

WICKLUNGEN
ELEKTRISCHER MASCHINEN
UND IHRE HERSTELLUNG

VON

DR.-ING. F. HEILES

MIT 221 TEXTABBILDUNGEN



BERLIN
VERLAG VON JULIUS SPRINGER
1936

ISBN 978-3-642-52540-7 ISBN 978-3-642-52594-0 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-642-52594-0

ALLE RECHTE, INSBESONDERE DAS DER ÜBERSETZUNG
IN FREMDE SPRACHEN, VORBEHALTEN.

COPYRIGHT 1936 BY JULIUS SPRINGER IN BERLIN.
SOFTCOVER REPRINT OF THE HARDCOVER 1ST EDITION 1936

Vorwort.

Das Buch ist in erster Linie bestimmt für die große Gruppe von Elektrotechnikern, welche die Wicklungen elektrischer Maschinen im wesentlichen von der praktischen Seite her kennen müssen. Dazu gehören z. B. der Gestaltungs- und Fertigungsingenieur sowie der Wickelmeister und bis zu einem gewissen Grade auch der Wickler selbst.

Für diesen Zweck ist die Darstellung möglichst einfach gehalten: auf tiefere theoretische Zusammenhänge (Spannungstern, Spannungsvieleck, Wicklungsfaktor) konnte nicht eingegangen werden. Daraus ergibt sich von selbst, daß Ausgleichsverbindungen, Gesetze der Parallelschaltung und Bruchlochwicklungen nur in ihren Grundzügen behandelt werden konnten.

Bei der Auswahl des Stoffes sind alle Wicklungen ausgeschieden, die nicht allgemein in der Praxis Verwendung finden. Ringwicklungen sind nicht erwähnt; sie gehören der Vergangenheit an und sind auch kein notwendiges Zwischenglied, um die Trommelwicklungen zu verstehen. Bei der Polumschaltung wurde nur die Schaltung von Dahlander und Lindström (für Umschaltung im Verhältnis 1 : 2) behandelt, der bei weitem die größte praktische Bedeutung zukommt.

Ein verhältnismäßig breiter Raum ist der praktischen Herstellung der Wicklungen, ihrer Isolierung, Befestigung und Prüfung sowie einer Beschreibung der hierbei verwendeten Einrichtungen und Werkstoffe eingeräumt. Dabei sind auch Besonderheiten in der Herstellung kleiner Anker behandelt, die heute in vielen kleineren Werkstätten hergestellt werden, in denen der Wickelmeister häufig auf sich selbst angewiesen ist. Für Instandsetzungswerkstätten ist ein Anhang über Umschalten und Umwickeln beigelegt.

Die Wicklungen bilden ein besonders sprödes Wissensgebiet; das erste Einarbeiten in dieses Gebiet sollte immer im Zusammenhang mit der Praxis erfolgen. Für den zukünftigen Ingenieur bietet sich diese Gelegenheit während seiner praktischen Tätigkeit vor dem Studium. Hierbei wird ihm die Benutzung des Buches die Arbeit erleichtern. Auch für das eigentliche Studium wird der behandelte Stoff im allgemeinen ausreichen, sofern es sich um Studierende der Höheren Technischen Staatslehranstalten für Elektrotechnik und ähnlicher Anstalten

handelt. Für Studierende der Technischen Hochschulen stehen zur weiteren Vertiefung die im gleichen Verlag erschienenen „Ankerwicklungen“ von Richter zur Verfügung.

Zu großem Dank verpflichtet bin ich den Herren Dr. Bödefeld, München, und Sieber und Vilsmeier, Aachen, die mir wertvolle Ratschläge gegeben, die Urschrift durchgesehen und mich auch beim Lesen der Korrekturen unterstützt haben. Ferner danke ich den Firmen, die mir in entgegenkommender Weise Bilder und sonstige Unterlagen zur Verfügung gestellt haben. Ein Verzeichnis dieser Firmen befindet sich am Schluß des Buches.

Magdeburg, Juni 1936.

F. Heiles.

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
Einleitung:	
Die elektrischen Maschinen	1
A. Allgemeines	1
B. Die Gleichstrommaschine	5
C. Der Einankerumformer	9
D. Die Synchronmaschine	10
E. Die Asynchronmaschine (Induktionsmaschine)	14
F. Die Wechselstrom-Stromwendermaschinen	16
Erster Teil.	
I. Stromwenderwicklungen	18
A. Allgemeines	18
B. Anordnung der Spulenseiten in der Nut	18
C. Schaltpläne, Wicklungsarten	20
1. Schleifenwicklung	21
2. Wellenwicklung	22
D. Darstellung und Entwurf der Wicklungen	23
1. Eingängige Schleifenwicklung (Parallelwicklung)	23
2. Eingängige Wellenwicklung (Reihenwicklung)	27
3. Zweigängige Schleifenwicklung	31
4. Zwei- und mehrgängige Wellenwicklung (Reihenparallelwicklung)	32
5. Unsymmetrische Wellenwicklungen	35
a) Wellenwicklung mit blinden Spulen	35
b) Künstlich geschlossene Wellenwicklung	37
6. Grundsätzliches über die Anwendung von Schleifen- und Wellenwicklungen	38
7. Ausgleichsverbindungen	40
E. Wicklungen für Einankerumformer und Dreileitermaschinen	44
F. Herstellung der Stromwenderwicklungen	46
1. Drahtwicklungen	46
2. Formspulenwicklungen	47
3. Stabwicklungen	52
4. Verbindung der Wicklung mit dem Stromwender	56
5. Herstellung der Ausgleichsverbindungen	58
6. Herstellung kleiner Anker	60
7. Wickelmaschinen für kleine Anker	66
II. Gleichstrom-Feldwicklungen	69
A. Feldwicklungen für Gleichstrommaschinen und Einankerumformer	69
B. Feldwicklungen für Schenkelpol-Synchronmaschinen	72
C. Feldwicklungen für Turbomaschinen	74

	Seite
III. Hilfswicklungen	75
A. Wendepolwicklungen	75
B. Kompensationswicklungen	76
C. Käfigwicklungen als Dämpfer- und Anlaufwicklungen	78
Zweiter Teil.	
IV. Einphasige Wechselstrom-Ständerwicklungen	80
A. Allgemeines	80
B. Einschichtwicklungen	80
C. Zweischichtwicklungen	86
D. Bruchlochwicklungen	88
V. Zweiphasige Wechselstrom-Ständerwicklungen	89
VI. Dreiphasige Wechselstrom-Ständerwicklungen	92
A. Allgemeines	92
B. Einschichtwicklungen	92
1. Wicklungen mit Spulen verschiedener Weite	94
a) Drei-Etagen-Wicklungen	94
b) Zwei-Etagen-Wicklungen	96
2. Wicklungen mit Spulen gleicher Weite	101
C. Zweischichtwicklungen	101
D. Bruchlochwicklungen	108
E. Schaltung der Spulen und Stränge	112
F. Wicklungen für Polumschaltung	115
G. Maßnahmen zur Unterdrückung zusätzlicher Stromwärmeverluste	120
H. Herstellung der Wechselstrom-Ständerwicklungen	122
1. Drahtwicklung	122
2. Eingeträufelte Wicklung	122
3. Eingefädelte Wicklung	126
4. Wicklungen mit Formspulen	127
5. Wicklungen mit Halbformspulen	131
6. Stabwicklungen	133
VII. Mehrphasige Läuferwicklungen	135
A. Drahtwicklungen	135
B. Stabwicklungen	136
C. Käfigwicklungen	138
Dritter Teil.	
VIII. Isolierung der Wicklungen	140
A. Isolierstoffe	140
1. Allgemeines	140
2. Glimmer und Glimmererzeugnisse	141
3. Asbest	144
4. Zellstofferzeugnisse	144
5. Faserstofferzeugnisse	145
6. Isolierlacke	145
7. Füllmassen (Kompondmassen)	145
B. Isolation der Drähte und Stäbe	145
C. Isolation von Feldspulen	149
D. Isolation von in Nuten liegenden Wicklungsteilen	150
1. Stromwenderwicklungen	150
a) Drahtwicklung	150
b) Stabwicklung	152

	Seite
2. Wechselstrom-Ständerwicklungen	153
a) Drahtwicklung	153
b) Stabwicklung	155
3. Läuferwicklungen von Asynchronmaschinen	155
E. Isolation der Wicklungsköpfe	155
F. Herstellung von Spulen mit Füllmasse (kompoundierten Spulen).	157
G. Trocknen und Lackieren der Wicklungen	159
IX. Sichern der Wicklungen gegen mechanische Kräfte	160
A. Sichern gegen Kurzschlußkräfte	160
B. Sichern gegen Fliehkräfte	161
X. Prüfen der Wicklungen	164
A. Prüfung der fertigen neuen Wicklungen	164
1. Wicklungsprobe	164
2. Sprungwellenprobe	166
3. Windungsprobe	167
4. Klemmenprobe	167
B. Prüfung teilweise erneuerter Wicklungen	167
C. Prüfung während der Herstellung der Wicklungen	168
1. Prüfung von Stromwendern und Schleifringen	168
2. Prüfung von Spulen und Wicklungen	168
3. Aufsuchen von Fehlerstellen	171
Anhang:	
Umschalten und Umwickeln	172
A. Gleichstromwicklungen	172
1. Änderung der Spannung bei gleichbleibender Drehzahl	172
a) Ankerwicklung	172
b) Feld-, Wendepol- und Kompensationswicklung	174
2. Änderung der Drehzahl bei gleichbleibender Spannung	175
B. Wechselstromwicklungen	176
1. Änderung der Spannung bei gleichbleibender Drehzahl und Frequenz	176
2. Änderung der Frequenz bei gleichbleibender Polzahl	178
3. Änderung der Polzahl bei gleichbleibender Spannung und Frequenz	179
Sachverzeichnis	180
Firmenverzeichnis	186

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen.

(Die in eckigen Klammern beigefügten Zahlen geben die Seiten an, auf denen die Zeichen oder die Begriffe zum erstenmal vorkommen.)

- a = Zahl der parallelen Ankerzweigpaare (halbe Zahl der parallelen Ankerzweige) [21].
 D = Durchmesser [5].
 e = mittlere Spannung eines Ankerleiters [38].
 f = Frequenz (in Hz) [10].
 k = Zahl der Stromwandlerstege (meistens = Zahl der Spulen) [22].
 m = Zahl der Gänge (bei Stromwandlerwicklungen) [34].
 n = Drehzahl (in U/min) [10].
 n_s = synchrone Drehzahl (in U/min) [14].
 N = Zahl der Nuten [4, 27].
 p = Zahl der Polpaare [4].
 q = Zahl der bewickelten Nuten bei einphasigen Wechselstromwicklungen [81],
= Zahl der Nuten je Pol und Strang bei mehrphasigen Wechselstromwicklungen [89].
 s = Schlupf (Schlüpfung) [14].
 u = Zahl der Spulenseiten quer zur Nut [19].
 U = Spannung (einer Maschine) [39].
 W = Spulenweite (bei Wechselstromwicklungen) [87].
 y = Gesamtschritt [22].
 y_1 = Spulenweite (bei Stromwandlerwicklungen) [22].
 y_2 = Schaltschritt [22].
 y_v = Verbindungsschritt (bei Ausgleichsverbindungen) [40].
 z = Zahl der gesamten Ankerleiter (bei Stromwandlerwicklungen) [39].
 η_1 = Nutenschritt [23].
 τ = Polteilung [5].

Einleitung:
Die elektrischen Maschinen.

A. Allgemeines.

Die Wirkung jeder elektrischen Maschine beruht auf dem Zusammenwirken von magnetischen Feldern und vom Strom durchflossenen Leitern. Ein magnetisches Feld ist z. B. daran zu erkennen, daß es auf eine Kompaßnadel Kräfte ausübt, die die Nadel in eine bestimmte Richtung einstellen.

Magnetische Felder werden ihrerseits wieder von elektrischen Strömen erzeugt. Eine Spule nach Abb. 1 sei von einem Gleichstrom durchflossen; die Richtung des Stromes ist in der Weise angedeutet, daß in den Schnittstellen der Windungen Kreuze und Punkte eingezeichnet sind, Kreuze deuten das Fließen des Stromes vom Beschauer her in die Papirebene hinein, die Punkte das Fließen aus der Papirebene heraus in Richtung auf den Beschauer an. Der Strom der Spule schafft ein magnetisches Feld, das durch die dünnen Linien angedeutet ist: die Linien laufen in sich selbst zurück, ein Teil in weitem Bogen, so daß sie nicht vollständig darzustellen sind. Man bezeichnet die Linien als Induktionslinien (auch Kraftlinien); die Gesamtheit der Linien nennt man magnetischen Fluß.

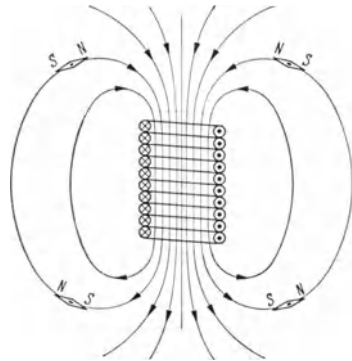


Abb. 1. Magnetisches Feld einer Spule.

Die Richtung der Linien fällt an allen Stellen mit der Richtung zusammen, in die sich die Kompaßnadel einstellt; der gegenseitige Abstand der einzelnen Linien ist um so geringer, ihre Dichte also um so größer, je größer an dieser Stelle die auf die Nadel ausgeübte Kraft ist. Den Linien ordnet man eine solche Richtung zu, daß sie am Südpol der Nadel in diese eintreten und an ihrem Nordpol austreten. Die in Abb. 1 durch Pfeile angegebene Richtung der Induktionslinien ergibt sich, wenn der Strom die durch Kreuze und Punkte angedeutete Rich-

tung hat, wobei die Stromrichtung in der üblichen Weise vom positiven zum negativen Pol gerechnet ist.

Die Stärke des magnetischen Feldes bei gegebenen Abmessungen der Spule ist um so größer, je größer das Produkt aus Stromstärke und Windungszahl (Amperewindungszahl) ist; man nennt dieses Produkt Durchflutung.

Man kann auch ohne Erhöhung der Durchflutung die Stärke des Feldes erhöhen, wenn man es in Eisen verlaufen läßt. Durch das Eisen wird gleichzeitig den Induktionslinien der Weg vorgeschrieben. Wenn sie jedoch ganz im Eisen verlaufen, läßt sich ihr Vorhandensein nicht mehr unmittelbar nachweisen. Dies gelingt jedoch wieder, wenn man den Eisenweg an einer Stelle unterbricht (Abb. 2). Im Luftspalt ist dann, wenn die Spule vom Strom durchflossen wird, ein starkes magnetisches Feld nachweisbar. An den Enden des Eisenweges haben sich magne-

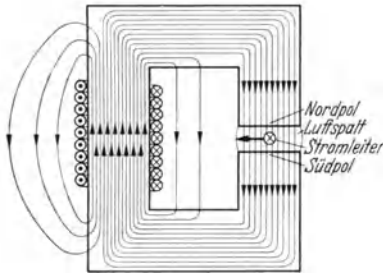


Abb. 2. Magnetischer Eisenkreis mit Luftspalt und Stromleiter.

tische Pole ausgebildet; dort, wo die Induktionslinien aus dem Eisen austreten, ist ein magnetischer Nordpol, wo sie wieder eintreten, ein magnetischer Südpol. Fast alle Linien treten vom Nordpol durch den schmalen Luftspalt zum Südpol über; nur ganz wenige verlaufen durch den übrigen Luftraum und bilden dort ein schwaches „Streifeld“. Eine solche Anordnung, wie sie Abb. 2 zeigt, nennt man einen magnetischen Kreis.

Wir denken uns in den Luftspalt einen geradlinigen, senkrecht zur Papierebene verlaufenden Stromleiter (Draht) hineingebracht, der in Abb. 2 im Schnitt dargestellt ist. Fließt der Strom in ihm in der angedeuteten Richtung, so wird auf ihn eine Kraft ausgeübt, die ihn in der Pfeilrichtung nach links zu bewegen sucht. Diese Kraftwirkung zwischen einem stromführenden Leiter und einem magnetischen Feld wird in jedem elektrischen Motor zur Erzeugung mechanischer Leistung benutzt, wobei der Maschine elektrische Leistung zugeführt werden muß.

Bewegt man den erwähnten Leiter, den wir dabei als stromlos annehmen, im magnetischen Feld, so tritt zwischen seinen Enden eine elektrische Spannung auf. Diese Erscheinung wird in den elektrischen Generatoren zur Erzeugung elektrischer Spannungen benutzt, welche die Maschinen zur Abgabe elektrischer Leistung bei gleichzeitiger Aufnahme mechanischer Leistung befähigen.

Neben diesen beiden Gruppen von elektrischen Maschinen gibt es noch eine dritte Gruppe, die Umformer, die elektrische Leistung in

elektrische Leistung anderer Form verwandeln (meistens durch Umwandlung von Wechselstrom in Gleichstrom).

Die Gesamtheit der elektrischen Leiter, welche eine Maschine enthält, nennt man ihre Wicklungen. Ein Teil der Wicklungen hat die Aufgabe, das magnetische Feld in der Maschine zu erzeugen (Feldwick-

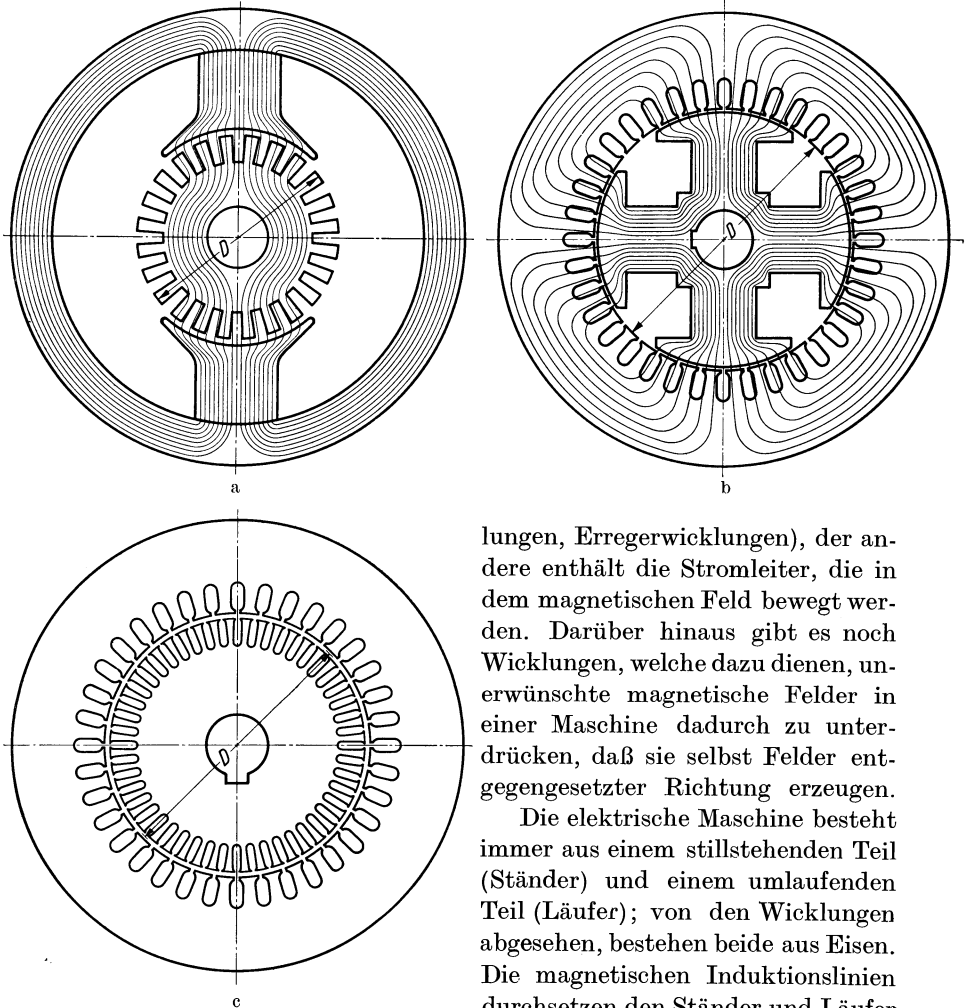


Abb. 3. Grundformen der elektrischen Maschine.
a) Außenpolmaschine; b) Innenpolmaschine;
c) Maschine ohne ausgeprägte Pole.

lungen, Erregerwicklungen), der andere enthält die Stromleiter, die in dem magnetischen Feld bewegt werden. Darüber hinaus gibt es noch Wicklungen, welche dazu dienen, unerwünschte magnetische Felder in einer Maschine dadurch zu unterdrücken, daß sie selbst Felder entgegengesetzter Richtung erzeugen.

Die elektrische Maschine besteht immer aus einem stillstehenden Teil (Ständer) und einem umlaufenden Teil (Läufer); von den Wicklungen abgesehen, bestehen beide aus Eisen. Die magnetischen Induktionslinien durchsetzen den Ständer und Läufer und treten vom Ständer zum Läufer und vom Läufer wieder zum Ständer durch den zwischen beiden befindlichen Luftspalt über.

Die magnetisch wirksamen Eisenteile der Maschinen treten im wesentlichen in drei Grundformen auf, die in Abb. 3 im Schnitt dargestellt

sind. Eine Maschine der Form *a*, bei der sog. ausgeprägte Pole im Ständer vorhanden sind, heißt Außenpolmaschine, eine Maschine mit ausgeprägten Polen im Läufer, die der Form *b* entspricht, heißt Innenpolmaschine. Bei beiden Ausführungsformen sind die ausgeprägten Pole stets die Träger der das Magnetfeld erregenden Wicklungen, die von Gleichstrom durchflossen werden. Bei der Form *c* sind weder im Ständer noch im Läufer ausgeprägte Pole vorhanden.

Diejenigen magnetisch wirksamen Eisenteile der Maschine, die keine ausgeprägten Pole tragen, haben Nuten, in denen Wicklungen liegen. Die gebräuchlichsten Nutenformen sind in Abb. 4 dargestellt. Die Formen *a* und *b* sind offene Nuten, die übrigen halboffene oder halbgeschlossene Nuten; in Sonderfällen kommen auch ganz geschlossene Nuten vor, die im übrigen meistens den Formen *c*, *d* und *e* entsprechen. Bei großem Maschinendurchmesser sind die Seitenwände einer Nut (Nutflanken) meistens einander parallel (Formen *a* bis *f*), nur bei kleineren Durchmessern verlaufen sie häufig radial, so daß die Nuten des inneren

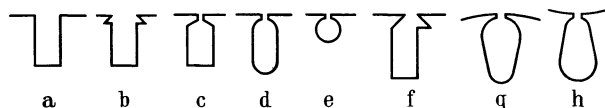


Abb. 4. Gebräuchliche Nutenformen.

Teiles (Läufer) der Form *g*, die des äußeren Teiles (Ständer) der Form *h* entsprechen. Die Wicklungen ausgeprägter Pole bezeichnet man auch als konzentrierte Wicklungen, während die in Nuten untergebrachten Wicklungen meistens verteilte Wicklungen sind.

Die elektrische Maschine wird mit verschiedener Polzahl ausgeführt; die Zahl der Pole ist immer gerade, die Polpaarzahl wird allgemein mit p bezeichnet. Wenn ausgeprägte Pole vorhanden sind, ist die Polzahl ohne weiteres erkennbar; Abb. 3 a stellt z. B. eine zweipolige ($p = 1$), Abb. 3 b eine vierpolige ($p = 2$) Maschine dar. Die ungefähre Gestalt der Magnetfelder dieser beiden Maschinen ist in Abb. 3 a u. 3 b angedeutet. Bei Maschinen ohne ausgeprägte Pole ist die Polzahl nicht ohne weiteres zu erkennen; es kommt auf den Verlauf des Magnetfeldes im Eisen an, und dieser wird bestimmt durch die Wicklung. Die Anordnung nach Abb. 3 c ist (ohne Nuten) in der Abb. 5 a mit zweipoligem ($p = 1$), in der Abb. 5 b mit vierpoligem Feld ($p = 2$) dargestellt. Ein Feld nach Abb. 5 a wird z. B. von einer Wicklung nach Abb. 120 a, ein Feld nach Abb. 5 b von einer Wicklung nach Abb. 120 b erregt.

Die das Arbeiten einer elektrischen Maschine bewirkenden Vorgänge spielen sich im wesentlichen im Luftspalt zwischen Ständer und Läufer und in seiner unmittelbaren Umgebung ab. Für die Bemessung der

Größe einer Maschine ist deshalb außer der Eisenlänge der in Abb. 3 und 5 mit D bezeichnete Durchmesser maßgebend. Teilt man den diesem Durchmesser entsprechenden Umfang durch die Zahl der Pole, so erhält man die Polteilung τ . In Abb. 3 a und 5 a ist also die Polteilung $\frac{D \cdot \pi}{2}$, in Abb. 3 b und 5 b ist sie $\frac{D \pi}{4}$, allgemein also $\frac{D \pi}{2p}$.

Die magnetischen Verhältnisse in einer Maschine wiederholen sich jedesmal, wenn man um zwei Polteilungen weiterschreitet. Bei der

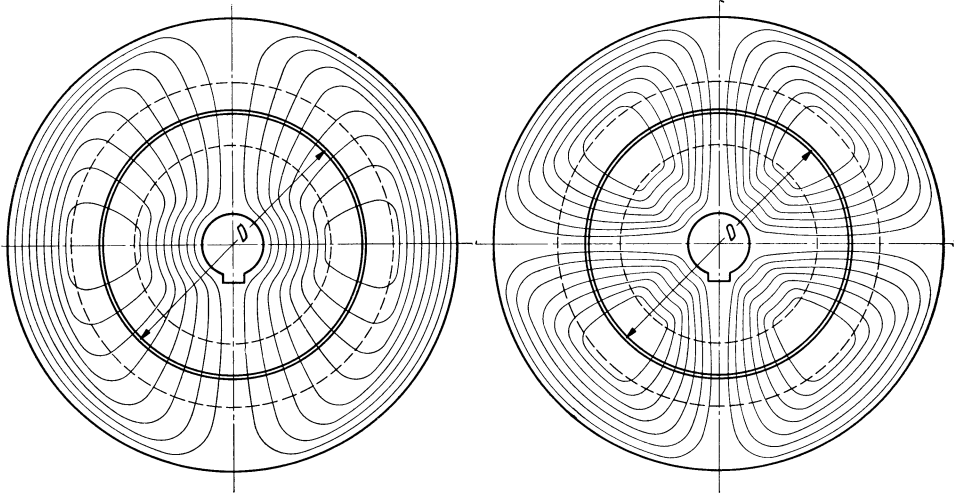


Abb. 5. Maschine ohne ausgeprägte Pole nach Abb. 3 c. a) mit zweipoligem, b) mit vierpoligem Magnetfeld.

mehrpolygonen Maschine ist also die doppelte Polteilung in magnetischer und elektrischer Hinsicht dasselbe, was bei der zweipoligen Maschine der ganze dem Durchmesser D entsprechende Umfang ist. Man ordnet daher der doppelten Polteilung einen elektrischen Winkel von 360° zu. Bei Maschinen mit nur einem Polpaar stimmen räumliche und elektrische Winkel überein, bei Maschinen mit p Polpaaren entspricht einem beliebigen räumlichen Winkel ein p mal so großer elektrischer Winkel.

B. Die Gleichstrommaschine.

Die Gleichstrommaschine wird stets als Außenpolmaschine ausgeführt, ihr Aufbau entspricht also Abb. 3 a. Die Zahl der Pole wird so gewählt, daß die Ausnutzung der Maschine am günstigsten wird. Bei den kleinsten Maschinen ist die Polpaarzahl $p = 1$ und wächst bis etwa $p = 12$ bei den größten Maschinen.

Der Ständer, der auch Magnetgestell oder Polgestell genannt wird, besteht aus dem ringförmigen Joch und den an seinem inneren Umfang sitzenden Polen. Der mittlere Teil eines Poles heißt Polkern, der

verbreiterte, dem Anker (Läufer) zugewandte Teil des Poles wird Polschuh, der dem Joch zugewandte Teil des Polkernes Polwurzel genannt. Der Raum zwischen zwei Polen wird als neutrale Zone bezeichnet.

Die Pole tragen die von Gleichstrom durchflossenen Spulen der Feldwicklung, die das Magnetfeld erzeugen. Dieses steht im Raume, also auch in bezug auf den Ständer, still und ändert auch seine Größe während längerer Zeit im allgemeinen nicht. Der Anker dreht sich jedoch in dem Feld, sein Eisen wird fortwährend „ummagnetisiert“. Wenn das Ankereisen massiv wäre, würden in ihm bei diesem Ummagnetisieren starke Wirbelströme entstehen, die es erhitzen und große Leistungsverluste verursachen würden. Um sie zu unterdrücken, wird der Anker aus einzelnen Blechen (meistens 0,5 mm stark) zusammengesetzt, die durch aufgeklebtes dünnes Papier oder durch eine Lackschicht gegeneinander isoliert sind.

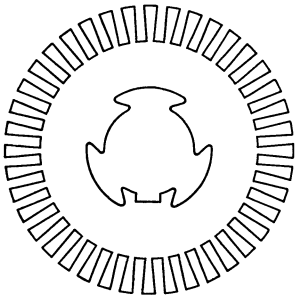


Abb. 6. Ankerblech einer kleineren Gleichstrommaschine.

Bei kleineren Ankern sitzen die Bleche unmittelbar auf der Welle, wobei häufig nierenförmige Aussparungen (Abb. 6) oder auch runde Löcher vorgesehen werden, die zum Durchleiten von Kühlluft dienen. Bei größeren Ankern sitzen die Bleche auf einem sternförmigen Körper, der Ankernabe. Das Blechpaket wird durch Druckringe zusammengepreßt. Bei größerer Ankerlänge wird das Blechpaket in Teilpakete von je etwa 40...70 mm unterteilt; zwischen den Teilpaketen liegen Luftzwischenräume von je etwa 10 mm Breite (vgl. Abb. 12 u. 63). Die Endbleche der Teilpakete sind gewöhnlich 1 mm stark und mit aufgenieteten oder aufgeschweißten Stegen versehen, die den Abstand zwischen den Teilpaketen aufrecht erhalten.

Im Ständer findet, wie schon erwähnt, kein Ummagnetisieren statt. Nur an der Oberfläche der Polschuhe treten infolge der Nutung des umlaufenden Ankers magnetische Feldänderungen (Ummagnetisierungen) auf, die Wirbelströme zur Folge haben können (Oberflächenverluste). Man stellt daher zweckmäßig die Polschuhe ebenfalls aus Blechen her; da jedoch gewöhnlich Polkern und Polschuh aus einem Stück bestehen, stellt man den ganzen Pol aus Blechen (meistens 1 mm stark) her. Das Joch ist jedoch fast immer massiv.

Der in der Ankerwicklung der Gleichstrommaschine fließende Strom ist immer ein Wechselstrom, nur der äußere Strom ist ein Gleichstrom. Zur Umformung der einen Stromart in die andere dient der Stromwender oder Kommutator (Abb. 7).

Die Stromwendernabe *a* aus Grau- oder Stahlguß sitzt entweder auf

der Welle oder ist bei größeren Ankern an die Ankernabe angeflanscht. Die Stege *b*, auch Lamellen oder Segmente genannt, werden aus gezogenem Profilkupfer hergestellt und durch Schwalbenschwänze der Nabe und des Druckringes *c* festgehalten. Die Fahnen *d*, die die Verbindung mit der Wicklung herstellen, sind mit den Stegen hart verlötet oder vernietet und weich gelötet. Die Stege sind untereinander durch Zwischenlagen *e* aus Mikanit und gegen Druckring und Nabe durch Mikanitkappen *f* isoliert.

Die Zahl der Stege ist allgemein gleich der Zahl der Ankerspulen; jeder Steg steht in Verbindung mit dem Anfang einer Ankerspule und dem Ende einer zweiten.

Auf dem Stromwender schleifen die aus gepreßter Kohle hergestellten Bürsten, die zur Zuführung bzw. Abführung des Stromes dienen. Sie sitzen in den Bürstenhaltern und werden durch Federn auf die Oberfläche des Stromwenders gedrückt. Die Bürstenhalter werden von den Bürstenbolzen getragen, und diese sind ihrerseits isoliert am Bürstenträger befestigt. Als Bürstensatz bezeichnet man alle auf dem gleichen Bolzen sitzenden Bürsten. Die Zahl der Bürstensätze ist meistens so groß wie die Polzahl (vgl. S. 23), positive und negative Bürstensätze wechseln ab. Alle Bürstensätze gleicher Polarität sind miteinander leitend verbunden.

Die Gleichstrommaschine hat mindestens zwei Wicklungen, die Feldwicklung und die Ankerwicklung. Nach der Schaltung der beiden

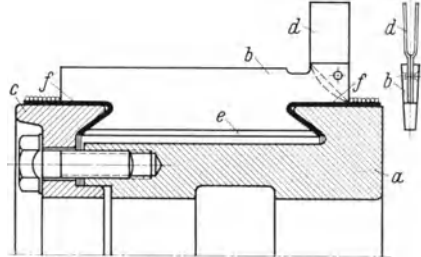


Abb. 7. Schnitt durch einen Stromwender.

Wicklungen unterscheidet man verschiedene Arten der Gleichstrommaschine, deren Schaltungen in Abb. 8 dargestellt sind. Bei der fremderregten Maschine liegt die Feldwicklung an einer fremden Stromquelle, bei der Nebenschlußmaschine liegt sie parallel zur Ankerwicklung, bei der Hauptschluß- oder Reihenschlußmaschine in Reihe mit der Ankerwicklung. Die Doppelschlußmaschine schließlich hat eine Nebenschluß- und eine Hauptschlußfeldwicklung.

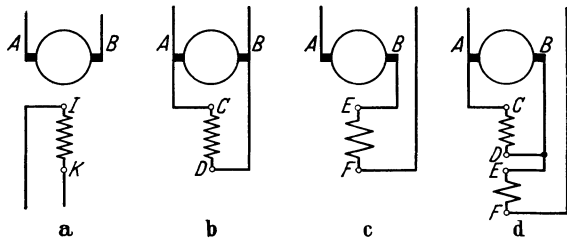


Abb. 8. Schaltungen der Gleichstrommaschine. a) Maschine mit Fremderregung; b) Nebenschlußmaschine; c) Hauptschlußmaschine; d) Doppelschlußmaschine.

Wenn die Ankerwicklung vom Strom durchflossen wird, erzeugt auch sie ein magnetisches Feld, das Ankerfeld. Die Stromrichtungen im Anker und in der Erregerwicklung stehen in bestimmter Beziehung zueinander, wobei die Drehrichtung und die Betriebsart (Motor oder Generator) maßgebend sind. In Abb. 9 sind die Verhältnisse schematisch dargestellt.

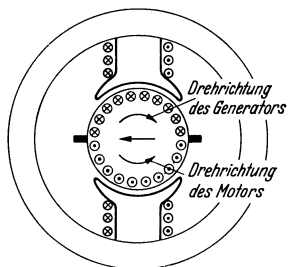


Abb. 9. Zusammenhang zwischen der Drehrichtung und den Stromrichtungen in Anker- und Erregerwicklung. (Der gerade Pfeil deutet die Richtung des Ankerfeldes an.)

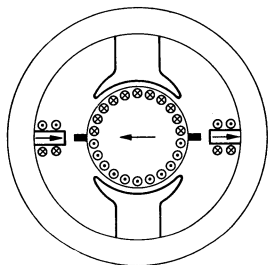


Abb. 10. Zusammenhang zwischen den Stromrichtungen in Anker- und Wendepolwicklung.

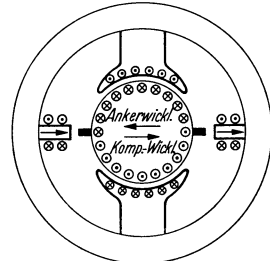


Abb. 11. Zusammenhang zwischen den Stromrichtungen in Anker-, Wendepol- und Kompensationswicklung.

Die Wirkungen des Ankerfeldes sind insbesondere in der neutralen Zone unangenehm. Beim Durchgang der Ankerleiter durch diese Zone kehrt sich in ihnen die Richtung des Stromes um; man nennt diesen Vorgang Stromwendung (Kommutierung). Das Ankerfeld in der neutralen Zone bewirkt, daß die Stromwendung unter Funkenbildung am Stromwender vor sich geht. Um diese zu unterdrücken, ruft man in der neutralen Zone ein Magnetfeld hervor, das dem Ankerfeld entgegen wirkt. Hierzu dienen die Wendepole oder Hilfspole, die zwischen den Feldwicklungstragenden Hauptpolen angeordnet werden. Die Wendepole erhalten eine Wicklung, die in Reihe mit der Ankerwicklung geschaltet wird, also vom Ankerstrom durchflossen wird. Die Stromrichtung in den Wendepolspulen ergibt sich ohne weiteres aus dem Zweck (Abb. 10); die magnetisierende Wirkung der Wendepolwicklung muß die entgegengesetzte Richtung haben wie die der Ankerwicklung.

Bei großen Maschinen und beim Vorliegen besonders schwieriger Betriebsverhältnisse (stoßweise Belastung) genügt es häufig nicht, dem Ankerfeld nur in der neutralen Zone entgegen zu wirken, vielmehr muß es am ganzen Ankerumfang „kompensiert“ werden. Hierzu dient die Kompensationswicklung, die dann noch zur Wendepolwicklung hinzu kommt. Die Stromleiter der Kompensationswicklung liegen in Nuten, die in den Polschuhen der Hauptpole angeordnet werden. Sie werden

ebenso wie die Wendepolspulen vom Ankerstrom durchflossen; die Stromrichtung ist an allen Stellen entgegengesetzt derjenigen in den unter ihnen liegenden Ankerleitern (Abb. 11). Die Enden der Wendepol- und Kompensationswicklung tragen die genormten Klemmen-

bezeichnungen G und H . Meistens sind diese Wicklungen unlösbar mit der Ankerwicklung in Reihe geschaltet, so daß nur der Anfang der Ankerwicklung (Klemme A) und das Ende der Wendepol- oder Kompensationswicklung (Klemme H) zugänglich sind.

In Abb. 12 ist eine auseinandergenommene Gleichstrommaschine dargestellt. Der im Hintergrund stehende Ständer hat vier Hauptpole

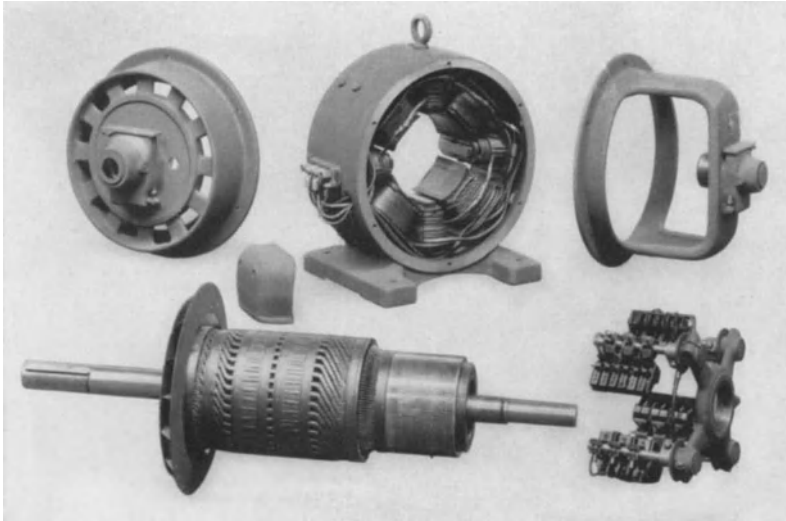


Abb. 12. In Einzelteile zerlegte Gleichstrommaschine (Werkbild Siemens).

und vier Wendepole. Im Vordergrund liegt der Anker mit dem Stromwender, der links einen Lüfter trägt, der Kühlluft durch die Maschine fördert. Rechts vom Anker befindet sich der Bürstenträger mit den Bürsten und Verbindungsleitungen.

C. Der Einankerumformer.

Der Einankerumformer dient meistens zur Umformung von Wechselstrom in Gleichstrom, kann aber auch Gleichstrom in Wechselstrom oder Gleichstrom in Gleichstrom anderer Spannung verwandeln. Er entspricht im Aufbau der Gleichstrommaschine, ist also eine Außenpolmaschine. Die Ankerwicklung ist jedoch nicht nur mit einem Stromwender verbunden, sondern auch mit Schleifringen, die zur Zu- oder Ableitung des Wechselstromes dienen. Am gebräuchlichsten sind Umformer mit drei Schleifringen für kleinere Leistungen und solche mit sechs Schleifringen für größere Leistungen. Gewöhnlich liegen Stromwender und Schleifringe auf verschiedenen Seiten des Ankers.

Bei kleinen Maschinen werden die Schleifringe auf eine Nabe isoliert aufgepreßt, bei größeren Maschinen werden sie möglichst freitragend angeordnet, damit der Bürstenstaub keine leitenden Brücken zwischen den einzelnen Ringen herstellen kann. Die Halter, welche die Schleifringbürsten tragen, sitzen gewöhnlich an sichelartigen Trägern.

Im Betrieb ist der Einankerumformer von der Wechselstromseite aus gesehen eine Synchronmaschine; er ist wie diese (vgl. folgenden Abschnitt) an bestimmte Drehzahlen gebunden. Im Ständer hat er abweichend von der Gleichstrommaschine oft noch eine Käfigwicklung, die das Pendeln des Ankers unterdrücken und außerdem das „asynchrone“ Anfahren der Maschine von der Wechselstromseite aus ermöglichen soll (Abb. 96).

D. Die Synchronmaschine.

Die Synchronmaschine wird fast stets als Innenpolmaschine gebaut; ihr Aufbau entspricht also Abb. 3b. Der Ständer ist dann derjenige Teil, der mit dem Wechselstromnetz in Verbindung steht; ein Zwischenglied wie der Stromwender bei der Gleichstrommaschine ist nicht notwendig, die Ständerwicklung kann daher für viel höhere Spannungen bemessen werden als die Ankerwicklung einer Gleichstrommaschine. Der Läufer, der auch die Bezeichnung Induktor führt, wird mit Gleichstrom erregt; dieser wird über zwei Schleifringe zugeführt.

Während bei der Gleichstrommaschine die Polpaarzahl ohne Rücksicht auf die Drehzahl so gewählt werden kann, daß die beste Ausnutzung erzielt wird, stehen bei der Synchronmaschine Drehzahl, Polpaarzahl und Frequenz des Wechselstromes in einem festen Verhältnis zueinander, so daß, wenn zwei von diesen Größen gegeben sind, auch die dritte festliegt; es ist

$$n = 60 \frac{f}{p} \quad (1)$$

(n = Drehzahl in U/min, f = Frequenz in Hz, p = Polpaarzahl). Für die in Deutschland übliche Frequenz von 50 Hz gehören die genormten, in Tafel 1 aufgeführten Polzahlen und Drehzahlen zusammen.

Tafel 1. Genormte Drehzahlen und Synchrondrehzahlen von Wechselstrommaschinen für eine Frequenz von 50 Hz (nach VDE 0530/1934).

(Die eingeklammerten Werte sollen nach Möglichkeit vermieden werden.)

Drehzahl n U/min	Polzahl $2p$	Drehzahl n U/min	Polzahl $2p$	Drehzahl n U/min	Polzahl $2p$
3000	2	375	16	150	40
1500	4	300	20	125	48
1000	6	250	24	(107)	(56)
750	8	(214)	(28)	94	64
600	10	188	32	(83)	(72)
500	12	(167)	(36)	75	80

Mit der gleichen Drehzahl, wie sie der Läufer hat, läuft im Ständer ein magnetisches Drehfeld um. Von diesem Gleichlauf (Synchronismus) hat die Maschine ihren Namen.

Da das Magnetfeld sich gegenüber dem Ständer dreht (magnetisches Drehfeld), so muß dessen magnetisch wirksamer Eisenkörper aus Blechen (0,5 mm Stärke) zusammengesetzt sein. Auch hier wird bei großen Eisenlängen das Blechpaket in Teilpakete zerlegt, zwischen denen sich Schlitzte zum Durchtreten der Kühlluft befinden.

Die meisten Synchronmaschinen sind dreiphasige Wechselstrommaschinen (Drehstrommaschinen). Bei ihnen sind im Ständer drei Wicklungsstränge vorhanden, deren Anfänge und Enden die genormten Bezeichnungen nach Abb. 13 tragen. Stehen die drei Stränge, wie in Abb. 13 a, in keiner Verbindung miteinander, so heißen sie unverkettet. Gewöhnlich sind sie jedoch zu einer Sternschaltung (Abb. 13 b) seltener zu einer Dreieckschaltung (Abb. 13 c), miteinander verbunden. Für besondere Zwecke, z. B. für die Speisung von Bahnnetzen, werden auch einphasige Synchronmaschinen gebaut, die im Ständer nur einen Wicklungsstrang haben.

Für den Läufer gibt es zwei Ausführungsformen. Eine Maschine mit ausgeprägten Polen (nach Abb. 3 b) wird Schenkelpolmaschine genannt. Für die magnetischen Verhältnisse im Läufer gilt das gleiche, was über das Magnetgestell der Gleichstrommaschine gesagt wurde. Wirbelströme können nur in der Oberfläche der Polschuhe entstehen; eine Unterteilung des Eisens in Bleche ist also nur bei ihnen notwendig. Aus Herstellungsgründen werden aber zuweilen die ganzen Pole aus Blechen zusammengesetzt, bei kleinen Maschinen häufig sogar der ganze Läuferkörper (abgesehen von der Welle). Andererseits gibt es auch bei Drehstrommaschinen (nicht bei Einphasenmaschinen) Ausführungen, bei denen Pole und Polschuhe massiv sind. In diesem Falle dürfen aber im Ständer nur halbgeschlossene (keine offenen) Nuten vorgesehen werden. Bei großen Maschinen werden die Pole häufig auf Scheiben- oder Speichenräder aufgesetzt (Polräder), die gleichzeitig als Schwungräder ausgebildet sind, wenn die Maschine mit einer Kolbenkraftmaschine gekuppelt wird.

Der für die Erregung des Läufers benötigte Gleichstrom kann einem Gleichstromnetz entnommen werden. Meistens wird er aber von einer besonderen kleinen Gleichstrommaschine geliefert, die Erregermaschine genannt wird und die mit der Hauptmaschine zusammengebaut oder unmittelbar mit ihr gekuppelt ist.

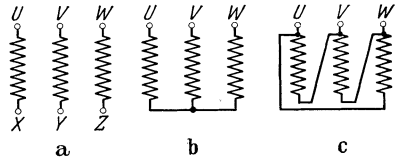


Abb. 13. Schaltungsarten dreiphasiger Wicklungen; a) unverkettet; b) Sternschaltung; c) Dreieckschaltung.

Eine Schenkelpolmaschine mit angebauter Erregermaschine zeigt Abb. 14. Links steht der Ständer; in ihm liegt der Läufer, dessen Welle die Schleifringe zur Zuführung des Erregerstromes trägt. Rechts an

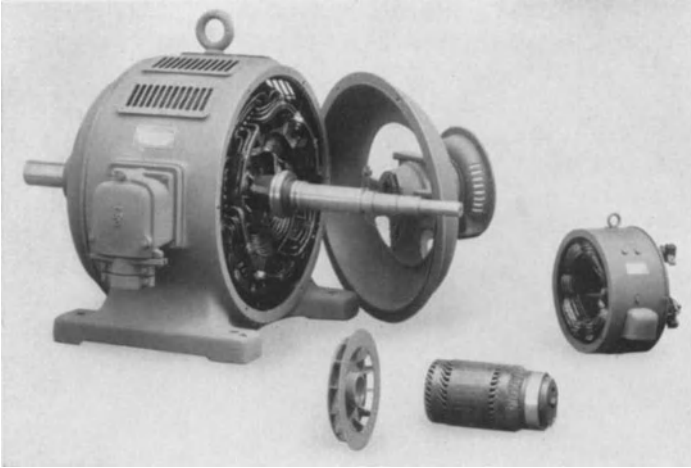


Abb. 14. In Einzelteile zerlegte Synchronmaschine (Werkbild Siemens).

den Ständer angelehnt ist der schleifringseitige Lagerschild, der die Bürsten für die Schleifringe und einen Ansatz zur Befestigung des Ständers der Erregermaschine trägt. Dieser Ständer, an dem der Gleich-

strombürstenapparat sitzt, ist ganz rechts in der Abbildung sichtbar. Im Vordergrund liegen der Lüfter und der Anker für die Erregermaschine, die nach Anbau des Lagerschildes auf die verlängerte Welle geschoben und dort befestigt werden. Man bezeichnet eine derartig angebaute Erregermaschine, die keine eigenen Lager besitzt, als „fliegend“ angeordnete Erregermaschine.

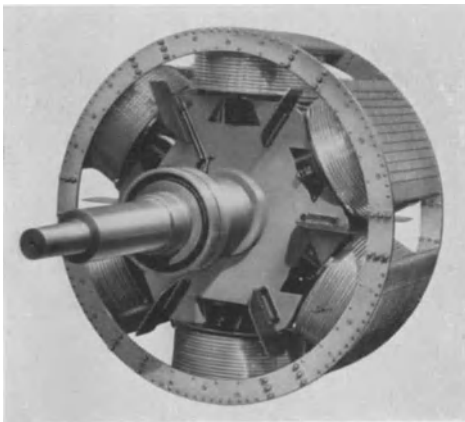


Abb. 14 a. Sechspoliger Schenkelpolläufer einer Synchronmaschine (Werkbild BBC).

sechspoliger Schenkelpolläufer allein dargestellt. Die Pole sind durch Schwalbenschwänze an dem auf der Welle sitzenden Läuferkörper

Da Abb. 14 Einzelheiten des Läufers nicht erkennen läßt, ist in Abb. 14 a ein

befestigt; sie tragen die Erregerspulen. Der Läufer hat außerdem eine Dämpferwicklung (vgl. S. 14).

Bei Synchronmaschinen für große Leistungen bei hoher Drehzahl (Turbomaschinen) erhält der Läufer keine ausgeprägten Pole; er hat hier die Gestalt eines Kreiszylinders (Volltrommelinduktor). Es gibt zwei Herstellungsarten für diese Läufer. Bei der einen besteht der ganze Läuferkörper aus einem Stück oder aus aufeinander geschichteten Scheiben, deren Außendurchmesser von vornherein etwa dem Durchmesser des fertigen Läufers entspricht. Zum Unterbringen der Wicklung werden in den Läuferkörper Nuten eingefräst. Die zwischen den Nuten stehenden Zähne erhalten gewöhnlich in Achsrichtung ver-

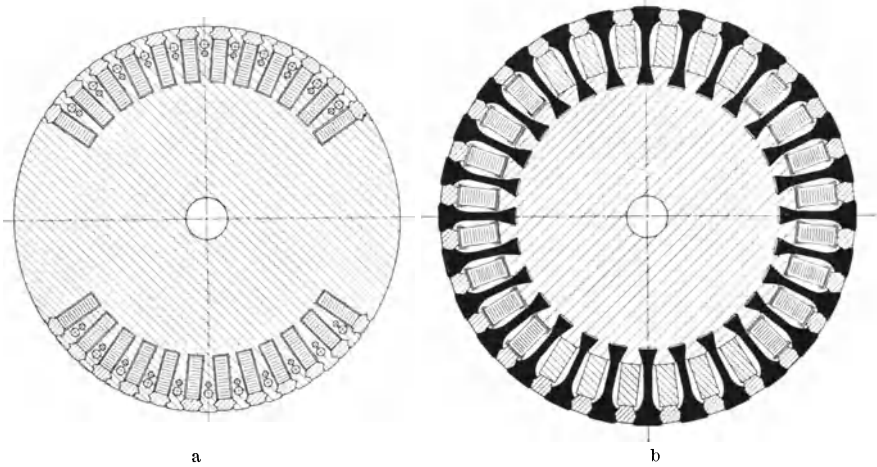


Abb. 15. Schnitte durch Volltrommelinduktoren,
a) massive Ausführung, b) Ausführung mit eingesetzten Zähnen.

laufende Löcher, durch die Kühlluft geleitet wird; die Löcher endigen in Einschnitten, die in bestimmten Abständen ringförmig in die Läuferoberfläche eingedreht sind. Die Wicklung nimmt nur etwa $\frac{2}{3}$ des Umfanges ein; es werden auch nur auf diesem Teil des Umfanges Nuten eingefräst. Die Nuten werden durch Messingkeile verschlossen, nur einzelne Nuten erhalten zuweilen zur Erzielung besonderer magnetischer Wirkungen Stahlkeile. Abb. 15 a zeigt einen Querschnitt durch einen solchen Läufer.

Bei der anderen Ausführungsform (Abb. 15 b) hat der massive Läuferkörper zunächst einen erheblich kleineren Durchmesser als der fertige Läufer. In diesen Körper werden über den ganzen Umfang schwalbenschwanzförmige Nuten eingefräst, welche dazu dienen, die Läuferzähne aufzunehmen, deren Gestalt Abb. 16 zeigt und die gewöhnlich aus Blechen zusammengesetzt sind. Die Zwischenräume zwischen den Zahnreihen

bilden die Nuten zum Aufnehmen der Wicklung. Zwischen Wicklung und Zahnflanken liegt noch ein freier Raum, durch den Kühlluft strömt. Die Nuten, welche die Wicklung enthalten, werden durch Messingkeile verschlossen. Zur Aufnahme der Wicklung werden nur etwa $\frac{2}{3}$ der Nuten gebraucht, die übrigen werden mit massiven Stahlstäben ausgefüllt und mit Stahlkeilen verschlossen.

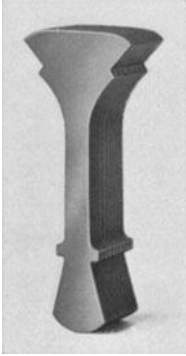


Abb. 16. Geblechter Zahn eines Vollstrommelinduktors nach Abb. 15 b (Werkbild Siemens).

Der Läufer der Synchronmaschine wird häufig mit einer Käfigwicklung versehen, welche die Aufgabe hat, Pendelschwingungen der Maschine zu dämpfen (Dämpferwicklung) oder bei Betrieb als Motor ein „asynchrones“ Anfahren der Maschine zu ermöglichen, wobei die Wicklung in gleicher Weise wirkt wie die Käfigwicklung einer Induktionsmaschine (vgl. S. 15). Die Käfigwicklung ist eine in sich kurzgeschlossene Wicklung; ihre Ausführungsformen sind in Abschnitt III C beschrieben.

E. Die Asynchronmaschine (Induktionsmaschine).

Sowohl im Ständer als auch im Läufer ist der magnetisch wirksame Teil dieser Maschine aus genuteten Blechen zusammengesetzt (Abb. 3 c). Der Ständer trägt eine gleichartige Wicklung wie der Ständer der Synchronmaschine. Die am häufigsten vorkommenden Drehstrommaschinen enthalten also eine aus drei Wicklungssträngen bestehende dreiphasige Wicklung, die bei Betrieb der Maschine mit einem Drehstromnetz in Verbindung steht. Durch Zusammenwirken der drei Ströme des Drehstromsystems wird in der Maschine ein magnetisches Drehfeld erzeugt. Zwischen der Umlaufdrehzahl n_s des magnetischen Drehfeldes, der Frequenz f des Wechselstromes und der Polpaarzahl p der Maschine besteht die Beziehung

$$n_s = 60 \frac{f}{p}. \quad (2)$$

Man nennt n_s auch die synchrone Drehzahl der Maschine. Für die synchronen Drehzahlen der Asynchronmaschinen gelten die genormten Werte der Tafel 1.

Das umlaufende Drehfeld erzeugt durch Induktionswirkung in der Läuferwicklung Ströme, die zusammen mit dem Drehfeld ein Drehmoment bilden. Die wirkliche Drehzahl n des Läufers ist im Betrieb immer um einen geringen Betrag von der synchronen Drehzahl verschieden. Wenn die Maschine als Motor arbeitet, ist n kleiner als n_s , arbeitet sie hingegen als Generator, ist n größer als n_s . Man nennt das Verhältnis

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (3)$$

den Schlupf oder die Schlüpfung der Maschine. Sie beträgt in normalen Betriebszuständen nur wenige Prozente.

Der Läufer trägt eine Wicklung, die im Betrieb gewöhnlich in sich kurzgeschlossen ist. Wird die Wicklung von vornherein als kurzgeschlossene Wicklung hergestellt, so spricht man von einem Kurzschlußläufer. Allgemein werden diese Wicklungen in Form eines aus Stäben und Ringen bestehenden Käfigs gebaut und heißen dann Käfigwicklungen (vgl. Abschnitt VII C).

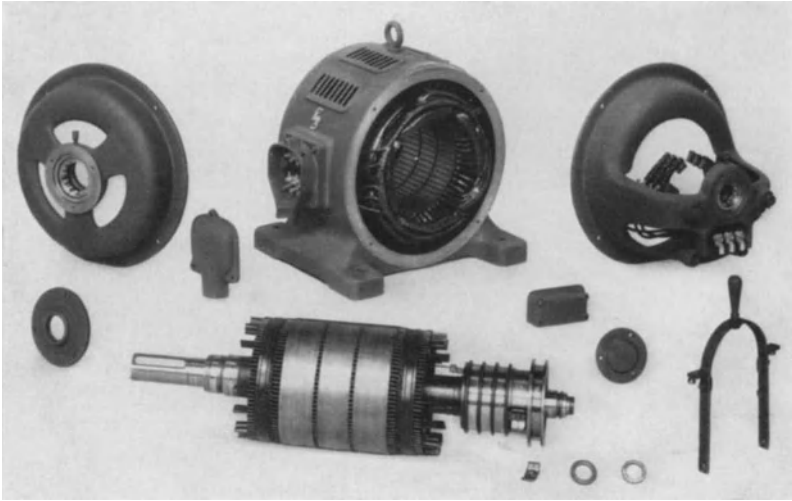


Abb. 17. In Einzelteile zerlegter Asynchronmotor mit Schleifringläufer (Werkbild Siemens).

