

Ing. Theodor Königshofer

# **Die Wicklungen elektrischer Maschinen**

Allgemeinverständliche  
Einführung in die Wicklungen und deren Wirken  
in elektrischen Maschinen

Mit 166 Textabbildungen

Erweiterte 2. Auflage



**Technischer Verlag Herbert Cram, Berlin**

1969



Copyright 1956 by Technischer Verlag Herbert Cram, Berlin W 35  
Satz und Druck: Walter de Gruyter & Co., Berlin 30

## Vorwort zur 1. Auflage

Dieses Buch ist hauptsächlich für Facharbeiter, wie Monteure, Installateure, Wickler oder allgemein für den Elektropraktiker bestimmt, und es sind daher keine mathematischen Vorkenntnisse erforderlich.

Über die Wicklungen von elektrischen Maschinen lassen sich Bände schreiben und es liegen auch Werke, z. B. von Prof. D. D. Dr. Sequenz, vor, die an Ausführlichkeit kaum noch zu überbieten sind. Diese vollständigen Werke setzen natürlich vom Leser theoretische Kenntnisse voraus, so daß sie für den ungeschulten Elektropraktiker nicht in Betracht kommen. Es gibt u. a. auch viele gute Fachbücher, die für den Elektromaschinenbauerberuf bestimmt sind, also vorwiegend für die in Reparaturwerkstätten Beschäftigten. In diesen Büchern werden besonders die praktischen Arbeitsvorgänge, die Arbeitsmethoden, die Hilfsmittel zur Herstellung von Wicklungen sehr ausführlich behandelt und die Wicklungsschemas angegeben. Es hätte also heute wenig Sinn, z. B. über die Wicklungen von elektrischen Maschinen in den aufgezeigten Richtungen noch ein Buch zu schreiben.

Für die große Anzahl von Elektropraktikern, eventuell auch für Berufsschulen, fehlt meines Erachtens aber noch eine Darstellung, die u. a. mit einfachen Mitteln solche Wicklungen leicht verständlich macht, die vorwiegend für den Elektropraktiker von Interesse sind.

Zweck und Ziel dieses Buches ist es nun, dem Praktiker nicht nur über die gebräuchlichsten Wicklungen einen Überblick zu geben, sondern sie ihm auch leicht verständlich zu machen.

Es wird zum besseren Verständnis der Wicklungen von den physikalischen Grundlagen, und zwar von den magnetischen Wirkungen des stromdurchflossenen Leiters und von der Wirkungsweise elektrischer Maschinen ausgegangen. Mit Hilfe einer einfachen Methode werden dann die gebräuchlichsten Wechselstromwicklungen, gleichgültig, ob es sich um eine ungeschichtete oder geschichtete Ein- oder Zweischichtwicklung oder um eine Bruchlochwicklung handelt, auf einfache Weise entworfen. Auch die gebräuchlichsten Gleichstromwicklungen, einschließlich der künstlich geschlossenen Wellenwicklungen, werden ausführlich behandelt. Bei der Behandlung der Wirkungsweise von elektrischen Maschinen wurde auf die weitverbreiteten Lichtbogen-Schweißmaschinen Rücksicht genommen, weil darüber in der Literatur noch wenig und über allgemeine Maschinen schon erschöpfend viel gesagt wurde. Es vermittelt dieses Buch daher gleichzeitig auch die Grundlagen zu meinem Buche „Die Lichtbogen-Schweißmaschinen“ [1].

Theodor Königshofer

## Vorwort zur 2. Auflage

Bei der 1. Auflage wurde bei den Erklärungen ein nicht übliches aber leichtverständliches Verfahren angewandt und es hat das Buch in dieser Form Anklang gefunden, so daß in der Neuauflage im Abschnitt I . . . VIII (entspricht der 1. Auflage) nur unwesentliche Änderungen vorgenommen wurden.

Von den Buchbesprechern wurde die 1. Auflage nicht nur den Praktikern des Elektromaschinenbaues bestens empfohlen, sondern auch den elektrotechnischen Berufs- und Fachschulen als Lehrbehelf.

Weiter wurde angeregt in einer Neuauflage die Wicklungsauslegung auch mit Hilfe des Nutzensternes zu behandeln, damit das Buch auch höheren technischen Lehranstalten als Lehrbehelf empfohlen werden kann.

Diese Anregung wird in der Erweiterung, und zwar im Abschnitt IX berücksichtigt. Außerdem wird im Abschnitt X noch die Herleitung von Bruchlochwicklungen aus Ganzlochwicklungen behandelt und die Wicklungsauslegung mit einem besonderen Verfahren (Ziffersystem). Dieses Buch vermittelt gleichzeitig auch Grundlegendes zu meinem Buche „Die praktische Berechnung elektrischer Maschinen“ [2].

