkleistung entspricht. So z. B. sind für eine Wirkleistung von 5000 kW bei  $\cos \varphi = 0,5$  Generatoren für eine Scheinleistung von  $\frac{5000}{0,5} = 10\ 000$  kVA erforderlich.

Durch den Blindstrom wird außerdem der Spannungsverlust in den Leitungen erheblich vergrößert und die Regelung der Spannung bei den Generatoren im Kraftwerk erschwert.

**Verbesserung des Leistungsfaktors bei Motoren.** Motoren mit verbessertem Leistungsfaktor dürfen dem Netz keinen oder nur geringen Blindstrom entnehmen. Der notwendige Blindstrom zur Erregung muß entweder von der Maschine selbst oder von besonderen Erregermaschinen geliefert werden. Ist der erzeugte Blindstrom gerade so stark, daß er für die eigene Maschine genügt, dann ist der Leistungsfaktor dieser Maschine = 1. Übersteigt der erzeugte Blindstrom den Bedarf des eigenen Motors (Übererregung), dann kann der den Eigenbedarf übersteigende Teil anderen Motoren zugeführt werden. Dadurch werden die Generatoren des Kraftwerkes von Blindstrom entlastet und damit der Gesamtleistungsfaktor der Anlage verbessert. Ist der erzeugte Blindstrom zu schwach, dann muß der fehlende Teil dem Netz entnommen werden.

Motoren, die dem Netz keinen oder nur wenig Blindstrom entnehmen, nennt man kompensierte Motoren.

Eine sehr einfache Einrichtung zum Ausgleichen (Kompensieren) des Blindstromes bei Drehstrommotoren ist der Kondensator (Bild 188). Bei einem solchen



Kondensator bestehen die beiden Platten aus sehr dünnen Aluminiumfolien. Als isolierende Zwischenschicht (Dielektrikum) dient besonderes mit Isolieröl getränktes Papier. Das Ganze ist in ein dichtgeschweißtes Blechgehäuse eingebaut. Damit die Wirtschaftlichkeit des Blindstromausgleichs mittels Kondensators möglichst günstig wird, soll man nicht zu hoch ausgleichen.

Auf keinen Fall darf die Leistung des Kondensators größer gewählt werden, als zum Ausgleich auf  $\cos \varphi = 1$  nötig ist. Bei großen Drehstrommotoren wird der erforderliche Blindstrom (Magnetisierungsstrom) nicht dem Netz entnommen, sondern in besonderen Maschinen erzeugt.

### 10. Der Einphasen-Asynchronmotor

Wird bei einem Drehstrom-Asynchronmotor, der leer läuft oder nur schwach belastet ist, eine der drei Zuleitungen unterbrochen, dann läuft der Motor trotzdem weiter. Schaltet man den Motor aus und nach dem Stillstand wieder ein, dann läuft er nicht von selbst an. Dreht man ihn jedoch kräftig in der einen oder in der anderen Drehrichtung an, dann erreicht er bald seine volle Drehzahl.

Der Grund, weshalb der Motor nicht von selbst anläuft, liegt darin, daß die Ständerwicklung eines Drehstrommotors beim Anschluß an nur zwei Hauptleitungen als Einphasenwicklung geschaltet ist und von Einphasenstrom durchflossen wird.

In Bild 189 (Y-Schaltung) ist durch die Unterbrechung der Zuleitung T die Phase III abgeschaltet. Phasenwicklung I und II sind in Reihe geschaltet und bilden eine Einphasenwicklung (Bild 190). In Bild 191 ( $\Delta$ -Schaltung) bleiben alle drei Phasenwicklungen eingeschaltet. Die beiden Wicklungen II und III sind in Reihe geschaltet und liegen zur Wicklung I parallel (Bild 192).

Die drei Wicklungen bilden jetzt zusammen eine Einphasenwicklung. Mit einer

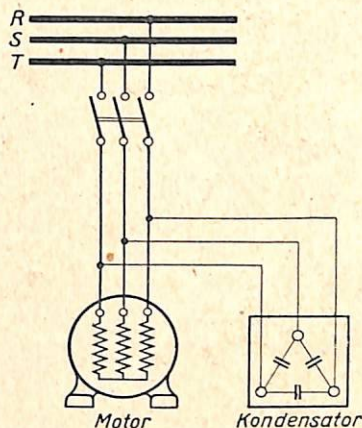


Bild 188  
Anschluß eines Kondensators zur Verbesserung des Leistungsfaktors

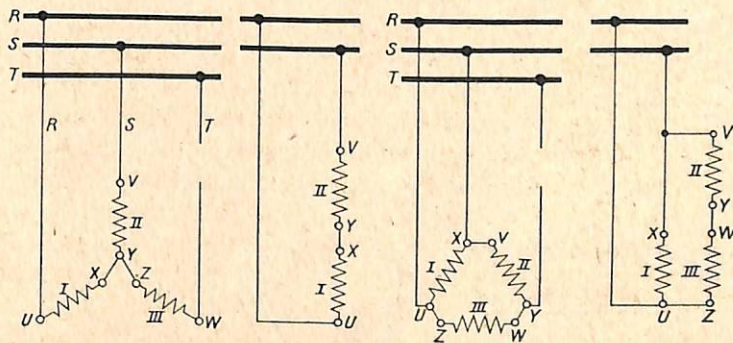


Bild 189—192. Schaltung der Ständerwicklung eines Drehstrommotors bei Unterbrechung einer Zuleitung



Einphasenwicklung läßt sich kein Drehfeld erzeugen. Erst wenn der Läufer eines Einphasenmotors seine volle Drehzahl erreicht hat, entsteht durch die Mitwirkung des Stromes im Läufer ein genügend kräftiges Drehfeld.

Damit der Einphasenmotor von selbst anläuft, muß auch für die Zeit des Anlaufs ein Drehfeld erzeugt werden.

Dieses Drehfeld läßt sich künstlich dadurch erzeugen, daß auf dem Ständer des Motors außer der eigentlichen Haupt-

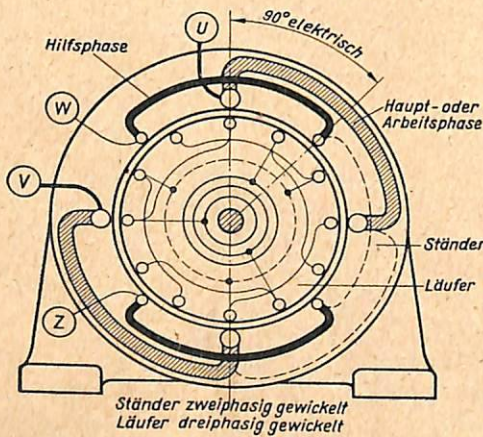


Bild 193

Einphasenmotor mit Schleifringläufer

Einphasenstrom  $I$  teilt sich infolgedessen in die beiden Teilströme  $i_1$  und  $i_2$ . Damit ein magnetisches Drehfeld entsteht, müssen die beiden Teilströme gegeneinander verschoben sein, d. h. der eine Teilstrom muß dem anderen zeitlich nacheilen.

Um dies zu erreichen, kann entweder zu der Hilfswicklung (Hilfsphase) ein induktionsfreier Widerstand neben- (parallel) geschaltet oder mit der Hilfswicklung ein induktiver Widerstand (Drosselspule) in Reihe oder mit der Hilfswicklung ein Kondensator in Reihe geschaltet werden.

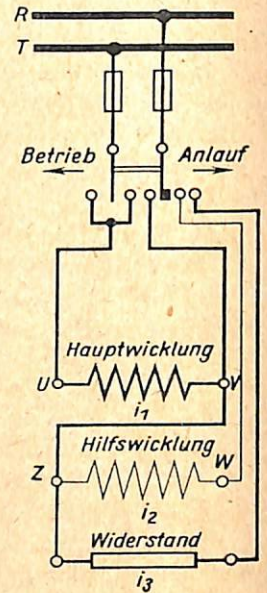


Bild 194

Anlaufschaltung mit induktionsfreiem Widerstand

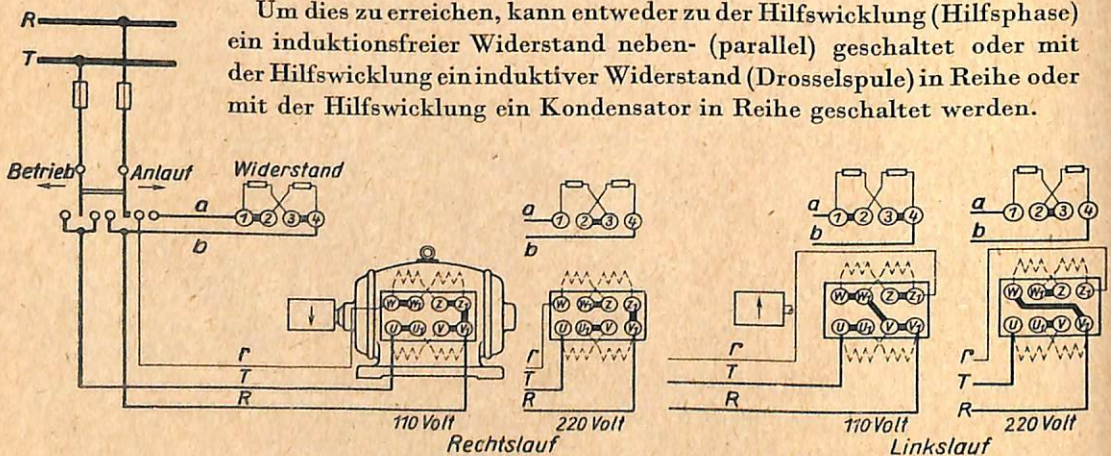


Bild 195. Schaltplan für Einphasenmotor mit Kurzschlußläufer



Bei Verwendung eines induktionsfreien Widerstandes (Bild 194) entsteht zwischen den Strömen in der Haupt- und Hilfswicklung eine Phasenverschiebung, die ein magnetisches Drehfeld erzeugt, das gerade genügt, um den Motor leer, das heißt ohne Last, auf seine Nenn-drehzahl zu bringen. In Bild 195 ist der Schaltplan eines Kurzschlußläufers mit einem induktionsfreien Widerstand, welcher der Hilfswicklung nebengeschaltet ist, dargestellt. Das Umschalten von Anlauf auf Betrieb kann entweder durch einen Sonderschalter mit 7 Klemmen oder einen dreipoligen Hebelumschalter oder einen Walzenschalter erfolgen. Das Ein- und Ausschalten der Hilfswicklung kann auch selbsttätig durch einen im Motorgehäuse eingebauten Fliehkraftschalter geschehen. Zum Klemmbrett des Motors werden dann nur die beiden Netzleitungen geführt.

Wird ein induktiver Widerstand (Drosselspule) mit der Hilfswicklung in Reihe geschaltet (Bild 196), dann

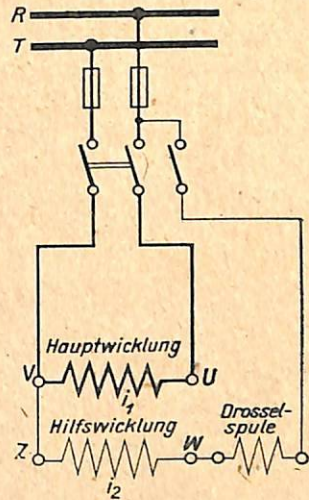


Bild 196. Anlaufschaltung mit Drosselspule

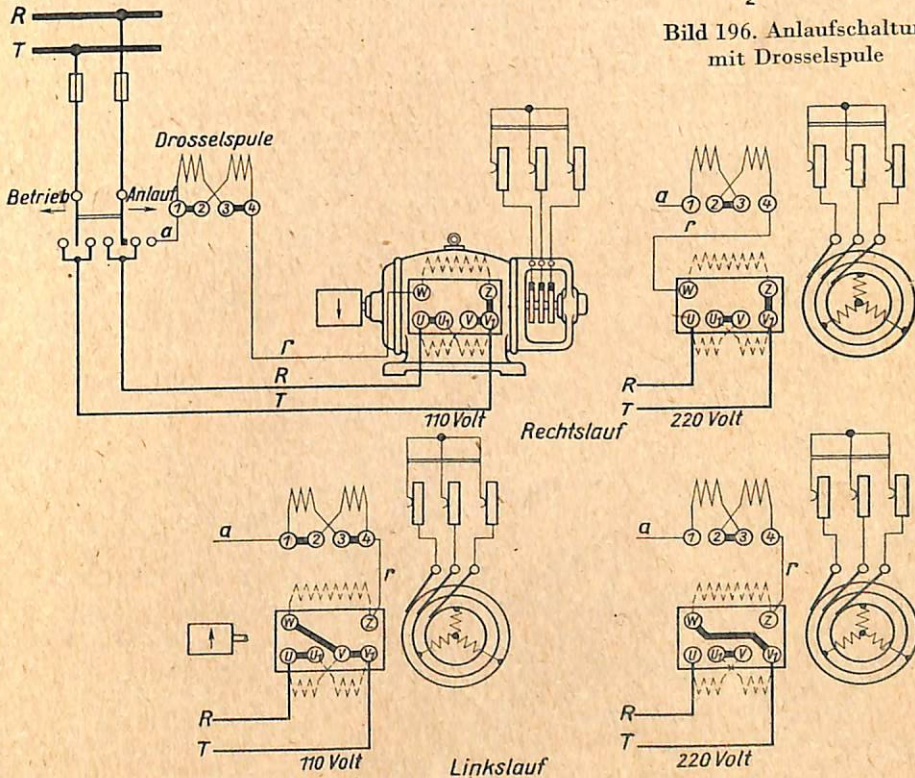


Bild 197. Schaltplan für einen Einphasenmotor mit Schleifringläufer



wird durch die Selbstinduktion der Drosselspule der Strom in der Hilfswicklung gegenüber dem Strom in der Hauptwicklung zurückgehalten, so daß zwischen beiden Strömen eine Phasenverschiebung entsteht. Das hierdurch erzeugte magnetische Drehfeld genügt, um den Motor auf seine Nenndrehzahl zu bringen. Zum Anlauf mit Anlaufdrosselspule.

Die Drehrichtung wird bei Einphasenmotoren dadurch geändert, daß entweder die Anschlüsse am Anfang und Ende der Hauptwicklung oder am Anfang und Ende der Hilfswicklung miteinander vertauscht werden.

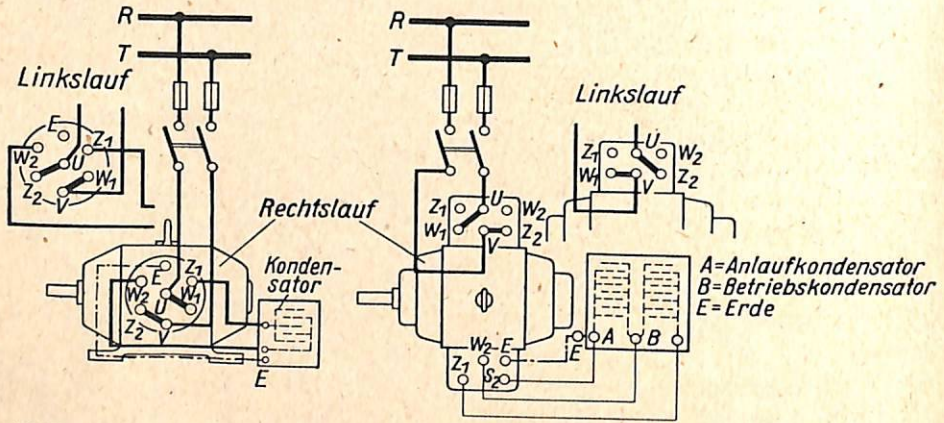


Bild 198 a. Anschlußplan für die Schaltung in Bild 199

Bild 198 b. Anschlußplan für die Schaltung in Bild 200

Motor mit Anlaufkondensator wird wie der Motor mit Betriebskondensator angeschlossen.

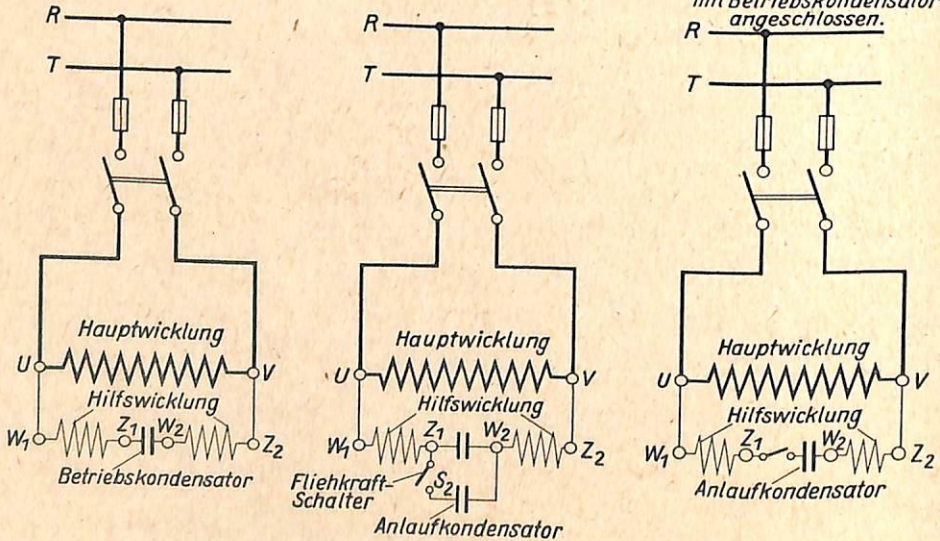


Bild 199—201. Schaltung des Kondensators als Betriebs- oder als Anlaufkondensator



Durch die Fortschritte, die im Bau betriebssicherer und preiswerter Kondensatoren erzielt wurden, werden heute zum Anlauf von Einphasenmotoren weder induktionsfreie noch induktive Widerstände, sondern nur noch Kondensatoren benutzt.

**Der Einphasen-Kondensatormotor.** Seitdem die früheren Einphasennetze in Drehstromnetze umgebaut sind, kommen Einphasenmotoren für größere Leistungen ihrer vielen Nachteile wegen nicht mehr in Frage. Nur der Einphasenmotor mit Kondensator in der Hilfswicklung hat besondere Bedeutung, weil er sich für Leistungen bis 2 PS zum Anschluß an Lichtnetze mit  $1,5 \text{ mm}^2$  Querschnitt eignet. Bei diesem Motor ist die Hauptwicklung mit dem Netz direkt verbunden. Die Hilfswicklung ist mit einem Kondensator in Reihe geschaltet und liegt zur Hauptwicklung parallel. Der Kondensator bewirkt, daß der Strom in der Hilfswicklung der Spannung voreilt (kapazitiv), während der Strom in der Hauptwicklung der Spannung nacheilt (induktiv). Die von beiden Strömen erzeugten Wechselfelder setzen sich zu einem Drehfeld zusammen.

Genügt ein geringes Anlaufmoment von etwa 30 bis 50 v. H. des Nennmoments, dann können Kondensator und Hilfsphase dauernd eingeschaltet bleiben (Bild 198 a u. 199). Dadurch wird der Leistungsfaktor  $\cos \varphi$  fast = 1. Wird ein höheres Anlaufmoment verlangt, dann werden zwei Kondensatoren verwendet, die sich in einem gemeinsamen Gehäuse befinden (Bild 198 b u. 200). Der eine Kondensator bleibt nach dem Hochlaufen des Motors als Betriebskondensator zur Verbesserung des Leistungsfaktors dauernd mit der Hilfswicklung eingeschaltet, während der andere nach dem Hochlaufen des Motors durch einen Fliehkraftschalter selbsttätig abgeschaltet wird. Für besonders hohe Anlaufmomente verwendet man besondere Anlaufkondensatoren, die nach dem Hochlaufen des Motors durch einen Fliehkraftschalter abgeschaltet werden (Bild 201).

Wesentlich ist, daß beim Kondensatormotor das Anzugsmoment im gleichen Verhältnis wie die Kondensatorblindleistung steigt, das heißt durch eine doppelt so große Kondensatorblindleistung entsteht ein doppelt so großes Anzugsmoment. Nun steigt die Kondensatorblindleistung mit dem Quadrat der Spannung, so daß bei einer doppelt so hohen Spannung eine viermal so große Blindleistung entsteht. Da aber 1 kVA Blindleistung bei höherer Spannung billiger ist als bei niedriger Spannung, ist die Kondensatorspannung nicht zu niedrig zu wählen. Die üblichen Kondensatorspannungen liegen zwischen 200 und 500 V. Bei Kondensatorspannungen unter 200 V werden die Kondensatoren verhältnismäßig teuer.

Umstehende Zahlentafel der Hydrarwerke, Berlin, Fabrik für Kondensatoren, gibt die Größe der Kapazität an, um einen sicheren Anlauf bei 220 V Netzspannung bei den verschiedensten Arbeitsmaschinen zu gewährleisten.

Kondensatoren lassen sich für kurze Zeit wesentlich höher beanspruchen als bei Dauerbetrieb. Infolgedessen wird die Kondensatorspannung der Anlaufkapazität möglichst hoch gewählt, um mit kleinen, billigen Kondensatoren auszukommen.

Günstiger als Trockenkondensatoren sind Elektrolytkondensatoren, weil sie bei kleinsten Abmessungen große Kapazität haben.

Beim Kondensatormotor ist die Spannung an einzelnen Klemmen höher als die Netzspannung. Es ist daher für eine gute Erdung des Motors zu sorgen. Wird der



Motor an Steckdosen angeschlossen, dann sind nur Steckdosen mit Schutzkontakt zu verwenden.

Zahlentafel

Arbeitsmaschine	Motorleistung in PS	Erforderliche Kapazität $\mu\text{F}$
Bohrmaschine .....	1/15	5
Drehbank .....	0,3	25
Drehbank .....	0,75	60
Exzenterpresse .....	0,5	50
Gebälse .....	0,75	25
Kreiselpumpe für Ölfilterpresse .....	1,5	80
Bügelsäge .....	0,3	25
Kreissäge auf Motorwelle sitzend .....	0,4	15
Kreissäge .....	0,75	60
Schleifscheibe .....	0,35	10
Ventilator .....	0,3	10
Waschmaschine .....	0,25	25
Zentrifuge .....	0,4	20

**Anwurfmotoren.** Anwurfmotoren sind Einphasenmotoren mit Kurzschlußläufer, die mit der Hand angeworfen werden müssen. Bei ihnen fehlt die Hilfs- oder Anlaufphase und die zum Selbstanlauf notwendige Einrichtung (Kondensator). Dadurch werden sie billiger.

Man verwendet sie z. B. zum Antrieb von Waschmaschinen und landwirtschaftlichen Hilfsmaschinen.

**Der Drehstrommotor als Einphasenmotor.** Der Drehstrommotor läßt sich auch als Einphasenmotor verwenden. Damit er als Einphasenmotor von selbst anläuft, wird bei Dreieckschaltung der Ständerwicklung zu einer der Phasenwicklungen ein Kondensator neben- (parallel-) geschaltet (Bild 203). Ist die Ständerwicklung im Stern geschaltet, dann wird mit der dritten Phasenwicklung, die als Hilfs- oder Anlaufwicklung dient, ein Kondensator in Reihe geschaltet (Bild 204).

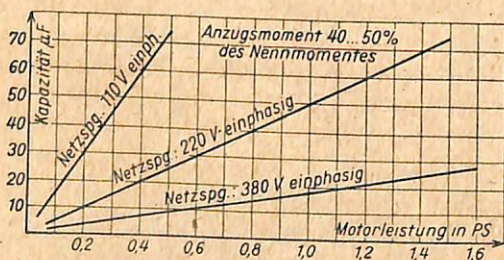


Bild 202. Kennlinien zur Ermittlung der erforderlichen Kapazität

Bei passender Wahl des Kondensators beträgt das Anzugsmoment als Einphasenmotor 40 bis 50 v. H. des Nenndrehmomentes als Drehstrommotor. Die Kennlinien in Bild 202 geben an, wie groß die Kapazität sein muß, um bei den verschiedenen Motorleistungen und Nennspannungen ein Anzugsmoment von 40 bis 50 v. H. des Nennmomentes zu erhalten. Diese Kennlinien wurden von der Firma Hydrawerk, Berlin, durch Versuche ermittelt. Sie gelten für Dreieckschaltung der Ständerwicklung. Ein Anzugsmoment



von 40 bis 50 v. H. genügt z. B. zum Antrieb von Ventilatoren, Kreiselpumpen usw. Noch günstigere Verhältnisse als beim Kurzschlußläufer ergeben sich beim Schleifringläufer. Bei diesem läßt sich bei passender Wahl des Kondensators sogar Vollastanlauf erreichen. Dabei braucht der Kondensator keine größere Kapazität als beim Kurzschlußläufer gleicher Drehstromleistung zu haben.

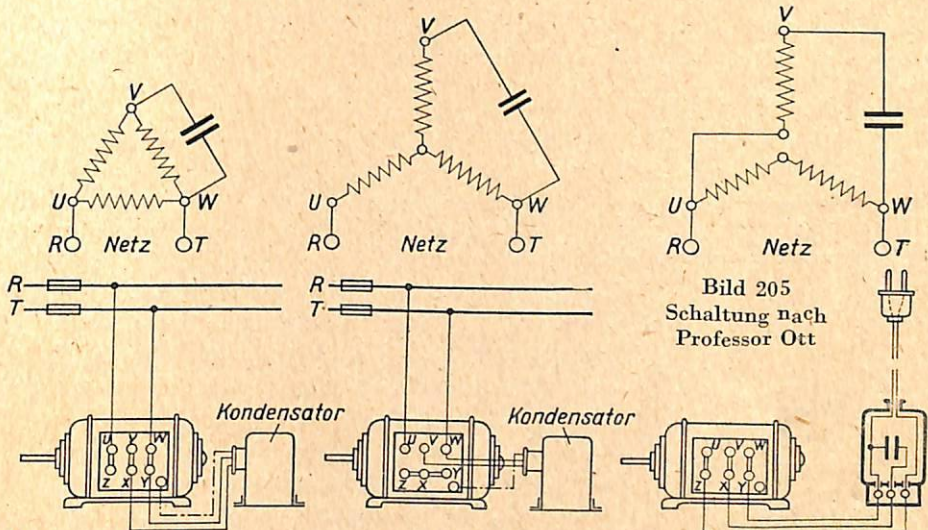


Bild 205  
Schaltung nach  
Professor Ott

Bild 203. Anschluß des Kondensators bei Dreieckschaltung der Ständerwicklung

Bild 204. Anschluß des Kondensators bei Sternschaltung der Ständerwicklung

Bild 206. Kupplungsvorrichtung (DRP) für Kondensatormotor (Hydrawerk, Berlin)

In Bild 203 ist oben die grundsätzliche Schaltung des Kondensators bei Dreieckschaltung der Ständerwicklung und darunter der Anschlußplan bei Dreieckschaltung angegeben. Sind die Ständerwicklungen im Stern geschaltet, dann ist es vorteilhaft, die Schaltung nach Prof. Ott, Karlsruhe (Bild 205), zu wählen. Sie hat gegenüber der Schaltung in Bild 204 den Vorteil, daß für die Zeit des Anlaufs die Hauptwicklung als Sparumspanner für die Hilfswicklung dient. Dadurch wird die Kondensatorspannung und durch diese das Anzugsmoment des Motors entsprechend erhöht.

Die Änderung der Drehrichtung des Motors erfolgt durch Umklemmen der Kondensatorleitung am Klemmbrett von Klemme *W* nach Klemme *U* (Bild 203 u. 204).

Um den einphasigen Anschluß von Drehstrommotoren schnell und ohne Fehlschaltung zu ermöglichen, liefert die Firma Hydrawerk, Berlin, eine Kupplungsvorrichtung (DRP), deren Anordnung Bild 206 zeigt. Auf gute Erdung des Motors ist zu achten. Es dürfen nur Stecker mit Schutzkontakt verwendet werden.

Anwendungsgebiete für den einphasigen Anschluß kleiner Drehstrommotoren sind z. B. Haushaltungen, Siedlungen, Werkstätten, die Landwirtschaft usw., in denen mit Drehstrommotoren ausgerüstete Arbeitsmaschinen einphasig betrieben werden müssen, weil entweder ein dreiphasiger Anschluß fehlt oder dessen Herstellung zu teuer wird.



## II. Stromwendermotoren

**Stromwendermotoren.** Stromwendermotoren sind Wechsel- oder Drehstrommotoren, deren Läufer wie der Anker eines Gleichstrommotors einen Stromwender mit Bürsten besitzt. Sie werden für Einphasenstrom als Reihenschluß- und für Drehstrom als Reihenschluß- und Nebenschlußmotoren gebaut.

Ihre Drehzahl läßt sich stufenlos und praktisch verlustlos regeln, was weder beim Synchron- noch beim Asynchronmotor möglich ist.

**Der Wechselstrom-Reihenschlußmotor.** Die Drehrichtung eines Gleichstrommotors ist von der Stromrichtung im Anker und in der Magnetwicklung abhängig. Nur wenn eine von beiden geändert wird, ändert sich die Drehrichtung. Wird gleichzeitig mit der Stromrichtung im Anker auch die Stromrichtung in der Magnetwicklung umgekehrt, dann bleibt die Drehrichtung des Ankers dieselbe. Bei einem Reihenschlußmotor (Hauptschlußmotor) sind Anker und Magnetwicklung in Reihe geschaltet. Wird ein solcher Motor an Wechselstrom angeschlossen, dann wird sich bei jedem Stromwechsel mit der Stromrichtung im Anker auch die Stromrichtung in der Magnetwicklung umkehren. Der Anker muß sich infolgedessen in einer bestimmten Drehrichtung drehen. Ein nach diesem Grundsatz gebauter Wechselstrommotor wird Wechselstrom-Reihenschlußmotor genannt (Bild 207). Das durch den Wechselstrom erzeugte magnetische Feld ändert dauernd seine Stärke und Richtung. Ein solches Wechselfeld würde in einem vollen Magnetkörper starke Wirbelströme induzieren. Um diese Wirbelströme möglichst klein

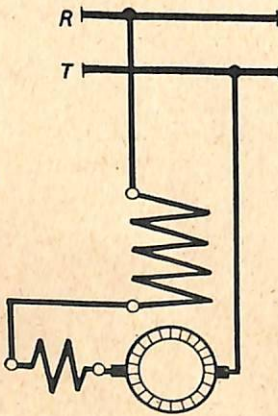


Bild 207. Wechselstrom-Reihenschlußmotor

zu halten, wird der Magnetkörper nicht aus einem vollen Stück, sondern in gleicher Weise wie der Ankerkörper aus einzelnen dünnen Blechen zusammengebaut. Auch wird der Magnetkörper nicht wie bei Gleichstrommotoren mit ausgeprägten Polen, sondern wie bei Wechselstrom-Asynchronmotoren als Hohlzylinder ausgebildet. Der Ständer sieht infolgedessen dem Ständer eines Asynchronmotors ähnlich. Der Läufer gleicht dem Anker eines Gleichstrommotors. Solche Wechselstrommotoren haben den Nachteil, daß die Bürsten stark feuern. Um das Bürstenfeuer zu unterdrücken, wird außer der eigentlichen Erregerwicklung noch eine besondere Kompensationswicklung auf dem Ständer untergebracht. Erregerwicklung, Kompensationswicklung und Ankerwicklung werden in Reihe geschaltet.

Durch einen passenden Umspanner kann die zu hohe Netzspannung auf die entsprechende Motorspannung heruntersetzt werden. Beim Anschluß an ein Niederspannungsnetz kann ein Umspanner in Sparschaltung Verwendung finden. Dieser Umspanner dient außerdem zum Anlassen und zur Regelung der Drehzahl (Bild 208).

Der Wechselstrom-Reihenschlußmotor hat ähnliche Betriebseigenschaften wie der Gleichstrom-Reihenschlußmotor (Hauptschlußmotor). Er zieht beim Anlauf kräftig an. Seine



Drehzahl sinkt, wenn die Belastung steigt und umgekehrt. Sein Leistungsfaktor ist fast 1. Infolge dieser Eigenschaften eignet sich dieser Motor besonders für Bahnzwecke. Hier ist Einphasenstrom deshalb vorteilhafter als Drehstrom, weil nur 2 Zuleitungen erforderlich sind.