Eine andere Ausführungsart ist der Schleifringläufer, der meistens eine aus drei Wicklungssträngen bestehende Wicklung trägt, deren Enden zu Schleifringen geführt sind, auf denen Bürsten schleifen. Während des Anlaufvorganges wird in die Läuferstromkreise der Widerstand eines Anlassers eingeschaltet, der zur Begrenzung des Anlaufstromes und zur Vergrößerung des Drehmomentes im Anlauf dient. Nach erfolgtem Anlauf wird auch diese Wicklung kurzgeschlossen. Das Kurzschließen wird häufig unmittelbar an den Schleifringen vorgenommen; die Einrichtung, die das Kurzschließen vornimmt, hebt gewöhnlich gleichzeitig die Bürsten von den Schleifringen ab, damit die Reibungsverluste der Bürsten fortfallen.

Eine auseinandergenommene Asynchronmaschine ist in Abb. 17 dargestellt. Im Vordergrund liegt der Läufer mit den Schleifringen, dahinter steht der Ständer mit den beiden Lagerschilden, von denen der eine den Bürstenapparat sowie die Einrichtung zum Kurzschließen der drei Schleifringe und zum Abheben der Bürsten trägt; die Einrichtung wird durch den im Bild sichtbaren Handgriff betätigt.

F. Die Wechselstrom-Stromwendermaschinen.

Die wichtigsten einphasigen Wechselstrom-Stromwendermaschinen sind der einphasige Reihenschlußmotor und der Repulsionsmotor. Die

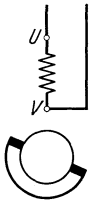


Abb. 18. Schaltung des Repulsionsmotors.

Schaltung des Reihenschlußmotors ist die gleiche wie beim Gleichstrom-Reihenschlußmotor (Abb. 8c). Beim Repulsionsmotor sind die Bürsten des Ankers in sich kurzgeschlossen und nur die Ständerwicklung liegt am Netz (Abb. 18). Der Aufbau des Ankers ist bei beiden Maschinenarten im wesentlichen der gleiche wie bei der Gleichstrommaschine. Bei kleinen Maschinen entspricht auch der Aufbau des Ständers ziemlich genau demjenigen der Gleichstrommaschine, nur muß mit Rücksicht auf die Erregung mit Wechselstrom das magnetisch wirksame Eisen aus

Blechen bestehen. Reihenschlußmaschinen für größere Leistungen erhalten stets Wendepol- und Kompensationswicklung. Der Blechschnitt des Ständers erhält dann meistens eine Form nach Abb. 19.

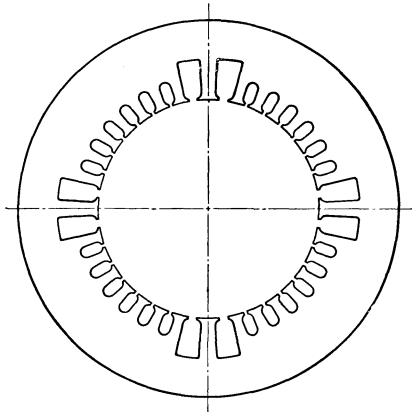


Abb. 19. Blechschnitt für den Ständer eines größeren einphasigen Wechselstrom-Reihenschlußmotors.

Die großen Nuten bilden den Zwischenraum zwischen den breiten Hauptpolen und den schmalen Wendepolen, sie nehmen die Hauptpol- und die Wendepolspulen auf. Die kleinen Nuten in den Polschuhen der Hauptpole dienen zur Aufnahme der Kompensationswicklung. Abb. 20 zeigt den fertig gewickelten Ständer eines Reihenschlußbahnmotors. Beiden dreiphasigen Stromwendermaschinen unterscheidet man die dreiphasige Reihenschlußmaschine und die dreiphasige Nebenschlußmaschine. Der Ständer bei beiden Maschinenarten entspricht hinsichtlich der Nutung und der Wicklung im wesentlichen der dreiphasigen Synchronmaschine oder der Induktionsmaschine. Die grundsätzliche Schaltung der Reihenschlußmaschine zeigt Abb. 21. Die Wicklung des Läufers ist so ausgeführt wie die eines Gleichstromankers; da sie nicht für beliebig hohe Spannungen bemessen werden kann, wird zwischen Ständer- und Läuferwicklung häufig ein Transformator geschaltet.

Die dreiphasige Nebenschlußmaschine ist entweder für Ständerpeisung oder für Läuferpeisung eingerichtet. Bei dem Motor für

Die großen Nuten bilden den Zwischenraum zwischen den breiten Hauptpolen und den schmalen Wendepolen, sie nehmen die Hauptpol- und die Wendepolspulen auf. Die kleinen Nuten in den Polschuhen der Hauptpole dienen zur Aufnahme der Kompensationswicklung. Abb. 20 zeigt den fertig gewickelten Ständer eines Reihenschlußbahnmotors.

Beiden dreiphasigen Stromwendermaschinen unterscheidet man die dreiphasige Reihenschlußmaschine und die drei-

Ständerspeisung besitzt der Läufer eine Wicklung wie bei der Reihenschlußmaschine. Diese Wicklung wird an eine regelbare Spannung mit der Netzfrequenz gelegt, die entweder der Ständerwicklung über Anzapfungen oder einer Hilfswicklung im Ständer entnommen wird, welche ihre Spannung über die Hauptwicklung des Ständers durch Transformation erhält; zur Regelung der Läufer Spannung kann bei der zweiten Ausführungsform ein an das Netz angeschlossener Drehtransformator dienen (Abb. 22 a). Bei der Maschine mit Läuferpeisung hat der Läufer zwei Wicklungen, eine an Schleifringe angeschlossene dreiphasige Wicklung, die mit dem Netz in Verbindung steht und eine Stromwenderwicklung. Auf dem Stromwender schleifen zwei verstellbare Bürstensätze; an die Bürsten sind die sechs Enden der unverketteten Ständerwicklung angeschlossen (Abb. 22 b).



Abb. 20. Ständer eines Reihenschlußbahnmotors (Werkbild BBC).

Auf dem Stromwender schleifen zwei verstellbare Bürstensätze; an die Bürsten sind die sechs Enden der unverketteten Ständerwicklung angeschlossen (Abb. 22 b).

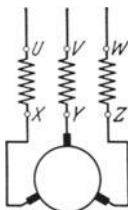


Abb. 21. Schaltung des dreiphasigen Reihenschlußmotors.

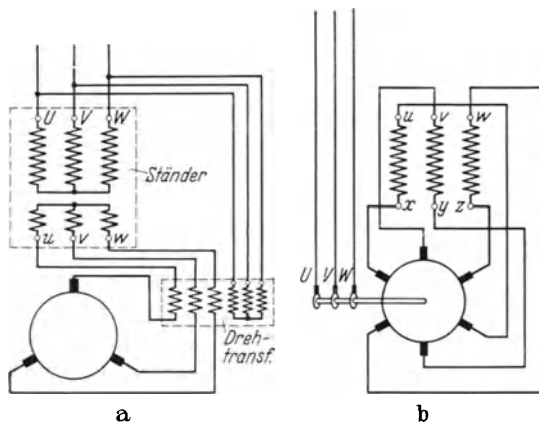


Abb. 22. Schaltungen des dreiphasigen Nebenschlußmotors, a) mit Ständerspeisung, b) mit Läuferpeisung.

Erster Teil.

I. Stromwenderwicklungen.

A. Allgemeines.

Stromwenderanker finden am häufigsten Anwendung bei den Gleichstrommaschinen; bei der Betrachtung der Stromwenderwicklungen legen wir daher den Gleichstromanker zugrunde. Die Wicklungen der Wechselstrom-Stromwenderanker entsprechen grundsätzlich denen der Gleichstromanker. Einer besonderen Betrachtung müssen jedoch die Wicklungen für Einankerumformer und Dreileitermaschinen unterzogen werden (vgl. Abschnitt I E).

Die Wicklungen für die Anker von Stromwendermaschinen bestehen aus einzelnen Spulen, welche in Nuten des Ankerblechpaketes eingebettet liegen und in geeigneter Weise untereinander und mit dem Stromwender verbunden sind. Während bei größeren Maschinen jede Spule fast immer nur aus einer einzigen Windung besteht, kommen

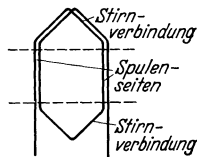


Abb. 23. Schematische Darstellung einer Ankerspule mit zwei Windungen.

bei kleinen und sehr kleinen Maschinen auch Spulen mit mehreren oder vielen Windungen vor. Abb. 23 zeigt schematisch eine aus zwei Windungen bestehende Spule. Für die Darstellung der Wicklung im Schaltplan ist die Windungszahl der Spulen gleichgültig; die Darstellung erfolgt immer so, als ob nur eine Windung vorhanden wäre.

Die geraden Teile der Spule innerhalb der Anker-nuten heißen Spulenseiten, die Teile außerhalb der Nuten Stirnverbindungen. Die Spulenseiten sind die eigentlich wirksamen Teile der Wicklung; die Stirnverbindungen dienen nur dazu, die Spulenseiten unter sich und mit dem Stromwender zu verbinden.

Jede Spule hat zwei Spulenseiten, die wir als rechte und linke Spulenseite bezeichnen wollen, wobei wir die auf dem Anker befindlichen Spulen von der Stromwenderseite her betrachten.

B. Anordnung der Spulenseiten in der Nut.

Bevor wir uns der Betrachtung der verschiedenen Wicklungsarten zuwenden, müssen wir auf die Anordnung der Spulenseiten in der Nut

eingehen. Die Stromwenderwicklungen werden meistens als Zweischichtwicklungen ausgeführt. In jeder Nut liegen dann zwei Schichten von Spulenseiten übereinander, von denen die Unterschicht z. B. nur rechte, die Oberschicht nur linke Spulenseiten enthält oder umgekehrt.

Ein weiteres Merkmal einer Wicklung ist die Zahl u der Spulenseiten, die in einer Schicht nebeneinander (quer zur Nut) liegen. In Abb. 24a sind Nuten mit einer Zweischichtwicklung und einer Spulenseite quer zur Nut ($u = 1$) dargestellt, in Abb. 24b eine Zweischichtwicklung mit drei Spulenseiten quer zur Nut ($u = 3$). Rechte und linke Spulenseiten sind durch rechts-schräge bzw. links-schräge Schraffur gekennzeichnet.

Seltener sind bei Stromwenderwicklungen die Einschichtwicklungen. Bei ihnen enthalten die Nuten nur je eine Spulenseite, und zwar abwechselnd eine linke und eine rechte. Sie kommen bei Niederspannungsmaschinen für elektrolytische Zwecke vor.

Eine Zweischichtwicklung mit $u = 3$ kann man aus einer solchen mit $u = 1$ entstanden denken dadurch, daß man die ursprünglich vorhandene Nutenzahl auf den dritten Teil verringert und dafür drei Spulenseiten in einer Nut nebeneinander anordnet, während vorher quer zur Nut nur eine Spulenseite vorhanden war.

Dabei sind grundsätzlich zwei Ausführungsformen möglich. Wenn bei Spulen, die z. B. mit ihren linken Spulenseiten zusammen in einer Nut liegen, das gleiche auch für die rechten Spulenseiten zutrifft, so bezeichnet man die Wicklung als gewöhnliche oder auch ungeteilte Wicklung, ist dies nicht der Fall, so spricht man von einer Treppenwicklung. Für $u = 3$ ist in Abb. 25 der Unterschied zwischen einer gewöhnlichen Wicklung und einer Treppenwicklung schematisch dargestellt. Spulenseiten, die zur gleichen Spule gehören,

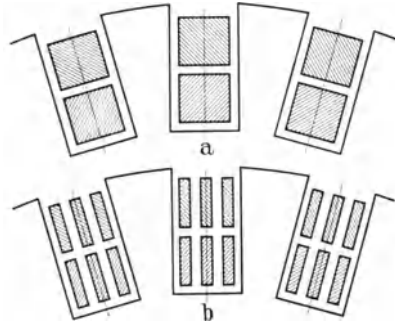


Abb. 24. Zweischichtwicklungen,
a) mit 1 Spulenseite quer zur Nut ($u = 1$).
b) mit 3 Spulenseiten quer zur Nut ($u = 3$),

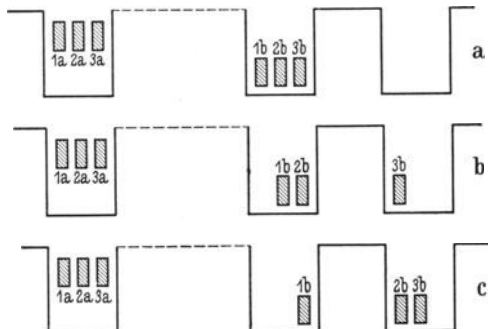


Abb. 25. Unterschied zwischen gewöhnlicher Wicklung und Treppenwicklung,
a) gewöhnliche Wicklung, b) und c) Treppenwicklung.

sind mit gleichen Zahlen bezeichnet, linke und rechte Spulenseiten durch beigefügtes *a* und *b* unterschieden. Bei der gewöhnlichen Wicklung haben die Spulenseiten der gleichen Spule die gleiche relative Lage quer zur Nut. Wenn also (Abb. 25a) z. B. die Spulenseite *1a* an der

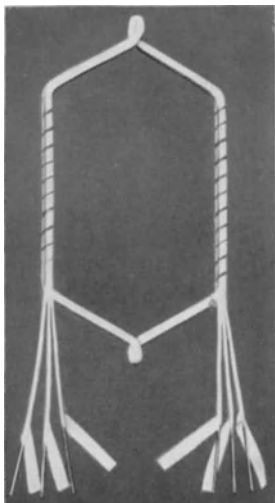


Abb. 26. Wicklungselement mit drei Spulen (Werkbild Siemens).

linken Nutflanke liegt, so ist dies auch bei der zur gleichen Spule gehörigen Spulenseite *1b* der Fall. Die gewöhnliche Wicklung hat den Vorteil, daß alle Spulen die gleiche Form und die gleichen Abmessungen haben, so daß sie mit den gleichen Vorrichtungen hergestellt werden können. Ferner können die Spulen, die in gleichen Nuten liegen, vor dem Einlegen zu Wicklungselementen zusammengefaßt und gemeinsam gegen das Eisen isoliert werden. Ein solches Wicklungselement mit drei Spulen ($u = 3$) zeigt Abb. 26.

Um die Lage zusammengehöriger Spulenseiten bei einer Treppenwicklung zu zeigen, sind in Abb. 25a u. b die beiden bei $u = 3$ vorhandenen Ausführungsmöglichkeiten dargestellt. Bei der Treppenwicklung sind für den gleichen Anker Spulen verschiedener Abmessungen notwendig, so daß diese Wicklungsart in der Herstellung teurer ist als die gewöhnliche Wicklung; da sie aber hinsichtlich der Stromwendungsbedingungen der gewöhnlichen Wicklung überlegen ist, wird sie bei großen Maschinen mit Stabankern, insbesondere bei Grenzleistungsmaschinen oft angewandt.

C. Schaltpläne, Wicklungsarten.

Der Schaltplan einer Wicklung hat den Zweck, die Lage der Spulen am Ankerumfang und die Art der Verbindung der Spulen untereinander und mit dem Stromwender anzugeben. Der Ankerumfang wird dabei abgewickelt dargestellt.

Den gegenseitigen Abstand der beiden Spulenseiten einer Spule bezeichnet man als Spulenweite. Ist die Spulenweite genau gleich der Polteilung, bezeichnet man die Wicklung als Durchmesserwicklung, andernfalls als Sehnenwicklung. Gewöhnlich ist die Sehnung, d. h. die Abweichung der Spulenweite von der Polteilung, gering.

Das Ende jeder Spule ist einmal zu einem Steg des Stromwenders geführt, gleichzeitig aber auch mit dem Anfang einer anderen Spule verbunden. Je nach der Art, in welcher die einzelnen Spulen mitein-

ander verbunden sind, unterscheidet man Schleifenwicklungen und Wellenwicklungen.

Der Unterschied zwischen beiden Wicklungsarten läßt sich am einfachsten bei einer eingängigen Wicklung erklären; auf mehrgängige Wicklungen, welche seltener Verwendung finden, gehen wir später ein.

Bei beiden Wicklungsarten ist in den meisten Fällen die Zahl k der Stromwenderstege gleich der Zahl der Spulen. Eine Ausnahme bilden nur die Wicklungen mit blinden Spulen (vgl. Abschnitt I D 5).

1. Schleifenwicklung.

Bei der eingängigen Schleifenwicklung sind die einzelnen Spulen in derselben Reihenfolge hintereinander geschaltet, in der sie am Ankerumfang aufeinander folgen. Die grundsätzliche Art der Schaltung ist in Abb. 27 dargestellt. Der Anfang der Spule 1 (mit den Spulenseiten 1a und 1b) ist mit dem Stromwenderstege 1 verbunden. Das Ende der Spule 1 führt zum Stromwenderstege 2; an diesem liegt weiterführend auch der Anfang der Spule 2 (mit den Spulenseiten 2a und 2b).

Die Spulenseite 2a folgt dabei am Ankerumfang unmittelbar auf die Spulenseite 1a, ebenso die Spulenseite 2b unmittelbar auf die Spulenseite 1b. Am Stromwenderstege 3 liegt das Ende der Spule 2 und der Anfang der Spule 3 usw., schließlich ist das Ende der letzten Spule zum Stromwenderstege 1 geführt und steht somit mit dem Anfang der Spule 1 in unmittelbarer Verbindung. Die Lage der Pole ist in Abb. 27 und in den folgenden Abbildungen durch Begrenzungslinien mit Schraffur angedeutet.

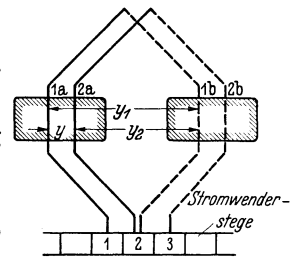


Abb. 27. Grundsätzliche Schaltung der eingängigen Schleifenwicklung.

Durchläuft man bei der eingängigen Schleifenwicklung die Spulen in der Reihenfolge ihrer Schaltung, so berührt man die Stromwenderstege in der Reihenfolge, in der sie nebeneinander liegen. Beginnt man z. B. bei einer positiven Bürste, so ist man zu einer negativen Bürste gelangt, wenn man den $2p$ -ten Teil der Ankerspulen (p = Zahl der Polpaare) durchlaufen hat. Der durchlaufene Teil der Wicklung ist also ein vollständiger Ankerstromkreis. Man erkennt, daß die Wicklung aus $2p$ solcher Stromkreise besteht, die parallel geschaltet sind (Abb. 28). Man bezeichnet allgemein mit a die halbe Zahl der parallelen Ankerzweige; jede Wicklung hat also $2a$ parallele Zweige. Für die eingängige Schleifenwicklung gilt demnach

$$2a = 2p.$$

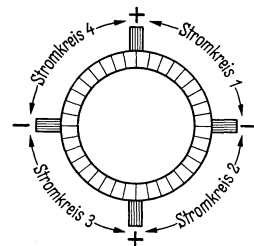


Abb. 28. Ankerstromkreise bei einer Schleifenwicklung für zwei Polpaare.

Daraus folgt, daß die Schleifenwicklung grundsätzlich soviele Bürsten wie Pole haben muß und daß man den Strom eines Stromkreises oder eines Ankerleiters erhält, wenn man den Strom der Maschine durch die Zahl der Pole dividiert.

Die Spulenweite, die wir bereits kennengelernt haben, bezeichnen wir mit y_1 (Abb. 27). Den Abstand zwischen zwei im Schaltplan aufeinanderfolgenden Spulen bzw. ihren Spulenseiten bezeichnet man als den Gesamtschritt y der Wicklung; er setzt sich zusammen aus der Spulenweite y_1 und dem sog. Schaltschritt y_2 , welcher den Abstand zwischen zwei Spulenseiten darstellt, die an denselben Stromwenderstege angeschlossen sind (in Abb. 27 z. B. die Spulenseiten $1b$ und $2a$). Wie man aus Abb. 27 erkennt, gilt für die Schleifenwicklung die Gleichung

$$y = y_1 - y_2. \tag{5}$$

Die Schritte y , y_1 und y_2 pflegt man nicht in Längeneinheiten anzugeben, sondern durch die Zahl der Spulenseiten oder der Stromwenderstege, welche dem Abstand zwischen den beiden Spulenseiten entspricht, zwischen denen die Schritte zu messen sind (vgl. die späteren Beispiele).

2. Wellenwicklung.

Bei der Wellenwicklung ist die Verbindungsfolge der Spulen anders (Abb. 29). Auf die Spule 1 folgt beim Durchlaufen der Wicklung

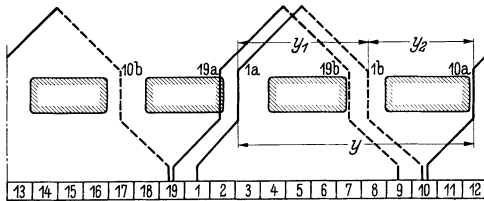


Abb. 29. Grundsätzliche Schaltung der eingängigen Wellenwicklung.

nicht die neben dieser liegende Spule 2 sondern eine Spule, die etwa um eine Polteilung von Spule 1 entfernt liegt (Spule 10 in Abb. 29). Bei der eingängigen Wellenwicklung kommt man erst zu einem dem Steg 1 benachbarten Steg (Steg 19 in Abb. 29),

wenn man p Spulen durchlaufen hat (zwei Spulen in Abb. 29); zwischen zwei benachbarten Stegen liegen also p Spulen.

Da der Abstand von einer positiven zu einer negativen Bürste stets der $2p$ -te Teil des Ankerumfangs ist, so muß man um $\frac{k}{2p}$ ($k = \text{Stegzahl} = \text{Spulenzahl}$) nebeneinander liegende Stege weiterschreiten, um von einer positiven zu einer negativen Bürste zu gelangen (vgl. Abb. 34); man muß dann also $\frac{k}{2p} \cdot p = \frac{k}{2}$ Spulen durchlaufen. Das bedeutet, daß bei der eingängigen Wellenwicklung unabhängig von der Polzahl die Hälfte der Spulen einen Ankerstromkreis bildet. Es sind also stets zwei parallele Ankerzweige vorhanden; es ist

$$2a = 2. \tag{6}$$

Der Strom in einem Ankerleiter ist demnach stets die Hälfte des gesamten Ankerstromes.

Die Tatsache, daß die Zahl der parallelen Ankerzweige bei der eingängigen Wellenwicklung immer 2 beträgt, gestattet es, bei Ankern mit dieser Wicklung mit nur einem Bürstensatzpaar auszukommen (in Abb. 35 angedeutet); der negative Bürstensatz ist dann um eine Polteilung (oder um ein ungerades Vielfaches der Polteilung) gegenüber dem positiven versetzt. Von dieser Möglichkeit macht man jedoch nur in besonderen Fällen Gebrauch, z. B. bei ganz kleinen Maschinen oder dann, wenn es, wie bei Fahrzeugmotoren, schwierig ist, mehr als zwei Bürstensätze so anzuordnen, daß sie der Bedienung zugänglich sind. In den meisten Fällen erfordert es die Rücksicht auf gute Ausnutzung der Stromwenderoberfläche, soviel Bürstensätze anzuordnen wie Pole vorhanden sind.

Die Beziehung, welche bei der Wellenwicklung zwischen dem Gesamtschritt y , der Spulenweite y_1 und dem Schaltschritt y_2 besteht, ist aus Abb. 29 ohne weiteres zu erkennen. Es ist

$$y = y_1 + y_2. \quad (7)$$

Neben den Schritten y , y_1 und y_2 hat jede Wicklung noch einen Nutenschritt η_1 , der die Spulenweite in Nutteilungen angibt. Zwischen ihm und der Spulenweite y_1 besteht die Beziehung

$$\eta_1 = \frac{y_1}{u}. \quad (8)$$

Der Nutenschritt muß natürlich immer eine ganze Zahl sein. Bei der Treppenwicklung ergibt sich aber nach Gl. (8) eine gebrochene Zahl. Dadurch wird zum Ausdruck gebracht, daß die Spulen der Treppenwicklung nicht alle den gleichen Nutenschritt haben, sondern daß dessen Größe von Spule zu Spule sich periodisch ändert. Ergibt sich z. B. nach Gl. (8) $\eta_1 = 4\frac{2}{3}$, so haben die aufeinanderfolgenden Spulen die Nutenschritte

$$\eta_1 = 4-5-5-4-5-5 \dots$$

D. Darstellung und Entwurf der Wicklungen.

1. Die eingängige Schleifenwicklung (Parallelwicklung).

Wir wollen nun zeigen, wie die bisher betrachteten Wicklungen im Schaltplan dargestellt werden. Wir wählen zunächst eine zweischichtige Schleifenwicklung mit 36 Spulen für eine 4polige Maschine ($p = 2$). Die Wicklung soll einmal in 36 Nuten verlegt werden ($u = 1$), ein zweites Mal in 12 Nuten ($u = 3$), und zwar sowohl als gewöhnliche Wicklung wie auch als Treppenwicklung.

Die Spulenseiten der Ober- und Unterschicht, welche im fertigen Anker in radialer Richtung übereinander liegen, sind im Schaltplan

dicht nebeneinander gezeichnet; die Spulenseiten der Unterschicht sind gestrichelt dargestellt. Bei der Abzählung der Schritte rechnen die übereinanderliegenden Spulenseiten als eine Einheit; sie tragen auch eine gemeinsame Nummer. Wenn mehrere Spulenseiten quer zur Nut vorhanden sind, zeichnen wir die in der gleichen Nut liegenden Spulenseiten so, daß sie einen geringeren gegenseitigen Abstand haben als die im Schaltplan benachbarten Spulenseiten, die verschiedenen Nuten angehören.

Die Lage der Pole ist in den Schaltplänen wieder durch Rechtecke mit schräg schraffiertem Rand angedeutet. Die Lage der Bürsten bzw. Bürstensätze ist durch kleine senkrecht schraffierte Rechtecke gekennzeichnet, die sich an den unteren Rand der Stromwenderstege anlegen. Die Zahl der Bürstensätze ist bei der Schleifenwicklung gleich der Zahl der Pole. Hinsichtlich der Polarität wechseln positive und negative Bürstensätze ab; in den Schaltplänen sind, so wie es auch in Wirklichkeit der Fall ist, alle Bürstensätze gleicher Polarität miteinander verbunden.

Die Bürstensätze stehen „elektrisch“ in der neutralen Zone, d. h. die gerade mit ihnen in Verbindung stehenden Stromwenderstege führen zu Spulenseiten, die in der neutralen Zone zwischen zwei Polen liegen. Infolge der seitlichen Abbiegung der Stirnverbindungen liegen aber diese Stromwenderstege, wie schon Abb. 27 und 29 zeigt, an Punkten des Ankerumfangs, die den Polmitten entsprechen. Die Bürsten stehen daher „räumlich“ in den Polmitten.

Den Schaltplan einer Wicklung mit $u = 1$ zeigt Abb. 30. Die Spulenseiten sind in der Reihenfolge numeriert, in der sie am Ankerumfang aufeinander folgen. Die Nummer gilt eigentlich für den Platz, an dem die Spulenseiten liegen; übereinanderliegende Spulenseiten haben daher, wie schon erwähnt, die gleiche Nummer (obere Nummernreihe). Ferner sind die Nuten fortlaufend numeriert (untere Nummernreihe). Da bei der dargestellten Wicklung $u = 1$ ist, stimmen die Nummern der Nuten mit denen der Spulenseiten überein. Die Stromwenderstege tragen die Nummern der mit ihnen verbundenen Spulenseiten der Oberschicht. Zwei willkürlich herausgegriffene unmittelbar hintereinander geschaltete Spulen sind fett gezeichnet, damit man die Größe der einzelnen Schritte leicht erkennen kann. Die Spulenweite ist $y_1 = 9$, der Schaltschritt $y_2 = 8$, so daß sich ein Gesamtschritt $y = 1$ ergibt; den gleichen Wert hat bei $u = 1$ auch der Nutenschritt η_1 . Da bei $y_1 = 9$ die Spulenweite mit der Polteilung übereinstimmt (wobei diese natürlich auch in „Anzahl von Spulenseiten“ zu messen ist), so ist die Wicklung eine Durchmesserwicklung. Die Wicklung wäre auch mit anderer Weite (etwa $y_1 = 8$ oder $y_1 = 10$) ausführbar; in diesem Falle wäre sie eine Sehnenwicklung.

Schleifenwicklungen, bei denen der Gesamtschritt $y = 1$ ist, heißen eingängig.

Für eine ungekreuzte Wicklung (d. h. Anfang und Ende einer Spule überschneiden sich nicht beim Zugang zum Stromwender) ist y positiv, für eine gekreuzte Wicklung negativ. Abb. 30 stellt eine

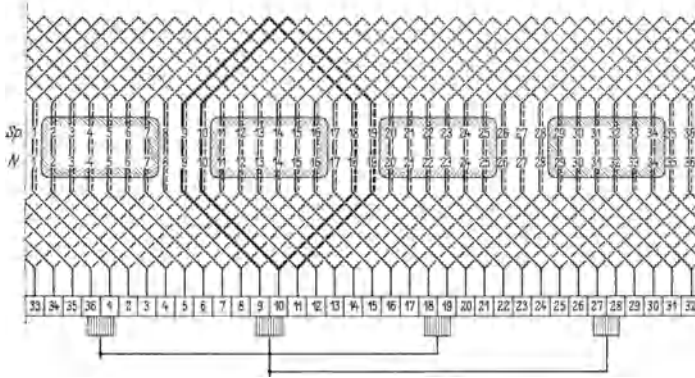


Abb. 30. Eingängige ungekreuzte Schleifenwicklung ($u = 1$)
36 Nuten, 36 Spulen, $y_1 = 9$, $y_2 = 8$, $y = +1$, $\eta_1 = 9$.

ungekreuzte Wicklung dar; aus ihr geht z. B. eine gekreuzte Wicklung hervor, wenn bei unveränderter Spulenweite $y_1 = 9$ der Schaltschritt $y_2 = 10$ gewählt, also $y = y_1 - y_2 = -1$ wird (Abb. 31). Wie die Abb. 30 u. 31 erkennen lassen, schreitet die ungekreuzte Schleifenwicklung nach rechts; die gekreuzte nach links fort.

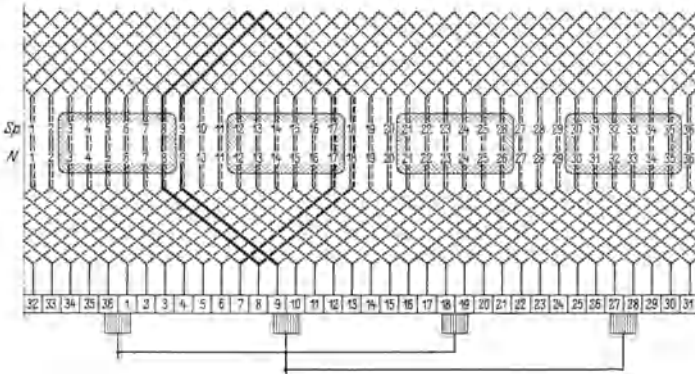


Abb. 31. Eingängige gekreuzte Schleifenwicklung ($u = 1$)
36 Nuten, 36 Spulen, $y_1 = 9$, $y_2 = 10$, $y = -1$, $\eta_1 = 9$.

Ungekreuzte Wicklungen ergeben kürzere Stirnverbindungen als gekreuzte, daher sollte man, wenn keine besonderen Gründe dagegen sprechen, die Schleifenwicklung immer als ungekreuzte Wicklung ausführen.

In Abb. 32 ist der Schaltplan für die Wicklung nach Abb. 30 jedoch für zwölf Nuten ($u = 3$) dargestellt, und zwar wieder mit einer Spulenweite $y_1 = 9$ (Durchmesserwicklung). Der Nutenschritt ist $\eta_1 = \frac{y_1}{3} = 3$. Wir haben also eine gewöhnliche oder ungeteilte Wicklung vor uns. Für

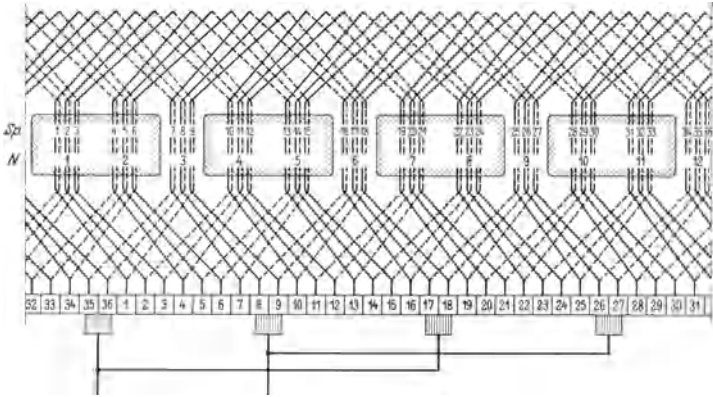


Abb. 32. Eingängige ungekreuzte Schleifenwicklung ($u = 3$)
12 Nuten, 36 Spulen, $y_1 = 9$, $y_2 = 8$, $y = +1$, $\eta_1 = 3$.

eine Treppenwicklung wählen wir etwa $y_1 = 10$ (Abb. 33); dann wird der Nutenschritt rechnermäßig $\eta_1 = \frac{10}{3} = 3\frac{1}{3}$, in Wirklichkeit nimmt er für die aufeinander folgenden Spulen die Werte an

$$\eta_1 = 3-3-4-3-3-4 \dots$$

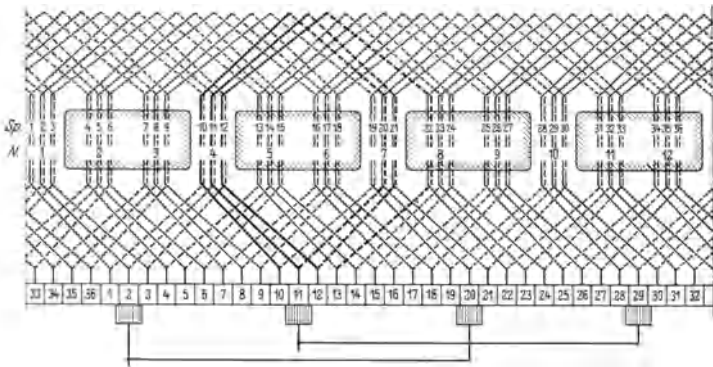


Abb. 33. Eingängige ungekreuzte Treppenwicklung ($u = 3$)
12 Nuten, 36 Spulen, $y_1 = 10$, $y_2 = 9$, $y = +1$, $\eta_1 = 3\frac{1}{3}$.

Die Wicklung ist eine Sehnenwicklung, bei der die Spulenweite größer ist als die Polteilung.

Die eingängige Schleifenwicklung mit $u = 1$ ist, wie man leicht erkennt, für jede beliebige Zahl von Spulen, also auch für be-

liebige Werte von k ausführbar. Ist die Spulenzahl je Pol $\frac{k}{2p}$ eine ganze Zahl, so ist die Ausführung einer Durchmesserwicklung mit $y_1 = \frac{k}{2p}$ möglich, andernfalls muß man zur Sehnenwicklung übergehen. Da die Spulenweite y_1 stets eine ganze Zahl sein muß, so wählt man sie im allgemeinen so, daß sie dem Verhältnis $\frac{k}{2p}$ möglichst nahe kommt, aber kleiner ist als dieses (verkürzter Schritt). Wie wir später sehen werden (vgl. S. 40), wählt man aus Symmetriegründen (Rücksicht auf Ausgleichsverbindungen) für Schleifenwicklungen im allgemeinen die Zahl der Spulen je Polpaar $\frac{k}{p}$ als ganze Zahl.

Liegen mehrere Spulenseiten quer zur Nut ($u > 1$), wie es meistens der Fall ist, so muß noch die Zahl der Spulen je Nutenschicht $\frac{k}{u}$ eine ganze Zahl sein. Außerdem soll dann aus Symmetriegründen die Zahl der Nuten je Polpaar $\frac{N}{p}$ eine ganze Zahl sein. Es gibt für alle Polzahlen hinreichend viel Steg- und Nutenzahlen, die diesen Forderungen genügen.

Der Entwurf der eingängigen Schleifenwicklung ist sehr einfach; es ist nur notwendig, die Spulenweite y_1 festzulegen, damit ergeben sich von selbst die Schritte y_2 und y . Für die Herstellung in der Werkstatt genügt ebenfalls die Angabe der Werte für y_1 , y_2 und y ; in der Regel wird noch der Nutenschritt η_1 mit angegeben. Die Herstellung eines Schaltplanes erübrigt sich meistens. Bei Treppenwicklungen gibt man zweckmäßig noch die Lage der Spulenseiten in der Nut an, etwa durch eine einfache Skizze nach Abb. 25, wobei man die Nummern der Nuten zufügt.

Die Zahl der Nuten je Pol $\frac{N}{2p}$ liegt gewöhnlich etwa innerhalb der Grenzen 10 bis 18; nur bei kleinen Ankern geht man zuweilen bis auf etwa 8 herunter. Mit Rücksicht auf den räumlichen Umfang der Darstellung sind in den folgenden Beispielen Nuten- und Stegzahlen oft kleiner gewählt, als es dieser Forderung entsprechen würde.

2. Die eingängige Wellenwicklung (Reihenwicklung).

Wir wenden uns nun der Darstellung der Wellenwicklung zu und wählen eine vierpolige Wicklung mit 27 Spulen bei 27 Nuten ($u = 1$). Da die Polteilung $\frac{27}{4} = 6\frac{3}{4}$ Nutteilungen beträgt und die Spulenweite y_1 eine ganze Zahl sein muß, ist nur eine Sehnenwicklung möglich. Wir wählen $y_1 = \eta_1 = 7$ und $y_2 = 6$; daraus ergibt sich der Gesamtschritt $y = 13$. Man erhält, wie der Plan in Abb. 34 erkennen läßt, eine ungekreuzte Wellenwicklung. Geht man bei ihr von einem beliebigen Stromwendersteg (10) aus und durchläuft die Spulen in der Reihenfolge, in der sie geschaltet sind, so kommt man erst zu dem

linken Nachbarsteg (9), wenn man p Spulen durchlaufen hat (vgl. auch Abb. 29). Daraus folgt, daß

$$p \cdot y + 1 = k \quad (9)$$

sein muß, oder

$$y = \frac{k-1}{p}. \quad (10)$$

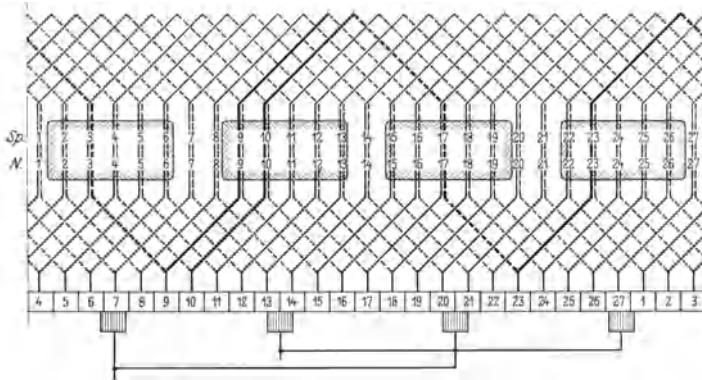


Abb. 34. Eingängige ungekreuzte Wellenwicklung ($u = 1$)
27 Nuten, 27 Spulen, $y_1 = 7$, $y_2 = 6$, $y = 13$, $\eta_1 = 7$.

Die Wicklung ist auch als gekreuzte Wicklung ausführbar mit $y_1 = 7$, $y_2 = 7$ und $y = 14$ (Abb. 35). Man erreicht dann von einem

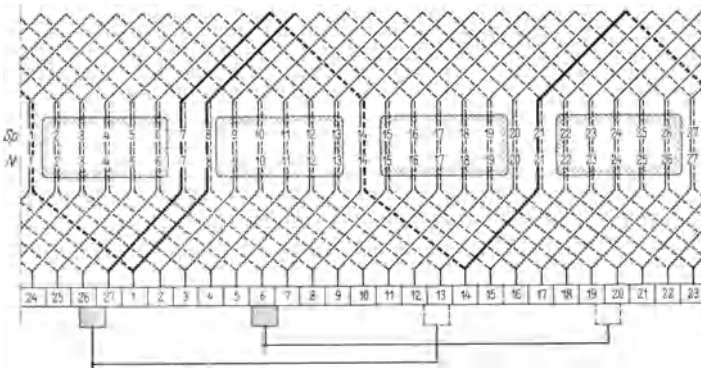


Abb. 35. Eingängige gekreuzte Wellenwicklung ($u = 1$)
27 Nuten, 27 Spulen, $y_1 = 7$, $y_2 = 7$, $y = 14$, $\eta_1 = 7$.

beliebigen Steg ausgehend nach dem Durchlaufen von p Spulen den rechten Nachbarsteg. Es ist dann

$$p \cdot y - 1 = k \quad (11)$$

oder

$$y = \frac{k+1}{p}. \quad (12)$$

Die ungekreuzte Wellenwicklung schreitet, wie man erkennt, nach links, die gekreuzte nach rechts weiter. Da die symmetrische eingängige

Wellenwicklung immer der Gl. (10) oder (12) genügen muß, dabei aber y , p und k ganze Zahlen sind, so ist die Wicklung nur für eine beschränkte Zahl von Spulen bzw. Stromwenderstegen ausführbar.

Bei einer Spulenseite quer zur Nut ($u = 1$) gibt es aber immerhin für alle Polpaarzahlen Stegzahlen k , mit denen die Wicklung ausführbar ist. Dies trifft nicht mehr zu, wenn $u > 1$ ist. In diesem Falle muß die Stegzahl k nicht nur der Gl. (10) oder (12), sondern noch der Bedingung

$$\frac{k}{u} = \text{ganze Zahl} \tag{13}$$

genügen. Für gewisse Wertepaare von p und u lassen sich dann überhaupt keine Stegzahlen k finden, für welche die Ausführung einer eingängigen Wellenwicklung möglich ist, für andere Wertepaare sind nur gerade, für wieder andere nur ungerade Stegzahlen möglich.

Für gerade Polpaarzahlen muß, wie man aus Gl. (10) und (12) erkennt, die Spulen- bzw. Stegzahl k ungerade sein.

Für durch 3 teilbare Polpaarzahlen kommen Wicklungen mit $u = 3$ nicht in Frage; denn einerseits müßte nach Gl. (13) der Quotient $\frac{k}{3}$ eine ganze Zahl sein, andererseits, da p ein Vielfaches von 3 sein soll, auch $\frac{k \mp 1}{3}$ eine ganze Zahl; beides gleichzeitig ist unmöglich.

Für alle Werte von u sind Wicklungen nur dann ausführbar, wenn die Polpaarzahl p eine Primzahl ist ($p = 3$ ausgenommen).

Ähnlichen Einschränkungen unterliegt auch die Zahl N der Nuten. Insbesondere ist zu beachten, daß bei der symmetrischen eingängigen Wellenwicklung die Zahl der Nuten nie durch die Polpaarzahl p teilbar ist. Die Polteilung (in „Zahl der Spulenseiten“ ausgedrückt) ist immer eine gebrochene Zahl, so daß Durchmesserwicklungen nicht ausführbar sind.

Die Tafel 2 enthält eine Zusammenstellung über die Ausführbarkeit der Wicklungen für die Polpaarzahlen $p = 2 \dots 5$ und für 2, 3 und 4 Spulenseiten quer zur Nut.

Tafel 2. Übersicht über die Ausführbarkeit eingängiger Wellenwicklungen.

Polpaarzahl p	Spulenseiten quer zur Nut u	Stegzahl (Spulenzahl) k	Nutenzahl N
2	— 3 —	ungerade	ungerade
3	2 — 4	gerade, nicht durch 3 teilbar	nicht durch 3 teilbar
4	— 3 —	ungerade	ungerade
5	2 — 4	gerade	beliebig { gerade { ungerade
	— 3 —	{ gerade { ungerade	

Der Entwurf der Wellenwicklung ist etwas schwieriger als der der Schleifenwicklung. Man stellt zunächst nach Tafel 2 fest, welche Werte von u für die vorliegende Polpaarzahl möglich sind. Falls die Nutenzahl N nicht festliegt, wählt man sie so, daß sie den Bedingungen der Tafel 2 genügt, und bestimmt die Stegzahl $k = N \cdot u$. Alsdann ist festzustellen, ob diese Stegzahl der Gl. (10) oder (12) genügt. Wenn dies der Fall ist, liegt auch gleich der Gesamtschnitt y fest, den man nun in die Teilschritte y_1 und y_2 aufzuteilen hat. Wird y_1 so gewählt, daß es ein ganzes Vielfaches von u ist, so erhält man eine gewöhnliche, andernfalls eine Treppenwicklung.

Ein Beispiel soll den Entwurf erläutern. Es sei gegeben: $p = 2$, $N = 45$. Nach Tafel 2 ist nur $u = 3$ ausführbar. Die Stegzahl ist $k = 3 \cdot 45 = 135$. Sie genügt Gl. (10) und (12). Für die ungekreuzte Wicklung ergibt sich $y = \frac{135-1}{2} = 67$. Die Polteilung ist $\frac{45}{4} = 11\frac{1}{4}$ Nutteilungen. Der Nutenschritt η_1 soll nicht wesentlich von der Polteilung abweichen; für eine gewöhnliche Wicklung muß er eine ganze Zahl sein. Wir wählen $\eta_1 = 11$; dann ist $y_1 = 3 \cdot 11 = 33$ und $y_2 = 67 - 33 = 34$.

Für die Herstellung der Wicklung in der Werkstatt stellt der Schaltplan die genaueste Unterlage dar. Das Aufzeichnen eines solchen ist jedoch oft zu zeitraubend, und man begnügt sich mit einer einfachen Skizze und einer Zahlentafel, aus der die Schritte y_1 und y_2 , die Schaltung der Spulen und ihre Verbindung mit dem Stromwender zu ersehen sind. Die Nummerierung der Stromwenderstege stimmt dabei wie üblich mit derjenigen der Spulenseiten in der Oberschicht überein.

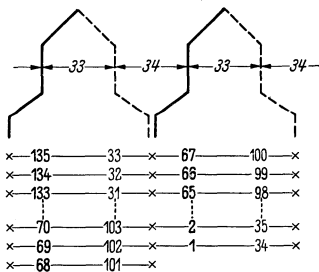


Abb. 36. Entwurfsplan für eine eingängige Wellenwicklung, $p = 2$, $N = 45$, $k = 135$, $y_1 = 33$, $y_2 = 34$, $y = 67$.

Für das Beispiel ergibt sich die Darstellung in Abb. 36. Die Spulenseiten der Oberschicht sind zum Unterschied von denen der Unterschicht durch fette Ziffern gekennzeichnet. Bei einer nach links fortschreitenden Wicklung beginnt man zweckmäßig mit der letzten Spulenseite der Oberschicht, also hier mit Nr. 135.

Auch als Treppenwicklung ist die Wicklung ausführbar. Es werde rechnergemäß $\eta_1 = 11\frac{1}{3}$ gewählt (wirkliche Nutenschritte $\eta_1 = 11 - 11 - 12$). Die Lage der Spulenseiten in der Nut entspricht Abb. 25b. Die Spulenschritte sind $y_1 = 3 \cdot 11\frac{1}{3} = 34$ und $y_2 = 67 - 34 = 33$.

Wenn die Nutenzahl nicht von vornherein festliegt, kann der Entwurf für mehrere Nutenzahlen durchgeführt werden. Es sei z. B. wieder

eine Wicklung für $p = 2$ zu entwerfen. Nach Tafel 2 muß $u = 3$ und die Nutenzahl ungerade sein. Wenn die Nutenzahl je Pol $10 \dots 12$ betragen soll, kommen in Betracht:

Nutenzahlen	N :	41	43	45	47	
Stegzahlen	k :	123	129	135	141	
Gesamtschritte ¹	y :	61	64	57	70	
Gewöhnliche Wicklung	$\left\{ \begin{array}{l} y_1: \\ y_2: \end{array} \right.$	y_1 :	10	10 oder 11	11	11 oder 12
		y_2 :	30	30 oder 33	33	33 oder 36
		y_2 :	31	34 oder 31	34	37 oder 31
Treppenwick- lung	$\left\{ \begin{array}{l} y_1: \\ y_2: \end{array} \right.$	y_1 :	$10\frac{1}{3}$	$10\frac{2}{3}$	$11\frac{1}{3}$	$11\frac{2}{3}$
		y_1 :	31	32	34	35
		y_2 :	30	32	33	35

3. Die zweigängige Schleifenwicklung.

Wählt man bei einer Schleifenwicklung die Spulenweite und den Schrittschritt so, daß der Gesamtschritt $y = 2$ wird, so erhält man

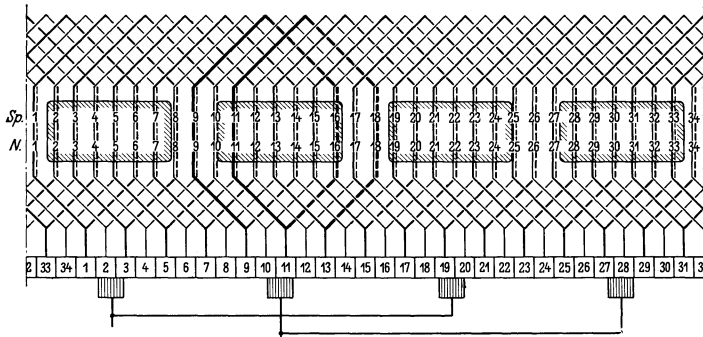


Abb. 37. Zweigängige zweifach geschlossene Schleifenwicklung ($u = 1$),
34 Nuten, 34 Spulen, $y_1 = 7$, $y_2 = 5$, $y = +2$, $\eta_1 = 7$.

eine zweigängige Schleifenwicklung. Man kommt bei einer solchen Wicklung einmal um den Anker herum, wenn man die Hälfte aller Spulen durchlaufen hat. Ist die Zahl der Spulen, also auch die Stegzahl k eine gerade Zahl, so schließt sich die Wicklung nach einem Umlauf; man erhält einen in sich geschlossenen Wicklungsgang, der die Hälfte der Spulen umfaßt. Die übrige Hälfte der Spulen ergibt ebenfalls einen geschlossenen Gang, der mit dem ersten in keiner unmittelbaren Verbindung steht. Man nennt eine solche Wicklung eine zweifach geschlossene zweigängige Schleifenwicklung. Eine derartige Wicklung ist in Abb. 37 dargestellt. Die beiden Gänge sind durch verschiedene Strichstärken gekennzeichnet; zwei unmittelbar hintereinander geschaltete Spulen des einen Ganges sind durch besonders fette Darstellung hervorgehoben.

Wenn bei der zweigängigen Schleifenwicklung die Stegzahl k ungerade ist, so schließt sich die Wicklung nicht nach einem Umlauf,

¹ Für ungekreuzte Wicklung.

sondern der erste Gang geht dann in den zweiten über. Die Wicklung schließt sich erst dann, wenn man zweimal den Ankerumfang durchlaufen hat. Eine solche Wicklung, wie sie in Abb. 38 dargestellt ist, heißt einfach geschlossene zweigängige Schleifenwicklung.

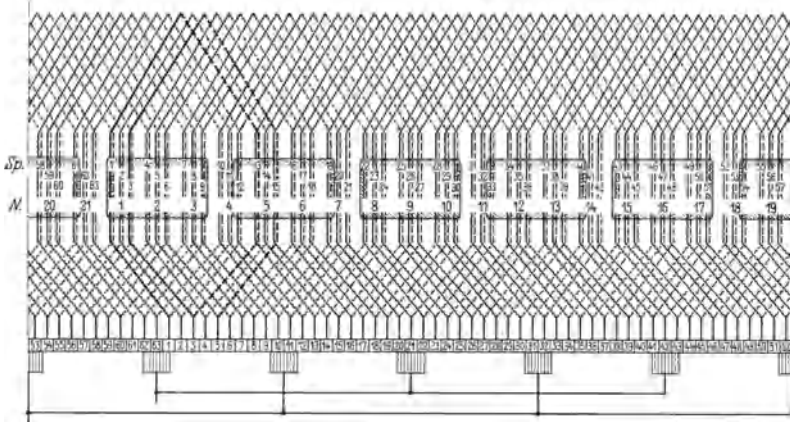


Abb. 38. Zweigängige einfach geschlossene Schleifenwicklung ($u = 3$)
21 Nuten, 63 Spulen, $y_1 = 12$, $y_2 = 10$, $y = +2$, $\eta_1 = 4$.

Bei beiden Arten der zweigängigen Schleifenwicklung ist die Zahl der parallelen Ankerzweige stets doppelt so groß wie bei der eingängigen Schleifenwicklung. Es ist also

$$2a = 4p. \quad (14)$$

Man erhält demnach den Strom in einem Ankerleiter, wenn man den gesamten Ankerstrom durch die doppelte Polzahl dividiert.

Auch bei der zweigängigen Schleifenwicklung soll aus Symmetriegründen die Zahl der Stege je Polpaar $\frac{k}{p}$ und die Zahl der Nuten je Polpaar $\frac{N}{p} = \frac{k}{u p}$ eine ganze Zahl sein. Eine einfach geschlossene zweigängige Schleifenwicklung ($k = \text{ungerade}$) ist dann nur für ungerade Werte von p und u ausführbar. Eine zweifach geschlossene zweigängige Schleifenwicklung ($k = \text{gerade}$) ist dagegen für gerade und ungerade Werte von p möglich. Meistens wird diese Wicklung mit $u = 2$ ausgeführt.

Mehr als zwei Gänge kommen bei der Schleifenwicklung nicht vor.

4. Die zwei- und mehrgängige Wellenwicklung (Reihenparallelwicklung).

Während bei der eingängigen Wellenwicklung nach Gl. (9) oder Gl. (11) die Bedingung erfüllt sein muß

$$p \cdot y \pm 1 = k,$$

gilt bei der zweigängigen Wellenwicklung das Gesetz

$$p \cdot y \pm 2 = k. \quad (15)$$

Das positive Vorzeichen ergibt eine ungekreuzte, das negative eine gekreuzte Wicklung. Der Gesamtschritt y muß also der Bedingung genügen

$$y = \frac{k \mp 2}{p} \quad (16)$$

wobei das negative Vorzeichen für die ungekreuzte, das positive für die gekreuzte Wicklung gilt.

Auch bei der Wellenwicklung ist die Zahl der parallelen Ankerzweige bei zwei Gängen doppelt so groß wie bei der eingängigen Wicklung. Es ist also nach Gl. (6)

$$2a = 4. \quad (17)$$

Wie bei der zweigängigen Schleifenwicklung kann auch hier die Wicklung sich einfach oder zweifach schließen; wenn der Gesamtschritt y eine gerade Zahl ist, ergibt sich eine zweifach geschlossene, wenn er ungerade ist, eine einfach geschlossene Wicklung.

Mit Rücksicht auf die Anschlußmöglichkeit von Ausgleichsverbindungen (vgl. S. 43) soll bei der zweigängigen einfach geschlossenen Wellenwicklung im allgemeinen sowohl die Nutenzahl N als auch die Polpaarzahl p eine gerade Zahl sein. Wenn diese Bedingung erfüllt wird, ergeben sich für die verschiedenen Polpaarzahlen (bis $p = 10$) die in der oberen Reihe der Tafel 3 nicht eingeklammerten Werte von u (in den Grenzen $1 < u < 5$), mit denen eine solche Wellenwicklung ausführbar ist. Wenn keine schwierigen Stromwendebedingungen vorliegen, kann man jedoch auch für ungerade Polpaarzahlen zweigängige einfach geschlossene Wellenwicklungen anwenden; für diese ergeben sich die eingeklammerten Werte von u in Tafel 3. Bei der zweigängigen zweifach geschlossenen Wellenwicklung kann p sowohl gerade als auch ungerade sein; doch ist bei ungeraden Polpaarzahlen die Anordnung der Ausgleichsverbindungen, die hier stets notwendig sind, schwieriger (vgl. S. 43). Zweigängige zweifach geschlossene Wellenwicklungen sind mit den in der unteren Reihe der Tafel 3 angegebenen Werte von u ausführbar.

Tafel 3. Übersicht über die Werte von u , für die zweigängige Wellenwicklungen ausführbar sind.

$p^*) =$	3	4	5	6	7	8	9	10
einfach geschlossen	—	3	(3)	2; 4	(3)	3; 4	—	3; 4
zweifach geschlossen	2; 4	2	2; 4	2	2; 4	2	2; 4	2

*) Bei $p = 2$ wählt man immer eine eingängige Schleifenwicklung an Stelle einer zweigängigen Wellenwicklung. Die Zahl der parallelen Ankerzweige ist in beiden Fällen die gleiche ($2a = 4$).