Theodor Königshofer

## Inhaltsverzeichnis

	Seite
I. Allgemeines über die Wirkungsweise elektrischer Maschinen	
a) Der Leiter im magnetischen Feld . . . . .	9
b) Der stromdurchflossene Leiter . . . . .	9
c) Elektromagnete . . . . .	9
d) Erzeugung des Gleichstromes . . . . .	11
e) Das Ankerfeld und die Ankerrückwirkung . . . . .	12
f) Maschine mit Ausnützung der Ankerrückwirkung . . . . .	15
g) Wirkungsweise des Gleichstrommotors . . . . .	17
h) Erzeugung des Wechselstromes . . . . .	18
i) Das Drehfeld . . . . .	25
j) Wirkungsweise der Wechselstrommotoren . . . . .	26
k) Transformatoren . . . . .	29
II. Wechselstromwicklungen	
A. Allgemeines über Wechselstrom-Ganzlochwicklungen und Aufstellung der Nutenpläne . . . . .	
a) Bestimmung der Nutenzahl $N$ . . . . .	30
b) Bestimmung der Nutenzahl $q$ je Pol und Phase . . . . .	31
c) Wicklungsaufteilung . . . . .	33
d) Dreiphasiger Nutenplan . . . . .	36
e) Zweiphasiger Nutenplan . . . . .	37
f) Einphasiger Nutenplan . . . . .	37
g) Schaltmöglichkeiten einer Gruppenspule . . . . .	38
h) Anwendung des Nutenschrittes bei Wechselstromwicklungen . . . . .	42
i) Dreiphasiger Nutenplan für die Einschicht-Faßwicklung . . . . .	43
j) Konstruktion der Felderregerkurve zur unsymmetrischen Faßwicklung . . . . .	45
k) Dreiphasiger Nutenplan für die ungesehnte Zweischicht-Ständerwicklung . . . . .	45
l) Dreiphasiger Nutenplan für die gesehnte Zweischicht-Ständerwicklung . . . . .	47
m) Dreiphasiger Nutenplan für die Wicklung von Schleifringläufermotoren . . . . .	48
n) Wicklungsauslegung mit Hilfe der elektrischen Grade . . . . .	49
B. Ständer-Einschichtwicklungen . . . . .	
a) Zweiebenenwicklung . . . . .	50
b) Zweiebenenwicklung mit gekröpfter Spule . . . . .	51
c) Dreiebenenwicklung . . . . .	51
d) Dreiebenen-Gruppenwicklung . . . . .	52
e) Korbwicklung mit 2fach übereinanderliegenden Phasen . . . . .	53
f) Korbwicklung mit 3fach übereinanderliegenden Phasen . . . . .	53
g) Ungesehnte Faßwicklung . . . . .	54
h) Gesehnte Faßwicklung . . . . .	54
i) Zweiphasenwicklung . . . . .	55
j) Einphasenwicklung . . . . .	55

	Seite
C. Ständer-Zweischichtwicklungen . . . . .	56
D. Schleifringläuferwicklungen . . . . .	58
a) Allgemeines . . . . .	58
b) Schleifenwicklung mit Umkehrbügeln . . . . .	59
c) Wellenwicklung mit Umkehrbügeln . . . . .	60
d) Vorgang bei der Zeichnung des Wicklungsschemas . . . . .	62
e) Wicklungsauslegung mit Hilfe eines Lageplanes . . . . .	65
f) Aufgeschnittene Wellenwicklung mit Schaltbügeln . . . . .	66
g) Wellenwicklung mit Wendestäben . . . . .	67
E. Kurzschlußläuferwicklungen . . . . .	68
F. Parallelschaltbarkeit von Wechselstromwicklungen . . . . .	70
G. Umrechnungen von Wechselstromwicklungen . . . . .	71
H. Wicklungsverfahren . . . . .	75

### III. Wechselstrom-Sonderwicklungen

A. Bruchlochwicklungen . . . . .	76
B. Polumschaltbare Wicklungen . . . . .	86
C. Wechselstromwicklung zum wahlweisen Anschluß an verschiedene Netzspannungen . . . . .	90
D. Phasenumschaltbare Wicklungen . . . . .	91

### IV. Einfluß der Wicklungen auf die Spannungshöhe (Bestimmung der Wicklungsfaktoren)

a) Bestimmung des Zonenfaktors . . . . .	93
b) Bestimmung des Sehnungsfaktors . . . . .	95

### V. Einfluß der Wicklung auf die Spannungskurve

a) Feldkurvenform . . . . .	99
b) Wicklungsanordnung im Ständer . . . . .	99
c) Mehrlochwicklung . . . . .	100
d) Bruchlochwicklung . . . . .	101
e) Sehnenwicklung . . . . .	101

### VI. Gleichstrom-Ankerwicklungen

a) Allgemeines . . . . .	102
b) Schleifenwicklungen. Von der Handwicklung bis zur Doppelkollektor-Stabwicklung . . . . .	105
c) Wellenwicklungen mit ausführlicher Behandlung der künstlich geschlossenen Wicklungen . . . . .	110
d) Wahl der Ankerwicklung . . . . .	115
e) Umschaltung von Gleichstromwicklungen . . . . .	116