Das Bürstenfeuer bei diesem Motor (Stromwendermotor) ist in der Hauptsache eine Folge der hohen Kurzschlußspannung in den einzelnen Ankerspulen. Während beim Gleichstromanker in den durch die Bürsten kurzgeschlossenen Ankerspulen nur eine Spannung durch Selbstinduktion (Stromwendespannung) entsteht, wird beim Stromwendermotor durch das magnetische Wechselfeld des Ständers in den durch die Bürsten kurzgeschlossenen Ankerspulen noch eine weitere Spannung (Kurzschlußspannung) induziert. Die Höhe dieser Kurzschlußspannung ist von der Frequenz, der Stärke des magnetischen Flusses und von der Windungszahl der Ankerspulen abhängig. Mittel zur Herabsetzung dieser Kurzschlußspannung sind geringe Frequenz, schwacher magnetischer Fluß pro Pol und geringe Windungszahl der Ankerspulen.

Schwacher magnetischer Fluß bedingt hohe Polzahl, geringe Windungszahl (möglichst eine Windung) der Ankerspulen bedingt hohe Stegzahl und damit großen Stromwenderdurchmesser. Die transformatorisch induzierte Kurzschlußspannung soll zur Vermeidung starken Bürstenfeuers bei Verwendung harter Kohlen nicht mehr als 3 bis 4 V betragen. Damit sie nicht zu hoch wird, muß bei Stromwendermotoren entweder die Ankerspannung niedrig (nicht über 100 V) oder die Frequenz gering sein. Stromwendermotoren für Wechselstromvollbahnen werden deshalb mit Wechselstrom von nur  $16\frac{2}{3}$  Per/s betrieben. Seit mehreren Jahren sind auch Bahnmotoren für 50 Per/s in Betrieb (Höllentalbahn). Sie haben sich gut bewährt.

**Kleinmotoren** für Haushaltgeräte, Staubsauger, Lüfter usw. werden meist als Einphasen-Reihenschlußmotoren gebaut und können sowohl für Wechselstrom als auch für Gleichstrom verwendet werden.

**Der Repulsionsmotor.** In Bild 209 befindet sich im magnetischen Feld eines Wechselstrommagneten eine kurzgeschlossene Magnetspule S. Diese Spule ist in ihrer Mitte drehbar gelagert. In der gezeichneten Lage fällt die Spulenchse mit der Kraftlinienrichtung zusammen. Infolgedessen wird die Spule von Kraftlinien des magnetischen Feldes durchsetzt. Da dieses seine Stärke und Richtung dauernd ändert (Wechselfeld), wird in der Spule eine EMK induziert. Diese EMK erzeugt in der kurzgeschlossenen Spule einen starken Induktionsstrom, der in jedem Augenblick die entgegengesetzte Richtung hat wie der Strom in der Magnetwicklung. Magnetwicklung und Spule verhalten sich wie die primäre und sekundäre Wicklung

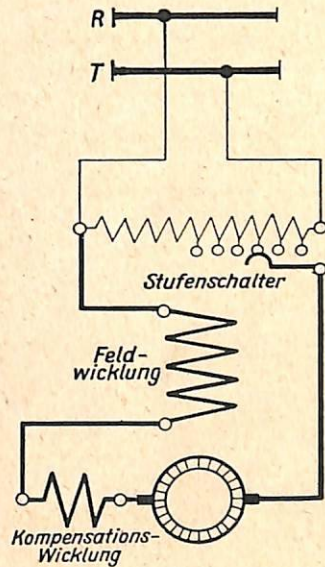


Bild 208. Wechselstrom-Reihenschlußmotor mit Sparumspanner



eines Umspanners. Solange die Spulenachse mit der Kraftlinienrichtung des magnetischen Feldes zusammenfällt, ist eine Drehung der Spule ausgeschlossen. Befindet sich jedoch die Spule in der in Bild 210 dargestellten Lage, d. h. ist die Spulenachse gegenüber der Kraftlinienrichtung nach rechts verdreht, dann entsteht zwischen dem Strom in der Spule und dem magnetischen Feld eine Kraftwirkung. Die Spule sucht sich rechtsherum so weit zu drehen, bis die Spulenachse senkrecht zur Kraftlinienrichtung steht. In dieser Stellung befindet sich die Spulenachse in der neutralen Zone.

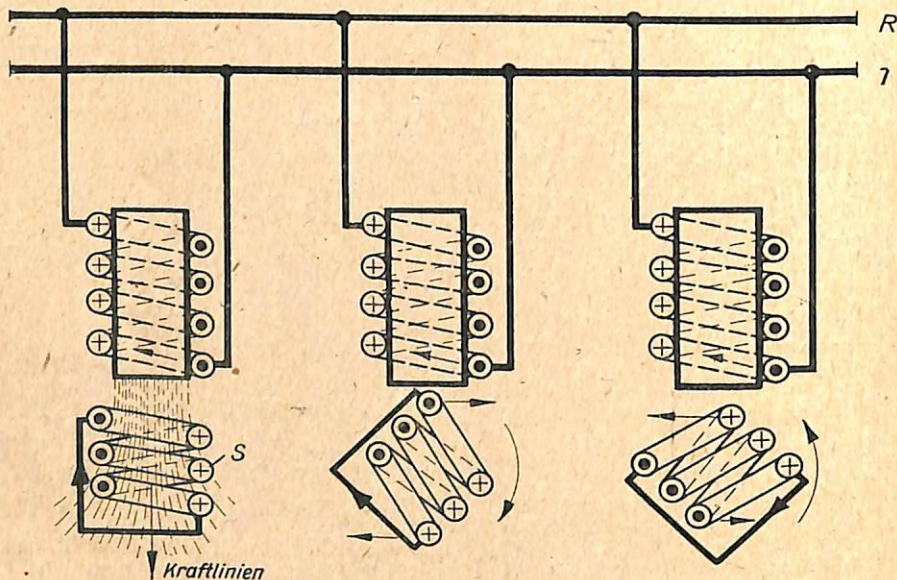


Bild 209—211. Repulsionsmotor

Wäre die Spule aus ihrer senkrechten Stellung statt nach rechts nach links gedreht worden, dann würde sie sich linksherum (Bild 211) bis in die neutrale Zone gedreht haben. Nach diesem Prinzip werden Stromwendermotoren gebaut, die ähnliche Betriebseigenschaften wie die Wechselstrom-Reihenschlußmotoren haben. Solche Motoren nennt man Repulsionsmotoren. Bei diesen Repulsionsmotoren wird nur die Magnetwicklung zur Erzeugung des magnetischen Wechselfeldes an Wechselstrom angeschlossen. Die Bürsten des Stromwenders sind miteinander verbunden, so daß man die Ankerwicklung als eine kurzgeschlossene Spule betrachten kann, in deren Mittelachse die Bürsten stehen.

Bei Stillstand stehen die Bürsten in der neutralen Zone (Bild 212). Soll der Motor angelassen werden und sich vom Stromwender aus gesehen rechtsherum drehen, dann genügt es, die Bürsten linksherum, d. h. entgegengesetzt der gewünschten Drehrichtung, zu verschieben (Bild 213). Für den Linkslauf müssen die Bürsten aus der Neutralen rechtsherum auf dem Stromwender verschoben werden (Bild 214). Der Anlauf ist sanft, d. h. vollkommen stoßfrei. Der



Repulsionsmotor zieht wie der Reihenschlußmotor kräftig an (hohes Anlaufmoment). Seine Drehzahl ist wie bei diesem von der Belastung abhängig. Die Drehzahl kann

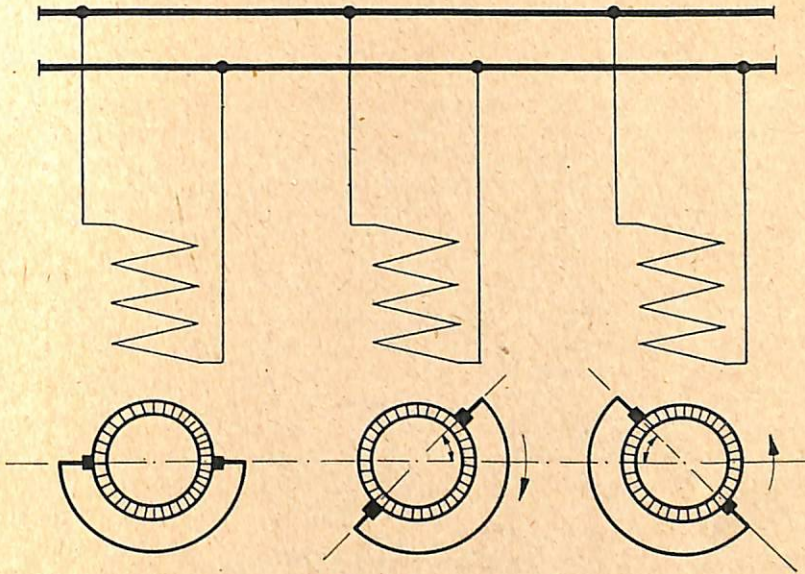


Bild 212—214. Änderung der Drehrichtung durch Bürstenverschiebung

durch Bürstenverschiebung bis 10 v. H. über und bis 50 v. H. und in besonderen Fällen bis 75 v. H. unter die synchrone Drehzahl geregelt werden. Die Verschiebung der Bürsten erfolgt entweder durch einen Hebel oder ein Handrad.

Der Vorteil dieser Motorart besteht sowohl in dem hohen Anlaufmoment als auch darin, daß zum Anlassen, zum Regeln der Drehzahl und zur Umkehrung der Drehrichtung nur die Bürsten zu verschieben sind.

Bei dem von der AEG gebauten Motor ist die Kompensationswicklung über zwei Ankerbürsten mit dem Wechselstromnetz verbunden. Diese Bürsten stehen senkrecht zu den beiden kurzgeschlossenen Bürsten. Durch diese Anordnung

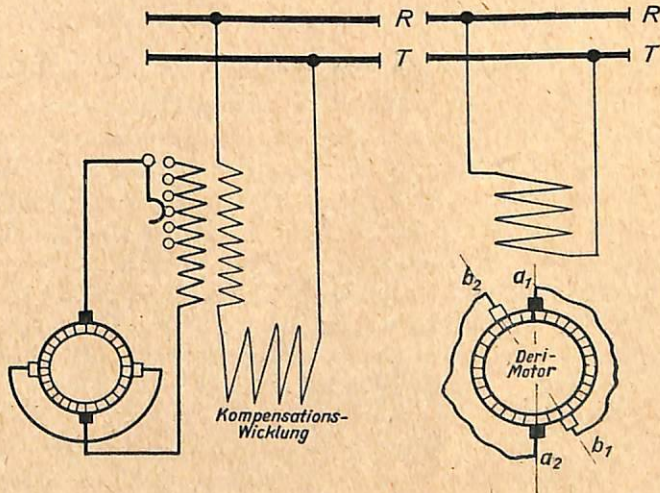


Bild 215. Repulsionsmotor mit Ankererregung und Kompensationswicklung

Bild 216. Repulsionsmotor mit zwei Bürstensätsen (Deri-Motor)



kann die eigentliche Erregerwicklung ganz fortfallen, weil die Erzeugung des notwendigen magnetischen Wechselfeldes durch den Anker selbst erfolgt (Motor mit Ankererregung). Der Motor wird nach seinen Erfindern Winter-Eichberg-Motor genannt. In Bild 215 ist der grundsätzliche Schaltplan eines solchen Motors mit zugehörigem Umspanner dargestellt.

Eine besondere Art von Repulsionsmotoren wird von der Firma Brown, Boveri & Cie. unter dem Namen Deri-Motor geliefert.

Dieser Motor besitzt zwei Bürstensätze. Der eine Bürstensatz ist fest und der andere auf dem Stromwender verschiebbar (Bild 216). Die festen Bürsten  $a_1$  und  $a_2$  sind durch bewegliche Leitungen mit den beweglichen Bürsten  $b_1$  und  $b_2$  verbunden. Stehen die verschiebbaren Bürsten dicht neben den zugehörigen festen Bürsten, dann herrscht zwischen diesen Bürsten keine Spannung. Infolgedessen kann im Anker kein Strom fließen. Der Motor steht. Werden die verschiebbaren Bürsten nach der einen oder anderen Seite verschoben, dann entsteht in den Spulen der Ankerwicklung, die von den zusammengehörigen Bürsten kurzgeschlossen sind, ein Induktionsstrom. Der Motor entwickelt jetzt ein Drehmoment. Dieses Drehmoment wächst mit der Größe der Bürstenverschiebung.

Der Bürstenverschiebungswinkel beträgt bei einem zweipoligen Deri-Motor  $180^\circ$  gegenüber  $90^\circ$  beim zweipoligen Repulsionsmotor. Durch diese weitgehende Bürstenverschiebung wird eine besonders feinstufige Regelung der Drehzahl erreicht.

Im übrigen verhält sich der Deri-Motor ähnlich wie ein Repulsionsmotor.

Repulsionsmotoren lassen sich nur für kleinere Leistungen betriebssicher bauen. Ihre Anwendung ist daher auf wenige Sondergebiete beschränkt (Hebezeuge, Spinnmaschinen).

## 12. Stromwendermotoren für Drehstrom

Die Regelung der Drehzahl läßt sich auch bei Drehstrommotoren fast ohne Verluste bewirken, wenn ein Anker mit Stromwender verwendet wird. Der Ständer ist der gleiche wie bei einem üblichen Drehstrom-Asynchronmotor.

Man unterscheidet bei den Stromwendermotoren für Drehstrom Reihenschlußmotoren und Nebenschlußmotoren.

**Der Drehstrom-Reihenschlußmotor.** Jedes Ende der drei Phasenwicklungen des Ständers wird mit einem besonderen Bürstensatz verbunden. Die Bürsten der drei Phasen sind um  $120^\circ$  elektrisch gegeneinander versetzt. Dadurch wird die Ankerwicklung in Dreieck geschaltet. Beim Anschluß der Ständerwicklung an Drehstrom entsteht sowohl im Ständer als auch im Anker ein magnetisches Drehfeld. Wie das Drehfeld des Ständers dreht sich auch das Drehfeld des Ankers mit der synchronen Drehzahl. Ob der Anker steht oder sich dreht, ist für die Drehgeschwindigkeit des Ankerdrehfeldes ohne Bedeutung. Wird das Ankerdrehfeld gegenüber dem Ständerdrehfeld verschoben, dann wird das Ankerfeld vom Ständerfeld angezogen. Der Anker muß sich infolgedessen in der Drehrichtung des Ständerfeldes drehen. Die Verschiebung des Ankerfeldes gegenüber dem Ständerfeld wird durch Verschieben der Bürsten aus der Grundstellung auf dem Stromwender erreicht. Dieses Verschieben muß entgegengesetzt dem Drehsinn des Ständerfeldes erfolgen. Hieraus folgt, daß zur Umkehrung der Drehrichtung des Ankers die Drehrichtung des Ständerfeldes umgekehrt werden muß. Diese Umkehrung erfolgt wie bei einem gewöhnlichen Asynchronmotor durch Vertauschen zweier Zuleitungen am Klemmbrett.



Ein solcher Reihenschlußmotor hat ein hohes Anlaufmoment. Seine Drehzahl ändert sich mit der Belastung. Sie kann durch Bürstenverschiebung verlustlos über und unter die synchrone Drehzahl geregelt werden. Bild 217 zeigt die Grundsicherung eines Drehstrom-Reihenschlußmotors der Siemens-Schuckert-Werke. Der Umspanner zwischen Ständer und Anker (Läufer) dient zum Umspannen der Ständerspannung auf die niedrige Ankerspannung. Mit dem Handrad *H* erfolgt die Regelung der Drehzahl durch Bürstenverstellung. Die Regelung der Drehzahl kann auch durch Fernsteuerung von einer beliebigen Stelle aus erfolgen. Bemerkenswert ist, daß die Drehzahl dieses Motors bei gleichbleibendem Drehmoment von etwa 110 v. H. bis auf etwa 50 v. H. der synchronen Drehzahl herabgeregelt werden kann.

Dieser Motor ist besonders zum Antrieb solcher Arbeitsmaschinen geeignet, bei denen ein hohes Anlaufmoment, sanftes Anfahren, weitgehende Drehzahlregelung und Nachgiebigkeit der Drehzahl bei steigendem Drehmoment erwünscht ist, wie z. B. bei Pumpen, Lüftern, Verdichtern, Pressen usw.

**Der Drehstrom - Nebenschlußmotor.** Der Drehstrom-Nebenschlußmotor ist ein Stromwendermotor, der sich im Betriebe ähnlich verhält wie ein Gleichstrom-Nebenschlußmotor. Seine Drehzahl bleibt bei allen Belastungen fast dieselbe. Sie läßt sich durch Bürstenverschiebung verändern. Wie bei allen Stromwendermotoren muß auch bei diesem die Ankerspannung zur Vermeidung von Bürstenfeuer gering sein. Das Herabsetzen der Netzspannung auf die gewünschte Ankerspannung kann entweder durch einen besonderen Umspanner oder durch die Motorwicklung selbst erfolgen. Die SSW bauen einen Motor, dessen Anker zwei Wicklungen hat. Die eine dieser Wicklungen ist mit 3 Schleifringen und die andere mit einem Stromwender verbunden. Die Bürsten der Schleifringe werden an die 3 Zuleitungen angeschlossen. Dadurch entsteht in der Schleifringwicklung ein magnetisches Drehfeld. Dieses Drehfeld induziert in der Stromwenderwicklung einen Strom mit niedriger Spannung.

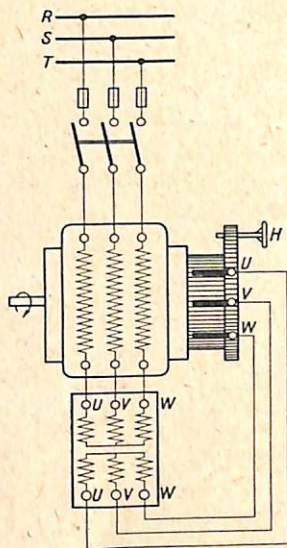


Bild 217. Drehstrom-Reihenschlußmotor (Dreibürstenschaltung)

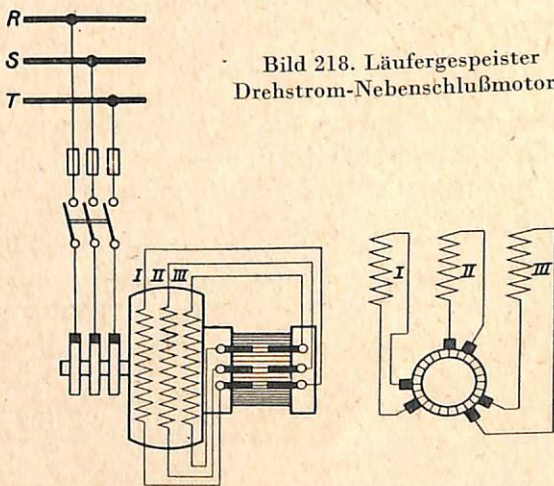


Bild 218. Läufergespeister Drehstrom-Nebenschlußmotor



Der Anfang und das Ende einer jeden Ständerphase ist mit voneinander getrennten Bürsten verbunden. Infolgedessen schleifen auf dem Stromwender 2 Bürstensätze, die gegeneinander verschoben werden können (Bild 218 und 219).

Je nach der Richtung, in welcher man die Bürsten gegeneinander verschiebt, entsteht in der Stromwenderwicklung zwischen den Bürsten der gleichen Ständerphase eine Ankerspannung, die der Spannung dieser Ständerphase entweder gleich- oder entgegengerichtet ist. Der

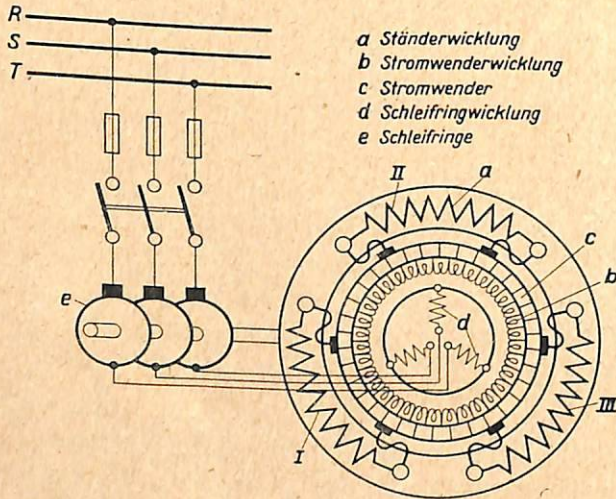


Bild 219. Anordnung der einzelnen Wicklungen beim läufergespeisten Drehstrom-Nebenschlußmotor

Stromwender als Frequenzwandler bewirkt, daß die Frequenz der Ankerspannung immer gleich der Schlupffrequenz in der Ständerwicklung ist. Sind Ankerspannung und Ständerspannung gleichgerichtet, dann steigt die Drehzahl über die synchrone. Sind dagegen Ankerspannung und Ständerspannung entgegengerichtet (Gegenschaltung), dann sinkt die Drehzahl unter die synchrone Drehzahl. Die Höhe der Regelspannung (Ankerspannung) läßt sich durch Bürsten-

verschiebung stetig ändern, wodurch eine stetige verlustlose Drehzahlregelung erreicht wird. Der Regelbereich ist für gewöhnlich 1 : 3, d. h. die Drehzahl läßt sich zwischen der 0,5fachen und 1,5fachen synchronen Drehzahl regeln. Dieser Motor ist besonders zum Antrieb solcher Arbeitsmaschinen geeignet, bei denen eine Regelung der Drehzahl erwünscht ist und bei denen die jeweils eingestellte Drehzahl unabhängig von der Belastung praktisch die gleiche bleibt, wie z. B. bei Papiermaschinen, Wanderrostantriebsmaschinen sowie bei Spinn- und Zwirnmotoren usw.

### 13. Drehmoment und mechanische Leistung bei Wechsel- und Drehstrommotoren

Für die Berechnung des Drehmoments und der mechanischen Leistung von Wechsel- und Drehstrommotoren gelten dieselben Formeln wie für Gleichstrom (S. 44—45). Wie dort ergibt sich das Drehmoment aus

$$M = P \cdot r.$$

Die mechanische Leistung in PS errechnet sich aus

$$N_{PS} = \frac{M \cdot n}{716} \quad (I)$$



Hieraus folgt das Drehmoment zu

$$M = 716 \cdot \frac{N_{PS}}{n}. \quad (II)$$

Die mechanische Leistung in kW ist

$$N_{kW} = \frac{M \cdot n}{975}, \quad (III)$$

und hieraus ergibt sich wieder das Drehmoment zu

$$M = 975 \cdot \frac{N_{kW}}{n}. \quad (IV)$$

Setzt man in die letzte Formel (Formel IV) statt der Zahl 975 die um 2,5 v. H. größere Zahl 1000 und statt der Nenndrehzahl  $n$  die etwas höhere synchrone Drehzahl  $n_s$ , dann berechnet sich das Drehmoment angenähert aus der einfachen Formel

$$M = \frac{1000 \cdot N_{kW}}{n_s}, \quad (V)$$

$$\text{Nenndrehmoment in kgm} = \frac{\text{Nennleistung in Watt}}{\text{Synchrone Drehzahl}}.$$

Für die Berechnung der Zugkraft  $P$  (Umfangskraft) kommen folgende Formeln in Frage:

1. wenn die mechanische Leistung in PS gegeben ist,

$$P = \frac{716 \cdot N_{PS}}{n \cdot r} \quad (VI)$$

2. wenn die mechanische Leistung in kW gegeben ist,

$$P = \frac{975 \cdot N_{kW}}{n \cdot r}, \quad (VII)$$

oder angenähert

$$P = \frac{1000 \cdot N_{kW}}{n_s \cdot r}. \quad (VIII)$$

Aufg. 53: Ein Drehstrommotor entwickelt beim Anlauf am Umfang der Riemenscheibe eine Zugkraft von 35 kg. Die Riemenscheibe hat einen Durchmesser von 240 mm. Der Motor hat bei einer Nenndrehzahl von 1425 U/min ein Nenndrehmoment von 12 kgm. a) Wie groß ist das Anlaufmoment des Motors? b) Wie groß ist die Nennleistung des Motors in PS? c) Wieviel kW mechanische Leistung entwickelt der Motor?

Aufg. 54: Ein Drehstrommotor mit Schleifringläufer für 380 V Spannung und 1420 U/min leistet 7,5 PS. Die Riemenscheibe hat einen Durchmesser von 140 mm. a) Wie groß ist das Drehmoment des Motors? b) Wie groß ist die Zugkraft  $P$  am Umfang der Riemenscheibe?

Aufg. 55: Ein Drehstrommotor für 7,5 PS macht in der Minute 940 Umdrehungen. Die Riemenscheibe hat einen Durchmesser von 140 mm. a) Wie groß ist das Nenndrehmoment des Motors? b) Wie groß ist die Zugkraft  $P$  am Umfang der Riemenscheibe?

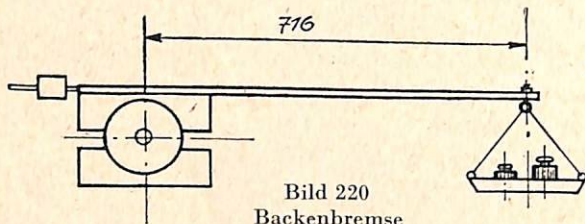
Aufg. 56: Ein Drehstrommotor für 4 kW mit Kurzschlußläufer macht 1430 U/min. Die Riemenscheibe hat einen Durchmesser von 120 mm. a) Wie groß ist nach Formel (VII) die Zugkraft  $P$  am Umfang der Riemenscheibe? b) Wie groß wird die Zugkraft  $P$  nach Formel (VIII) bei einer synchronen Drehzahl von  $n_s = 1500$  U/min?



Aufg. 57: Ein Drehstrommotor für 7,5 kW mechanische Leistung hat eine synchrone Drehzahl von  $n_s = 1500$  U/min. Wie groß ist sein Nenndrehmoment nach Formel (V)?

Aufg. 58: Ein sechspoliger Drehstrommotor leistet 5,5 kW. a) Wie groß ist das Nenndrehmoment dieses Motors? b) Wie groß ist die Zugkraft  $P$  bei einem Riemenscheibendurchmesser von 180 mm?

**Messung des Drehmoments und der mechanischen Leistung bei Wechsel- und Drehstrommotoren.** Die Messung des Drehmoments und der mechanischen Leistung kann



in gleicher Weise wie bei Gleichstrommotoren durch eine Band-, eine Backen-, eine Wirbelstrombremse oder eine Bremsdynamo erfolgen. Bei der Bandbremse bedeutet  $P$  die an der Federwaage abgelesene Zugkraft in kg, die der Motor am Umfange der Riemenscheibe entwickelt,

und  $R$  den Halbmesser (Radius) der Riemenscheibe in m. Bei der Backenbremse bedeutet  $P$  das Bremsgewicht in kg auf der Waagschale und  $R$  die Länge des Hebelarmes in m.

$$M = P \cdot R.$$

$$N_{PS} = \frac{P \cdot R \cdot n}{716} \quad \text{oder} \quad N_{PS} = \frac{M \cdot n}{716}. \quad (I)$$

$$N_{kW} = \frac{P \cdot R \cdot n}{975} \quad \text{oder} \quad N_{kW} = \frac{M \cdot n}{975}. \quad (III)$$

Wird bei der Backenbremse ein 716 mm langer Hebelarm (Bild 220) verwendet, dann ergibt sich die mechanische Leistung in PS aus

$$N_{PS} = \frac{P \cdot 716 \cdot n}{1000 \cdot 716} \quad \text{oder} \quad N_{PS} = \frac{P \cdot n}{1000}. \quad (Ia)$$

Bei einer Länge des Hebelarmes von 975 mm berechnet sich die mechanische Leistung in kW aus

$$N_{kW} = \frac{P \cdot n}{1000}. \quad (IIIa)$$

Aufg. 59: Ein Einphasenmotor wurde mittels Bandbremse abgebremst. Die ermittelte Zugkraft  $P$  am Umfang einer Bremsscheibe von 300 mm Durchmesser betrug 15 kg bei einer Drehzahl von 1410 U/min.

Wie groß ist a) das Drehmoment dieses Motors, b) die mechanische Leistung in PS und in kW?

Aufg. 60: Ein Drehstrommotor mit Schleifringläufer wurde durch eine Backenbremse abgebremst. Hebelgewicht und Waagschale waren durch ein Gegengewicht ausgeglichen. Der Motor machte 950 U/min. Die Länge des Hebelarmes betrug 975 mm. Die Waagschale war mit 22 kg belastet. Wieviel kW mechanische Leistung entwickelte der Motor nach Formel (IIIa)?



Aufg. 61: Zum Abbremsen eines Drehstrommotors diene eine Backenbremse, deren Hebelarm 716 mm lang war. Bei einer Nennzahl von 1450 U/min betrug das Gewicht auf der Waagschale 5100 g. Wie groß ist die Nennleistung des Motors nach Formel (Ia)?

Aufg. 62: Zum Abbremsen eines Drehstrommotors wurde eine Backenbremse mit einer Hebellänge von 0,975 m verwendet. Bei einer Drehzahl von 950 in der Minute betrug das Gewicht auf der Waagschale bei ausgeglichenem Hebel 10,525 kg. Wie groß ist die mechanische Leistung des Motors in kW?

**Bestimmung des Wirkungsgrades bei Wechsel- und Drehstrommotoren.** Nach den Erklärungen über die Bestimmung des Wirkungsgrades bei Gleichstrommotoren gilt für die Berechnung des Wirkungsgrades die Formel

$$\text{Wirkungsgrad} = \frac{\text{abgegebene Leistung}}{\text{aufgenommene Leistung}}$$

oder  $\eta = \frac{N_2}{N_1}$ , wenn  $N_1$  die aufgenommene und  $N_2$  die abgegebene Leistung in Watt oder Kilowatt bedeutet.

#### a) Einphasenmotor

Beim Einphasenmotor berechnet sich die aufgenommene elektrische Leistung in Watt aus  $N = U \cdot I \cdot \cos \varphi$ . Ist die abgegebene mechanische Leistung in PS bekannt, dann erhält man die abgegebene mechanische Leistung in Watt aus  $N_{\text{PS}} \cdot 736$ . Infolgedessen gilt für den Einphasenmotor die Formel

$$\eta = \frac{N_{\text{PS}} \cdot 736}{U \cdot I \cdot \cos \varphi}, \quad (\text{IX a})$$

wenn die vom Motor abgegebene mechanische Leistung in PS, die Klemmenspannung  $U$ , die Stromstärke  $I$  und der Leistungsfaktor  $\cos \varphi$  bekannt sind.

Wenn die mechanische Leistung in kW gegeben ist, gilt die Formel

$$\eta = \frac{N_{\text{kW}} \cdot 1000}{U \cdot I \cdot \cos \varphi}. \quad (\text{X a})$$

Der Leistungsfaktor  $\cos \varphi$  ist das Verhältnis der Wirkleistung (in kW oder W) zur Scheinleistung (in kVA oder VA).

Zur Messung der Wirkleistung dient der Leistungsmesser (Wattmeter). Die Scheinleistung ergibt sich bei Einphasenmotoren aus dem Produkt Volt  $\times$  Ampere und der Leistungsfaktor aus

$$\text{Leistungsfaktor} = \frac{\text{Watt}}{\text{Volt-Ampere}} \quad \text{oder} \quad \cos \varphi = \frac{N}{U \cdot I}$$

Infolgedessen sind zur Bestimmung des Wirkungsgrades bei Einphasenmotoren ein Leistungsmesser, ein Spannungs- und ein Strommesser erforderlich.