Als Beispiel ist in Abb. 39 eine zweigängige zweifach geschlossene Wellenwicklung für vier Pole dargestellt, bei der $y = 16$ (gerade!) ist. Für eine zehnpolige zweigängige einfach geschlossene Wellenwicklung

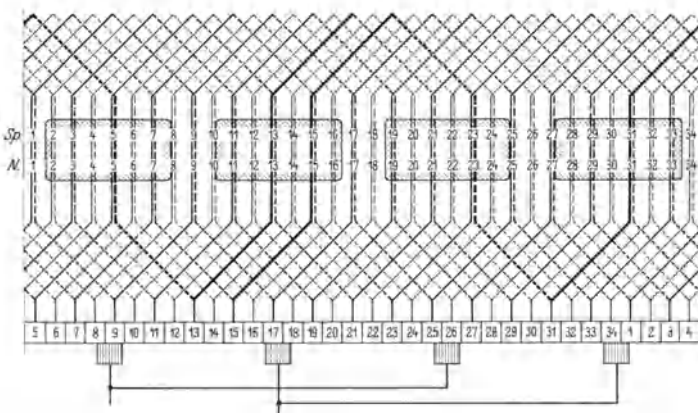


Abb. 39. Zweigängige zweifach geschlossene Wellenwicklung ($u = 1$), 34 Nuten, 34 Spulen, $y_1 = 8$, $y_2 = 8$, $y = 16$, $r_1 = 8$.

mit 63 Stegen zeigt Abb. 40 den Entwurfsplan; die Schritte sind: $y = 13$ (ungerade!), $y_1 = 7$, $y_2 = 6$. Da die Stegzahl k durch 3 teilbar ist, kann die Wicklung mit $u = 3$ (also mit 21 Nuten) ausgeführt werden.

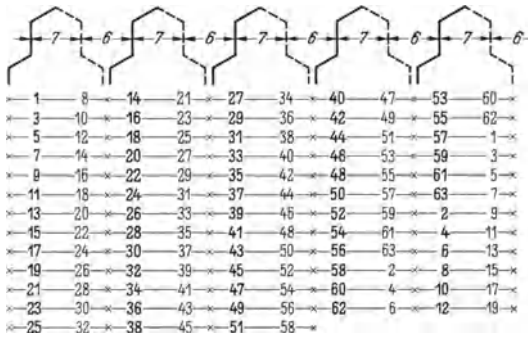


Abb. 40. Entwurfsplan für eine zweigängige einfach geschlossene Wellenwicklung, $p = 5$, $k = 63$, $y_1 = 7$, $y_2 = 6$, $y = 13$.

Bei der Wellenwicklung kommen zuweilen auch mehr als zwei Gänge vor. Bezeichnet man die Gangzahl allgemein mit m , so muß sein

$$p \cdot y \pm m = k. \quad (18)$$

Das positive Vorzeichen ergibt eine ungekreuzte, das negative eine gekreuzte Wicklung. Der Gesamtschritt y muß also der Bedingung genügen

$$y = \frac{k \mp m}{p}, \quad (19)$$

wobei das negative Vorzeichen für die ungekreuzte, das positive für die gekreuzte Wicklung gilt. Die Zahl der parallelen Ankerzweige ist bei m Gängen

$$2a = 2m. \quad (20)$$

Bei der Wellenwicklung mit mehr als zwei Gängen sind die Wicklungsgesetze und Symmetrieforderungen noch schwieriger zu erfüllen; die Wicklungen können daher nur selten angewandt werden.

5. Unsymmetrische Wellenwicklungen.

Die Erfüllung aller Wicklungsgesetze bei der Wellenwicklung stößt oft auf große Schwierigkeiten. Tafel 2 läßt z. B. erkennen, daß bei den sehr häufig vorkommenden vierpoligen Maschinen ($p = 2$) eine symmetrische eingängige Wellenwicklung mit zwei Spulenseiten quer zur Nut ($u = 2$) nicht ausführbar ist. Die Schwierigkeiten werden noch erhöht, wenn besondere Forderungen an die Wicklung gestellt werden müssen, z. B. die, daß sie durch Anzapfungen in eine bestimmte Anzahl von gleichwertigen Strängen aufgeteilt werden soll, wie es bei Wicklungen für Einankerumformer und für Spannungsteilung der Fall ist (vgl. Abschnitt I E). Aber selbst dann, wenn theoretisch für eine bestimmte Polzahl und für ein bestimmtes u eine symmetrische Wicklung möglich wäre, kann ihre Herstellung dadurch erschwert sein, daß für die sich ergebende Nutenzahl kein Blechschnitt in der Werkstatt vorhanden ist. Die gleichen Schwierigkeiten ergeben sich, wenn ein Anker, der bisher eine Schleifenwicklung gehabt hat, umgewickelt und mit einer Wellenwicklung versehen werden soll.

In allen diesen Fällen ist es meistens notwendig, von der Symmetrie abzuweichen und eine unsymmetrische Wellenwicklung auszuführen. Es gibt zwei Arten solcher Wicklungen, die Wellenwicklungen mit blinden Spulen und die künstlich geschlossenen Wellenwicklungen.

a) Wellenwicklungen mit blinden Spulen. Wir betrachten zunächst eine Wicklung mit einer Spulenseite quer zur Nut ($u = 1$). Es soll ein Anker mit 32 Nuten vorliegen, der also 32 Spulen aufzunehmen hat. Mit 32 Spulen ist eine symmetrische eingängige Wellenwicklung nicht ausführbar, da weder Gl. (10) noch Gl. (12) erfüllt werden kann. Mit 31 Spulen dagegen ergibt sich eine symmetrische Wicklung mit $y = 15$; die Teilschritte können gewählt werden zu $y_1 = 8$ und $y_2 = 7$. Es liegt zunächst nahe, eine Nut von Spulenseiten frei zu lassen und die restlichen 31 Nuten mit einer normalen Wicklung zu versehen. Eine solche Wicklung ist jedoch elektrisch und mechanisch so schlecht ausgeglichen, daß sie für die praktische Ausführung nicht in Frage kommt. Günstiger werden die Verhältnisse, wenn man den Anker mit 32 Spulen bewickelt, von diesen aber nur 31 an den Stromwender anschließt; der Stromwender erhält also nur 31 Stege. Die nicht angeschlossene Spule trägt die Bezeichnung blinde Spule.

Der Entwurf der Wicklung mit einer blinden Spule gestaltet sich einfach. Bei dem gewählten Beispiel hatten wir, ausgehend von der Zahl der angeschlossenen Spulen, die Schritte $y = 15$, $y_1 = 8$ und

$y_2 = 7$ festgelegt. Beim Aufstellen des Entwurfsplanes berücksichtigen wir das Vorhandensein der blinden Spule dadurch, daß wir einmal in jedem Umlauf den Schaltschritt y_2 um 1 erhöhen, und zwar dort, wo er zum erstenmal auftritt. Dort ist also im Beispiel 8 an die Stelle

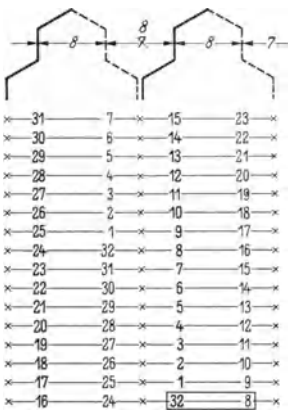


Abb. 41. Entwurfsplan für eine Wellenwicklung mit blinder Spule, $y_1 = 8, y_2 = 7, y = 15$.

von 7 zu setzen. Die übrigen $(p - 1)$ -mal bleibt der Schaltschritt bestehen. Es ergibt sich dann der Plan nach Abb. 41. Wo der Schaltschritt y_2 zum erstenmal im Umlauf auftritt, ist die 7 gestrichen und durch 8 ersetzt; im übrigen bleiben alle Schritte bestehen. Wenn die Oberschicht der blinden Spule in Nut 32 liegen soll, beginnen wir den Plan mit Spulenseite 31 und entwerfen ihn wie früher; beim Abzählen der Schritte müssen alle Spulenseiten mitgezählt werden (also 32, nicht 31!). Zu der blinden Spule gelangen wir dann zuletzt. Ihre Spulenseitennummern sind im Entwurfsplan eingerahmt; ihre Enden bleiben frei. Der Schaltplan der Wicklung ist in Abb. 42

dargestellt; die blinde Spule ist durch Fettdruck hervorgehoben.

Wicklungen mit $u > 1$ lassen sich in gleicher Weise entwerfen. Als Beispiel wählen wir eine Wicklung mit 16 Nuten und $u = 2$. Es ergeben sich wieder 31 angeschlossene und eine blinde Spule. Den Gesamt-

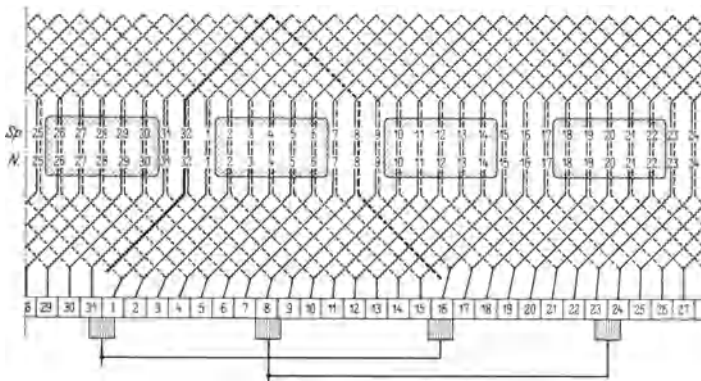


Abb. 42. Eingängige Wellenwicklung mit blinder Spule ($u = 1$), $y_1 = 8, y_2 = 7, y = 15, \eta_1 = 8$.

schritt 15 zerlegen wir so, daß $y_1 = 7$ und $y_2 = 8$ ist (Treppenwicklung). Bei Aufstellung des Entwurfsplanes ist y_2 bei seinem erstmaligen Auftreten bei jedem Umlauf auf 9 zu erhöhen. Den Schaltplan der Wicklung zeigt Abb. 43.

Man kann die Wicklungen mit blinder Spule auch so entwerfen, daß nicht der Schaltschritt y_2 , sondern die Spulenweite y_1 einmal bei jedem Umlauf um 1 erhöht wird. Man erhält dann jedoch für eine Wicklung Spulen verschiedener Weite, was für die Herstellung nicht günstig ist. Es sind auch Wellenwicklungen mit mehr als einer blinden Spule möglich, doch haben solche Wicklungen keine praktische Bedeutung.

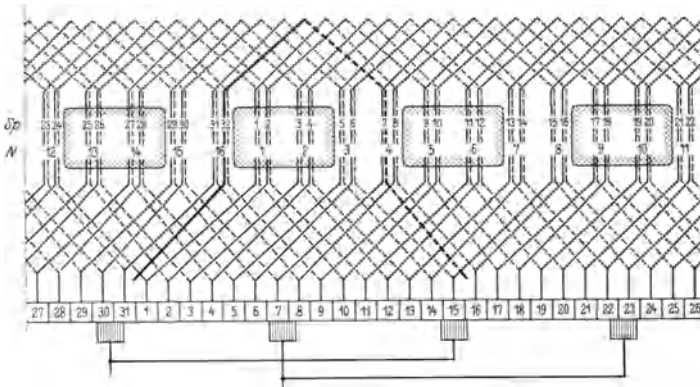


Abb. 43. Eingängige Wellenwicklung mit blinder Spule ($u = 2$),
 $y_1 = 7$, $y_2 = 8$, $y = 16$, $\eta_1 = 3\frac{1}{2}$.

Wellenwicklungen mit blinden Spulen sind, auch wenn sie in der hier beschriebenen Weise entworfen werden, elektrisch nicht vollkommen ausgeglichen; es fließt in ihnen immer ein kleiner innerer Ausgleichstrom. Die Zahl der Stromwenderstege ist bei diesen Wicklungen immer gleich der Zahl der angeschlossenen Spulen.

b) Künstlich geschlossene Wellenwicklungen. Während bei der Wellenwicklung mit blinder Spule für eine normale Wellenwicklung zuviel Platz vorhanden ist, ist bei der künstlich geschlossenen Wellenwicklung gewissermaßen zuwenig Platz da. Wir betrachten wieder ein Beispiel und wollen eine vierpolige eingängige Wicklung mit $u = 1$ für 26 Nuten entwerfen.

Eine normale ungekreuzte Wicklung ist für 27 Nuten möglich (vgl. Abb. 34). Wir haben also für eine Spule Platz zuwenig; die fehlende Spule ersetzen wir durch einen künstlichen Schluß. Die Schritte bestimmen wir wieder so, als ob wir es mit einer normalen Wicklung mit 27 Spulen zu tun hätten. Der Gesamtschritt ergibt sich zu $y = 13$; die Teilschritte wählen wir $y_1 = 6$ und $y_2 = 7$. Während wir bei der Wicklung mit blinder Spule einen Teilschritt bei jedem Umlauf einmal um 1 erhöht haben, müssen wir ihn hier einmal um 1 verringern. Damit alle Spulen die gleiche Weite erhalten, nehmen wir die Verringerung beim Schaltschritt y_2 vor; sie erfolgt jedoch zweckmäßig nicht beim erstmaligen Auftreten von y_2 im Umlauf, sondern

an letzter Stelle. Es ist also allgemein zuerst $(p - 1)$ -mal der normale Wert von y_2 zu setzen und dann einmal der um 1 verringerte Wert. Für unser Beispiel ergibt sich der Entwurfsplan in Abb. 44. Bei Auf-

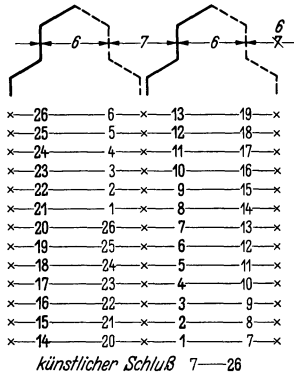


Abb. 44. Entwurfsplan für eine künstlich geschlossene Wellenwicklung, $p = 2$, $k = 26$, $y_1 = 6$, $y_2 = 7$, $y = 13$.

stellung des Planes ist mit der Zahl der wirklich vorhandenen Spulen zu rechnen, die hier mit der der angeschlossenen Spulen übereinstimmt. Das Ende der letzten Spule ist mit dem Anfang der ersten Spule zu verbinden und dadurch die Wicklung künstlich zu schließen. Die Verbindung kann am Stromwender durchgeführt werden. Der Schaltplan ist in Abb. 45 dargestellt.

Der Stromwender wird wie bisher so angeschlossen, daß die Stege fortlaufend nummeriert sind und daß ihre Nummern übereinstimmen mit den Nummern der Spulenseiten der Oberschicht, mit denen sie in unmittelbarer Verbindung stehen. Abweichend von Abb. 45 kann der Strom-

wender auch an die oberen Stirnverbindungen angeschlossen werden.

Für Wicklungen mit mehreren Spulenseiten quer zur Nut ($u > 1$) erfolgt der Entwurf in gleicher Weise. Die Zahl der Stromwenderstege ist immer gleich der Zahl der wirklich vorhandenen Spulen.

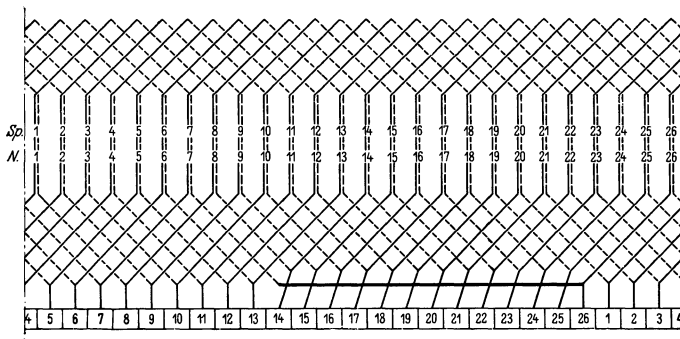


Abb. 45. Künstlich geschlossene Wellenwicklung ($u = 1$), $y_1 = 6$, $y_2 = 7$, $y = 13$, $\eta_1 = 6$.

Künstlich geschlossene Wellenwicklungen sind elektrisch vollkommen ausgeglichen; innere Ausgleichsströme treten also nicht auf.

6. Grundsätzliches über die Anwendung von Schleifen- und Wellenwicklungen.

Die mittlere Spannung e eines Ankerleiters liegt angenähert fest durch Länge und Durchmesser des Ankers und durch die Drehzahl der

Maschine; bei großen Maschinen mit hoher Drehzahl ist e am größten, bei kleinen, langsam laufenden ist e am kleinsten. Es müssen nun so viel Ankerleiter hintereinander geschaltet sein, daß die Summe aus ihren Spannungen die Maschinenspannung U ergibt. Wenn nun im ganzen z Ankerleiter vorhanden sind, die auf $2a$ parallele Zweige entfallen, so liegen $\frac{z}{2a}$ Leiter hintereinander. Es muß also

$$\frac{z}{2a} \cdot e = U \tag{21}$$

sein; daraus ergibt sich die erforderliche Leiterzahl

$$z = 2a \frac{U}{e}. \tag{21 a}$$

Das Verhältnis $\frac{U}{e}$ ist am größten bei kleinen, langsam laufenden Maschinen für hohe Spannungen. Um keine übermäßig hohe Zahl von Ankerleitern (schlechte Ausnutzung des Nutenraumes) zu erhalten, wählt man bei diesen Maschinen eine Wicklung mit möglichst kleiner Zahl der parallelen Zweige, also eine eingängige Wellenwicklung. Die Zahl der Windungen einer Spule wählt man so klein wie möglich; am günstigsten ist eine Windung je Spule (Stabwicklung). Eine zu geringe Windungszahl je Spule führt aber in vielen Fällen (besonders bei kleinen Maschinen) auf eine zu hohe Stegzahl des Stromwenders; der einzelne Steg würde dann zu schmal werden.

Bei größeren Maschinen führt die eingängige Wellenwicklung auf eine zu geringe Zahl von Ankerleitern und selbst bei nur einer Windung je Spule auf eine zu geringe Zahl von Stromwenderstegen; es wird dann die Spannung zwischen benachbarten Stromwenderstegen zu hoch (Rundfeuergefahr!). Man muß dann zu einer Wicklung mit einer größeren Zahl der parallelen Ankerzweige übergehen.

In welcher Reihenfolge die Wicklungsarten hinsichtlich der parallelen Ankerzweige aufeinanderfolgen, geht aus Tafel 4 hervor. Gleichzeitig zeigt diese Tafel, in welchem Sinne Leistung, Spannung und Drehzahl der Maschine die Wahl der Wicklung beeinflussen. Wo zwei

Tafel 4 Reihenfolge der Wicklungsarten (ein- und zweigängige Schleifenwicklung und ein- bis viergängige Wellenwicklung) hinsichtlich der Zahl der parallelen Ankerzweige. Einfluß von Leistung, Drehzahl und Spannung auf die Wahl der Wicklung.

S = Schleifenwicklung, W = Wellenwicklung. Die Zahl hinter S oder W gibt die Zahl der Gänge an.

Zahl der Polpaare	klein ← Leistung → groß	
	klein ← Drehzahl → groß	
	groß ← Spannung → klein	
$p = 2$	W 1 — S 1 — W 3 — W 4	S 2
$p = 3$	W 1 — W 2 — S 1 — W 4 — S 2	(W 3)
$p = 4$	W 1 — W 2 — W 3 — S 1 — S 2	(W 4)
$p > 4$	W 1 — W 2 — W 3 — W 4 — S 1 — S 2	

Wicklungen hinsichtlich der Zahl der parallelen Ankerzweige gleichwertig sind, ist eine in Klammern gesetzt; die nicht eingeklammerte Wicklung ist der eingeklammerten vorzuziehen. Die zweigängige Schleifenwicklung wird wegen schwieriger Stromwendebedingungen nicht gern gewählt; nur bei Niederspannungsmaschinen findet sie häufiger Anwendung.

7. Ausgleichsverbindungen.

Wie schon früher (S. 5) festgestellt wurde, wiederholen sich die magnetischen Verhältnisse in einer Maschine, wenn man um eine Polpaarteilung (zwei Polteilungen) weiterschreitet. Ist die Zahl N der Nuten durch die Polpaarzahl p teilbar, so ist innerhalb der einzelnen Polpaarteilungen bei jeder Ankerstellung die Verteilung der Nuten und der darin liegenden Spulenseiten die gleiche. Wenn schließlich noch die auf jedes Polpaar entfallenden Teile der Wicklung parallel geschaltet sind, wie es bei der Schleifenwicklung der Fall ist, so ist ein bestimmter Punkt einer Spulenseite (z. B. deren Anfang oder Ende) gleichwertig mit dem entsprechenden Punkt einer um zwei Polteilungen entfernt liegenden Spulenseite. Ebenso sind in diesem Falle die um zwei Polteilungen auseinanderliegenden Stromwenderstege gleichwertig.

Solche gleichwertigen Punkte können miteinander unmittelbar verbunden werden, ohne daß bei völlig symmetrischer Maschine ein Strom durch die Verbindungsleitungen fließt. Eine solche Verbindung heißt Ausgleichsverbindung oder Ausgleichsleitung.

Wenn bei der Schleifenwicklung gleichwertige Punkte auftreten sollen, muß nach den obigen Ausführungen die Bedingung erfüllt sein

$$\frac{N}{p} = \frac{k}{u \cdot p} = \text{ganze Zahl.} \quad (22)$$

Jede Gruppe von unter sich gleichwertigen Punkten enthält p solcher Punkte; die Zahl der Gruppen ist $\frac{k}{p}$, also sind auch $\frac{k}{p}$ Ausgleichsleitungen möglich.

Den Verbindungsschritt y_v , um den gleichwertige Punkte voneinander entfernt sind, drücken wir wieder durch die Zahl der Stege aus, um die man weiterschreiten muß; es ist

$$y_v = \frac{k}{p}. \quad (23)$$

Da der Verbindungsschritt y_v nur eine ganze Zahl sein kann, muß (wie schon auf S. 27 erwähnt) die Stegzahl ein ganzes Vielfaches der Polpaarzahl p sein.

Es hat sich als zweckmäßig erwiesen, von der Möglichkeit, gleichwertige Punkte der Wicklung miteinander zu verbinden, Gebrauch zu machen. Die Ausgleichsverbindungen üben einen günstigen Einfluß auf die Stromwendung aus. Von den $\frac{k}{p}$ möglichen Ausgleichs-

leitungen wird jedoch im allgemeinen nur ein gewisser Bruchteil angeordnet; nur bei Maschinen großer Leistung mit schwierigen Stromwendebedingungen werden zuweilen alle Ausgleichsverbindungen hergestellt, die möglich sind.

Eine Wicklung mit Ausgleichsleitungen ist in Abb. 46 dargestellt. Die Zahl der Stromwenderstege ist $k = 36$, die Nutenzahl $N = 36$, die Polpaarzahl $p = 3$. Die Gl. (22) ist erfüllt; nach Gl. (23) liegen die

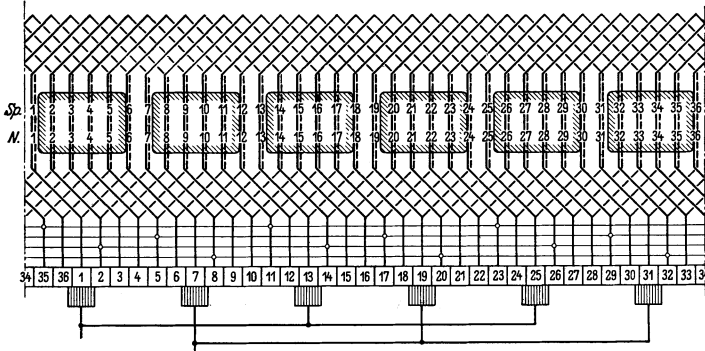


Abb. 46. Eingängige Schleißenwicklung ($u = 1$) mit Ausgleichsverbindungen, $y_1 = 6, y_2 = 5, y = +1, \eta_1 = 6$.

gleichwertigen Punkte um $\frac{36}{3} = 12$ Stege voneinander entfernt. Möglich sind auf der Stromwenderseite zwölf Ausgleichsleitungen, jede ist an drei Stege anzuschließen entsprechend den vorhandenen drei Polpaaren. Von den zwölf möglichen Ausgleichsleitungen sind in Abb. 46 nur vier vorgesehen, so daß jeder dritte Steg an eine Ausgleichsverbindung angeschlossen ist.

Die Ausgleichsleitungen in Abb. 46 können entweder als Verbindungen von Stromwenderstegen oder auch als solche von Anfängen

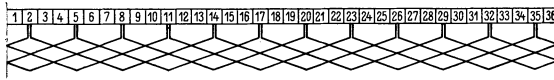


Abb. 47. Ausgleichsleitungen in Form von Bügel- oder Gabelverbindungen (zur Wicklung nach Abb. 46).

positiver Spulenseiten aufgefaßt werden. In gleicher Weise können auch Ausgleichsleitungen zwischen Enden positiver Spulenseiten vorgesehen werden, die dann auf der dem Stromwender gegenüberliegenden Ankerseite verlaufen.

In Abb. 46 sind die Ausgleichsleitungen als Ringleitungen (vgl. Abschnitt I F 5) dargestellt. Sie lassen sich auch in Form von Bügel- oder Gabelverbindungen herstellen entsprechend den Stirnverbindungen der Spulen. Abb. 47 zeigt für die gleiche Wicklung den Schaltplan für derartige Ausgleichsleitungen.

Bei der zweigängigen Schleifenwicklung sind Ausgleichsverbindungen notwendig; sie erfüllen, wie unten ersichtlich, hier noch einen anderen Zweck als bei der eingängigen Wicklung. Damit gleichwertige Punkte auftreten, muß wieder Gl. (22) erfüllt sein; für die Berechnung von y_v gilt wieder Gl. (23). Wenn der Verbindungsschritt y_v eine ungerade Zahl ist, so verbinden die Ausgleichsleitungen Wicklungspunkte oder Stege miteinander, die verschiedenen Gängen angehören; sie bringen also diese Gänge in Verbindung miteinander, wenn eine solche vorher nicht bestand (zweifach geschlossene Wicklung). Bei der Wicklung in Abb. 37 können z. B. verbunden werden:

Steg 1, 2, 3 ...
mit
Steg 18, 19, 20 ...

Eine derartige Verbindung der beiden Gänge ist zur Erzielung einer guten Stromwendung unerläßlich.

Wenn jedoch der Verbindungsschritt y_v eine gerade Zahl ist, so verbindet eine Ausgleichsleitung zwei Stege miteinander, die demselben Gang angehören. Bei der zweifach geschlossenen Wicklung sind dann die beiden Gänge trotz der Ausgleichsleitungen bei abgehobenen Bürsten ohne gegenseitige Verbindung. In diesem Falle müssen die beiden Gänge durch Verbindungsleitungen miteinander verbunden werden, deren Anschlußstellen auf verschiedenen Stirnseiten des Ankers liegen und die durch den Hohlraum zwischen Ankerblechpaket und Welle durchgeführt werden. Gleichwertige Punkte, die miteinander verbunden werden dürfen, treten jedoch nur auf, wenn der eine Teilschritt um ebensoviel größer ist als die Polteilung wie der andere kleiner ist als die Polteilung. In diesem Falle kann die Mitte einer Spule (auf der dem Stromwender gegenüberliegenden Seite liegend) verbunden werden mit dem Stromwendersteg, der zwischen den beiden Stegen liegt, an welche die Spule angeschlossen ist. Eine Wicklung mit derartigen Verbindungsleitungen, die stets im Zusammenhang mit den früher besprochenen Ausgleichsleitungen angeordnet werden, zeigt Abb. 48. Jeder Gang hat zunächst seine eigenen Ausgleichsleitungen (je einer auf einer Ankerseite); durch die strichpunktiierten Verbindungsleitungen a_1-b_1 , a_2-b_2 , ..., a_6-b_6 sind diese und damit auch die beiden Gänge miteinander in Verbindung gebracht. Die Anordnung derartiger Verbindungsleitungen von einer zur anderen Ankerseite setzt Spulen mit nur je einer Windung voraus; Spulen mit mehr als einer Windung kommen aber bei zweigängigen Schleifenwicklungen nicht vor.

Bei der eingängigen Wellenwicklung kommen Ausgleichsverbindungen nicht in Frage, einmal weil die auf die einzelnen Polpaarteilungen entfallenden Teile der Wicklung nicht parallel geschaltet sind und dann

auch, weil bei den symmetrischen eingängigen Wellenwicklungen Gl. (22) nicht erfüllt werden kann.

Bei der zweigängigen Wellenwicklung sind Ausgleichsleitungen immer notwendig, wenn die Wicklung zweifach geschlossen ist. Sie haben wieder die Aufgabe, die beiden Gänge miteinander in Verbindung zu bringen. Gleichwertige Punkte ergeben sich in der Wicklung dann,

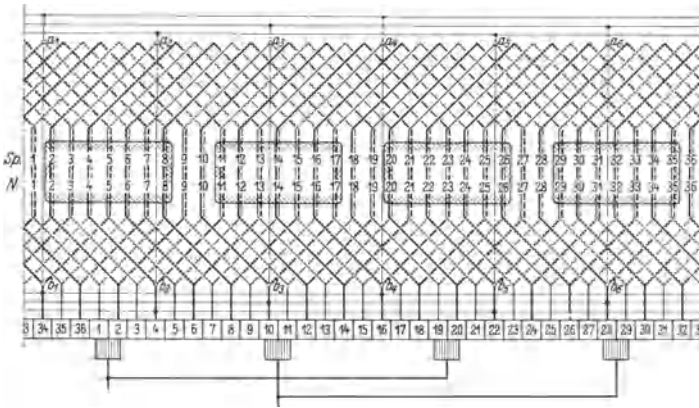


Abb. 48. Zweigängige zweifach geschlossene Schleifenwicklung ($u = 1$) mit Ausgleichsverbindungen, $y_1 = 9$, $y_2 = 7$, $y = +2$, $\eta_1 = 9$ ($\tau = 8$).

wenn sowohl die Nutenzahl N als auch die Stegzahl k gerade ist; der Verbindungsschritt, um den gleichwertige Punkte auseinander liegen, ist

$$y_v = \frac{k}{2}. \quad (24)$$

Bei der Wicklung in Abb. 39 können z. B. verbunden werden

Steg 1, 2, 3, ...
mit
Steg 18, 19, 20, ...

Wenn p ungerade ist, sind zwei um den Verbindungsschritt $y_v = \frac{k}{2}$ auseinander liegende Punkte der Wicklung nicht gleichwertig, dürfen also nicht miteinander verbunden werden. In diesem Falle treten jedoch unter bestimmten Bedingungen gleichwertige Punkte auf verschiedenen Stirnseiten des Ankers auf, die verbunden werden können durch Leitungen, die durch den Hohlraum zwischen Ankerblechpaket und Welle hindurchgeführt werden. Das einwandfreie Aufsuchen der gleichwertigen Punkte der Wicklung ist hierbei nur mit besonderen Hilfsmitteln möglich, die hier nicht besprochen werden können.

Auch bei der einfach geschlossenen zweigängigen Wellenwicklung sollen Ausgleichsverbindungen immer angeordnet werden, wenn sie möglich sind. Dies ist wieder der Fall, wenn Nutenzahl N und Polpaar-

zahl p gerade Zahlen sind. Der Verbindungsschritt ergibt sich wieder nach Gl. (24). Bei ungerader Polpaarzahl ergeben sich in der Wicklung keine gleichwertigen Punkte.

E. Wicklungen für Einankerumformer und Dreileitermaschinen.

Die Anker von Einankerumformern unterscheiden sich von den gewöhnlichen Gleichstromankern dadurch, daß sie außer dem Stromwender noch Schleifringe haben, die das Abnehmen bzw. Zuführen von Wechselstrom gestatten. Die Schleifringe führen zu Anzapfpunkten der Wicklung oder zu entsprechenden Stromwenderstegen. Bei kleineren Leistungen werden die Umformer meistens mit drei, bei größeren Leistungen mit sechs Schleifringen gebaut.

In gleicher Weise eingerichtet sind die Anker der Dreileitermaschinen (für Spannungsteilung); die Schleifringe werden dort an einen induktiven Spannungsteiler angeschlossen, an dessen Mittelpunkt oder Nullpunkt der Mittelleiter des Netzes liegt. Hier kommen Ausführungen mit zwei oder drei Schleifringen in Frage.

Wir betrachten zunächst die Wicklungen mit der geringsten Zahl paralleler Ankerzweige ($a = 1$); es sind dies die zweipoligen eingängigen Schleifenwicklungen und die eingängigen Wellenwicklungen für beliebige Polzahl. Bei ihnen muß die ganze Wicklung durch die Anzapfpunkte in m gleiche Teile zerlegt werden, wenn m die Zahl der Schleifringe ist. Wenn also k Spulen vorhanden sind, so muß jeder zwischen zwei Anzapfpunkten liegende Wicklungsstrang $s = \frac{k}{m}$ Spulen enthalten. Die Zahl s soll nach Möglichkeit eine ganze Zahl sein; es liegen dann alle Anzapfpunkte auf derselben Stirnseite des Ankers. Bei sechs Schleifringen ist die Forderung, daß s eine ganze Zahl sein soll, oft nicht gut zu erfüllen. Man läßt dann für s auch gebrochene Zahlen mit dem Bruch $\frac{1}{2}$ zu (es ist also dann $2s$ eine ganze Zahl); dabei erhält man aber Anzapfpunkte auf beiden Stirnseiten des Ankers.

Es soll z. B. die Wicklung in Abb. 34 an drei Schleifringe angeschlossen werden. Jeder zwischen zwei Anzapfpunkten liegende Wicklungsstrang muß $\frac{27}{3} = 9$ Spulen enthalten. Es können also z. B. angeschlossen werden

Schleifring 1 an	Stromwendersteg	1
"	2 "	10
"	3 "	12

Der Anschluß kann auch auf der dem Stromwender gegenüberliegenden Ankerseite erfolgen; man findet dort passende Anschlußpunkte, wenn man von den genannten Stromwenderstegen aus eine gleichartige Spulenseite (z. B. die der Oberschicht) durchläuft.

Sollen an die Wicklung in Abb. 34 sechs Schleifringe angeschlossen werden, so enthält jeder Strang $\frac{27}{6} = 4\frac{1}{2}$ Spulen. Die Anschlußpunkte liegen dann je zur Hälfte auf beiden Stirnseiten (Abb. 49). Die Hälfte der Schleifringzuleitungen muß von der einen auf die andere Stirnseite hinübergeführt werden; diese Leitungen verlaufen durch den Hohlraum zwischen Welle und Ankereisen.

Wenn die Zahl a der Ankerzweigpaare größer ist als 1, so sind die einzelnen Zweigpaare parallel geschaltet. Es muß dann jedes Zweigpaar in der geschilderten Weise auf die Stränge aufgeteilt werden. Jeder Schleifring steht dann mit a gleichwertigen Punkten der Wicklung in

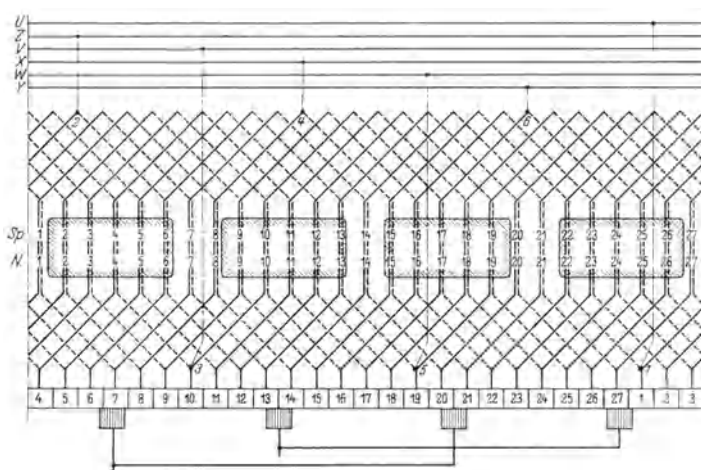


Abb. 49. Wicklung nach Abb. 34 für einen Einankerumformer mit 6 Schleifringen.

Verbindung; die Schleifringverbindungen wirken gleichzeitig als Ausgleichsleitungen. In diesem Falle soll $s = \frac{k}{am}$ nach Möglichkeit eine ganze Zahl sein; läßt man Anzapfpunkte auf beiden Stirnseiten zu, genügt es auch hier, wenn $2s$ eine ganze Zahl ist.

Wenn z. B. die Wicklung in Abb. 32 ($a = 2$) an drei Schleifringe angeschlossen werden soll, so enthält jeder Strang je Zweigpaar $s = \frac{k}{am} = \frac{36}{2 \cdot 3} = 6$ Spulen, die in der Schaltung unmittelbar aufeinander folgen müssen. Jeder Schleifring ist an zwei gleichwertige Punkte anzuschließen. Wenn der Anschluß an die Stege des Stromwenders erfolgt, kann er nach folgendem Plan vorgenommen werden.

Schleifring 1	an Steg 1	und Steg 19
„ 2	„ „	7 „ „ 25
„ 3	„ „	13 „ „ 31

Auch künstlich geschlossene Wellenwicklungen können für Ein-

ankerumformer und Dreileitermaschinen Verwendung finden. Die Aufteilung auf die Stränge geschieht in gleicher Weise.

F. Herstellung der Stromwenderwicklungen.

Abgesehen von ganz kleinen Ankern, die später besonders behandelt werden, geschieht die Herstellung der Stromwenderwicklungen in der Weise, daß die einzelnen Wicklungselemente (vgl. S. 20) vor dem Aufbringen auf den Anker hergestellt und in die Form gebracht werden, die sie bei der fertigen Wicklung haben. Es ist notwendig, den Wicklungselementen eine bestimmte Form zu geben, um den für die Wicklung verfügbaren Raum zweckmäßig auf die einzelnen Wicklungselemente zu verteilen. Dies gilt besonders hinsichtlich der Ausbildung der Spulenköpfe.

1. Drahtwicklungen.

Die Drahtwicklungen werden meistens als Zylinderwicklungen (auch Mantelwicklungen genannt) ausgeführt, bei denen die Wicklungsköpfe ungefähr auf dem gleichen (gedachten) Zylindermantel liegen,

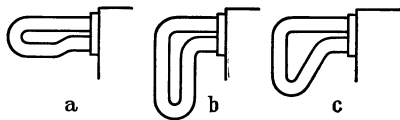


Abb. 50. Form der Spulenköpfe bei Stromwenderwicklungen.

auf dem sich auch die in die Nuten gebetteten Spulenseiten befinden. Die Form der Spulenköpfe bei dieser Wicklungsart ist in Abb. 50a angedeutet; sie laden in axialer Richtung ziemlich weit aus. Um ihnen einen festen Halt zu geben,

werden häufig Wicklungsträger vorgesehen, auf denen sie ruhen und auf die sie durch aufgewickelte Bandagen fest aufgepreßt werden. Bei den kleinen Maschinen, bei denen die Drahtwicklung Anwendung findet, haben die Wicklungsträger eine Form wie schmale Riemenscheiben und sitzen beiderseits des Blechpaketes auf der Welle, bei größeren Maschinen haben sie die Form von Ringen, die auf beiden Seiten des Blechpaketes an den Druckringen befestigt (meist angeschweißt) sind.

Seltener als die Zylinderwicklung wird die Stirnwicklung angewandt. Bei ihr haben die Spulenköpfe etwa die in Abb. 50b angegebene Form, sind also im wesentlichen in radialer Richtung nach innen abgebogen. Die axiale Ausladung ist bei dieser Wicklung geringer als bei der Zylinderwicklung, doch ist die Herstellung der Wicklung teurer. Anwendung findet die Stirnwicklung in Verbindung mit der Zylinderwicklung oft dann, wenn ein Anker zwei getrennte Stromwenderwicklungen enthält (Gleichstrom-Gleichstrom-Umformer). Im Nutengrund wird dann die Stirnwicklung, darüber die Zylinderwicklung angeordnet. In Achsrichtung gesehen haben die Spulenköpfe bei der Stirnwicklung zweckmäßig die Form von Evolventen (vgl. S. 105).

Zuweilen erhalten die Spulenköpfe auch eine Form nach Abb. 50c, die man als Mittelding zwischen Zylinderwicklung und Stirnwicklung ansehen kann. Der radial gerichtete Teil des Spulenkopfes erhält auch hier meistens die Form einer Evolvente. Dieser Teil der Spulenköpfe verleiht dem ganzen Wicklungskopf eine gewisse Steifigkeit, die das Auflegen von Bandagen ermöglicht, ohne daß ein Wicklungsträger vorhanden ist.

2. Formspulenwicklungen.

Die Drahtwicklungen werden meistens als Formspulenwicklungen hergestellt. Bei den Formspulenwicklungen enthält jede Spule im allgemeinen mindestens zwei Windungen; jede Spule ist ein zusammenhängendes Ganzes ohne Lötstellen. Formspulen werden sowohl aus Runddraht als auch aus Profildraht hergestellt. Runddraht wird meistens nur bis zu einem Querschnitt von $4 \dots 6 \text{ mm}^2$ verwendet. Als kleinstes Maß für Profildrähte kann etwa $0,8 \times 1,4 \text{ mm}$ gelten. Das Herstellen und Formen der Wicklungselemente kann so erfolgen, daß die Spule in eine Form (Schablone) gewickelt wird, in der sie gleich ihre richtige Form erhält. Derartige Formen, die in der Herstellung nicht einfach und nur für eine einzige Spulenform anwendbar sind, werden heute kaum noch verwendet. Das Wickeln und Formen geschieht vielmehr nacheinander entweder in der gleichen Einrichtung oder in verschiedenen Einrichtungen.

Zur Herstellung der Spulen für die Zylinderwicklungen wird vielfach die sog. Fischform (Abb. 51) angewandt, in welcher die Spule in Form eines langgestreckten Sechseckes aufgewickelt wird. Bei stärkeren Drahtquerschnitten, insbesondere bei Anwendung von Profildrähten, sind besondere Spannvorrichtungen für den Draht beim Wickeln notwendig. Um der gewickelten Spule einen vorläufigen Zusammenhalt zu geben, wird sie an einzelnen Stellen mit Band abgebunden oder mit entsprechend vorbereiteten Blechklammern versehen. Spulen, die zum Einträufeln (vgl. S. 52) in halbgeschlossene Nuten vorgesehen sind, werden in diesem Zustande in einer besonderen Einrichtung in die richtige Form gezogen (gespreizt). Bei Spulen, die in offene Nuten eingelegt werden, werden die Spulenseiten oft mit Band weitläufig bewickelt, damit die gegenseitige Lage der einzelnen Leiter beim Spreizen erhalten bleibt. Zu dem gleichen Zweck empfiehlt es sich unbedingt, die Spule vor dem Spreizen in Lack zu tränken

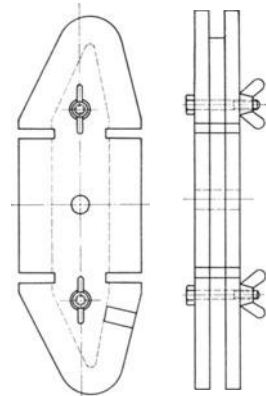


Abb. 51. Wickelform (Fischform).

und anschließend zu trocknen. Für Gleichstrommaschinen werden meistens nur kleinere Spulen in dieser Weise hergestellt; die Spreizeinrichtungen werden dann gewöhnlich von Hand betätigt. Eine größere mit Prebluft betätigte Spreizeinrichtung, die bei der Herstellung von Spulen für Wechselstromwicklungen Verwendung findet, ist in Abb. 177 dargestellt. Spulen für offene Nuten werden fast ausschließlich aus Profildraht hergestellt, weil mit diesem eine viel bessere Ausnutzung des Nutenraumes erzielt wird.

Wenn ein Wicklungselement mehrere Spulen enthält ($u > 1$), so werden die zu einem Wicklungselement gehörigen Spulen gleichzeitig (unter Verwendung einer entsprechenden Anzahl von Vorratsrollen) in

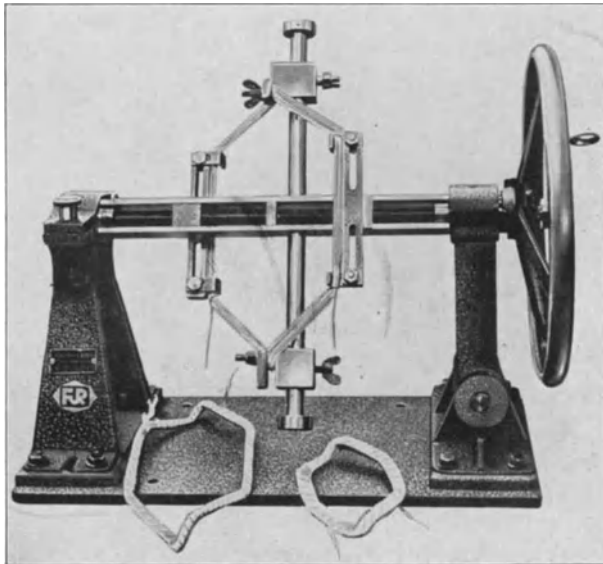


Abb. 52. Wickel- und Spreizmaschine (Werkbild Froitheim & Rudert).

die Form gewickelt. Wenn nur wenig Windungen je Spule vorhanden sind, insbesondere aber bei Verwendung von Profildraht, sind die einzelnen Leiter in den Wicklungselementen in ganz bestimmter Weise geordnet (vgl. Abb. 26). Nur wenn jede Spule viele Windungen aus Runddraht mit kleinem Querschnitt hat, wie es bei Spulen, die zum Einträufeln bestimmt sind, oft der Fall ist, liegen die Drähte der einzelnen Spulen eines Wicklungselementes ungeordnet durcheinander.

Andere Einrichtungen für die Herstellung von Formspulen sind so beschaffen, daß auf ihnen sowohl das Wickeln als auch das Formen des Wicklungselementes erfolgen kann. Eine einfache Einrichtung dieser Art zeigt Abb. 52. Die Einrichtung ist für verschiedene Größen

der Spulenseitenlänge und des Spulenseitenquerschnitts anwendbar. Vor dem Beginn des Wickelns wird die Maschine auf die gewünschten Abmessungen eingestellt. Beim Wickeln der Spule stehen die beiden Körper, welche die Spulenseiten aufnehmen, in der Mitte der Spindel. Der Draht wird mit einer Hand geführt, mit der anderen Hand wird der Spulenrahmen gedreht. Wenn die richtige Zahl von Windungen aufgewickelt ist, wird die Spule abgebunden und durch Drehen des Handrades auseinandergezogen, bis die beiden Spulenseiten die richtige gegenseitige Entfernung haben.

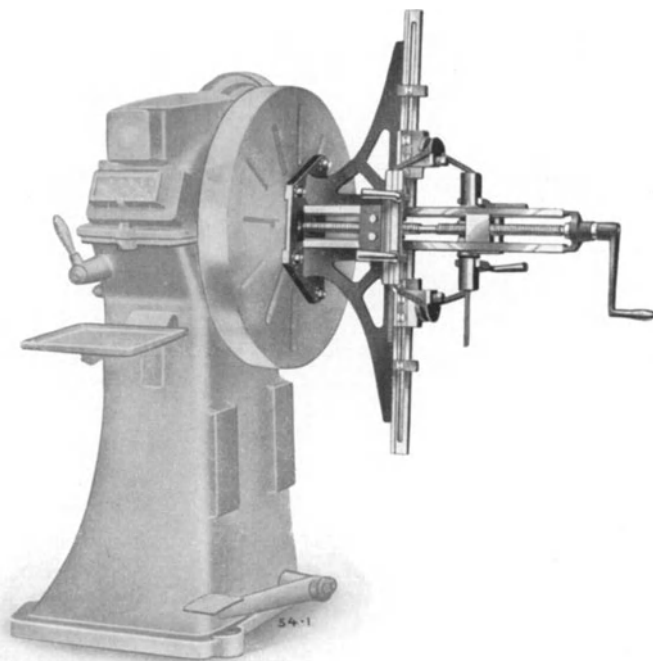


Abb. 53. Wickel- und Spreizmaschine (Werkbild Micafil).

Eine ähnliche Einrichtung jedoch für Kraftantrieb ist der in Abb. 53 dargestellte Wickel- und Spreizapparat der Firma Micafil, der auch für die Herstellung von Spulen mit stärkeren Drahtquerschnitten und unter Benutzung von besonderen Formwerkzeugen zur Herstellung schwieriger Sonderspulenformen geeignet ist.

Die auf die einfachste Art hergestellten Spulen, wie sie sich z. B. bei Benutzung der Fischformen ergeben, haben den Nachteil, daß beide Drahtenden einer Spule entweder aus der obersten oder aus der untersten Drahtlage der Spulenseite herauskommen. Eine solche Spule (Abb. 54) wird auch Normalformspule (Normalschablonenspule) genannt. Für

die Verbindung mit dem Stromwender ist diese Lage von Anfang und Ende nicht günstig. Es ist vielmehr erwünscht, daß bei der Spulenseite, die in die Oberschicht der Nut gelegt wird, das Ende aus der obersten Drahtlage, bei der Spulenseite, die in die Unterschicht der Nut gelegt wird, das Ende aus der untersten Drahtlage heraustritt.

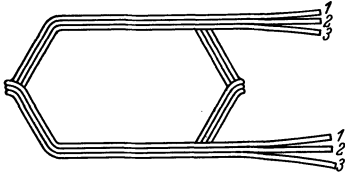


Abb. 54. Wicklungselement mit Normalformspulen.

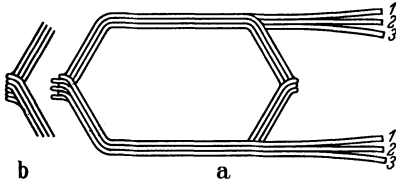


Abb. 55 a u. b. Wicklungselement mit Doppelkopfformspulen.

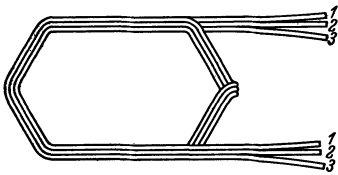


Abb. 56. Wicklungselement mit Flächenformspulen.

Um dies zu erreichen, kann man bei dem häufig vorkommenden Fall, daß jede Spule zwei Windungen hat, die Spule als sog. Doppelkopfformspule ausführen. In Abb. 55 sind zwei Ausführungsarten (a und b) dieser Spulenform gezeigt. Wie man erkennt, besitzt der dem Stromwender abgewandte

Wicklungskopf in tangentialer Richtung die doppelte Breite wie der in Abb. 54. Das Wicklungselement beansprucht also hier im Wicklungskopf mehr Raum als bei der Normalformspule. Die Doppelkopfformspule ist nur anwendbar, wenn die Nutteilung mindestens das Doppelte der Nutbreite beträgt.

Eine andere Spulenart mit günstiger Lage der Drahtenden (ebenfalls nur bei zwei Windungen je Spule anwendbar) zeigt Abb. 56. Man bezeichnet eine solche Spule auch als Flächenformspule. Die Doppelkopf- und Flächenformspulen werden oft auf besonderen Spezialeinrichtungen hergestellt, deren Konstruktion und Wirkungsweise von den Firmen geheimgehalten wird.

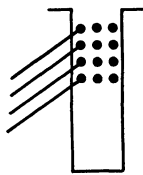


Abb. 57. Andeutung übereinander liegender Spulenden.

Die aus derselben Spulenseite heraustretenden Enden der verschiedenen Spulen eines Wicklungselementes liegen meistens nebeneinander (vgl. Abb. 26). Zuweilen ist es aber auch zweckmäßig, sie übereinander anzuordnen. Eine solche Anordnung ist in Abb. 57 angedeutet für den Fall, daß ein Wicklungselement vier Spulen zu je drei Windungen enthält.

Wenn die Spulen in die richtige Form gebracht sind, so ist ihre weitere Behandlung wieder davon abhängig, ob die Nuten offen oder halbgeschlossen sind. Sind die Nuten offen, so werden die Spulen vor dem Einlegen fertig isoliert. Die Art der Isolation der Spulenseiten

hängt ab von der Höhe der Maschinenspannung und oft auch von den besonderen Verhältnissen, unter denen die Maschine arbeiten muß. Für gewöhnliche Verhältnisse und mäßige Spannungen werden die Spulenseiten meistens mit vorgefalteten Streifen aus Preßspan oder ähnlichen Isolierstoffen umgeben, die durch weitläufige Umwicklung mit Baumwollband zusammengehalten werden (vgl. Abb. 58). Für höhere Spannungen und besondere Ansprüche werden die Spulenseiten auch umpreßt. Die Wicklungsköpfe werden ein- oder mehrmal mit Band um-



Abb. 58. Einlegen von Ankerspulen in offene Nuten (Werkbild Siemens).

wickelt. Die Ausführung der Spulenisolation ist in Abschnitt VIII eingehender behandelt.

Die fertigen Spulen werden nun in die Nuten des Ankers eingelegt, die zweckmäßig vorher noch mit einer dünnen vorgefalteten Einlage aus Isolierstoff versehen werden, um das Eingleiten der Spulenseiten zu erleichtern und eine Beschädigung der eigentlichen Spulenseitenisolation zu verhindern. Bei kleinen Ankern werden zunächst alle Spulen der Unterschicht eingelegt und daran anschließend diejenigen der Oberschicht. Abb. 58 zeigt den Vorgang des Einlegens der Ankerspulen.

Bei den größeren Ankern wird von den ersten Spulen zunächst nur die Unterschicht eingelegt. Sind auf diese Weise so viel Spulen auf den

Anker aufgebracht, wie auf eine Polteilung entfallen, so können die folgenden Spulen sofort mit der Unter- und Oberschicht eingelegt werden.

Nach dem Einlegen der Spulenseiten werden die Nuten bei größeren Ankern durch einen Keil aus Holz, Hartpapier oder Fiber verschlossen. Die Nuten haben dabei gewöhnlich die in Abb. 4b dargestellte Form. Außerdem werden häufig noch Bandagen aufgewickelt (vgl. Abschnitt IX B). Bei kleinen Ankerdurchmessern und geringen Umfangsgeschwindigkeiten wird auch auf die Anbringung von Keilen verzichtet und die Wicklung nur durch Bandagen befestigt. Die Nuten haben dann eine Form nach Abb. 4a.

Bei halbgeschlossenen Nuten wird die Nut vor dem Einlegen der Spulen mit der vollen Spulenseitenisolation ausgekleidet. Die Isolierstoffstreifen erhalten zuweilen eine solche Breite, daß die Ränder durch den Nutenschlitz nach außen ragen.

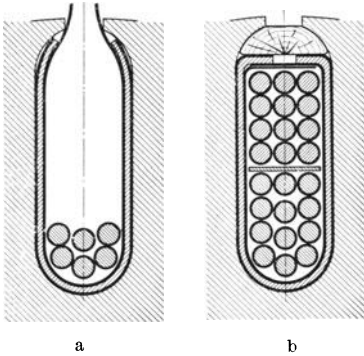


Abb. 59. Halbgeschlossene Nut.
a) während des Einträufelns der Wicklung,
b) nach dem Füllen und Verschließen.

Durch den Nutenschlitz werden dann die Drähte der Spulenseite einzeln in die Nut eingeträufelt. Man bezeichnet diese Art der Wicklung als Träufelwicklung. Die durch den Nutenschlitz herausragenden Ränder der Nutisolation verhindern beim Einträufeln eine Beschädigung der Drahtisolation an den scharfen Zahnkanten.

Die Drähte der Ober- und Unterschicht, die in einer Nut zusammenliegen, werden gewöhnlich (bei Spannungen über 220 Volt immer!) durch eine Zwischenlage aus Isolierstoff getrennt. Wenn alle Leiter in der Nut untergebracht sind, werden die etwa aus dem Nutenschlitz herausragenden Enden der Nutisolation abgeschnitten und dann die Ränder übereinandergelegt; die Nut wird dann durch einen Keil verschlossen (Abb. 59). Bei den kleinen Maschinen, bei denen die Träufelwicklung praktisch vorkommt, genügt als Keil häufig ein Streifen aus Preßspan.

3. Stabwicklungen.

Die Stabwicklung kommt nur für Spulen mit je einer Windung in Frage. Als Werkstoff dient Profilkupfer, das im allgemeinen blank verarbeitet und erst nach Formung der Spulen bzw Spulenteile isoliert wird. Die Spule wird entweder als Ganzes gebogen oder aus mehreren Teilen, sog. Stabelementen, zusammengesetzt. Hinsichtlich der Form der Spulenköpfe wird auch hier die Zylinderwicklung bevorzugt, doch kommt auch die Stirnwicklung vor.