### VII. Entwurf einer unsymmetrischen Bruchlochwicklung

a) Übungsbeispiel, wobei zwei verschiedene Auslegungsverfahren zur Anwendung kommen . . . . .	119
---	-----

## VIII. Einphasige Anlaufwicklungen

- a) Richtlinien für die Auslegung von Anlaufwicklungen samt Zubehör bei asynchronen Einphasenmotoren mit fünf verschiedenartigen Ausführungsbeispielen . . . . . 122

## IX. Wicklungsauslegungen mittels Nutenstern

1. Einschichtwicklungen . . . . . 127
- a) Nutenstern . . . . . 127
- b) Bildung der Ankerspulen und Phasen . . . . . 128
- c) Auslegungsregeln . . . . . 129
- d) Ausführungsbeispiel für Ganzlochwicklung . . . . . 129
- e) Ausführungsbeispiel für Bruchlochwicklung . . . . . 133
2. Zweischichtwicklungen . . . . . 135
- a) Ganzloch-Zweischichtwicklung . . . . . 135
- b) Bruchloch-Zweischichtwicklung . . . . . 138

## X. Besondere Auslegungsverfahren ohne Nutenstern

- a) Grundsätzliches zum Entwurf von Bruchlochwicklungen ohne Nutenstern 140
- b) Herleitung von Bruchlochwicklungen aus Ganzlochwicklungen mit sieben Ausführungsbeispielen . . . . . 143
- c) Entwurf einer Zweischicht-Bruchlochwicklung mittels einer Spulen-Aufteilungsmethode . . . . . 144
- d) Entwurf von Zweischicht-Bruchlochwicklungen mittels Ziffernsystem . . 147
- e) Sinn der Bruchlochwicklung . . . . . 152

## XI. Wicklungsfaktoren der Oberwellen

- a) Wicklungsfaktoren der Grundwelle . . . . . 153
- b) Wicklungsfaktoren der Oberwellen . . . . . 154
1. Verhältnisse bei der Sternschaltung (Gegenschaltung) . . . . . 154
2. Verhältnisse bei der Dreieckschaltung (Reihenschaltung) . . . . . 155

Verwendete Formelzeichen . . . . . 159

Literaturverzeichnis . . . . . 160



## I. Allgemeines über die Wirkungsweise elektrischer Maschinen

### a) Der Leiter im magnetischen Feld

Bewegt man einen elektrischen Leiter in einem magnetischen Feld, dann wird in dem Leiter eine Spannung induziert. Führt man diese Spannung einem Stromverbraucher zu, z. B. einer Magnetspule, dann fließt in dem geschlossenen Kreis ein elektrischer Strom und es werden im folgenden die magnetischen Wirkungen von stromdurchflossenen Leitern, soweit sie für das grundlegende Verständnis von den Vorgängen in elektrischen Maschinen notwendig sind, so einfach wie möglich dargestellt.

### b) Der stromdurchflossene Leiter

Der stromdurchflossene Leiter erzeugt um sich ein magnetisches Feld und es haben die Kraftlinien die in Abb. 1a und 1b dargestellte Richtung. Fließt also der Strom nach Abb. 1a vom Beschauer weg (in die Papier-



Abb. 1a



Abb. 1b

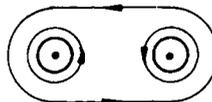


Abb. 2



Abb. 3

ebene hinein), dann verlaufen die Kraftlinien im Sinne des Uhrzeigers, und bei umgekehrter Richtung (Abb. 1b) haben sie die entgegengesetzte Richtung. Es stellt  $\otimes$  das Ende und  $\odot$  die Spitze des Stromrichtungspfeiles dar. Aus Abb. 1, 2 und 3 folgt: Zwischen den beiden gegensinnig vom Strom durchflossenen Leitern (Abb. 1) haben die Kraftlinien dieselbe Richtung und es werden die beiden Leiter auseinandergedrückt. (Feld innen stark, außen schwach.) Zwischen den beiden gleichsinnig vom Strom durchflossenen Leitern (Abb. 2 und 3) haben die Kraftlinien die entgegengesetzte Richtung und es werden die Leiter zusammengezogen. (Feld innen schwach oder Null, außen stark.) Im ersten Fall stoßen sich also die Leiter ab und in den beiden letzten Fällen ziehen sie sich an.

Da die Spulenköpfe von elektrischen Maschinen stromdurchflossene Leiter sind (meistens Leiterbündel), treten bei den Wicklungen bzw. Spulenköpfen größerer Maschinen oft so große Kräfte auf, daß die Wicklung abgestützt werden muß, um Verbiegungen zu verhindern.