Die vom Motor abgegebene mechanische Leistung kann durch eine Band-, Backen- oder Wirbelstrombremse oder eine Bremsdynamo unter Benutzung der Formeln

$$N_{\text{PS}} = \frac{M \cdot n}{716} \quad \text{oder} \quad N_{\text{kW}} = \frac{M \cdot n}{975}$$

ermittelt werden.



b) Drehstrommotor

Die vom Drehstrommotor aufgenommene elektrische Leistung in Watt wird nach der Formel  $N = U \cdot I \cdot 1,73 \cdot \cos \varphi$  berechnet. Die vom Motor abgegebene mechanische Leistung in Watt ergibt sich aus  $N_{PS} \cdot 736$ , wenn die mechanische Leistung in PS bekannt und aus  $N_{kW} \cdot 1000$ , wenn die mechanische Leistung in kW gegeben ist. Für die Berechnung des Wirkungsgrades gelten infolgedessen folgende Formeln:

$$\eta = \frac{N_{PS} \cdot 736}{U \cdot I \cdot 1,73 \cdot \cos \varphi} \quad (IX\ b)$$

oder

$$\eta = \frac{N_{kW} \cdot 1000}{U \cdot I \cdot 1,73 \cdot \cos \varphi} \quad (X\ b)$$

Der Leistungsfaktor  $\cos \varphi$  ergibt sich aus

$$\text{Leistungsfaktor} = \frac{\text{Watt}}{\text{Volt-Ampere}}$$

oder

$$\cos \varphi = \frac{N}{U \cdot I \cdot 1,73}$$

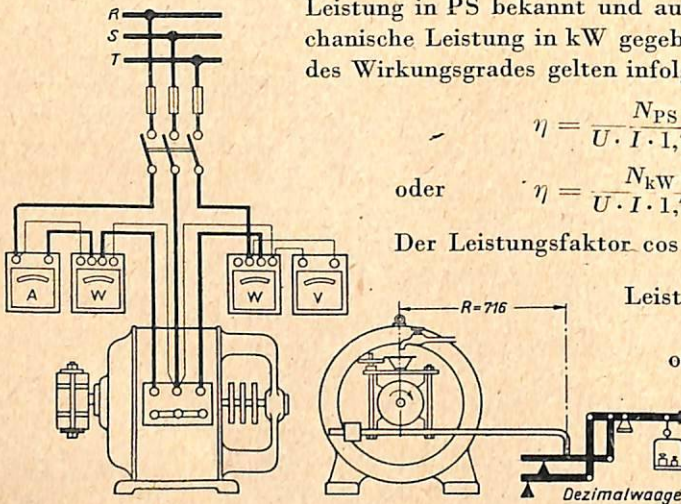


Bild 221. Abbremsen eines Drehstrom-Schleifringläufers mittels Backenbremse und Dezimalwaage

Die Messung der vom Motor aufgenommenen Wirkleistung in Watt erfolgt in der Regel durch zwei Leistungsmesser (Bild 221 u. 222). Die Summe der Angaben beider Leistungsmesser ergibt die aufgenommene Leistung. Soll die Messung mit nur einem Leistungsmesser ausgeführt werden, dann ist durch einen besonderen Umschalter dieser Leistungsmesser rasch nacheinander aus der einen in die andere der drei Zuleitungen umzuschalten (Bild 223).

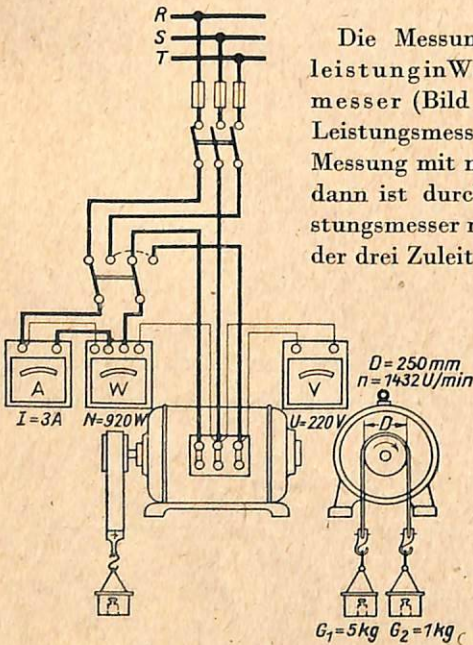


Bild 223. Abbremsen eines Drehstrom-Kurzschlußläufers mittels Bandbremse (Leistungsmesser mit Umschalter)

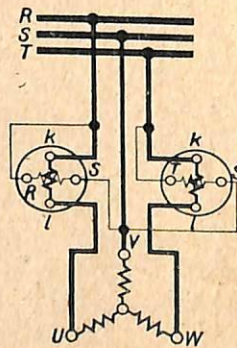


Bild 222. Zwei-Leistungsmesser-schaltung

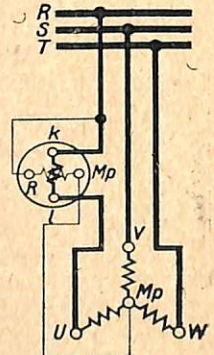


Bild 224. Anschluß des Leistungsmessers bei zugänglichem Sternpunkt



Der Anschluß eines Leistungsmessers ohne Umschalter ist in Bild 224 angegeben. Um die vom Motor aufgenommene Leistung zu finden, hat man die Angabe des Leistungsmessers mit 3 zu multiplizieren.

Es werden auch Leistungsmesser verwendet, bei denen zwei Meßwerke in einem Gehäuse untergebracht sind. Beide Meßwerke wirken dann auf einen gemeinsamen Zeiger, der die vom Motor aufgenommene Leistung direkt anzeigt.

Die vom Motor aufgenommene Scheinleistung wird mit Hilfe eines Spannungsmessers und eines Strommessers nach der Formel  $N_s = U \cdot I \cdot 1,73$  berechnet.  $N_s$  bedeutet die Scheinleistung in Volt-Ampere (VA).

Zur Feststellung der vom Motor abgegebenen mechanischen Leistung in PS oder kW werden dieselben Einrichtungen wie bei Einphasenmotoren benutzt. Die Formeln

$$N_{PS} = \frac{M \cdot n}{716} \quad \text{oder} \quad N_{kW} = \frac{M \cdot n}{975}$$

gelten auch hier.

Aufg. 63: Ein Einphasenmotor mit Kurzschlußläufer wird durch eine Bandbremse abgebremst. Die Bremsscheibe hat einen Durchmesser von 300 mm. Am Zugmesser und den Meßgeräten wurden im gleichen Augenblick folgende Werte abgelesen:

Gesamte Zugkraft am Zugmesser 13,5 kg; Gewicht des freien Bandes mit Waagschale einschließlich des Gewichtes auf der Waagschale 3,5 kg; Leistungsmesser 2710 W; Spannungsmesser 220 V; Strommesser 14,5 A; Drehzahl 1440 U/min.

Gesucht: a) Zugkraft  $P$  an der Bremsscheibe, b) Drehmoment  $M$ , c) mechanische Leistung in PS und in kW, d) Leistungsfaktor  $\cos \varphi$ , e) Wirkungsgrad  $\eta$ .

Aufg. 64: Ein Drehstrommotor mit Schleifringläufer wurde mit einer Bandbremse abgebremst (Bild 225). Bei der Ablesung der Meßgeräte wurden folgende Werte festgestellt:

Spannung 380 V; Stromstärke 8 A; aufgenommene Leistung 4350 W; Umfangskraft 11,75 kg; Bremsscheibendurchmesser 400 mm; Drehzahl im Augenblick der Ablesung 1450 U/min.

a) Wie groß ist das Drehmoment des Motors? b) Wie groß ist die mechanische Leistung des Motors in PS und in kW? c) Wieviel VA Scheinleistung nimmt der Motor auf? d) Wie groß ist der Leistungsfaktor  $\cos \varphi$ ? e) Wie groß ist der Wirkungsgrad  $\eta$  des Motors?

Aufg. 65: Ein Drehstrommotor mit Schleifringläufer wurde durch eine Backenbremse (Hebelbremse) unter Benutzung einer Dezimalwaage abgebremst (Bild 221). Die Hebellänge

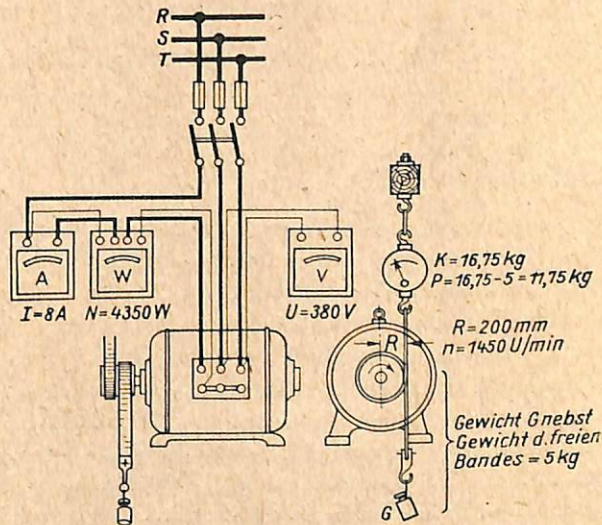


Bild 225. Abbremsen eines Drehstrom-Kurzschlußläufers mittels Bandbremse und einem Leistungsmesser bei zügänglichem Sternpunkt



der Backenbremse betrug 716 mm. Beim gleichzeitigen Ablesen aller Meßgeräte wurde das Gewicht auf der Waagschale der Dezimalwaage zu 1,06 kg, die Stromstärke zu 15 A, die Spannung zu 380 V, die Summe der Angaben beider Leistungsmesser zu 8550 W und die Drehzahl des Läufers zu 945 U/min festgestellt.

Wie groß ist a) die Kraft  $P$ , b) die mechanische Leistung des Motors in PS, c) der Leistungsfaktor  $\cos \varphi$ , d) der Wirkungsgrad  $\eta$  des Motors?

**Aufg. 66:** Ein Drehstrommotor mit Kurzschlußläufer wurde mittels Bremsband abgebremst (Bild 223). Die beiden Gewichtsschalen waren gleich schwer. Während der Bremsung wurden beide Schalen mit Gewichten so belastet, daß sie im Gleichgewicht waren. Das Gewicht auf der linken Schale betrug  $G_1 = 5$  kg, das auf der rechten Schale  $G_2 = 1$  kg. Die Bremsscheibe hatte einen Durchmesser von  $D = 250$  mm. Der Motor machte 1432 U/min. Am Spannungsmesser wurden  $U = 220$  V und am Strommesser  $I = 3$  A abgelesen. Die Messung der vom Motor aufgenommenen elektrischen Leistung erfolgte durch einen Leistungsmesser unter Benutzung eines besonderen Umschalters. Die Summe der beiden Leistungsmessergaben betrug  $N = 920$  W.

Berechne: a) die Umfangskraft an der Bremsscheibe, b) das Drehmoment, c) die mechanische Leistung in PS, d) den Leistungsfaktor, e) den Wirkungsgrad.

#### 14. Hilfseinrichtungen und Geräte für den Motorstromkreis bei Wechsel- und Drehstrommotoren

Als Hilfseinrichtungen und Geräte für den Motorstromkreis kommen wie bei Gleichstrommotoren Schmelzsicherungen oder Überstromschalter, Motorschutzschalter, Schalter mit Spannungsrückgangsauslösung (früher Nullspannungsschalter), Anlaßgeräte, Strommesser und in besonderen Fällen auch Spannungsmesser, Leistungsmesser und Zähler in Frage.

**Schmelzsicherungen.** Insbesondere bei Motoren mit Kurzschlußläufer müssen die Schmelzsicherungen, wenn es sich nicht um träge Sicherungen handelt, mit Rücksicht auf die hohe Anlaufstromstärke für eine höhere Stromstärke gewählt werden, als der Nennstromstärke des Motors entspricht. Ein Motor genügt aber schon in bezug auf Überlastung, wenn er im betriebswarmen Zustande 2 Minuten lang den 1,5fachen Nennstrom aushält, ohne irgendwelchen Schaden zu nehmen. Dagegen müssen Schmelzsicherungen für 6 bis 10 A den 1,5fachen und solche für 15 bis 25 A den 1,4fachen Nennstrom 1 Stunde lang aushalten, ohne durchzuschmelzen. Eine gewöhnliche Schmelzsicherung bis 25 A wird infolgedessen gegen Überlastungen, die unter 40 v. H. liegen, keinen Motorschutz bilden. Schon bei einer Überlastung von 20 v. H., wenn sie länger als 2 Stunden besteht, erwärmt sich die Wicklung des Motors so stark, daß die Isolation verbrennt.

**Überstromschalter.** In älteren Anlagen findet man zum Schutz der Motoren gegen Überlastung noch Überstromschalter mit nur elektromagnetischen Auslösern, die sich für eine bestimmte Auslösestromstärke einstellen lassen. Wird bei Überlastung des Motors die eingestellte Auslösestromstärke des Überstromschalters überschritten, dann treten die Auslöser in Tätigkeit und schalten den Motor allpolig aus.

Um zu verhindern, daß bei Motoren mit Kurzschlußläufer der Schalter beim Anlauf des Motors infolge der hohen Anlaufstromstärke ausgelöst wird, wird er mit



einer Auslöseerschwerung versehen. Durch Drücken auf einen am Schalter befindlichen besonderen Druckknopf kann die Auslösestromstärke des Schalters bis zum 8fachen der Nennstromstärke gesteigert werden.

Solche Überstromschalter schützen den Motor zwar gegen gefährliche Überlastungen, lassen aber kurzzeitige, unschädliche Überlastungsstöße nicht zu. Sobald die am Schalter eingestellte Stromstärke auch nur für ganz kurze Zeit überschritten wird, treten die Schalter in Tätigkeit und schalten den Motor aus. Dadurch können unangenehme Betriebsstörungen entstehen. Auch läßt sich ein nur durch elektromagnetische Auslöser geschützter Motor nicht voll ausnutzen. An Stelle solcher Schalter werden heute Motorschutzschalter verwendet.

Der Schutz von Motoren durch einpolige Kleinselbstschalter (Kleinautomaten) ist nicht so empfehlenswert wie Motorschutzschalter, weil sie keine sichere Abschaltung aller Pole gewährleisten.

### Motorschutzschalter

**Anforderungen und Bauarten.** Von einem guten Motorschutzschalter wird verlangt, daß er folgende Bedingungen erfüllt:

1. der Motor darf auch beim Anlauf mit Vollast nicht abgeschaltet werden.
2. bei Überlast von 20 v. H. muß der Motor innerhalb 2 Stunden und bei Überlast von 50 v. H. innerhalb 2 Minuten bestimmt ausgeschaltet werden.
3. bei Kurzschluß muß der Motor unverzögert, d. h. sofort, abgeschaltet werden.

Diese Bedingungen werden von den Überstromschaltern mit thermischer Verzögerung (Verzögerung durch den Einfluß der Wärme) und Freiauslösung erfüllt. Man unterscheidet:

1. Motorschutzschalter mit thermischer Verzögerung und Freiauslösung mit und ohne Spannungsrückgangsauslösung.

Dieser Schalter bietet Schutz gegen Kurzschlüsse. Er schützt den Motor gegen Einphasenanlauf und gegen schädliche Überlastungen. Außerdem gestattet er weitgehende Ausnutzung der Überlastbarkeit des Motors. Wird der Schalter mit Spannungsrückgangsauslösung versehen, dann schützt er den Motor auch gegen unbeabsichtigten Wiederanlauf.

2. Motorschutzschalter mit thermischer Verzögerung, Freiauslösung, nicht verzögerter elektromagnetischer Auslösung mit und ohne Spannungsrückgangsauslösung.

Dieser Motorschutzschalter hat die gleichen Eigenschaften wie der Schalter unter 1. Durch die zusätzliche nicht verzögerte elektromagnetische Auslösung werden Bedienungsfehler (Anlassen von Schleifringmotoren bei kurzgeschlossenem Läufer) verhindert. Der unerwünschte Anlauf von Schleifringmotoren wird durch die nicht verzögerte elektromagnetische Auslösung auch dann verhindert, wenn keine Spannungsrückgangsauslösung vorhanden ist.

Ein solcher Motorschutzschalter, der noch mit einer Fehlerstromspule zum Schutz gegen zu hohe Berührungsspannung ausgerüstet ist, bietet den besten Schutz gegen alle Fehler und Störungen, die im Betrieb vorkommen können. Er ist der vollkommenste Motorschutz, den es heute gibt.



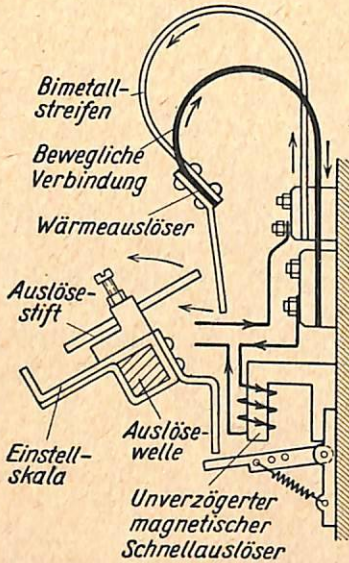


Bild 226. Überstromschalter mit thermischer Verzögerung und elektromagnetischer Schnellauslösung

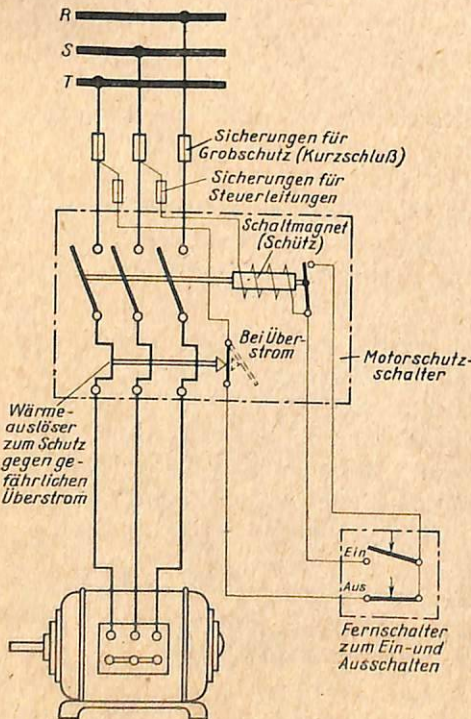


Bild 227. Drehstrommotor mit Motorschutzschalter

**Thermische Verzögerung.** Die thermische Verzögerung wird durch einen oder mehrere Wärmeauslöser bewirkt. Ein solcher Wärmeauslöser besteht entweder aus einem Bimetallstreifen oder aus einem Hitzdraht.

Unter einem Bimetallstreifen versteht man zwei miteinander verbundene Streifen aus Metall, von denen sich bei Erwärmung der eine Streifen mehr ausdehnt als der andere. Ein solcher Streifen biegt sich bei Erwärmung nach der Seite des Metalls mit geringerer Ausdehnung. Der Wärmeauslöser wird so in den Schalter eingebaut, daß er sich bei Erwärmung durch Überstrom ausbiegt, eine Schalterklinke trifft und dadurch den Schalter auslöst (Bild 226).

Dem gleichen Zweck dient der Hitzdraht.

Die Nennstromstärken des thermischen Auslösers sollen der Nennstromstärke des Motors genau angepaßt sein.

**Elektromagnetische Auslösung.** Diese besteht aus einem oder mehreren Elektromagneten, deren Anker durch die hohe Stromstärke bei Kurzschluß oder beim Einschalten von Schleifringläufern mit kurzgeschlossenem (eingeschaltetem) Anlasser unverzögert, d. h. direkt angezogen wird, eine Klinke trifft und dadurch den Schalter auslöst (Bild 226).

**Freiauslösung.** Durch die Freiauslösung wird die Einschaltvorrichtung (Schaltergriff usw.) mit Hilfe des Auslösers vor dem selbsttätigen Ausschalten entkuppelt. Die Freiauslösung ist sehr wichtig, weil sie verhindert, daß ein Motor durch Festhalten oder Festbinden des Schaltergriffes längere Zeit gefährlich hoch überlastet werden kann.

**Motorschutzschalter ohne Klinkwerk.** Den grundsätzlichen Schaltplan eines Motorschutzschalters ohne Klinkwerk (Schütz mit Motorschutz) zeigt Bild 227. Dieser Schalter wird nicht von Hand, sondern elektromagnetisch eingeschaltet. In jedem Pol ist ein Hitzdrahtauslöser eingebaut,



der eine verzögerte Ausschaltung bei Überstrom bewirkt. Die elektromagnetischen Schnellauslöser fehlen. Der Schutz des Motors gegen Kurzschluß erfolgt durch Schmelzsicherungen. Hierfür eignen sich am besten träge Sicherungen. Diese Schalter lassen sich ohne weiteres für Ferneinschaltung (Fernschalter) verwenden.

Weil bei diesem Schalter Hebel und Klinkwerk fehlen, ist eine Freiauslösung entbehrlich. Wenn der Stromkreis der Schaltmagnetspule (Schütz) an irgendeiner Stelle unterbrochen wird, ist die Einschaltung nicht möglich.

Das Ein- und Ausschalten dieses Motorschutzschalters erfolgt mittels Druckknöpfen.

**Sicherungen vor Motorschutzschaltern.** Wenn der in der Zuleitung bis zum Motorschutzschalter auftretende Spannungsabfall bei Kurzschluß den Strom nicht auf 500 A begrenzt, darf der Nennstrom der nächst vorgeschalteten Sicherung nicht größer als 100 A sein.

Für die übrigen Hilfseinrichtungen und die Geräte gilt sinngemäß das auf Seite 73 und 74 bereits für Gleichstrommotoren Gesagte.

### 15. Wirkungsgrad und Leistungsfaktor offener Drehstrommotoren

Für den Wirkungsgrad und den Leistungsfaktor offener Drehstrommotoren üblicher Ausführung gelten die Werte in den nachstehenden Zahlentafeln A und B.

#### A. Kurzschlußläufer (220, 380 und 500 V)

Nennleistung		Wirkungsgrad						Leistungsfaktor						
kW	PS etwa	für Drehzahl						für Drehzahl						
		3000	1500	1000	750	600	500	3000	1500	1000	750	600	500	
<b>0,125</b>	0,17	66,5	69,5	66,5				0,78	0,70	0,66				
<b>0,2</b>	0,27	70	72,5	69,5	64,5			0,80	0,73	0,69	0,60			
<b>0,33</b>	0,45	73,5	74,5	72,5	68,5			0,82	0,76	0,71	0,64			
<b>0,5</b>	0,7	76	76,5	75	71,5			0,84	0,79	0,73	0,67			
<b>0,8</b>	1,1	78,5	79,5	77,5	75			0,86	0,80	0,75	0,70			
<b>1,1</b>	1,5	80	81,5	79,5	77			0,87	0,82	0,77	0,72			
<b>1,5</b>	2	81,5	82,5	81	78,5			0,88	0,83	0,78	0,74			
<b>2,2</b>	3	83	83,5	82,5	80,5			0,89	0,85	0,80	0,76			
<b>3</b>	4	84	84,5	83,5	81,5			0,89	0,86	0,81	0,78			
<b>4</b>	5,5	84,5	85,5	84,5	82,5			0,89	0,87	0,82	0,80			
<b>5,5</b>	7,5	85,5	86,5	85,5	83,5			0,89	0,87	0,84	0,82			
<b>7,5</b>	10	86	87	86	84	84		0,89	0,87	0,85	0,83	0,81		
<b>11</b>	15	86,5	87,5	86,5	85	85	84	0,89	0,87	0,85	0,84	0,82	0,79	
<b>15</b>	20	86,5	87,5	86,5	86	85,5	85	0,89	0,87	0,85	0,84	0,82	0,79	
<b>22</b>	30	87,5	88	87,5	87	86,5	86	0,90	0,88	0,86	0,85	0,82	0,79	
<b>30</b>	40	88,5	89	88,5	88	87,5	87	0,90	0,89	0,87	0,86	0,83	0,80	
<b>40</b>	55	89	89,5	89	89	88,5	88	0,90	0,90	0,88	0,87	0,84	0,81	
<b>50</b>	68	89,5	90	90	89,5	89	88,5	0,91	0,90	0,88	0,87	0,85	0,82	
<b>64</b>	87	90	90,5	90,5	90	89,5	89	0,91	0,90	0,89	0,88	0,86	0,83	
<b>80</b>	110	90	90,5	90,5	90,5	90	90	0,91	0,90	0,89	0,88	0,86	0,85	
<b>100</b>	136	90,5	91	91	91	90,5	90,5	0,91	0,90	0,89	0,88	0,86	0,85	



## Berechnung der Nennstromstärke für Drehstrommotoren

1. Kurzschlußläufer. Ein offener Drehstrommotor mit Kurzschlußläufer für 220 V Nennspannung hat eine Nennleistung von 4 PS und eine Leerlaufdrehzahl von 1500 U/min.

Wie hoch darf bei diesem Motor die Nennstromstärke sein ?

## B. Schleifringläufer (220, 380 und 500 V)

Nennleistung		Wirkungsgrad						Leistungsfaktor					
		kW		PS		für Drehzahl							
	etwa	3000	1500	1000	750	600	500	3000	1500	1000	750	600	500
1,1	1,5			75,5	73,5					0,71	0,66		
1,5	2		79,5	77,5	75,5				0,80	0,74	0,69		
2,2	3	80,5	80,5	79,5	77,5			0,86	0,82	0,76	0,72		
3	4	81,5	82	81	79			0,86	0,83	0,78	0,75		
4	5,5	82	83,5	82	80			0,86	0,84	0,80	0,77		
5,5	7,5	82	84,5	83	81			0,87	0,84	0,82	0,79		
7,5	10	83	85	84	83,5	83,5		0,87	0,85	0,83	0,81	0,79	
11	15	84	85,5	86	84,5	84,5	83,5	0,88	0,86	0,84	0,82	0,80	0,77
15	20	85	87,5	86,5	86	85,5	85	0,89	0,87	0,85	0,84	0,81	0,78
22	30	87,5	88	87,5	87	86,5	86	0,90	0,88	0,86	0,85	0,82	0,79
30	40	88,5	89	88,5	88	87,5	87	0,90	0,89	0,87	0,86	0,83	0,81
40	55	89	89,5	89	89	88,5	88	0,90	0,90	0,88	0,87	0,84	0,82
50	68	89,5	90	90	89,5	89	88,5	0,91	0,90	0,88	0,87	0,85	0,83
64	87	90	90,5	90,5	90	89,5	89	0,91	0,90	0,89	0,88	0,86	0,84
80	110	90	90,5	90,5	90,5	90	90	0,91	0,90	0,89	0,88	0,86	0,85
100	136	90,5	91	91	91	90,5	90,5	0,91	0,90	0,89	0,88	0,86	0,85

Für Stromverdrängungsmotoren gelten dieselben Werte wie für Schleifringläufer.

Lösung: Nach Zahlentafel A (Kurzschlußläufer) muß bei einer Nennleistung von 4 PS und einer Drehzahl von 1500 U/min der Wirkungsgrad mindestens 84,5 und der Leistungsfaktor mindestens 0,86 sein.

$$\text{Wirkungsgrad } \eta = 84,5 \text{ v. H. oder } \frac{84,5}{100} \text{ oder } 0,845.$$

Bei  $N = 4 \text{ PS}$ ,  $U = 220 \text{ V}$ ,  $\eta = 0,845$  und  $\cos \varphi = 0,86$  wird

$$I = \frac{N \cdot 736}{U \cdot \cos \varphi \cdot 1,73 \cdot \eta} = \frac{4 \cdot 736}{220 \cdot 0,86 \cdot 1,73 \cdot 0,845} = 10,6 \text{ A.}$$

2. Schleifringläufer. Ein offener Drehstrommotor mit Schleifringläufer für 380 V Nennspannung hat eine Nennleistung von 7,5 kW und eine Leerlaufdrehzahl von 1000 U/min.

Wie hoch darf bei diesem Motor die Nennstromstärke sein ?

Lösung: Nach Zahlentafel B (Schleifringläufer) muß bei einer Nennleistung von 7,5 kW und einer Drehzahl von 1000 U/min der Wirkungsgrad mindestens 84 und der Leistungsfaktor mindestens 0,83 sein.



Wirkungsgrad  $\eta = 84$  v. H. oder 0,84.

Bei  $N = 7,5$  kW,  $U = 380$  V,  $\eta = 0,84$  und  $\cos \varphi = 0,83$  wird

$$I = \frac{N \cdot 1000}{U \cdot \cos \varphi \cdot 1,73 \cdot \eta} = \frac{7,5 \cdot 1000}{380 \cdot 0,83 \cdot 1,73 \cdot 0,84} = 16,4 \text{ A.}$$

3. Stromverdrängungsmotor (Doppelstabläufer). Ein offener Doppelstabläufer für Drehstrom 380 V hat eine Nennleistung von 5,5 kW und eine Leerlaufdrehzahl von 1500 U/min.

Wie hoch darf bei diesem Motor die Nennstromstärke sein?

Lösung: Nach Zahlentafel B (Schleifringläufer) muß bei einer Nennleistung von 5,5 kW und einer Drehzahl von 1500 U/min der Wirkungsgrad mindetens 84,5 und der Leistungsfaktor mindestens 0,84 sein.

Wirkungsgrad  $\eta = 84,5$  v. H. oder 0,845.

Bei  $N = 5,5$  kW,  $U = 380$  V,  $\eta = 0,845$  und  $\cos \varphi = 0,84$  wird

$$I = \frac{N \cdot 1000}{U \cdot \cos \varphi \cdot 1,73 \cdot \eta} = \frac{5,5 \cdot 1000}{380 \cdot 0,84 \cdot 1,73 \cdot 0,845} = 11,8 \text{ A.}$$

## 16. Störungen an Einphasenmotoren

**Der Motor läuft nicht an.** Mögliche Ursache: Falscher Anschluß; der Läufer schleift am Ständer; Unterbrechung in den Zuleitungen; Sicherung durchgebrannt; schlechter Kontakt an den Anschlußklemmen; die verwendete Drosselspule oder der Kondensator ist für den betreffenden Motor ungeeignet; bei Schleifringläufer Unterbrechung in den Verbindungsleitungen zwischen Bürsten und Anlasser; Unterbrechung im Anlasser.

**Der Motor zieht bei Belastung nicht durch und wird heiß.** Mögliche Ursache: Falscher Anschluß; bei 110 V Spannung sind beide Teilwicklungen der Hauptphase statt nebeneinander (parallel) in Reihe geschaltet; bei 220 V Spannung sind beide Teilwicklungen der Hauptphase statt in Reihe nebeneinander (parallel) geschaltet; bei Verwendung eines Schalters mit sieben Klemmen haben die beiden nebeneinanderliegenden Klemmen untereinander Verbindung, so daß die Hilfsphase dauernd eingeschaltet bleibt und folglich heiß wird.

**Die Lager werden heiß.** Mögliche Ursache: Der Riemen ist zu stark gespannt; der Motor ist schlecht aufgestellt; das Öl ist schlecht oder zum Schmieren ungeeignet; die Ölringe im Lager drehen sich nicht; es ist Staub oder Schmutz in die Lager gekommen.

## 17. Störungen an Drehstrommotoren

Was für Gleichstrommotoren gilt, trifft auch für Drehstrommotoren zu, d. h. die meisten Störungen sind auf mangelhafte Aufstellung und unsachgemäße Wartung der Motoren und deren Hilfseinrichtungen zurückzuführen.

Die hauptsächlichsten Störungen, die bei Drehstrommotoren vorkommen, sind folgende:

**Der Motor läuft nicht an.** Mögliche Ursache: Unterbrechung in einer der drei Zuleitungen; eine oder mehrere Sicherungen sind durchgebrannt; schlechter Kontakt an den Anschlußklemmen der Schalter, der Sicherungen oder auf dem Klemmbrett des Motors; Unterbrechung in der Ständer- oder Läuferwicklung; eine oder mehrere Bürsten der Schleifringeliegen nicht oder nur schlecht auf; Unterbrechung in den Verbindungsleitungen zwischen Bürsten und Anlasser; schlechter Kontakt an den Anschlußklemmen des Anlassers; Unterbrechung im Anlaßwiderstand; falsche Schaltung der Ständerwicklung.

Wird z. B. ein Motor für 380/220 V statt in  $\Delta$ - in Y-Schaltung an 220 V angeschlossen, dann wird das Ständereisen nur schwach magnetisiert. Das magnetische Drehfeld hat jetzt nur etwa die halbe Stärke (genau  $\frac{1}{1,73}$  mal so stark). Infolgedessen kann der Motor auch



nur ein entsprechend geringes Anlaufmoment entwickeln. Dieses geringe Moment genügt in der Regel nicht, um den Motor beim Anlauf mit Last in Drehung zu bringen.

Sind Anfang und Ende einer Phasenwicklung des Ständers miteinander vertauscht, dann kommt kein richtiges Drehfeld zustande. Das Anlaufmoment des Motors ist dann so gering, daß der Motor meist nicht anläuft. Ein solcher Motor brummt in der Regel sehr stark.

**Der Motor läuft schwer an.** Mögliche Ursache: Infolge stark abgenutzter Lager streift der Läufer am Ständer.

**Die Drehzahl fällt bei Belastung stark ab, der Motor wird bei Belastung heiß.** Mögliche Ursache: Unterbrechung in einer Phase der Ständerwicklung während des Betriebes. Der Motor sucht dann als Einphasenmotor weiterzulaufen.

Der Motor ist statt in  $\Delta$  in  $Y$  geschaltet und wird infolgedessen zu schwach magnetisiert. Ständer- und Läuferwicklung haben Windungsschluß. In diesem Falle brummt der Motor stark und nimmt einen auffällig starken Strom auf.