Ist die Spule aus einem Stück gebogen, so erfolgt ihre Herstellung derart, daß das Kupfer zunächst in passender Länge zugeschnitten und mittels einer besonderen, das Ausweichen des Stabes aus der Ebene verhindernden Einrichtung hochkantig zu einer Hufeisenform mit parallelen Schenkeln gebogen wird. Die Spule wird dann ähnlich wie eine Drahtspule gespreizt und in die endgültige Form gebogen. Zum Biegen bedient man sich bei der fabrikmäßigen Herstellung sog. Biegetrommeln (Abb. 60), die aus Blech hergestellt sind. Das Blech bildet zwei gewölbte Flächen, deren Krümmung derjenigen entspricht, welche Ober-

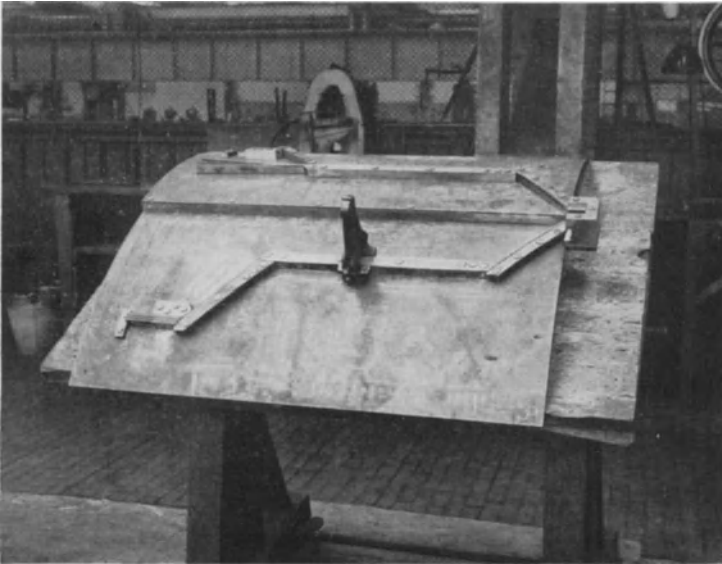


Abb. 60. Biegetrommel.

und Unterlage der Stirnverbindungen der Spulen haben müssen. Der hochkant in Hufeisenform gebogene Stab wird hochkant eingelegt und durch einen Stift mit Klemmeinrichtung an der Kröpfungsstelle gehalten. Auf den gewölbten Flächen sind Anschlagstücke angebracht, an welche die Spulenseiten angepreßt und so in die richtige Form gebracht werden. In Instandsetzungswerkstätten erfolgt jedoch das Biegen der Spulen mit behelfsmäßigen Mitteln; die richtige Biegung der Stirnverbindungen wird durch Schläge mit einem Holzhammer erzielt; dabei werden hölzerne Unterlagen mit entsprechend gebogener Oberfläche benutzt. Die fertige Spule wird sodann durch Umwickeln mit Band isoliert. Die Spulen, die in der Nut nebeneinander liegen, werden auch hier zu Wicklungselementen vereinigt und erhalten nochmals eine gemeinsame Isolation, die sog. Nutisolation. Ein Wicklungs-

element für eine Schleifenwicklung, das zwei aus je einem Stück gebogene Spulen enthält, zeigt Abb. 61.

Bei stärkeren Leiterquerschnitten, wie sie bei Ankern für große Ströme vorkommen, ist die Herstellung der Spulen aus einem Stück nicht gut möglich. Bei der Zylinderwicklung wird dann jede Spule aus zwei Teilen (Stabelementen) hergestellt, die vor dem Einlegen in die Nuten fertig gebogen und isoliert werden. Die Stabelemente, die in der gleichen Nut nebeneinander liegen, werden auch bei dieser Wicklungsart zusammen isoliert. Abb. 62 zeigt zwei derartige Stabelemente, eins für eine Wellenwicklung, das andere für eine Schleifenwicklung. Jedes Element enthält zwei Spulenseiten ($u = 2$).

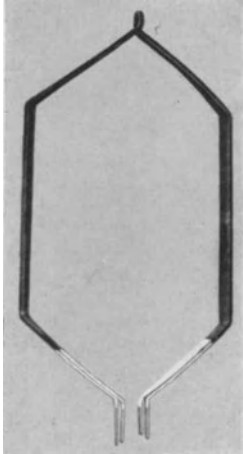


Abb. 61. Wicklungselement einer Stabwicklung enthaltend zwei aus je einem Stück hergestellte Spulen (Werkbild Siemens).

Die fertigen Stabelemente werden in die Ankernuten eingelegt, zuerst die Elemente der Unterschicht, dann die der Oberschicht. Vor dem Einlegen wird die Nut mit einem vorgefalteten dünnen Streifen aus Isolierstoff ausgekleidet, die das Eingleiten der Spulenseiten in die Nuten erleichtert und verhindert, daß die Stabisolation beschädigt wird. Abb. 63 zeigt einen Anker mit einer Stabwicklung (Schleifenwicklung). Die Stäbe der Unterschicht sind alle, die der Oberschicht erst teilweise eingelegt. Die zu einer Spule gehörigen Stabelemente werden auf der dem Stromwender abgewandten Seite durch Zwingen miteinander verbunden und verlötet. Die blanken Stabenden liegen

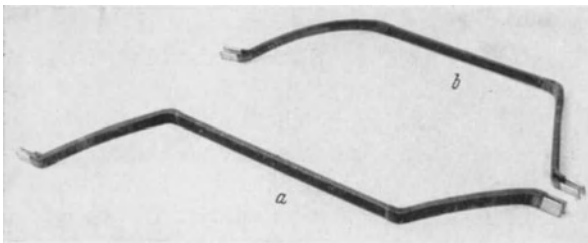


Abb. 62. Stabelemente, a) für eine Wellenwicklung, b) für eine Schleifenwicklung (Werkbild Siemens).

wegen des Auftrages der Stabisolation und etwaiger zwischen Ober- und Unterstab liegender Isolationszwischenlagen nicht unmittelbar aufeinander; der Zwischenraum zwischen ihnen wird durch eine Zwischenlage aus Kupfer ausgefüllt. Diese Zwischenlage wird zuweilen in die Zwingen vor dem Aufschieben auf die Stabenden eingienietet. Zweckmäßiger ist es aber, die Zwischenlage nachträglich in Form eines Keiles zwischen die in der Zwingen liegenden

Stabenden einzutreiben (Abb. 64). Die Verbindung der Spulen untereinander auf der Stromwenderseite erfolgt in der gleichen Weise, nur stellen die Zwingen hier auch gleichzeitig die Verbindung mit den Fahnen her, die zum Stromwender führen (vgl. Abschnitt I F 4).

Grundsätzlich läßt sich eine Stabwicklung, bei der jede Spule aus zwei Stabelementen besteht, auch bei halbgeschlossenen Nuten anwenden, jedoch kann dann das Stabelement vor dem Einbringen in die Nut nur an einem Ende fertig gebogen werden. Die Stäbe werden mit dem nicht abgobogenen Ende in die Nut seitlich eingeschoben, und zwar zunächst alle Stäbe der Unterschicht. Durch besondere Biegewerkzeuge werden dann die nicht abgobogenen Enden in ihre endgültige Lage gebracht. Alsdann wird mit den Stäben der Oberschicht in der gleichen Weise verfahren.



Abb. 63. Großer Gleichstromanker mit Stabwicklung während der Herstellung (Werkbild Siemens).

Das hier beschriebene Herstellungsverfahren läßt sich auch anwenden, wenn jede Spule aus einem Stück gebogen ist. Die an den Stromwender anzuschließenden Enden bleiben auch hierbei zunächst gerade und werden erst nach dem Einschieben in die Nuten abgobogen. Diese Ausführungsform kommt bei kleinen Maschinen für große Ströme vor.

Das nachträgliche Abbiegen der Stabenden wird vermieden, wenn man eine Stirnwicklung anwendet. Bei ihr sind die Nutenleiter einfache gerade Stäbe. Die Stirnverbindungen, die hier Gabelverbinder oder einfach Gabeln genannt werden, weichen meistens in ihrer Querschnittform und auch in der Größe des Querschnittes von den Nutenleitern ab.

Sie werden in Evolventenform gebogen. Die Enden werden zu Zwingen ausgebildet, die über die Enden der Nutenstäbe geschoben und mit diesen verlötet werden. Um eine feste mechanische Verbindung zu bewirken, werden Gabeln und Stäbe vor dem Verlöten oft auch vernietet.

Die Stirnverbindungen bei diesen Wicklungen entsprechen in ihrer Form den Evolventenwicklungen bei Wechselstromständern (vgl.

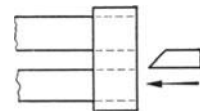


Abb. 64. Zwingen für Verbindung von Ober- und Unterstab (mit Zwischenkeil).

Abb. 143, 144 u. 147); nur sind sie nicht nach außen, sondern nach innen (zur Welle hin) abgebogen.

4. Verbindung der Wicklung mit dem Stromwender.

Die Verbindung der Wicklung mit dem Stromwender kann in verschiedener Weise erfolgen. Die wichtigsten Verbindungsarten sind in Abb. 65a bis g dargestellt. In Abb. 65a ist in den hinteren Teil

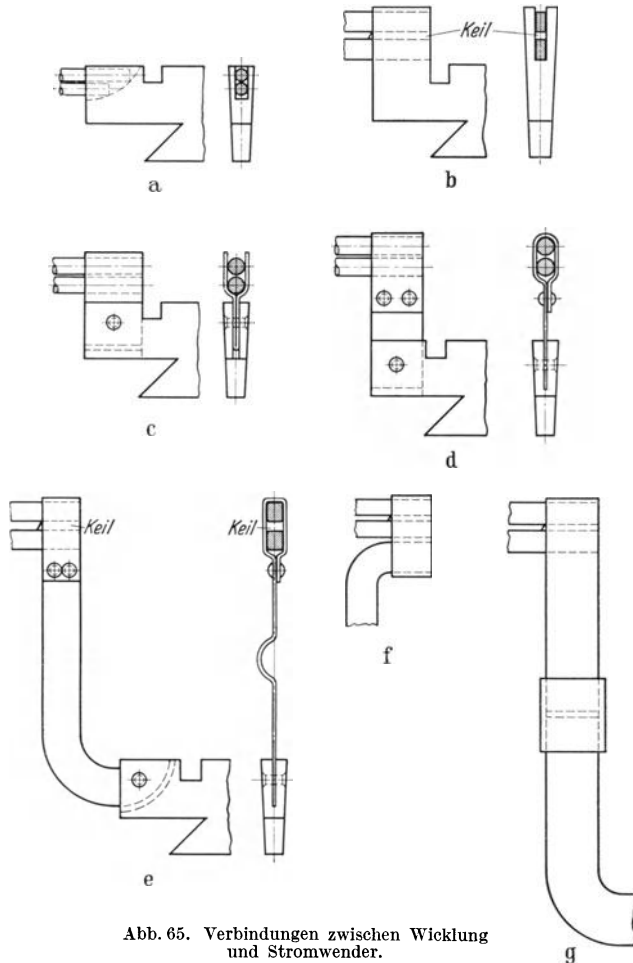


Abb. 65. Verbindungen zwischen Wicklung und Stromwender.

jedes Stromwendersteiges ein Schlitz eingefräst, in den die Spulenden unmittelbar eingelötet werden. In ähnlicher Weise erfolgt die Verbindung in Abb. 65 b, wo jedoch die Stege an dem der Wicklung zugekehrten Ende radial nach außen gerichtete geschlitzte An-

sätze haben, in die die Drahtenden gelegt und durch Löten befestigt werden.

Bei den Stegen nach Abb. 65c fehlen die Ansätze; an ihrer Stelle sind Zwingen aus gefalztem Blech (Weißblech oder Kupferblech) eingienietet und eingelötet. In diese Zwingen werden die Spulenden eingelegt und mit ihnen verlötet. Um eine Berührung benachbarter Zwingen zu verhindern, werden die Zwischenräume häufig mit Preßspan oder ähnlichem Isolierstoff ausgefüllt.

Die bisher betrachteten Befestigungsarten finden dann Anwendung, wenn zwischen Ankerdurchmesser und Stromwenderdurchmesser kein erheblicher Unterschied besteht. Ist hingegen der Durchmesser des Stromwenders erheblich geringer als der des Ankers, so erfolgt die Verbindung zwischen Wicklung und Stromwender durch Fahnen (Abb. 65d u. e). Diese sind in Schlitz der Stromwenderstege eingienietet und verlötet. Am anderen Ende sind sie zu Zwingen ausgebildet; in diese werden die Spulenden eingeführt und verlötet. Eine Abart der Befestigung zwischen Fahne und Wicklung ist in Abb. 65f angedeutet.

Die seitliche Ausbuchtung der Fahne in Abb. 65e soll bei Erwärmung die Ausdehnung der Fahne in Längsrichtung gestatten, ohne daß benachbarte Fahnen in gegenseitige Berührung kommen; sie wird nur bei sehr langen Fahnen angeordnet.

Häufig sind noch weitere Maßnahmen notwendig, die eine gegenseitige Berührung der Fahnen verhindern. Entweder man zieht an einer oder mehreren Stellen eine Schnur zickzackförmig zwischen den Fahnen hindurch oder man stützt die Fahnen nach Abb. 66 gegeneinander ab.

Bei sehr großen Maschinen ist es vorteilhaft, wenn man Anker und Stromwender leicht voneinander trennen kann, ohne die Wicklung aufzulöten. Man erreicht dies, wenn man die Fahnen etwa in der Mitte trennt und die beiden Teile durch Schiebehülsen wieder verbindet (Abb. 65g). Die Schiebehülsen müssen natürlich verlötet werden, lassen sich aber im Bedarfsfalle leicht auflöten und von den Verbindungsstellen herunterschieben.

Die Verbindung nach Abb. 65a kommt nur bei Drahtwicklungen vor, die übrigen Verbindungen sowohl bei Draht- als auch bei Stabwicklungen. Bei Stabwicklungen wird zwischen den beiden Stabenden ein Keil angeordnet (vgl. Abb. 65b, e, f u. g).

Bei Drahtwicklungen ist darauf zu achten, daß bei Herstellung der Stromwenderverbindungen die Spulen gemäß dem Schaltplan in der

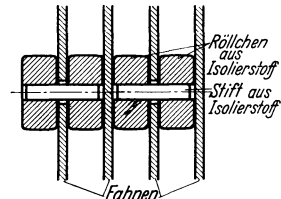


Abb. 66. Gegenseitige Abstützung von Fahnen.

richtigen Reihenfolge geschaltet werden. Bei den aus der Oberschicht austretenden Spulenenden ist in der Regel ohne weiteres zu sehen, aus welcher Nut sie kommen; die zugehörigen Enden, die aus der Unterschicht austreten, lassen sich durch eine Prüflampe (vgl. Abb. 214) ermitteln.

Sind mehrere Spulen je Nut vorhanden ($u > 1$), so ist es, da Treppenwicklungen bei Drahtankern nicht vorkommen, grundsätzlich gleichgültig, in welcher Reihenfolge die in den gleichen Nuten liegenden Spulen aufeinander folgen. Wenn die Drähte der einzelnen Spulen ähnlich wie bei Stabwicklungen bestimmte geordnete Plätze quer zur Nut haben (vgl. Abb. 25 a), so schaltet man die Spulen nach ihrer natürlichen Reihenfolge. Wenn dagegen die Drähte der einzelnen Spulen ungeordnet durcheinander liegen, gibt es eine solche natürliche Reihenfolge nicht. Bei Drahtwicklungen mit $u > 1$ wird die Feststellung der Zusammengehörigkeit von Anfängen und Enden der Spulen erleichtert, wenn man für die verschiedenen in einer Nut liegenden und gleichzeitig zu wickelnden Spulen Drähte mit verschiedenfarbiger Isolation nimmt (vgl. S. 62).

Bei den Stabwicklungen ist die Lage jeder Spule und jeder Spulenseite ohne weiteres erkennbar; das richtige Schalten der Wicklung gemäß dem Schaltplan macht daher keine Schwierigkeiten.

Das Verlöten der Wicklungsenden mit dem Stromwender geschieht meistens in der Weise, daß die Verbindungen einzeln mittels LötKolbens hergestellt werden. Wenn die Draht- oder Stabenden in Zwingen liegen (Abb. 65 d bis g), so gibt man dem LötKolben zweckmäßig eine solche Form, daß er beim Löten die ganze Seitenfläche der Zwinge berührt, so daß ein guter Wärmeübergang gewährleistet wird. In diesem Falle erfolgt das Löten zweckmäßig bei senkrechter Stellung der Ankerwelle (Stromwender nach oben). Bei kleinen Maschinen geschieht das Löten auch in der Weise, daß die Verbindungsstellen in ein ringförmiges Zinnbad getaucht werden.

5. Herstellung der Ausgleichsverbindungen.

Bei den Ausgleichsverbindungen gibt es zwei grundsätzliche Ausführungsformen. In vielen Fällen werden sie als Bügel- oder Gabelverbindungen entsprechend den Spulenköpfen der Wicklungen ausgeführt. Die Enden dieser Verbindungsleitungen werden entweder auf der Rückseite des Stromwenders in die Stege (Abb. 67 a u. b) oder bei Stabwicklungen in die Zwingen (Abb. 67 c u. d) eingelötet. In diesem Falle können die Verbindungen entweder auf der Stromwenderseite oder der gegenüberliegenden Ankerseite liegen. Sie sind entweder wie die Spulenköpfe der Stirnwicklungen (Abb. 67 a u. d) oder wie die der Zylinderwicklungen (Abb. 67 b u. c) ausgeführt. Im letzteren Falle müssen be-

sondere Träger vorgesehen werden, auf denen die Ausgleichsleitungen mit Bandagen befestigt werden. In Abb. 67b wird dieser Träger von einer axialen Verlängerung der Stromwendernabe gebildet. Die Leitungen können sowohl aus Runddraht (kleine Maschinen) als auch aus Profildraht bestehen.

Bei der zweiten Ausführungsform sind die Ausgleichsverbindungen Ringleitungen, die auf einen besonderen Träger aufgebracht werden und um den Umfang herum in sich selbst zurücklaufen. An je einen Ring sind gleichwertige Punkte der Wicklung angeschlossen. Bei größeren Maschinen mit Stabwicklungen bestehen die Ringleitungen aus Flachdraht (Abb. 67e), von ihnen führen Verbindungsleitungen zu den

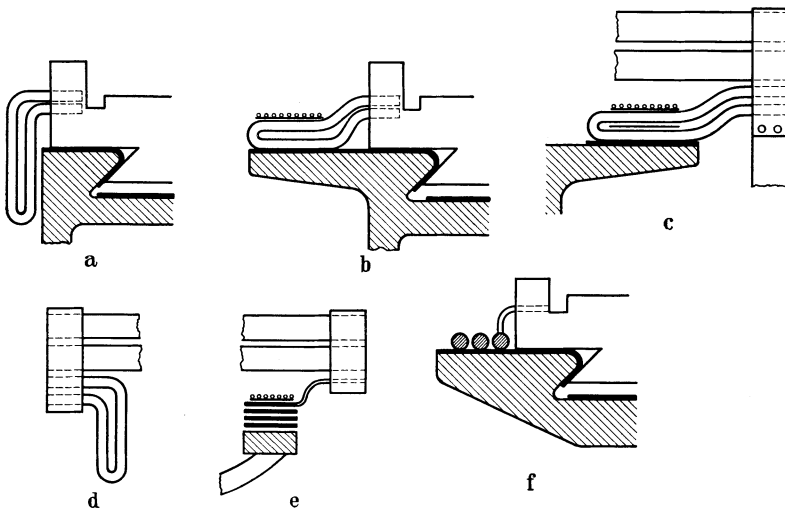


Abb. 67. Verlegung von Ausgleichsverbindungen.

Zwingen und werden gleichzeitig mit den Wicklungsstäben in diesen verlötet.

Auch bei kleinen Maschinen kommen Ausgleichsleitungen in Gestalt von Ringleitungen vor. Sie sind dann meistens aus Runddraht hergestellt und können auf einer axialen Verlängerung der Stromwendernabe untergebracht werden (Abb. 67f). Zuweilen werden bei Zylinderwicklungen die die Wicklungsköpfe haltenden Bandagen als Ausgleichsleitungen benutzt. Sind, wie es meistens der Fall ist, mehrere Ringleitungen notwendig, so unterteilt man die Bandage in mehrere nebeneinander liegende elektrisch voneinander isolierte Ringe. Ist dabei der Querschnitt der Bandage selbst für die Stromleitung nicht ausreichend, so wird unter die Bandage ein Streifen Kupferblech gelegt und mit der Bandage verlötet.

6. Herstellung kleiner Anker.

Die Wicklungen für die Anker ganz kleiner Stromwendermaschinen, insbesondere solcher für zwei Pole, erfordern eine besondere Behandlung, weil die praktische Ausführung dieser Wicklungen nicht in der gleichen Weise erfolgen kann wie die der größeren Maschinen. Die bisher behandelten Wicklungen haben, soweit es sich um Zweischichtwicklungen handelt, das Merkmal, daß jede Spule mit einer Spulenseite in der Unterschicht, mit der anderen in der Oberschicht liegt. Die Herstellung solcher Wicklungen ist bei Drahtspulen nur in der Weise möglich, daß die Spulen vor dem Einlegen in die Nuten auf Formen gewickelt und dann in die offenen oder halbgeschlossenen Nuten eingelegt werden.

Bei den zweipoligen Ankern müssen jedoch die Spulen, die meistens aus einer größeren oder sehr großen Zahl von Windungen bestehen, unmittelbar in die Nuten eingewickelt werden. Es nehmen dann bei einer Zweischichtwicklung die ersten eingewickelten Spulen mit jeder Spulenseite die Unterschicht der Nut, die letzten Spulen mit jeder Spulenseite die Oberschicht ein; zwischen diesen beiden Gruppen können dann noch Spulen vorhanden sein, die mit je einer Spulenseite in der Oberschicht, mit der anderen in der Unterschicht liegen. Daraus folgt schon, daß diese Wicklungen nicht

so symmetrisch sind wie die bisher behandelten Wicklungen.

Es seien nun die verschiedenen Ausführungsmöglichkeiten der Wicklung für kleine Anker betrachtet. Die einfachste Wicklungsart ist in ähnlicher Weise aufgebaut wie die Schleifenwicklung für größere Anker, nur mit dem schon erwähnten Unterschied, daß die Verteilung der Spulenseiten auf die Ober- und Unterschicht nicht symmetrisch ist. Damit die Drähte auf den Stirnseiten des Ankers an der

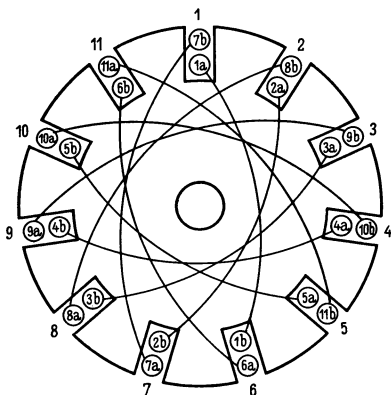


Abb. 68. Wicklung eines kleinen zweipoligen Ankers (unsymmetrische Wicklungsköpfe).

Welle vorbeilaufen können, wird meistens Sehnenwicklung angewendet. Eine Wicklung dieser Art ist in Abb. 68 dargestellt.

Der Anker hat elf Nuten, die durch fortlaufende Zahlen bezeichnet sind. Die Spulenweite ist zu fünf Nutteilungen gewählt, die Spulenseiten sind hier nicht, wie in den früheren Wicklungsplänen, fortlaufend numeriert, sondern entsprechend ihrer Zugehörigkeit zu den einzelnen Spulen bezeichnet, z. B. tragen die Seiten der Spule 1 die Bezeichnungen 1a und 1b. Die Numerierung der Spulen entspricht der Reihenfolge, in der sie hintereinander geschaltet werden, in der sie also im

Schaltplan nacheinander durchlaufen werden. Die Verbindungslinien der Spulenseiten deuten den Verlauf der Wicklung auf den Stirnseiten des Ankers an. Die Spulen werden in der Reihenfolge eingewickelt, in der sie numeriert sind. Wenn die erste Spule eingewickelt ist, wird zweckmäßig der Draht nicht abgeschnitten, sondern es wird eine verdrehte Drahtschleife gebildet, die später den Anschluß an den Stromwender ermöglicht, und sodann in einem Zuge die nächste Spule weitergewickelt. Nachdem auf diese Weise alle Spulen gewickelt sind, wird der Draht abgeschnitten und das Drahtende mit dem Anfang der ersten Spule verdreht.

Wie die Abb. 68 zeigt, liegen die Spulen 1 bis 5 mit beiden Spulenseiten in der Unterschicht, die nächste Spule (6) mit einer Seite in der Unter-, mit der anderen in der Oberschicht und schließlich die letzten fünf Spulen (7 bis 11) mit beiden Seiten in der Oberschicht.

Die Wicklung hat den Vorteil, daß sich ihre Herstellung und Schaltung sehr leicht übersehen läßt, daß also Schaltfehler kaum vorkommen können; sie ist ferner für jede Nutenzahl verwendbar. Dagegen hat sie

den Nachteil, daß die Wicklungsköpfe unsymmetrisch werden. Die mittlere Windungslänge nimmt mit zunehmender Spulenummer infolge der länger werdenden Stirnverbindungen zu, und da die Stirnverbindungen exzentrisch verlaufen, so fällt der Schwerpunkt außerhalb der Achse. Ein derartiger Anker ist also mechanisch nicht ausgeglichen.

Besondere Beachtung verdient noch die Verbindung der Spulenden mit dem Stromwender. Wenn die Bürsten wie bei größeren Maschinen räumlich so angeordnet sind, daß sie unter der Polmitte stehen, so ist die Lage der Stromwenderstege zu den mit ihnen verbundenen Spulenseiten genau so, wie es in den früheren Plänen dargestellt war. Diese Verhältnisse sind für die vorliegende Wicklung noch einmal in Abb. 69a dargestellt. Bei den kleinen Maschinen legt man jedoch häufig zur besseren Raumaussnutzung im Maschinengehäuse die Bürsten räumlich in die neutrale Zone, also zwischen die Pole. In

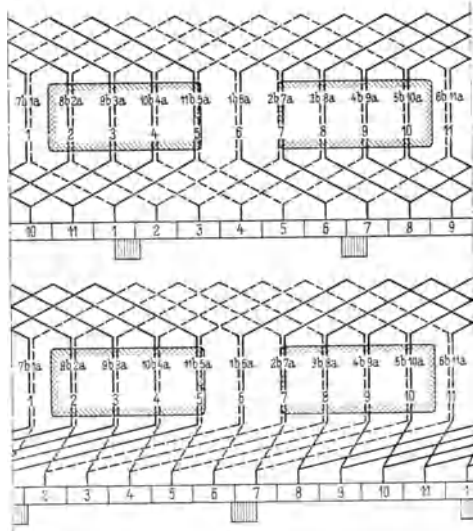


Abb. 69. Schaltplan der Wicklungen nach Abb. 68 u. 70.

- a) Bürsten räumlich unter der Polmitte,
- b) Bürsten räumlich in der neutralen Zone.

diesem Falle müssen die Stromwenderstege gegenüber der früheren Anordnung um eine halbe Polteilung (90 elektrische Grade) gedreht werden. Man erhält dann die in Abb. 69 b dargestellte Anordnung.

Die gleiche Wicklungsart kann auch Verwendung finden, wenn die Zahl der Spulen und der Stromwenderstege ein Vielfaches der Nutenzahl ist. Eine solche Wicklung entspricht dann den früher behandelten Wicklungen mit mehreren Spulenseiten quer zur Nut. Auf die gegenseitige Lage der Seiten verschiedener Spulen in einer Nut wird jedoch hier keine Rücksicht genommen.

Das Wickeln kann in diesem Falle auf zwei verschiedene Arten erfolgen, die an einem Beispiel erklärt werden sollen. Es sei wieder der Anker mit elf Nuten benutzt, jedoch soll der Stromwender 33 Stege haben, so daß also auch 33 Spulen vorzusehen sind.

Bei der ersten Wicklungsart wird zunächst die Spule 1 in derselben Weise gewickelt wie bisher, also in die Nuten 1 und 6, dann wird im Draht eine Schlaufe für den Stromwenderanschluß gemacht und sodann die Spule 2 in die gleichen Nuten gewickelt wie die Spule 1. Dabei kann zwischen die beiden Spulen eine Isolationszwischenlage gelegt werden. Nach dem Wickeln der Spule 2 wird abermals eine Schlaufe gemacht und dann die Spule 3 in die gleichen Nuten gewickelt. In gleicher Weise werden die Spulen 4, 5 und 6 in die Nuten 2 und 7 gewickelt usw. Auf jede Nut entfallen drei Anschlüsse für den Stromwender; damit diese in der richtigen Reihenfolge an die Stege angeschlossen werden, werden zweckmäßig gleich beim Wickeln die drei Drahtschlaufen einer Nut dadurch gekennzeichnet, daß man sie mit einem farbigen Schlauch überzieht, und zwar so, daß bei jeder Nut die Aufeinanderfolge der Farben die gleiche ist.

Bei der anderen Wicklungsart werden die drei Spulen, die in einer Nut liegen, gleichzeitig gewickelt. Es laufen dabei drei Drähte gleichzeitig von drei Drahtrollen ab. Um die gleichzeitig gewickelten Spulen voneinander unterscheiden zu können, ist es zweckmäßig, sie durch verschiedene Farbe der Drahtumspinnung kenntlich zu machen. Da die gleichzeitig gewickelten Spulen in Reihe geschaltet werden, muß der Draht nach dem Wickeln einer Spule abgeschnitten werden. Die Spulen werden dann so in Reihe geschaltet, daß bei fortlaufender Numerierung der Spulen die Farben der Umspinnung zyklisch wechseln, bei dem Beispiel also folgende Farbenzusammengehörigkeit besteht:

Farbe A: Spule 1, 4, 7, 10 ...
 „ B: „ 2, 5, 8, 11 ...
 „ C: „ 3, 6, 9, 12 ...

Notwendig ist allerdings eine bestimmte Reihenfolge der in den gleichen Nuten liegenden Spulen nicht, da diese unter sich elektrisch gleichwertig sind; eine bestimmte Regel erleichtert nur das Schalten.

Verwendet man für die verschiedenen gleichzeitig gewickelten Spulen Draht mit gleichfarbiger Umspinnung, so muß man zusammengehörige Anfänge und Enden mittels einer Prüflampe oder einer ähnlichen Einrichtung feststellen.

Das zweite Verfahren hat den Vorteil, daß das Wickeln schneller vonstatten geht, dagegen den Nachteil, daß die zwischen benachbarten Windungen auftretende Spannung erheblich größer wird, so daß die Gefahr eines Windungsschlusses in viel höherem Maße besteht.

Ein besserer mechanischer Ausgleich läßt sich erzielen, wenn man die Spulen in anderer Reihenfolge in die Nuten einwickelt, als sie bei der fertig geschalteten Wicklung aufeinander folgen. Eine solche Wicklung ist in Abb. 70 dargestellt; es sind wieder elf Nuten und elf Spulen angenommen. Für die Wicklung gelten wieder die in Abb. 69 a oder b dargestellten Schaltpläne, und die Numerierung der Spulen entspricht der Reihenfolge, in der sie hintereinander geschaltet werden. Das Wickeln erfolgt jedoch in der Reihenfolge:

1—6—11—5—10—4—9—3—8—2—7.

Wenn die Spule 1 gewickelt ist, wird der Anker um angenähert 180° um seine Achse gedreht und dann die Spule 6 gewickelt usw. Mit Ausnahme der zuerst und der zuletzt eingewickelten Spule liegen alle Spulen mit einer Spulenseite in der Oberschicht, mit der anderen in der Unterschicht einer Nut.

Die Windungslänge der Spulen ist zwar auch hier nicht gleich, jedoch liegen immer je zwei Spulen von ungefähr gleicher Windungslänge symmetrisch zur Achse, so daß im Gegensatz zur Ausführung nach Abb. 68 der Schwerpunkt der Wicklung einigermaßen genau in die Achse zu liegen kommt.

Man kann alle Spulen in der angegebenen Reihenfolge fortlaufend wickeln, ohne zunächst den Draht zu durchschneiden, wenn man beim Übergang von einer Spule zur anderen Schlaufen macht, um hinreichend lange Spulendenen für das spätere Schalten zu bekommen. Vor dem Schalten müssen natürlich die Spulen voneinander getrennt werden, da die Reihenfolge der Spulen beim Schalten eine andere ist als beim Wickeln.

Das Schalten geht jedoch einfacher vonstatten, wenn man schon während des Wickelns die Spulen trennt. Bei der üblichen Bürsten-

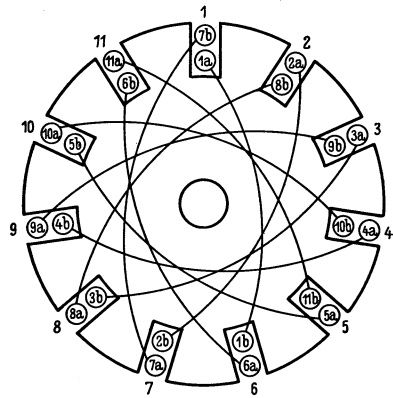


Abb. 70. Wicklung eines kleinen zweipoligen Ankers (annähernd symmetrische Wicklungsköpfe), Nutenzahl ungerade.

anordnung nach Abb. 69 b wird dann nach dem Wickeln der Spule 1 das aus der Nut 6 herauskommende Ende über die Stirnseite des Ankers bis zu dem vor der Nut 1 liegenden Anfang der gleichen Spule geführt und mit diesem zunächst verdrillt; in gleicher Weise wird mit den anderen Spulen verfahren. Nachdem alle Spulen gewickelt sind, werden die verdrillten Anfänge und Enden derselben Spulen wieder getrennt und diejenigen Anfänge und Enden miteinander verdrillt, die gemeinsam an einen Stromwendersteg zu führen sind, z. B. Ende der Spule 1 und Anfang der Spule 2.

Wenn die Zahl der Spulen ein Vielfaches der Nutenzahl ist, so können auch hier, wie oben beschrieben, die Spulen, welche in den gleichen

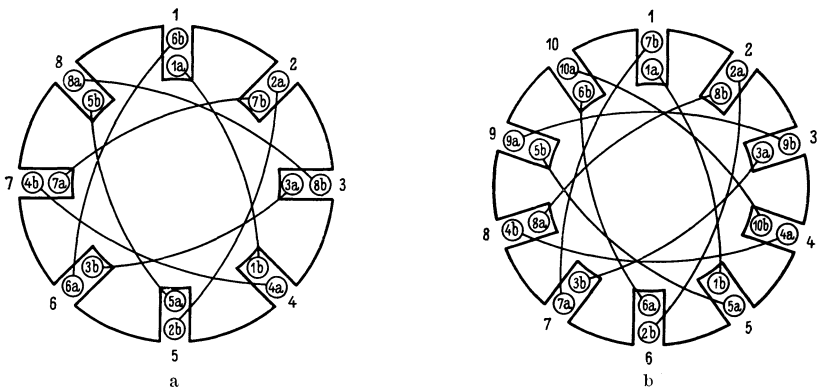


Abb. 71. Wicklung eines kleinen zweipoligen Ankers (symmetrische Wicklungsköpfe), Nutenzahl gerade.

a) halbe Nutenzahl gerade, b) halbe Nutenzahl ungerade.

Nuten liegen, entweder nacheinander oder gleichzeitig gewickelt werden.

Die zuletzt besprochene zweipolige Wicklung ist eine Sehnenwicklung; die Zahl der Nuten ist ungerade (nicht durch die Zahl der Pole teilbar). Wenn die Zahl der Nuten durch die Polzahl teilbar ist, kann entweder eine Sehnen- oder eine Durchmesserwicklung angewandt werden. Bei zweipoligen Maschinen hat eine Durchmesserwicklung den Nachteil, daß bei ihr die Stirnverbindungen mehr Raum in axialer Richtung beanspruchen, als bei der Sehnenwicklung.

Bei zweipoligen Ankeren mit geraden Nutenzahlen macht man häufig noch von einer anderen Art der Sehnenwicklung Gebrauch, die eine sehr symmetrische Anordnung der Stirnverbindungen ergibt. Diese Wicklung gestaltet sich etwas verschieden, je nachdem die halbe Nutenzahl gerade (Nutenzahl durch 4 teilbar) oder die halbe Nutenzahl ungerade (Nutenzahl nicht durch 4 teilbar) ist. Für diese beiden Fälle sind in Abb. 71 a u. b Beispiele dargestellt, wobei die Numerierung der Spulen wieder der Reihenfolge beim Schalten

entspricht. In Abb. 71 a sind acht Nuten und Spulen vorhanden. Die Reihenfolge beim Wickeln ist

$$1-5-3-7-4-8-6-2.$$

In Abb. 71 b sind zehn Nuten und Spulen vorhanden. Die Reihenfolge beim Wickeln ist hier

$$1-6-3-8-5-10-7-2-9-4.$$

Bei der Wicklung nach Abb. 71 a liegt die eine Hälfte der Spulen mit beiden Spulenseiten in der Unterschicht, die zweite Hälfte mit beiden Spulenseiten in der Oberschicht. Bei der Wicklung nach Abb. 71 b sind zwei Spulen (Nr. 5 und 10) vorhanden, die mit je einer Spulenseite in der Unterschicht, mit der anderen in der Oberschicht liegen, von den übrigen Spulen liegt wieder die eine Hälfte ganz in der Unterschicht, die andere ganz in der Oberschicht.

Tafel 5. Lage der Spulen bzw. Spulengruppen bei Wicklungen nach Abb. 71 a u. b für eine beliebige Nutenzahl x .

Spule bzw. Gruppe Nr.	Spulenseite	
	a Nut Nr.	b Nut Nr.
1	1	$\frac{x}{2}$
2	2	$\frac{x}{2} + 1$
3	3	$\frac{x}{2} + 2$
⋮	⋮	⋮
$\frac{x}{2}$	$\frac{x}{2}$	$x - 1$
$\frac{x}{2} + 1$	$\frac{x}{2} + 1$	x
⋮	⋮	⋮
x	x	$\frac{x}{2} - 1$

Tafel 6. Reihenfolge, in der bei den Wicklungen nach Abb. 71 a u. b die Spulen bzw. Spulengruppen gewickelt werden.

Halbe Nutenzahl gerade (Abb. 71 a) Spulenpaare		Halbe Nutenzahl ungerade (Abb. 71 b) Spulenpaare	
Spule 1	und Spule $\frac{x}{2} + 1$	Spule 1	und Spule $\frac{x}{2} + 1$
Spule 3	und Spule $\frac{x}{2} + 3$	Spule 3	und Spule $\frac{x}{2} + 3$
Spule 5	und Spule $\frac{x}{2} + 5$	Spule 5	und Spule $\frac{x}{2} + 5$
⋮	⋮	⋮	⋮
Spule $\frac{x}{2} - 1$	und Spule $x - 1$	Spule $\frac{x}{2} - 2$	und Spule $x - 2$
Spule $\frac{x}{2}$	und Spule x	Spule $\frac{x}{2}$	und Spule x
Spule $\frac{x}{2} + 2$	und Spule 2	Spule $\frac{x}{2} + 2$	und Spule 2
Spule $\frac{x}{2} + 4$	und Spule 4	Spule $\frac{x}{2} + 4$	und Spule 4
⋮	⋮	⋮	⋮
Spule $x - 2$	und Spule $\frac{x}{2} - 2$	Spule $x - 1$	und Spule $\frac{x}{2} - 1$

Heiles, Wicklungen.

Für eine beliebige Nutenzahl x ist der Nutenschritt $\eta_1 = \frac{x}{2} - 1$ zu wählen. Bei gleicher Zahl von Spulen und Nuten ($u = 1$) gibt die Tafel 5 die Lage der einzelnen Spulen an (Numerierung entsprechend der Reihenfolge beim Schalten). Ist die Zahl der Spulen ein Vielfaches der Nutenzahl ($u > 1$), so denkt man sich die in den gleichen Nuten liegenden Spulen zu einer Gruppe zusammengefaßt, die man entsprechend Abb. 71 a oder 71 b numeriert. Die Tafel 5 gibt dann die Lage der Spulengruppen an.

Die Reihenfolge beim Wickeln für beliebige Nutenzahlen ergibt sich aus der Tafel 6, wobei die beiden erwähnten Fälle (halbe Nutenzahl gerade oder ungerade) unterschieden sind. Die Gesetzmäßigkeit der Reihenfolge des Wickelns ist leichter zu übersehen, wenn man immer je zwei Spulen zu einem Paar zusammenfaßt. In Tafel 7 sind die allgemeinen Angaben der Tafel 6 für einige häufig vorkommende Nutenzahlen ausgewertet.

Tafel 7.

Auswertung der Tafel 6 für die Nutenzahlen 8, 10, 12, 14, 16, 18.

Reihenfolge der Spulen					
Halbe Nutenzahl gerade			Halbe Nutenzahl ungerade		
8 Nuten	12 Nuten	16 Nuten	10 Nuten	14 Nuten	18 Nuten
1 und 5	1 und 7	1 und 9	1 und 6	1 und 8	1 und 10
3 „ 7	3 „ 9	3 „ 11	3 „ 8	3 „ 10	3 „ 12
4 „ 8	5 „ 11	5 „ 13	5 „ 10	5 „ 12	5 „ 14
6 „ 2	6 „ 12	7 „ 15	7 „ 2	7 „ 14	7 „ 16
	8 „ 2	8 „ 16	9 „ 4	9 „ 2	9 „ 18
	10 „ 4	10 „ 2		11 „ 4	11 „ 2
		12 „ 4		13 „ 6	13 „ 4
		14 „ 6			15 „ 6
					17 „ 8

7. Wickelmaschinen für kleine Anker.

Da die Windungszahl der Spulen bei kleinen Ankern meistens sehr groß ist, ist das Wickeln von Hand sehr zeitraubend. Man benutzt daher für das Wickeln besondere Wickelmaschinen, die in verschiedenen Ausführungsformen gebaut werden.

Abb. 72 zeigt eine Maschine der Micafil A.-G., bei der der Anker um eine Achse gedreht wird, die senkrecht zur Welle und zur Ebene der zu wickelnden Spule steht. Das Bild zeigt die Maschine ausgerüstet mit drei Drahtspulen zum gleichzeitigen Wickeln von drei Spulen in die gleichen Nuten; sie ist natürlich auch für eine geringere Spulenzahl je Nut verwendbar. Um ein einwandfreies Hineingleiten des Drahtes in die Nuten zu gewährleisten, sind besondere Führungsbleche vorhanden, die an den Rand des Nutenschlitzes angelegt werden. Die Führungseinrichtung ist so verstellbar, daß die Spulenweite beliebig eingestellt werden kann. Nachdem eine Spule gewickelt ist, wird der

Anker von Hand so weit um seine Achse gedreht, daß die Maschine die nächste Spule wickeln kann.

Die Ablaufgeschwindigkeit des Drahtes ändert sich, wie man ohne weiteres erkennt, während des Wickelns periodisch, da die Windungen nicht kreisförmig sind. Bei jeder Vergrößerung der Ablaufgeschwindigkeit muß aber die Drahtrolle beschleunigt werden; dadurch wird der Draht auf Zug beansprucht. Dünner Draht mit geringer mechanischer Festigkeit kann dabei leicht reißen.

Dieser Nachteil wird vermieden bei einem Drahtabroller der Micafil A.-G., mit dem die in Abb. 73 dargestellte Wickelmaschine ausgerüstet ist. Die Vorratsspule wird vertikal auf einen Dorn gesteckt, der auf einer drehbaren Scheibe sitzt. Der ablaufende Draht wird durch eine Öse gezogen, welche an einem frei kreisenden Arm befestigt ist. Beim Abziehen des Drahtes führt der Arm eine kreisende Bewegung aus. Für das Ab-

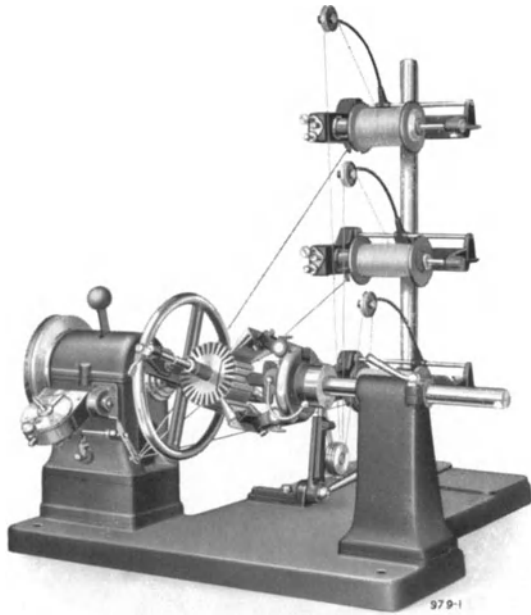


Abb. 72. Wickelmaschine für umlaufenden Anker (Werkbild Micafil).

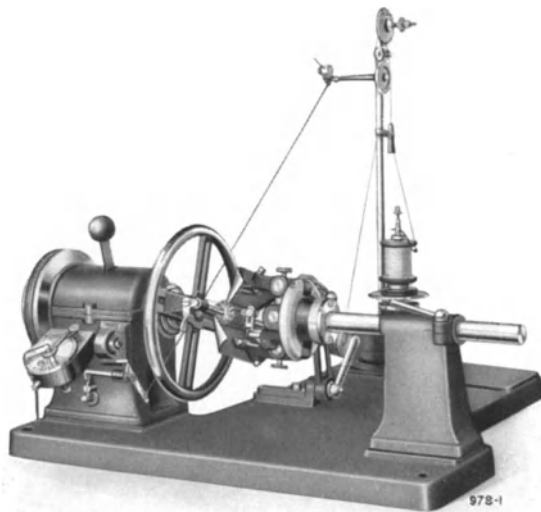


Abb. 73. Wickelmaschine mit Drahtabroller (Werkbild Micafil).

wickeln selbst ist eine Drehung der Vorratsspule nicht notwendig. Um jedoch einen Drall des Drahtes nach Möglichkeit zu vermeiden, wird die Vorratsspule von der Wickelmaschine her künstlich in Drehung versetzt. Die Drehzahl muß natürlich entsprechend dem stetig abnehmenden Durchmesser des Drahtvorrats geändert werden. Die Einstellung erfolgt mittels eines Reibräderpaares so, daß die kreisende Bewegung des Drahtführungsarmes geringfügig ist. Dieser Drahtabroller vermeidet Drahtzerstörungen und Beschädigung der Isolation und ermöglicht das Wickeln mit hohen Geschwindigkeiten.



Abb. 74. Wickelmaschine mit pendelnder Drahtführungsdüse (Werkbild Schlegel).

Eine andere Arbeitsweise hat die Wickelmaschine nach Abb. 74, die von der Firma Schlegel hergestellt wird. Das Einlegen des Drahtes in die Nuten erfolgt hier durch die hin- und hergehende Bewegung einer Drahtführungsdüse. Am Ende jeder Düsenbewegung wird eine Drehbewegung des Ankers um seine eigene Achse bewirkt, durch welche der Draht auf der Stirnseite des Ankers verlegt

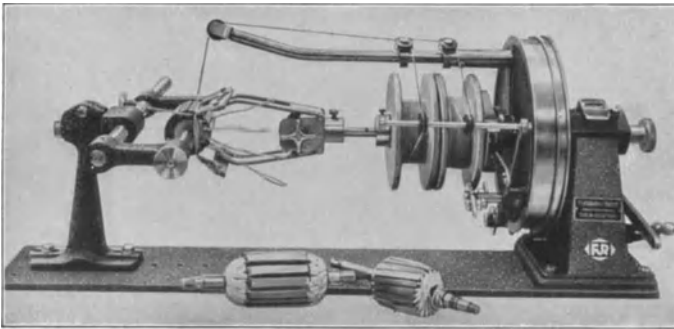


Abb. 75. Wickelmaschine mit stillstehendem Anker (Werkbild Froitheim & Rudert).

wird und ferner die Nut, welche die zweite Spulenseite aufnehmen soll, unter die Düse gebracht wird.

Der wesentliche Vorteil der Maschine besteht darin, daß besondere Führungseinrichtungen, welche das Eingleiten des Drahtes in die Nuten sichern und deren Einstellung Zeit erfordert, nicht notwendig sind. Die nachteiligen Folgen der ungleichmäßigen Drahtgeschwindigkeit

werden hier durch einen sehr elastischen Drahtspannungsausgleicher von geringer Trägheit vermieden.

Eine Wickelmaschine, bei welcher der zu wickelnde Anker überhaupt keine Bewegungen ausführt (Abb. 75), wird von der Firma Froitzheim & Rudert gebaut. Der Draht wird durch einen umlaufenden Arm an Gleitschienen vorbei in die Nuten verlegt. Dieses Verfahren bringt den Vorteil, daß die freien Drahtenden der Spulen nicht besonders befestigt zu werden brauchen, um zu verhindern, daß sie bei der Bewegung des Ankers herumschlagen und beschädigt werden. Die Maschine eignet sich sowohl für Anker mit geraden als auch für solche mit schrägen Nuten.

II. Gleichstrom-Feldwicklungen.

Gleichstrom-Feldwicklungen kommen vor im Ständer der Gleichstrommaschinen und Einankerumformer sowie in den Läufern der Synchronmaschinen. Nur bei den Volltrommelsynchronmaschinen (Turbogeneratoren) treten sie als verteilte Wicklungen auf, während sie in allen anderen Fällen konzentrierte Wicklungen sind.

A. Feldwicklungen für Gleichstrommaschinen und Einankerumformer.

Die Wicklungen kommen vor als Nebenschluß-, Hauptschluß- und Doppelschlußfeldwicklungen. Die Doppelschlußwicklung ist eine Nebenschlußwicklung mit einer zusätzlichen Hauptschlußwicklung geringer Windungszahl.

Als Draht wird bei kleinen Querschnitten Runddraht, bei größeren Profildraht verwendet. Als Drahtisolation kommt bei kleinen Querschnitten Lacküberzug, bei größeren Lack mit einfacher Baumwollbespinnung, doppelte Baumwollbespinnung oder Asbestbespinnung zur Anwendung (vgl. Abschnitt VIII B).

Bei den kleineren Maschinen werden Nebenschluß- und Hauptschlußwicklungen grundsätzlich in gleicher Weise hergestellt. Sie werden auf eine zerlegbare Wickelform gewickelt, aus dieser herausgenommen und mit Band umwickelt. Um nicht für alle Spulengrößen besondere Formen herstellen zu müssen, kann man sich verstellbarer Wickelformen bedienen; eine solche ist in Abb. 76 dargestellt. Das Umbandeln der Spulen wird

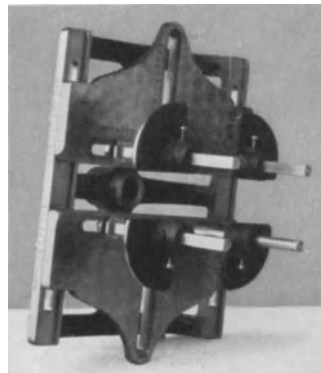


Abb. 76. Verstellbare Wickleinrichtung (Werkbild Schümann).

meistens auf besonderen Maschinen vorgenommen (Abb. 196 u. 197). Eine fertige Polspule zeigt Abb. 77. Bei ganz kleinen Maschinen werden die Spulen oft noch in eine Form gepreßt, die sich der Rundung des Joches anpaßt. Bei der Doppelschlußwicklung werden die zu-



Abb. 77. Polspule einer Gleichstrommaschine (Werkbild Siemens).

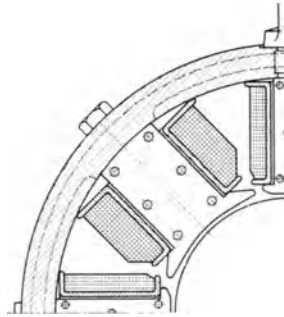


Abb. 78. Feldwicklungen mit Spulenkästen.

sätzlichen Hauptschlußwindungen unter Zwischenlage von Isolierstoff (Preßspan oder dergleichen) unmittelbar auf die Nebenschlußwindungen gewickelt und mit diesen gemeinsam umbandelt.

Bei mittelgroßen Maschinen werden die Spulen ebenso hergestellt wie bei den kleinen oder sie werden auf besondere Spulenkästen ge-

wickelt, die aus Isolierstoff (Preßspan, Hartpapier, Lackpapier) oder aus Blech hergestellt sind (Abb. 78). Mit Rücksicht auf die Raumverhältnisse muß die Wicklungshöhe, wie Abb. 78 erkennen läßt, in der Nähe des Polschuhs häufig verringert werden.

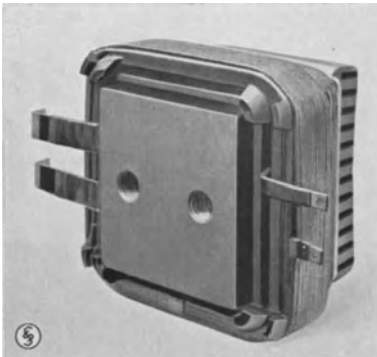


Abb. 79. Pol mit Röhrenwicklung (Werkbild Siemens).

Die Feldspulen für größere Maschinen werden meistens freitragend gewickelt. Um eine gute Kühlung zu ermöglichen, werden sie so auf den Polen befestigt, daß möglichst die ganze Spulenoberfläche von der Kühlluft bestrichen wird. Zur Ver-

größerung der Abkühlungsoberfläche werden die Spulen oft unterteilt, und zwar entweder so, daß die Teilspulen konzentrisch ineinander liegen (Abb. 79) oder daß sie die Form nebeneinander liegender Scheiben haben (Abb. 80); in jenem Falle spricht man von Röhrenwicklung, in diesem von Scheibenwicklung. Bei beiden Arten sind die Teilspulen durch Zwischenlagen aus Isolierstoff gegeneinander und gegen das Pol-

eisen abgestützt. Eine andere Möglichkeit, die Oberfläche zu vergrößern, benutzen die SSW bei ihren sog. Rillenspulen (Abb. 81).

Bei großen Doppelschlußmaschinen werden die Haupt-schlußwindungen meistens aus Flachkupfer hochkant gewickelt; zwischen die Windungen werden Zwischenlagen aus Isolierstoff gelegt. Die Herstellung dieser Spulen entspricht etwa derjenigen der Polradspulen von Synchronmaschinen. Sie werden auf dem Pol gewöhnlich in unmittelbarer Nähe des Joches angebracht. Von ihnen durch Isolationszwischenlagen getrennt folgen dann in Richtung der Polachse die Nebenschlußspulen.

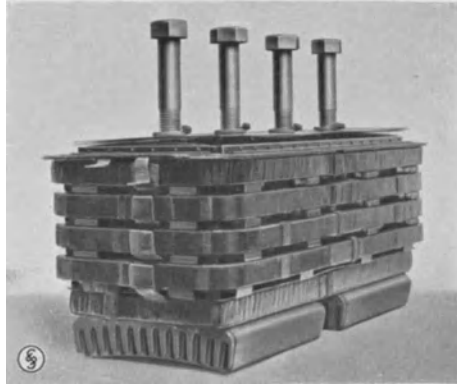


Abb. 80. Pol mit Scheibenwicklung (Werkbild Siemens).

Der Umlaufsinn der Windungen muß bei den aufeinanderfolgenden Polen stets abwechseln. Alle Spulen werden aber in gleicher Weise gewickelt; beim Zusammenschalten wird dann immer Anfang mit Anfang und Ende mit Ende (im Sinne des Wickelns) verbunden.

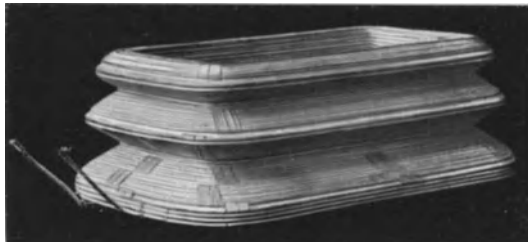


Abb. 81. Rillenspule (Werkbild Siemens).

Um die Verbindung der Spulen miteinander zu ermöglichen, macht man bei kleineren und mittleren

Maschinen die Spulenden von vornherein so lang, daß sie nach dem Einbau der Spulen unmittelbar miteinander verlötet werden können (meistens unter Anwendung von Löthülsen). Bei kleinen Drahtquerschnitten darf der Draht selbst nicht aus der Spule herausgeführt werden, weil seine mechanische Festigkeit zu gering ist. Es werden vielmehr an die Drahtenden Litzenstücke angelötet, die teilweise mit eingebandelt werden, damit der eigentliche Spulendraht von Zug entlastet wird.

Bei ortsveränderlichen Maschinen (z. B. Bahnmotoren), die Erschütterungen ausgesetzt sind, müssen die Spulenverbindungen sehr sorgfältig hergestellt werden, damit sie nicht brechen. Die Wicklungs-

enden werden dann am besten zu Klemmhülsen geführt, die so ausgebildet sind, daß sie beim Umbandeln der Spule mit dieser fest verbunden werden (Abb. 82). Die Verbindungsleitungen selbst müssen hierbei aus Litze bestehen, da bei starren Leitungen infolge der Erschütterungen Brüche an den Verbindungsstellen auftreten.

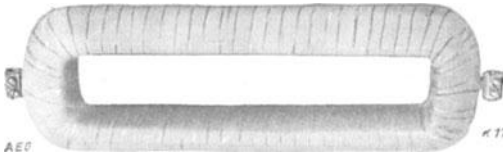


Abb. 82. Polspule mit Klemmhülsen (Werkbild AEG).

Bei großen Maschinen werden die Spulen durch Bügel aus Runddraht, bei großen Querschnitten auch aus Flachkupfer hergestellt und beiderseits mit den Spulenenden verlötet. Die Schaltverbindungen der Hauptschlußspulen werden wie die der Wendepolspulen hergestellt (vgl. Abschnitt III A).

Im allgemeinen werden die Wicklungen aller Pole in Reihe geschaltet, doch kommen auch parallel geschaltete Zweige vor. Man kann z. B. die Spulen aller Nordpole und die aller Südpole für sich in Reihe schalten und diese beiden Gruppen parallel legen. Bei den Scheibenspulen großer Maschinen können auch Teilspulen eines Poles parallel geschaltet werden.

B. Feldwicklungen für Schenkelpol-Synchronmaschinen.

Da die Wicklungen auf dem umlaufenden Polrad sitzen, muß bei der Herstellung auf die Fliehkräfte Rücksicht genommen werden. Die

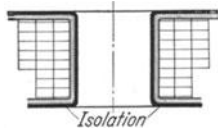


Abb. 83. Polradspule mit abgesetzter Wicklungshöhe im Spulenkasten.

Spulen werden daher in den meisten Fällen in kräftige Spulenkörper eingebaut, die aus 2...3 mm starkem Eisenblech hergestellt und mit Isolierstoff (z. B. Preßspan oder Mikafolium) beklebt sind.