### c) Elektromagnete

Wickelt man einen Leiter so, daß eine Spule entsteht (Abb. 4), so bekommt man im Innern ein fast gleichmäßiges, magnetisches Feld, und es

schließen sich die Kraftlinien außerhalb der Spule. Dieses Feld zieht einen in die Nähe gebrachten Eisenkern in die Spule hinein. Es wirkt also die stromdurchflossene Spule als Elektromagnet. Die magnetische Wirkung wird vervielfacht, wenn man die Kraftlinien nicht durch die Luft, sondern über Eisen leitet, weshalb Elektromagnete immer so gebaut werden, wie es die Abbildungen 5 und 6 veranschaulichen. Bei Wechselstrom muß wegen der sonst zu großen Eisenverluste durch die Ummagnetisierung ein lamellierter Eisenkern für den magnetischen Kreis verwendet werden. Die Abb. 5 zeigt einen Hufeisenmagnet und es wird der Anker *A* bei Stromdurchgang durch die magnetische Wirkung angezogen. Die Abb. 6 zeigt den magnetischen Kreis einer Gleichstrommaschine oder einer Wechselstrom-Außenpolmaschine. Damit der Erregerbedarf, d. i. das Produkt aus Ampere mal Windungszahl =  $AW$  oder Amperewindungszahl, nicht zu groß ausfällt,

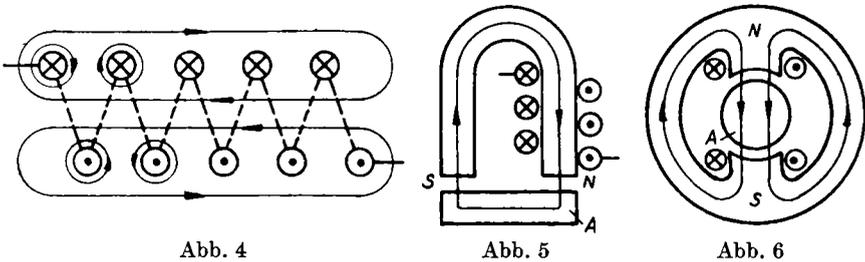


Abb. 4

Abb. 5

Abb. 6

wird der Luftspalt zwischen den Polen und dem Anker natürlich so klein wie möglich gehalten. Trotz des kleinen Luftspaltes ist der  $AW$ -Bedarf für den Luftspalt meistens größer als für den langen Eisenweg. Jede geringfügige Luftspaltvergrößerung wirkt sich daher bei den Magnetsystemen meistens nachteilig aus. Zum Beispiel würde sich bei einem Drehstrommotor der Magnetisierungsstrom, das ist angenähert der Leerlaufstrom, wegen des größeren  $AW$ -Bedarfes wesentlich erhöhen.

Werden die Spulen der Abb. 6 so wie angegeben vom Strom durchflossen, erzeugen sie ein Feld, das in der angegebenen Richtung verläuft, und es entsteht an der Polaustrittsstelle ein Nordpol *N* und an der Pol Eintrittsstelle ein Südpol *S*. Die Richtung des Feldes bestimmt man am einfachsten mit der rechten Hand (rechte Handregel) auf folgende Art:

„Der Pol wird mit der Hand so umfaßt, daß die Fingerspitzen bei der mit  $\oplus$  bezeichneten Stelle in die Papierebene gerichtet sind. Es gibt dann der ausgestreckte Daumen (quer zur Fingerrichtung) die Richtung der Kraftlinien an.“

Demnach sind nach Abb. 6 die Kraftlinien von oben nach unten gerichtet und man erhält die angegebene Polarität. Das Magnetgehäuse be-

steht bei der Gleich- und Wechselstrom-Außenpolmaschine aus massivem Eisen, weil in beiden Fällen das Gehäuse von einem Gleichstromfeld durchflutet ist. Die Polschuhe werden u. a. auch aus fabrikatorischen Gründen aus gestanzten Blechen hergestellt. Der Anker, als induzierter Teil, muß in beiden Fällen, also bei Gleich- und Wechselstrom, aus lamellierten Blechen, die isoliert sind, bestehen. Bei Wechselstrom-Innenpolmaschinen ist natürlich der stehende Teil (Ständer) der Anker.

Bei einem einmal erregten Magnetsystem bleibt, wenn die Erregung abgeschaltet wird, ein Restmagnetismus zurück (Remanenz), der im wesentlichen von der Länge des Eisenweges und vom Material abhängig ist. Die Remanenz bewirkt eine Selbsterregung der Maschinen, wenn die schaltungsmäßigen Voraussetzungen gegeben sind.

#### d) Erzeugung des Gleichstromes

Mit der in Abb. 14 dargestellten Anordnung wird eine Wechselspannung erzeugt, deren Verlauf die Abb. 18 zeigt. Mit derselben Anordnung kann man auch eine Gleichspannung erzeugen, wenn man statt zwei Schleifringen nur einen geteilten Ring verwendet, wie es die Abb. 7 veranschaulicht. Der Anfang und das Ende der Spule  $Sp$  sind zu je einer Schleifringhälfte geführt und man bekommt auf diese Art einen Strom, der nur in einer Richtung fließt, also einen Gleichstrom, weil die Bedingung erfüllt wird, daß beim Richtungswechsel der Spannung, der in der neutralen Zone erfolgt, auch die Schleifringhälften unter den Bürsten  $b$  wechseln. Aus diesem Grunde müssen die Bürsten in der gezeichneten Lage stehen. Die beiden Schleifringhälften  $s$  bezeichnet man als Kommutator oder Stromwender. Die auf diese Art erzeugte Gleichspannung  $E$ , die an den Bürsten  $b$  abgenommen wird, ist sehr wellig, denn sie schwankt zwischen Null und Maximum, etwa nach Abb. 8, Kurve  $a$ . Führt man aber die Ankerwicklung nicht mit einer Spule und zwei Lamellen (Stegen) aus, sondern mit vielen Spulen und Lamellen (vgl. Ankerwicklungen, Abschnitt VI), dann bekommt man eine fast wellenfreie Gleichspannung, etwa nach Abb. 8, Linie  $b$ . Bei Belastung fließt der Strom immer in derselben Richtung von einer Bürste zur anderen und es ist die Strom-