**Der Motor wird heiß.** Mögliche Ursache: Motor überlastet; Ständerwicklung falsch geschaltet.

Wird z. B. ein Motor für 380/220 V bei 380 V in  $\Delta$ -Schaltung angeschlossen, dann tritt eine übermäßig starke Magnetisierung des Ständereisens ein. Die Folge ist eine starke Erhitzung des Eisens und der Wicklung.

Es kann auch vorkommen, daß derselbe Motor bei 220 V in  $Y$ -Schaltung angeschlossen wird. In diesem Fall ist die Magnetisierung des Ständereisens zu schwach. Infolgedessen nimmt der Motor bei Belastung sowohl im Läufer als auch im Ständer einen übermäßig starken Strom auf. Beide Wicklungen werden sehr heiß und mit diesen das Gehäuse.

**Die Lager werden heiß.** Mögliche Ursache: Siehe Einphasenmotoren.

## X. Elektrotechnische Meßgeräte

### 1. Allgemeines

Messen heißt vergleichen. Will man z. B. die Länge eines Raumes bestimmen, dann vergleicht man, wie oft ein bekanntes Längenmaß (Meter) in der zu messenden unbekanntem Länge enthalten ist. Nicht so einfach wie das Messen von Längen, Flächen usw. ist das Messen elektrotechnischer Größen. Während z. B. für Längenmessungen ein einfacher Maßstab genügt, sind zum Messen elektrotechnischer Größen besondere Meßgeräte mit empfindlichen Meßwerken erforderlich.

Zu messen sind:

- |   |   |
|---|---|
| 1. die Stromstärke in Ampere (A),           | 6. der Widerstand in Ohm ( $\Omega$ ),              |
| 2. die Spannung in Volt (V),                | 7. die elektrische Arbeit in Kilowattstunden (kWh), |
| 3. die Leistung in Kilowatt (kW),           | 8. der Verbrauch an Blindkilowattstunden (BkWh).    |
| 4. der Leistungsfaktor ( $\cos \varphi$ ),  |   |
| 5. die Periodenzahl in der Sekunde (Per/s), |   |

Dementsprechend unterscheidet man:

- |  |                                  |
|--|----------------------------------|
| 1. Strommesser (Amperemeter),            | 5. Frequenzmesser,               |
| 2. Spannungsmesser (Voltmeter),          | 6. Widerstandsmesser (Ohmmeter), |
| 3. Leistungsmesser (Wattmeter),          | 7. Zähler.                       |
| 4. Leistungsfaktormesser (Phasenmesser), |                                  |



## 2. Meßgeräte und ihre Teile

Ein Meßgerät besteht aus dem Meßwerk mit Gehäuse und dem eingebauten oder angebauten Zubehör.

Ein Meßgerät kann auch mehrere Meßwerke enthalten.

Das Meßwerk ist der Teil des Meßgerätes, der zur Erzeugung des Zeigerausschlages dient.

Bei Meßgeräten spricht man von einem Strompfad und einem Spannungspfad.

Der Strompfad ist der vom Meßstrom oder einem Teil des Meßstromes durchflossene Teil des Meßgerätes. Als Spannungspfad wird der mittelbar oder unmittelbar an die Spannung anzuschließende Teil des Meßgerätes bezeichnet.

Es gibt Meßgeräte mit Nebenwiderstand und mit Vorwiderstand.

Nebenwiderstand ist der vom Hauptstrom unmittelbar durchflossene Widerstand, an dessen Klemmen das Meßgerät angeschlossen wird. Er ist dem Meßgerät neben-(parallel-)geschaltet.

Vorwiderstand ist der Widerstand, der dem Spannungspfad des Meßgerätes vorgeschaltet wird.

**Stromartzeichen.** Es gibt Meßgeräte, die nur für Gleichstrom, solche, die nur für Wechselstrom und solche, die sowohl für Gleichstrom als auch für Wechselstrom verwendet werden können. Zur Kennzeichnung der Stromart dient für Gleichstrom ein waagerechter Strich (—) und für Wechselstrom das Wellenzeichen ( $\sim$ ). Meßgeräte, die für Gleich- und für Wechselstrom geeignet sind, erhalten beide Zeichen ( $\text{—}$ ).

Die Art des Meßgerätes wird durch ein Sinnbild gekennzeichnet.

## 3. Einteilung der Meßgeräte

Nach der Art des Meßwerks unterscheidet man:

- |                                 |                                |
|---------------------------------|--------------------------------|
| 1. Dreheisenmeßgeräte,          | 5. Induktionsmeßgeräte,        |
| 2. Drehspulmeßgeräte,           | 6. Vibrationsmeßgeräte,        |
| 3. Thermische Meßgeräte,        | 7. Elektrostatische Meßgeräte. |
| 4. Elektrodynamische Meßgeräte, |                                |

## 4. Indirekte Messung von Stromstärke und Spannung bei Wechselstrom

Bei der direkten Messung werden die Meßgeräte direkt mit den Leitungen verbunden, deren Stromstärke oder Spannung zu messen ist.

Die indirekte Messung erfolgt unter Zwischenschaltung besonderer Meßwandler.

### Meßwandler

In Hochspannungsanlagen werden die Meßgeräte aus Gründen der Betriebssicherheit und um Personen, die mit solchen Geräten in Berührung kommen können, gegen die Gefahren der Hochspannung zu schützen, an die Sekundärwicklung



besonderer Meßwandler angeschlossen (Bild 228). Solche Meßwandler sind ihrem Wesen nach Umspanner. Sie besitzen zwei elektrisch gut voneinander isolierte Wicklungen.

Man unterscheidet Stromwandler und Spannungswandler.

**Stromwandler** dienen zum Umspannen der Stromstärke. Ihre Primärwicklung wird in die Hauptleitung (Hochspannungsleitung) eingeschaltet und vom gesamten

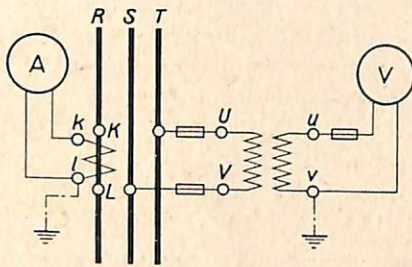


Bild 228. Anschluß von Meßwandlern für Strom- und Spannungsmessung

Hauptstrom durchflossen (Bild 228). Dieser Hauptstrom, der mehrere 1000 A betragen kann, wird durch den Stromwandler in der Regel auf die geringe Stromstärke von 5 A umgewandelt. Bei vollem Nennstrom in der Primärwicklung fließen in der Sekundärwicklung und durch den mit der Sekundärwicklung in Reihe geschalteten Strommesser 5 A. Steigt oder fällt die Stromstärke in der Hauptleitung, dann steigt oder fällt im gleichen Verhältnis die Stromstärke in der Sekundärwicklung des Stromwandlers und in dem mit diesem verbundenen Strommesser. Die Skala des Strommessers ist so eingeteilt, daß der Zeiger des Meßwerks die Stärke des Stromes in der Hauptleitung anzeigt.

An einen Stromwandler lassen sich mehrere Meßgeräte in Reihenschaltung anschließen.

Durch die **Spannungswandler** wird die zu messende Hochspannung in der Sekundärwicklung auf die geringe Spannung von 100 oder 110 V umgewandelt. Die angeschlossenen Spannungsmesser usw. liegen infolgedessen an einer Spannung, die ungefährlich ist.

Die Skala des Spannungsmessers ist so eingeteilt, daß der Zeiger die zu messende Hochspannung anzeigt. Spannungswandler werden mit ihrer Primärwicklung wie ein Spannungsmesser an zwei Hauptleitungen angeschlossen.

### Allgemeine Regeln für Meßwandler

1. Ist die Primärwicklung des Meßwandlers an Hochspannung angeschlossen, dann soll man den Meßwandler nicht berühren, weil die Gefahr besteht, daß man mit Teilen in Berührung kommt, die Hochspannung führen.

2. Die Sekundärwicklung eines primär angeschlossenem Stromwandlers muß entweder über den Strommesser oder eine Kurzschlußverbindung geschlossen sein.

Grund: Bei offenem Sekundärkreis können an den Sekundärklemmen des Stromwandlers gefährlich hohe Spannungen entstehen. Außerdem kann sich der Eisenkern des Stromwandlers so stark erhitzen, daß seine Wicklung verbrennt. Solange nämlich der Sekundärkreis geschlossen ist, wird vom Sekundärstrom ein magnetisches Feld erzeugt, das dem Feld des Primärstromes entgegengerichtet ist und dieses teilweise aufhebt. Das wirksam vorhandene magnetische Feld ist so schwach, daß auf jedes Quadratzentimeter Eisenkern nur einige hundert Kraftlinien entfallen. Infolgedessen ist der Eisenkern des Stromwandlers nur schwach gesättigt. Bei geöffneter Sekundärwicklung fällt die Gegenwirkung des Sekundär-



stromes fort. Das Primärfeld ist jetzt in seiner vollen Stärke vorhanden. Die Sättigung des Eisenkerns kann dabei so hoch werden, daß sich der Eisenkern gefährlich erhitzt, was zu einer Verbrennung der Wicklung führt.

Durch die bei offener Sekundärwicklung im Eisenkern entstehende hohe Sättigung wird in der Sekundärwicklung eine hohe Spannung erzeugt, die 1000 V und mehr betragen kann.

Die offene Sekundärwicklung eines Stromwandlers hat außerdem einen unzulässig hohen Spannungsabfall in der Hauptleitung zur Folge, weil die Primärwicklung als Drosselspule wirkt und eine hohe Gegenspannung erzeugt, zu deren Überwindung ein entsprechender Teil der Netzspannung nutzlos verlorengeht.

3. Bei Spannungswandlern, die primär angeschlossen sind, kann die Sekundärwicklung offen sein. Sie darf nur über einen hohen Widerstand (Spannungsmesser, Spannungswicklung bei Leistungsmessern und Zählern) geschlossen werden.

Beim Spannungswandler ist die Stärke des wirksamen magnetischen Feldes bei offener Sekundärwicklung nicht größer, als wenn die Wicklung über einen Spannungsmesser oder dgl. geschlossen wird. Infolgedessen ist die Spannung an den Klemmen der Sekundärwicklung nicht höher als bei geschlossener Wicklung. Sie beträgt nur etwa 100 V und kann als ungefährlich gelten.

4. Spannungswandler müssen auf der Hochspannungsseite allpolig gesichert werden. Auf der Niederspannungsseite werden nur die Leitungen gesichert, die nicht geerdet sind.

Die Sicherungen auf der Hochspannungsseite sollen die Anlage gegen Kurzschlüsse schützen, während die Sicherungen auf der Niederspannungsseite zum Schutz des Spannungswandlers gegen Überlastung dienen. Überlastungen können durch Schluß in den Leitungen, durch falsche Erdung oder durch falsche Schaltung entstehen.


5. Bei Strom- und Spannungswandlern, die in einer Meßschaltung verwendet werden, sind die Sekundärwicklungen und die Gehäuse aller Meßwandler einpolig zu erden.

Die Erdung soll verhindern, daß Leitungen und Meßgeräte für Niederspannung hohe Spannungen annehmen und Personen gefährden.

6. Werden bei Leistungsmessern für die Stromspulen Stromwandler und für die Spannungsspulen Vorwiderstände benutzt (halbindirekte Schaltung), dann darf nicht geerdet werden.

In diesem Falle ist die Sekundärwicklung des Stromwandlers mit einem geeigneten Punkt des Netzes zu verbinden, damit innerhalb der Leistungsmesser keine hohen Spannungsunterschiede entstehen. Bei Leistungsmessern für Einphasenstrom wird zu diesem Zweck die Sekundärwicklung des Stromwandlers einpolig mit der zugehörigen Primärwicklung verbunden (Bild 268).

### 5. Das Dreheisenmeßgerät (Weicheisenmeßgerät)

Sinnbild: , Stromartzeichen  $\sim$

**Aufbau.** Das älteste Meßgerät ist das Weicheisenmeßgerät nach Bild 229. Bei diesem Meßgerät ist über dem Hohlraum einer Magnetspule ein Rohr aus weichem Eisen mit seinem oberen Ende an einer Feder befestigt. Ein an dem Eisenrohr befestigter Zeiger gibt auf einer seitlich angebrachten Skala die Stärke des zu messenden Stromes an.



**Wirkungsweise.** Wenn Strom durch die Spule fließt, wird das Eisenrohr in den Hohlraum der Spule gezogen. Die Stärke der Anziehung ist um so größer, je stärker der Strom ist, der durch die Spule fließt. Die Spannkraft der Feder hält der magnetischen Zugkraft der Spule

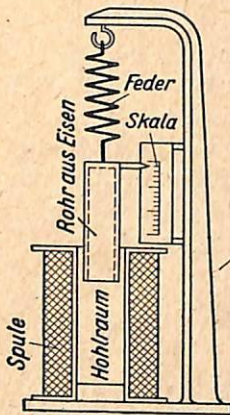


Bild 229.  
Ältestes Weicheisen-  
meßgerät

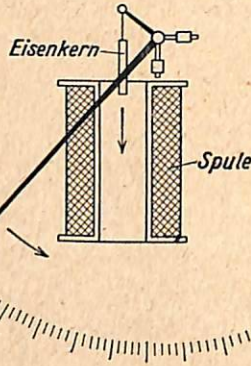


Bild 230.  
Weicheisenmeßgerät  
älterer Bauart

das Gleichgewicht. Bei zunehmender Stromstärke wird durch die Abwärtsbewegung des Eisenrohres die Feder stärker gespannt. Bei abnehmender Stromstärke zieht die Feder das Eisenrohr so weit nach oben, bis Federkraft und magnetische Zugkraft wieder im Gleichgewicht sind. Wird der Strom ausgeschaltet, dann zieht die Feder das Eisenrohr in seine Nullstellung zurück. Die unhandliche Bauart nach Bild 229 wurde später durch die zweckmäßigere Bauart nach Bild 230 abgelöst. Beide Bauarten sind wegen ihrer Mängel heute nicht mehr im Gebrauch. Heute wird nur noch das Dreheisenmeßwerk verwendet.

**Wirkungsweise des Dreheisenmeßwerks.** In Bild 231 befinden sich im Hohlraum einer Magnetspule die beiden Eisenstückchen  $k_1$  und  $k_2$ . Das Eisenstückchen  $k_1$  ist mit der Spule fest verbunden, während das Eisenstückchen  $k_2$  lose neben dem Eisenstückchen  $k_1$  liegt. Sobald Strom durch die Spule fließt, entsteht im Hohlraum der Spule ein magnetisches Feld, dessen Kraftlinien zum Teil

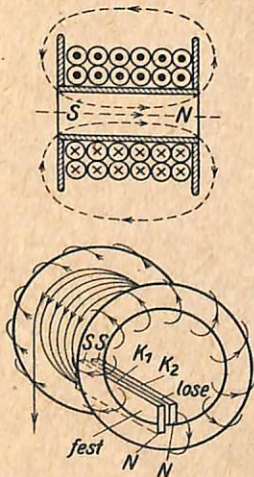


Bild 231. Magnetspule  
mit festem undlosem  
Eisenstückchen

ihren Weg durch die beiden Eisenstückchen nehmen. Da diese Kraftlinien beide Eisenstückchen in gleicher Richtung durchsetzen, entstehen an den nebeneinander liegenden Enden beider Eisenstückchen Magnetpole gleicher Polarität. Bei der in Bild 231 angenommenen Stromrichtung werden die vorderen Enden der Eisenstückchen beide zum Nordpol und die hinteren beide zum Südpol. Da sich gleichnamige Pole abstoßen, wird beim Einschalten des Stromes das lose liegende Eisenstückchen  $k_2$  von dem festen Eisenstückchen  $k_1$  fortgetrieben. Die Stärke der Abstoßung ist um so größer, je stärker der Strom ist, der durch die Spule fließt. Das lose liegende Eisenstückchen wird mit einer drehbaren Achse verbunden, auf der ein Zeiger befestigt ist. Bild 232 zeigt den Aufbau des Dreheisenmeßwerks der Firma Hartmann & Braun, Frankfurt a. M.<sup>1)</sup>. Bei diesem Meßwerk ist in einer Ringspule S

1) Diese Firma stellte freundlicherweise die Druckstöcke für die Bilder 232, 235, 236, 238—240, 243, 246, 247, 251, 253, 254, 256, 258—261, 277, 278, 280—283, 291—297, 300.



ein Eisenblech  $K_1$  fest mit dem Spulenkörper verbunden. Das andere Eisenblech  $K_2$  ist an einer drehbaren Achse  $A$  befestigt, die vorne den Zeiger  $Z$  trägt. Die Spiralfeder  $F$  steht mit ihrem einen Ende mit dem verstellbaren Winkelhebel  $H$  und mit ihrem anderen Ende mit der Zeigerachse  $A$  in fester Verbindung. Diese Spiralfeder wirkt der Drehwirkung (Drehmoment) des drehbaren Eisenblechs entgegen und hält ihr das Gleichgewicht. Mit zunehmender Stromstärke wird die Drehkraft des Eisenblechs größer, so daß sich das Eisenblech entsprechend weiter dreht. Dadurch wird gleichzeitig die Spiralfeder stärker gespannt. Sinkt die Stromstärke in der Ringspule, dann wird infolge der Federspannung der Zeiger so weit zurückgedreht, bis Federspannung und Drehmoment des Eisenblechs im Gleichgewicht sind. Beim Ausschalten des Stromes wird durch die Federspannung das Eisenblech und damit auch der Zeiger in seine Nullstellung zurückgedreht.

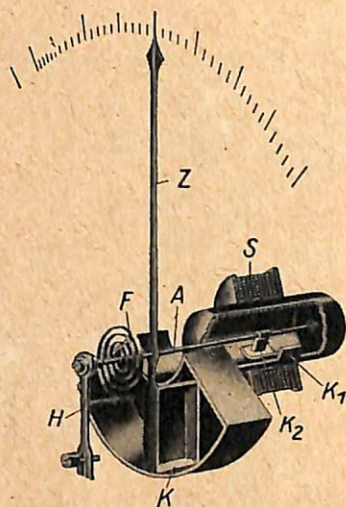


Bild 232. Dreheisenmeßgerät mit Dämpfung

**Die Dämpfung.** Damit bei Änderung der Stromstärke der Zeiger nicht erst um die neue Gleichgewichtslage hin und her schwingt, sondern nach jedem Ausschlag sofort zur Ruhe kommt, ist das Meßwerk mit einer Luftdämpfung versehen. Diese Luftdämpfung besteht aus einer Dämpfungskammer  $K$ , in der ein leichter Flügel mit geringem Spielraum hin und her schwingen kann. Dieser Flügel ist mit dem unteren Ende des Zeigers fest verbunden. Bei jeder Zeigerbewegung entsteht in der Dämpfungskammer ein Luftwiderstand, der sich der Zeigerbewegung entgegensetzt und diese so stark dämpft, daß der Zeiger nach jedem Ausschlag sofort zur Ruhe kommt.

**Eigenschaften des Dreheisenmeßwerks.** Beim Dreheisen- bzw. Weicheisenmeßwerk wird als Anker weiches Eisen verwendet. Infolgedessen ist die Richtung der erzeugten Drehkraft von der Stromrichtung unabhängig. Dreheisenmeßwerke lassen sich daher sowohl für Gleichstrom als auch für Wechselstrom verwenden. Die Unterschiede in der Zeigerangabe sind bei Gleichstrom und bei Wechselstrom von 15 bis 100 Per/s so gering, daß sie praktisch keine Rolle spielen und vernachlässigt werden können. Ihre Skalenteilung ist ungleichmäßig (Bild 235/236).

Der Eigenverbrauch des Dreheisenmeßwerks stellt sich auf etwa 1,5 bis 2 W.

Dreheisenmeßwerke sind kräftig gebaut, unempfindlich gegen Überlastung und billig.

#### Strom- und Spannungsmessungen mittels Dreheisenmeßwerk

**Strommessung.** Strommesser dienen zum Messen der Stärke des Stromes, der durch einen oder mehrere nebeneinander (parallel) oder in Reihe geschaltete Stromverbraucher fließt. Damit der gesamte Strom von dem Strommesser angezeigt



wird, muß dieser mit den Stromverbrauchern in Reihe geschaltet werden (Bild 233). Durch den Widerstand der Spulenwicklung des Strommessers entsteht beim Fließen

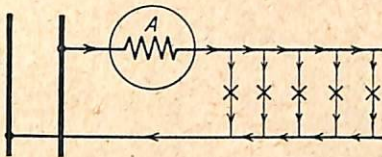


Bild 233. Strommessung

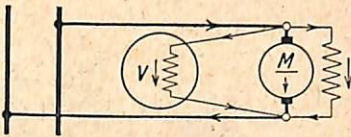


Bild 234. Spannungsmessung

des Stromes ein Spannungsabfall. Um diesen Spannungsabfall wird die Spannung an den Klemmen der Stromverbraucher geringer. Damit die Stromverbraucher möglichst ihre volle Spannung erhalten, muß der Spannungsabfall im Strommesser selbst sehr gering sein. Zu diesem Zweck macht man den inneren Widerstand des Strommessers dadurch so gering wie möglich, daß man die Magnetspule aus nur wenig Windungen aber verhältnismäßig dickem Draht herstellt.

**Spannungsmessung.** Spannungsmesser dienen zum Messen der Spannung an den Klemmen von Stromerzeugern und Stromverbrauchern. Sie müssen zu diesem Zweck zu den Stromerzeugern bzw. Stromverbrauchern neben- (parallel) geschaltet werden

(Bild 234). Der durch den Spannungsmesser fließende Strom verursacht einen Leistungsverlust. Dieser wird um so kleiner, je schwächer der Strom ist, der durch

den Spannungsmesser fließt. Damit dieser Strom möglichst schwach ist, muß der innere Widerstand des Spannungsmessers entsprechend groß sein. Aus diesem Grunde wird bei Spannungsmessern die Magnetspule aus vielen Windungen dünnen Drahtes hergestellt.

Die Meßwerke der Strom- und Spannungsmesser sind von gleicher Bauart. Das Strommeßwerk unterscheidet sich vom Spannungmeßwerk nur durch die Windungszahl und die Drahtdicke der Stromspule.



Bild 235.


Skala eines Dreheisen- (Weicheisen-) Strommessers



Bild 236.

Skala eines Dreheisen- (Weicheisen-) Spannungsmessers oder eines Strommessers ohne Nennstromskala

## 6. Das Drehspulmeßgerät

Sinnbild , Stromartzeichen —

**Aufbau.** Das Drehspulmeßwerk besteht aus einem kräftigen Dauermagnet aus gehärtetem Stahl (Bild 237u.238). Auf den Enden dieses Dauermagneten sind zylindrisch ausgebohrte Polschuhe aus weichem Eisen befestigt. Zwischen diesen Polschuhen ist ein zylindrischer Kern aus weichem Eisen fest so angeordnet, daß zwischen



Polschuhen und Kern ein schmaler Luftspalt bleibt. In diesem Luftspalt befindet sich auf einem Aluminiumrähmchen eine drehbar gelagerte Spule (Drehspule).

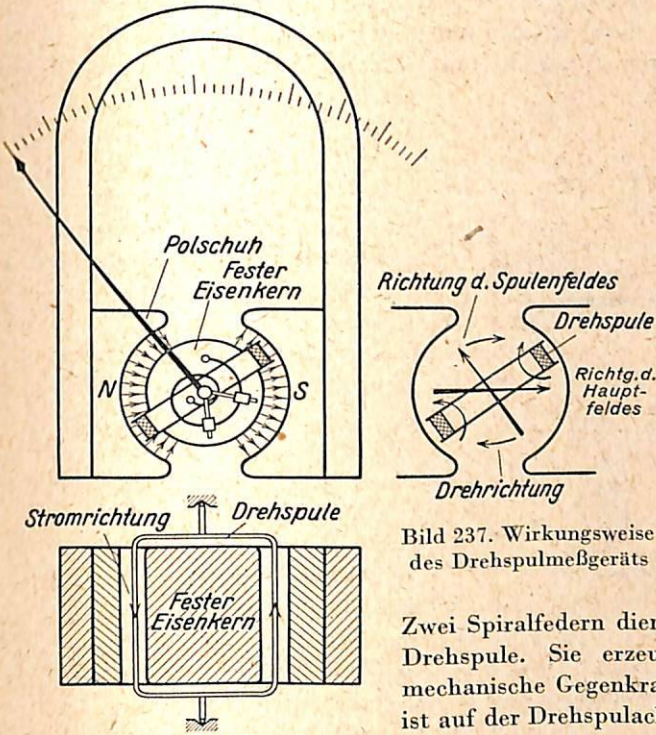


Bild 237. Wirkungsweise des Drehspulmeßgeräts

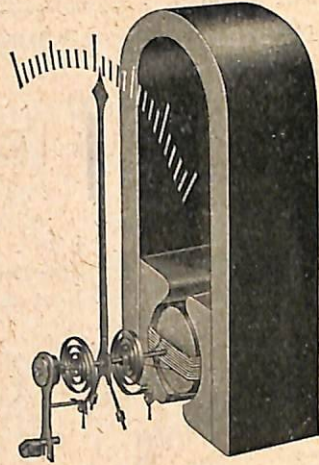


Bild 238. Drehspulmeßgerät

Zwei Spiralfedern dienen als Stromzuführung für diese Drehspule. Sie erzeugen außerdem die notwendige mechanische Gegenkraft für das Meßwerk. Der Zeiger ist auf der Drehspulachse befestigt.

**Wirkungsweise.** Der Dauermagnet erzeugt ein kräftiges magnetisches Feld. Dieses Feld wird durch die Polschuhe gleichmäßig verteilt (homogenes Feld). Fließt Strom durch die Spule, dann entsteht durch die Einwirkung des magnetischen Feldes auf die stromdurchflossene Spule ein Drehmoment, durch welches die Spule nach der Linken-Hand-Regel (S. 37, Bild 47) in der Richtung des Daumens ein entsprechendes Stück gedreht wird. Weil sich die Drehspule in einem gleichmäßigen magnetischen Feld befindet, nimmt auch das Drehmoment der Spule gleichmäßig mit der Stromstärke zu oder ab. Infolgedessen ist beim Drehspulmeßgerät die Skalenteilung von 0 bis zum Endwert gleichmäßig. Der Zeiger wird jeweils immer so weit gedreht, bis Drehmoment der Drehspule und Gegenmoment der Spiralfedern im Gleichgewicht sind. Wird der Strom ausgeschaltet, dann dreht sich der Zeiger infolge der Gegenkraft der Spiralfedern in die Nullstellung zurück.

**Dämpfung.** Die für eine schwingungsfreie Zeigereinstellung notwendige Dämpfung wird durch das Aluminiumrähmchen erzeugt. Sobald sich nämlich die Drehspule mit dem Rähmchen im magnetischen Feld des Dauermagneten dreht, schneidet das Rähmchen die Kraftlinien des magnetischen Feldes. Dadurch werden im Rähmchen



Wirbelströme (Kurzschlußströme) erzeugt, welche die Drehbewegung des Rähmchens bremsen.

**Eigenschaften des Drehspulmeßwerks.** Das magnetische Feld des Dauermagneten hat immer die gleiche Richtung. Infolgedessen hängt die Drehrichtung der Spule nur von der Stromrichtung in der Spule ab (Linke-Hand-Regel). Drehspulmeß-



Bild 239. Skala für Drehspulstrommesser  
(Nullpunkt an der Seite)



Bild 240. Skala für Drehspulstrommesser  
(Nullpunkt in der Mitte)

werke mit Nullpunkt an der Seite (Bild 239) lassen sich daher nur für eine Stromrichtung verwenden. Sie kommen infolgedessen auch nur für Gleichstrom in Frage. Falsche Stromrichtung hat falschen Zeigerausschlag zur Folge. Um diesen zu vermeiden, ist die eine Anschlußklemme des Meßwerks mit einem + -Zeichen versehen. An diese Klemme ist der Pluspol der Meßleitungen anzuschließen. Infolgedessen lassen sich Drehspulmeßwerke bei Gleichstrom auch als Polsucher verwenden.

Drehspulmeßwerke mit Nullpunkt in der Mitte (Bild 240) eignen sich für zwei verschiedene Stromrichtungen. Sie finden dann Verwendung, wenn sich die Stromrichtung ändern kann, wie dies z. B. beim Laden von Akkumulatoren der Fall ist. Die Stromrichtung ist beim Laden die umgekehrte wie beim Entladen. Aus der Richtung des Zeigerausschlages läßt sich ohne weiteres erkennen, ob die Batterie geladen oder entladen wird.

Drehspulmeßwerke besitzen eine gleichmäßige Skalenteilung. Sie sind gegen Überlastungen wesentlich empfindlicher als Dreheisenmeßwerke. Die als Stromzuführung dienenden Spiralfedern brennen bei Überlastung leicht durch.

Drehspulmeßwerke besitzen den Vorzug großer Genauigkeit und werden infolgedessen für Feinmessungen (Präzisionsmeßgeräte für Gleichstrom) gebaut.

### Strom- und Spannungsmessung mittels Drehspulmeßwerk

**Strommessung.** Das gleiche Meßwerk wird für Strom- und Spannungsmessungen verwendet.

Bei Strommessern werden passende Widerstände zur Drehspule neben- (parallel) geschaltet (Bild 241), so daß nur ein Bruchteil des zu messenden Stromes durch die Drehspule des Meßwerkes fließt. Diese Nebenwiderstände sind bei Meßgeräten für geringere Stromstärken im Meßgerät mit eingebaut. Bei größeren Stromstärken werden diese Nebenwiderstände vom Meßgerät getrennt angeordnet. Zur Verbindung



des Meßwerks mit den getrennt angeordneten Nebenwiderständen dienen besondere Meßleitungen, die von den Firmen mitgeliefert werden. Sie dürfen weder durch andere Leitungen ersetzt noch verkürzt oder verlängert werden. Durch Verwendung nicht zugehöriger oder veränderter Meßleitungen entstehen Meßfehler. Auf den richtigen Anschluß der Nebenwiderstände und Meßleitungen ist zu achten. Bild 242 zeigt den richtigen Anschluß und die falschen Anschlüsse. Die meisten Meßwerke sind so abgeglichen, daß bei vollem Zeigerausschlag an den freien Enden der an das Meßwerk angeschlossenen Leitungen ein Spannungsabfall von 60 Millivolt (mV) auftritt. Die getrennt angeordneten Nebenwiderstände sind ebenfalls für einen Spannungsabfall von 60 mV gebaut, so daß die Nebenwiderstände beliebig vertauscht werden können.

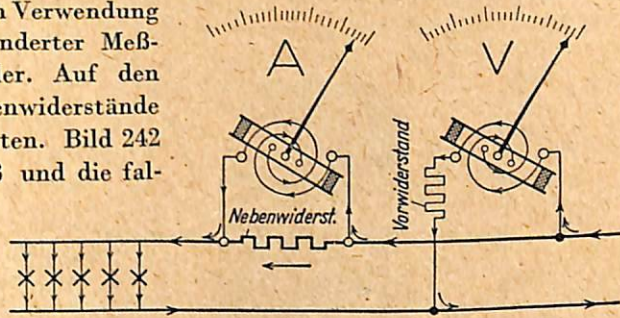


Bild 241. Strommesser mit Nebenwiderstand und Spannungsmesser mit Vorwiderstand

Bei Spannungsabfall von 60 Millivolt (mV) tritt auf. Die getrennt angeordneten Nebenwiderstände sind ebenfalls für einen Spannungsabfall von 60 mV gebaut, so daß die Nebenwiderstände beliebig vertauscht werden können.

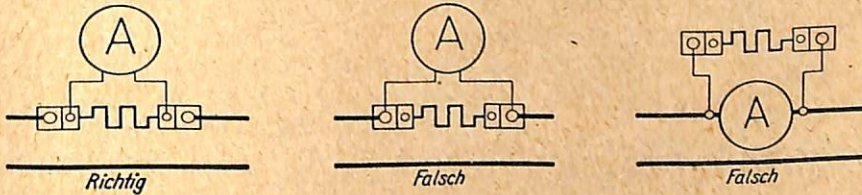


Bild 242. Richtiger und falscher Anschluß des Strommessers

**Spannungsmessung.** Bei Spannungsmessern wird der Drehspule ein entsprechend großer Widerstand vorgeschaltet (Bild 241). Dieser Vorwiderstand wird bei Spannungen bis 400 V in das Meßgerät eingebaut. Der Stromverbrauch der Spannungsmesser mit seitlich liegendem Nullpunkt beträgt bei vollem Zeigerausschlag etwa 0,01 A oder 10 mA, so daß der innere Widerstand bei 400 V  $R = 400 : \frac{1}{100} = 40000 \Omega$  beträgt. Auf jedes Volt Spannung entfallen demnach  $40000 : 400 = 100 \Omega$  innerer Widerstand.