Die Form der Pole ist entweder rechteckig (Langpole) oder rund (Rundpole). Als Draht kommt nur bei ganz kleinen Maschinen Runddraht in Frage, bei größeren Profildraht etwa mit dem Seitenverhältnis 1:2, der hochkant gewickelt wird, weil bei dieser Wicklungsart die Windungen der Einwirkung der Fliehkraft besser standhalten und sich nicht gegeneinander verlagern.

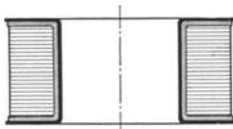


Abb. 84. Polspule mit Kupferbandwicklung.

Die Drahtisolation besteht meistens aus doppelter Baumwollbespinnung oder Asbestbespinnung. Die Raumverhältnisse zwingen bei Maschinen geringer Polzahl oft dazu, die Wicklungshöhe an der Polwurzel geringer zu machen als am Polschuh (Abb. 83).

Wenn es die Windungszahl je Pol und der Querschnitt der Leiter zuläßt — und dies ist bei großen Maschinen immer der Fall —, so werden die Spulen stets aus blankem Kupferband hochkant gewickelt, und zwar

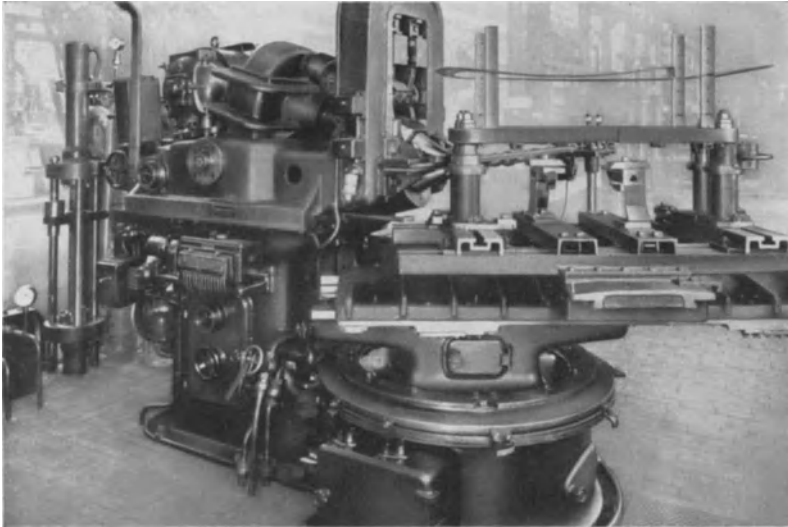


Abb. 85. Maschine zum Wickeln von Flachbandspulen (Werkbild Siemens).

so, daß jede Windung die ganze Wicklungshöhe (senkrecht zur Polachse) einnimmt (Abb. 84). Das Wickeln des blanken Kupfers geschieht mit besonderen Maschinen (Abb. 85). Als Windungsisolation dienen Zwischenlagen von etwa 0,15 ... 0,2 mm Stärke aus Isolierstoff. Während man früher häufig Preßspan oder ähnliche Stoffe benutzte, nimmt man heute meistens Asbestbänder oder



Abb. 86. Zu verschweißende Teile eines Spulenkastens (die Schweißstellen sind durch Pfeile angedeutet).

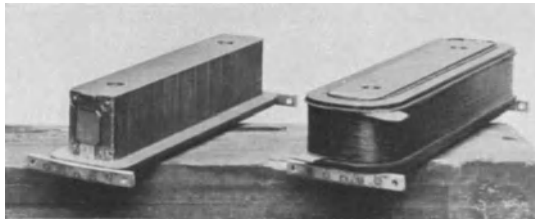


Abb. 87. Langpol ohne und mit Spule (Werkbild Siemens).

Glimmerstoffe, weil man dann wegen der höheren zulässigen Erwärmung die Wicklung höher belasten kann. Die mit Zwischenlagen versehenen Spulen werden gewöhnlich in ein Bindemittel (Schellack oder Kunstharz) getaucht, zusammengepreßt und unter Druck getrocknet (gebacken). Das Zusammenpressen und Trocknen kann in dem Spulenkasten erfolgen, in dem die Spule in der fertigen Maschine liegt. Der Spulenkasten besteht dann zunächst aus zwei Teilen (Abb. 86), die nach dem Einlegen der Spule unter Druck verschweißt werden. Einen Langpol mit derartig hergestellten Spulen zeigt Abb. 87,

einen Rundpol Abb. 88. Bei den Rundpolen läßt sich meistens der Spulenkasten sparen: die Spule wird dann unter Zwischenlage von Isolierstoff unmittelbar auf den Pol geschoben.

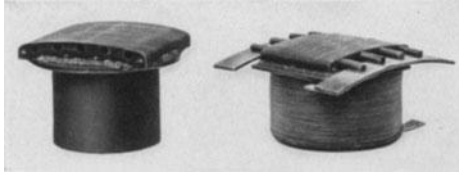


Abb. 88. Rundpol ohne und mit Spule (Werkbild Siemens).

Hinsichtlich der Wärmeabgabe sind die aus blankem Kupferband gewickelten Spulen sehr günstig, da jede Windung an ihrer äußeren Schmalseite unmittelbar mit der Kühlluft in Verbindung steht. Die Kühlungsverhältnisse können aber noch wesentlich verbessert werden durch künstliche Vergrößerung der mit der Luft in Berührung stehenden Oberfläche. Eine solche

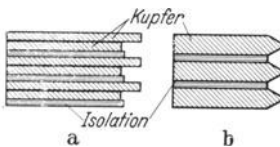


Abb. 89a u. b. Flachbandwicklungen mit vergrößerter Oberfläche.

Oberflächenvergrößerung kann man z. B. erzielen dadurch, daß man ein schmaleres und ein breiteres Kupferband in Parallelschaltung aneinander legt (Abb. 89a) oder dadurch, daß man die mit der Luft in Berührung stehende Schmalseite dachförmig ausbildet (Abb. 89b).

C. Feldwicklungen für Turbomaschinen.

Die Feldwicklungen für Turbogeneratoren sind fast stets verteilte Wicklungen, die in Nuten des Läufers liegen. Die Spulen, die mit verschiedener Weite ausgeführt sind, werden ebenso wie die großen Schenkelpolspulen aus blankem Kupferband gewickelt (Abb. 85). Da aber im fertigen Zustand die Stirnverbindungen der Rundung des Läufers entsprechend gebogen sind (vgl. Abb. 216), muß beim Wickeln jede Windung eine andere Breite erhalten. Es müssen also die Säulen der Wickelmaschine (Abb. 85), um die das Kupferband gewickelt wird, nach jeder Windung versetzt werden. Die blanke Spule wird dann in die gebogene Form gepreßt, die Windungen werden gegenseitig durch zwischengelegte Streifen isoliert wie bei den Kupferbandspulen der Schenkelpolmaschinen. Die Stärke der Isolation ist jedoch bei den Turbomaschinen gewöhnlich etwas größer; sie beträgt 0,25 ... 0,35 mm. Als Isolierstoff dient ein Glimmerpapier, Glimmerfaserstoffzeugnis oder Asbest. Die Spulen werden in einem Bindemittel getränkt und unter hohem Druck gebacken.

Wenn der Läufer eingefräste Nuten hat, werden die Spulen mit besonderen Preßeinrichtungen in die Nuten gepreßt. Bei Läufern mit eingesetzten Zähnen erübrigt sich das Einpressen. Nach dem Einlegen der Spulen werden die Nuten durch Messingkeile verschlossen. An

den Stirnseiten des Läufers werden die Spulenden durch Hartlötten miteinander verbunden; die einzelnen Spulen werden dabei stets in Reihe geschaltet.

Bei Läufern mit eingesetzten Zähnen liegen die Spulenseiten innerhalb der Nut frei, so daß Kühlluft zwischen Nutenwand und Spulenseite hindurchgepreßt werden kann. Nur oben und unten sind die Spulen durch flache U-förmige Kästen gefaßt (vgl. Abb. 15 b) und werden an diesen Stellen in ihrer Lage gehalten. Bei Läufern mit eingefrästen Nuten werden die Spulenseiten gewöhnlich vollständig mit U-förmigen Kästen umgeben, die sich unmittelbar und fest an die Nutenwände anlegen. Die Stirnverbindungen werden bei beiden Ausführungsarten mit Band umwickelt.

III. Hilfswicklungen.

A. Wendepolwicklungen.

Wendepole kommen bei Stromwendermaschinen vor; sie haben im wesentlichen den Zweck, der magnetisierenden Wirkung des Ankerstromes in der neutralen Zone entgegenzuwirken. Der eigentliche Pol aus Eisen hat in Richtung der Maschinenachse ungefähr die Länge der Hauptpole, in Richtung des Umfanges ist er viel schmaler; auf dem Pol befindet sich eine vom Ankerstrom durchflossene Wicklung, die aus verhältnismäßig wenig Windungen besteht.

Der dem Ankerstrom angepaßte große Querschnitt der Windungen hat zur Folge, daß nur bei kleinen Maschinen die Wendepolspulen aus isoliertem Rund- oder Profildraht in der Weise gewickelt werden können wie die Nebenschlußfeldwicklungen. Im übrigen gibt es im wesentlichen zwei Ausführungsarten. Bei der einen (Abb. 90) wird die Spule aus blanken dünnen Kupferbändern hergestellt. Diese werden (meistens mehrere in Parallelschaltung) flach aufgewickelt.

Als Windungsisolation werden Streifen aus Isolierstoff mit eingewickelt. Jeder Pol trägt zwei nebeneinander liegende Teilspulen, die in entgegengesetzter Richtung gewickelt sind und deren innen liegende Wicklungsanfänge miteinander durch eine Querverbindung verbunden sind. Die außen liegenden Enden sind zu Winkelstücken geführt, die zum Anschließen der Schaltverbindungen dienen. Die Wicklung wird durch Drahtbandagen, die auf eine Isolationsunterlage gewickelt sind, gehalten.

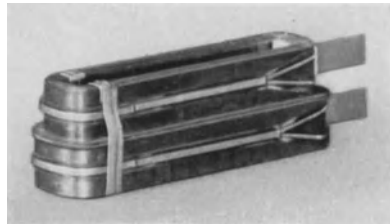


Abb. 90. Wendepolspule aus flachgewickelttem Kupferband (Werkbild Siemens).

Bei größeren Leiterquerschnitten wird die Wicklung aus blankem Profilkupfer hergestellt, das hochkant gewickelt wird (Abb. 91). Eine eigentliche Windungsisolierung ist meistens nicht erforderlich, nur die erste und letzte Windung werden umbandelt, wenn sie an metallischen, zum Halten der Spule dienenden Konstruktionsteilen liegen. Im übrigen werden die Windungen nur an einzelnen Stellen des Umfanges gegeneinander abgestützt.

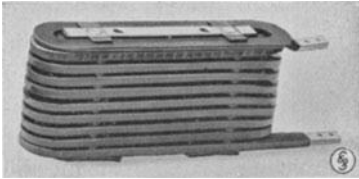


Abb. 91. Wendepolspule mit Schraubwicklung (Werkbild Siemens).

Die Schaltverbindungen der Wendepole werden nur bei kleinen Maschinen aus Rundkupfer, im übrigen stets aus Kupferbändern oder Profilkupfer hergestellt; da sie bei großen Maschinen ein bedeutendes Gewicht haben, müssen sie durch besondere Halteinrichtungen befestigt werden (Abb. 92).

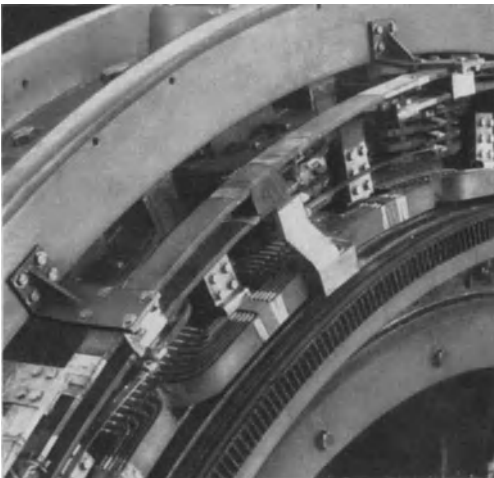


Abb. 92. Schaltleitungen von Wendepolspulen mit Halteinrichtungen (Werkbild AEG).

B. Kompensationswicklungen.

Kompensationswicklungen dienen bei Stromwendermaschinen gemeinsam mit den Wendepolen dazu, der magnetisierenden Wirkung des Ankerstromes auf dem ganzen Umfang entgegenzuwirken. Bei Gleichstrommaschinen kommen sie nur für große Leistungen und beim Vorliegen besonders schwieriger Betriebsverhältnisse vor, bei Wechselstrom-Stromwendermaschinen da-

gegen allgemein.

Die wirksamen Spulenseiten der Kompensationswicklung liegen in geschlossenen oder mit schmalen Schlitz versehenen Nuten der Polschuhe der Hauptpole. Sie werden vom Ankerstrom durchflossen, und zwar ist die Stromrichtung an allen Stellen des Umfanges entgegengesetzt derjenigen des Stromes in den Ankerleitern. Die Stromrichtung wechselt von Pol zu Pol.

Jede Nut kann entweder einen oder mehrere Leiter enthalten

(Abb. 93). Sind mehrere Leiter mit nicht zu starkem Querschnitt vorhanden, so können sie mit doppelter Baumwollumspinnung isoliert sein; als Nutisolation dient dann eine Hülse aus Preßspan oder Hartpapier von etwa 1,5 mm Stärke. Einzelleiter werden gewöhnlich mit einer etwa 1 mm starken Umpressung versehen. Die Nutenleiter werden in ähnlicher Weise

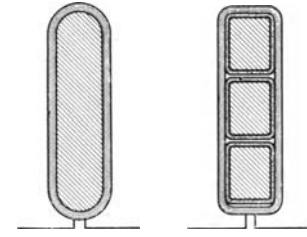


Abb. 93. Schnitt durch Nuten von Kompensationswicklungen.

miteinander verbunden, wie es bei Wechselstrom - Stabwicklungen mit Spulen verschiedener Weite der Fall ist (Abb. 95). Die Stirnverbindungen bestehen aus blankem Flachkupfer, das

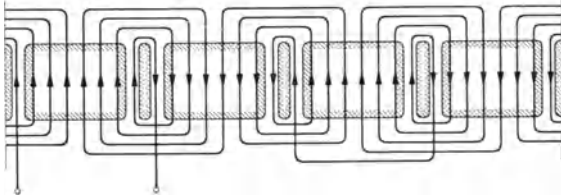


Abb. 94. Schaltplan für eine Wendepol- und Kompensationswicklung.

mit den Stabenden verschraubt und verlötet wird.

Da sowohl die Wendepolwicklung als auch die Kompensationswicklung vom Ankerstrom durchflossen wird, werden bei Maschinen mit Kompensationswicklung die Wendepolspulen zweckmäßig in den Stromkreis der Kompensationswicklung mit einbezogen, so daß beide

Wicklungsarten einen Stromkreis bilden. Ein Beispiel einer solchen Schaltung für eine vierpolige Maschine ist in Abb. 94 dargestellt. Die Spulen sind alle in Reihe geschaltet. Die Reihenschaltung ist nicht unbedingt erforderlich; es können auch parallele Zweige gebildet werden, doch ist darauf zu achten, daß alle Zweige den gleichen Widerstand haben.

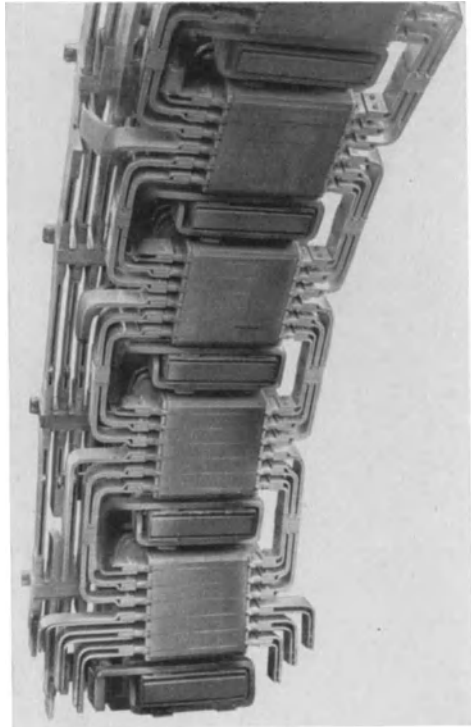


Abb. 95. Teilansicht des Ständers einer großen Gleichstrommaschine mit Wendepol- und Kompensationswicklung (Werkbild AEG).

Einen Teil des Ständers einer großen Gleichstrommaschine mit Wendepol- und Kompensationswicklung zeigt Abb. 95.

C. Käfigwicklungen als Dämpfer- und Anlaufwicklungen.

Käfigwicklungen werden als Dämpferwicklungen in Synchronmaschinen und Einankerumformer eingebaut, um Pendelschwingungen zu unterdrücken, bei synchronen Generatoren auch, um schädliche Folgen ungleicher Belastung der einzelnen Wicklungsstränge abzuwenden. Sie liegen in den Polschuhen der Pole, welche die Erregerwicklung tragen, bei der üblichen Ausführung der Synchronmaschine also im Läufer, beim Einankerumformer im Ständer.

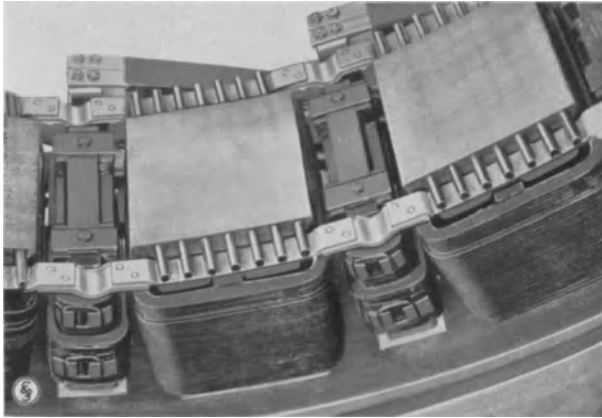


Abb. 96. Teilansicht des Ständers eines Einankerumformers mit Käfigwicklung (Werkbild Siemens).

Unmittelbar unter der Polschuhoberfläche liegen geschlossene oder geschlitzte, zuweilen geschrägte Nuten, in denen Rund- oder Profilstäbe aus Kupfer liegen. Sie sind entweder nicht isoliert oder nur mit einer dünnen Isolierhülle (etwa aus Preßspan) umgeben. Die Stabenden sind beiderseits durch Kurzschlußringe miteinander verbunden. Die Ringe bestehen nicht aus einem Stück, sondern jeder Pol trägt sein besonderes Ringsegment. Die einzelnen Ringsegmente sind durch Verbindungsstücke miteinander verbunden, die so gestaltet sind, daß sie gegenüber Wärmedehnungen des Ringes nachgiebig sind.

Abb. 96 zeigt die Dämpferwicklung eines Einankerumformers. Die Stäbe aus Rundkupfer liegen in geschrägten Nuten. Als Ringsegmente dienen Flachkupferstreifen, die mit den Stäben durch Hartlötten verbunden sind. Die Verbindungsblasen, die die Segmente zu Ringen zusammenschließen, bestehen aus dünnen Kupferblechen.

Die Dämpferwicklung einer Schenkelpol-Synchronmaschine ist in Abb. 97 dargestellt. Da die Ringsegmente hier den Fliehkräften unterworfen sind, sind sie gelocht, auf die Stäbe geschoben und dann hart verlötet. Zur Sicherung der Verbindungslaschen gegen die Fliehkräfte sind besondere Halteeinrichtungen vorgesehen.

Bei Trommelläufern von Synchronmaschinen werden die Käfige aus Kupferbändern zusammengelötet. Die in Achsrichtung verlaufenden

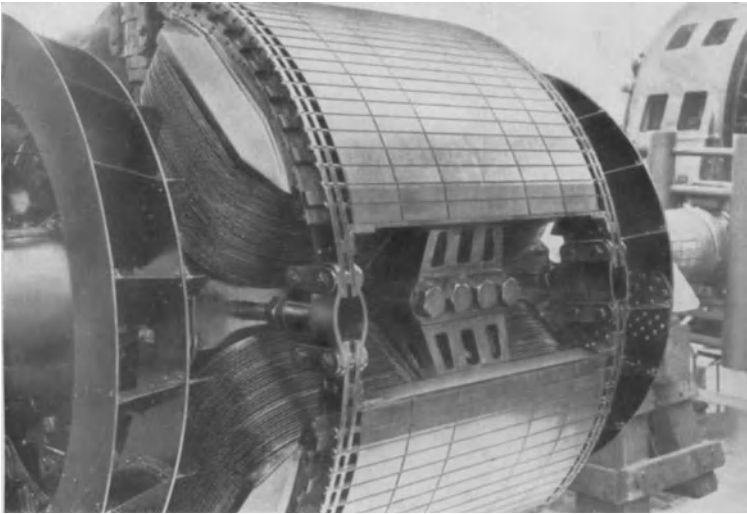


Abb. 97. Schenkelpolläufer mit Käfigwicklung (Werkbild AEG).

Bänder liegen in den gleichen Nuten wie die Erregerwicklung, und zwar zwischen deren Spulenseiten und den Verschlußkeilen der Nuten.

Bei Einankerumformern und Synchronmotoren werden Käfigwicklungen häufig zu dem Zweck vorgesehen, einen sog. asynchronen Anlauf dieser Maschinen zu ermöglichen. Sie wirken dabei genau wie die Käfigwicklungen von Asynchronmaschinen. Der Widerstand solcher Anlaufwicklungen muß meistens höher sein als der der eigentlichen Dämpferwicklungen, wenn ein günstiges Anlaufmoment erzielt werden soll. Sie werden dann häufig aus Messing hergestellt, weil dieser Stoff einen etwa viermal so hohen spezifischen Widerstand hat als Kupfer.

Zweiter Teil

IV. Einphasige Wechselstrom-Ständerwicklungen.

A. Allgemeines.

Einphasige Wechselstrom-Ständerwicklungen kommen hauptsächlich vor als Draht- oder Stabwicklungen in einphasigen Synchrongeneratoren und als Drahtwicklungen in Einphasen-Asynchronmotoren, die nur für kleine Leistungen gebaut werden.

Die Wicklungen sind als verteilte Wicklungen ausgebildet, die ähnlich wie die Gleichstrom-Ankerwicklungen in den Nuten eines Blechpaketes liegen. Jede Spule besteht auch hier aus zwei Spulenseiten und den sie verbindenden Stirnverbindungen oder Spulenköpfen.

Unabhängig von der wirklichen Stromrichtung, die ja bei Wechselstrom periodisch wechselt, wird zur besseren Übersicht in jeder Spulenseite eine Zählrichtung für den Strom festgelegt. Bei einer Darstellung der Spulenseiten im Schnitt ist eine positive Zählrichtung (Stromeintritt in die Papierebene) mit \otimes , eine negative Zählrichtung (Stromaustritt aus der Papierebene) mit \odot bezeichnet. Werden hingegen die Spulenseite in der Papierebene liegend dargestellt, so sind die positiven Spulenseiten durch eine nach oben gerichtete, die negativen durch eine nach unten gerichtete Pfeilspitze gekennzeichnet.

Für die Wirkung der Wicklung ist im wesentlichen nur die Lage der Spulenseiten und ihre Zählrichtung von Bedeutung. Die Stirnverbindungen spielen hinsichtlich ihrer Lage und Ausführung nur eine untergeordnete Rolle; sie dienen nur dazu, den Strom aus einer positiven in eine negative Spulenseite überzuleiten und umgekehrt.

B. Einschichtwicklungen.

Wir betrachten zunächst die Einschichtwicklungen, bei denen in jeder Nut nur eine Spulenseite liegt. Am gebräuchlichsten ist hier eine Ausführung, bei der nur etwa $\frac{2}{3}$ des Ankerumfangs mit Spulenseiten belegt ist. Aus Herstellungsgründen ist jedoch stets der ganze Umfang mit Nuten versehen, von denen also etwa $\frac{1}{3}$ unbewickelt ist.

Für die Verteilung der Spulenseiten auf dem Umfang ist noch die Zahl p der Polpaare maßgebend. Die Zahl der positiven und negativen Spulenseitengruppen ist gleich der Polzahl $2p$. Jede dieser Gruppen nimmt eine Zone ein, die etwa $\frac{2}{3}$ der Polteilung beträgt, zwischen je zwei Zonen, die Spulenseiten entgegengesetzten Vorzeichens enthalten,

liegt eine unbewickelte Zone von etwa $\frac{1}{3}$ der Polteilung. Die Zahl der bewickelten Nuten, die bei der einphasigen Wicklung auf einen Pol entfällt, bezeichnen wir mit q . Die Verteilung der Spulenseiten ist in Abb. 98a für eine zweipolige Wicklung ($q = 6$ angenommen) und in Abb. 98b für eine vierpolige Wicklung ($q = 4$ angenommen) dargestellt. In entsprechender Weise läßt sie sich für beliebige Polzahlen und für beliebige Werte von q angeben.

Oft ist es ausreichend und für manche Zwecke sogar übersichtlicher, wenn man nicht die einzelnen Spulenseiten, sondern nur die Zonen darstellt. Für die Anordnung nach Abb. 98a ist dies in Abb. 99a, für die Anordnung nach Abb. 98b in Abb. 99b geschehen. Die Zonen sind abgewickelt dargestellt; die Zonen mit positiven Spulenseiten sind durch ein $+$ -Zeichen und senkrechte Schraffur, die Zonen mit negativen Spulenseiten durch ein $-$ -Zeichen und waagerechte Schraffur gekennzeichnet, die unbewickelte Zone ist nicht schraffiert. An Stelle der abgewickelten Zonen-darstellung kann auch eine solche in Ringform treten, wenn es zweckmäßig erscheint (vgl. Abb. 158).

Die Stirnverbindungen müssen nun jeweils eine positive und eine negative Spulenseite verbinden. Sie dürfen nicht über die Öffnungen der Bohrung hinweg verlaufen, da diese für den Ein- und Ausbau des Läufers frei gehalten werden müssen; sie werden vielmehr seitwärts abgebogen.

Das Abbiegen erfolgt zweckmäßig so, daß die Wicklungsköpfe möglichst gleichmäßig am Umfang verteilt sind. Man biegt also z. B. bei der Wicklung nach Abb. 98a die eine Hälfte der Stirnverbindungen nach oben, die andere nach unten ab. Wenn die Zahl q der bewickelten Nuten je Pol ungerade ist, teilt man entweder die Windungen des mittleren Spulenkopfes auf die beiden Hälften auf, oder man biegt nach der einen Seite einen Spulenkopf mehr ab als nach der andern.

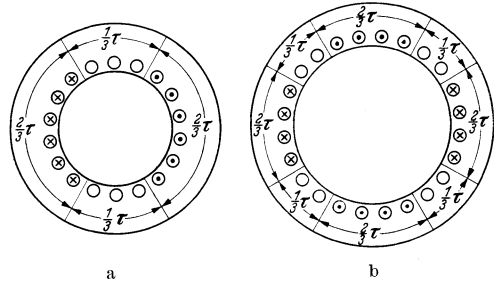


Abb. 98. Lage der Spulenseiten bei einschichtigen Einphasenwicklungen.

a) $p = 1$, $q = 6$; b) $p = 2$, $q = 4$.

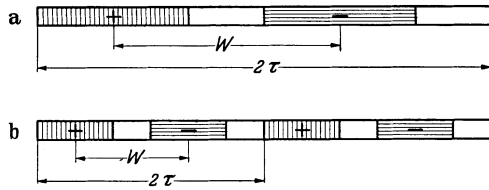


Abb. 99. Zonenpläne der Wicklungen nach Abb. 98.

a) $p = 1$; b) $p = 2$.

Die Verbindung der positiven und negativen Spulenseiten kann auf zwei grundsätzlich verschiedene Arten erfolgen. Für die Spulenseiten nach Abb. 98a sind diese beiden Möglichkeiten in Abb. 100a u. b dargestellt. In Abb. 100a haben die einzelnen Spulen verschiedene Weite, d. h. der Abstand zwischen positiver und negativer Spulenseite

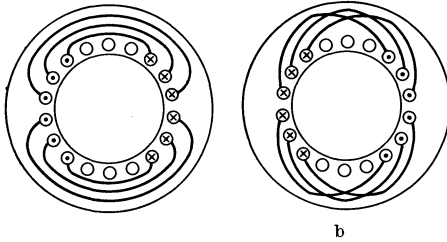


Abb. 100. Verlauf der Stirnverbindungen bei einer zweipoligen Einphasenwicklung ($p = 1$, $q = 6$),
a) Spulen verschiedener Weite.
b) Spulen gleicher Weite.

ist bei den einzelnen Spulen verschieden; Abb. 100b stellt dagegen eine Wicklung mit Spulen gleicher Weite dar.

Die Gesamtheit der Spulen, deren Wicklungsköpfe nebeneinander verlaufen, bezeichnet man als Spulengruppe. Sowohl bei der Wicklung nach Abb. 100a als auch bei derjenigen nach Abb. 100b sind zwei Spulengruppen mit

je drei Spulen vorhanden. Die Zahl der Spulengruppen ist hier gleich der Zahl der Pole, also gleich $2p$.

Die Verbindung der positiven und negativen Spulenseiten kann aber auch so erfolgen, daß nur p Spulengruppen entstehen. Für die vierpolige Wicklung

ist in Abb. 101a eine Anordnung mit $2p$, in Abb. 101b mit p Spulengruppen dargestellt. Für

Einphasenwicklungen hat die Wicklung mit p Spulengruppen keine große praktische Bedeutung, wohl dagegen bei den später zu behandelnden dreiphasigen Wicklungen.

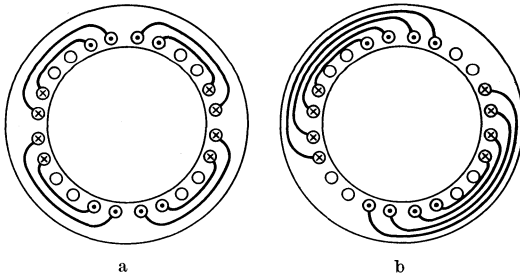


Abb. 101. Stirnverbindungen einer vierpoligen Einphasenwicklung mit Spulen verschiedener Weite ($p = 2$, $q = 4$),
a) mit $2p$ Spulengruppen; b) mit p Spulengruppen.

Die Zahl der Spulen hängt von der Zahl N der Nuten ab. Wenn $\frac{2}{3}N$ Nuten bewickelt sind, so sind bei der Einsichtwicklung $\frac{1}{3}N$ Spulen vorhanden. Die Zahl q der bewickelten Nuten je Pol ist also

$$q = \frac{1}{3} \frac{N}{p}. \quad (25)$$

Den Teil des Ankerumfangs, der von gleichsinnigen nebeneinander liegenden Spulenseiten eingenommen wird, bezeichnet man als Zonenbreite oder Spulenbreite. Man kann sie in Bruchteilen der Polteilung oder auch als Zahl der eingenommenen Nutteilungen angeben. So ist

z. B. in Abb. 98a u. b die Zonenbreite $\frac{2}{3}\tau$; in Nutteilungen ausgedrückt ist sie 6 Nutteilungen in Abb. 98a und 4 Nutteilungen in Abb. 98b.

Beim Aufzeichnen der Schaltpläne wird auch hier der Ankerumfang abgewickelt dargestellt. Bei der Drahtwicklung werden die Spulen, die durchweg eine größere Anzahl von Windungen besitzen, durch starke Linien angedeutet, die Verbindung der einzelnen Spulen durch dünne Linien. Bei den hier aufzuzeichnenden Schaltplänen sind die Spulen

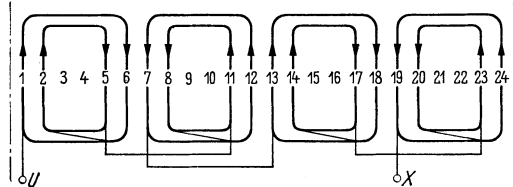


Abb. 102. Schaltplan einer Einphasenwicklung mit Spulen verschiedener Weite und $2p$ Spulengruppen ($p = 2, q = 4$).

stets hintereinander geschaltet. Dies ist nicht immer erforderlich, sondern es können gleichwertige Wicklungszweige parallel geschaltet werden. Die Bedingungen, die bei der Parallelschaltung erfüllt sein müssen, werden später bei Betrachtung der dreiphasigen Wicklungen besprochen werden. Der Schaltplan der vierpoligen Wicklung nach Abb. 101a ist in Abb. 102 dargestellt. Anfang und Ende der Wicklung sind mit den Bezeichnungen U und X versehen. Die Wicklungsköpfe können verschiedene Form haben: sie liegen entweder (abgewickelt ge-

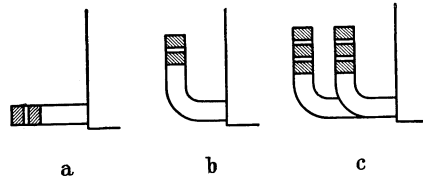


Abb. 103. Formen der Spulenköpfe von Einphasenwicklungen mit Spulen verschiedener Weite.

a) und b) mit $q = 4$, c) mit $q = 12$.

gedacht) in der gleichen Ebene wie die Nutleiter (Abb. 103a) oder sind unter einem Winkel von 90° (Abb. 103b) oder einem kleineren Winkel abgelenkt. Im allgemeinen lassen sich die Stirnverbindungen der Spulen in einer Ebene unterbringen (Abb. 103a u. b); nur wenn die Zahl q der Nuten je Pol sehr groß ist, machen es die Raumverhältnisse notwendig, sie in zwei Ebenen anzuordnen (Abb. 103c).

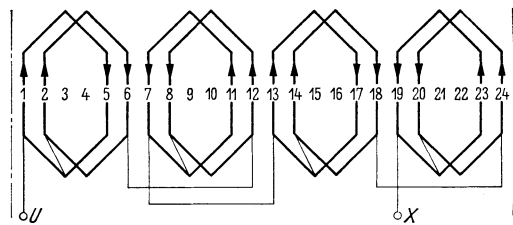


Abb. 104. Schaltplan der Wicklung nach Abb. 102, jedoch mit Spulen gleicher Weite.

Die Wicklung nach Abb. 102 läßt sich natürlich auch mit Spulen gleicher Weise ausführen; der entsprechende Schaltplan ist in Abb. 104 dargestellt. Die Spulenköpfe müssen dann so geformt sein,

daß die Stirnverbindungen der einzelnen Spulen aneinander vorbeigeführt werden können. In Abb. 105 sind die gebräuchlichsten Formen der Spulenköpfe dargestellt.

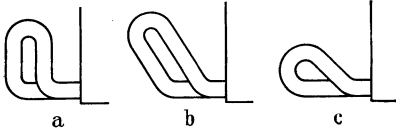


Abb. 105. Formen der Spulenköpfe bei Spulen gleicher Weite.

Auch als Stabwicklungen kommen einphasige Einschichtwicklungen vor. Da bei ihnen nur ein Leiter (Stab) je Spulenseite vorhanden ist, so können im Schaltplan keine in sich geschlossene Spulen erscheinen,

sondern die Spulenseiten folgen in ähnlicher Weise aufeinander wie bei den Schaltplänen der Stromwenderwicklungen. Wie bei diesen

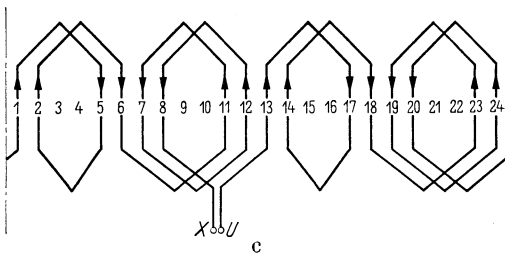
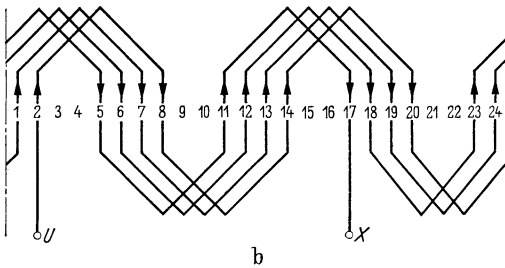
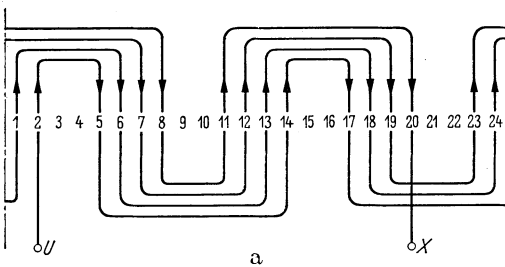


Abb. 106. Einphasige Einschicht-Stabwicklungen ($p = 2$, $q = 4$).

a) und b) Wellenwicklungen, c) Schleifenwicklung.

unterscheidet man auch hier Schleifenwicklungen (Abb. 106c) und Wellenwicklungen (Abb. 106a u. b). Neben den in Abb. 106 dargestellten Schaltungen sind noch andere möglich; die Schaltungen a und b lassen sich z. B. leicht so abändern, daß die Stirnverbindungen der Nutenleiter eines Poles nicht nach einer Seite (vgl. Abb. 101 b) sondern nach zwei Seiten (vgl. Abb. 101 a) abgelenkt werden. Bei Stabwicklungen werden die Nutenleiter als gerade Stäbe hergestellt und auf den Stirnseiten der Maschine durch Verbindungsleitungen miteinander verbunden in der Weise, daß positive und negative Spulenseiten abwechselnd aufeinander folgen. Die Verbindung der Stäbe erfolgt durch Bügelverbindungen (vgl. S. 134).

Abb. 107 zeigt eine einphasige Ständer-Stabwicklung mit Spulen verschiedener Weite und Stirnverbindungen, die nach zwei Seiten abgelenkt sind.

Bei Spulen gleicher Weite (Abb. 106 b u. c) geht die Stirnverbindung zweier Stäbe in ihrer Mitte von einer Wickelkopfebene (Etage) in die andere über (vgl. Abb. 105) wie bei den Stirnwicklungen der Stromwenderanker. Ihrer Form wegen bezeichnet man sie dann als Gabelverbindungen. Sie sind meistens in Evolventenform gebogen und heißen dann auch Evolventenverbindungen (vgl. Abb. 147).

Wenn bei den Stabwicklungen die Leiterabmessungen bestimmte Werte überschreiten, müssen Maßnahmen getroffen werden, um zusätz-

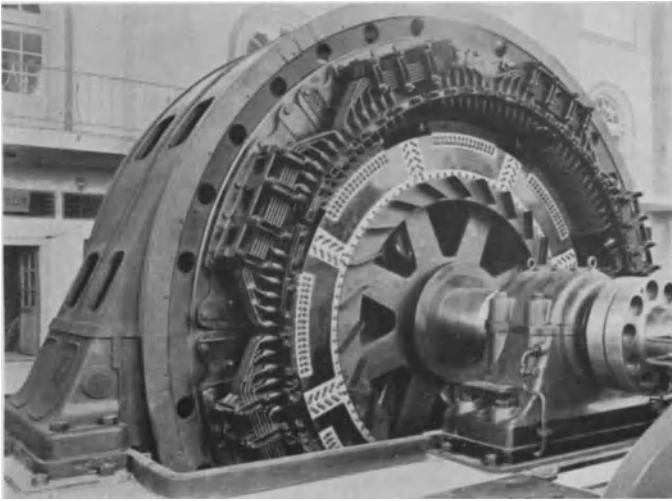


Abb. 107. Einphasige Ständer-Stabwicklung (Werkbild BBC).

liche Stromwärmeverluste zu unterdrücken. Diese Maßnahmen werden später bei den dreiphasigen Wicklungen besprochen.

Bei der Mannigfaltigkeit der Stirnverbindungen bei den Wechselstromwicklungen läßt sich an der Spulenweite der einzelnen Spulen nicht leicht erkennen, ob eine Wicklung Durchmesser- oder Sehnenwicklung ist. Diese Feststellung erfolgt besser an Hand eines Zonenplanes (Abb. 99 a u. b). Wenn der Abstand von der Mitte einer positiven Zone bis zur Mitte der nächsten negativen Zone genau eine Polteilung beträgt (wie es in Abb. 99 a u. b der Fall ist), so haben wir eine Durchmesserwicklung vor uns, sonst eine Sehnenwicklung. Der Mittenabstand der Zonen ist also hier an die Stelle der Spulenweite getreten; er ist demgemäß in Abb. 99 a u. b mit W bezeichnet. Nach dieser Festlegung sind alle bisher betrachteten Wechselstromwicklungen Durchmesserwicklungen.

C. Zweischichtwicklungen.

Neben der Einschichtwicklung gewinnt neuerdings sowohl bei einphasigen als auch bei mehrphasigen Wechselstromwicklungen die Zweischichtwicklung zunehmende Bedeutung, bei der in jeder Nut zwei Spulenseiten übereinander liegen. Eine einphasige Zweischichtwicklung läßt sich aus der entsprechenden Einschichtwicklung leicht ableiten. Man ordnet

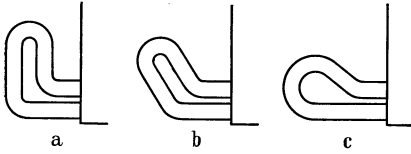


Abb. 108. Spulenköpfe bei Zweischichtwicklungen.

zunächst die Spulen der Oberschicht genau so an wie bei der Einschichtwicklung (z. B. nach Abb. 98); dabei darf eine Spulenseite nur die Hälfte des nutzbaren Nutenraumes einnehmen. Jeder ober-schichtigen positiven Spulenseite ordnen wir dann eine unterschicht-tige negative Spulenseite zu, die von jener etwa eine Polteilung entfernt ist, und vereinigen diese beiden Spulenseiten zu einer Spule. In gleicher Weise wird jeder ober-schichtigen negativen Spulenseite eine unterschicht-tige positive Spulenseite zugeordnet und mit ihr zu einer Spule vereinigt. Bei derselben Nuten-zahl hat also die Zweischicht-wicklung doppelt so viel Spulen wie die Einschichtwicklung.

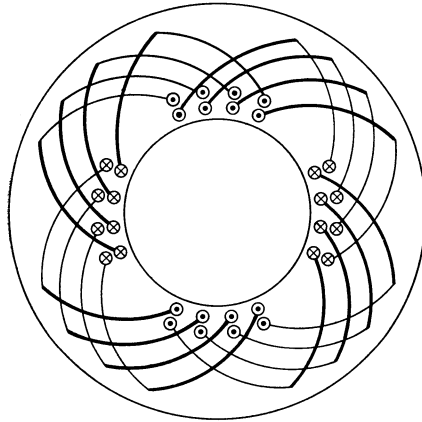


Abb. 109a. Lage der Spulenseiten und Verlauf der Stirnverbindungen bei einer einphasigen Zweischichtwicklung ($p = 2$, $q = 4$).

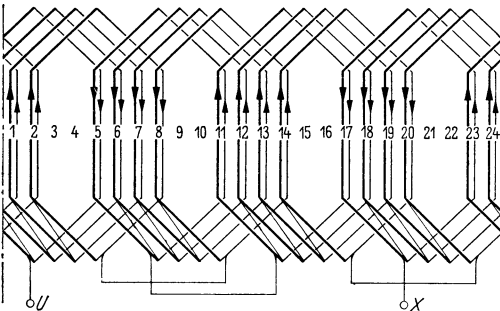


Abb. 109b. Schaltplan der Wicklung nach Abb. 109a.

Gebräuchliche Formen der Spulenköpfe der Zweischichtwicklung sind in Abb. 108 dargestellt. Bei Stabwicklungen sind die Nutenleiter entweder als gerade Stäbe ausgebildet, die wie bei der Einschichtwicklung durch Bügel oder Gabeln miteinander verbunden sind, oder es besteht jede Spule aus zwei Stabelementen, die wie bei Stromwenderwicklungen (vgl. Abb. 62) so gebogen sind, daß sie an ihren Enden durch Zwingen miteinander verbunden werden können.

Die Lage der Spulenseiten und den Verlauf der Stirnverbindungen bei einer vierpoligen Zweischichtwicklung als Durchmesserwicklung zeigt Abb. 109a; der zugehörige Schaltplan ist in Abb. 109b dargestellt. Im Schaltplan sind die in den gleichen Nuten übereinander liegenden Spulenseiten der Deutlichkeit halber nebeneinander gezeichnet; die Spulenseiten der Unterschicht sind durch geringere Strichstärke gekennzeichnet.

In der Zonendarstellung müssen Ober- und Unterschicht getrennt und übereinander liegend dargestellt werden (vgl. z. B. Abb. 138b). Als Spulenweite W zählt dann der Abstand von der Mitte einer positiven Zone der Oberschicht zur Mitte der benachbarten negativen Zone der Unterschicht oder umgekehrt. Bei der Ausführung der Stirnverbindungen nach Abb. 109a u. b stimmt die so festgelegte Größe W mit der wirklichen Weite der Spulen überein.

Man erkennt auch ohne Zonenplan die Wicklung nach Abb. 109a u. b als Durchmesserwicklung, da $W = \tau$ ist. Abb. 110 zeigt die gleiche Wicklung als Sehnenswicklung; der Schaltplan dieser Wicklung läßt sich aus Abb. 109 einfach herleiten, wenn man dort alle Spulenseiten der Unterschicht um je eine Nut nach links verschiebt. Das Maß der Sehnung wird entweder durch das Verhältnis der Spulenweite zur Polteilung (W/τ) zum Ausdruck gebracht oder durch Angabe der Spulenweite als Winkel, wobei die Polteilung einem (elektrischen) Winkel von 180° entspricht. Während bei der Durchmesserwicklung die bewickelten Nuten immer zwei Spulenseiten enthalten, gibt es bei der zweischichtigen Sehnenswicklung Nuten, die nur eine Spulenseite enthalten; damit diese in den Nuten fest liegen, muß der freibleibende Nutenraum mit Holz oder dergleichen ausgefüllt werden.

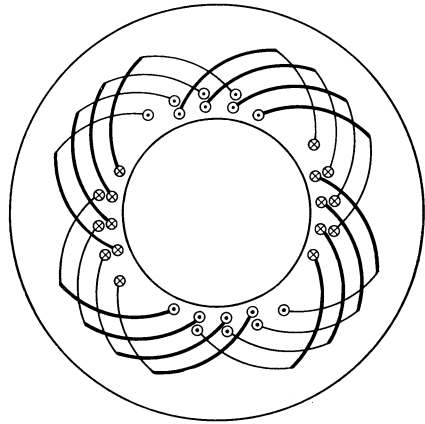


Abb. 110. Wicklung nach Abb. 109 als Sehnenswicklung.

Die Zweischichtwicklung hat einmal den Vorteil, daß alle Spulen genau gleich ausgeführt werden können; außerdem kann man durch passende Bemessung der Spulenweite (Sehnung) magnetische Oberfelder und durch sie verursachte Verluste unterdrücken. Weiterhin ist bei der Zweischichtwicklung die Form und Anordnung der Wicklungsköpfe für eine gute Belüftung viel günstiger als bei der Einschichtwicklung.

Eine ausgeführte einphasige Zweischichtwicklung ist in Abb. 111 dargestellt.

Als einphasige Wicklungen können auch, wie wir später sehen werden, zwei Wicklungsstränge einer dreiphasigen Wicklung verwendet werden.

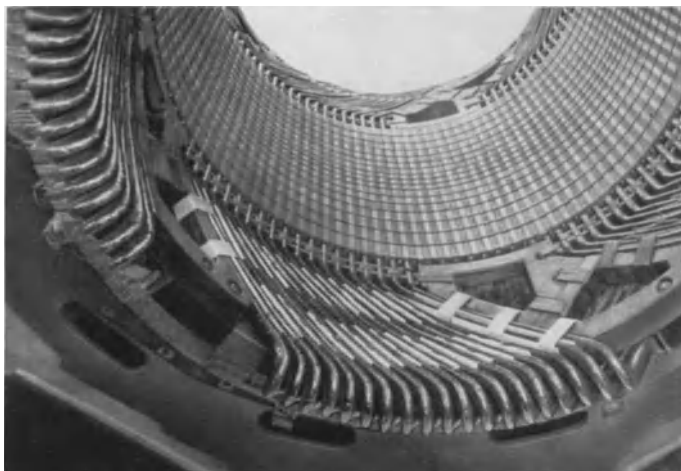


Abb. 111. Teilansicht einer einphasigen Zweischichtwicklung (Werkbild AEG).

Die praktische Ausführung der einphasigen Wicklung wird gemeinsam mit den übrigen Wechselstromwicklungen behandelt.

D. Bruchlochwicklungen.

Bei den bisher betrachteten Wicklungen war die Zahl q der bewickelten Nuten je Pol stets eine ganze Zahl. Dies braucht (bei $p > 1$) nicht immer der Fall zu sein, vielmehr kann q auch eine gebrochene Zahl

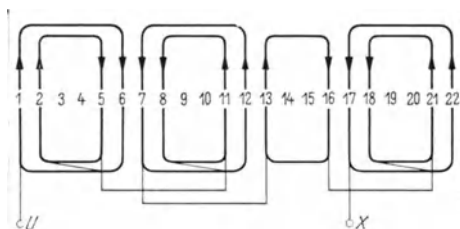


Abb. 112. Schaltplan einer einphasigen Bruchlochwicklung ($p = 2$, $q = 3\frac{1}{2}$).

sein; die Wicklung heißt dann Bruchlochwicklung. Wir betrachten hier nur einschichtige Bruchlochwicklungen; zweischichtige Bruchlochwicklungen sind aus den entsprechenden einschichtigen ebenso herzuleiten, wie es für die Ganzlochwicklungen gezeigt wurde

(S. 86); außerdem werden sie bei den mehrphasigen Wicklungen besonders behandelt. Der Schaltplan einer vierpoligen Bruchlochwicklung mit $q = 3\frac{1}{2}$ ist in Abb. 112 dargestellt. Es sind im ganzen sieben positive und sieben negative Spulenseiten vorhanden; davon entfallen

auf ein Polpaar je vier, auf das andere je drei. Das Verhältnis der Zahl der bewickelten Nuten zur gesamten Nutenzahl ist hier $14/22$, also nicht genau $2/3$. Auf besondere Symmetriebedingungen braucht bei der einphasigen Bruchlochwicklung nicht geachtet zu werden.

Bruchlochwicklungen werden fast nur bei Generatoren verwendet. Sie sind besonders dann von Vorteil, wenn die Zahl q der bewickelten Nuten je Pol klein ist; sie ergeben eine bessere Form der Spannungs-kurve (Unterdrückung von Oberwellen).

V. Zweiphasige Wechselstrom-Ständerwicklungen.

Eine zweiphasige Wicklung stellt eine Vereinigung von zwei einphasigen Wicklungen dar, von denen jede nunmehr die Bezeichnung Wicklungsstrang oder einfach Strang trägt. Wenn, wie es meistens der Fall ist, keine Nuten unbewickelt bleiben und wenn die beiden Stränge unter sich gleich sind, so steht für jeden Strang die Hälfte der Nuten zur Verfügung. Mit q bezeichnet man bei den zwei- und mehrphasigen Wicklungen die Zahl der Nuten je Pol und Strang. Bei der Zweiphasenwicklung ist

$$q = \frac{1}{2} \cdot \frac{N}{2p}. \quad (26)$$

Die Spulenseiten der beiden Wicklungsstränge sind um $1/2$ Polteilung gegeneinander versetzt, also um einen elektrischen Winkel von 90° (d. h. also um einen räumlichen Winkel von 90° bei zwei Polen, von 45° bei vier Polen usw.). Für eine vierpolige Wicklung zeigt Abb. 113 die Verteilung der Spulenseiten über den Ankerumfang. Die beiden Stränge sind dadurch unterschieden, daß die Nuten des einen Stranges mit einfachen Kreisen, die des andern mit Doppelkreisen angedeutet sind. Auch hier hat man bei der Bezeichnung positive und negative Spulenseiten nur an eine Zählrichtung zu denken.

Die Verbindung der positiven und negativen Spulenseiten erfolgt hier nach den gleichen Grundsätzen wie bei der einphasigen Wicklung. Man bevorzugt auch hier wieder eine Wicklung mit $2p$ Spulengruppen, bei der hier natürlich jeder der beiden Stränge diese Zahl von Spulengruppen besitzt. In Abb. 113 sind die Stirnverbindungen des einen Stranges ausgezogen, die des andern gestrichelt dargestellt. Da die Stirnverbindungen der beiden Stränge sich überschneiden, so müssen sie hier in zwei Ebenen oder Etagen angeordnet werden, die Wicklung ist also eine Zwei-Etagen-Wicklung. Die Wicklungsköpfe sind dabei nach Abb. 128a, b oder c geformt.

Auch die Darstellung der Wicklung im Schaltplan ist bei der zweiphasigen Wicklung grundsätzlich die gleiche wie bei der einphasigen. Die Anordnung der Wicklungsköpfe in zwei Etagen wird hier durch

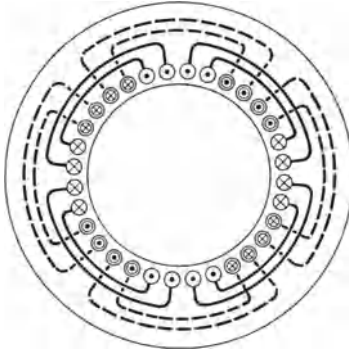


Abb. 113. Lage der Spulenseiten und Verlauf der Stirnverbindungen bei einer zweiphasigen Einschichtwicklung ($p = 2, q = 4$).

verschieden große Ausladung der Stirnverbindungen in Achsrichtung angedeutet. Abb. 114 zeigt den Schaltplan für die Wicklung nach Abb. 113. Die Spulen jedes Stranges sind in Reihe geschaltet. Die Bezeichnungen der Anfänge sind U und V , die der Enden X und Y .

Bei der Wicklung nach Abb. 113 u. 114 sind die Wicklungsköpfe der beiden Stränge der Form und Lage nach und häufig auch noch der mittleren Länge nach verschieden; infolgedessen weichen meistens die Streu-

Blindwiderstände und häufig auch die Gleichwiderstände (Ohmschen Widerstände) der beiden Stränge voneinander ab.

Eine größere Symmetrie haben Wicklungen mit gleichgeformten Spulengruppen. Wie der Name sagt, sind nur die Spulengruppen gleichgeformt, die Spulen einer Gruppe dagegen sind voneinander ver-

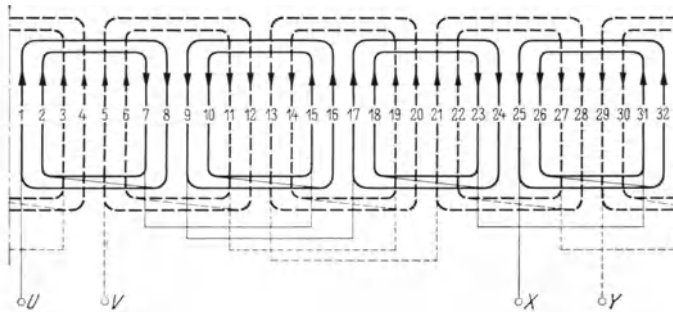


Abb. 114. Schaltplan der Wicklung nach Abb. 113.

schieden (Spulen verschiedener Weite). Die Form der Spulen ist aus dem Schaltplan Abb. 115a zu erkennen; abgesehen von der Spulenform stimmt die Wicklung nach Abb. 115a mit derjenigen nach Abb. 114 überein. Ausgeführte Wicklungen dieser Art lernen wir bei Betrachtung der dreiphasigen Wicklungen kennen. Eine andere Art von gleichgeformten Spulengruppen ist in Abb. 115b dargestellt. Die Stirnverbindungen einer Spulengruppe auf beiden Stirnseiten gehören hier verschiedenen Etagen an, während sie in Abb. 114 in derselben

Etage liegen. Eine Wicklung nach Abb. 115 b ist jedoch nur bei Anwendung von sog. Halbformspulen (vgl. Abschnitt VI H 5) herstellbar.

Die beiden Wicklungsstränge können unverkettet, also ohne gegenseitige Verbindung sein (vier Anschlußklemmen), sie können aber auch in der Weise verkettet sein, daß das Ende X mit dem Ende Y verbunden ist (drei Anschlußklemmen).

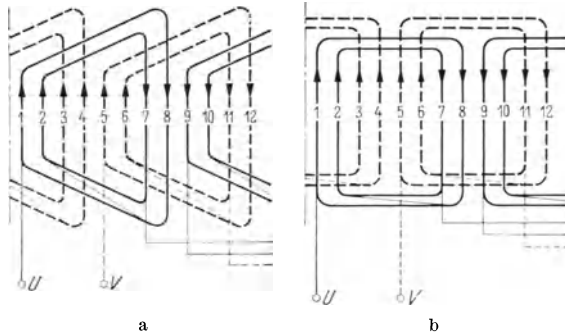


Abb. 115 a u. b. Ausführung der Wicklung nach Abb. 114 mit gleichförmigen Spulengruppen.

Zweiphasige Stabwicklungen sind aus den einphasigen Stabwicklungen ebenfalls leicht herzustellen, da jeder Strang für sich betrachtet eine Einphasenwicklung ist, welche die halbe Nutenzahl einnimmt. Ebenso einfach ist der Entwurf von zweiphasigen Zweischichtwicklungen. Wenn bei diesen die Spulenweite kleiner ist als die Polteilung (Sehnenwicklung), so gibt es Nuten, die Spulenweiten enthalten, welche verschiedenen Wicklungssträngen angehören.

Die zweiphasigen Wicklungen mit zwei gleichwertigen Wicklungssträngen haben keine große praktische Bedeutung, da es zweiphasige Wechselstromnetze kaum gibt. Dagegen spielen sie eine Rolle als einphasige Wicklungen mit Anlaufwicklung.