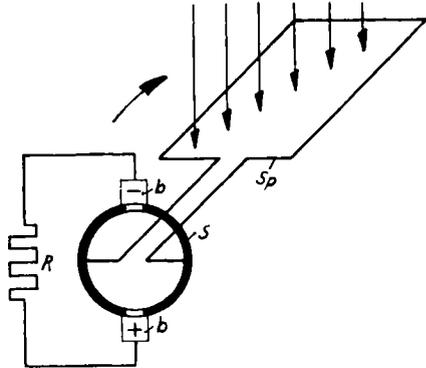


Abb. 7

austrittsstelle mit  $+$  und die Stromeintrittsstelle mit  $-$  bezeichnet. Demnach wird der in der Ankerspule fließende Wechselstrom in einen Gleich-

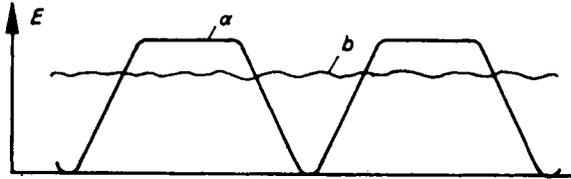


Abb. 8

strom verwandelt, d. h., der Stromwender oder Kommutator wirkt als Gleichrichter.

#### e) Das Ankerfeld und die Ankerrückwirkung

Die Abb. 9 zeigt wieder eine 2polige Gleichstrommaschine, und zwar mit der in Abb. 6 gezeigten Feldrichtung. Bewegt sich nun der bewickelte Anker im Sinne des Pfeiles, so wird in den Ankerstäben eine Spannung induziert, die an den Bürsten  $b-b'$  (Abb. 7) gemessen werden kann. Wird nun die Maschine belastet, etwa mittels des Widerstandes  $R$  in Abb. 7,

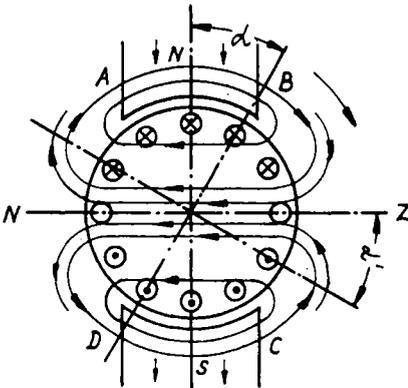


Abb. 9

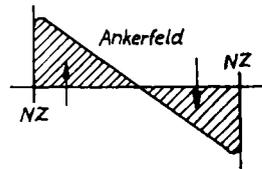


Abb. 9a

dann wird auch die Ankerwicklung von einem Strom durchflossen, und es erzeugt die Ankerwicklung genau so wie jeder stromdurchflossene Leiter ein magnetisches Feld, das sogenannte Ankerfeld. Die Richtung des Ankerstromes kann man wieder mit der rechten Handregel bestimmen. In diesem Falle wird die Hand so zwischen Pol und Anker gelegt, daß die Kraftlinien in die innere Handfläche eindringen. Der Daumen kommt in die Bewegungsrichtung und es gibt die Richtung der Fingerspitzen die Strom-

richtung nach Abb. 9 an. Dieser Ankerstrom erzeugt nun ein Feld, dessen Richtung und Wirkung noch zu bestimmen ist.

Von Abb. 2 her wissen wir, daß das magnetische Feld zwischen den beiden gleichsinnig vom Strom durchflossenen Leitern sehr schwach ist und nach außen hin stärker wird. Das Feld der Ankerwicklung wird daher unter der Mitte der Pole Null sein, nach außen zunehmen und in der neutralen Zone, also dort, wo die Stromabnahme erfolgt, am stärksten auftreten (Abb. 9a). Man kann die stromdurchflossene Ankerwicklung natürlich auch wie eine Spule nach Abb. 4 behandeln und man bekommt dieselbe Kraftlinienrichtung oder Feldrichtung, und zwar von rechts nach links und quer zum Hauptfeld. Man bezeichnet daher dieses Feld als Ankerquerfeld und es wirkt als stillstehendes Feld induzierend auf die sich in Bewegung befindliche Ankerwicklung. Es entstehen dadurch mehrere Nachteile, weil das Hauptfeld verzerrt und in der sich in Kommutierung oder Stromwendung befindlichen kurzgeschlossenen Spule (Abb. 7) eine Spannung induziert wird. In der durch die Bürsten kurzgeschlossenen Spule wird vom Hauptfeld keine Spannung induziert, weil sie sich in diesem Augenblick parallel zu den Kraftlinien des Hauptfeldes bewegt.