**Drehspul-Meßgeräte für Hochfrequenz-Strom- und Spannungsmessungen**

Das Drehspulmeßwerk in Verbindung mit einem Gleichrichter oder einem Thermoelement hat sich für Strom- und Spannungsmessungen bei Wechselstrom und Hochfrequenz sehr gut bewährt.

Man unterscheidet Gleichrichtermessgeräte und Thermoumformermessgeräte. Gleichrichtermessgeräte können für Frequenzen bis 10 000 Per/s verwendet werden. Sie sind gegen Überlastung unempfindlich.



**Das Thermoumformermeßgerät. Aufbau.** Die Bilder 243 und 244 zeigen den Aufbau des Thermoumformermeßgerätes der Firma Hartmann & Braun, Frankfurt a. M. Dieses Gerät setzt sich aus einem empfindlichen Drehspulmeßwerk und einem Thermoumformer zusammen. Dieser Thermoumformer besteht aus einem Heizdraht und

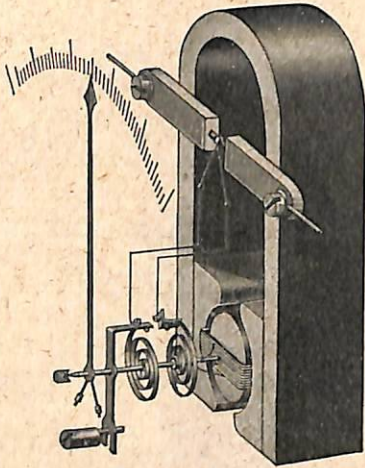


Bild 243.

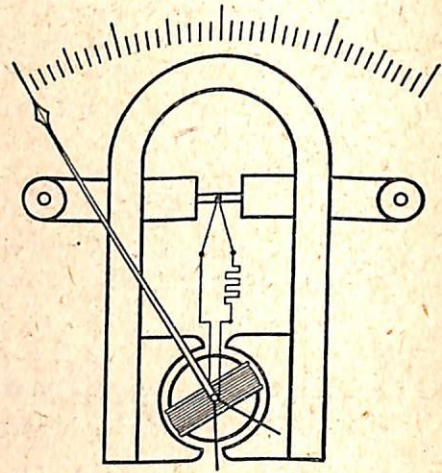


Bild 244.

Thermoumformermeßgerät

einem Thermoelement. Er ist entweder fest eingebaut oder austauschbar auf der Gehäuserückwand des Gerätes angebracht. Er kann auch getrennt angeordnet werden.


**Wirkungsweise.** Der zu messende Strom durchfließt den Heizdraht. Beim Stromdurchgang erwärmt sich dieser Heizdraht. Durch den erwärmten Heizdraht entsteht im Thermoelement eine Gleichspannung, die von dem empfindlichen Drehspulmeßwerk gemessen wird. Diese Thermogleichspannung steht in einem bestimmten Verhältnis zum Heizstrom. Infolgedessen kann die Skala des Drehspulgerätes unmittelbar in Einheiten des zu messenden Stromes aufgeteilt werden.

**Verwendung.** Dieses Meßgerät kann überall da Verwendung finden, wo es sich um Strom- oder Spannungsmessungen handelt, deren Frequenz hoch ist, wie z. B. in Hochfrequenzanlagen, in der Fernmeldetechnik, in der Radiotechnik usw. Diese Meßgeräte haben die früher für diesen Zweck verwendeten Hitzdrahtgeräte fast ganz verdrängt.

Die Thermoumformermeßgeräte werden sowohl als Schalttafelgeräte in Rundgehäuse wie auch als tragbare Geräte in Isoliergehäuse geliefert.



## 7. Das Hitzdrahtmeßgerät (Thermisches Meßgerät)

Sinnbild , Stromartzeichen  $\sim$

**Aufbau.** Beim Hitzdrahtmeßgerät (Bild 245) ist zwischen den Klemmen  $A$  und  $A_1$  der eigentliche Hitzdraht  $H$  gespannt. An diesen Hitzdraht ist senkrecht zu ihm in Punkt  $O$  ein zweiter Draht  $B$  befestigt. Das untere Ende des Drahtes  $B$  ist mit dem Gehäuse verbunden. An der Stelle  $V$  des Drahtes  $B$  ist ein Kokonfaden (Rohseide)  $K$  befestigt, der über die Rolle  $R$  geschlungen ist und durch die Blattfeder  $F$  gespannt wird. Mit der Rollenachse ist der Zeiger verbunden.

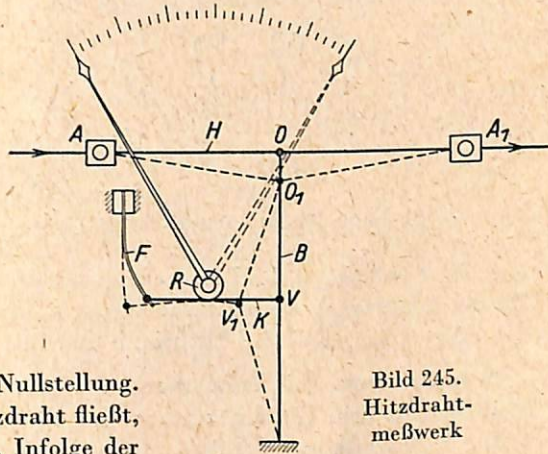


Bild 245.  
Hitzdraht-  
meßwerk

**Wirkungsweise.** Solange kein Strom fließt, ist der Hitzdraht kalt. Der Zeiger steht dann links in der Nullstellung. Sobald jedoch Strom durch den Hitzdraht fließt, erwärmt er sich und dehnt sich aus. Infolge der Ausdehnung durch die Wärme biegt sich der Hitzdraht von Punkt  $O$  nach Punkt  $O_1$  durch. Dadurch rückt bei Draht  $B$  der Punkt  $V$  nach  $V_1$ . Die Zeigerrolle dreht sich jetzt unter dem Einfluß der Feder-spannung (Blattfeder  $F$ ) rechts herum. Die infolge der Stromwärme entstehende Ausdehnung des Hitzdrahtes wird daher mit Hilfe des Drahtes  $B$  und des Kokonfadens  $K$  auf das Zeigerwerk übertragen. Durch die kunstgerechte Anordnung der Übertragungseinrichtung auf den Zeiger wird eine Größe gemessen, die viel größer ist, als der geringen Längenausdehnung des Hitzdrahtes entspricht.



Bild 246. Hitzdrahtmeßgerät  
mit Wirbelstromdämpfung

Die Firma Hartmann & Braun verwendet als Werkstoff für den Hitzdraht Platiniridium, dessen Schmelzpunkt hoch ist und bei etwa  $2300^{\circ}\text{C}$  liegt. Die Temperatur des Hitzdrahtes ist bei vollem Zeigerausschlag etwa  $300^{\circ}\text{C}$ . Infolge dieser erheblichen Hitzdrahttemperatur haben die verhältnismäßig geringen Schwankungen der Außentemperatur keinen Einfluß auf die Genauigkeit der Messungen. Da die Schmelztemperatur von Platiniridium hoch ist, vertragen diese Hitzdrahtmeßgeräte Überlastungen bis zum  $2\frac{1}{2}$ -fachen der Nennstromstärke. Dabei kann sich der Hitzdraht bis auf Rotglut erhitzen.

**Dämpfung.** Auf der Zeigerachse ist eine Aluminiumscheibe befestigt, die sich zwischen den Polen eines kräftigen Dauermagneten bewegt (Bild 246). Die bei der



Drehung der Scheibe in dieser entstehenden Wirbelströme wirken bremsend auf die Drehung und bewirken dadurch eine schwingungsfreie Einstellung des Zeigers.

**Eigenschaften des Hitzdrahtmeßwerks.** Die vom Strom erzeugte Wärme ist unabhängig von der Stromrichtung. Infolgedessen lassen sich Hitzdrahtmeßwerke für Gleich- und Wechselstrom verwenden. Sie sind gegen Temperaturschwankungen der Außentemperatur unempfindlich und lassen sich zum Messen von Stromstärken und Spannungen hoher Frequenz geeignet. Ihre Skalenteilung ist ungleichmäßig (quadratisch) (Bild 247),



Bild 247.  
Skala für Hitzdrahtstrommesser

weil die Erwärmung des Hitzdrahtes vom Quadrat der Stromstärke ( $I^2$ ) abhängt. Da die Erwärmung des Hitzdrahtes nur allmählich erfolgt, dauert die Einstellung des Zeigers länger als bei Dreheisen- und Drehspulmeßwerken.



**Strommessung.** Bei Strommessern für Stromstärken über 5 A werden getrennte Widerstände dem Hitzdraht neben- (parallel) geschaltet.

Der Eigenverbrauch der Strommesser für 5 A beträgt etwa 1,5 VA.

**Spannungsmessung.** Für Spannungsmessungen über 3 V werden Vorwiderstände mit dem Hitzdraht in Reihe geschaltet. Bei Spannungsmessern bis 250 V sind die Vorwiderstände in das Meßgerät eingebaut. Bei Spannungsmessern für 250 V und höher sind die Vorwiderstände vom Meßgerät getrennt.

Der Eigenverbrauch beträgt bei Spannungsmessern für 110 V etwa 15 VA.

## 8. Das elektrodynamische Meßgerät

Sinnbild , Stromartzeichen 

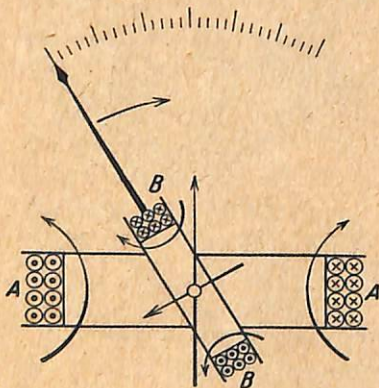


Bild 248.  
Elektrodynamisches Meßwerk

**Aufbau.** Das Meßwerk des elektrodynamischen Meßgeräts (Bild 248) besteht in der Hauptsache aus der Feldspule A und der Zeigerspule B. Die Feldspule A steht fest. Die Zeigerspule B ist im magnetischen Feld der festen Spule A drehbar gelagert. An der Zeigerspule B ist der Zeiger befestigt. Der Strom wird der Zeigerspule B durch zwei Spiralfedern zugeführt (Bild 251). Die Federn liefern gleichzeitig die mechanische Gegenkraft für das Meßwerk. Die schwingungsfreie Einstellung des Zeigers erfolgt durch Luftdämpfung. Das Meßwerk ist ohne Eisen.

**Wirkungsweise.** Werden beide Spulen in der angenommenen Richtung (Bild 248) vom Strom



durchflossen, dann erzeugt jede Spule ein magnetisches Feld, das parallel zu ihrer Spulennachse gerichtet ist.

Demnach ist das Feld der festen Spule senkrecht von unten nach oben und das der beweglichen Zeigerspule entsprechend der Richtung der Spulennachse schräg von oben nach unten gerichtet. Magnetische Felder haben das Bestreben, sich gleich und parallel zu richten. Infolgedessen üben die beiden stromdurchflossenen Spulen aufeinander eine Kraftwirkung aus, die zur Folge hat, daß sich die bewegliche Zeigerspule von links nach rechts dreht.

Die Größe dieser Drehkraft hängt sowohl von der Stärke des Stromes in der festen als auch von der Stärke des Stromes in der beweglichen Spule ab. Weil das Meßwerk eisenlos ist, verlaufen die Kraftlinien nur in der Luft. Infolgedessen sind die magnetischen Felder verhältnismäßig schwach.

Die Richtung der auf die Zeigerspule ausgeübten Drehkraft ändert sich nur dann, wenn die Stromrichtung entweder in der festen oder in der drehbaren Spule geändert wird. Wird die Stromrichtung in beiden Spulen gleichzeitig geändert, dann bleibt die Richtung der Drehkraft unverändert. Infolgedessen kann das elektrodynamische Meßwerk sowohl für Gleichstrom als auch für Wechselstrom verwendet werden. Das Meßwerk ist für Strommessungen, Spannungsmessungen und Leistungsmessungen geeignet.

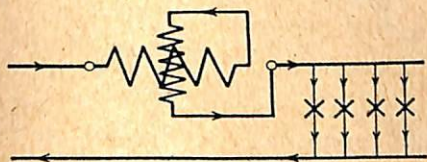


Bild 249.

Schaltung für Stromstärken bis 5 A

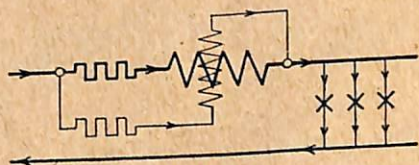


Bild 250.

Schaltung für höhere Stromstärken

**Strommessung.** Beim Strommesser für Stromstärken bis höchstens 5 A können feste und bewegliche Spulen in Reihe geschaltet werden (Bild 249). Für höhere Stromstärken wird die bewegliche Spule zur festen Spule neben- (parallel) geschaltet (Bild 250). Die Messung hoher Stromstärken erfolgt bei Gleichstrom durch Verwendung getrennter Nebenwiderstände und bei Wechselstrom unter Benutzung von Stromwandlern.

Die Spulen sind entweder rechteckig oder ringförmig. Bild 251 zeigt ein elektrodynamisches Meßwerk der Firma Hartmann & Braun mit ringförmigen Spulen für Strom- und Spannungsmesser.

**Spannungsmessung.** Für Spannungsmessungen werden feste und bewegliche Spulen mit einem Vorwiderstand in Reihe geschaltet.

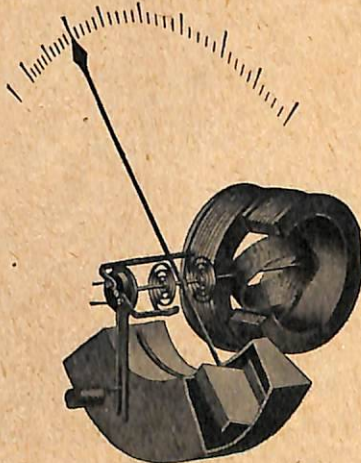



Bild 251

Eisenloses elektrodynamisches Meßwerk mit ringförmigen Spulen



### 9. Das Induktionsmeßgerät

Sinnbild , Stromartzeichen ~

Das Induktionsmeßgerät wird auch Drehfeldmeßgerät genannt. Der Erfinder des Drehfelds ist der Italiener Ferraris. Infolgedessen wird das Meßgerät auch als Ferraris-Meßgerät bezeichnet.

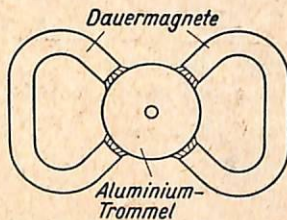
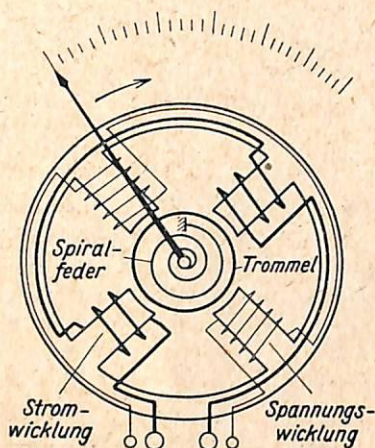


Bild 252. Induktionsmeßwerk

halb der Bohrung des Polringes ist ein zylindrischer Eisenkern fest angeordnet. Dieser Eisenkern ist ebenfalls aus einzelnen dünnen Blechen zusammengesetzt. Im Luftspalt zwischen den Polkernen und dem Mittelkern ist eine Aluminiumtrommel leicht drehbar gelagert. Mit der Trommelachse ist der Zeiger verbunden. Spiralfedern halten dem Drehmoment der Trommel das Gleichgewicht.

Auf jedem Polkern befindet sich eine Spule. Je zwei gegenüberliegende Spulen sind in Reihe geschaltet. Dadurch entstehen zwei getrennte Wicklungen.

**Wirkungsweise.** Sind die Ströme in den beiden Polwicklungen in der Phase gegeneinander verschoben, dann entsteht zwischen den Polen ein magnetisches Drehfeld. Dieses Drehfeld erzeugt in der Aluminiumtrommel Wirbelströme. Durch die Einwirkung des Drehfeldes auf die Ströme in der Trommel wird die Trommel wie

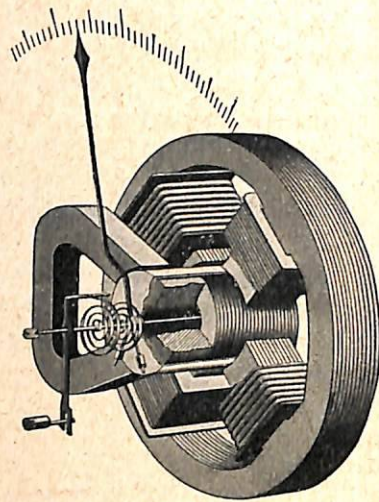


Bild 253. Aufbau des Induktionsgeräts mit Wirbelstromdämpfung

**Aufbau.** Das Induktionsmeßgerät (Bild 252 und 253) besteht aus einem Polring mit vier vorstehenden Polkernen. Polring und Polkerne sind zur Vermeidung von Wirbelströmen aus einzelnen Blechen zusammengesetzt. Inner-



der Kurzschlußläufer eines Drehstrommotors in der Richtung des Drehfeldes so weit gedreht, bis die zunehmende Spannung der Spiralfedern dem Drehmoment der Trommel das Gleichgewicht hält.

Eine Magnetdämpfung bewirkt schwingungsfreie Einstellung der Trommel und des mit dieser verbundenen Zeigers. Das Magnetfeld für die Dämpfung wird durch zwei kräftige, hufeisenförmige Dauermagnete erzeugt, die den verlängerten Teil der Trommel umfassen und bei der Drehung der Trommel in dieser Wirbelströme erzeugen, die eine Bremsung der Drehung bewirken.

**Verwendung.** Induktionsmeßgeräte sind nur für Wechselstrom zu verwenden. Sie werden als Strommesser, Spannungsmesser und Leistungsmesser geliefert. Bei Strom- und Spannungsmessern ist die Skalenteilung ungleich (quadratisch, Bild 254), bei Leistungsmessern dagegen gleichmäßig (Bild 261).



Bild 254.

Skala für Induktions- (Ferraris-) Strommesser

Bei Strom- und Spannungsmessern ist die Skalenteilung ungleich (quadratisch, Bild 254), bei Leistungsmessern dagegen gleichmäßig (Bild 261).

## 10. Leistungsmessung

Die elektrische Leistung eines Gleichstromes erhält man durch Multiplikation der Spannung in V mit der Stromstärke in A. Infolgedessen genügen zur Bestimmung der Leistung ein Spannungs- und ein Strommesser. Besondere Leistungsmesser (Wattmeter) sind nicht erforderlich.

Bei Wechselstrom ergibt das Produkt aus Volt mal Ampere nur dann die Leistung in Watt, wenn zwischen Spannung und Stromstärke keine Phasenverschiebung besteht (Belastung induktionsfrei). Ist die Belastung induktiv (Motoren, Umspanner, Magnetspulen), dann ist der Strom  $I$  gegenüber der Spannung  $U$  um den Winkel  $\varphi$  verschoben. Für die Berechnung der Wirkleistung kommt aber nur der Teil des Stromes  $I$  in Frage, der mit der Spannung in gleicher Richtung liegt. Wie man die Größe dieses Wirkstromes findet, ergibt sich aus Bild 255. Die Größe des

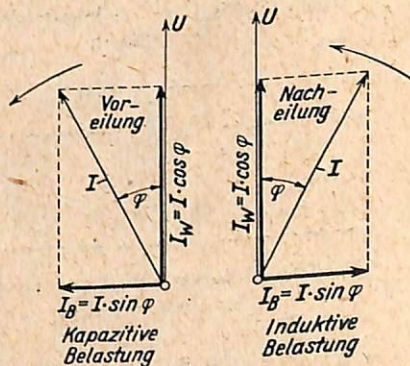


Bild 255. Bestimmung der Größe des Wirkstromes

Wirkstromes wird auch Wirkkomponente genannt. Sie berechnet sich aus  $I_W = I \cdot \cos \varphi$ . Durch Multiplikation der Spannung  $U$  mit der Wirkstromstärke  $I \cdot \cos \varphi$  erhält man die Wirkleistung in Watt, so daß  $N = U \cdot I \cdot \cos \varphi$  für Einphasenstrom und  $N = U \cdot I \cdot \cos \varphi \cdot 1,73$  für Drehstrom gilt. Die untere waagerechte Komponente des Gesamtstromes  $I$  ist mit  $I_B$  bezeichnet. Weil sie für die Erzeugung der Leistung nicht in Frage kommt, wird sie Blindstrom genannt. Sie berechnet sich aus  $I_B = I \cdot \sin \varphi$ . Bei induktiver Belastung dient der Blindstrom



zur Erzeugung des magnetischen Feldes bei den angeschlossenen Motoren, Umspannern und Magnetspulen. Bei kapazitiver Belastung dient der Blindstrom zur Aufladung der angeschlossenen Kapazitäten (Kabel, lange Leitungen usw.).

Zur Messung der Wirkleistung  $N = U \cdot I \cdot \cos \varphi$  sind entweder ein Strommesser, ein Spannungsmesser und ein Phasenmesser oder nur ein Leistungsmesser (Wattmeter) erforderlich.

**Der elektrodynamische Leistungsmesser.** Für Leistungsmessungen ist das elektrodynamische Meßwerk (Bild 248

und 256) besonders geeignet. Die feste Feldspule dient als Stromspule und wird wie ein Strommesser mit den Stromverbrauchern in Reihe geschaltet. Die drehbare Zeigerspule dient als Spannungsspule und wird zur Leistungsmessung bei Gleich- und Wechselstrom wie ein Spannungsmesser zu den Stromverbrauchern neben- (parallel) geschaltet. Die grundsätzliche Schaltung eines Leistungsmessers für Einphasenstrom zeigt Bild 257. Hierin bedeutet  $R$  den Vorwiderstand für die Spannungsspule. Handelt es sich um sehr genaue Messungen, dann wird zweckmäßig das astatische elektrodynamische Meßwerk (Bild 258) verwendet. Dieses Meßwerk besitzt zwei Spulensysteme, die so geschaltet sind, daß sich alle äußeren Einflüsse, die durch fremde magnetische Felder entstehen können, gegeneinander aufheben. Dieses Meßwerk läßt sich bei veränderter Schaltung auch als

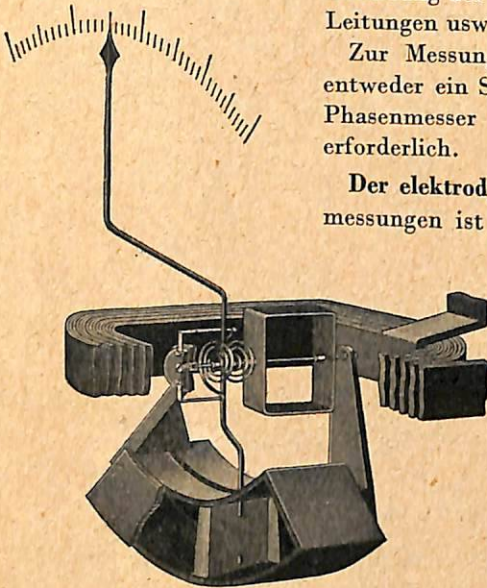


Bild 256. Eisenloses elektrodynamisches Meßwerk

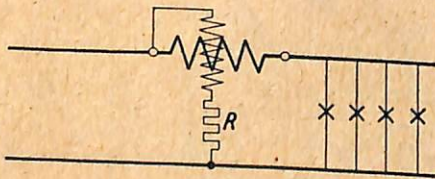


Bild 257. Schaltung des Leistungsmessers für Einphasenstrom

Doppelleistungsmesser für ungleich belastete Phasen bei Drehstrom verwenden. Außer den Leistungsmessern mit eisenlosem Meßwerk werden auch elektrodynamische Meßgeräte als Leistungsmesser mit eisengeschlossenem Meßwerk (Sinnbild  $\oplus$ ) gebaut (Bild 259). Das eisengeschlossene Meßwerk unterscheidet sich vom eisenlosen dadurch, daß die von den Feldspulen erzeugten Kraftlinien auf dem größten Teil ihres Weges durch Eisen verlaufen. Die Verwendung von Eisen hat zur Folge, daß das magnetische Feld erheblich verstärkt wird, wodurch ein sehr kräftiges Drehmoment bei der Zeigerspule entsteht.

Außerdem bietet das Eisen des Meßwerks einen guten Schutz gegen fremde magnetische Felder (Strefelder).



Eisengeschlossene Meßwerke lassen sich wegen ihrer Unempfindlichkeit gegen Streufelder zu mehreren in einem gemeinsamen Gehäuse miteinander kuppeln. Ein solches Meßgerät kann zum unmittelbaren Messen der Drehstromleistung bei 3- und

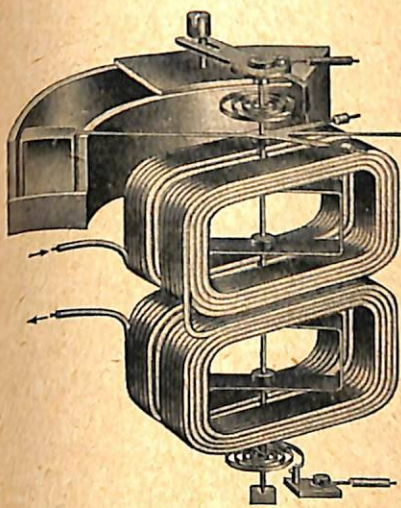


Bild 258.  
Astatisches  
elektrodynamisches  
Meßwerk

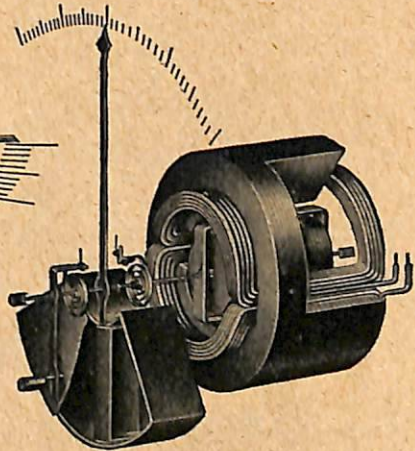


Bild 259. Eisengeschlossenes  
elektrodynamisches Meßwerk

4-Leiter-Anlagen benutzt werden. Für Drehstrom-3-Leiter-Anlagen genügen 2 und für Drehstrom-4-Leiter-Anlagen 3 in einem Gehäuse gekuppelte Meßwerke.

Elektrodynamische Leistungsmesser haben gleichmäßige Skalenteilung (Bild 260).

Beim Anschließen tragbarer Leistungsmesser ist darauf zu achten, daß die Spannung zwischen der Stromspule und der Spannungsspule möglichst gering ist (Bild 264). Bei falschem Anschluß (Bild 265) kann das Meßgerät leicht dadurch



Bild 260.

Skala für elektrodynamischen Leistungsmesser

beschädigt werden, daß die Spannung die Isolation zwischen der Strom- und Spannungsspule durchschlägt. Auch sollen alle Spannungsleitungen, die mit der Stromspule nicht unmittelbar verbunden sind, gesichert werden.

**Drehfeldleistungsmesser.** Bei den Leistungsmessern mit Drehfeldmeßgerät (Induktionsmeßgerät) ist die eine Polwicklung als Stromwicklung aus dickem Draht hergestellt, während die andere Wicklung als Spannungswicklung aus dünnem Draht besteht (Bild 252). Die zur Erzeugung des Drehfeldes notwendige Phasenverschiebung um  $90^\circ$  wird durch eine Kunstschaltung unter Verwendung von Drosselspulen und Widerständen erzeugt. Bei niedrigen Spannungen sind diese Zubehör-



teile im Gehäuse untergebracht. Bei höheren Spannungen werden besondere Meßwandler verwendet.

Für ungleich belastete Drehstromanlagen werden zwei oder drei Meßwerke miteinander gekuppelt in einem Gehäuse untergebracht.



Bild 261.

Skala für Drehfeld- (Ferraris-) Leistungsmesser

grundsätzliche Schaltungen. In der Schaltung nach Bild 262 ist die Spannungsspule, in der Richtung des Hauptstromes gesehen, vor der Hauptstromspule abzweigend. Der Leistungsmesser mißt bei dieser Schaltung den Leistungsverbrauch

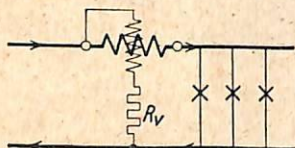


Bild 262. Spannungsspule vor der Hauptstromspule abzweigend

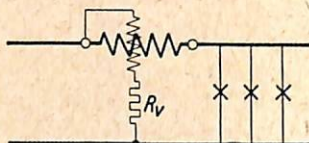


Bild 264. Richtiger Anschluß des Vorwiderstandes

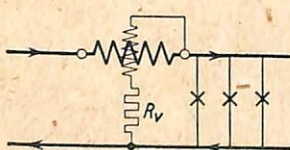


Bild 263. Spannungsspule hinter der Hauptstromspule abzweigend

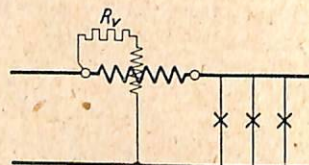


Bild 265. Falscher Anschluß des Vorwiderstandes

den Leistungsverbrauch dieser Schaltung der Hauptstromspule mit. Bedeutet  $I_H$  den durch die Stromspule fließenden Hauptstrom und  $R_H$  den Widerstand der Hauptstromspule, dann stellt sich der Leistungsverbrauch der Hauptstromspule auf  $N_H = I_H^2 \cdot R_H$  (Watt). Um diesen Betrag ist die vom Leistungsmesser angegebene Leistung zu groß. Nur bei kleinen Leistungen fällt dieser mitgemessene Eigenverbrauch ins Gewicht und muß von dem vom Leistungsmesser angegebenen Wert abgezogen werden. In Schaltung Bild 263 mißt der Leistungsmesser den Leistungsverbrauch in der Spannungsspule mit. Dieser Leistungsverbrauch berechnet sich zu  $N_S = I_S^2 \cdot R_S$  (Watt), wenn  $I_S$  die Stromstärke in der Spannungsspule und  $R_S$  den Widerstand des Spannungskreises bedeutet. Dieser Leistungsverbrauch ist ebenfalls nur gering und braucht nur beim Messen kleiner Leistungen von der Angabe des Leistungsmessers abgezogen werden.

**Richtiger und falscher Anschluß der Spannungsspulen.** Bild 264 zeigt den richtigen und Bild 265 den falschen Anschluß. Bei der Schaltung Bild 265 ist der Vorwiderstand der Spannungsspule mit dem freien Ende an den gleichen Pol wie die Stromspule angeschlossen. Das freie Ende der Spannungsspule liegt am zweiten Pol. Bei

Drehfeldleistungsmesser (Ferraris-Leistungsmesser) haben gleichmäßige Skalenteilung (Bild 261).

**Grundsätzliche Schaltungen der Leistungsmesser.** Bei den Leistungsmessern unterscheidet man zwei

unterscheidet man zwei



dieser Schaltung kann zwischen benachbarten Teilen der festen und beweglichen Spule die volle Betriebsspannung auftreten. Infolge der gedrängten Bauart des Meßwerks besteht die Gefahr, daß an den gefährdeten Stellen durch die hohe Spannung die Isolation beider Spulen durchschlagen wird. Diese Gefahr ist bei der Schaltung nach Bild 264 vermieden. Als Grundsatz gilt, den Spannungskreis immer so anzuschließen, daß die Spannung zwischen der festen und beweglichen Spule möglichst gering ist.

Bild 266 zeigt den direkten Anschluß eines Leistungsmessers an Niederspannung (direkte Schaltung). In Bild 267 ist ein Leistungsmesser indirekt, d. h. über Strom- und Spannungswandler an Hochspannung angeschlossen, während in Bild 268 der Leistungsmesser halbindirekt, d. h. unter Vorschaltung eines Widerstandes für die Spannungsspule und eines Stromwandlers für die Stromspule angeschlossen ist.