Die zweiphasigen Wicklungen mit zwei gleichwertigen Wicklungssträngen haben keine große praktische Bedeutung, da es zweiphasige Wechselstromnetze kaum gibt. Dagegen spielen sie eine Rolle als einphasige Wicklungen mit Anlaufwicklung.

Einphasige Asynchronmotoren entwickeln ohne besondere Hilfseinrichtungen im Stillstand kein Drehmoment, so daß sie nicht anlaufen. Um ein Drehmoment zu erzielen, muß beim Einschalten außer dem Strom in der Hauptwicklung noch ein Strom in einer zweiten Wicklung, der sog. Anlaufwicklung fließen. Dabei müssen Haupt- und Anlaufwicklung räumlich gegeneinander versetzt sein (z. B. um einen elektrischen Winkel von 90°), und es muß der Strom der Anlaufwicklung eine zeitliche Phasenverschiebung gegenüber demjenigen der Hauptwicklung haben. Diese Phasenverschiebung wird künstlich hervorgerufen durch Vorschalten eines Kondensators, einer Drosselspule oder eines Wirkwiderstandes vor die Anlaufwicklung (vgl. Abb. 116). Nach erfolgtem Anlauf wird die Anlaufwicklung abgeschaltet.

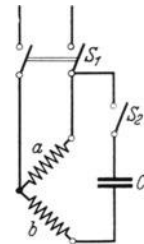


Abb. 116. Schaltung eines Einphasenmotors mit Anlaufwicklung.

a = Hauptwicklung, b = Anlaufwicklung, C = Kondensator, S_1 = Hauptschalter, S_2 = Anlaufschalter.

Die einphasige Wicklung mit Anlaufwicklung ist zwar grundsätzlich ebenso ausgeführt wie die zweiphasige Wicklung, doch sind Hauptwicklung und Anlaufwicklung meistens nicht gleichwertig, ja nicht einmal angenähert gleichwertig. Windungszahl und Drahtquerschnitt sind verschieden und oft auch noch die Zonenbreiten der beiden Wick-

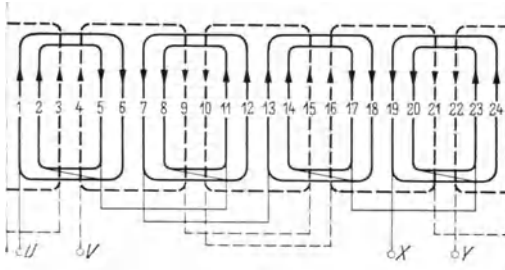


Abb. 117. Schaltplan einer einphasigen Wicklung ($q = 4$) mit Anlaufwicklung ($q = 2$).

lungen, und zwar derart, daß die Hauptwicklung eine größere Breite einnimmt als die Anlaufwicklung (Abb. 117). Es kommen auch Ausführungen vor, bei denen Haupt- und Anlaufwicklung sich teilweise überlappen in der Weise, daß Nuten vorhanden sind, in denen

Spulenseiten sowohl der Hauptwicklung als auch der Anlaufwicklung liegen, wobei die Windungszahlen dieser Spulenseiten aus Raumgründen geringer sein müssen als die der Spulenseiten der übrigen Nuten.

VI. Dreiphasige Wechselstrom-Ständerwicklungen.

A. Allgemeines.

Die am häufigsten vorkommenden Wechselstromwicklungen sind die dreiphasigen (Drehstromwicklungen). Bei ihnen sind drei Wicklungsstränge vorhanden, von denen jeder für sich eine einphasige Wicklung darstellt. Für jeden Strang steht $\frac{1}{3}$ des Umfanges zur Verfügung. Um eine symmetrische Verteilung der drei Stränge zu erzielen, sind diese um einen elektrischen Winkel von 120° gegeneinander versetzt. (Der räumliche Versetzungswinkel beträgt $\frac{120^\circ}{p}$, wenn mit p die Zahl der Polpaare bezeichnet wird.)

B. Einschichtwicklungen.

Für gegebene Nutenzahl und Polzahl läßt sich nach den obigen Ausführungen die Lage der Spulenseiten am Ankerumfang für die einzelnen Stränge ohne weiteres angeben. In Abb. 118 a ist dies beispielsweise für eine zweipolige und in Abb. 118 b für eine vierpolige Wicklung geschehen. Jede Spulenseite des ersten Stranges ist durch einen einfachen Kreis, die des zweiten Stranges durch einen doppelten und die des dritten Stranges durch einen dreifachen Kreis gekennzeichnet. Da die drei

Wicklungsstränge um je einen elektrischen Winkel von 120° (d. i. $\frac{2}{3}$ der Polteilung) gegeneinander versetzt sind, so folgen innerhalb einer Polpaarteilung die Spulenseitengruppen in folgender Weise aufeinander: positive des ersten Stranges — negative des dritten Stranges — positive des zweiten Stranges — negative des ersten Stranges — positive des dritten Stranges — negative des zweiten Stranges. Sowohl in Abb. 118a als auch in Abb. 118b ist die Zonenbreite $\frac{1}{3}$ der Polteilung.

Auch bei der dreiphasigen Wicklung können wir eine Zonendarstellung anwenden (Abb. 119a u. 119b). Innerhalb einer Polpaarteilung (2τ) sind von jedem Strang zwei Zonen vorhanden, die sowohl hinsichtlich des Vorzeichens als auch hinsichtlich der Strangzugehörigkeit gekennzeichnet sind. Hier rechnet als Spulenweite W natürlich der Abstand von der Mitte einer positiven Zone zur Mitte der nächsten negativen desselben Stranges.

Die Stirnverbindungen sind nun wieder so zu legen, daß jeweils eine positive Spulenseite mit einer negativen Spulenseite desselben Stranges

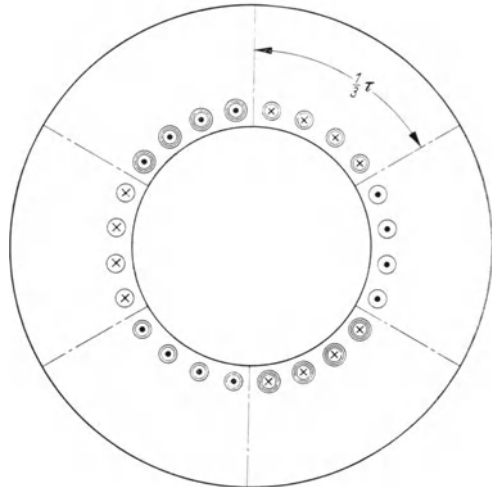


Abb. 118a. Lage der Spulenseiten bei einer dreiphasigen Wicklung ($p = 1, q = 4$).

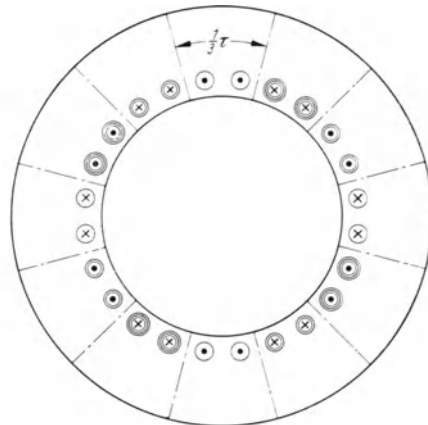


Abb. 118b. Lage der Spulenseiten bei einer dreiphasigen Wicklung ($a = 2, q = 2$).

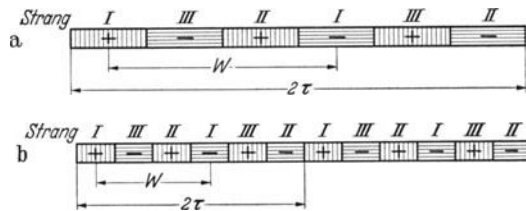


Abb. 119. Zonenpläne der Wicklungen nach Abb. 118.
a) $p = 1$, b) $p = 2$.

verbunden wird. Es bestehen dabei dieselben Arten der Verbindungsmöglichkeit, wie wir sie bei den ein- und zweiphasigen Wicklungen kennengelernt haben. Zunächst können wir wieder Ausführungen mit

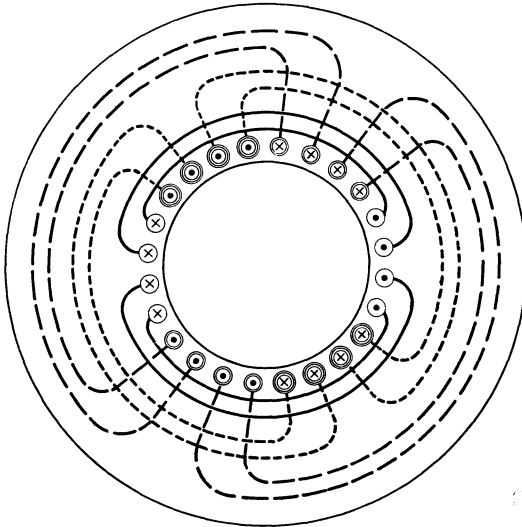


Abb. 120a. Dreiphasige Drei-Etagen-Wicklung ($p = 1, q = 4$).

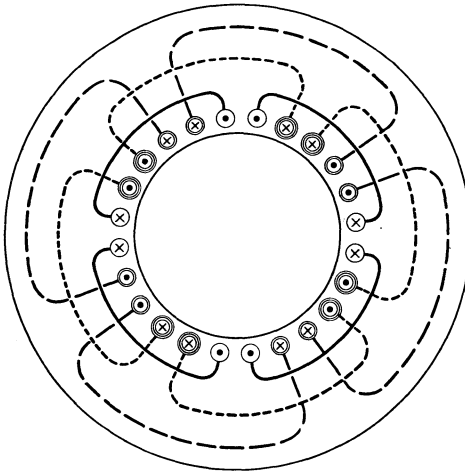


Abb. 120b. Dreiphasige Drei-Etagen-Wicklung ($p = 2, q = 2$).

Spulen gleicher Weite und solche mit Spulen verschiedener Weite unterscheiden, von denen wir zunächst die letzteren betrachten wollen.

1. Wicklungen mit Spulen verschiedener Weite.

a) **Drei-Etagen-Wicklungen.** Wir verbinden die Spulenseiten nach Abb. 118a und die nach Abb. 118b so, daß jeder Wicklungsstrang aus $2p$ Spulengruppen besteht und erhalten die in Abb. 120a u. 120b dargestellten Anordnungen. Die Stirnverbindungen der nebeneinander liegenden Spulenseiten eines Stranges sind gleichmäßig nach zwei Seiten abgebogen. Wenn die Zahl q der Nuten je Pol und Strang gerade ist, macht die gleichmäßige Aufteilung auf die beiden Spulengruppen keine Schwierigkeiten. Wenn q ungerade ist, kann man die Windungen der mittleren Spule in zwei

Hälften aufteilen, um auch hier zwei gleichmäßige Gruppen zu erhalten. Dies geschieht im allgemeinen nur bei ganz kleinen Maschinen. Im übrigen zieht man es vor, zwei ungleichmäßige Gruppen zu bilden, von denen die eine einen Spulenkopf mehr enthält als die andere. Bei

der Darstellung der Stirnverbindungen sind diejenigen des ersten Stranges ausgezogen, die des zweiten Stranges gestrichelt und die des dritten Stranges punktiert gezeichnet.

Man erkennt ohne weiteres, daß es notwendig ist, die Spulenköpfe in drei Ebenen oder Etagen anzuordnen, um sie aneinander vorbeiführen zu können. Eine Wicklung dieser Art heißt daher eine Drei-Etagen-

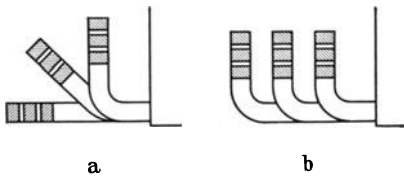


Abb. 121. Formen der Spulenköpfe bei Drei-Etagen-Wicklungen.



Abb. 122. Ständer mit dreiphasiger Drei-Etagen-Wicklung (Werkbild BBC).

Wicklung. Die räumliche Anordnung der Wicklungsköpfe kann dabei entweder nach Abb. 121 a oder 121 b erfolgen. Bei der Ausführung nach Abb. 121 a werden die Verbindungen durchschnittlich kürzer, die Ver-

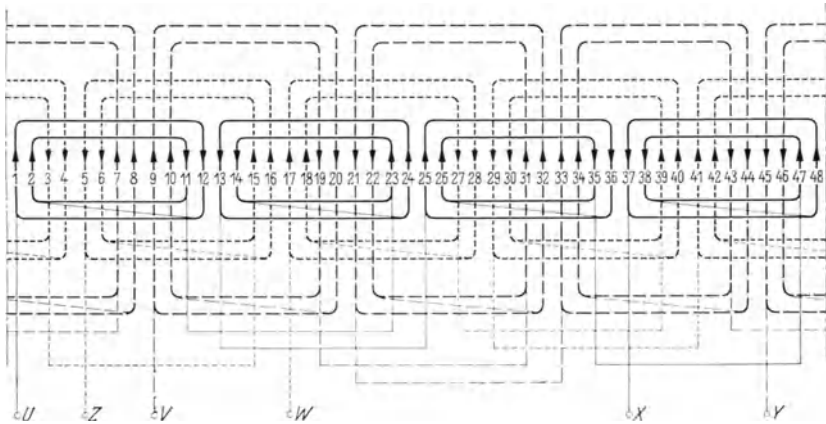


Abb. 123. Schaltplan der Wicklung nach Abb. 122.

legung der Köpfe nach Abb. 121 b ermöglicht aber eine sicherere mechanische Befestigung der Wicklung.

Eine fertige Drei-Etagen-Wicklung zeigt Abb. 122. Die Wicklungsköpfe sind nach Abb. 121 a geformt. Der Schaltplan dieser Wicklung ist in Abb. 123 dargestellt. Die einzelnen Stränge sind auch hier durch

verschiedene Stricharten unterschieden. Alle Spulen eines Stranges sind in Reihe geschaltet, die Anfänge tragen die Bezeichnungen U , V und W , die Enden die Bezeichnungen X , Y und Z .

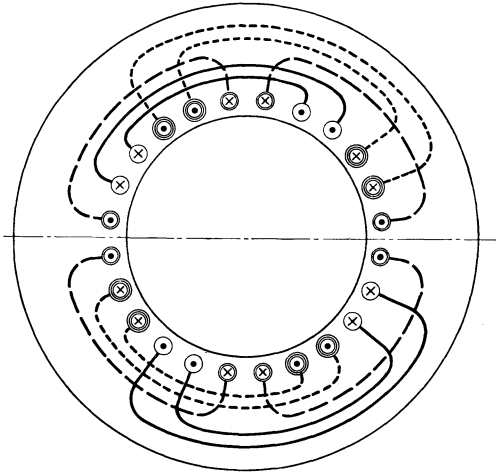


Abb. 124. Dreiphasige Wicklung für geteilten Ständer ($p = 2, q = 2$).

lung in Bergwerken usw.) erwünscht, die Wicklungsköpfe so anzuordnen, daß der Ständer in zwei Hälften zerlegt werden kann, ohne daß

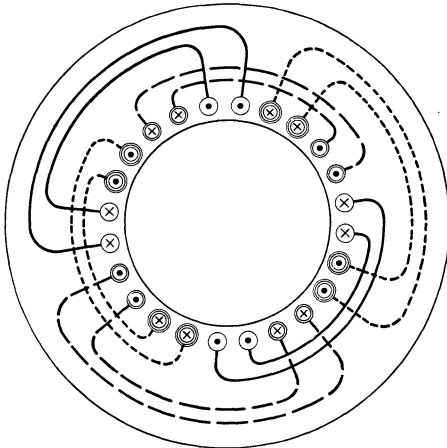


Abb. 125. Dreiphasige Zwei-Etagen-Wicklung ($p = 2, q = 2$).

Spulen aufgeschnitten oder ausgebaut werden müssen. Von den verschiedenen Möglichkeiten, die Stirnverbindungen so zu legen, daß eine Teilung des Ständers möglich ist, ist eine in Abb. 124 dargestellt. Derartige Wicklungen sind nur möglich, wenn mehr als zwei Pole vorhanden sind ($p > 1$).

Die mittlere Windungslänge sowie die Lage der Wicklungsköpfe im Stirnraum ist bei den einzelnen Strängen verschieden. Die daraus folgende Verschiedenheit der Widerstände läßt sich, wie wir bei den zweiphasigen Wicklungen gesehen haben, vermeiden, wenn die Wicklung mit gleichgeformten Spulengruppen ausgeführt wird (vgl. Abb. 115).

In besonderen Fällen ist es wegen Transportschwierigkeiten (Überschreitung des Bahnprofils, Aufstellung in Bergwerken usw.) erwünscht, die Wicklungsköpfe so anzuordnen, daß der Ständer in zwei Hälften zerlegt werden kann, ohne daß Spulen aufgeschnitten oder ausgebaut werden müssen. Von den verschiedenen Möglichkeiten, die Stirnverbindungen so zu legen, daß eine Teilung des Ständers möglich ist, ist eine in Abb. 124 dargestellt. Derartige Wicklungen sind nur möglich, wenn mehr als zwei Pole vorhanden sind ($p > 1$).

b) Zwei-Etagen-Wicklungen. Weit häufiger als die Drei-Etagen-Wicklungen finden bei dreiphasigen Ständerwicklungen die Zwei-Etagen-Wicklungen Verwendung, bei

denen die Wicklungsköpfe in zwei Ebenen (Etagen) untergebracht sind. Die Unterbringung der Wicklungsköpfe in zwei Ebenen ist immer möglich, sofern es sich nicht um eine Wicklung für geteilten Ständer

handelt. Man wendet aber auch bei geteilten Ständern die Zwei-Etagen-Wicklung an und legt die Spulen, die die Teilfuge überdecken, erst dann in die Nuten, wenn der Ständer am Bestimmungsorte fertig zusammengebaut ist. Dies ist dann besonders einfach, wenn der Ständer offene Nuten hat.

Die Zwei-Etagen-Wicklungen unterscheiden sich von den Drei-Etagen-Wicklungen mit gleichmäßig verteilten Wicklungsköpfen dadurch, daß sie nur p Spulengruppen je Strang besitzen.

Als Beispiel sei zunächst die in Abb. 120b dargestellte Wicklung in eine Zwei-Etagen-Wicklung abgeändert; wir erhalten die Anordnung der Wicklungsköpfe nach Abb. 125 und den in Abb. 126 dargestellten Schaltplan; jeder Wicklungsstrang enthält hier eine Gruppe mit „kurzen“ und eine Gruppe mit „langen“ Spulen. Bei größeren Polpaarzahlen enthält allgemein jeder Strang ebensoviel kurze wie lange Spulen.

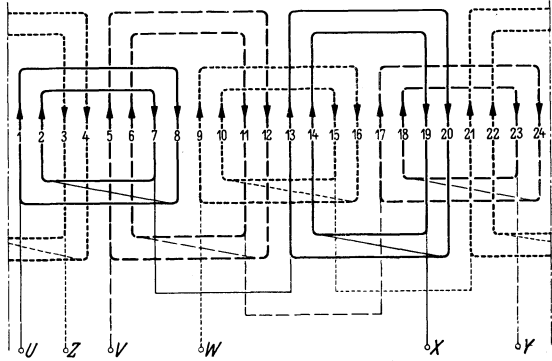


Abb. 126. Schaltplan der Wicklung nach Abb. 125.

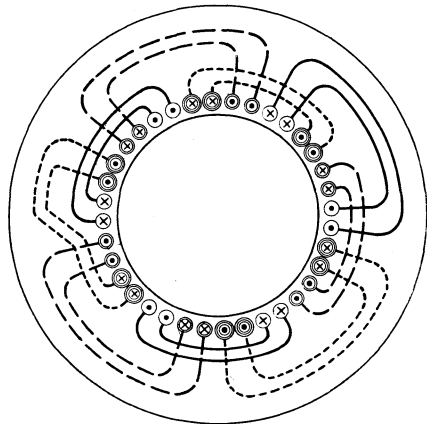


Abb. 127. Dreiphasige Drei-Etagen-Wicklung mit gekröpfter Spulengruppe ($p = 3$, $q = 2$).

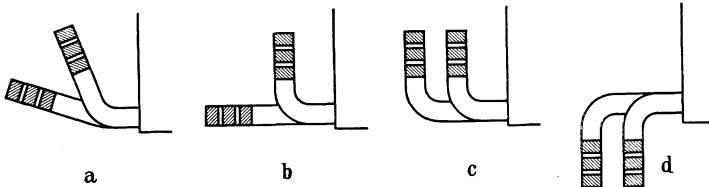


Abb. 128. Formen der Spulenköpfe bei Zwei-Etagen-Wicklungen.

Eine derartige Wicklung läßt sich immer dann herstellen, wenn die Zahl p der Polpaare eine gerade Zahl ist. Ist dagegen p eine ungerade Zahl, so erhält man stets eine Spulengruppe, deren Stirnverbindung aus einer Ebene (Etage) in die andere übergeht; man nennt sie eine

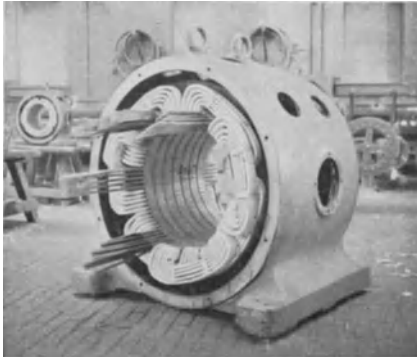


Abb. 129. Dreiphasige Zwei-Etagen-Wicklung ($p = 3$) während der Herstellung (Werkbild Siemens).

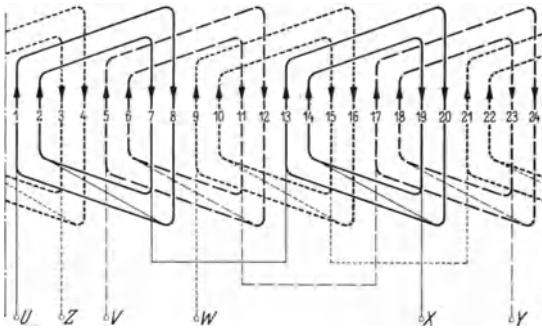


Abb. 130. Schaltplan einer Wicklung mit gleichgeformten Spulengruppen ($p = 2, q = 2$).

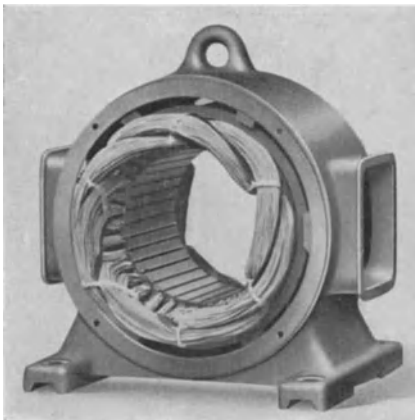


Abb. 131. Dreiphasige Wicklung mit gleichgeformten Spulengruppen (Werkbild BBC).

gekröpfte Spulengruppe. Eine Wicklung mit gekröpfter Spulengruppe zeigt Abb. 127. Im Schaltplan haben ihre Spulen mit Ausnahme der gekröpften Spulengruppe eine Form nach Abb. 126; die gekröpfte Gruppe entspricht in ihrer Form den Spulengruppen in Abb. 130.

Die gebräuchlichen Anordnungen der Wicklungsköpfe im Stirnraum bei Zwei-Etagen-Wicklungen sind in Abb. 128

dargestellt. Im allgemeinen ist die Form der Köpfe auf beiden Stirnseiten der Maschine die gleiche, wobei dann die Formen *a* bis *c* zur Anwendung gelangen. Seltener kommen Wicklungen vor, bei denen auf der einen Stirnseite die Form *c*, auf der anderen Seite die Form *d* aus Abb. 128

angewandt wird (vgl. Abb. 173). Der Läufer ist bei einer solchen Maschine nur von der einen Seite ein- und auszubauen. Eine Zwei-Etagen-Wicklung für einen sechspoligen Ständer zeigt Abb. 129 im Zustande der Herstellung.

Hinsichtlich des Gleichwiderstandes und des Streublindwiderstandes sind bei der Zwei-Etagen-Wicklung die einzelnen Stränge einander gleichwertig, wenn die Polpaarzahl p gerade ist (Abb. 126), weil jeder Strang ebensoviel „kurze“ wie

„lange“ Spulengruppen enthält. Bei den ungeraden Polpaarzahlen, bei denen eine gekröpfte Spulengruppe vorliegt (Abb. 127), ist diese Gleichheit nicht ganz vorhanden.

Eine Wicklung, die auch bei ungeraden Polpaarzahlen zu genau gleichwertigen Wicklungssträngen führt, ist die Wicklung mit gleichgeformten Spulengruppen, wie wir sie bei den zweiphasigen Wicklungen kennengelernt haben (vgl. Abb. 115). Den Schaltplan einer dreiphasigen Wicklung mit gleichgeformten Spulengruppen zeigt Abb. 130, eine ausgeführte Wicklung ist in Abb. 131 dargestellt. Alle Spulengruppen haben hier die Form der gekröpften Spulengruppe in Abb. 127. Auch die in Abb. 115b gezeigte Anordnung ist möglich, wenn die Wicklung aus Halbformspulen (vgl. Abschnitt VI H 5) besteht.

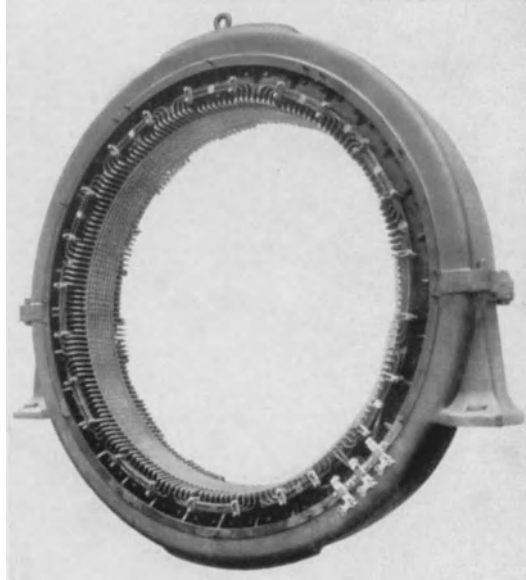


Abb. 132. Dreiphasige Zwei-Etagen-Wicklung als Stabwicklung (Werkbild BBC).

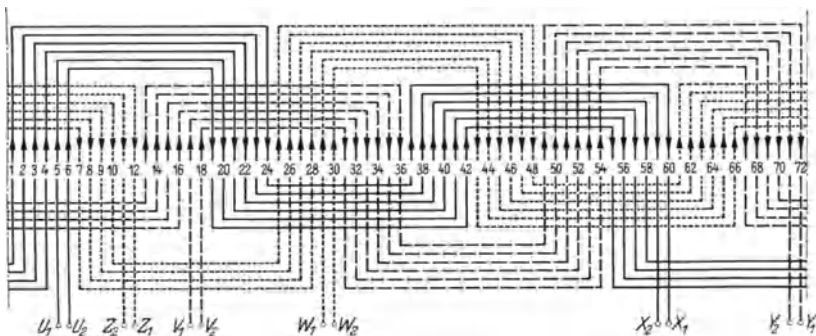


Abb. 133. Schaltplan einer dreiphasigen Stabwicklung ($p = 2$, $q = 6$).

Wir haben bei den bisher betrachteten dreiphasigen Wicklungen stillschweigend vorausgesetzt, daß sie Spulen mit mehreren Leitern je Spulenseite enthalten. Bei den Stabwicklungen, bei denen je Spulen-

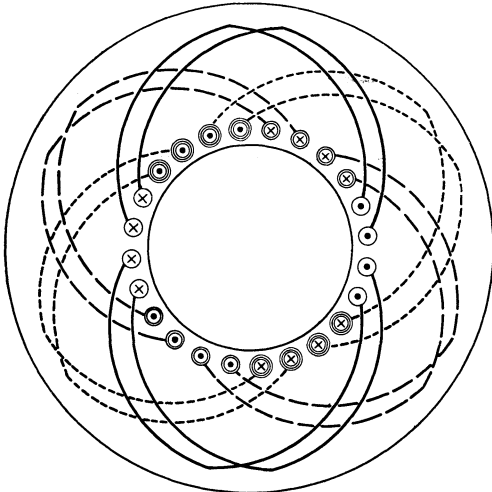


Abb. 134a. Dreiphasige Wicklung mit Spulen gleicher Weite ($p = 1, q = 4$).

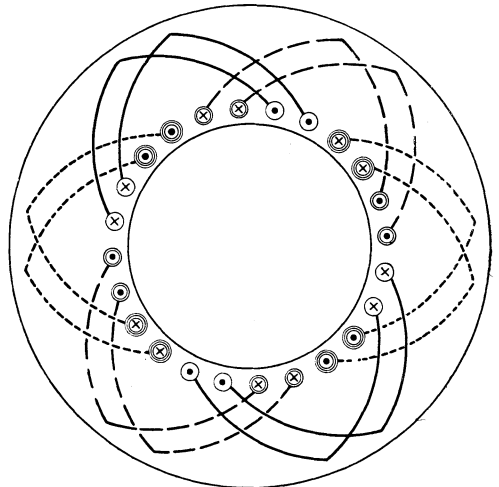


Abb. 134b. Dreiphasige Wicklung mit Spulen gleicher Weite ($p = 2, q = 2$).

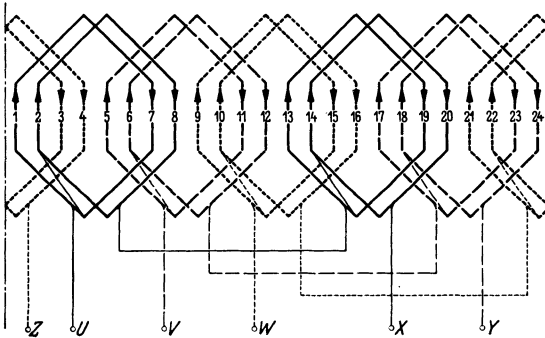


Abb. 135a. Schaltplan der Wicklung nach Abb. 134a.

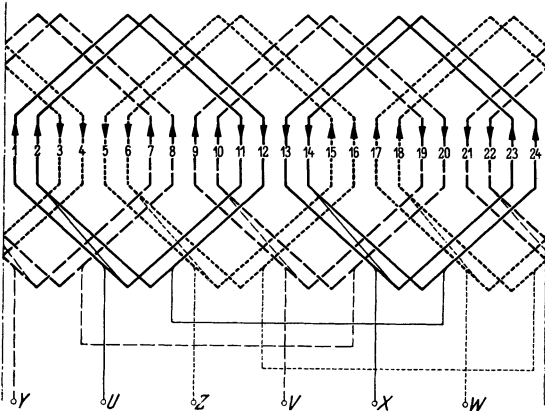


Abb. 135b. Schaltplan der Wicklung nach Abb. 134b.

seite nur ein Leiter vorhanden ist, gelten die Überlegungen, die wir bei den einphasigen Stabwicklungen angestellt haben (vgl. S. 84). Jeder Wicklungsstrang ist so aufgebaut wie eine Wicklung nach Abb. 106a bis c; jeder nimmt $\frac{1}{3}$ der Nuten ein, und die einzelnen Stränge sind um einen elektrischen Winkel von 120° gegeneinander versetzt. Ein Ausführungsbeispiel ist die Wicklung in Abb. 132. Ein ihr entsprechender Schaltplan für zwei Polpaare ist in Abb. 133 dargestellt. Im Gegensatz zu den bisherigen Schaltplä-

nen besteht hier jeder Strang aus zwei Zweigen, die entweder parallel oder in Reihe geschaltet werden können (vgl. Abschnitt VI E).

2. Wicklungen mit Spulen gleicher Weite.

Wir gehen nunmehr zur Betrachtung der dreiphasigen Wicklungen mit Spulen gleicher Weite über. Auch sie lassen sich aus den gleichartigen einphasigen Wicklungen herleiten. Die Stirnverbindungen können verschiedenartig verlegt werden; die gebräuchlichsten Formen sind in Abb. 134a u. b dargestellt. Abb. 134a entspricht beim Vergleich mit den Wicklungen, die Spulen verschiedener Weite haben, den Drei-Etagen-Wicklungen mit gleichmäßig verteilten Wicklungsköpfen ($2p$ Spulengruppen je Strang) und Abb. 134b den Zwei-Etagen-Wicklungen (p Spulengruppen je Strang). Die Wicklungsköpfe können dabei wieder eine der in Abb. 105 dargestellten Formen haben. Die Schaltpläne der Wicklungen nach Abb. 134a u. b sind in Abb. 135a u. b dargestellt. Eine für den Einbau fertige Spulengruppe für die Wicklung einer größeren Maschine mit Spulen gleicher Weite zeigt Abb. 136; die Spulenköpfe haben etwa die Form, wie sie Abb. 105a zeigt. Den Ständer einer kleineren Maschine mit teilweise eingelegter Wicklung nach Abb. 134a und 135a stellt Abb. 137 dar.

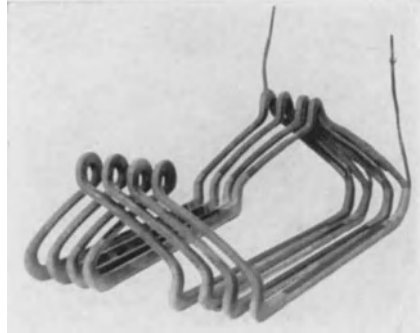


Abb. 136. Zum Einbau fertige Spulengruppe, bestehend aus Spulen gleicher Weite (Werkbild Siemens).



Abb. 137. Dreiphasige Ständerwicklung mit Spulen gleicher Weite während des Einlegens (Werkbild Schumann).

C. Zweischichtwicklungen.

Aus den schon früher genannten Gründen (vgl. S. 87) gewinnt in neuerer Zeit die Zweischichtwicklung immer mehr an Bedeutung. Die Verteilung der Spulenseiten am Ankerumfang bei einer dreiphasigen

Zweischichtwicklung erhält man in der gleichen Weise, wie es bei den einphasigen Wicklungen angegeben

wurde. Für eine vierpolige Durchmesserwicklung erhalten wir z. B. die Anordnung in Abb. 138a, in Zonen- darstellung Abb. 138b. Die Lage der Zonen in der Oberschicht stimmt genau mit derjenigen in der Unterschicht überein. In Abb. 138a sind auch gleich die Stirn- verbindungen dargestellt. Sie sind gleichmäßig am Umfang verteilt und nach einer der in Abb. 108 dar- gestellten Formen gebogen. Der Schaltplan der Wicklung nach Abb. 138 ist in Abb. 139 gezeichnet.

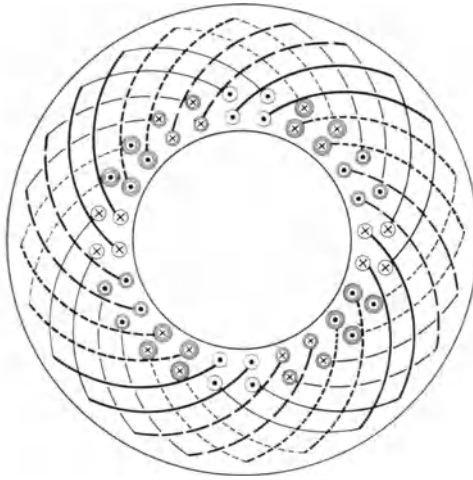


Abb. 138a. Dreiphasige Zweischichtwicklung als Durch- messerwicklung ($p = 2, q = 2$).

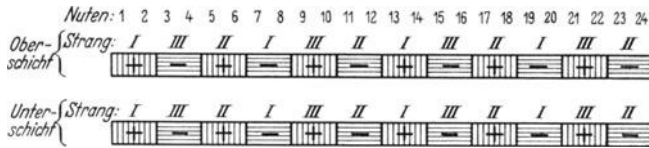


Abb. 138b. Zonenplan der Wicklung nach Abb. 138a.

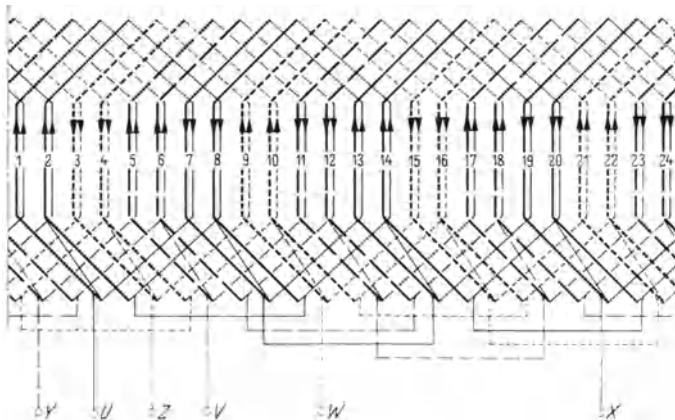


Abb. 139. Schaltplan der Wicklung nach Abb. 138a u. b.

Eine ausgeführte Zweischichtwicklung zeigt Abb. 140. Es läßt sich hier erkennen, wie die Spulen in die offenen Nuten des Ständers ein-

gelegt werden. Die Form der Wicklungsköpfe entspricht der Ausführung *c* in Bild 108.

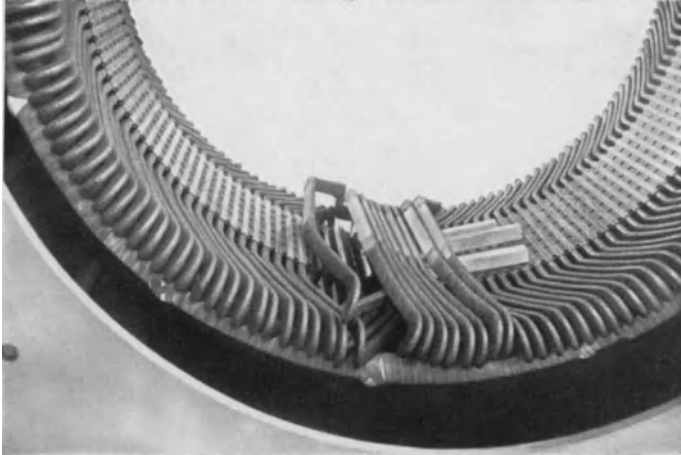


Abb. 140. Ausgeführte dreiphasige Zweischichtwicklung (Werkbild AEG).

Eine zweischichtige Sehnwicklung für zwei Pole ist in Abb. 141 dargestellt. Die Verteilung der Spulenseiten bei der Sehnwicklung kann man sich so entstanden denken, daß zunächst in Ober- und Unterschicht die Lage der Zonen übereinstimmt, wie es bei der Durchmesserwicklung der Fall ist, und daß dann die ganze Unterschicht um eine bestimmte ganze Anzahl von Nutteilungen (in Abb. 141 ist es eine Nutteilung) um die Ständerachse gedreht worden ist. Die Sehnwicklung ist bekanntlich dadurch gekennzeichnet, daß die Spulenweite verschieden ist von der Polteilung, und zwar meistens kleiner als diese. In Abb. 141 ist das Verhältnis der Spulenweite zur Polteilung (W/τ) gleich $5/6$ oder, in Winkelmaß ausgedrückt, gleich 150° . Der Schaltplan einer Spulenwicklung nach Abb. 141 ist

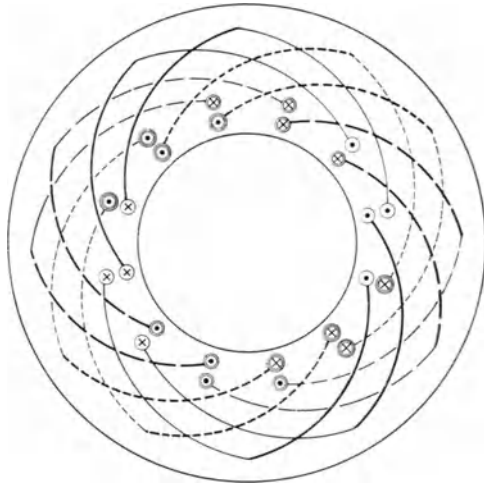


Abb. 141. Dreiphasige Zweischichtwicklung mit Sehnung ($p = 1, q = 2$).

leicht zu zeichnen; er entspricht der Hälfte des Planes in Abb. 139 mit dem Unterschied, daß die Weite jeder Spule um eine Nutteilung verringert ist.

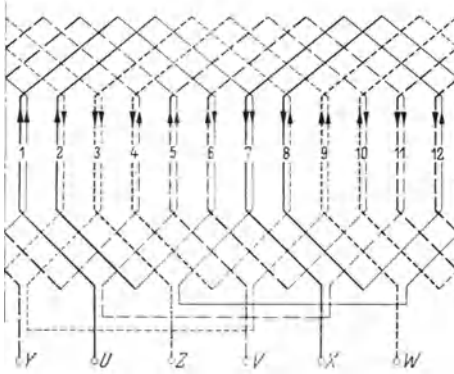


Abb. 142. Schaltplan einer dreiphasigen zweischichtigen Stabwicklung ($p = 1$, $q = 2$).

Während bei der Durchmesserwicklung (Abb. 138 a u. b) stets nur Spulenseiten desselben Stranges in einer Nut zusammenliegen, gibt es bei der Sehnenwicklung (Abb. 141) Nuten, in denen die Spulenseiten der Ober- und Unterschicht verschiedenen Strängen angehören. Dadurch treten stellenweise zwischen zwei Spulenseiten, die in einer Nut liegen, höhere Spannungen auf, als es bei der Durchmesserwicklung der Fall ist. Gegenüber den verschiedenen Vorteilen der Sehnung wird jedoch dieser Nachteil in Kauf genommen.

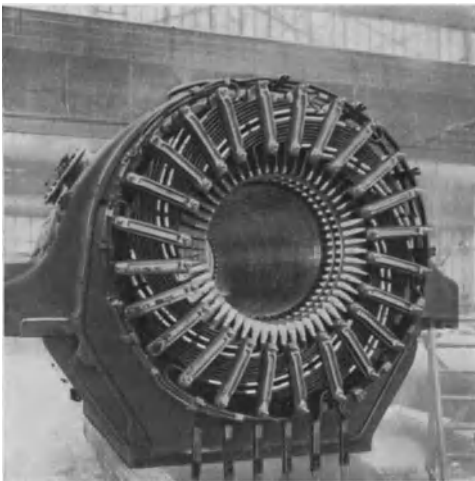


Abb. 143. Dreiphasige zweischichtige Stabwicklung (Evolventenwicklung) eines Turbogenerators (Werkbild Siemens).

Stabwicklungen werden grundsätzlich in der gleichen Weise ausgeführt. Auch bei ihnen erfolgt das Verlegen der Stirnverbindungen nach Abb. 138 a oder 141. Die praktischen Ausführungsformen sind schon bei den einphasigen Wicklungen erwähnt worden. Entweder werden die Nutenleiter für sich als gerade Stäbe hergestellt, die durch Bügel- oder Gabelverbinder miteinander verbunden werden, oder es besteht jede Spule aus zwei Stabelementen, die in ähnlicher Weise gebogen sind

wie die Stabelemente der Zylinderwicklung bei Stromwenderwicklungen.

Da bei der Stabwicklung jede Spulenseite nur einen Leiter enthält, hat der Schaltplan eine etwas andere Gestalt. Als Beispiel ist der Schaltplan einer Stabwicklung nach Abb. 141 in Abb. 142 dargestellt. In

dieser Form werden gewöhnlich die Wicklungen der Turbogeneratoren hergestellt. Abb. 143 zeigt den fertigen Ständer einer zweipoligen Maschine mit einer derartigen Wicklung; ein Ausschnitt einer solchen Wicklung ist in Abb. 144 zu sehen. Von den Stäben sieht man nur diejenigen der Oberschicht; ihre Enden gehen in die äußere Ebene der Stirnverbindungen über. Die Stäbe der Unterschicht, die von denen der Oberschicht verdeckt werden, sind kürzer und gehen an ihren Enden in die innere Ebene der Stirnverbindungen über.



Abb. 144. Ausschnitt aus einer dreiphasigen zweischichtigen Stabwicklung (Evolventenwicklung) eines Turbogenerators (Werkbild Siemens).

Damit der gegenseitige Abstand benachbarter Stirnverbindungen auf der ganzen Länge konstant ist, müssen die Stirnverbindungen in Abb. 138a u. 141 die Form von Evolventen haben; man nennt daher derartige Wicklungen auch Evolventenwicklungen.

Die Form der Wicklungsköpfe, die hier immer in Gestalt von Gabelverbindern hergestellt werden, entspricht bei den Evolventenwicklungen der Ausführung *a* in Abb. 108. Wenn bei Anordnung der Wicklungsköpfe in zwei Ebenen der Abstand zwischen benachbarten Stirnverbindungen zu klein wird (bei großen Spannungen), so sieht man vier Ebenen vor, von denen je zwei paarweise zusammengehören. Die Stirnverbindungen der einzelnen Stäbe werden dann abwechselnd in dem einen oder anderen Ebenenpaar untergebracht. Die Wicklungsköpfe können dabei etwa die in Abb. 145 dargestellte Form haben.

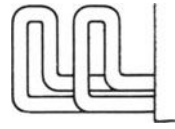


Abb. 145.
Form der Spulenköpfe bei Unterbringung in vier Ebenen.

Zuweilen, wenn auch seltener, werden besonders bei Turbogeneratoren Einschichtwicklungen angewendet, die in ihrer Ausführung den hier betrachteten Zweischichtwicklungen ähnlich sind und sich aus ihnen leicht herleiten lassen. Wir denken uns z. B. in Abb. 141 alle Spulenseiten der Oberschicht festgehalten und die ganze Unterschicht wieder um die Ständerachse gedreht, diesmal jedoch nur um $\frac{1}{2}$ Nutteilung nach rechts oder links. Die Spulen der Unterschicht liegen nun mitten zwischen denen der Oberschicht und können radial so weit einwärts geschoben werden, daß sie ebenfalls in die Oberschicht gelangen. Hierbei muß natürlich (bei gleichbleibender Spulenzahl) die Zahl der Nuten verdoppelt werden. Die Stirnverbindungen verbinden nach der Drehung die gleichen Spulenseiten wie vorher. Aus Abb. 141 geht z. B. bei einer

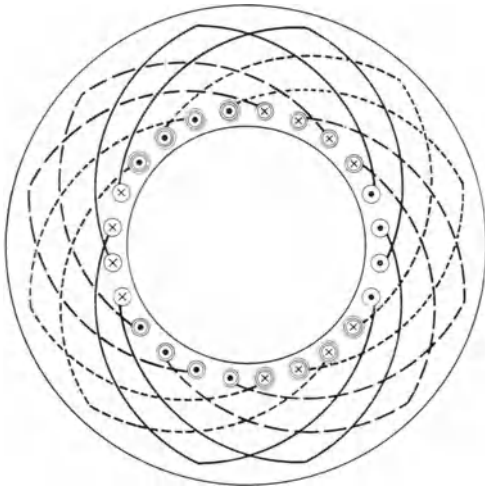


Abb. 146. Einschichtige Stabwicklung als Evolventenwicklung ($p = 1$, $q = 4$).

Verdrehung der Unterschicht um $1/2$ Nutteilung nach rechts die Anordnung in Abb. 146 hervor.

Allgemein kann bei größerer Zahl der Nuten je Pol und Strang die Unterschicht auch um $1 1/2$, $2 1/2$. . . Nutteilungen verdreht werden, falls die dabei entstehende Abweichung der Spulenweite von der Polteilung nicht zu groß wird.

Eine Teilansicht einer ausgeführten Einschichtwicklung der beschriebenen Art ist in Abb. 147 dargestellt.



Abb. 147. Einschichtige Stabwicklung als Evolventenwicklung (Werkbild BBC).

Die zweischichtigen Stabwicklungen, die nach Art der Zylinderwicklungen für Stromwenderanker ausgeführt werden, entsprechen in ihrer Schaltung meistens etwa den Wellenwicklungen (vgl. Abb. 106 b), wobei abweichend von den Stromwenderwicklungen sowohl der Schritt y_1 (Spulenweite) als auch der Schritt y_2 gleich der Polteilung gemacht wird. Nach jedem Umlauf um den Ankerumfang wird der Schritt einmal um eine Nutteilung verkürzt oder verlängert. In dieser Weise läßt sich die Hälfte der Leiter eines Stranges miteinander verbinden. Die zweite Hälfte der Leiter wird durch eine gleiche Welle miteinander

verbunden. Damit jedoch die in den gleichen Nuten liegenden Spulenseiten dasselbe Vorzeichen hinsichtlich der Zählrichtung haben, muß die zweite

Welle in umgekehrter Richtung durchlaufen werden wie die erste. In Abb. 148 ist ein Wicklungsstrang einer solchen Wicklung für vier Pole dargestellt. Der Schritt ist im allgemeinen sechs Nutteilungen, nur einmal bei jedem Umlauf ist er auf fünf verringert. Die beiden Zweige können entweder in Reihe geschaltet werden (durch Verbinden von U_2 mit X_1) oder parallel (durch Verbinden von U_1 mit U_2 und X_1 mit X_2). Eine derartige Verbindung wird Umkehrung, Umleitung oder Rücklaufverbindung genannt.

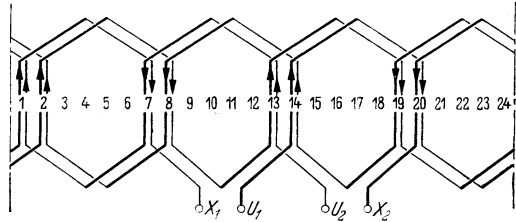


Abb. 148. Strang einer dreiphasigen Zweischichtwicklung mit „Umkehrung“.

Die beiden anderen Stränge lassen sich in bekannter Weise aus dem gezeichneten herleiten. Wicklungen nach Abb. 148 kommen häufig auch als Läuferwicklungen für Asynchronmaschinen vor.

Der Entwurf einer solchen Wicklung sei an einem Beispiel gezeigt. Wir wählen die Nutenzahl $N = 72$ und die Polpaarzahl $p = 3$. Je Pol und Strang sind dann 4 Nuten vorhanden. Jeder Strang hat 48 Spulenseiten, von denen je die Hälfte zu den beiden Teilzweigen gehört. Die Polteilung ist gleich 12 Nutteilungen.

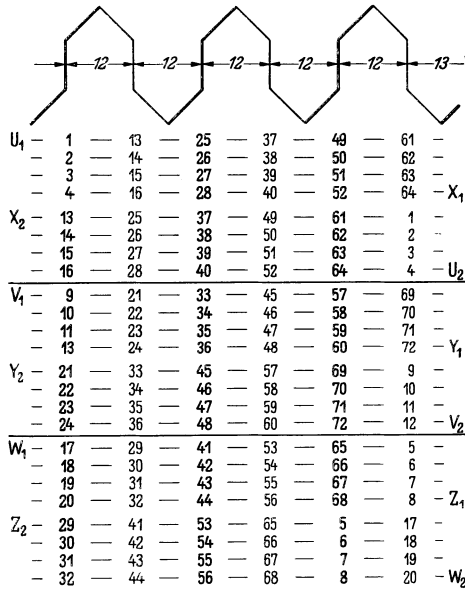


Abb. 149. Entwurfsplan für eine Wicklung mit „Umkehrung“.

Wir stellen in Abb. 149 einen Entwurfsplan auf, wie wir ihn von Abb. 36 herkennen. Die Schritte y_1 und y_2 werden gleich der Polteilung, also gleich 12 Nutteilungen gemacht, nur einmal bei jedem Umlauf, und zwar an letzter Stelle, ist dieser Schritt um 1 vergrößert, also 13 an die Stelle von 12 gesetzt.

Den ersten Wicklungsstrang beginnen wir willkürlich bei dem Oberstab der Nut 1 (Anschlußpunkt U_1); nach dem Durchlaufen von 24 Stäben haben wir das Ende des einen Zweiges erreicht (Anschlußpunkt X_1). Den zweiten Zweig des gleichen Stranges beginnen wir mit

dem Oberstab einer Nut, deren Unterschicht schon besetzt ist (es ist die Nut 12 gewählt), und entwerfen ihn in der gleichen Weise. Da der zweite Zweig in umgekehrter Richtung durchlaufen werden muß, nennen wir den Ausgangspunkt X_2 und das Ende U_2 .

Der zweite und der dritte Strang werden in der gleichen Weise entworfen. Die Anfänge dieser Stränge liegen um $\frac{2}{3}$ und $\frac{4}{3}$ Polteilung von dem des ersten Stranges entfernt (Nut 9 und Nut 17). Sie könnten stattdessen aber auch in solchen Nuten liegen, die von den genannten um ein ganzes Vielfaches der doppelten Polteilung entfernt sind.

Die Wicklung kann auch in der Weise entworfen und ausgeführt werden, daß der nach jedem Umlauf der Schritt einmal von 12 auf 11 Nuten verringert wird. Man schreitet dann beim Durchlaufen eines Zweiges von rechts nach links fort (vgl. Abb. 148), während man bei dem obigen Entwurf von links nach rechts weiterschreitet.

D. Bruchlochwicklungen.

Wir haben die Bruchlochwicklung schon bei den einphasigen Wicklungen kennengelernt. Sie war dort dadurch gekennzeichnet, daß die Zahl der bewickelten Nuten je Pol eine gebrochene Zahl war. Bei dreiphasigen Wicklungen ist eine Bruchlochwicklung dann vorhanden, wenn die Zahl q der Nuten je Pol und Strang eine gebrochene Zahl ist.

Wir befassen uns hier nur mit solchen dreiphasigen Bruchlochwicklungen, bei denen alle Nuten bewickelt sind und greifen von ihnen nur diejenigen heraus, bei denen der Bruchteil von q den Wert $\frac{1}{2}$ hat ($q = \frac{1}{2}, 1\frac{1}{2}, 2\frac{1}{2}, 3\frac{1}{2} \dots$). Einmal werden diese Wicklungen bevorzugt angewendet und ferner ist bei ihnen die Symmetrie ohne besondere Untersuchungen erkennbar¹. Die zu fordernde Symmetrie besteht darin, daß die Strangspannungen dem Betrage nach gleich und in der Phase um 120° verschoben sind. Dies setzt zunächst voraus, daß alle Stränge die gleiche Spulenzahl haben. Da bei der Einschichtwicklung, die wir zunächst ins Auge fassen, halb soviel Spulen wie Nuten vorhanden sind, ergeben sich für jeden Strang $\frac{N}{6}$ Spulen. Da diese Zahl stets ganz sein muß, kommen nur Nutenzahlen in Frage, die ohne Rest durch 6 teilbar sind.

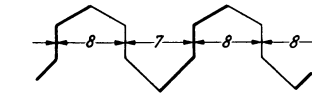
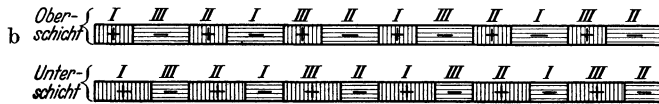
In der Tafel 8 sind bis zu $N = 120$ Nuten und $p = 12$ Polpaaren die ausführbaren Bruchlochwicklungen dieser Art aufgeführt; wo eine solche möglich ist, ist die Zahl q der Nuten je Pol und Strang eingetragen. Nur für gerade Polpaarzahlen ergeben sich Wicklungen, die den aufgestellten Forderungen genügen.

¹) Eine eingehende Darstellung der Bruchlochwicklungen befindet sich in Richter: Ankerwicklungen für Gleich- und Wechselstrommaschinen, Berlin, Julius Springer, berichtiger Neudruck 1922.

Aus Abb. 150a ergibt sich ohne weiteres die in Abb. 150b aufgezeichnete Lage der Spulenseiten. Damit ist die Wicklung eigentlich schon festgelegt; denn in welcher Weise man nun je eine demselben Strang angehörige positive und negative Spulenseite zu einer Spule vereinigt, ist grundsätzlich bedeutungslos. Man wird jedoch bestrebt sein, die Verbindungen so zu legen, daß sie möglichst einfach und kurz werden.

	I	III	II	I	III	II
a) <i>Oberschicht:</i>	2	3	2	3	2	3
<i>Unterschicht:</i>	3	2	3	2	3	2
<i>Summe:</i>	5	5	5	5	5	5

Nuten: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30



U_1	1	—	9	—	16	—	24	—	
	2	—	10	—	17	—	25	—	X_1
X_2	8	—	16	—	23	—	1	—	
	9	—	17	—	24	—	2	—	
	10	—	18	—	25	—	3	—	U_2
V_1	21	—	29	—	6	—	14	—	
	22	—	30	—	7	—	15	—	V_1
V_2	28	—	6	—	13	—	21	—	
	29	—	7	—	14	—	22	—	
	30	—	8	—	15	—	23	—	V_2
W_1	11	—	19	—	26	—	4	—	
	12	—	20	—	27	—	5	—	Z_1
Z_2	18	—	26	—	3	—	11	—	
	19	—	27	—	4	—	12	—	
	20	—	28	—	5	—	13	—	W_2

Abb. 151. Entwurf einer zweischichtigen Bruchloch-Stabwicklung.
a) Zonentafel, b) Zonenplan, c) Entwurfs-tafel.

Bruchlochwicklungen der angegebenen Art in gleicher Weise entwickeln.

Auch Zweischichtwicklungen können als Bruchlochwicklungen ausgeführt werden, sowohl Spulwicklungen als auch Stabwicklungen. Beim Entwurf stellt man eine Zonentafel für die Ober- und Unterschicht auf. Dabei braucht man nicht wie bei der Einschichtwicklung von Polpaar zu Polpaar in der Zahl der Spulenseiten je Zone zu wechseln, sondern man kann die ganze Oberschicht so behandeln wie bei der Einschichtwicklung das erste Polpaar (Abb. 150a) und die ganze Unterschicht so wie das zweite Polpaar oder umgekehrt.