Die Abb. 9 zeigt das Ankerfeld allein. Es schließt sich über die Hauptpole und schwächt auf der linken Seite das Hauptpolfeld (Gegenwirkung) und verstärkt es auf der rechten Seite (Mitwirkung), was durch Pfeile in Abb. 9a deutlicher ersichtlich gemacht ist. Dadurch wird das Hauptfeld verzerrt, d. h. die Felddichte unter den Polen ist nicht mehr gleich stark. Sie ist unter den Polspitzen  $A-C$  in Abb. 9 kleiner als unter den Polspitzen  $B-D$ , und es ist das resultierende Feld (allein vorhandenes Betriebsfeld) gegenüber dem Hauptfeld um den Winkel  $\alpha$  verschoben. Demnach müssen auch die Bürsten um den Winkel  $\alpha'$  verdreht werden, weil die neutrale Zone senkrecht zum resultierenden Feld stehen muß, um eine gute Stromwendung zu erhalten. Die Ankerrückwirkung bringt zwei Nachteile mit sich, und zwar eine Schwächung des Hauptfeldes und eine Vergrößerung der Lamellenspannung.

#### 1. Schwächung des Hauptfeldes:

Bei magnetisch ausgenutzten Maschinen ist das resultierende Feld oder Betriebsfeld nicht übermäßig stark verzerrt, weil infolge der Sättigung des Eisens das Feld auf der einen Seite nicht im selben Ausmaß verstärkt wird, wie es auf der andern Seite geschwächt wird. Die Folge ist eine Schwächung des Hauptfeldes, das durch eine Bürstenverschiebung noch weiter geschwächt wird, weil die im Winkel  $\beta$  gelegenen Ankerstäbe dem Hauptfeld direkt entgegenwirken (Abb. 10), d. h., es tritt außer dem Querfeld noch ein Gegenfeld auf. Demnach kann man mittels Bürstenverschiebung die Stromstärke des Generators regulieren und es wird diese Art der Stromregulierung mitunter bei Schweißgeneratoren angewendet.

## 2. Vergrößerung der Lamellenspannung:

Zwischen einer positiven und einer negativen Bürste befinden sich  $K/2p$ -Stege, wenn mit  $K$  die Lamellen- oder Stegzahl und mit  $p$  die Polpaarzahl bezeichnet wird. Somit ist die

$$\text{Leerlauf-Stege Spannung } E_0 \cong \frac{U}{\alpha} \cdot \frac{K}{2p} \cong \frac{U \cdot 2p}{\alpha \cdot K} \text{ in V,}$$

wenn  $U$  die Klemmenspannung und  $\alpha$  der Polbedeckungsfaktor ist. Bei Belastung wird die Lamellenspannung durch die Feldverzerrung vergrößert, weil in den Ankerspulen, die sich im verdichteten Luftspaltfeld befinden, eine höhere Spannung induziert wird und es ist  $E_b \cong 1,2 E_0$ . Bei einem Motor mit Drehzahlregelung durch Feldschwächung (ungesättigte Maschine) kommt die Feldverzerrung aber voll zur Wirkung und es treten in den ein-

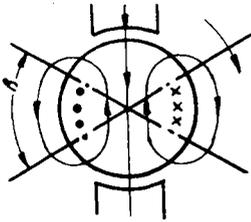


Abb. 10

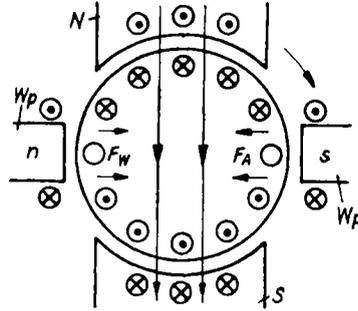


Abb. 11

zelnen Ankerspulen sehr verschiedene Lamellenspannungen auf. Man kann in grober Annäherung sagen,  $E_b \cong E_0 \cdot \frac{n_r}{n}$ , wenn  $n$  die Nenndrehzahl und  $n_r$  die geregelte Drehzahl ist.

Weil bei großen Lamellenspannungen Rundfeuer am Kollektor (Stromwender) auftritt, soll daher  $E_b$  kleiner als 30 Volt sein. Bei ganz kleinen Maschinen sind wegen des großen inneren Spannungsabfalles etwa 40 V noch unbedenklich.