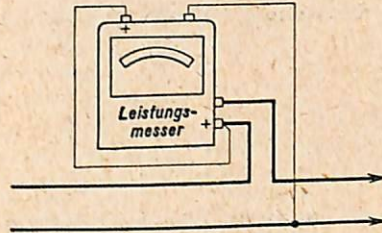


Bild 266. Direkte Schaltung (Niederspannung)

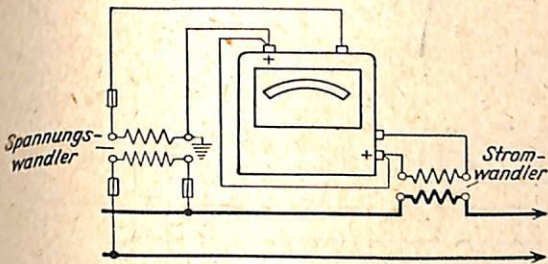


Bild 267. Indirekte Schaltung (Hochspannung)

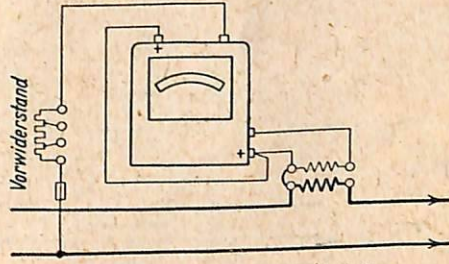


Bild 268. Halbindirekte Schaltung

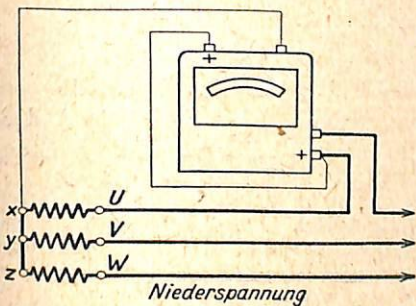


Bild 269.

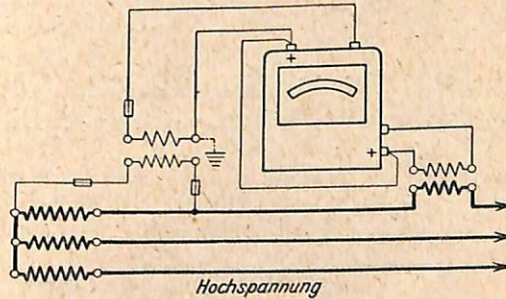


Bild 270.

Anschluß des Leistungsmessers bei zugänglichem Sternpunkt

Bei den Schaltungen in den Bildern 269 und 270 ist der Sternpunkt zugänglich. Der Leistungsmesser gibt die Leistung einer Phase an. Man erhält die gesamte Dreiphasen- oder Drehstromleistung, wenn man die Angabe des Leistungsmessers mit 3 multi-



pliziert, so daß  $N = 3 \cdot N_W$  ist, wenn  $N$  die gesamte Drehstromleistung und  $N_W$  die Angabe des Leistungsmessers bedeutet.

Bei den Schaltungen in Bild 271 und Bild 272 ist der Sternpunkt unzugänglich. Es muß in diesem Falle ein Leistungsmesser mit eingebautem oder ein Leistungsmesser mit getrenntem Sternpunktwiderstand verwendet werden.

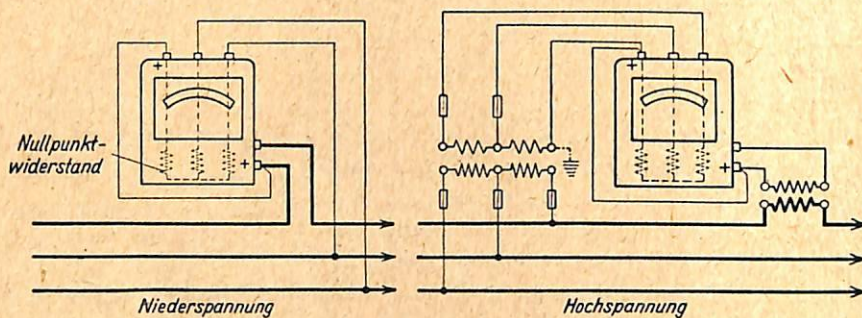


Bild 271. Bild 272.  
Anschluß des Leistungsmessers bei unzugänglichem Sternpunkt

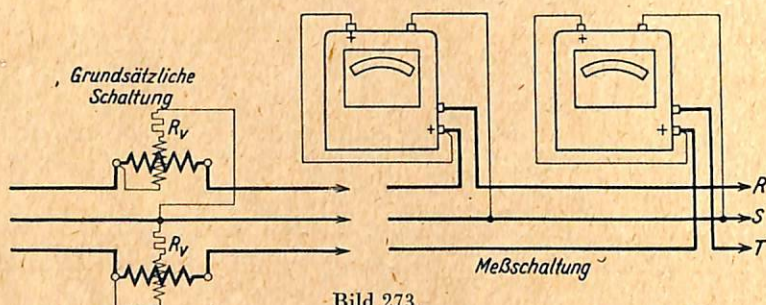


Bild 273.  
Zwei-Leistungsmesserschaltung

Bei der Zwei-Leistungsmesserschaltung in Bild 273 erhält man die gesamte Dreiphasen- oder Drehstromleistung durch Zusammenzählen (Addition) der Angaben beider Leistungsmesser, so daß  $N = N_1 + N_2$  ist.

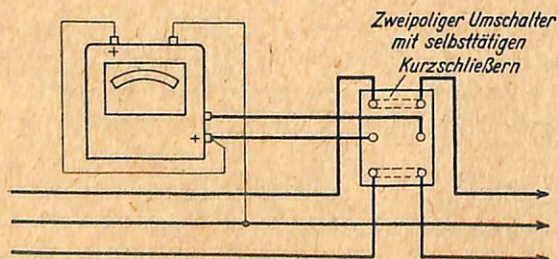


Bild 274. Leistungsmessung mit einem Leistungsmesser und Sonderumschalter

Bei dieser Schaltung ist zu beachten, daß bei induktiver Belastung und einer Phasenverschiebung von  $60^\circ$  ( $\cos \varphi = 0,5$ ) zwischen den Strömen und den zugehörigen Sternspannungen nur der eine Leistungsmesser ausschlägt, während der Zeiger des zweiten auf Null stehen bleibt, also keinen Ausschlag zeigt. Die gesamte Drehstromleistung ergibt sich dann aus der Angabe des



einen Leistungsmessers. Wird die Phasenverschiebung noch größer als  $60^\circ$  ( $\cos \varphi$  kleiner als 0,5), dann schlägt der eine Leistungsmesser nach der verkehrten Seite aus. Seine Leistung ist jetzt negativ. In diesem Falle müssen die Anschlüsse der Spannungsspule dieses Leistungsmessers miteinander vertauscht werden. Die Gesamtleistung des Drehstromsystems ist jetzt nicht mehr gleich der Summe, sondern gleich der Differenz beider Leistungsmessersangaben. Man muß jetzt zur Feststellung der gesamten Drehstromleistung die Angabe des Leistungs-

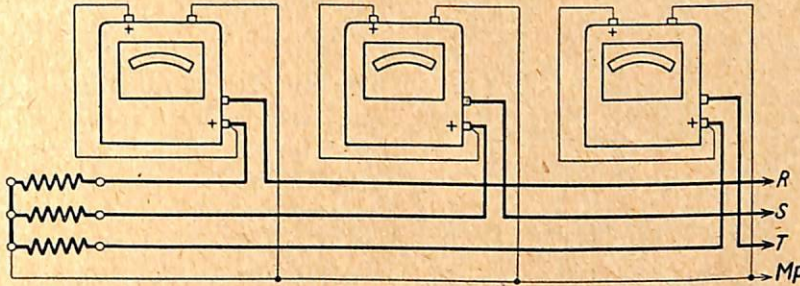


Bild 275. Drei-Leistungsmesserschaltung für Drehstrom-Vierleiternetz

messers mit umgeschaltetem Spannungskreis von der Angabe des anderen Leistungsmessers abziehen, so daß, wenn  $N_1$  die Leistungsangabe des umgeschalteten Leistungsmessers bedeutet,  $N = N_2 - N_1$  ist. In Betrieben mit stark schwankender Belastung macht das gleichzeitige Ablesen beider Leistungsmesser Schwierigkeiten. In solchen Fällen benutzt man den Doppelleistungsmesser. Dieser Leistungsmesser besitzt zwei durch eine gemeinsame Drehachse miteinander gekuppelte Meßwerke. Der Zeiger zeigt die Gesamtleistung bei gleicher oder ungleicher Belastung an.

Die Schaltung nach Bild 274 kommt nur in solchen Anlagen in Frage, in denen keine häufigen und starken Belastungsschwankungen auftreten (ruhiger Betrieb). Der Umschalter muß mit selbsttätigen Kurzschließern versehen sein, damit beim Umschalten von der einen auf die andere Phase keine Unterbrechung entsteht.

Zum Messen der Leistung in einem Drehstrom-Vierleiternetz genügen drei Leistungsmesser (Bild 275).

**Blindleistungsmesser.** Außer den vorbeschriebenen Leistungsmessern zum Messen der Wirkleistung in W gibt es auch Leistungsmesser zum Messen der Blindleistung ( $N_B = U \cdot I \cdot \sin \varphi$  bei Einphasenstrom und  $N_B = 1,73 \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi$  bei Drehstrom). Sie dienen zur Feststellung des Blindverbrauchs in Var (BW). Die Blindleistung ist bei schlechtem (kleinem) Leistungsfaktor groß und bei gutem (hohem) Leistungsfaktor klein. Sie kann in Betrieben mit einer größeren Anzahl von Asynchronmotoren erhebliche Werte annehmen. Weil sie unter Umständen eine wesentliche Belastung der Generatoren, Umspanner und Zuführungsleitungen verursacht, wird sie in solchen Fällen bei der Berechnung des Preises für die bezogene elektrische Arbeit (kWh) mitberücksichtigt.

## 11. Meßgeräte zum Messen des Leistungsfaktors

Beim Einphasenstrom berechnet sich die Wirkleistung aus  $N = U \cdot I \cdot \cos \varphi$ , so daß  $\cos \varphi = \frac{N}{U \cdot I}$  ist. Zur Bestimmung des Leistungsfaktors  $\cos \varphi$  hat man demnach die mit dem Leistungsmesser gemessene Wirkleistung  $N$  durch das Produkt aus der mit einem Spannungsmesser gemessenen Spannung  $U$  und der mit einem Strommesser gemessenen Stromstärke  $I$  zu teilen.



Sehr häufig ist es aus betriebstechnischen Gründen notwendig, den Leistungsfaktor jederzeit ohne besondere Messung und Rechnung direkt ablesen zu können. Diesem Zweck dient der Leistungsfaktormesser (Phasenmesser). Solche direkt zeigende Leistungsfaktormesser werden unter anderen von den Firmen Hartmann & Braun und Siemens & Halske gebaut.

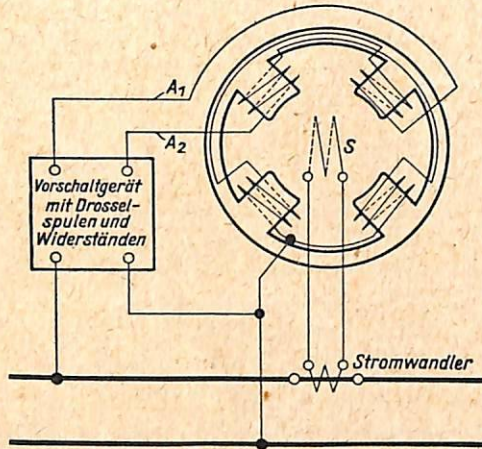


Bild 276. Anschluß des Leistungsfaktormessers mit Vorschaltgerät

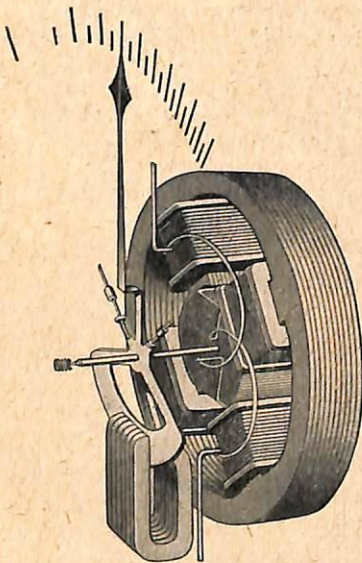


Bild 277. Leistungsfaktormesser mit Wirbelstromdämpfung

**Aufbau.** Das Meßwerk des Leistungsfaktormessers der Firma Hartmann & Braun besteht aus einem eisengeschlossenen elektrodynamischen Meßwerk in besonderer Schaltung (Bild 276 und 277). Der Eisenkörper ist aus einzelnen Blechen zusammengesetzt und hat die Form eines Ringes mit vier vorstehenden Polansätzen. Die Polansätze sind bewickelt. Je zwei gegenüberliegende Spulen dieser Polwicklung sind in Reihe geschaltet. Beide Wicklungen dienen als Spannungswicklungen.

Die unteren Enden beider Wicklungen sind an die eine Netzleitung direkt angeschlossen. Die oberen Enden beider Wicklungen sind über eine Zusammensetzung von Drosselspulen und induktionsfreien Widerständen mit beiden Netzleitungen verbunden.

Die Stromspule  $S$  ist zwischen den Polansätzen drehbar gelagert. Ihre Enden sind an die Sekundärwicklung eines Stromwandlers angeschlossen, der in das Gehäuse des Meßgeräts eingebaut ist. Bei diesem Meßwerk ist im Gegensatz zum üblichen elektrodynamischen Meßwerk nicht die Spannungs-, sondern die Stromspule drehbar gelagert.

**Wirkungsweise.** Der Strom im Spannungskreis  $A_1$  muß gegenüber dem Strom im Spannungskreis  $A_2$  um  $90^\circ$  verschoben sein. Diesem Zweck dienen die Drosselspulen und die induktionsfreien Widerstände in den Spannungskreisen. Beim Einschalten des Meßwerks nimmt die vom Strom durchflossene drehbare Spule  $S$  eine Lage ein, die nur von der Phasenverschiebung zwischen Stromstärke und Spannung im Netz abhängt. Die Augenblickswerte von Netzstromstärke und Netzspannung haben auf die Lage der Drehspule keinen Einfluß. Bei diesem Meßwerk fehlt die Federrichtkraft. Infolgedessen hat der Zeiger beim stromlosen Meßgerät keine bestimmte Ruhelage.

Die Augenblickswerte von Netzstromstärke und Netzspannung haben auf die Lage der Drehspule keinen Einfluß. Bei diesem Meßwerk fehlt die Federrichtkraft. Infolgedessen hat der Zeiger beim stromlosen Meßgerät keine bestimmte Ruhelage.



Eine kräftige Wirbelstromdämpfung, die aus einem unterteilten Dauermagnet und einer mit der Zeigerachse verbundenen Aluminiumscheibe besteht (Bild 277), bewirkt schwingungsfreie Einstellung des Zeigers. Die Teilung der Skala beim Leistungsfaktormesser (Phasenmesser) ist ungleichmäßig (Bild 278).

Der Leistungsfaktormesser der Firma Siemens & Halske hat ein Kreuzspulmeßwerk. Bei diesem ist die Stromspule fest angeordnet, während die beiden Spannungsspulen drehbar gelagert sind.



Bild 278. Skala für Leistungsfaktormesser (Phasenmesser)

## 12. Frequenzmesser (Vibrationsmeßgerät)

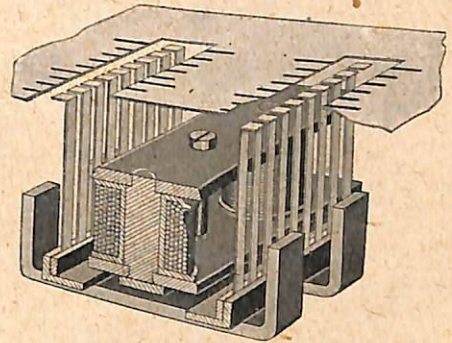
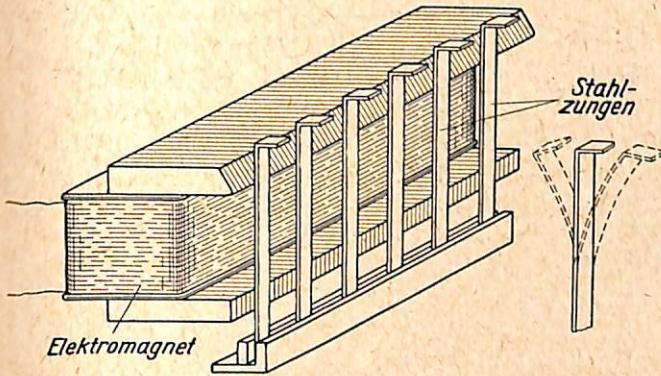


Bild 280. Zungenfrequenzmesser mit zwei Zungenreihen

Bild 279. Zungenfrequenzmesser mit einer Zungenreihe

Zum Messen der Frequenz (Per/s) dienen Frequenzmesser. Man unterscheidet Zungenfrequenzmesser und Zeigerfrequenzmesser. Am gebräuchlichsten ist der Zungenfrequenzmesser.

### Der Zungenfrequenzmesser

Sinnbild  $\nabla$ , Stromartzeichen  $\sim$

**Aufbau.** Das Meßwerk des Zungenfrequenzmessers der Firma Hartmann & Braun besteht aus einem Elektromagneten und einer Anzahl Zungen aus dünnem Stahlblech, die vor dem Elektromagneten angeordnet sind (Bild 279). An den oberen Enden der Zungen sind kleine weiße Plättchen angebracht. Jede einzelne Zunge ist auf eine bestimmte Eigenschwingungszahl (Frequenz) abgestimmt. Bild 280 zeigt das Meßwerk eines Zungenfrequenzmessers mit zwei Reihen Zungen, Bild 281 die Ansicht eines Frequenzmessers.

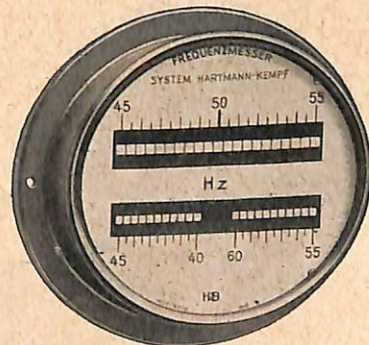
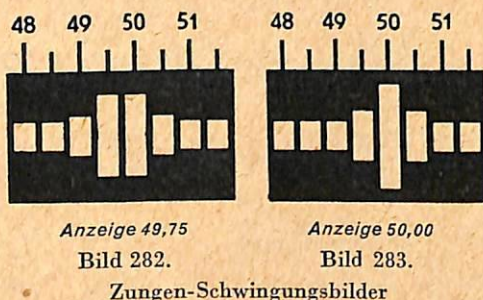


Bild 281. Ansicht eines Frequenzmessers



**Wirkungsweise.** Fließt Wechselstrom durch die Wicklung des Elektromagneten, dann entsteht ein magnetischer Fluß, dessen Kraftlinien durch den Eisenkern des Magneten und die Stahlzungen verlaufen. Dieser magnetische Fluß wechselt seine Richtung ebensooft wie der diesen Fluß erzeugende Wechselstrom.



einige benachbarte Zungen mit kleinerem Ausschlag mitschwingen. Auf diese Weise entsteht ein übersichtliches Schwingungsbild, aus dem auch die Zwischenfrequenz

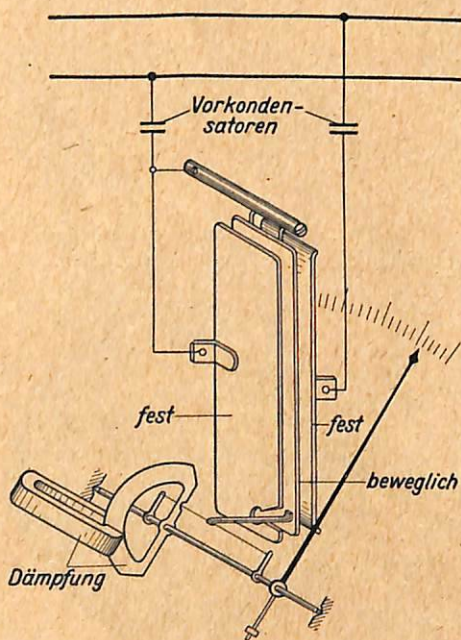


Bild 284. Elektrostatistischer Spannungsmesser mit Wirbelstromdämpfung

Durch diesen Wechselfluß werden die Stahlzungen wechselweise angezogen und abgestoßen. Die Wirkung der Anziehungen und Abstoßungen ist auf diejenige Stahlzunge am größten, deren Eigenschwingungszahl mit der Wechselzahl (doppelten Frequenz) des Wechselstromes übereinstimmt. Diese Zunge wird voll ausschlagen. Die Zungenzahl ist so gewählt, daß außer der voll ausschlagenden Zunge noch

abgelesen werden kann. In Bild 282 schwingen die Zungen 50 und 49,5 gleich stark. In diesem Fall hat der Wechselstrom eine Frequenz, die in der Mitte zwischen 50 und 49,5, d. h. bei 49,75 liegt.

Beim Schwingungsbild in Bild 283 schwingt nur die Zunge 50 voll aus, während die rechts und links neben dieser Zunge befindlichen Zungen 49,5 und 50,5 schwächer mitschwingen. Die genaue Frequenz beträgt in diesem Fall 50 Per/s.

Der Eigenverbrauch des Zungenfrequenzmessers stellt sich auf etwa 3 VA.

### 13. Elektrostatistisches Meßgerät

Sinnbild  $\frac{\perp}{\downarrow}$ , Stromartzeichen —  $\sim$

Das elektrostatistische Meßgerät dient als Spannungsmesser und wird hauptsächlich zum Messen hoher Wechselspannungen benutzt.

**Aufbau.** Der elektrostatistische Spannungsmesser der Firma Hartmann & Braun (Bild 284) besteht aus drei senkrecht angeordneten Metallplatten. Die beiden äußeren Platten sind fest. Die zwischen diesen beiden festen Platten hängende mittlere Platte



ist beweglich. Die Bewegung, die die mittlere Platte beim Messen ausführt, wird auf das Zeigerwerk übertragen. Zum Zwecke der Dämpfung ist auf der Zeigerachse eine Aluminiumscheibe befestigt, die sich zwischen den Polen eines hufeisenförmigen Dauermagneten bewegt. Die eine feste Platte ist mit dem einen, die zweite feste Platte mit dem anderen Pol der zu messenden Spannung verbunden. Die bewegliche mittlere Platte steht mit einer der festen Platten in leitender Verbindung.

**Wirkungsweise.** Die Wirkungsweise des elektrostatischen Meßwerks beruht auf der Abstoßung gleichnamiger und der Anziehung ungleichnamiger Elektrizitätsmengen. Beim Anschluß des Meßwerks an die zu messende Spannung werden die bewegliche und die mit dem gleichen Spannungspol verbundene feste Platte gleichnamig geladen. Beide Platten stoßen sich ab. Die zweite feste Platte, die an den zweiten Spannungspol angeschlossen ist, erhält die entgegengesetzte Ladung wie die bewegliche Platte. Infolgedessen ziehen sich diese beiden Platten gegenseitig an. Mithin wird die bewegliche Platte auf der einen Seite abgestoßen und auf der anderen Seite angezogen. Die hierbei entstehende Bewegung wird auf das Zeigerwerk übertragen. Die Stärke der anziehenden und abstoßenden Kräfte hängt von dem Produkt der Plattenladungen ab. Die Ladungen steigen und fallen im gleichen Verhältnis wie die Spannung steigt und fällt. Infolgedessen ist die auf die bewegliche Platte ausgeübte Kraftwirkung vom Quadrat der angelegten Spannung abhängig.

**Verwendung.** Für Wechselspannungen bis 120 000 V werden die elektrostatischen Spannungsmesser der Firma Hartmann & Braun in einem vollständigen Isoliergehäuse geliefert. Nur die Spannungsmesser im Metallgehäuse können für Gleich- und Wechselstrom verwendet werden. Die unter dem Namen Multizellularspannungsmesser gelieferten Meßgeräte sind für Gleich- und Wechselspannungen bis 1500 V und beim Anschluß an kapazitive Spannungsteiler für Wechselspannungen bis 1 Million V zulässig.

#### 14. Widerstandsmessung

Widerstandsmessungen werden am einfachsten mit Gleichstrom ausgeführt. Schließt man den zu messenden Widerstand an Gleichstrom an, und mißt man mit Hilfe eines Strommessers die Stärke des durch den Widerstand fließenden Stromes  $I$  und gleichzeitig mit einem Spannungsmesser die an den Klemmen des Widerstandes herrschende Spannung  $U$ , dann berechnet sich der Widerstand  $R$  aus  $R = \frac{U}{I}$  ( $\Omega$ ).

Wenn es sich um genaue Messungen oder um Messungen von Widerständen mit großem oder sehr kleinem Widerstand handelt, werden für diese Messungen zweckmäßig sogenannte Meßbrücken verwendet.

Die Messung von Widerständen kann auch mit unmittelbar zeigendem Widerstandsmesser erfolgen.

**Widerstandsmessung mittels Meßbrücke.** In Bild 285 sind vier Widerstände so miteinander verbunden, daß ein geschlossenes Viereck entsteht. An die beiden Eckpunkte  $a$  und  $c$  ist eine Batterie (Taschenlampenbatterie) angeschlossen. Das Gal-



vanometer  $G$  liegt zwischen den beiden Eckpunkten  $b$  und  $d$ . Steht der Zeiger des Galvanometers auf Null, dann fließt durch das Galvanometer kein Strom. In diesem Falle besteht zwischen den Anschlußpunkten  $b$  und  $d$  des Galvanometers kein Spannungsunterschied, so daß die Spannung zwischen den Punkten  $a$  und  $b$  gleich der Spannung zwischen den Punkten  $a$  und  $d$  ist. Ebenso ist die Spannung zwischen den Punkten  $b$  und  $c$  gleich der Spannung zwischen den Punkten  $d$  und  $c$ .

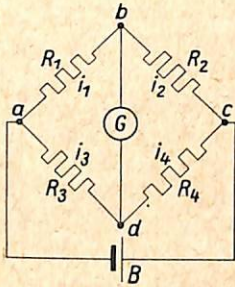


Bild 285.  
Wheatstone-Meßbrücke

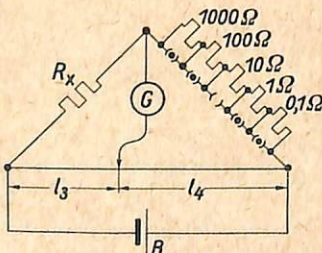
Mithin ist  $i_1 \cdot R_1 = i_3 \cdot R_3$  und  $i_2 \cdot R_2 = i_4 \cdot R_4$ . Durch Division der ersten Gleichung durch die zweite ergibt sich  $\frac{i_1 \cdot R_1}{i_2 \cdot R_2} = \frac{i_3 \cdot R_3}{i_4 \cdot R_4}$ . Nun ist bei stromlosem Galvanometer  $i_1 = i_2$  und  $i_3 = i_4$ , so daß  $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$  wird. Hieraus ergibt sich  $R_1 = R_2 \cdot \frac{R_3}{R_4}$ . Mit dieser Brückenschaltung läßt sich also mit Hilfe von drei bekannten Widerständen die Größe des vierten unbekanntes Widerstandes ermitteln.

Man geht bei der Messung so vor, daß man erst ein bestimmtes Widerstandsverhältnis  $\frac{R_3}{R_4}$  einstellt und dann den Vergleichswiderstand  $R_2$  so lange ändert, bis der Zeiger des Galvanometers auf Null steht.

Um die Rechnung zu vereinfachen, wird der Wert  $\frac{R_3}{R_4}$  als dekadische Zahl (z. B. 10, 1, 0,1) gewählt. In diesem Falle braucht man zur Bestimmung von  $R_1$  den Widerstand  $R_2$  nur mit einer feststehenden Zahl (Konstante) zu multiplizieren.

Diese Brückenschaltung wird Wheatstone-Meßbrücke genannt.

**Schleifdrahtmeßbrücke.** Nach der Brückengleichung  $R_1 = R_2 \cdot \frac{R_3}{R_4}$  braucht die Größe der Widerstände  $R_3$  und  $R_4$  nicht bekannt zu sein. Es genügt vielmehr, wenn das Verhältnis von  $R_3$  zu  $R_4$  bekannt ist. Infolgedessen können an Stelle der Widerstände  $R_3$  und  $R_4$  in Ohm auch Längen  $l_3$  und  $l_4$  in mm gewählt werden.



Schleifdraht-Meßbrücke

Bild 286.  
Schleifdrahtmeßbrücke

Bei der Schleifdrahtmeßbrücke (Bild 286) wird an Stelle der Widerstände  $R_3$  und  $R_4$  ein blanker Schleifdraht verwendet, der in seiner ganzen Länge aus genau gleichmäßigem Werkstoff besteht und überall gleichmäßigen Querschnitt hat (kalibrierter Schleifdraht). Über diesen Schleifdraht schleift ein verschiebbarer Kontakt (Schleifer), durch den der Schleifdraht in die beiden Längen  $l_3$  und  $l_4$  geteilt wird. Neben dem Schleifdraht befindet sich eine Millimeterskala zum Ablesen der Werte für  $l_3$  und  $l_4$ .

Als Vergleichswiderstand  $R_2$  dient einer der festen Widerstände 0,1; 1; 10; 100 oder 1000  $\Omega$ . Zur Vermeidung von Meßfehlern muß der Vergleichswiderstand von der gleichen Größenordnung wie der zu messende Widerstand sein.



Wird bei der Messung der Schleifer so eingestellt, daß der Zeiger des Galvanometers auf Null steht, dann ist

$$R_x = R_2 \cdot \frac{l_3}{l_4}$$

Die Schleifdrahtmeßbrücke kommt zur Messung von Ohmschen Widerständen von 0,1  $\Omega$  bis 1000  $\Omega$  in Frage.

**Die Walzenmeßbrücke.** Meßgenauigkeit und Meßbereich sind bei der Schleifdrahtmeßbrücke von der Länge des Schleifdrahtes abhängig, das heißt je länger der Schleifdraht, um so genauer die Messung und um so größer der Meßbereich.

Um einen verhältnismäßig langen Schleifdraht auf kleinem Raum unterzubringen, wird der Schleifdraht auf eine Walze aus Isolierstoff aufgewickelt. Der Schleifer schleift bei der Einstellung auf den einzelnen Windungsgängen der Schleifdrahtwendel. Solche Meßbrücken werden Walzenmeßbrücken genannt. Bei ihnen handelt es sich um Schleifdrahtmeßbrücken mit verlängertem Schleifdraht. Sie sind zum schnellen und genauen Messen von Widerständen zwischen 0,1 und 100 000  $\Omega$  geeignet.

Außer den Schleifdrahtmeßbrücken gibt es noch Stöpsel- und Kurbelmeßbrücken.

**Thomson-Meßbrücke.** Zum Messen von kleinen Widerständen zwischen etwa 0,000 01 bis 1  $\Omega$  dient die Thomson-Meßbrücke. Bild 287 zeigt die grundsätzliche Schaltung dieser Meßbrücke. Werden die Widerstände  $R_3$ ,  $R_4$ ,  $R_5$  und  $R_6$  so verändert, daß der Zeiger des Galvanometers auf Null steht, dann ist der gesuchte Widerstand

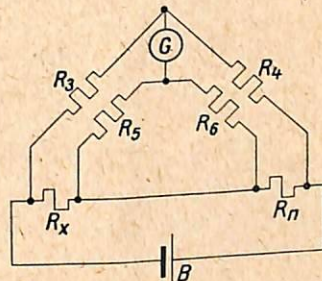
$$R_x = R_n \cdot \frac{R_3}{R_4} \quad \text{oder} \quad R_x = R_n \cdot \frac{R_5}{R_6}$$

**Messung des Erdungswiderstandes.** Die Größe des Erdungswiderstandes von Erdplatten muß von Zeit zu Zeit nachgemessen werden, denn nur dann, wenn der Erdungswiderstand den zulässigen Wert nicht überschreitet, wird durch die Erdung die erforderliche Sicherheit gewährleistet.

Die Größe des Erdungswiderstandes ist außer von der Größe des Erders noch von der Leitfähigkeit des Erdreiches abhängig.

Zum Messen des Erdungswiderstandes werden u. a. Schleifdraht- oder Walzenmeßbrücken verwendet. Die Messung muß jedoch mit Wechselstrom erfolgen, weil beim Messen mit Gleichstrom Veränderungen der Erdplattenoberfläche (Polarisation) entstehen können. Solche Veränderungen bewirken eine Erhöhung des Erdwiderstandes der Erdplatte und führen zu falschen Meßergebnissen.