Versuchen wir nun in Abb. 150b die Stirnverbindungen so zu legen, daß eine Zwei-Etagen-Wicklung entsteht, so stoßen wir auf Schwierigkeiten. Diese lassen sich leicht beheben, wenn wir beachten,

daß zwei Nuten, deren Abstand genau zwei Polteilungen beträgt,

vollständig gleichwertig sind, ihre Spulenseiten also miteinander getauscht werden können. Ein solcher Tausch hat aber nur dann einen Zweck, wenn die zu tauschenden Spulenseiten verschiedenen Strängen angehören. In Abb. 150b wählen wir zum Tausch die Spulenseiten der Nuten 8 und 23. Die neue Anordnung nach dem Tausch mit den in zwei Etagen untergebrachten Stirnverbindungen zeigt Abb. 150c.

An die hier gewählte Form der Spulen ist man nicht gebunden; sehr regelmäßige Stirnverbindungen erhält man z. B. bei der Bruchlochwicklung, wenn man Spulen gleicher Weite vorsieht. Für beliebige andere Polzahlen lassen sich

Wir wählen wieder das gleiche Beispiel mit $N = 30$ Nuten, $p = 2$ Polpaaren, also $q = 2\frac{1}{2}$ und wollen eine zweischichtige Läuferstabwicklung (vgl. S. 107) entwerfen. Wir stellen zunächst eine Zonentafel (Abb. 151 a) auf, aus der sich ohne weiteres der Zonenplan (Abb. 151 b) ergibt. Dieser Zonenplan führt zu dem Entwurfsplan in Abb. 151 c; er unterscheidet sich in einem Punkt von den bisherigen Entwurfsplänen. Bisher haben wir den Anfang des zweiten Stranges gegenüber dem des ersten Stranges um $\frac{2}{3}$ der Polteilung nach rechts verlegt; dies würde hier zum Stab der Oberschicht der Nut 6 führen. Stattdessen verlegen wir den Anfang von dieser Stelle aus um eine Polpaarteilung nach dem gleichwertigen Stab der Oberschicht der Nut 21. Bei der hier vorliegenden Polzahl hat dies zur Folge, daß die Anfänge der drei Stränge gleichmäßig am

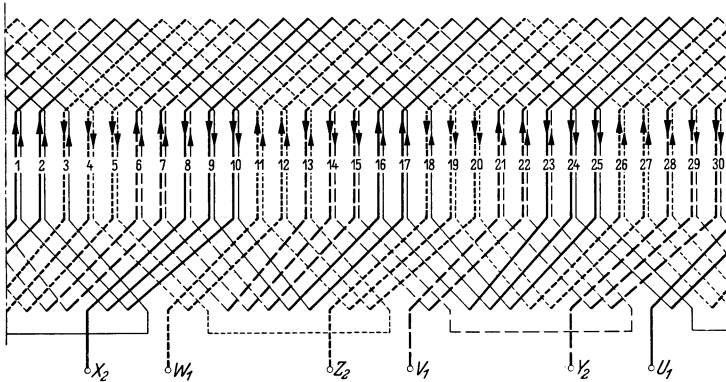


Abb. 152. Schaltplan einer Wicklung nach Abb. 151.

Umfang verteilt sind. Dies ist bei Läuferwicklungen oft zweckmäßig, um einen Massenausgleich für die Zuleitungen zu den Schleifringen zu erzielen (vgl. Abschnitt VII B).

Der Schaltplan der Wicklung ist in Abb. 152 dargestellt. Im Gegensatz zu den Ganzlochwicklungen ist hier die Zahl der Stäbe in den beiden Zweigen eines Stranges verschieden; diese können daher nur in Reihe (nicht parallel!) geschaltet werden.

In Abb. 152 sind die Schritte zum Teil um $\frac{1}{2}$ Nutteilung größer, zum Teil $\frac{1}{2}$ Nutteilung kleiner als die Polteilung ($\tau = 7,5$ Nutteilungen), im Durchschnitt also angenähert gleich der Polteilung. Für die Stabwicklung ist dies am günstigsten, weil die Länge der Stirnverbindungen am gleichmäßigsten wird.

Bei einer Spulenwicklung kann man auch eine stärkere Sehnung vornehmen, indem man im Zonenplan Abb. 151 b die Unterschicht etwa um eine oder zwei Nutteilungen nach links verschiebt. Bei einer Verschiebung um zwei Nutteilungen ergibt sich die Wicklung nach

Abb. 153. Die Spulenweite ist sechs Nutteilungen; die Sehnung ist $6/7,5 = 4/5 = 144^\circ$. Die Spulen der einzelnen Stränge sind hier so hintereinander geschaltet, daß die Anfänge U, V und W sowie die Enden X, Y und Z der Stränge unter sich möglichst dicht zusammen liegen.

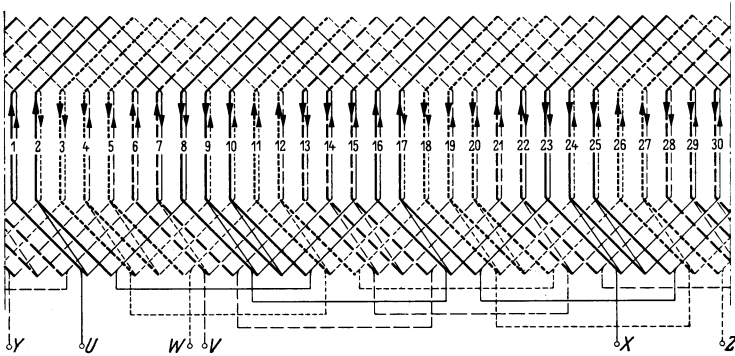


Abb. 153. Schaltplan einer zweischichtigen Bruchloch-Spulenwicklung mit Sehnung.

Bei Ständerwicklungen schaltet man die Spulen häufig in dieser Weise und legt dabei die Anfänge der Stränge in die Nähe des Klemmbrettes, um kurze Zuleitungen zu den Klemmen zu erhalten.

E. Schaltung der Spulen und Stränge.

Wir haben bis jetzt die einzelnen Spulen eines Stranges fast stets in Reihe geschaltet. Man erhält durch diese Schaltung bei gegebener Spulenzahl und gegebener Windungszahl der Spulen den größten erreichbaren Wert der Strangspannung. Zuweilen ist es aber notwendig oder zweckmäßig, nicht alle Spulen in Reihe zu schalten, sondern parallele Wicklungszweige vorzusehen, z. B. dann, wenn bei gegebenen Maschinenabmessungen selbst bei nur einem Leiter je Nut die Reihenschaltung auf eine höhere Spannung führen würde, als sie gewünscht wird, oder wenn die Reihenschaltung (bei der jeder Leiter den gesamten Strangstrom führt) unvorteilhafte Leiterquerschnitte bedingt, oder schließlich, wenn eine Wicklung für eine geringere Spannung umgeschaltet werden soll.

Wenn zwei oder mehrere Spulengruppen parallel geschaltet werden sollen, so müssen sie den Bedingungen genügen, die allgemein bei einer Parallelschaltung von Wicklungsteilen erfüllt sein müssen; es müssen nämlich die Spannungen der parallel zu schaltenden Zweige sowohl dem Betrage als auch der Phase nach übereinstimmen.

Bei den Wicklungsarten, die wir betrachtet haben, ist es im allgemeinen nicht schwierig, festzustellen, wieviel parallele Zweige möglich sind und wie die Spulen auf diese parallelen Zweige aufzuteilen sind. Da

bei diesen Wicklungen, sofern die Polpaarzahl größer ist als 1, nach jeder Polpaarteilung die Anordnung der Spulenseiten sich wiederholt, so sind auch mindestens p gleichwertige Wicklungszweige vorhanden, die parallel geschaltet werden können. Eine Ausnahme hiervon machen die Bruchlochwicklungen.

Als Beispiel greifen wir die Wicklung nach Abb. 135b ($N = 24$, $p = 2$, $q = 2$) heraus. Da die Lage der Spulenseiten in der zweiten Polpaarteilung (Nuten 13 bis 24) genau derjenigen der ersten Polpaarteilung (Nuten 1 bis 12) entspricht, so sind, wie der Schaltplan zeigt, die in jedem Strang vorhandenen Spulengruppen unter sich gleichwertig, können also parallel geschaltet werden. Für die Spulen des ersten Stranges ($U-X$) ist die Schaltung in Abb. 154 aufgezeichnet.

Bei den meisten Wicklungen ist es sogar möglich, $2p$ parallele Zweige zu bilden. Bei den Wicklungen, die $2p$ gleichwertige Spulengruppen haben (vgl. z. B. Abb. 123), ist dies ohne weiteres einzusehen. Das Vorhandensein von $2p$ gleichwertigen Spulengruppen ist meistens an die Bedingung geknüpft, daß die Zahl q

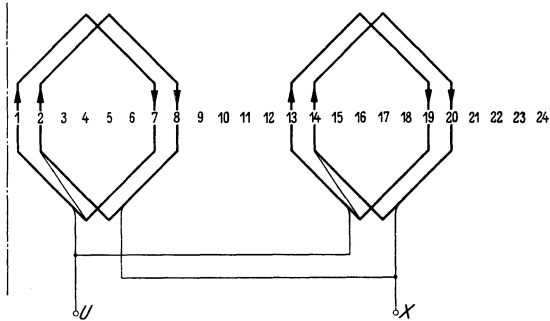


Abb. 154. Parallelschaltung von zwei Spulengruppen eines Stranges der Wicklung nach Abb. 135b.

der Nuten je Pol und Strang gerade ist. Auch bei den Wicklungen mit nur p Spulengruppen sind oft $2p$ parallele Zweige möglich, sofern q eine gerade Zahl ist, nämlich dann, wenn man jede Spulengruppe noch in zwei gleichwertige Zweige zerlegen kann. Zwei Spulen verschiedener Weite sind z. B. gleichwertig, wenn ihre Mitten zusammenfallen und wenn die Weite der einen Spule um ebensoviel größer ist als die Polteilung, wie die Weite der anderen kleiner ist als die Polteilung.

Auf Grund dieser Tatsache ergibt sich z. B., daß die beiden Spulen der Wicklung in Abb. 126, die in den Nuten $1 \rightarrow 8$ und $2 \rightarrow 7$ liegen, gleichwertig sind; denn ihre Mitten liegen zusammen, die Polteilung beträgt 6 Nutteilungen, die Weite der einen Spule 7, die der anderen 5 Nutteilungen. Die beiden Spulen dürfen also parallel geschaltet werden.

Auch bei Stabwicklungen lassen sich parallele Wicklungszweige herstellen. Bei der zweischichtigen Wicklung z. B. in Abb. 142 mit $2p$ Spulengruppen ist ohne weiteres zu erkennen, daß jeder Strang in zwei gleichwertige Zweige zerlegt werden kann, die parallel geschaltet werden

man die Klemmen meistens so an, daß die Verkettung der Stränge zur Stern- oder Dreieckschaltung durch beigegebene Schienen in einfacher Weise möglich ist. In Abb. 156 ist diese Anordnung gezeigt. Die waagerechten und senkrechten Abstände benachbarter Klemmen sind dabei einander gleich, so daß die Herstellung der beiden Schaltungsarten mit den gleichen Schaltschienen erfolgen kann.

Zuweilen wird auch die Wicklung innerhalb des Maschinengehäuses fertiggeschaltet (in Stern- oder Dreieckschaltung); herausgeführt werden dann nur die Anfänge U , V und W der drei Stränge. Bei Sternschaltung wird bei Generatoren häufig noch der Sternpunkt herausgeführt, damit man an ihn einen etwa vorhandenen Nulleiter des Netzes und Schutzrichtungen für die Maschine anschließen kann.

Es war früher schon bemerkt worden, daß man zwei Wicklungsstränge einer dreiphasigen Wicklung auch als einphasige Wicklung verwenden kann. Die beiden Stränge (z. B. $U-X$ und $V-Y$) werden ebenso miteinander verkettet wie bei der Sternschaltung von drei Strängen, d. h. die Enden X und Y werden miteinander verbunden. Ob das Ende Z des dritten Stranges ebenfalls noch angeschlossen ist, ist gleichgültig. Die Anfänge U und V der Stränge führen zu den Anschlußklemmen. Die Zählrichtung der Spulenseiten ergibt sich, wenn man die Wicklung von U nach V durchläuft. Es wird also der zweite Strang $V-Y$ in umgekehrter Richtung durchlaufen wie bei der Drehstromwicklung; die Spulenseiten dieses Stranges kehren also ihre Zählrichtung um.

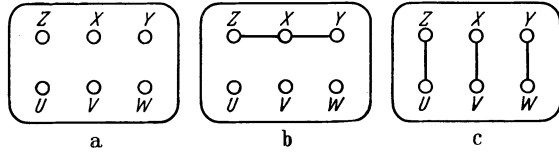


Abb. 156. Zweckmäßige Anordnung der Klemmen zur Herstellung einer Stern- oder Dreieckschaltung mit den gleichen Verbindungsschienen.

a) unverkettete Stränge, b) Sternschaltung, c) Dreieckschaltung.

Wir betrachten z. B. in diesem Sinne die Wicklung in Abb. 126. Wir lassen den dritten Strang außer acht, verbinden X und Y miteinander und kehren die Zählrichtungen des zweiten Stranges um. Hinsichtlich der Verteilung der Spulenseiten am Ankerumfang erhalten wir dann das gleiche Bild wie bei der einphasigen Wicklung in Abb. 102. Die Klemme V in Abb. 126 entspricht dabei der Klemme X in Abb. 102. Die Reihenfolge der Spulen in den beiden Schaltplänen ist verschieden, doch ist dies ohne Bedeutung.

Wir betrachten z. B. in diesem Sinne die Wicklung in Abb. 126.

Wir lassen den dritten Strang außer acht, verbinden X und Y miteinander und kehren die Zählrichtungen des zweiten Stranges um. Hinsichtlich der Verteilung der Spulenseiten am Ankerumfang erhalten wir dann das gleiche Bild wie bei der einphasigen Wicklung in Abb. 102. Die Klemme V in Abb. 126 entspricht dabei der Klemme X in Abb. 102. Die Reihenfolge der Spulen in den beiden Schaltplänen ist verschieden, doch ist dies ohne Bedeutung.

F. Wicklungen für Polumschaltung.

Um bei konstanter Netzfrequenz verschiedene Drehzahlen zu erzielen, versieht man Asynchronmotoren zuweilen mit Wicklungen, welche für zwei verschiedene Polzahlen umschaltbar sind. Zwar ist es möglich,

Wicklungen auch für mehr als zwei Polzahlen umschaltbar zu machen, doch wird wegen verschiedener sich dabei ergebender Schwierigkeiten seltener Gebrauch davon gemacht.

Wie eine Polumschaltung grundsätzlich zu erzielen ist, zeigt schon eine Betrachtung von Abb. 118a u. 118b, die sich auf Wicklungen mit der gleichen Nutenzahl aber verschiedener Polpaarzahl beziehen. Ein Unterschied besteht lediglich in der Verteilung der Spulenseiten der verschiedenen Zonen am Ankerumfang. Diese Verteilung muß also bei der Polumschaltung geändert werden. Die Änderung kann entweder durch Vertauschen von Wicklungsteilen oder durch Umkehr der Stromrichtung in einzelnen Wicklungsteilen erfolgen.

Von den zahlreichen Umschaltmöglichkeiten, die theoretisch bestehen, haben sich nur wenige in der Praxis durchgesetzt. Wir beschränken uns auf die Betrachtung der gebräuchlichsten Umschaltungsart, der sog. Dahlanderschaltung. Sie ermöglicht eine Umschaltung der Polzahl im Verhältnis 1 : 2, und zwar durch Änderung der Stromrichtung in der halben Wicklung. Die Schaltung kann sowohl bei der dreiphasigen Einschichtwicklung als auch bei der Zweischichtwicklung Verwendung finden.

Bei der Einschichtwicklung werden die Spulen genau so ausgeführt wie bei einer nicht für Polumschaltung vorgesehenen Wicklung für die größere Polzahl. Sind je Wicklungsstrang p Spulengruppen vorhanden, die man sich am Ankerumfang fortlaufend numeriert denkt, so werden diese zu je zwei Wicklungsteilen zusammengefaßt, von denen der eine die geraden, der andere die ungeraden Spulengruppen enthält. Während bei der größeren Polzahl (geringeren Drehzahl) die Wicklungsteile eines Stranges in der gleichen Zählrichtung durchlaufen werden, erfolgt beim Übergang auf die kleinere Polzahl (größere Drehzahl) ein Umschalten derart, daß die beiden Wicklungsteile in entgegengesetztem Sinne durchlaufen werden. Es ist also z. B. die Zählrichtung in dem ersten Wicklungsteil, der die ungeraden Gruppen enthält, beizubehalten, in dem zweiten Wicklungsteil, der die Spulengruppen mit gerader Nummer enthält, zu ändern oder umgekehrt.

Mit der Numerierung des Wicklungsstranges I kann man an beliebiger Stelle beginnen. Beim zweiten und dritten Wicklungsstrang muß jedoch der Anfang um $\frac{2}{3}$ und $\frac{4}{3}$ der größeren Polteilung (oder kleineren Polpaarteilung) gegenüber dem Anfang des Stranges I versetzt sein.

Als Beispiel diene die in Abb. 157 dargestellte Wicklung für 48 Nuten. Hinsichtlich der Gestaltung der einzelnen Spulen erscheint sie als normale dreiphasige Wicklung (Zwei-Etagen-Wicklung) für 4 Polpaare. Jeder Strang hat 4 Spulengruppen, die fortlaufend numeriert sind. Die am oberen Rand des Wicklungsplanes stehenden Nummern sind mit

ein-, zwei- oder dreifachen Kreisen umgeben, die die Zugehörigkeit zu den Wicklungssträngen andeuten.

Die Wicklung soll für 4 und 2 Polpaare schaltbar sein. Die Polteilung für $p = 2$ (oder die Polpaarteilung für $p = 4$) beträgt 24 Nutteilungen. Die Spulengruppe I des zweiten Wicklungsstranges muß daher um $\frac{2}{3} \cdot 24 = 16$ Nutteilungen, die Spulengruppe I des dritten Stranges um $\frac{4}{3} \cdot 24 = 32$ Nutteilungen von der Spulengruppe I des ersten Stranges (nach rechts) entfernt liegen.

Jeder Wicklungsstrang hat zwei Wicklungsteile, die die Spulengruppen 1 und 3 bzw. 2 und 4 enthalten. Die Spulen jedes Wicklungsteils sind in Reihe geschaltet: Anfänge und Enden sind bezeichnet:

- beim Strang I mit U_1 , X_1 und U_2 , X_2 ,
- beim Strang II mit V_1 , Y_1 und V_2 , Y_2 ,
- beim Strang III mit W_1 , Z_1 und W_2 , Z_2 .

In den die ungeraden Spulengruppen enthaltenden Wicklungsteilen soll beim Umschalten die Zählrichtung erhalten bleiben, in den die geraden Spulengruppen enthaltenden dagegen wechseln. Die sich dann ergebenden Zählrichtungen für die einzelnen Spulenseiten sind in dem Schaltplan (Abb. 157) durch Pfeile angedeutet, und zwar für $p = 4$ oberhalb der Nutennummern, für $p = 2$ unterhalb der Nutennummern.

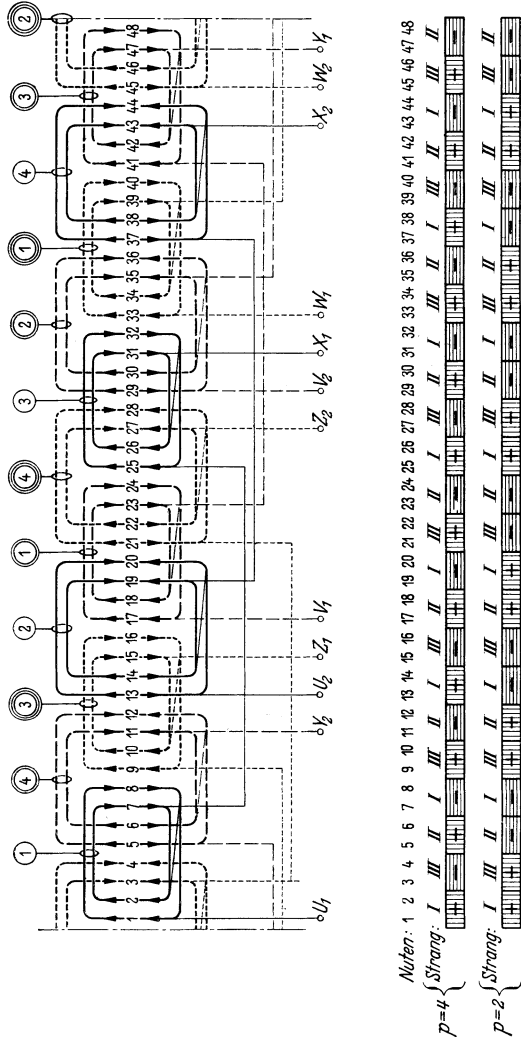


Abb. 157. Polumschaltung einer Einschichtwicklung im Verhältnis 1 : 2.

Die Verteilung der Spulenseiten am Ankerumfang ist der Deutlichkeit halber unter dem Schaltplan noch einmal als Zonenplan dargestellt. Für $p = 4$ haben wir die normale uns bekannte Reihenfolge (vgl. z. B. Abb. 119b), für $p = 2$ jedoch nicht. Es läßt sich jedoch zeigen, daß auch die für $p = 2$ sich ergebende Zonenverteilung die Ausbildung eines

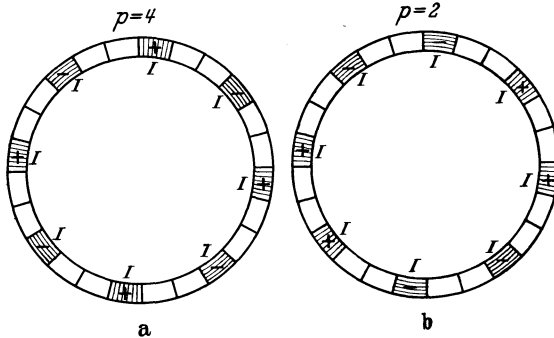


Abb. 158. Zur Bestimmung der Polzahl bei einer polumschaltbaren Wicklung.

hinreichend symmetrischen Drehfeldes gewährleistet.

Welche Polzahl die Wicklung bei den beiden Schaltungen hat, erkennt man am einfachsten, wenn man die Spulenseiten eines Stranges ins Auge faßt. Bei der oberen Verteilung ($p = 4$) wechseln die Spulenseiten beim

Durchlaufen des Ankerumfangs achtmal das Vorzeichen, bei der unteren Verteilung ($p = 2$) jedoch nur viermal (Abb. 158).

Um den Umlaufsinn des Drehfeldes in beiden Fällen zu erkennen, faßt man nur die positiven Spulenseiten der drei Stränge ins Auge (Abb. 157). Die Reihenfolge I—II—III erhält man bei der Schaltung für $p = 4$, wenn man den Zonenplan von links nach rechts durchläuft, bei der Schaltung

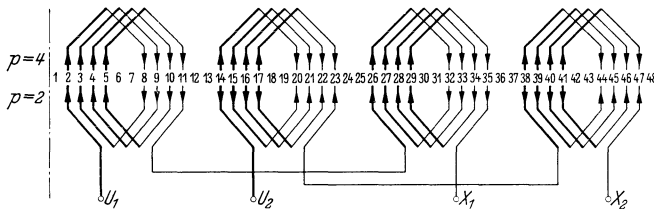


Abb. 159. Wicklungsstrang einer polumschaltbaren Zweischichtwicklung.

für $p = 2$ jedoch, wenn man von rechts nach links fortschreitet. Der Umlaufsinn des Drehfeldes ist also in beiden Fällen verschieden, falls der Anschluß an das Drehstromnetz in gleicher Weise erfolgt. Um für beide Schaltungen die gleiche Drehrichtung des Motors zu erhalten, muß man daher beim Umschalten zwei Netzzuleitungen tauschen.

Das hier beschriebene Umschaltverfahren für zwei im Verhältnis 1 : 2 stehende Polzahlen läßt sich auch bei Zweischichtwicklungen verwenden. Die Spulenweite kann so gewählt werden, daß sie zwischen den Polteilungen der beiden Polzahlen liegt (etwa $\frac{2}{3}$ der größeren Pol-

teilung); meistens macht man sie jedoch gleich oder annähernd gleich der kleineren Polteilung.

Ein Wicklungsstrang einer solchen umschaltbaren Zweischichtwicklung für die Polpaarzahlen $p = 2$ und $p = 4$ ist in Abb. 159 dargestellt. Die beiden anderen Stränge erhält man, wenn man den gezeichneten um $\frac{2}{3}$ und $\frac{4}{3}$ der Polteilung der kleineren Polzahl, also bei der dargestellten Wicklung um 8 und 16 Nutteilungen verschiebt.

Die sowohl bei der Einschicht- als auch bei der Zweischichtwicklung entstehenden beiden Wicklungsteile eines Stranges können in Reihe oder parallel geschaltet werden, die Stränge entweder in Stern oder in Dreieck. Daraus ergeben sich vier Schaltungsmöglichkeiten für jede Polzahl. Beim Übergang von einer Polzahl auf die andere wird fast stets eine Änderung der Schaltung vorgenommen; dies ist zweckmäßig, um bei beiden Polzahlen auf günstige Werte für die Stärke des magnetischen Feldes im Luftspalt zwischen Ständer und Läufer zu kommen. Die magnetische Dichte im Rücken von Ständer und Läufer ist stets bei der kleineren Polzahl am größten; dieser größte Wert ist für die Bemessung der Rückenlänge maßgebend.

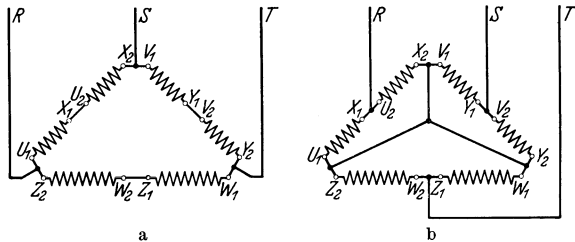


Abb. 160. Einfachste Umschaltung einer polumschaltbaren Wicklung (Verhältnis 1 : 2).

a) große Polzahl, b) kleine Polzahl.

Bei der Wahl der Schaltungen ist man meistens auch darauf bedacht, daß möglichst wenig Wicklungsenden an das Klemmbrett zu führen sind, und daß der Umschalter möglichst einfach wird. Die günstigste Schaltung in dieser Hinsicht, die auch hinsichtlich der magnetischen Verhältnisse brauchbar ist, hat Reihenschaltung in Dreieck bei der großen Polpaarzahl und Parallelschaltung in Stern bei der kleinen Polpaarzahl. Die Art der Umschaltung geht aus Abb. 160 hervor.

Will man mehr als zwei verschiedene Drehzahlen haben, so versieht man meistens die Maschine mit zwei Wicklungen, die in den gleichen Nuten liegen. Mit einer polumschaltbaren Wicklung und einer nicht umschaltbaren lassen sich drei Drehzahlen, mit zwei umschaltbaren Wicklungen vier Drehzahlen erzielen.

Den Läufer eines polumschaltbaren Motors versieht man nach Möglichkeit mit einer Käfigwicklung, weil diese unter den praktisch vorkommenden Verhältnissen für alle Polpaarzahlen paßt. Möglich ist aber auch die Verwendung eines Schleifringläufers, der dann ebenfalls eine polumschaltbare Wicklung nach Art der Ständerwicklungen erhält; bei

der Umschaltung des Ständers ändert sich in der halben Läuferwicklung die Stromrichtung. Jeder Wicklungsstrang besteht auch hier

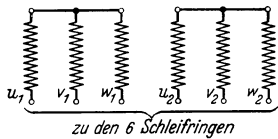


Abb. 161. Läuferwicklung für Polumschaltung im Verhältnis 1 : 2.

aus zwei Wicklungsteilen, deren Anfänge getrennt herauszuführen sind; dafür sind sechs Schleifringe notwendig. Ein Schleifring läßt sich sparen, wenn man je einen Punkt der beiden Wicklungsteile miteinander verbindet (z. B. U_1 mit U_2); die Strombelastung der Schleifringe ist dann aber nicht mehr gleichmäßig. Das Anlassen kann entweder mit zwei gekoppelten dreiphasigen Anlassern oder mit einem sechsphasigen Anlasser erfolgen (Abb. 161).

G. Maßnahmen zur Unterdrückung zusätzlicher Stromwärmeverluste.

Wenn die in einer Nut liegenden Leiter in radialer Richtung eine bestimmte Höhe überschreiten, so treten infolge von Stromverdrängung zusätzliche Stromwärmeverluste im Leiter auf. Die Stromverdrängung wird dadurch hervorgerufen, daß die in der Nut tiefer liegenden Schichten des Leiters von einem größeren Teil des magnetischen Nutenfeldes umfaßt werden als die höher gelegenen Schichten. Dies hat zur Folge, daß der Strom sich nicht gleichmäßig über die einzelnen Schichten des Leiters verteilt, sondern in die oberen Schichten „verdrängt“ wird. Der Leiter hat infolgedessen für Wechselstrom einen höheren Widerstand als für Gleichstrom; es treten daher bei Wechselstrom auch höhere Stromwärmeverluste in ihm auf.

Die gesamten bei Wechselstrom entstehenden Stromwärmeverluste teilt man in zwei Teile auf, in die Gleichstromverluste, die auftreten, wenn der Leiter von einem gleich großen Gleichstrom durchflossen wird, und die zusätzlichen Stromwärmeverluste, die durch die Stromverdrängung verursacht werden. Die Größe der zusätzlichen Verluste gibt man in der Form an, daß man sie auf die Gleichstromverluste des gleichen Leiters bezieht. Für gebräuchliche Abmessungen von Nuten und Nutenleitern (bei einer und zwei Schichten) sind für die Frequenz von 50 Hz in Abb. 162 die auf die Gleichstromverluste bezogenen zusätzlichen Verluste in Kurvenform angegeben. Die Kurven gelten nur für Leiter aus Kupfer. Sie lassen ohne weiteres erkennen, welche Werte die Höhe eines Leiters nicht überschreiten darf, wenn ein bestimmter Betrag der bezogenen Zusatzverluste zugelassen werden soll. Überschreiten die Leiter diese Höhe, so muß man sie in einzelne flach übereinanderliegende Teilleiter zerlegen, zwischen die dünne Isolierschichten gelegt werden.

Die Zerlegung in Teileiter allein genügt jedoch im allgemeinen nicht. Man muß vielmehr dafür sorgen, daß die Teileiter ihre Höhen-

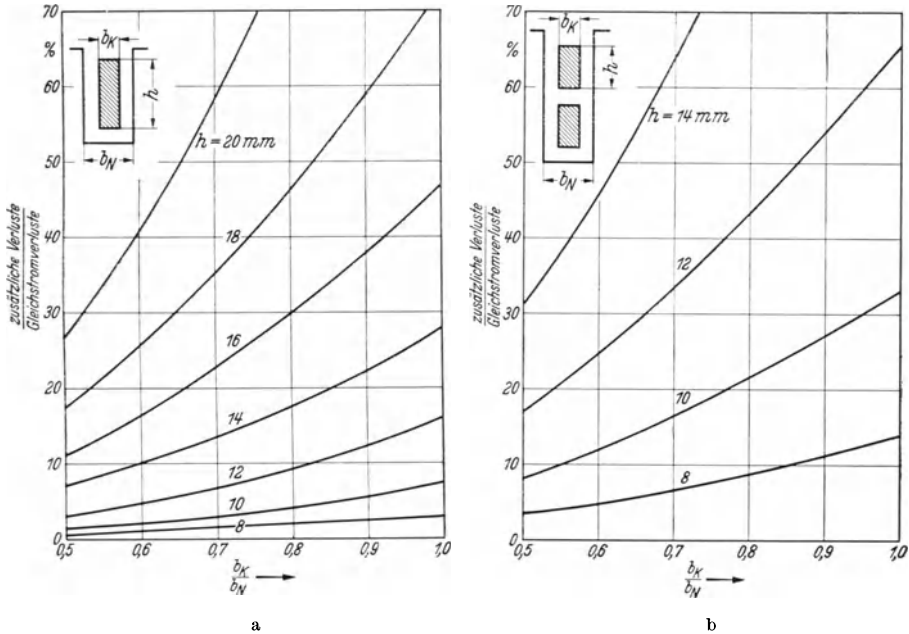


Abb. 162. Zusätzliche Stromwärmeverluste in Nutenleitern aus Kupfer bei 50 Hz.
a) bei Einschichtwicklungen, b) bei Zweischichtwicklungen.

lage innerhalb des Gesamtleiters ändern. Dies geschieht dadurch, daß man den Leiter im Spulenkopf verdrillt, d. h. um 180° um seine Achse dreht, so daß z. B. der Teileiter, der vor der Verdrillungsstelle an unterster Stelle gelegen hat, hinter der Verdrillungsstelle die höchste Lage einnimmt. Es ist im allgemeinen ausreichend, wenn eine solche Verdrillung in jeder Spule einmal, und zwar zweckmäßig in der Mitte, vorgenommen wird. Die Ausführung einer Verdrillungsstelle in einem Spulenkopf zeigt Abb. 163.

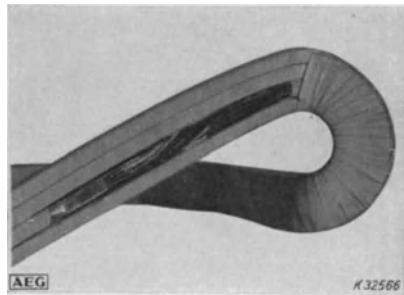


Abb. 163. Verdrillung im Spulenkopf (Werkbild AEG).

Bei Stabwicklungen wird die zusätzliche Stromwärme in anderer Weise unterdrückt; die Nutenleiter werden hier als sog. Kunststäbe ausgeführt. Jeder Nutenleiter besteht aus einer Anzahl flacher Teileiter von geringer Höhe. Die Teil-

leiter werden so geformt und unter Zwischenlage von Isolierstoff zusammengelegt, daß jeder Teilleiter nach und nach alle Hörschichten des ganzen Stabes durchläuft. Ein Beispiel eines derartigen Kunststabes ist der Roebelstab (Abb. 164).

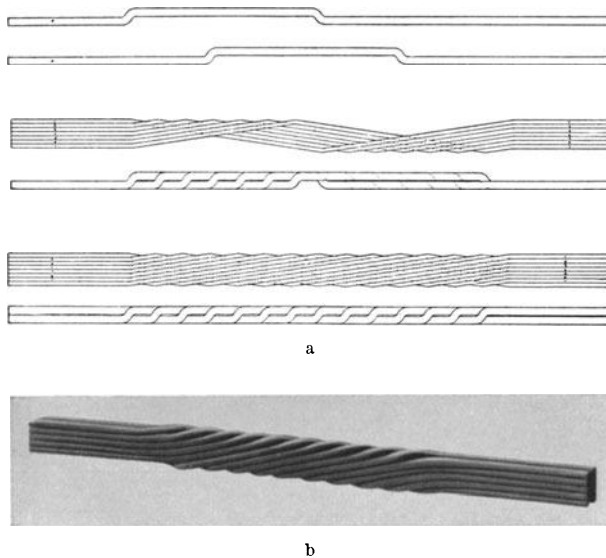


Abb. 164. Verdrillter Stab (Roebelstab) (Werkbild BBC).
a) schematische Darstellung des Aufbaues, b) fertiger Stab.

Bei ihm liegen zwei Teilleiterschichten nebeneinander; die einzelnen Teilleiter wechseln an der höchsten und tiefsten Stelle von einer Schicht in die andere. Jeder Teilleiter durchläuft innerhalb der Nut gewissermaßen einen Schraubengang.

H. Die Herstellung der Wechselstrom-Ständerwicklungen.

1. Drahtwicklung.

Für Drahtwicklungen gibt es mehrere Verfahren der Herstellung; die Spulen werden entweder unmittelbar in die Nuten der Maschinen eingewickelt oder außerhalb der Maschine vorbereitet und dann in halbfertigem Zustande in die Nuten eingelegt oder schließlich außerhalb der Maschine ganz fertiggestellt und dann eingebaut.

2. Eingeträufelte Wicklung.

Die eingeträufelte Wicklung oder Träufelwicklung findet insbesondere bei den Ständern kleiner und kleinster Maschinen Anwendung, bei denen, sofern sie für die üblichen Spannungen bemessen sind, die Windungs-

zahl einer Spule verhältnismäßig groß, der Drahtquerschnitt verhältnismäßig klein ist. Die Spulen werden bei dieser Wicklungsart außerhalb der Maschine in ebener Form gewickelt, aber nicht isoliert; um ein Auseinanderfallen der Spulen während des Transportes innerhalb der Werkstatt zu verhindern, werden sie lediglich an einzelnen Stellen zusammengebunden. Die Drähte der Spulenseiten werden dann einzeln durch den Nutenschlitz der hier ausschließlich angewandten halboffenen Nuten eingelegt. Die Nuten sind vorher mit vorgefalteten Streifen aus Isolierstoff ausgekleidet worden, die man oft durch den Nutenschlitz nach außen vorstehen läßt, um zu verhindern, daß die Isolation der Drähte beim Einlegen an den scharfen Kanten des Nutenschlitzes beschädigt wird (vgl. Einträufeln von Stromwenderwicklungen, S.52).

Um eine möglichst günstige Raumausnutzung zu erzielen und ein kreuzweises Übereinanderlegen der einzelnen Drähte zu verhindern, wird während des Einträufelns ab und zu ein flacher Dorn in die Nut eingeführt, mit dem die Drähte in eine zueinander parallele Lage gedrückt werden. Wenn die Drahtisolation nicht sehr widerstandsfähig ist (z. B. bei Lackdraht), wird sie hierdurch leicht beschädigt. Man schiebt dann besser ab und zu einen passenden Streifen aus Preßspan oder ähnlichem Stoff in die Nut, setzt darauf einen durch den Nutenschlitz durchtretenden „Treiber“ und gibt auf diesen leichte Hammerschläge.

In welcher Weise das Einträufeln in die Nut erfolgt, zeigt Abb. 165 an einer Zweischichtwicklung; bei der Einschichtwicklung ist der Vorgang der gleiche. Auf Abb. 165 sind im Vordergrund noch einige zum Einträufeln vorbereitete Spulen zu sehen.



Abb. 165. Einträufeln von Spulen einer Zweischichtwicklung (Werkbild Siemens).

Nach dem Einlegen aller Leiter werden mittels des Dornes auch die (entsprechend abgeschnittenen) Ränder der Nutisolation übereinander gelegt (vgl. Abb. 59b) und dann die Nut durch einen Keil verschlossen. Als Keil genügt bei kleinen Maschinen ein Streifen aus Preßspan, Fiber, Hartpapier usw., bei größeren werden Keile aus getränktem Hartholz oder künstlichen Preßstoffen verwendet.

Nach dem Einbau einer Spule müssen im allgemeinen die Spulenköpfe in radialer Richtung nach außen abgebogen werden; dies geschieht durch Schläge mit einem weichen Holz- oder Gummihammer. Wenn die Spule die richtige Lage und Form hat, werden die Spulenköpfe meist mit Band umwickelt; zum Durchziehen des Bandes durch die schmalen Zwischenräume zwischen den einzelnen Spulen und auch zwischen Spulen und Eisenkörper dienen besondere Haken. Die Spulenköpfe werden entweder dicht (etwa halbüberlappt) bewickelt, oder man begnügt sich

bei nicht zu hohen Spannungen und wenn keine besonders hohen Ansprüche an die Isolation gestellt werden, mit einer weitläufigen Bewick-



Abb. 166. Wickelgestell für kleinere Ständer (Werkbild Garbe-Lahmeyer).

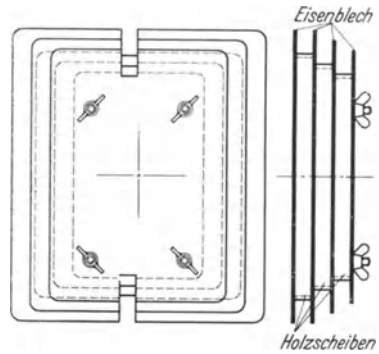


Abb. 167. Wickelform für eine aus 3 Spulen verschiedener Weite bestehende Spulengruppe.

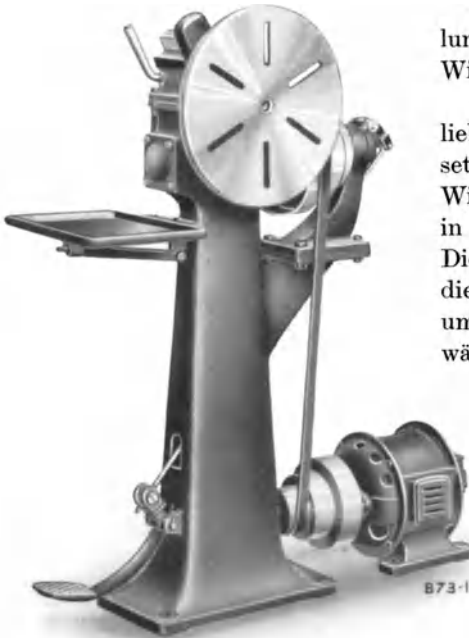


Abb. 168. Wickelmaschine für Spulen verschiedener Art (Werkbild Micafil).

lung, die für die Kühlung der Wicklung überdies günstiger ist.

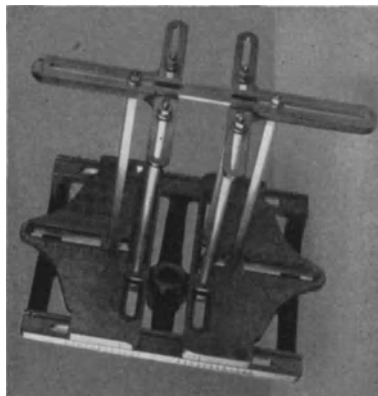
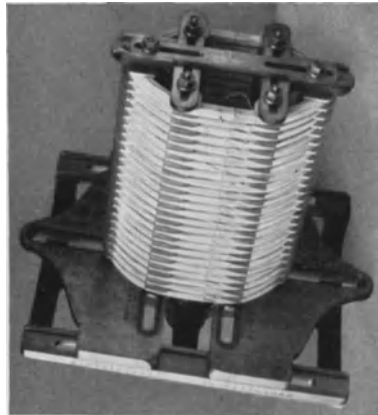
Um den Ständer in jede beliebige Lage drehen zu können, setzt man ihn während des Wickelvorganges zweckmäßig in ein Gestell nach Abb. 166. Dieses liegt unten auf Rollen, die eine leichte Beweglichkeit um die waagerechte Achse gewährleisten. Die Rollen sitzen wieder auf einem drehbaren Tisch, der eine Bewegung um die senkrechte Achse gestattet. Eine ungewollte Drehung des Tisches wird durch eine Sperre verhindert; durch einen Fußhebel erfolgt die Freigabe.

Die für das Einträufeln benutzten Spulen werden auf Wickelformen hergestellt. Um Lötverbindungen zu sparen, wickelt man heute meistens die Spulen

einer Spulengruppe zusammenhängend. Dies ist sowohl bei Spulen gleicher Weite als auch bei Spulen verschiedener Weiten möglich. Eine Wickelform für eine aus drei Spulen verschiedener Weite bestehende Spulengruppe zeigt z. B. Abb. 167. Sie besteht aus Holzscheiben mit Blechwänden; die Einschnitte in die Ränder der Blechwände dienen zum Überleiten des Drahtes von einer Spule zur andern; außerdem ermöglichen sie das Zusammenbinden der gewickelten Spulen, so daß ein Auseinanderfallen während des Transportes verhindert wird. Die Wickelformen werden auf Wickelmaschinen aufgespannt, von denen ein Ausführungsbeispiel in Abb. 168 dargestellt ist.

Zur Herstellung von Spulen gleicher Weite kann man Einrichtungen benutzen, die sich auf die jeweils erforderlichen Spulenabmessungen einstellen lassen. Eine solche Einrichtung und ihre Anwendung zeigt Abb. 169a bis c; auf ihr läßt sich eine ganze Reihe von Spulen gleichzeitig wickeln. Auch für die Herstellung von Träufelspulen für kleine Stromwenderanker ist die Einrichtung geeignet.

Auch für größere Maschinen kann die Träufelwicklung Verwendung finden. Der Draht braucht dabei nicht immer Runddraht zu sein, son-



c

b

a

Abb. 169. Wickelform für Spulen gleicher Weite (Werkbild Schümann).
a) Gestell, b) Gestell mit fertigem auf Führungsstücke gewickelten Spulensatz, c) abgenommener Spulensatz mit Führungsstücken.

dern etwa Flachdraht, der so breit ist wie die nutzbare Nutenbreite. Die Nut hat dann zweckmäßig die in Abb. 4f dargestellte Form. Bei der Verwendung von Runddraht hat die Nut eine der Formen c, d, g und h nach Abb. 4. Da nur Drähte eingeträufelt werden können, deren Durchmesser geringer ist als die Breite des Nutenschlitzes, muß man bei der Träufelwicklung den gesamten durch die Stromstärke bedingten Leiterquerschnitt oft auf zwei oder mehr parallel gewickelte Einzeldrähte aufteilen.

Als eine Abart der Träufelwicklung kann das Wicklungsverfahren angesehen werden, bei dem die Windungen einzeln von Hand unmittelbar in die Nuten eingewickelt werden. Dieses Verfahren wird zuweilen bei kleinen Maschinen, bei Instandsetzungsarbeiten sowie bei Drahtwicklungen für Läufer angewendet.

3. Eingefädelte Wicklung.

Die Verwendung der Träufelwicklung bei größeren Maschinen ist selten. Insbesondere bei hohen Spannungen ist es schwierig, bei dieser Wicklungsart eine ausreichende Isolation der Windungen gegeneinander und gegen Eisen zu erzielen. Bei größeren Stromstärken muß man, wie schon erwähnt, den Leiter in mehrere parallele Drähte unterteilen, um ihn durch den Nutenschlitz zu bringen; hierdurch wird die Ausnutzung des Nutenraumes verschlechtert.

Diese Nachteile werden vermieden bei der eingefädelten Wicklung. Bei ihr werden als Nutisolation zunächst sog. Nutenhülsen in die Nuten eingeschoben, die nahtlos aus Hartpapier oder Mikanit hergestellt sind (Abb. 170). Der Draht wird durch diese Hülsen durchgezogen. Um den Spulenköpfen von vornherein die gewünschte Form zu geben, werden beim Wickeln an den Stirnseiten der Maschine Holzformen angebracht, die so zerlegbar sind, daß sie nach Fertigstellung einer Spule leicht beseitigt werden können (ähnlich wie in Abb. 179). Eine



AEG

Abb. 170. Nutenhülsen verschiedener Form
(Werkbild AEG).

geordnete Lage der Drähte in der Nut wird durch besondere Hilfseinrichtungen erzielt; man füllt z. B. die Nutenhülsen vor dem Bewickeln mit Stahlnadeln aus, die nach Zahl und Stärke den Drähten einer Spulenseite entsprechen. Vor dem Einziehen einer Windung wird dann jeweils die Nadel herausgezogen, deren Platz die Windung einnehmen soll.

Der Draht wird in solcher Länge abgeschnitten, daß eine ganze Spule mit dem abgeschnittenen Stück gewickelt werden kann. Bei großer Windungszahl je Spule sind dann insbesondere beim Durchziehen der

ersten Windungen große Drahtlängen durch die Nuten zu ziehen. Um eine Beschädigung der Isolation dabei zu verhindern, wird der Draht vor dem Wickeln getränkt; außerdem werden häufig zwischen die einzelnen Drahtlagen einer Nut dünne Streifen aus Preßspan gelegt. Um das Durchziehen zu erleichtern, wird der Draht mit einem glättenden Mittel (Talkum) eingerieben. Den Vorgang des Einfädels läßt Abb. 171 erkennen. Die eingefädelt Wicklung wird bei Maschinen mittlerer Leistung und für Spannungen bis etwa 5000...6000 Volt angewandt.

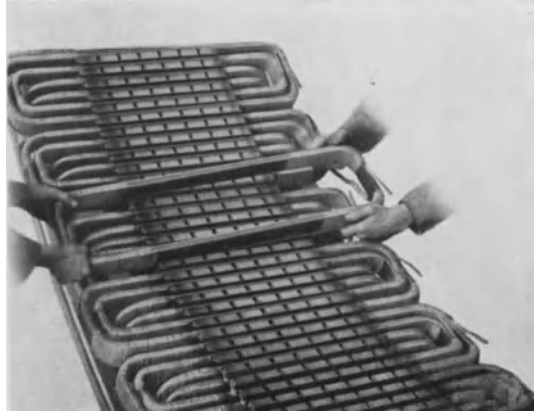


Abb. 172. Einlegen von Formspulen in offene Nuten (Werkbild BBC).

Für höhere Spannungen ist die eingefädelt Wicklung nur dann brauchbar, wenn die Zwischenräume zwischen den einzelnen Drähten in den Nutenhülsen und auch in den Wicklungsköpfen so vollständig mit Füllmasse (Kompoundmasse) ausgefüllt werden können, daß keine Lufträume mehr vorhanden sind (vgl. Abschnitt VIII F). Dies gelingt nur, wenn der Ständer ganz in eine Tränkanlage eingesetzt werden kann. Bei großen Ständerabmessungen ist dies meistens nicht möglich.

4. Wicklungen mit Formspulen.

Formspulen werden außerhalb der Maschine gewickelt, in die endgültige Form gebracht, fertig isoliert und dann in die Nuten eingelegt; ihre Anwendung setzt im allgemeinen offene Nuten voraus. Das Einlegen einer Spule einer dreiphasigen Einschichtwicklung in offene Nuten zeigt Abb. 172. Nach dem Einlegen der Spulen werden



Abb. 171. Einfädelt einer Ständerwicklung (Werkbild Siemens).

die Nuten durch Keile aus getränktem Hartholz, Fiber oder dergleichen geschlossen.

Formspulen zum Einlegen in offene Nuten stellen vom isolations-technischen Standpunkt aus die höchstwertige Wicklungsart dar. Bei den höchsten vorkommenden Maschinenspannungen finden sie fast ausschließlich Anwendung.

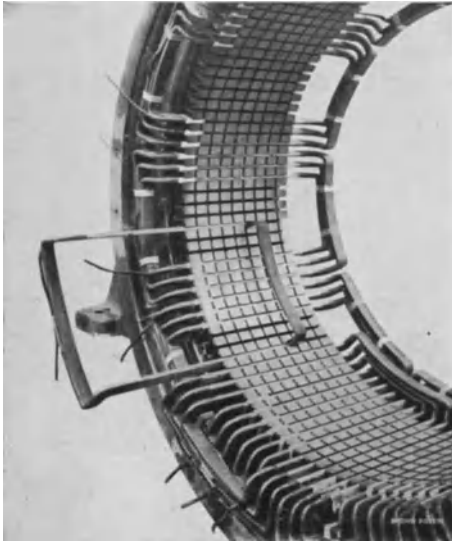


Abb. 173. Einschieben von Formspulen in halbgeschlossene Nuten (Werkbild BBC).

In besonderen Fällen werden Formspulen auch zum Einschieben in die Nut hergestellt (Abb. 173). Die Nuten brauchen dabei nicht ganz offen zu sein, jedoch muß der Schlitz immerhin so weit sein, daß der radiale Teil der Stirnverbindung durch ihn hindurchgeht.

Bei der Zweischichtwicklung, die neuerdings insbesondere für Maschinen mittlerer und großer Leistung in Verbindung mit offenen Nuten sehr bevorzugt wird, werden, sofern es sich um Drahtwicklung handelt, ausschließlich Formspulen angewendet. Eine Gruppe von Formspulen für eine solche Wicklung zeigt Abb. 174; die Spu-

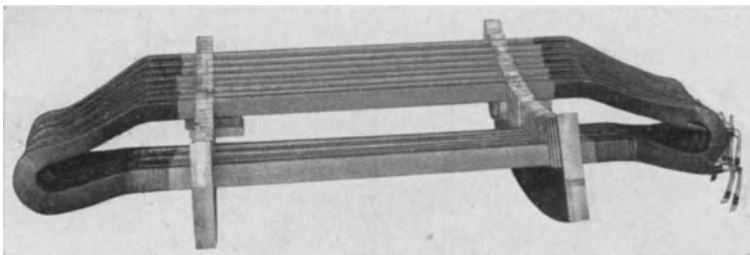


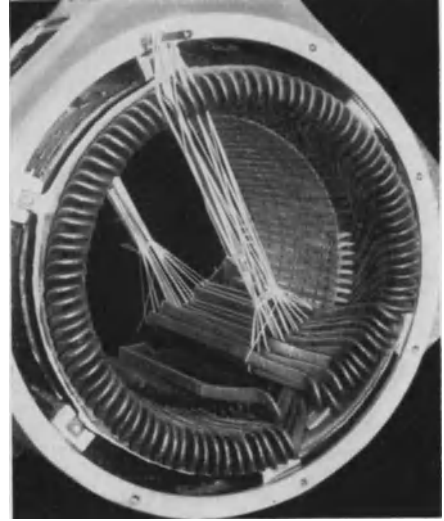
Abb. 174. Gruppe von Formspulen einer Zweischichtwicklung (Werkbild AEG).

len liegen in Holzrahmen, die eine Nutung haben, die der Nutung der Maschine genau entspricht und die zum Einpassen der Spulen dienen. Das Einlegen dieser Spulen in die Maschine (vgl. Abb. 140) erfolgt in ähnlicher Weise wie das Einlegen der Wicklung bei Gleichstromankern.

Die Anwendung offener Nuten hat nicht nur den großen Vorteil, daß die Spulen hochwertig isoliert werden können, auch das Auswechseln schadhafter Spulen ist ohne große Schwierigkeiten möglich, ohne daß



a



b

Abb. 175a u. b. Auswechseln einer schadhafter Ständerspule einer Zweischichtwicklung (Werkbild AEG).

bei der Auswechsellung die noch brauchbaren Spulen gefährdet werden. Dies gilt sowohl für die Einschicht- als auch für die Zweischichtwicklung. Das Auswechseln einer Spule einer Zweischichtwicklung zeigt Abb. 175a u. b. Die in der Oberschicht liegenden Spulenseiten derjenigen Spulen, die die schadhafte Spule überdecken, werden nach Entfernen des Nutenkeils mit besonderen Werkzeugen hochgehoben und festgebunden; die schadhafte Spule läßt sich dann leicht durch eine neues ertzen.

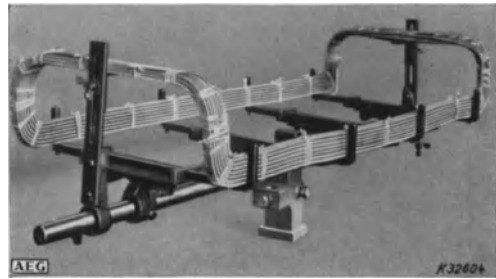


Abb. 176. Formspule einer Einschichtwicklung in einer Richtvorrichtung (Werkbild AEG).

Bei der Herstellung einer Spule wird der Draht zunächst auf eine Wickelform aufgewickelt; die gewickelte Spule wird sodann in die richtige Form gebracht. Bei der Einschichtwicklung sind lediglich die Wicklungsköpfe abzubiegen (Abb. 176). Bei der Zweischichtwicklung werden zunächst die Spulen in langgestreckter ebener Form,

zuweilen auch in Fischform (vgl. S. 47) gewickelt; die Leiter der Spulenseiten werden behelfsmäßig zusammengebunden. Alsdann werden

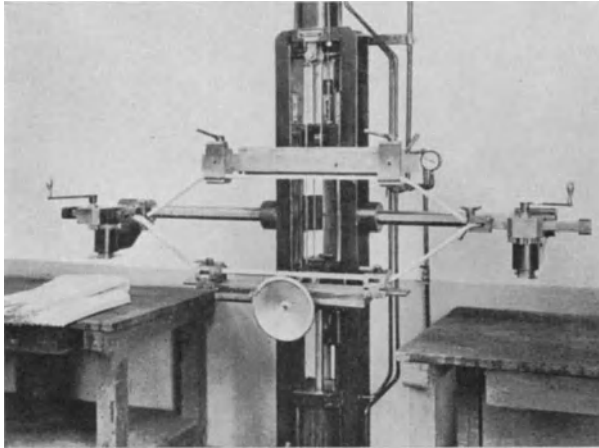


Abb. 177. Spreizeinrichtung für Spulen von Zweischichtwicklungen mit Preßluftantrieb (Werkbild Siemens).

die Spulen in gleicher Weise wie die Spulen der Stromwenderwicklungen (vgl. S. 47) in die richtige Form gezogen (gespreizt) und weitläufig

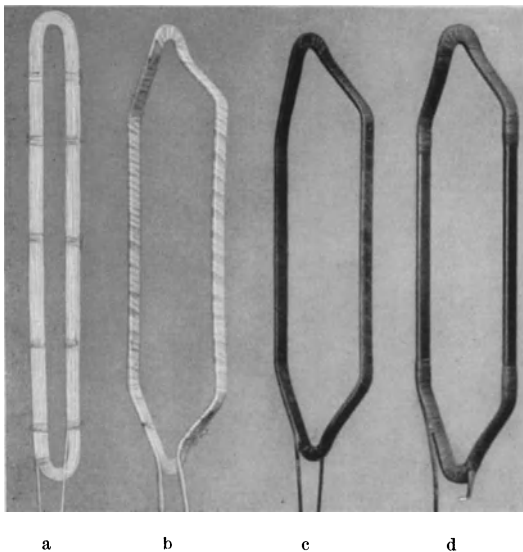


Abb. 178. Formspule einer Zweischichtwicklung in verschiedenen Zuständen während der Herstellung (Werkbild Siemens).

mit Band umwickelt. Für das Spreizen werden hier häufig Einrichtungen verwendet, die mit Preßluft arbeiten (Abb 177). Die so vorbereiteten Spulen kommen in die Tränkanlage, in welcher die Hohlräume zwischen den einzelnen Leitern mit Füllmasse ausgefüllt werden. Schließlich werden die Spulenseiten umpreßt und die Spulenköpfe mit Band isoliert (vgl. Abschnitt VIII D bis F). Eine solche Formspule in verschiedenen

Zuständen während der Herstellung zeigt Abb. 178.