Dem vorher Gesagten zufolge kann es besonders bei großen Drehzahlregelungen durch Feldschwächung vorkommen, daß der Grenzwert überschritten wird. In solchen Fällen muß die Feldverzerrung unter den Polschuhen verhindert werden und es geschieht dies mit einer Kompensationswicklung, die in Nuten der Polschuhe, wie in Abb. 11 gezeigt, angeordnet wird. Wählt man den Strombelag von Anker- und Kompensationswicklung im Bereiche der Polschuhe gleich groß, dann wird die Verzerrung natürlich restlos aufgehoben (die Felder haben entgegengesetzte Richtung) bzw. wird

durch diese Kompensationswicklungsanordnung etwa  $\frac{2}{3}$  von der Ankerückwirkung aufgehoben, so daß in der neutralen Zone nur mehr ein stark geschwächtes Ankerfeld wirksam ist. Die Kompensationswicklungen sind sehr teuer, weshalb sie nur bei Spezialmaschinen angewendet werden, und man findet zur Bekämpfung des Ankerfeldes allgemein nur Wendepole  $WP$ , die zwischen den Hauptpolen angeordnet sind. Die Wendepole haben nicht nur die Aufgabe, das Ankerfeld bzw. die durch das Ankerfeld in der kurzgeschlossenen (stromwendenden) Spule induzierte Spannung  $e_b$  aufzuheben, sondern sie müssen außerdem noch die Stromwendespannung  $e_r$ , auch Reaktanz- oder Selbstinduktionsspannung genannt, in der stromwendenden Spule aufheben. Man nennt  $e_b$  auch Spannung der Bewegung und  $e_r$  die Spannung der Ruhe. Die Reaktanzspannung entsteht durch die zeitliche Änderung des Streuflusses während der Stromwendung in den von den Bürsten kurzgeschlossenen Ankerspulen, weil in diesen Spulen der Strom seine Richtung in kurzer Zeit ändert. Durch die Reaktanzspannung wird der für eine gute Kommutierung erforderliche Stromverlauf unter den Bürsten gestört und es können dadurch so große Stromdichten unter der Bürstenkante auftreten, daß Funken entstehen. Die Reaktanzspannung wird dadurch unschädlich gemacht, daß man mit dem Wendepolefeld noch eine zusätzliche Spannung in den kurzgeschlossenen Spulen erzeugt, die gleich groß wie die Reaktanzspannung ist, aber die entgegengesetzte Richtung hat. In diesem Beispiel müssen also die Wendepole so vom Belastungsstrom durchflossen werden, wie es die Abb. 11 zeigt, wenn es sich um einen Generator handelt; es folgt also dem Nord-Hauptpol ein Süd-Wendepol. Bei Wendepolmaschinen können die Bürsten bei jeder Belastung und bei jeder Drehrichtung in der neutralen Zone verbleiben. Ohne Wendepole müssen die Bürsten mit der Belastung verschoben werden, weil sich die neutrale Zone, wie bereits erwähnt, durch die Feldverzerrung verschiebt.

Diesen Ausführungen zufolge ist also das Ankerfeld schädlich und es wird allgemein durch besondere Maßnahmen zum Verschwinden gebracht. Nun gibt es aber auch Maschinen, die das Ankerfeld bzw. die Ankerückwirkung nutzbringend verwerten und unter dem Begriff „Querfeldmaschinen“ zusammengefaßt werden. Derartige Ausführungen sind z. B. Lichtbogenweißgeneratoren, weiter die zu vielfachen Regelzwecken verwendete Amplidyne.

#### f) Maschine mit Ausnutzung der Ankerrückwirkung

Wir haben festgestellt, daß bei einem normalen Gleichstromgenerator durch das Ankerquerfeld das Hauptfeld verzerrt wird und durch eine Bürstenverschiebung ein Ankergegenfeld entsteht. Beide Ankerfelder bewirken eine Feldschwächung, d. h. es wird auf diese Weise die Maschinen-

spannung durch die Ankerrückwirkung vermindert. Je größer man nun die Bürstenverschiebung macht, um so stärker wird natürlich das Ankergegenfeld und man kann daher mit einer verstellbaren Bürstenbrücke die Spannung bzw. Stromstärke einer Maschine regeln. Diese Möglichkeit wird bei den Schweißgeneratoren zur Regelung der Schweißstromstärke auch angewandt, etwa in der Weise, daß man über eine Zahnradübersetzung mittels eines Handrades die Bürstenbrille verstellt. Diese Vorrichtungen müssen natürlich sorgfältig ausgeführt werden, damit nicht aus mechanischen Gründen ein Bürstenfeuer entsteht.

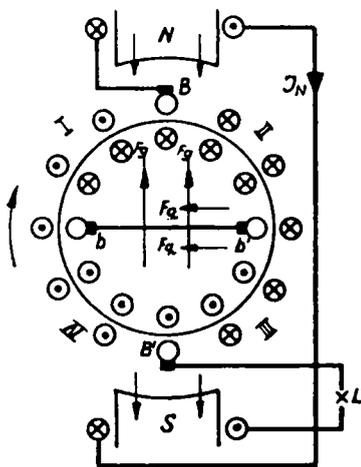


Abb. 12

Ordnet man aber z. B. bei einer zweipoligen Maschine ein zweites Bürstenpaar  $B-B'$  an (Abb. 12), das gegenüber dem in der neutralen Zone befindlichen Bürstenpaar  $b-b'$  um  $90^\circ$  versetzt ist, und schließt man das Bürstenpaar  $b-b'$  widerstandslos kurz, dann kann man auf diese Weise, also ohne Verschiebung der Bürstenbrille, die Maschinenspannung weitgehendst beeinflussen, weil das Querfeld in der Ankerwicklung auch eine Spannung induziert, die bei den Bürsten  $B-B'$  abgenommen werden kann. Wegen der üblichen Ausführung der Ankerwicklung nach Abb. 117b sind an der ausgeführten Maschine die Bürsten um  $90^\circ$  räumlich verschoben. Maschinen, die nach diesem Prinzip arbeiten, bezeichnet man, wie schon erwähnt, daher