An Stelle des Galvanometers kommt ein Kopfhörer (Telefon). Als Wechselstromerzeuger dient eine Batterie mit Unterbrecher und Umspanner (Bild 288).



Thomson-Meßbrücke

Bild 287. Thomson-Meßbrücke



Bei der Messung wird der Schleifer so lange verschoben, bis im Kopfhörer kein Ton mehr zu hören ist.

Diese Meßbrücke wird Telefonmeßbrücke genannt.

Bei der üblichen Messung mit der Telefonmeßbrücke sind außer dem zu untersuchenden Erder noch zwei Hilfserder  $H_1$  und  $H_2$  erforderlich (Bild 289). Erder und Hilfserder müssen zur Vermeidung von Meßfehlern mindestens 20 m Abstand haben.

Als Hilfserder werden Stahlrohre etwa  $\frac{1}{2}$  bis 1 m tief ins Erdreich eingetrieben. Das Erdreich um den Hilfserder wird mit Wasser gut angefeuchtet.

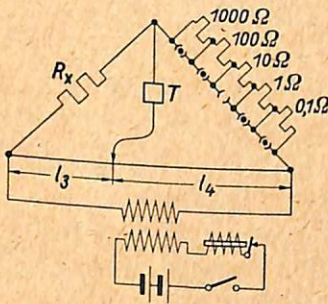


Bild 288. Telefon-Meßbrücke

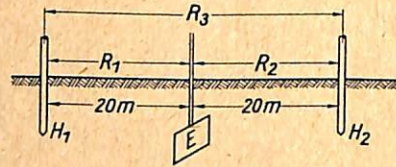


Bild 289. Messung des Erdungswiderstandes

Zur Bestimmung des Erdungswiderstandes sind folgende drei Messungen erforderlich:

1. Messung zwischen  $E$  und  $H_1$  ergibt den Widerstand  $R_1$ .
2. Messung zwischen  $E$  und  $H_2$  ergibt den Widerstand  $R_2$ .
3. Messung zwischen  $H_1$  und  $H_2$  ergibt den Widerstand  $R_3$ .

Hieraus berechnet sich der gesuchte Erdungswiderstand zu

$$R_E = \frac{R_1 + R_2 - R_3}{2}$$

Die Genauigkeit der Bestimmung von  $R_E$  ist wesentlich von der Größe der Erdungswiderstände  $R_{H1}$  und  $R_{H2}$  abhängig. Sie genügt, wenn die Erdungswiderstände der Hilfserden  $R_{H1}$  und  $R_{H2}$  nicht erheblich größer sind als der Erdungswiderstand  $R_E$  der zu untersuchenden Erdplatte. Sind die Erdungswiderstände  $R_{H1}$  und  $R_{H2}$  jedoch erheblich größer als  $R_E$ , dann kann schon durch geringe Meßfehler der für  $R_E$  gefundene Wert erheblich über oder unter dem tatsächlichen Wert für  $R_E$  liegen.

Beispiel: Es wurden gemessen:

$$\text{Messung zwischen } E \text{ und } H_1 = R_1 = 15 \Omega$$

$$\text{Messung zwischen } E \text{ und } H_2 = R_2 = 12 \Omega$$

$$\text{Messung zwischen } H_1 \text{ und } H_2 = R_3 = 17 \Omega.$$

Dann ist

$$R_E = \frac{R_1 + R_2 - R_3}{2} = \frac{15 + 12 - 17}{2} = 5 \Omega.$$



Die Erdungswiderstände  $R_{H_1}$  und  $R_{H_2}$  berechnen sich zu

$$R_{H_1} = \frac{R_1 + R_3 - R_2}{2} = \frac{15 + 17 - 12}{2} = 10 \Omega$$

$$R_{H_2} = \frac{R_2 + R_3 - R_1}{2} = \frac{12 + 17 - 15}{2} = 7 \Omega.$$

Würden sich jedoch bei der Bestimmung von  $R_E$  die Werte  $R_1 = 55 \Omega$ ,  $R_2 = 60 \Omega$  und durch Meßfehler  $R_3 = 110 \Omega$  ergeben, dann wäre  $R_E = \frac{R_1 + R_2 - R_3}{2} = \frac{55 + 60 - 110}{2} = 2,5 \Omega$  oder nur die Hälfte des tatsächlichen Erdungswiderstandes  $R_E$ . Man erkennt hieraus, daß bei großen Erdungswiderständen der Hilfs-erden schon bei verhältnismäßig geringen Meßfehlern das Meßergebnis falsch wird.

Es gibt auch Meßgeräte, bei denen der gesuchte Widerstand  $R_E$  direkt, das heißt ohne zu rechnen, ermittelt wird.

Die Messung des Isolationswiderstandes von Starkstromanlagen mittels Kurbelinduktor und ähnlichen Geräten ist im Teil 3 (9120) beschrieben.

**Unmittelbar zeigender Widerstandsmesser (Ohmmeter).** In Bild 290 ist die grundsätzliche Schaltung eines direkt zeigenden Widerstandsmessers mit Kreuzspulmeßwerk der Firma Hartmann & Braun dargestellt. Im Hohlraum der Polschuhe eines Dauermagneten ist ein Eisenkern fest angeordnet. Die Luftspaltweite zwischen Polschuhen und Eisenkern ist ungleichmäßig. Infolgedessen ist auch das magnetische Feld im Luftspalt an den verschiedenen Stellen des Luftspaltes verschieden stark (nichthomogen). Im Luftspalt sind zwei fest verbundene gekreuzte Spulen drehbar gelagert. Mit der Spulenchse ist der Zeiger verbunden. Der Strom wird den beiden Drehspulen durch drei Metallbänder zugeführt (Bild 291). Diese Metallbänder

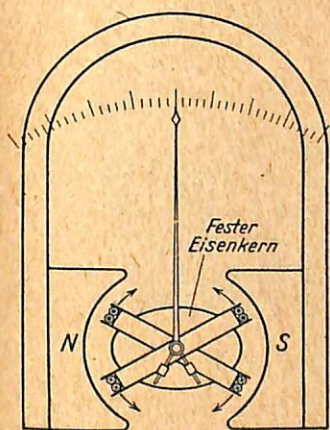


Bild 290.

Aufbau und Schaltung des Widerstandsmessers

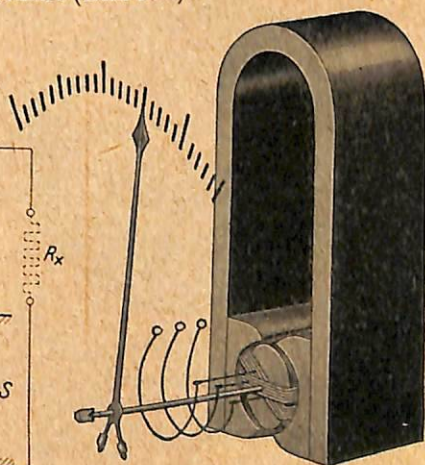
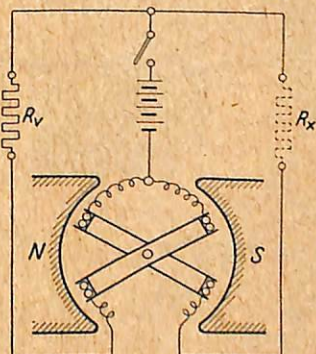


Bild 291.



haben keine Richtkraft. Infolgedessen haben Kreuzspulen und Zeiger im stromlosen Zustand keine feste Ruhelage. Zwei nebeneinander liegende Spulenenden sind mit dem gleichen Batteriepol unmittelbar verbunden. Das zweite Ende der einen Spule ist über den Widerstand  $R_v$ , das andere über den Widerstand  $R_x$  mit dem Schalter



Bild 292. Skala für Widerstandsmesser

und dem zweiten Batteriepol verbunden.  $R_x$  ist der gesuchte Widerstand. Beide Spulen sind so geschaltet, daß beim Stromdurchgang ihre Drehmomente entgegen wirken. Die beim Fließen des Stromes entstehenden Drehmomente sind sowohl von der Stromstärke als auch von der jeweiligen Stellung der Spulen abhängig. Die gekreuzten Spulen drehen sich immer in die Stellung, bei der das Drehmoment der einen dem Drehmoment der anderen das Gleichgewicht hält. Infolgedessen ist die jeweilige Einstellung der Spulen nur vom Verhältnis der Stärke der Ströme in beiden Spulen abhängig. Werden die Spulen an dieselbe Spannung angeschlossen, dann hängt ihre jeweilige Einstellung nur noch vom Verhältnis der Widerstände in den beiden Spulenzweigen ab. Bleibt ein Widerstand unverändert (konstant), dann läßt sich die Skala unmittelbar in Widerstandseinheiten eichen.

Mit diesem Meßgerät lassen sich Widerstände von  $0,001$  bis  $10\,000\,000\ \Omega = 10\ \text{M}\Omega$  (Megohm) messen. Dabei genügt zum Messen von Widerständen von  $0,001$  bis  $100\ \Omega$  eine Spannung von  $2\ \text{V}$ , dagegen ist zum Messen von Widerständen von  $10\,000$  bis  $10\,000\,000\ \Omega$  eine Spannung von  $500\ \text{V}$  erforderlich.

Unmittelbar zeigende Widerstandsmesser (Ohmmeter) haben ungleichmäßige Skalenteilung (Bild 292).

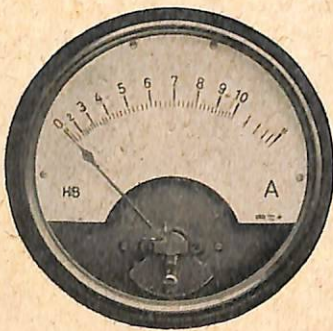


Bild 293.



Bild 294.

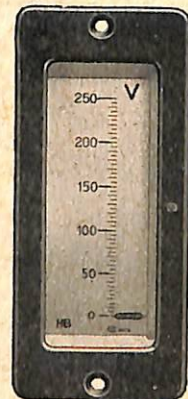


Bild 295.

Bild 293/295. Form der Meßgeräte

**Die Form der Meßgeräte.** Meßgeräte für Schalttafeln haben entweder runde, rechteckige oder quadratische Form (Bild 293 bis 297). Die quadratische Form ist besonders dann geeignet, wenn eine größere Anzahl Meßgeräte neben- oder übereinander angeordnet werden muß. Die Quadrantmeßgeräte der Firma Hartmann & Braun,



Frankfurt a. M., haben quadratische Form mit seitlicher Skala in der Größe eines Quadranten (Viertelkreis). In der Nullstellung steht der Zeiger waagrecht, bei vollem Ausschlag senkrecht (Bild 297).



Bild 296.

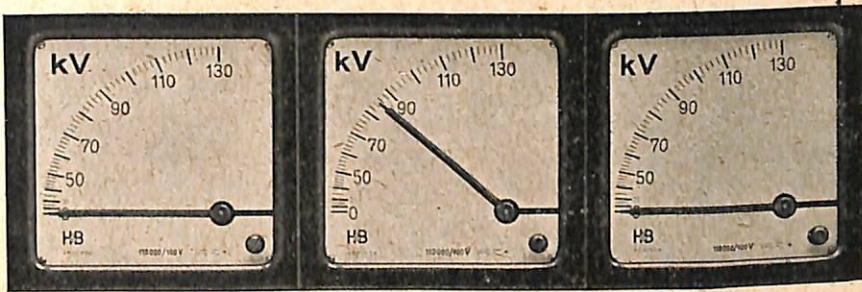


Bild 297.

Bild 296/297. Form der Meßgeräte

15. Besondere Arten von Meßgeräten

**Schreibende Meßgeräte.** In vielen Fällen der Praxis ist es notwendig, die gemessenen Werte fortlaufend aufzuschreiben oder, wie man auch sagt, zu registrieren. Ein solches Meßgerät besteht aus einem Meßwerk und aus einem Uhrwerk. Das Uhrwerk hat den Zweck, einen Papierbandstreifen gleichmäßig so weiter zu bewegen, daß eine an dem Zeiger des Meßwerks befestigte Schreibfeder den Meßwert aufzeichnen kann.

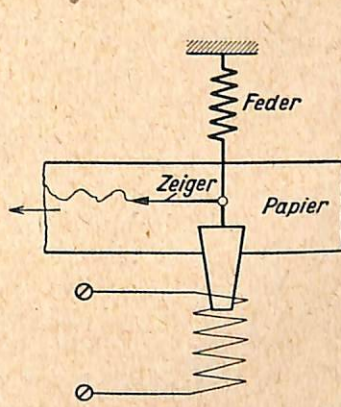


Bild 298.

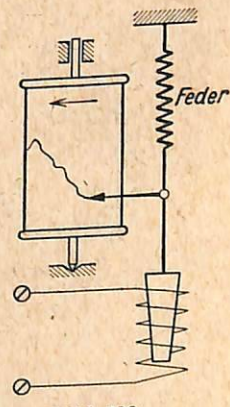
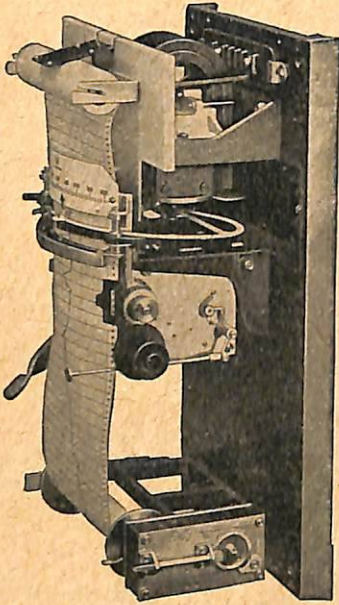


Bild 299.

Grundsätzliche Anordnung der schreibenden Meßgeräte

Die Bilder 298 und 299 zeigen die grundsätzliche Anordnung bei geradliniger Zeigerbewegung. Bei den Meßwerken mit Kreisbewegung kommen Ellipsenlenker,





Hakenzeiger und andere Einrichtungen in Frage, wie z. B. der Linienschreiber (Bild 300) zeigt.

**Meßwerke mit Hilfskontakten.** In besonderen Fällen werden die Meßwerke mit Kontakten versehen, um bei einer bestimmten Stellung des Zeigers einen Meldestromkreis zu schließen (Bild 301).

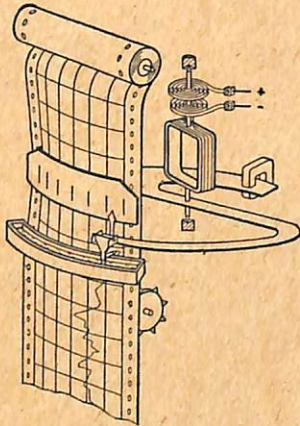
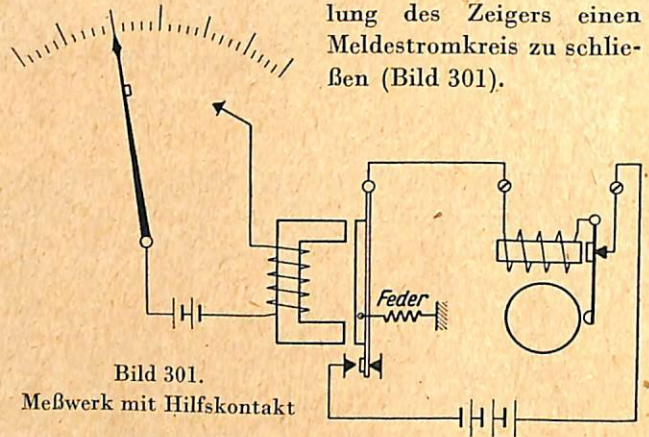


Bild 300. Linienschreiber

## 16. Elektrizitätszähler (Messung des elektrischen Arbeitsverbrauchs)

Arbeit ist Leistung mal Zeit. Um die in einer elektrischen Anlage vom Strom geleistete Arbeit zu finden, hat man die elektrische Leistung in kW mit ihrer Zeitdauer in h zu multiplizieren ( $A_{kWh} = kW \cdot h$ ). Wäre die elektrische Leistung einer Anlage in jedem Augenblick die gleiche, dann brauchte man zur Bestimmung des elektrischen Arbeitsverbrauchs nur die Zeit festzustellen, innerhalb welcher diese Leistung verbraucht wird. Die elektrische Leistung und damit auch die elektrische Arbeit wird mit jeder Belastungsänderung eine andere. Sie schwankt infolgedessen in der Regel sehr häufig und nicht selten auch stark. Um den wirklichen Gesamtverbrauch an elektrischer Arbeit zu finden, muß ein Meßgerät verwendet werden, das jeden einzelnen Leistungsverbrauch mit seiner Zeitdauer in Stunden multipliziert und alle diese Teilbeträge zusammenzählt. Ein solcher elektrischer Arbeitsverbrauchsmesser wird infolgedessen Zähler genannt.

Die Zählerangabe kann entweder in Amperestunden (Ah) oder in Kilowattstunden (kWh) erfolgen. Amperestundenzähler kommen in Frage, wenn die Netzspannung nicht oder doch nur wenig schwankt. In diesem Falle genügt es, die Zahl der Amperestunden zu zählen. Diese Zahl mit der Netzspannung multipliziert, ergibt die ver-



brauchte elektrische Arbeit in kWh. Gebräuchlicher als Amperestundenzähler sind Kilowattstundenzähler, weil sie auch die Spannungsschwankungen in der Anlage mit berücksichtigen und die verbrauchte elektrische Arbeit in kWh direkt angeben.

### Bauart der Zähler

Nach der Bauart unterscheidet man:

- a) Motorzähler für Gleich-, Wechsel- und Drehstrom.
- b) Elektrochemische Zähler für Gleichstrom.

### Motorzähler

Motorzähler werden wegen ihrer Zuverlässigkeit am meisten verwendet. Bei den Motorzählern unterscheidet man Magnetmotorzähler, dynamometrische Zähler und Induktionszähler.

#### Der Magnetmotorzähler

**Aufbau.** Dieser Zähler (Bild 302) besteht aus einem scheibenförmigen Anker mit Stromwender. Der Anker dreht sich im Luftspalt zweier Dauermagnete. Eine Feld- oder Hauptstromwicklung fehlt. Die Ankerscheibe ist in der Regel aus Aluminium. Sie dient gleichzeitig als Wirbelstrombremse. Der Ankerwicklung ist ein Widerstand neben- (parallel) geschaltet. Die Drehungen des Ankers werden durch eine Schnecke auf ein Rollenzählwerk mit Zahlen übertragen.

**Wirkungsweise.** Jeder Dauermagnet erzeugt ein gleichmäßig starkes magnetisches Feld. Fließt Strom durch die Netzleitung, dann wird auch der Anker von Strom durchflossen und dreht sich infolge der Einwirkung der magnetischen Felder der Dauermagnete auf die stromdurchflossenen Ankerleiter. Das hierbei entstehende Drehmoment des Ankers ist von der Stärke der magnetischen Felder der Dauermagnete, der Ankerstromstärke und der Ankerwindungszahl abhängig. Bei einem fertigen Zähler bleibt die Stärke der Felder und die Zahl der Ankerwindungen unverändert. Infolgedessen sind Ankerdrehmoment und Ankerdrehzahl nur von der Stärke des Stromes im Anker abhängig. Ein solcher Zähler kann somit als Amperestundenzähler verwendet werden.

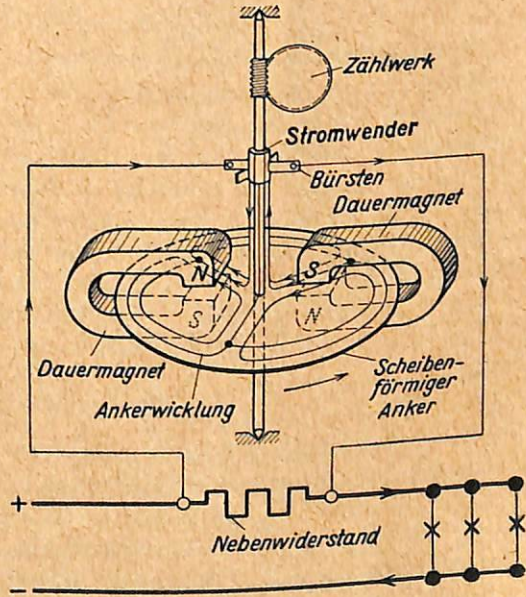


Bild 302. Amperestundenzähler  
(Magnetmotorzähler)



Würde die Drehung des Ankers nicht gebremst, dann würde die Drehzahl des Ankers immer höher ansteigen. Damit die jeweilige Stromstärke im Anker und dessen Drehzahl im gleichen Verhältnis steht, muß die Ankerdrehung entsprechend gebremst werden. Dies geschieht mit Hilfe der Aluminiumscheibe des Ankers. Diese Scheibe schneidet bei der Drehung des Ankers die Kraftlinien der Dauermagnete.

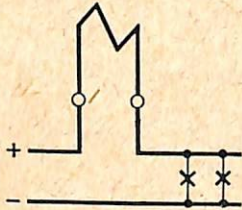


Bild 303.  
Amperestundenzähler  
im + - Leiter

Dadurch werden in dieser Scheibe Wirbelströme erzeugt, die bremsend wirken. Die Bremsung steigt mit zunehmender und fällt mit abnehmender Drehzahl. Das vom Strom im Anker erzeugte treibende Drehmoment wird den Anker so lange beschleunigen, bis Treibmoment und Bremsmoment gleich groß sind. Der Anker stellt sich infolgedessen bei jeder Änderung der Stromstärke auf eine Drehzahl ein, die der Stärke des jeweilig fließenden Stromes entspricht.

Liegt der Amperestundenzähler im + - Leiter, dann ist er nach Bild 303, liegt er im Minusleiter, dann ist er nach Bild 304 anzuschließen.

**Eigenschaften.** Weil die magnetischen Felder von Dauermagneten erzeugt werden und diese Felder immer in gleicher Richtung verlaufen, hängt die Drehrichtung des Zählers nur von der Stromrichtung im Anker ab. Infolgedessen läßt sich der Magnetmotorzähler nur für Strom mit gleichbleibender Richtung, d. h. nur für Gleichstrom verwenden. Im unbelasteten Zustand hat dieser Zähler im Gegensatz zu anderen Motorzählern keinen Eigenverbrauch, weil ja die Ankerwicklung nur an einem Leitungspol liegt. Auch bei Belastung ist der Eigenverbrauch nur gering und beträgt weniger als 1 v. H. bei Vollast. Leerlauf ohne Belastung ist bei diesem Zähler ausgeschlossen. Wegen seines einfachen Aufbaues ist dieser Zähler verhältnismäßig billig. Er ist insbesondere für Anlagen mit geringem Anschlußwert geeignet.

### Dynamometrische Zähler

Sie werden nur als Kilowattstundenzähler gebaut. Beim elektrodynamischen Meßwerk der Leistungsmesser (Bild 256) wird dem auf die bewegliche Spule ausgeübten Drehmoment durch die Richtkraft der Spiralfedern das Gleichgewicht gehalten, so daß nur ein Ausschlag, aber keine Drehung der beweglichen Spule entstehen kann. Werden die Spiralfedern entfernt und wird auf der Achse der Drehspule ein Stromwender angebracht, dessen Stege mit den Enden der Drehspule verbunden sind, dann wird sich die bewegliche Spule als Anker im Feld der festen Spule drehen. Nach dieser Anordnung sind die dynamometrischen Zähler gebaut.

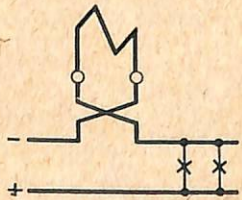


Bild 304.  
Amperestundenzähler  
im - - Leiter

**Aufbau.** Das dynamometrische Treibwerk (Bild 305) besteht in der Hauptsache aus den beiden festen Hauptstromspulen  $H_S$ , dem Anker  $A$  mit dem Stromwender  $K$ , den Bürsten  $B$ , der Bremscheibe  $S$  und dem Dauermagneten  $M$ . Auf der Ankerachse ist oben eine Schnecke



befestigt, mit deren Hilfe die Drehzahl des Ankers auf das Zählwerk übertragen wird. Ankerwicklung, Hilfsspule  $h$  und Vorwiderstand  $R_v$  sind in Reihe geschaltet. Die beiden Hauptstromspulen sind ebenfalls in Reihe geschaltet und werden vom gesamten Hauptstrom durchflossen.

**Wirkungsweise.** Die Ankerwicklung ist dauernd mit dem Stromnetz verbunden. Die Bürsten sind so angeordnet, daß das magnetische Feld der Ankerspulen senkrecht zum magnetischen Feld der Hauptstromspulen steht. Wenn Strom durch die Netzleitungen und damit auch durch die Hauptstromspulen  $H_s$  fließt, entsteht ein magnetisches Hauptfeld, durch dessen Einwirkung auf das Feld des Ankers im Anker ein Drehmoment entsteht. Dieses Drehmoment hängt von der Stärke des magnetischen Hauptfeldes und von der Stärke des Ankerfeldes ab. Die Stärke des Hauptfeldes ist wieder von der Stärke des Hauptstromes und die Stärke des

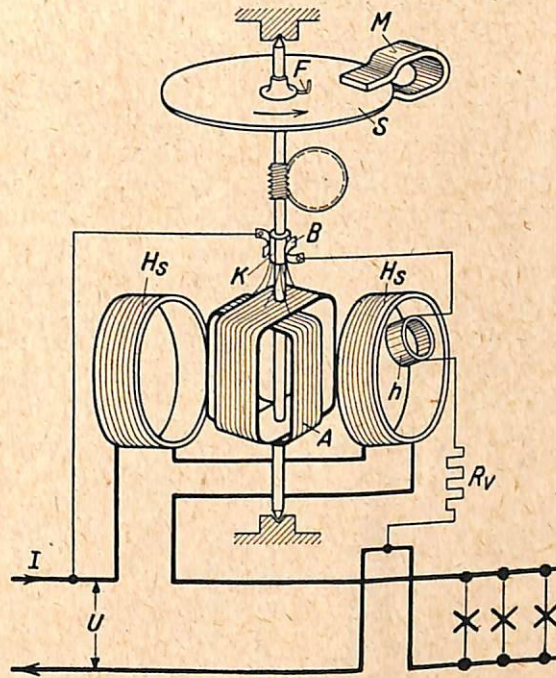


Bild 305. Wattstundenzähler  
(Dynamometrischer Zähler)

Ankerfeldes von der Stärke des Ankerstromes abhängig. Da die Stärke des Ankerstromes mit der Netzspannung steigt und fällt, ist das Drehmoment des Ankers dem Hauptstrom  $I$  und der Netzspannung  $U$  verhältnismäßig. Infolgedessen wird auch die Drehzahl des Ankers im gleichen Verhältnis wie die in der Anlage verbrauchte Leistung  $N = U \cdot I$  zu- oder abnehmen. In der auf der Ankerwelle befestigten Bremsscheibe werden bei der Drehung des Ankers Wirbelströme erzeugt, die eine Bremsung der Ankerdrehung bewirken. Da die Bremsung im gleichen Verhältnis wie die Drehzahl zu- oder abnimmt, wird bei zunehmendem Leistungsverbrauch die Drehzahl vom Treibmoment so lange beschleunigt, bis Treibmoment und Bremsmoment sich das Gleichgewicht halten.

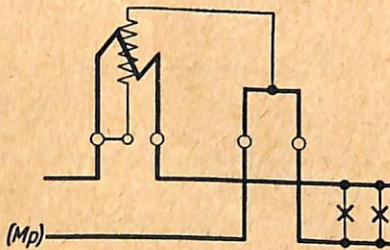
Die Hauptfehlerquelle bei diesem Zähler ist die Lagerreibung. Diese hängt außer von der Beschaffenheit der Lager auch vom Gewicht des Ankers und von der Reibung zwischen Bürsten und Stromwender ab. Zum Ausgleich (Kompensation) der Lagerreibung dient die Hilfsspule  $h$ . Diese Hilfsspule wird vom Ankerstrom durchflossen. Sie ist so angeordnet, daß durch ihr magnetisches Feld im Anker ein Hilfsdrehmoment entsteht, welches etwa der Größe der Lagerreibung entspricht. Dieses Hilfsdrehmoment wird so groß bemessen, daß es die Reibung der Ruhe bei-



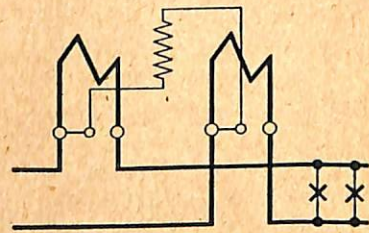
nahe überwindet, so daß ein ganz geringer Hauptstrom von 0,3 bis 1 v. H. der Voll-  
last genügt, den Anker in Drehungen zu versetzen. Damit kein Leerlauf des Zählers  
eintreten kann, ist am Anker eine Hemmfahne  $F$  angebracht, die von der magneti-  
schen Kraft des Dauermagneten  $M$  festgehalten wird.

**Eigenschaften.** Der dynamometrische Zähler kommt nur für Gleichstrom  
in Frage. Er läßt sich auch für Wechselstrom benutzen, wenn die Selbstinduktion  
im Ankerkreis nur gering ist. Er läuft leicht an und zählt genau. Sein Preis ist ver-  
hältnismäßig hoch. Weil sein Ankerkreis dauernd am Netz liegt, verbraucht er auch  
dauernd elektrische Arbeit, d. h. er hat dauernd Eigenverbrauch, der sich auf etwa  
1,5 bis 2 W für 100 V Netzspannung stellt. Der jährliche Eigenverbrauch beträgt  
demnach bei 110 V etwa 15 kWh und bei 220 V etwa 30 kWh. Die Kosten dieses  
Eigenverbrauchs werden vom Zähler nicht berücksichtigt und sind vom Strom-  
lieferer zu tragen. Der Eigenverbrauch in den Hauptstromspulen stellt sich auf etwa  
1 v. H. der Belastung. Er wird vom Zähler mitgezählt und geht infolgedessen zu  
Lasten des Strombeziehers.

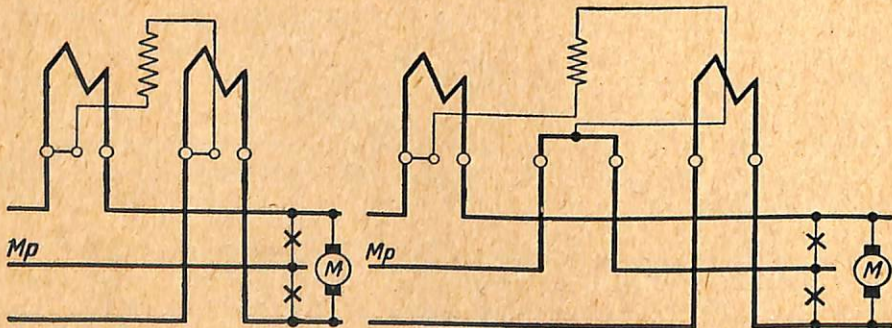
In den Bildern 306 bis 309 sind die Schaltpläne für dynamometrische Zähler  
(Motorzähler) angegeben.



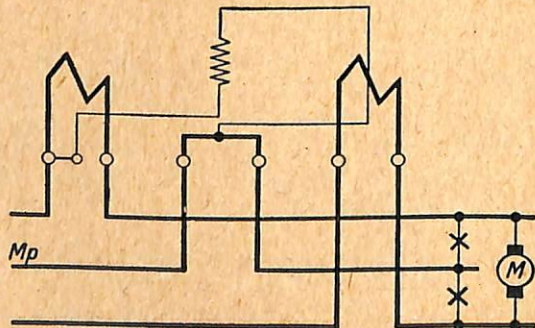
(Schaltplan mit Nulleiter)  
Bild 306. Zweileiterzähler



(Schaltplan ohne Nulleiter)  
Bild 307. Zweileiterzähler



(Außenleiteranschluß  
des Spannungskreises)  
Bild 308. Dreileiterzähler



(Nulleiteranschluß  
des Spannungskreises)  
Bild 309. Dreileiterzähler

Bild 306/309. Schaltpläne für Wattstundenzähler



### Induktionszähler

Dieser Zähler kommt nur für Wechselstrom in Frage. Seine Wirkungsweise ist die gleiche wie die des Induktionsleistungsmessers. Er wurde daher früher auch Ferrariszähler genannt.

**Aufbau.** In Bild 310 ist der grundsätzliche Aufbau eines Treibwerkes für einen Induktionszähler dargestellt. Der G-förmige Elektromagnet  $E_1$  ist mit der Spannungswicklung, der U-förmige Elektromagnet  $E_2$  mit der Stromwicklung versehen.  $A$  ist eine Ankerscheibe aus Aluminium. Der Elektromagnet  $E_1$  ist oberhalb und der Elektromagnet  $E_2$  unterhalb der Ankerscheibe  $A$  angeordnet. Der Dauermagnet  $M$  dient als Bremsmagnet.

**Wirkungsweise.** Beide Elektromagnete erzeugen magnetische Felder von wechselnder Richtung (Wechselfelder). Diese Felder durchsetzen die Ankerscheibe und induzieren in dieser Scheibe Wirbelströme. Durch die Wechselwirkung zwischen den Wirbelströmen und den magnetischen

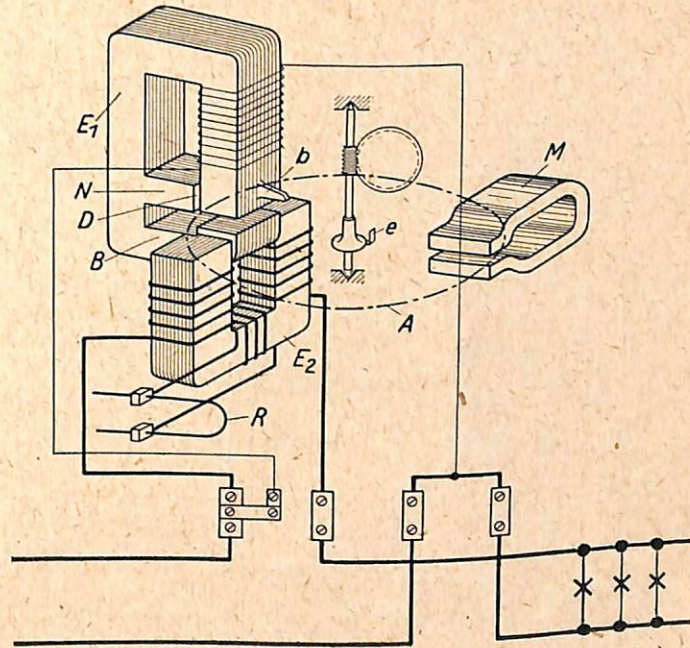


Bild 310. Treibwerk für Induktionszähler (Wattstundenzähler)

Feldern entsteht in der Ankerscheibe ein Drehmoment. Die Stärke des Stromfeldes ist von der Stärke des Hauptstromes und die Stärke des Spannungsfeldes von der Höhe der Spannung abhängig. Damit das Drehmoment des Ankers von der im Netz verbrauchten Leistung  $N = U \cdot I \cdot \cos \varphi$  abhängt, muß bei induktionsfreier Belastung ( $\cos \varphi = 1$ ) zwischen Strom- und Spannungsfeld eine Phasenverschiebung von  $90^\circ$  bestehen. Bei Belastung sind dann Strom- und Spannungsfeld nicht um den Phasenwinkel  $\varphi$ , sondern um den Winkel  $90 - \varphi$  gegeneinander verschoben. Das Stromfeld ist in der Regel mit dem Strom in Phase. Infolgedessen muß das Spannungsfeld der Spannung um  $90^\circ$  nacheilen. Diese  $90^\circ$ -Verschiebung kann dadurch erreicht werden, daß man der Spannungsspule eine starke Streuung gibt. Diesem Zweck dient der magnetische Nebenschluß  $N$  beim Spannungseisen. Der größte Teil der vom Spannungseisen erzeugten Kraftlinien geht durch den Drosselspalt  $D$  über den magnetischen Nebenschluß  $N$ , ohne die Ankerscheibe zu durchsetzen. Die durch



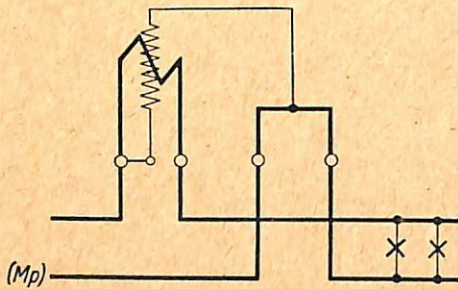


Bild 311. Schaltplan zu Bild 310

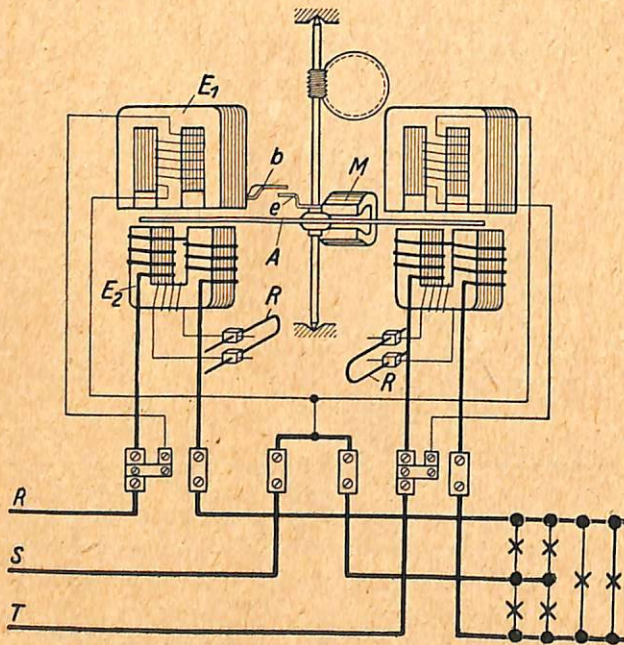
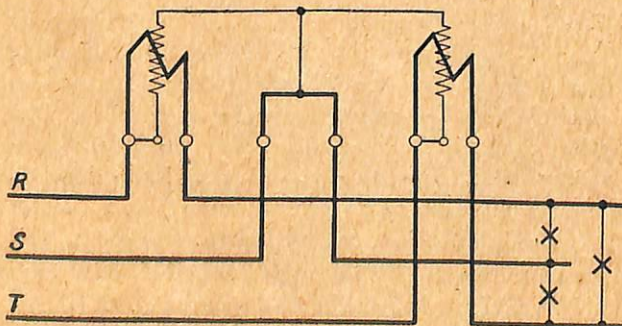


Bild 312. Induktionszähler mit zwei Treibwerken für Drehstrom-Dreileiter



die Ankerscheibe gehenden wirksamen Kraftlinien des Spannungseisens finden in dem unteren Teil  $B$  des Spannungseisens ihren magnetischen Rückschluß. Um eine genaue Einstellung der Phasenverschiebung von  $90^\circ$  zwischen Strom- und Spannungsfeld zu erreichen, ist auf dem Joche des Stromeisens eine Wicklung angebracht, deren Enden durch eine regelbare Widerstandsschleife  $R$  kurzgeschlossen sind. Zur Vermeidung von Leerlauf befindet sich auf

der Ankerachse ein verbiegbares Bremshäkchen  $e$  aus Eisen, das bei der Drehung an dem vorstehenden Bremsblech  $b$  des Spannungseisens vorbeikommt und von diesem angezogen wird.

Zur Überwindung der Ankerreibung kann z. B. ein Anlaufhebel am Spannungseisen angebracht werden. Durch diesen Hebel wird das zusätzliche Reibungsdrehmoment auch dann erzeugt, wenn kein Strom durch die Hauptstromspulen fließt. Durch Verstellen des Anlaufhebels läßt sich das Reibungsdrehmoment genau einstellen. In Bild 311 ist der Schaltplan für einen Induktionszähler für Einphasenstrom angegeben.

Die Bilder 312 und 314 zeigen andere übliche Anordnungen des Strom- und Spannungseisens wie in Bild 310.

Bild 313. Schaltplan zu Bild 312



### Wattstundenzähler für Drehstrom

Drehstromzähler für Dreileiterdrehstrom (ohne Nulleiter) besitzen zwei Einphasentreiberwerke, die nach der Zwei-Leistungsmesser-Schaltung angeschlossen werden. Die Scheiben beider Treiberwerke sind entweder auf der gleichen Achse befestigt, oder beide Treiberwerke wirken auf eine gemeinsame Ankerscheibe (Bild 312 u. 313).

Für Drehstrom-Vierleiteranlagen verwendet man Induktionszähler mit drei Treiberwerken (Bild 314 und 315).

#### Zählerschild

Nach den Regeln für Elektrizitätszähler muß auf dem Zählerschild unter anderem auch angegeben sein, wieviel Ankerumdrehungen einer Kilowattstunde entsprechen. Um die Zahl der Anker-

umdrehungen feststellen zu können, ist die Bremsscheibe an einer Stelle mit einer Marke versehen (roter Strich). Ein Fenster im Zählergehäuse gestattet die Beobachtung der Bremsscheibe. Durch Zählen der Ankerumdrehungen während einer bestimmten Zeit läßt sich der elektrische Arbeitsverbrauch und damit auch die Leistung bzw. der Anschlußwert eines oder mehrerer Stromverbraucher feststellen.

Beisp.: Auf einem Zähler ist angegeben: 2000 Ankerumdrehungen = 1 kWh. Es soll die Leistungsaufnahme einer elektrischen Lichtanlage festgestellt werden. Zu diesem Zweck werden alle Glühlampen eingeschaltet und festgestellt, wie-

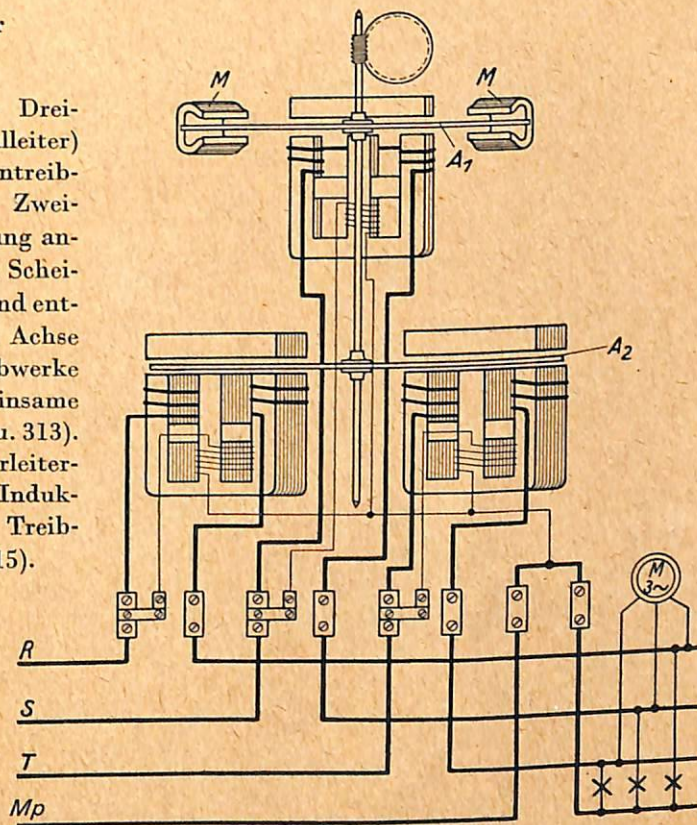


Bild 314. Induktionszähler mit drei Treiberwerken für Drehstrom-Vierleiter

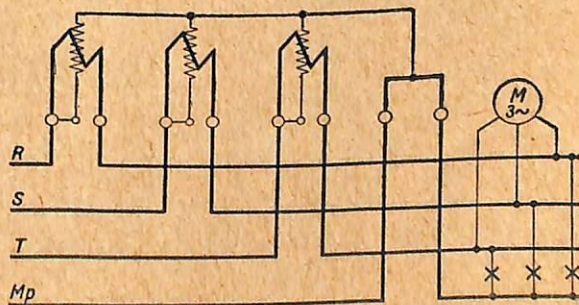


Bild 315. Schaltplan zu Bild 314



viel Ankerumdrehungen der Zähler während einer bestimmten Zeit (1 Minute) macht. Werden während einer Minute z. B. 100 Umdrehungen gezählt, dann macht der Zähler in der Stunde  $60 \cdot 100 = 6000$  Umdrehungen. Da 2000 Umdrehungen einer kWh entsprechen, stellt sich der elektrische Arbeitsverbrauch der Anlage während einer Stunde auf  $\frac{6000}{2000} = 3$  kWh. Der Anschlußwert für Licht beträgt demnach 3 kWh.

### Drehrichtung

Für Motorzähler gilt als Drehrichtung des Ankers „Rechtslauf“. Die Drehrichtung ist durch einen Pfeil auf dem Zählergehäuse angegeben. Falsche Drehrichtung kann beim Amperestundenzähler durch Änderung der Stromrichtung in den Hauptleitungen oder durch Vertauschen der Zuleitungen zum Zähler entstehen. Beim Wattstundenzähler (Bild 305) tritt eine Änderung der Drehrichtung (Rücklauf) durch Änderung der Stromrichtung in der Zuleitung nicht ein.

### Wendemotorzähler

Wendemotorzähler sind Zähler mit schwingendem (oszillierendem) Anker. Bei diesem von der AEG gebauten Zähler schwingt der Anker, statt sich zu drehen, zwischen den Hauptstromspulen hin und her. Die Spannungsspulen werden beim Schwingen in ihrer Endstellung jedesmal eingeschaltet, wodurch sich die Richtung ihrer Kraftwirkung umkehrt und ein Zurückschwingen bewirkt wird. Die Schwingungen werden auf das Zählwerk übertragen. Dieser Zähler hat den Vorzug, daß er weder Stromwender noch Bürsten besitzt. Außerdem kann bei ihm das Zählwerk getrennt vom Zähler angebracht werden. Diese getrennte Anordnung von Zähler und Zählwerk kommt hauptsächlich für elektrische Kraftwerke in Frage.

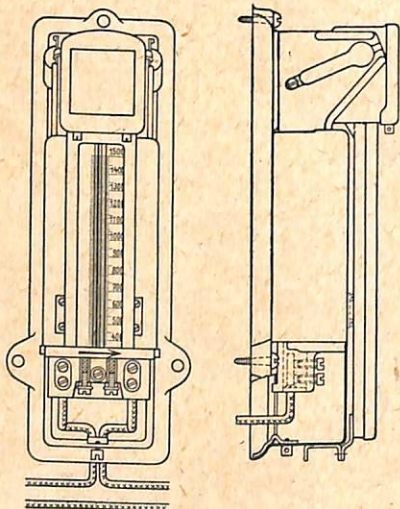


Bild 316.

Quecksilberzähler (Stia-Zähler)

### Elektrochemische Zähler

Ihre Wirkungsweise beruht auf der chemischen Wirkung des elektrischen Stromes. Die beim Stromdurchgang aus der Flüssigkeit ausgeschiedene Menge eines Stoffes ist abhängig von der Stärke des Stromes und der Zeitdauer des Stromdurchganges. Solche Zähler sind in folgedessen Amperestundenzähler und nur für Gleichstrom zu benutzen.

Man unterscheidet Quecksilberzähler (Bild 316) und Wasserstoffzähler (Bild 317). Der erstere wird vom Glaswerk Schott in Jena hergestellt und als „Stia-Zähler“ bezeichnet.

Beim Stia-Zähler besteht die eigentliche Zersetzungszelle aus einer luftdicht zugeschmolzenen Glasröhre aus Jenaer Spezialglas. Diese Röhre dient als Meßröhre.



Sie ist oben zu einem Kolben erweitert. In diesem Kolben befindet sich das Quecksilber, das als Anode dient. Ein unterhalb der Anode angebrachter ringförmiger Körper aus Kohle dient als Kathode. Das Glasgefäß ist fast ganz mit einer wässrigen Lösung (Quecksilberjodkalilösung) gefüllt, die als Elektrolyt dient. Bei Stromdurchgang schlägt sich an der Kathode Quecksilber nieder, das in die Meßröhre geleitet wird. Die Höhe des Quecksilberspiegels in der Meßröhre ist ein Maß für die verbrauchten Amperestunden oder Kilowattstunden. Die Skala der Meßröhre ist entweder in Amperestunden oder in Kilowattstunden geeicht. Wenn die Meßröhre mit Quecksilber gefüllt ist, wird sie gekippt (auf den Kopf gestellt). Beim Kippen fließt das Quecksilber zur Anode zurück. Die Meßröhre ist jetzt wieder frei für neuen Gebrauch. Bei falschem Anschluß färbt sich der Elektrolyt rot. Durch Vertauschen des Anschlusses und Kippen des Zählers wird der Fehler beseitigt.

Der Wasserstoffzähler der Siemens-Schuckert-Werke (Bild 317) enthält Phosphorsäure. Aus dieser wird beim Stromdurchgang Wasserstoff ausgeschieden. Der Wasserstoff steigt in Form von Bläschen in der Meßröhre hoch. Dadurch wird die in der Meßröhre enthaltene Flüssigkeit verdrängt. Der Flüssigkeitsspiegel senkt sich infolgedessen. Mit Hilfe des Flüssigkeitsspiegels kann an einer seitlichen Skala der Verbrauch abgelesen werden. Ist der Flüssigkeitsspiegel bis unten gesunken, dann wird die Meßröhre zum Zwecke der Entleerung von Gas und zum Wiederfüllen mit Flüssigkeit gekippt. Das Kippen erfolgt mit dem Vorderteil vornüber nach unten, d. h. umgekehrt wie beim Stia-Zähler.

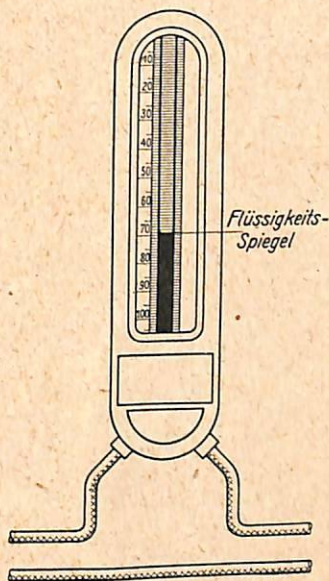


Bild 317. Wasserstoffzähler

Zähler für besondere Zwecke

**Doppeltarifzähler.** Doppeltarifzähler besitzen zwei Zählwerke, von denen immer nur ein Zählwerk eingeschaltet ist. Die Umschaltung von einem Zählwerk auf das andere geschieht durch eine besondere Schaltuhr, die entweder im Zähler eingebaut oder getrennt von diesem angebracht ist. Diese Uhr kann so eingerichtet sein, daß sich entweder verschiedene Umschaltzeiten einstellen lassen, oder die Umschaltung erfolgt selbsttätig entsprechend der astronomischen Tageslichtdauer.

Doppeltarifzähler werden in Anlagen im Anschluß an Netze verwendet, die während der stark belasteten Abendstunden einen höheren Preis für die kWh berechnen als am Tage und während der Nacht. Der billige Tagesstrom hat besonders für gewerbliche Zwecke Bedeutung, während der billige Nachtstrom für den Haushalt zum Beheizen von Warmwasserspeichern und für die Landwirtschaft zum Betrieb von Futterdämpfern usw. in Frage kommt.

**Nachtstromzähler.** Es werden auch besondere Nachtstromzähler verwendet. An diese besonderen Zähler werden Warmwasserspeicher, Futterdämpfer usw. ange-



geschlossen. Der Stromkreis für diese Stromverbraucher wird durch eine Uhr nachts umgeschaltet und morgens wieder ausgeschaltet. Die von einem solchen Nachtstromzähler gezählten kWh werden zu Vorzugspreisen abgegeben.

**Preisähler.** Bei den Preisählern ist der zu zahlende Preis von der Belastungskurve des Elektrizitätswerkes abhängig. Er wechselt mehrere Male am Tage. Die Angabe des Zählers erfolgt direkt in Mark und Pfennig. Die Zählung geschieht in der Weise, daß eine Uhr entsprechend der Belastungskurve des Elektrizitätswerkes im Zähler verschiedene Übersetzungen einschaltet.

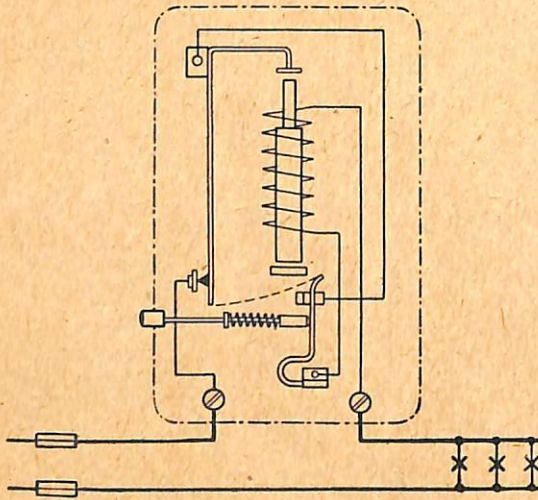


Bild 318. Strombegrenzer

**Vergütungszähler.** Vergütungszähler dienen zum Zählen der Zeit oder des elektrischen Arbeitsverbrauchs bei solchen Stromverbrauchern, die den Strom zum verbilligten Preis beziehen (Haushaltgeräte). Der Zähler ist tragbar und mit Stecker und Steckdose zum Anschluß von Kleinkraftverbrauchern versehen. Er wird als Unterzähler zwischen den Kleinkraftverbraucher und die Netzsteckdose geschaltet. Infolgedessen werden die von ihm gezählten kWh vom Hauptzähler mitgezählt. Zur Feststellung der zum Normalpreis bezogenen kWh werden die Angaben des Vergütungszählers von den Angaben des Hauptzählers abgezogen.

**Strombegrenzer.** In kleinen Anlagen mit ganz geringem Anschlußwert wird vielfach ein monatlicher Pauschalbetrag vereinbart. Hierbei darf eine bestimmte Höchststromstärke nicht überschritten werden. Um zu verhindern, daß eine Überschreitung dieser Höchststromstärke stattfindet, wird in jede Anlage ein Strombegrenzer eingebaut. Sobald die festgesetzte Höchststromstärke überschritten wird, wird die Leitung so vom Strombegrenzer unterbrochen, daß das Licht der Lampen „flackert“ (Bild 318).

**Zeitähler.** Bei Anlagen oder Stromverbrauchern, deren Belastung immer gleich bleibt, genügt zur Feststellung des elektrischen Arbeitsverbrauchs ein Zeitähler, der nur die Zeitdauer des Strombezugs zählt.

**Münzzähler** (Elektrizitätsselbstverkäufer). Münzzähler sind Zähler, die nach Einwurf einer bestimmten Geldmünze eine bestimmte Anzahl von kWh zu entnehmen gestatten. Nach Entnahme dieser bestimmten Anzahl kWh wird der Strombezug gesperrt und erst nach Einwurf einer neuen Münze freigegeben. Die Bezahlung der bezogenen elektrischen Arbeit erfolgt demnach im voraus. Die Ausstellung einer Stromrechnung fällt fort.



## Sachverzeichnis

- Akkumulatorenzelle 25  
 Aluminiumrähmchen 173  
 Amperewindungszahl 15f.  
 55f.  
 Anker 9. 14  
 Ankerdrehmoment 40  
 Ankerfeld 18ff.  
 Ankerkörper 10f. 38  
 Ankerquerfeld 18  
 Ankerrückwirkung 18f.  
 Ankerspannung 67. 70  
 Ankerspule 19  
 Ankerstrom 20. 24. 58f. 64ff.  
 70  
 Anlasser 56. 58f. 65. 73ff.  
 129f. 165  
 Anlaßwiderstand 42f.  
 Anode 106. 108. 111  
 Anwurfmotoren 146  
 Ausgleichsleitung 24f.  
 Asynchronmotor 69. 135. 148  
  
 Backenbremse 47ff. 53. 156  
 Bandbremse 47. 54. 156  
 Bewegungsrichtung 5  
 Bimetallstreifen 162  
 Bleiakkumulator 26  
 Blindleistung 187  
 Blindstrom 118. 139ff. 181f.  
 Bremsband 47f.  
 Bremsdynamo 157  
 Bremsscheibe 47f.  
 Bürstenbolzen 12f.  
 Bürstenbrille 12  
 Bürstensbrücke 12  
 Bürstendruck 12  
 Bürstenfeuer 19. 61. 149  
 Bürstenhalter 12  
 Bürstenstern 12. 76  
  
 Dämpfungskammer 171  
 Dauermagnet 172  
 Doppelläufermotor 136  
 Doppelschlußgenerator 18.21.  
 25  
 Doppelschlußmotor 59. 63.  
 69. 72  
 Doppelstabläufer 132  
 Doppel-Zellenschalter 33ff.  
 Drehfeld 119ff. 137. 139.  
 142ff. 152f. 180  
  
 Drehsinn 63f.  
 Drehspule 173  
 Dreiphasenwicklung 82  
 Dunkelschaltung 85f.  
 Eigenerregung 78  
 Einfach-Zellenschalter 33f.  
 Einzelpolläufer 80  
 Elektrode 106. 114.  
 Elektrographitkohlen 12  
 Elektrolyt 207  
 Elektronen 106. 111  
 Erregermaschine 68. 78  
 Erregerstrom 16  
 Erregerwicklung 9. 13f. 80.  
 148. 152  
 Fahrzeugbatterien 26ff.  
 Federwaage 47. 54  
 Feldregelanlasser 66  
 Flachbahnanlasser 75. 130  
 Fliehkraftschalter 102. 145  
 Flüssigkeitsanlasser 75  
 Freiauslösung 161f.  
 Fremderregung 13. 78  
 Frequenz 6. 84. 105. 133.  
 137f. 149. 154. 178. 189f.  
 Frequenzwandler 137  
 Füllflüssigkeit 30. 32  
 Galvanometer 1  
 Gehäuse 21. 79. 145  
 Generatoren 1  
 Gitterladung 111  
 Gitterplatten 27f.  
 Gitterspannung 111f.  
 Gittersteuerung 111ff.  
 Gleichstrommotoren 37  
 Glimmer 10. 12  
 Glühkathode 113  
 Graetzschaltung 115  
 Graphitkohlen 12  
 Grobflächenplatten 27f.  
 Gußeisen 9. 79  
 Haltebänder 10f.  
 Hauptstrommotor 55  
 Hauptstromwicklung 20. 22  
 Heizbatterien 26  
 Hellschaltung 85f.  
 Hilfspole 20  
 Hintermotor 135f.  
 Hochstabläufer 131f.  
  
 Induktion 1  
 Induktionsgerät 89  
 Induktionsspule 88f.  
 Induktionsstrom 1ff. 14. 17.  
 89. 125. 149f.  
 Kalilauge 32  
 Kapazität 29f. 36. 145. 147  
 Kastenplatten 27f.  
 Kathode 106ff. 207  
 Kernumspanner 92  
 Kippzündung 108f.  
 Kokonfaden 177  
 Kollektor 8  
 Kommutator 8  
 Kompensationswicklung 22.  
 148. 151  
 Kondensator 140ff. 165  
 Kondensatorblindleistung 145  
 Kopfhörer 193  
 Körperschluß 11  
 Kreuzpulmeßwerk 195  
 Kupferoxydul 114  
 Kupferoxydulgleichrichter  
 114  
 Kurbelmeßbrücken 193  
 Kurzschlußklemme 17  
 Kurzschlußläufer 147. 160.  
 163f. 181  
  
 Ladegeräte 36  
 Ladespannung 34  
 Ladung 33  
 Läufer 122ff. 148. 166  
 Läuferstrom 133  
 Läuferwicklung 130. 135. 138  
 Leonard-Schaltung 67  
 Leistungsfaktor 139f. 145.  
 157f. 187  
 Linke-Hand-Regel 37f. 41.  
 173f.  
 Luftdämpfung 171. 178  
 Lüfter 10  
 Lüftungsschlitze 10  
 Magnetdämpfung 181  
 Magnetgestell 9. 12  
 Magnetpole 9  
 Magnetwicklung 14ff. 55ff.  
 64ff. 69ff. 76. 78. 110. 116.  
 148f.  
 Mantelumspanner 92



- Meßbrücke 191  
 Meßfehler 175  
 Meßwandler 167 f.  
 Mikanit 10  
 Minusplatten 27 ff.  
 Minuspol 33 f.  
 Motorschutzschalter 73. 161 f.  
  
 Naturgraphit 12  
 Nebenschlußgenerator 16. 25  
 Nebenschlußmotor 57 f.  
 Nebenschlußregler 17. 23 f.  
 78  
 Nebenschlußwicklung 18.  
 24 f. 60. 67  
 Nebenwiderstand 167  
 Nullinie 5 f.  
 Nullspannungsschalter 73  
 Nuten 10  
  
 Oberspannungswicklung 91 f.  
 Ölkonservator 94  
  
 Panzerplatten 27  
 Periode 6. 122  
 Phasenverschiebung 139.  
 143 f. 181. 186 ff. 203 f.  
 Phasenwicklung 79. 81 f.  
 Plusplatten 27 f. 30  
 Pluspol 33  
 Polrad 80. 117  
 Polreagenzpapier 33  
 Polschuh 9  
 Polumschaltung 135  
 Primäranker 122  
 Profilkupfer 10  
  
 Rechte-Hand-Regel 2 f. 41.  
 89. 116  
 Regelanlasser 65  
 Regelmaschinen 135  
 Regelsatz 67 f.  
 Reihenschlußgenerator 14 f.  
 Reihenschlußmotor 55 f. 71 f.  
 148. 151. 153  
 Reihenschlußwicklung 18. 24.  
 60 f. 72  
 Röhrchenplatten 31  
 Rückstrom 15. 23 f.  
  
 Rückstrom-Selbstschalter 23  
 Rückzündung 110  
 Ruhespannung 29  
 Rundstabläufer 132  
  
 Säuredichte 27. 30  
 Schaltdrosseln 104 f.  
 Schaltuhr 207  
 Scheinleistung 140. 157. 159  
 Schleifdraht 192  
 Schleifdrahtmeßbrücke 192 f.  
 Schleifringe 3. 77 f. 101.  
 130 f. 136  
 Schleifringläufer 129. 131.  
 147. 164 f.  
 Schlupf 124 f. 135  
 Schlupfwiderstand 69  
 Schutzschaltung 138  
 Schwefelsäure 26 f.  
 Schwungradumformer 68  
 Sekundäranker 122  
 Selbsterregung 13 f. 71 f.  
 Selbstinduktion 19. 90 f. 144.  
 149. 202  
 Selengleichrichter 114  
 Sinuslinie 4  
 Spanschlitten 12  
 Spannungspfad 167  
 Spannungswandler 168 f.  
 Stahlakkumulatoren 26. 31  
 Stahlguß 9  
 Ständer 122. 135. 139. 148.  
 152 f. 166  
 Ständeranlasser 127 f.  
 Ständerwicklung 126 f. 130.  
 133. 136. 139. 141. 146 f.  
 165  
 Stege 8. 11. 19. 200  
 Sternpunkt-widerstand 186  
 Stromdämpfungsläufer 131 f.  
 Strompfad 167  
 Stromwandler 168  
 Stromwender 11 f. 76. 102 f.  
 148. 150. 152. 154. 199 f.  
 206  
 Stromwenderstege 8. 10  
 Synchronismus 84 f.  
 Synchronmotor 101  
  
 Taschenplatten 31  
 Tauchzündung 109  
 Telefonmeßbrücke 194  
 Thermoclement 175  
 Trockengleichrichter 115  
 Trommelbahnanlasser 75  
  
 Übererregung 118  
 Überstromschalter 73. 160 f.  
 Umfangskraft 39. 45  
 Umrichter 116  
 Umspanner 87 ff. 148. 153.  
 168. 181. 187. 193  
 Untererregung 148  
 Unterspannungswicklung 91 f.  
  
 Vergleichswiderstand 192  
 Volltrommelläufer 79 f.  
 Vormotor 135  
 Vorwiderstand 167. 179  
  
 Walzenbahnanlasser 75  
 Walzenmeßbrücken 193  
 Walzstahl 9. 79  
 Wärmeauslöser 162  
 Wechsrichter 116  
 Wellenlinie 4  
 Wendepole 20. 61. 103  
 Wendepolwicklung 20 ff. 61.  
 63. 71  
 Wicklungsstrang 79  
 Wirbelstrombremse 50. 157.  
 199  
 Wirbelstromdämpfung 189  
 Wirbelströme 9. 91. 98. 148.  
 174. 178. 180 f. 201. 203  
 Wirkleistung 140. 157 f. 181 f.  
 187  
 Wirkstrom 139 f.  
  
 Zellenaufbau 28. 31  
 Zellschalter 32 f.  
 Zellenspannung 29. 32  
 Zellenzahl 30. 32  
 Zeigerspule 179. 182  
 Zusatzgenerator 34. 36  
 Zündanode 110  
 Zündbatterien 26  
 Zündmagnet 110  
 Zündung 108. 110 ff.