als Querfeldmaschinen; sie eignen sich u. a. wegen der einfachen Ausführung auch bestens als Schweißgeneratoren.

Bei der Querfeldmaschine nach Abb. 12 (die Ankerwicklung ist des leichteren Verständnisses wegen zweimal gezeichnet, und zwar für die Querfelddarstellung innen und für die Gegenfelddarstellung außen) ersetzen die Hilfsbürsten  $b-b'$ , die miteinander verbunden sind, die Hauptbürsten an einer normalen Maschine. Bringt man den Anker in Bewegung, dann entsteht durch das Remanenzfeld wegen der kurzgeschlossenen Bürsten sofort ein kräftiges Querfeld  $F_q$ , das in der Ankerwicklung eine Spannung induziert, die an den offenen Hauptbürsten  $B-B'$  abgenommen werden kann. Wird der Hauptkreis z. B. durch den Lichtbogen  $L$  belastet, dann entsteht das Gegenfeld  $F_g$  (Bestimmung mit der rechten Handregel), das dem Hauptfeld entgegenwirkt. Der Nutzstrom  $J_N$  wird gleichzeitig durch die Serienerregung der Hauptpole geleitet, d. h. mit

zunehmendem Nutzstrom wird das Haupt- und Gegenfeld verstärkt. Da die Ankerstreuung sehr klein ist, braucht man nur den Magnetkreis mit einer großen Streuung auszulegen, um zu erreichen, daß von einer bestimmten Stromstärke an das wirksame Ankerdifferenzfeld immer kleiner wird. Auf diese einfache Art kann man beispielsweise bei einem Lichtbogenschweißgenerator die Kurzschlußstromstärke (bei jeder Zündung wird die Maschine kurzgeschlossen) auf einen unschädlichen Wert bringen bzw. eine fallende statische Charakteristik herstellen. Die Abb. 12 veranschaulicht, daß bei Belastung der Anker ungleich vom Strom durchflossen wird. So z. B. addieren sich die Ströme im Ankerviertel II und IV, und in den Vierteln I und III subtrahieren sie sich, was bei der Dimensionierung der Ankerwicklung zu berücksichtigen ist.

Die Quersfeldmaschine ermöglicht auch noch auf eine andere einfache Weise die Stromregulierung in weiten Grenzen, und zwar rein magnetisch, also verlustlos und ohne Bürstenverschiebung [1].

#### g) Wirkungsweise des Gleichstrommotors

Wird der Motor an das Netz geschaltet, so wird die Magnetwicklung und der stillstehende Anker vom Strom durchflossen. Beide Wicklungen erzeugen bei der angenommenen Stromrichtung das in der Abb. 13 durch Pfeile angedeutete Feld. Die Ankerwicklung besteht der besseren Übersicht wegen nur aus einer Windung. Das Ankerfeld schwächt links oben und rechts unten das Hauptfeld, und auf der Gegenseite wird es verstärkt. Das Hauptfeld wird verzerrt und die Folge davon ist, daß die Kraftlinien, die sich wie gespannte Gummifäden verhalten, einen Druck (Moment) auf die Leiter ausüben, so daß sich der gelagerte Anker im verkehrten Uhrzeigersinne, also in der Pfeilrichtung, bewegt. Man kann die Drehrichtung auch mit der linken Handregel bestimmen. Damit die Bewegung erhalten bleibt, muß beim Überschreiten der neutralen Zone der Strom gewendet werden, was bei der Gleichstrommaschine der Stromwender oder Kollektor besorgt.

Die Drehrichtung wird geändert, indem man entweder das Hauptfeld oder das Ankerfeld durch Vertauschen der Anschlüsse umkehrt. Bei einem Gleichstrommotor kann sich die Ankerrückwirkung (Feldschwächung) so auswirken, daß der Motor mit zunehmender Belastung immer schneller läuft und unter Umständen führt dies zum Kippen oder Durchgehen. Aus diesem Grunde werden Nebenschlußmotoren als Doppelschlußmaschinen ausgebildet, d. h. die Maschine erhält außer der Nebenschlußwicklung noch eine Hauptstromwicklung. Die Hauptstromwicklung ist gegenüber der

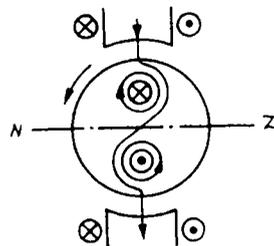


Abb. 13