5. Wicklungen mit Halbformspulen.

Die Halbformspule findet dort Anwendung, wo man die Vorteile der Ganzformspule nach Möglichkeit auch bei halbgeschlossenen Nuten anwenden will. Die beiden in den Nuten liegenden Spulenseiten und ein Spulenkopf werden auch bei einer Halbformspule außerhalb der Maschine fertig isoliert. Der zweite Spulenkopf ist jedoch aufgeschnitten; die freien Enden sind nicht abgebogen, sondern haben die Richtung der Spulenseiten. In dieser Form kann die Spule von einer Stirnseite her in die Nuten eingeschoben werden. Nach dem Einschieben werden die einzelnen Leiter im offenen Spulenkopf abgebogen, wobei Holzformen

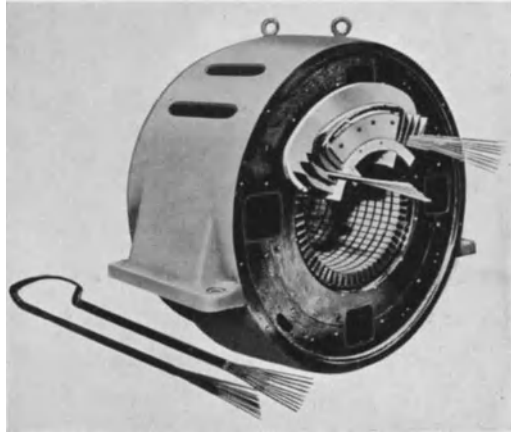


Abb. 179. Ständer mit Halbformspulen und Holzformen für die Verlegung der Stirnverbindungen (Werkbild BBC).

Nuten eingeschoben werden. Nach dem Einschieben werden die einzelnen Leiter im offenen Spulenkopf abgebogen, wobei Holzformen

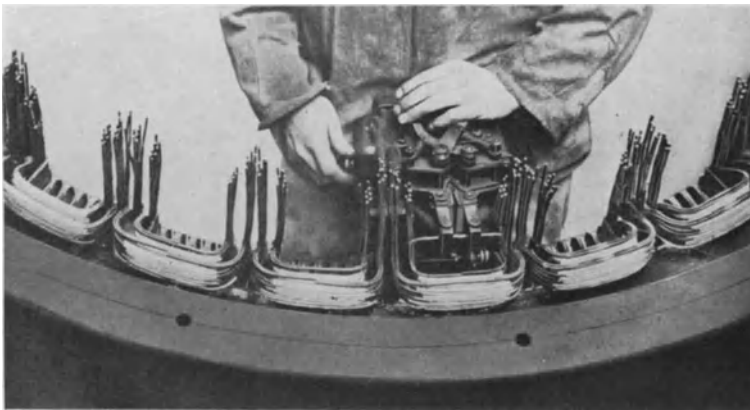


Abb. 180. Herstellen von Schweißverbindungen bei Halbformspulen (Werkbild Siemens)

benutzt werden, welche die richtige Form des Spulenkopfes sichern (Abb. 179). Die zusammengehörigen Leiter werden nunmehr durch Löten oder häufiger durch Schweißen miteinander verbunden. Das Herstellen von Schweißverbindungen zeigt Abb. 180. Ein kleiner Schweißtransformator hat eine Sekundärwicklung, deren Enden als Zangen aus-

gebildet sind. Sie fassen die beiden zu verbindenden Leiterenden und stoßen sie stumpf zusammen. Der Strom wird eingeschaltet und schaltet sich nach erfolgter Schweißung selbsttätig ab. Werden Lötverbindungen hergestellt, so wird Hartlot oder Silberlot benutzt.

Zur Herstellung der Spulen werden die einzelnen Leiter zunächst auf die richtige Länge abgeschnitten und in der Weise zusammengelegt,

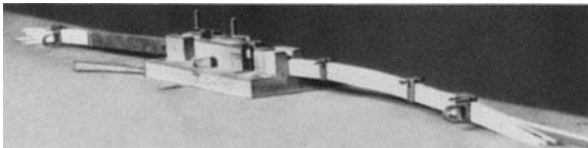


Abb. 181. Herrichten von Drahtenden für Halbformspulen (Werkbild Garbe-Lahmeyer).

wie sie später in der Nut liegen sollen. Das Zusammenlegen ist einfach, wenn es sich um Flachdrähte handelt, die die ganze nutzbare

Nutenbreite einnehmen; liegen hingegen mehrere Leiter nebeneinander, so sind besondere Formen und Klammern notwendig, um die Leiter zusammenzuhalten (Abb. 181).

Das Leiterbündel wird sodann auf Biegeeinrichtungen in die richtige Form gebracht. Die Spulenseiten und der eine Spulenkopf werden fertig isoliert. Abb. 182 zeigt eine Spule während der Herstellung.

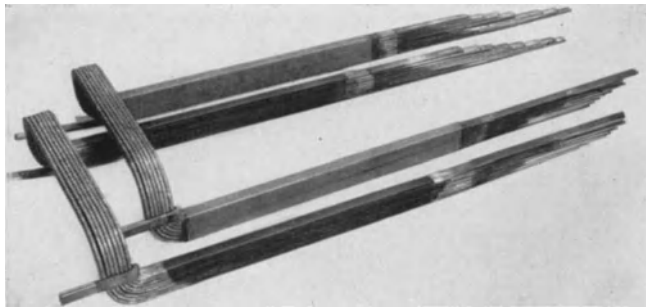


Abb. 182. Halbformspulen während der Herstellung (Werkbild AEG).

Da an den durch Löten oder Schweißen herzustellenden Verbindungsstellen die einzelnen Leiter nachträglich durch Umbandeln neu isoliert werden müssen, tritt an diesen Stellen ein stärkerer Isolationsauftrag auf. Es ist daher notwendig, die Verbindungsstellen gegeneinander versetzt anzuordnen. Zu diesem Zweck müssen schon beim Zusammensetzen der Spule die einzelnen Leiter so gelegt werden, daß ihre Enden gegeneinander versetzt sind (vgl. Abb. 182).

Zu den Wicklungen mit Halbformspulen kann man auch eine besondere Wicklungsart rechnen, die von den SSW zuweilen bei Maschinen großer Leistung (Turbogeneratoren) angewandt wird. Jede Spule wird

hier in zwei getrennten Teilen hergestellt; jeder Teil enthält eine Spulenseite und eine Stirnverbindung (Abb. 183). Die zu einer Nut gehörigen Leiter, die aus gepreßter Litze bestehen, werden zunächst isoliert (meistens durch Umwickeln mit Glimmer-Faserstoff-Band) und zu Bündeln vereinigt; die Bündel werden mit Füllmasse durchtränkt. Der in der Nut liegende Teil wird sodann durch Umpressen isoliert. Die Verbindung der einzelnen Leiter in der Maschine erfolgt durch Hartlöten der stumpf aneinandergelegten Leiterenden. In den Wicklungsköpfen werden die Bündel durch Umwickeln mit Band isoliert.

6. Stabwicklungen.

Bei den Stabwicklungen sind zwei Hauptarten der Herstellung zu unterscheiden. Die zweischichtigen Stabwicklungen nach Art der Stromwender-Wellenwicklungen (vgl. S. 106) werden in ähnlicher Weise wie diese hergestellt. Die Stäbe werden ebenso vorbereitet wie bei diesen (Abb. 62); Unterschiede bestehen nur darin, daß hier nur je ein Leiter quer zur Nut vorhanden ist, und daß nur ein Ende jedes Stabes vor dem Einbau in die richtige Lage gebogen wird. Das andere Ende bleibt zunächst gerade, um ein Einschieben des Stabes in die stets halbgeschlossene Nut zu ermöglichen. Nach dem Einbau wird dann das andere Stabende abgebogen. Die Verbindung der Stabenden erfolgt durch Zwingen wie bei den Stromwender-Stabwicklungen; eine gute elektrische Verbindung wird durch Verlöten erzielt.

Abb. 184 zeigt eine derartige Wicklung während der Herstellung. Die Stäbe sind eingeschoben, die geraden Enden erst teilweise abgebogen. Man sieht, wie gerade ein Stabende mittels eines übergeschobenen Rohres abgebogen wird. Vor dem Abbiegen der Enden sind bereits die Verbindungen der beiden Wellenzüge (vgl. S. 107; Verbindung U_2 mit



Abb. 183. Bündelspulen (Werkbild Siemens).



Abb. 184. Zweischichtige Ständer-Stabwicklung während der Herstellung (Werkbild Siemens).

X_1 in Abb. 148) hergestellt. Sie sind bereits mit weißem Band isoliert und daher im Bilde besonders deutlich erkennbar.

Das zweite Herstellungsverfahren wird hauptsächlich bei Maschinen großer Leistung angewandt. Nutenstäbe und Stirnverbindungen werden

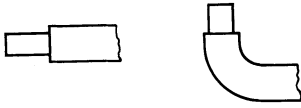


Abb. 185. Enden von Nutenstäben.

für sich getrennt hergestellt; jede Spule wird also aus vier Teilen zusammengesetzt. Die Nutenleiter sind gerade Stäbe, die nur an den Enden zuweilen um 90° abgebogen sind (Abb. 185); sie werden in die Nuten eingeschoben oder eingelegt. Vor dem

Einbau werden sie auf ihrer ganzen Länge mit einer aus Mikafolium hergestellten Isolation umkleidet; nur ein kurzes Stück an jedem Ende bleibt für das Anbringen der Stirnverbindungen frei. Zur Verbindung



Abb. 186.
Kröpfungsstelle von
Gabelverbindern.

der Stäbe miteinander dienen Bügel aus Kupfer, die oft Gabelform haben. Die Gabeln werden meistens in Evolventenform angeordnet; sie erhalten, wenn sie aus einem Stück hergestellt sind, in der Mitte, wo sie aus einer Ebene der Stirnverbindungen in die andere übertreten, eine Kröpfung (Abb. 186).

Zuweilen wird jede Gabel aber auch aus zwei Teilen hergestellt, die an der Kröpfungsstelle miteinander verlötet und verschraubt werden (Abb. 147). Die Bügel werden bis auf die Enden vor dem Einbau durch Umwickeln mit Band isoliert.

Wenn die Nutenstäbe eine bestimmte Höhe überschreiten, müssen sie, wie schon erwähnt, zur Verringerung der zusätzlichen Stromwärmeverluste aus verdrehten Teilleitern zusammengesetzt werden (vgl. Abb. 164). Die Teilleiter werden auf die richtige Länge abgeschnitten, in die richtige Form gebogen und sodann mit Zwischenlagen aus Isolierstoff (meist Glimmerpapier von etwa 0,2 mm Stärke) zum Stab zusammengesetzt. Die Zwischenlagen werden zuweilen auch nach dem Zusammensetzen der Teilleiter zwischengeschoben. An den Umleitungsstellen wird die Isolation verstärkt. Wenn zwei Schichten von Teilleitern vorhanden sind, wie beim Roebelstab, wird zwischen diese Schichten gewöhnlich Glimmerseide gelegt. Die Stäbe werden dann mit einem Bindemittel (Kunstharzmischung) bestrichen und unter Hitze zusammengedrückt; dadurch erzielt man einen mechanisch festen Zusammenhalt des Stabes. Bevor der Stab als Ganzes isoliert wird, findet oft noch eine Prüfung daraufhin statt, ob keine Teilleiter sich unmittelbar berühren. Dies kann mittels einer Prüflampe geschehen. An den Stabenden werden sodann die Teilleiter durch Hartlöten miteinander verbunden; die Enden werden oft durch Fräsen so hergerichtet, daß sie in zuverlässiger Weise mit den Bügeln verbunden werden können.

Die Verbindung der Stäbe mit den Bügeln oder Gabeln kann in verschiedener Weise erfolgen; sie muß hinreichende mechanische Festigkeit und geringen elektrischen Übergangswiderstand besitzen. In Abb. 147 sind z. B. die Enden der Gabeln mit Laschen versehen, die mit den Stabenden verschraubt und verlötet werden. Eine ähnliche Verbindungsart zeigt Abb. 187. Hier sind an den Enden der Gabeln Schnallen durch Hartlötungen befestigt; diese werden über die Stabenden geschoben und mit diesen vernietet, verkeilt und verlötet.

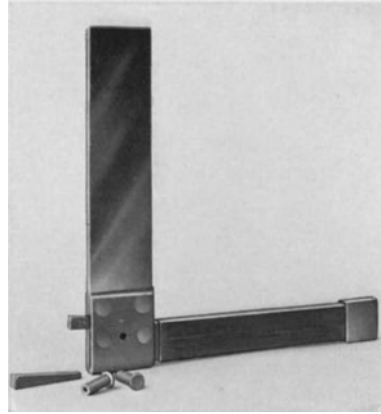


Abb. 187. Verbindung zwischen Nutenstab und Gabelverbinder (Werkbild Siemens).

Die Verbindungsstellen bleiben zuweilen unisoliert (Abb. 147), meistens werden sie aber ebenso wie die andern Teile der Stirnverbindungen durch Umwickeln mit Band sorgfältig isoliert. Derartige isolierte Verbindungsstellen zeigt Abb. 144.

VII. Mehrphasige Läuferwicklungen.

Mehrphasige Wicklungen im Läufer haben die Asynchronmaschinen. Die Draht- und Stabwicklungen sind fast stets dreiphasige Wicklungen, deren grundsätzliche Anordnung mit derjenigen der dreiphasigen Ständerwicklungen übereinstimmt. Nur selten kommen bei Maschinen kleiner Leistung zweiphasige verkettete Wicklungen vor, die dann ebenfalls grundsätzlich mit den entsprechenden Ständerwicklungen übereinstimmen.

A. Drahtwicklungen.

Drahtwicklungen kommen nur bei Maschinen für kleine Leistungen vor. Da die Spannung der Wicklung, die von der Windungszahl abhängt, beim Läufer keinen bestimmten Wert zu haben braucht (genormt sind nach DIN VDE 2651 nur bestimmte Spannungsbereiche), so wählt man zweckmäßig die Windungszahl so, daß man den Raum in der Nut möglichst gut ausnutzt, und daß die Herstellung der Wicklung möglichst einfach wird. Da die Läuferferriten bei den kleinen Maschinen schmal und tief sind, kann die Drahtstärke zuweilen so gewählt werden, daß sie gerade die nutzbare Breite der Nut ausfüllt. Man erhält dann nur wenige Leiter je Nut, die alle in radialer Richtung übereinander liegen

(Abb. 188). Bei Maschinen mit Leistungen bis 2...3 kW muß jedoch im allgemeinen eine größere Zahl von Leitern je Nut vorgesehen werden, weil sonst die Läuferspannung zu gering oder der Strom verhältnismäßig zu groß werden würde. Die Wicklung wird durch Einfädeln oder durch unmittelbares Einlegen des Drahtes in die Nuten hergestellt. Beim unmittelbaren Einlegen muß

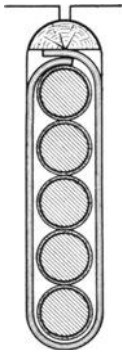


Abb. 188. Querschnitt durch eine Läufernut mit Drahtwicklung.

mit Rücksicht auf die geringe Breite des Nutenschlitzes meistens mit Paralleldrähten gearbeitet werden. Die Nuten sind halbgeschlossen mit schmalen Schlitz, zuweilen bei kleinen Maschinen auch ganz geschlossen. Der Anordnung der Stirnverbindungen nach sind die Wicklungen bei gerader Polpaarzahl Zwei-Etagen-Wicklungen. Die Stirnverbindungen der einen Etage werden nach der Welle hin abgebogen. Die Spulengruppen, deren Stirnverbindungen dieser Etage angehören, werden zuerst gewickelt. Passende Holzformen, die an die Stirnseiten gesetzt werden, sorgen dafür, daß die Drähte gleich ihre richtige Lage erhalten. Die Spulenköpfe der zuletzt eingewickelten Spulengruppen, die in der zweiten Etage liegen, werden meistens nicht zur Welle hin abgebogen.

Auch bei ungerader Polpaarzahl sind Zwei-Etagen-Wicklungen möglich, wenn eine Spulengruppe gekröpft wird; die Spulenköpfe sind dann meistens nach Abb. 128 c geformt. Es kommen aber auch Drei-Etagen-Wicklungen — meistens mit Spulenköpfen nach Abb. 121 a — vor.

Die Verbindung der Wicklung mit den Schleifringen erfolgt bei der Drahtwicklung so, daß die Anfänge der Stränge in Ösen gesteckt werden, die aus Blechstreifen gebildet sind, und mit diesen verlötet werden. Die Blechstreifen stehen unmittelbar oder mittelbar mit den Schleifringen in Verbindung.



Abb. 189. Zweischichtige Läufer-Stabwicklung während der Herstellung (Werkbild Siemens).

B. Stabwicklungen.

Bei Maschinen mittlerer Leistung erhalten die Läufer immer zweischichtige Stabwicklungen, die ähnlich wie die Stromwender-Wellenwicklungen ausgeführt sind (vgl. Abb. 148 u. 184). Die Herstellung dieser Wicklungen erfolgt genau so wie die der ent-

sprechenden Ständerwicklungen (vgl. S. 133). Abb. 189 zeigt die Herstellung einer solchen Wicklung in ähnlicher Weise wie Abb. 184 die

einer gleichartigen Ständerwicklung. Im Vordergrund der Abb. 189 liegen einige zum Einschieben in die Nuten vorbereitete Stäbe.

Die Anfänge der Wicklungsstränge werden zu Schleifringen geführt. Die Verbindung zwischen Wicklung und Schleifring erfolgt bei dieser Wicklungsart in ähnlicher Weise wie die Verbindung zwischen Stromwenderwicklungen und Stromwender. Die Fahnen (Abb. 190) sind an einem Ende zu Zwingen ausgebildet, die auf die Stabenden geschoben und mit diesen verlötet werden. Sie werden hier meistens Ableitungen genannt. Das andere Ende einer Ableitung wird mit einem am Schleifringkörper sitzenden Bolzen verbunden, der die Verbindung zum Schleifring herstellt. Die Verbindung zwischen Ableitung und Bolzen erfolgt entweder durch Verschrauben, wobei das Ende der Ableitung um 90° gedreht werden muß (Abb. 190), oder durch Vernieten und Verlöten, wobei der Bolzen einen Schlitz erhält, in den die Ableitung eingelegt wird.



Abb. 190. Ableitung einer Läufer-Stabwicklung.

Häufig, und zwar insbesondere bei Maschinen mit hohen Drehzahlen, werden die Anfänge der drei Wicklungsstränge so angeordnet, daß sie räumlich um 120° am Umfang auseinanderliegen, weil dann die Verbindungsfahnen zum Schleifringkörper keine Verlagerung des Schwerpunktes hervorrufen. Wenn die Polpaarzahl der Maschine durch drei teilbar ist, ist jedoch eine Versetzung der Anschlußpunkte um genau 120° nicht möglich.

Auch bei Maschinen großer Leistung kommen diese zweischichtigen Wicklungen häufig vor, doch werden hier auch einschichtige Stabwicklungen mit Bügelverbindern ausgeführt. Eine einschichtige Stabwicklung mit Bügeln, die in zwei Ebenen (Etagen) angeordnet sind, zeigt Abb. 191. Hinsichtlich der Ausführung entspricht sie etwa der Ständerwicklung in Abb. 132. Die Zuführungen zu den Schleifringen liegen hier nicht gleichmäßig am Umfang verteilt, sondern un-

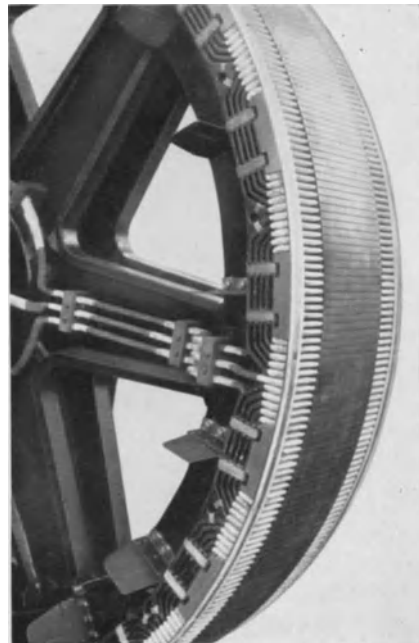


Abb. 191. Läufer eines Asynchronmotors mit einschichtiger Stabwicklung (Werkbild AEG).

mittelbar nebeneinander, einmal, weil es sich um eine Maschine mit geringer Drehzahl handelt, bei der das Gewicht der Zuführungen gegenüber dem gesamten Läufergewicht keine Rolle spielt, dann aber auch, weil bei der hier gewählten Anordnung die Befestigungseinrichtungen für die Zuleitungen nur einmal vorgesehen zu werden brauchen.

C. Käfigwicklungen.

Die Käfigwicklung ist die in der Herstellung einfachste und im Betrieb unempfindlichste Läuferwicklung. In der bekanntesten, früher allgemein üblichen Ausführungsform ist der Läufer mit runden Nuten versehen (Abb. 192 a), die entweder einen schmalen Schlitz haben oder ganz geschlossen sind. Ganz geschlossene Läufernuten wendet man gern an bei Sonderausführungen für rauhe Betriebe (z. B. Kranmotoren), weil bei etwaigem Streifen des Läufers am Ständer (etwa durch Auslaufen eines

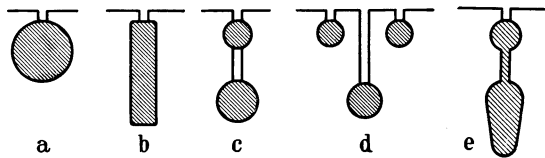


Abb. 192. Nutenformen bei Käfigläufern.

Lagers veranlaßt) die Blechpakete weniger beschädigt werden. Außerdem kommen ganz geschlossene Läufernuten allgemein bei Maschinen sehr gerin-

ger Leistung vor. In die Nuten werden blanke Kupferstäbe eingeschoben, die an beiden Seiten des Blechpaketes ein kurzes Stück aus den Nuten vorstehen. Zur Verbindung der Stäbe untereinander dienen Kupferringe, die mit eingestanzten oder eingebohrten Löchern entsprechend der Nutung des Blechpaketes versehen sind. Die Ringe werden über die Stabenden geschoben und mit diesen durch Hartlötten oder Schweißen verbunden.

Die Käfigwicklung stellt in elektrischer Hinsicht eine Wicklung dar, bei der jeder Stab einen Wicklungsstrang bildet. Durch die Ringe werden die Wicklungsstränge in „Stern“ geschaltet.

Häufig wird bei den Käfigwicklungen die Erscheinung der Stromverdrängung benutzt, um während des Anlaufvorganges eine künstliche Widerstandserhöhung in den Stäben hervorzurufen, die die Anlaufverhältnisse verbessert.

In einfachster Weise läßt sich dies dadurch erreichen, daß man den Nuten und demgemäß den Stäben nicht einen runden, sondern einen rechteckigen (oder ähnlichen langgestreckten) Querschnitt mit größerer Abmessung in radialer Richtung gibt (schmale tiefe Nuten, Abb. 192 b). Eine solche als Wirbelstromläufer bezeichnete Ausführung zeigt Abb. 193. Die Verbindungsringe liegen nicht unmittelbar am Blechpaket an, sondern sind, um bessere Kühlwirkung zu erzielen, von diesem abgesetzt. Die rechteckigen Stäbe stehen abwechselnd nach links und rechts über den Ring vor; die vorstehenden Enden wirken als Lüfterflügel.

Ähnliche Wirkungen werden erzielt, wenn man zwar runde Stäbe nimmt, aber nicht eine sondern zwei ineinanderliegende Schichten von Stäben vorsieht (Doppelstab- oder Doppelnutläufer). Die zu ver-

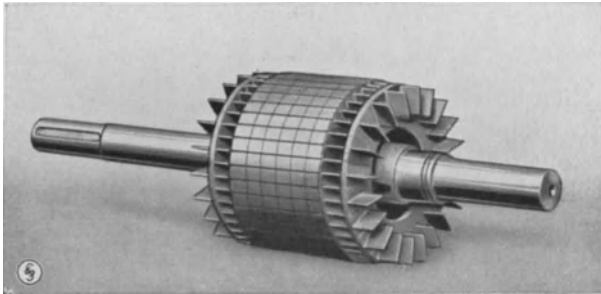


Abb. 193. Wirbelstromläufer (Werkbild Siemens).

schiedenen Schichten gehörigen Stäbe können radial unmittelbar übereinander (Abb. 192c) oder auch zueinander versetzt (Abb. 192d) liegen.

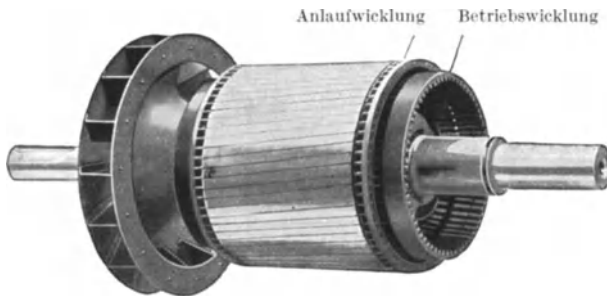


Abb. 194. Doppelkäfigläufer (Werkbild Sachsenwerk).

Die Stäbe der inneren Schicht haben oft auch einen von der Kreisform abweichenden Querschnitt, etwa ähnlich wie in Abb. 192e. Der Querschnitt der Stäbe der inneren Schicht ist immer größer als derjenige der äußeren. Die Verbindung der Stäbe untereinander geschieht entweder so, daß jede Stabschicht ihr eigenes Ringpaar erhält, wobei sich zwei getrennte Käfige ergeben (Abb. 194), oder mit einem einzigen Ringpaar, wobei ein Doppelkäfig entsteht.

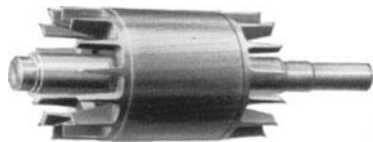


Abb. 195. Läufer mit gegossener Aluminium-Käfigwicklung (Werkbild Sachsenwerk).

Käfigläufer werden auch in der Weise hergestellt, daß die Wicklung (Stäbe und Ringe) als Ganzes aus Aluminium gegossen wird. Häufig werden dabei auch Lüfterflügel mit angegossen (Abb. 195).

Dritter Teil.

VIII. Isolierung der Wicklungen.**A. Isolierstoffe.**

1. Allgemeines.

Die Stoffe, die zum Isolieren der Wicklungen Verwendung finden, sind meistens künstliche Erzeugnisse, die nach besonderen Verfahren aus Naturstoffen gewonnen werden.

Die Isolierstoffe sind mechanischen, thermischen und elektrischen Beanspruchungen ausgesetzt, mechanischen insbesondere beim Herstellen und Einlegen der Wicklungen in die Nuten, thermischen und elektrischen im normalen Betrieb. Eine besonders hohe elektrische Beanspruchung erfährt die Wicklung noch bei verschiedenen Prüfungen während und nach der Herstellung.

Die wichtigsten elektrischen Eigenschaften, die ein Isolierstoff aufweisen muß, sind eine hinreichend hohe Durchschlagsfestigkeit und ein ausreichender Isolationswiderstand. Bei Hochspannung und Wechselstrom spielen auch die durch das elektrische Feld verursachten dielektrischen Verluste eine Rolle. Wenn bei einer Wicklung ein aus mehreren Schichten verschiedener Isolierstoffe zusammengesetzte Isolation Verwendung findet, ist die Beanspruchung der einzelnen Schichten noch vom Verhältnis der Dielektrizitätskonstanten der einzelnen Stoffe abhängig.

Mechanische Eigenschaften kommen nur bei festen Isolierstoffen in Betracht. Die wichtigsten Eigenschaften sind ausreichende Biegefestigkeit und Schlagbiegefestigkeit (Zähigkeit). Außerdem ist eine möglichst geringe Aufsaugfähigkeit für Wasser (Hygroskopie) und in vielen Fällen auch Ölbeständigkeit erwünscht.

Hinsichtlich der Wärmebeständigkeit sind die Isolierstoffe nach den REM (Regeln für die Bewertung und Prüfung elektrischer Maschinen, VDE 0530/1934) in verschiedene Klassen eingeteilt (s. Tafel 9). Für die verschiedenartigen Wicklungen sind unter Berücksichtigung der Klassenzugehörigkeit des Isolierstoffes Grenzwerte der Erwärmung festgesetzt (s. Tafel 10). Unter Erwärmung versteht man den Unterschied der Temperaturen von Wicklung und Kühlmittel (Kühlluft). Die Grenzwerte für die Erwärmung gelten unter der Voraussetzung, daß die Temperatur des Kühlmittels nie höher liegt als 35°. Wird dieser Wert überschritten, so gelten für die Wicklungen Grenzwerte der Temperatur, die in keinem Fall überschritten werden sollen. Die Grenzwerte für die Temperatur liegen 35° höher als die in Tafel 10 angegebenen Grenzwerte für die Erwärmung.

Tafel 9. Wärmebeständigkeitsklassen der Isolierstoffe
(nach VDE 0530/1934).

	I	II	III
	Klasse	Isolierstoff	Behandlung
1	A	Baumwolle, Seide, Papier und ähnliche Faserstoffe	getränkt* oder in Füllmasse*
		Lackdraht	—
2	B	Glimmer- und Asbestpräparate und ähnliche mineralische Stoffe	mit Bindemittel
3	C	Glimmer	ohne Bindemittel
		Porzellan, Glas, Quarz und ähnliche feuerfeste Stoffe	—

* Eine Isolierung wird als „getränkt“ bezeichnet, wenn die Luft zwischen den Fasern weitgehend durch einen geeigneten Stoff ersetzt wird.
Sind diese Zwischenräume ausgefüllt, so wird die Isolierung als „in Füllmasse“ bezeichnet.
Von einem brauchbaren Tränkmittel wird verlangt, daß es gute Isoliereigenschaften hat, daß es die Fasern vollständig einhüllt und sie aneinander und am Leiter haften läßt, daß es bei der zugelassenen Grenztemperatur nicht weich wird und daß es wärmebeständig ist.
Von einer brauchbaren Füllmasse wird verlangt, daß sie gute Wärmeleitfähigkeit und erforderliche Isoliereigenschaften hat, daß sie die Hohlräume zwischen den isolierten Leitern praktisch ausfüllt und keine Hohlräume bildet, daß sie bei der zugelassenen Grenztemperatur nicht tropfbar weich wird und daß sie wärmebeständig ist.

Bei mehreren Schichten von Stoffen verschiedener Wärmebeständigkeit gilt die Grenztemperatur des weniger wärmebeständigen Stoffes, wenn dessen Zerstörung den Isolationszustand der Wicklung gefährdet, dagegen die Grenztemperatur des wärmebeständigeren Stoffes, wenn der weniger wärmebeständige nur in geringen Mengen als Aufbaustoff vorhanden ist (z. B. bei Asbestdraht).

2. Glimmer und Glimmererzeugnisse¹.

Die höchstwertigen Isolierstoffe sind der Glimmer und die aus ihm hergestellten Erzeugnisse. Glimmer ist ein Naturprodukt und kommt in größeren Stücken als Blockglimmer in den Handel. Durch Spalten des Blockglimmers in dünne Lagen erhält man den Spaltglimmer.

a) **Mikanit-Erzeugnisse.** Mikanit ist der Sammelbegriff für Erzeugnisse, die aus Spaltglimmer unter Verwendung von Bindemitteln hergestellt sind. Je nach dem Gehalt an Glimmer und Bindemittel hat der Stoff verschiedene Eigenschaften und ist dadurch für verschiedene Zwecke geeignet. Man unterscheidet:

¹ Vgl. VDE 0332/1929.

Tafel 10. Grenzerwärmungen für Wicklungen und Eisenkerne
(nach VDE 0530/1934).

a) Allgemeine Bestimmungen.

	I	II	III	IV
	Wicklungen mit Isolierung nach Klasse*	A	B	C
1	Alle Wicklungen mit Ausnahme von 2	60°	80°	Nur beschränkt durch den Einfluß auf benachbarte Isolierteile
2	Einlagige Feldwicklungen allgemein, ebenso in Volltrommelläufern zweilagige Feldwicklungen	70°	90°	
3	I Stromwender und Schleifringe	II 60°		
4	Lager	45°		
5	Eisenkerne mit eingebetteten Wicklungen	Wie die Wicklungen		
6	Eisenkerne ohne eingebettete Wicklungen	Nur beschränkt durch den Einfluß auf benachbarte Isolierteile		
7	Alle anderen Teile			
Meßverfahren.				
Alle Wicklungen mit Ausnahme der dauernd kurzgeschlossenen		Widerstandszunahme und Thermometermessung		
Dauernd kurzgeschlossene Wicklungen sowie alle anderen Teile		Thermometermessung		
* Ungetränkte Isolierstoffe sollen im allgemeinen nicht verwendet werden. Wenn in Ausnahmefällen davon Gebrauch gemacht wird, so sind die Grenzerwärmungen hierfür um 15° gegenüber den für Isolationsklasse A zulässigen Werten zu erniedrigen.				

b) Zusatzbestimmungen für Ständerwicklungen von Wechselstrommaschinen von mehr als 5000 kVA Leistung oder mehr als 1 m Eisenlänge.

	I	II	III
	Wicklungen mit Isolierung nach Klasse	A	B
8	Wicklungen bis 7000 V* (Thermometer an der Nutenwand oder in der Zahnmitte)	Meßstelle in der Mitte an den Enden	55° 70° 60° 80°
9	Zweischichtwicklungen (Thermometer beiden Schichten)	zwischen den	60° 80°
Meßverfahren.			
Messung mit eingebautem elektrischen Thermometer (siehe VDE 0530/1934, § 35). Auf Wunsch des Herstellers kann bei Maschinen mit Einschichtwicklungen das Thermometer innerhalb der Nutenisolation angeordnet werden. Als Erwärmungsgrenze des Kupfers gilt alsdann bei Isolierung nach Klasse A 70°, bei Isolierung nach Klasse B 85°.			
* Für Maschinen mit mehr als 7000 V werden die Grenzwerte um je 1,5° herabgesetzt für je 1000 V über 7000 V.			

1. Kommutator- (Stromwender-) Mikanit mit Bindemitteln in geringer Menge zur Isolation der Stromwenderstege gegeneinander.
2. Heiz-Mikanit (für Wicklungen nicht geeignet).
3. Form-Mikanit zur Herstellung von Rohren und Formstücken (in warmem Zustande).
4. Hartform-Mikanit für gestanzte Gegenstände.
5. Flexibel-Mikanit, das sich in kaltem Zustande gut biegen und leicht in Ankernuten einlegen läßt.

b) Mikanit-Faserstoff-Erzeugnisse. Mikanit-Faserstoff-Erzeugnisse bestehen aus einer Faserstoffschicht als Träger und einer Schicht Flexibel-Mikanit, sowie gegebenenfalls aus einer Faserstoffdeckschicht.

1. Mikanit-Papier ist Flexibel-Mikanit, das zweiseitig (selten einseitig) mit Seidenpapier von etwa je 0,03 mm Stärke bezogen ist.

2. Mikanit-Leinen. Als Träger dient Baumwollmull (im Handel Leinen genannt) von etwa 0,15 mm Stärke. Als Deckschicht auf der anderen Seite des Flexibel-Mikanits dient meistens Seidenpapier von etwa 0,03 mm Stärke oder seltener eine zweite Leinenschicht.

3. Mikanit-Batist. Die tragende Schicht ist feinfädiger Baumwollbatist von etwa 0,10 mm Stärke, die Deckschicht wieder Seidenpapier.

4. Mikanit-Seide. Die tragende Schicht ist reine Seide von etwa 0,04 mm Stärke. Eine Deckschicht fehlt meistens.

c) Glimmer-Faserstoff-Erzeugnisse. Glimmer-Faserstoff-Erzeugnisse bestehen aus Faserstofflagen, die nur mit einer einzigen Lage dünnen Spaltglimmers unter Verwendung eines Bindemittels bedeckt sind und nur selten auf der anderen Seite eine zweite Faserstofflage erhalten.

Je nach dem verwendeten Faserstoff unterscheidet man

1. Glimmer-Papier,
2. Glimmer-Batist,
3. Glimmer-Seide.
4. Glimmer-Lacktuch,
5. Glimmer-Asbest.

Eine Sonderart des Glimmer-Papiers ist das Mikafolium. Die Trägerschicht ist reines Zullulosepapier; die Glimmerschicht ist ihrerseits auf der Oberfläche wieder mit einer Bindemittelschicht versehen, damit mehrere aufeinanderliegende Schichten des Stoffes durch gleichzeitige Anwendung von Druck und Wärme in feste mechanische Verbindung miteinander gebracht werden können. Das Aufeinanderbringen mehrerer Schichten kann durch Aufwickeln auf einen Dorn (Herstellung von Rohren) oder durch Aufschieben von Bogen bestimmter Größe (Herstellung von Tafeln) geschehen.

Die Wärmebeständigkeit der Glimmererzeugnisse hängt nur von derjenigen des Bindemittels und der Trägerschichten ab, da der Glimmer selbst bei allen praktisch vorkommenden Temperaturen beständig bleibt.

Beim Mikanit ist also nur die Wärmebeständigkeit des Bindemittels maßgebend. Schellack als Bindemittel hat den Nachteil, daß er bei Erwärmung erweicht und die Formbeständigkeit des Mikanits in Frage stellt. Für bestimmte Zwecke wird daher der Schellack durch Kunstharz ersetzt (z. B. Supramikanit der AEG).

3. Asbest.

Asbest ist ein natürlicher mineralischer Stoff, der unverbrennbar und säurebeständig ist. Er findet neuerdings zur Drahtisolation Verwendung, nachdem es gelungen ist, durch besondere Bearbeitungsverfahren und Beimengungen in geringen Mengen zusammenhängende Isolierschichten mit ausreichender mechanischer Festigkeit herzustellen. Auch die große Wasseraufnahmefähigkeit des Stoffes wird durch Beimengungen beseitigt.

4. Zellstofferzeugnisse.

a) Papier. Das einfachste Zellstofferzeugnis ist das Papier. Die für Isolierzwecke verwendeten Papiere sind Sonderausführungen mit guten mechanischen und elektrischen Eigenschaften. Erwähnt sei das Kabelpapier, ein reines Natronzellulosepapier, das Manilapapier, das aus Manilahanf hergestellt wird, sowie das Japanpapier, das aus dem Bast japanischer Pflanzen gewonnen wird.

Für manche Zwecke wird das Papier getränkt. Als Tränkmasse kommen Öl, Paraffin oder Lack in Frage, das mit diesen Stoffen getränkte Papier heißt Ölpapier, Paraffinpapier oder Lackpapier. Die Verwendung des Papiers in Verbindung mit Glimmererzeugnissen ist schon behandelt worden.

b) Preßspan. Preßspan ist eine hochwertige unter starkem Druck hergestellte Pappe, von 0,1...5 mm Stärke; er wird in gelber und grauer Farbe, mit geglätteter und uneglätteter Oberfläche hergestellt. Edelpreßspan ist schwarzgrau und uneglättet. Preßspan wird als Rollenpreßspan (nur für geringe Stärken) und als Tafelpreßspan (Abmessungen nach DIN VDE 600) geliefert. Durch Tränken in Lack erhält man getränkten (imprägnierten), durch Tränken in Öl geölten Preßspan.

c) Rotpapier. Rotpapier ist ein dem Preßspan sehr ähnlicher Stoff von hoher Durchschlagsfestigkeit.

d) Lederspan (Leatheroid). Lederspan ist ein amerikanischer Stoff, der dem Preßspan und Rotpapier ähnlich, aber fester ist. Er wird in Stärken von etwa 0,1...2 mm hergestellt.

e) Hartpapier. Hartpapier wird hergestellt, indem dünne Papierbahnen, mit Kunstharz getränkt, aufeinander geschichtet und durch Anwendung von Druck und Wärme zusammengebacken werden. Wie beim Mikafolium können sowohl Tafeln als auch Rohre hergestellt werden.

f) **Hartleinen.** Hartleinen wird in der gleichen Weise hergestellt wie Hartpapier, nur treten Gewebepapieren an die Stelle der Papierbahnen.

5. Faserstofferzeugnisse.

Baumwoll- und Seidengewebe erhalten mehrmals einen Auftrag von Isolierlack; nach jedem Auftrag findet eine Trocknung statt (Exzelsiorleinen, Ölleinen, Ölseide). Die Stoffe finden besonders Verwendung in Gestalt von Bändern, die zum Bewickeln der Wicklungsköpfe dienen. Für diesen Zweck findet auch ungetränktes Baumwollband Verwendung, das dann erst nach dem Aufwickeln in Lack getränkt wird. Zum Überziehen von Drähten und freien Schaltenden werden sog. Isolierschläuche verwendet, die ebenfalls aus in Lack getränkten Faserstoffen bestehen.

6. Isolierlacke.

Isolier- oder Imprägnierlacke werden in flüssigem Zustande auf Faserstoffe aufgebracht und bilden nach der Trocknung den sog. Lackfilm. Der Lackfilm bildet die eigentliche Isolierschicht, der Faserstoff ist nur Träger.

Bei den Luftlacken (Spirituslacken, Zelluloselacken) erfolgt das Trocknen durch bloßes Verdunsten des Lösungsmittels. Bei den höherwertigen Ofenlacken (Öllacken) findet beim Trocknen noch ein zusätzlicher Oxydationsprozeß statt.

An gute Isolierlacke werden hohe elektrische, mechanische, thermische und chemische Anforderungen gestellt.

Weitgehende Verwendung findet auch aus phenoplastischem Kunstharz (Bakelite) hergestellter Lack. Bei der nach dem Auftragen erfolgenden Erwärmung geht dieser Stoff in einen „gehärteten“ Zustand über, in dem er nicht mehr schmelzbar und nicht mehr lösbar ist.

7. Füllmassen (Kompondmassen).

Sie sind Asphalt und Teer enthaltende Mischungen, die bei normaler Raumtemperatur fest sind, bei höheren Temperaturen erweichen und bei etwa 150...180° vollständig flüssig werden. Sie dienen zum Ausfüllen der Zwischenräume in Wicklungen und verhindern, daß die Isolation durch Ionisation eingeschlossener Luft gefährdet wird. Ferner verbessern sie die Ableitung der Verlustwärme.

B. Isolation der Drähte und Stäbe.

Die für die Wicklungen verwendeten Kupferdrähte sind isoliert

- a) durch Umspinnen oder Umflechten (Umklöppeln) mit Baumwolle, Papier und Baumwolle oder Seide,
- b) durch eine Lack-Emailschicht,
- c) durch Überziehen mit einer Asbestschicht.

Der Isolationsauftrag der Drähte darf einerseits nicht zu groß sein, weil sonst der für die Wicklung zur Verfügung stehende Raum schlecht ausgenutzt wird, andererseits muß die Isolation eine ausreichende elektrische und mechanische Festigkeit besitzen.

Für Runddrähte, die nach a und b isoliert sind, ist der Isolationsauftrag in den Normenblättern DIN VDE 6435 und 6436 festgelegt (s. Tafel 11 u. 12).

Lackdraht hat den geringsten Isolationsauftrag, ist aber mechanisch sehr empfindlich; man hat ihn daher früher fast nur für ruhende Feldwicklungen benutzt. Neuerdings sind die Lacküberzüge hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften sehr verbessert worden, so daß Lackdrähte bei kleineren Maschinen heute auch für Nutenwicklungen verwendet werden. Der Lackdraht ist bedeutend billiger als der Draht mit Faserstoffisolation, besonders billiger als Seidendraht.

Tafel 11. Auftrag von Lackisolation auf rundem Kupferdraht (nach DIN VDE 6435*).

<p>Durchmesser des blanken Drahtes d Durchmesser des isolierten Drahtes d_1 Maße in mm</p>			
1	2	3	4
Drahtdurchmesser d	Kurzzeichen Lackdraht	Lackauftrag	
		$d_1 - d$	Zulässige Abweichungen ¹
von 0,03 bis 0,05	L (schwarz) Lr (durchscheinend, genannt „Rotlackdraht“)	0,012	$\pm 0,003$
über 0,05 bis 0,1		0,015	$\pm 0,005$
über 0,1 bis 0,2		0,02	
über 0,2 bis 0,3		0,025	$\pm 0,007$
über 0,3 bis 0,4		0,03	
über 0,4 bis 0,5		0,035	$\pm 0,01$
über 0,5 bis 0,7		0,04	
über 0,7 bis 1		0,05	$\pm 0,015$
über 1 bis 2		0,06	
über 2 bis 3		0,07	

¹ Die zulässigen Abweichungen des blanken Drahtes nach DIN VDE 6431 sind in diesen Werten nicht enthalten.
Bei Lackdraht in Verbindung mit Seide-, Baumwolle- und Papierisolation sind zum Lackauftrag die entsprechenden Werte nach DIN VDE 6436 hinzuzufügen.

* Wiedergegeben mit Genehmigung des Deutschen Normenausschusses. Verbindlich ist die jeweils neueste Ausgabe des Normblattes im Normformat A 4, das beim Beuth-Verlag, G.m.b.H., Berlin SW 19, erhältlich ist.

Tafel 12. Auftrag von Seide-, Papier- und Baumwollisolation auf rundem Kupferdraht (nach DIN VDE 6436*).

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Isolierstoffe		Kurzzeichen	Drahtdurchmesser d									
			von 0,03 bis 0,05	über 0,05 bis 0,1	über 0,1 bis 0,2	über 0,2 bis 0,3	über 0,3 bis 0,5	über 0,5 bis 0,8	über 0,8 bis 1,5	über 1,5 bis 3	über 3 bis 4	über 4 bis 6
			Isolations-Auftrag ¹ d_1-d Größtwerte ²									
Seide												
1 × besponnen		S	0,035	0,035	0,035	0,04	0,04	0,04	0,04			
2 × besponnen		SS	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08			
Baumwolle:												
1 × besponnen		B			0,1	0,1	0,12	0,12	0,12	0,15		
2 × besponnen		BB			0,16	0,16	0,2	0,22	0,22	0,26	0,3	0,4
1 × besponnen und darüber 1 × umflochten		BU							0,55	0,6	0,6	0,6
2 × besponnen und darüber 1 × umflochten		BBU							0,7	0,8	0,8	0,9
Papier- und Baumwolle:												
1 × Papier bewickelt und darüber 1 × Baumwolle besponnen		PB							0,32	0,4	0,45	0,5
1 × Papier bewickelt, darüber 1 × Baumwolle besponnen und darüber 1 × Baumwolle umflochten		PBU							0,8	0,9	0,9	1

¹ Bei der Feststellung des Durchmessers d_1 des isolierten Drahtes sind außer dem Isolationsauftrag die zulässigen Abweichungen des blanken Kupferdrahtes nach DIN VDE 6431 zu berücksichtigen.

² Die Werte beziehen sich auf ungetränkte Isolation.

Bei Tränkung der Isolation ist im allgemeinen mit einer Erhöhung des Isolationsauftrages zu rechnen.

* Wiedergegeben mit Genehmigung des Deutschen Normenausschusses. Verbindlich ist die jeweils neueste Ausgabe des Normblattes im Normformat A 4, das beim Beuth-Verlag, G.m.b.H., Berlin SW 19, erhältlich ist.

Seidenisolation kommt nur für dünne Drähte zur Verwendung, wo Baumwolle zu stark auftragen würde. Da der Seidendraht teuer ist, sucht man ihn nach Möglichkeit durch Lackdraht zu ersetzen.

Drähte mit Asbestfasern zu isolieren ist erst in neuerer Zeit einwandfrei gelungen (z. B. Apyroldraht der AEG — Neptun-Asbest-Draht der Firma Felten & Guilleaume AG., Köln-Mülheim). Während die Faserstoffisolation auf die Dauer nur Temperaturen bis etwa 100° ohne Nachteil verträgt, können die Asbestdrähte solche von 150...200°, vorübergehend noch höhere aushalten. Die Isolation dieser Drähte ist außerdem mechanisch fest und dicht, so daß ein nachträgliches Lockerwerden

Tafel 13. Auftrag von Asbestisolation auf Runddraht (Apyroldraht der AEG).

Maße¹ in mm

Drahtdurchmesser <i>d</i>	Isolationsauftrag	
	<i>d</i> ₁ - <i>d</i>	Zulässige Abweichungen
von 0,3 bis 0,6	0,2	+ 0,05
über 0,6 bis 1,1	0,25	± 0,05
über 1,1 bis 2,8	0,3	± 0,05
über 2,8 bis 6	0,4	± 0,05
	0,5	
	0,6	

¹ Die Bedeutung der Bezeichnungen *d* und *d*₁ ist die gleiche wie in den Tafeln 11 und 12.

der einzelnen Windungen, wie es bei Faserstoffisolation möglich ist, nicht eintritt. Für thermisch und mechanisch hochbeanspruchte Wicklungen (insbesondere Läuferwicklungen von Synchronmaschinen) wird daher Draht mit Asbestisolation in steigendem Maße verwendet. Als normalen Isolationsauftrag für Runddraht gibt die AEG die in Tafel 13 aufgeführten Werte an.

Für Wechselstrom-Ständerwicklungen werden bei größeren Maschinen, die meistens auch für höhere Spannungen bemessen sind, häufig auch Profildrähte

mit Papier- und Baumwollisolation verwendet. Die Zahl der Papierlagen richtet sich nach der Höhe der Spannung. Aus Baumwolle besteht nur die oberste Lage, die als mechanischer Schutz für die Papier-

Tafel 14. Isolation von Profildrähten für Wechselstrom-Ständerwicklungen.

P = Papier, B = Baumwolle.

Nennspannung bis Volt	Art der Isolation	Isolationsauftrag (einseitig) mm
1200	1 × P + 1 × B	0,4 ... 0,5
5800	2 × P + 1 × B	0,6 ... 0,7
9000	3 × P + 1 × B	0,8 ... 0,9
11000	4 × P + 1 × B	1,0 ... 1,1

lagen wirkt. Der (einseitige) Auftrag einer Papierlage beträgt etwa 0,2 mm, die Stärke der Baumwollschicht wird bei kleineren Drahtquerschnitten ebenfalls zu 0,2 mm gewählt, bei größeren Querschnitten macht man sie stärker, und zwar bis zu etwa 0,3 mm.

Eine Zusammenstellung über die Art der Isolation für verschiedene Spannungen enthält Tafel 14.

Stäbe von größerem Querschnitt werden, wie schon erwähnt, zunächst blank gebogen und dann durch Umbandeln isoliert oder umpreßt.



Abb. 196. Umbandelmaschine
(Werkbild Siemens).

lappt gewickelt; der Isolationsauftrag beträgt 0,3...0,4 mm einseitig. Für höhere Ansprüche ist die Umpressung zu empfehlen; die Hülsenstärke kann nach Tafel 16 gewählt werden.

C. Isolation von Feldspulen.

Gleichstromfeldspulen für kleine Gleichstrommaschinen werden durch Umbandeln isoliert (vgl. Abb. 77), in Lack getränkt und getrocknet; sie werden dann ohne weitere Befestigung auf die Polkerne

Das Umbandeln geschieht meistens mit Umbandelmaschinen (Abb. 196), mit denen auch zwei verschiedene Stoffe (etwa Papier und Baumwollband) gleichzeitig aufgewickelt werden können. Als Stoffe kommen in Frage Baumwollband, Papier mit Baumwollband, Lackleinen oder auch Bänder aus Glimmer-Faserstoff-Erzeugnissen. Das Band wird gewöhnlich $\frac{1}{2}$ über-



Abb. 197. Umbandelmaschine für Spulen mit kleinem Innendurchmesser (Werkbild Micafil).

geschoben. Zwischen Poleisen und Spule wird zuweilen eine Zwischenlage aus Preßspan oder ähnlichem Isolierstoff vorgesehen.

Bei Spulen mit kleinem Innendurchmesser ist das Umbandeln mit einer Einrichtung nach Abb. 196 nicht möglich, weil die Bandrollen nicht durch die Spule hindurchgehen. Man muß sich hier einer Maschine nach Abb. 197 bedienen. Der Laufring, der das Band um die Spulen-seiten herumlegt, wird zunächst von der Vorratsspule her aufgefüllt, und zwar immer genau mit der Bandlänge, die für eine Spule notwendig ist. Die Vorratsrolle braucht dann nicht durch die Spule hindurchgeführt zu werden.

Werden als Träger der Wicklung Spulenkästen verwendet, wie es bei den Feldspulen der Synchronmaschinen und auch bei mittleren Gleichstrommaschinen der Fall ist, so unterbleibt ein nachträgliches Umbandeln der Spule. Sind die Spulenkästen aus Blech hergestellt, so werden sie vor dem Aufwickeln der Spule auf den Innenflächen mit Isolierstoff beklebt.

Bei Feldwicklungen für große Maschinen werden die Spulen der einzelnen Pole gewöhnlich unterteilt (vgl. Abb. 79 u. 80). Die einzelnen Teile werden zuweilen ebenfalls umbandelt.

Im übrigen ist die Isolation der Feldspulen schon bei der Besprechung der Herstellung (Abschnitt II) behandelt.

D. Isolation von in Nuten liegenden Wicklungsteilen.

1. Stromwenderwicklungen.

a) Drahtwicklung. Bei den eingeträufelten Wicklungen kleiner Maschinen, die praktisch nur für Spannungen bis höchstens 500 Volt vorkommen, wird die Nut vor dem Einlegen der Wicklung mit Isolationsstreifen aus Zellstofferzeugnissen (Preßspan oder dergleichen) ausgekleidet. Die Stärke der Isolation beträgt je nach Größe der Maschine 0,5...0,8 mm (einseitig). Man nimmt jedoch nicht eine Schicht von der angegebenen Stärke, sondern legt mehrere dünnere (mindestens zwei) aufeinander, die zusammen die notwendige Stärke ergeben, weil der dünnere Stoff beim Biegen weniger leicht Brüche erhält.

Eine höherwertige Isolation erhält man, wenn man aus verschiedenen Stoffen geschichtete Isolation verwendet. Auf einer Trägerschicht, die gewöhnlich aus Preßspan besteht, ist eine Schicht Ölleinen oder Glimmer aufgebracht; dann folgt eine Deckschicht aus Papier oder Preßspan (vgl. Abb. 59). Die Streifen werden so eingelegt, daß die Trägerschicht der Nutenwand zugekehrt ist. Ölleinen und Glimmer sind dabei als eigentlich wirksame Isolierstoffe anzusprechen, die anderen Schichten dienen nur als Träger und zum Schutz des höherwertigen Isolierstoffes vor Beschädigungen z. B. durch Unebenheiten der Nuten-

wand. Unter- und Oberschicht werden, wenn es die Höhe der Spannung erfordert, durch einen Streifen aus Preßspan oder dergleichen getrennt.

Bei offenen Nuten werden die Seiten der Wicklungselemente vor dem Einlegen in die Nut mit einem Streifen aus Isolierstoff (Preßspan oder dergleichen) umhüllt, dessen Ränder sich an einer Seite überlappen. Die Umhüllung wird entweder verklebt oder durch weitläufige Umwicklung mit Baumwollband gehalten (vgl. Abb. 26). Sie ist auch hier häufig aus verschiedenen Stoffen geschichtet; die Gesamtstärke

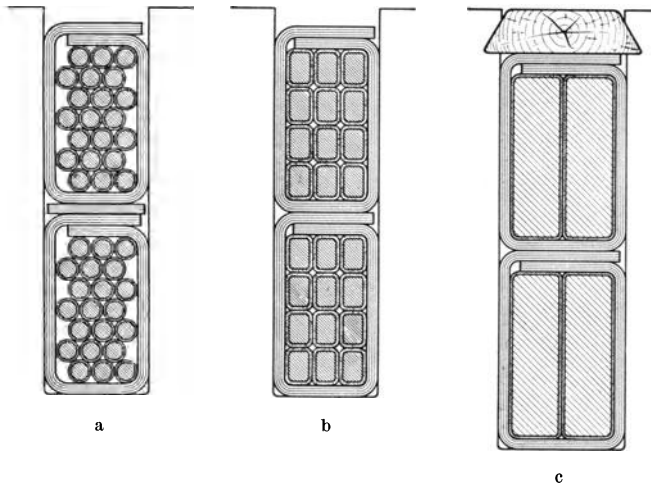


Abb. 198. Nutisolation bei Spannungen bis 500 Volt, 0,8 mm stark, innen Papier, außen Preßspan, dazwischen Ölleinen oder Glimmer.
a) Runddraht, b) Profildraht, c) Stabwicklung.

beträgt wieder bei Spannungen bis 500 Volt etwa 0,5...0,8 mm. Zwischen Unter- und Oberschicht wird meistens noch ein Preßspanstreifen von 0,2...0,3 mm Stärke gelegt, damit Unter- und Oberschicht der Stirnverbindungen nicht unmittelbar aufeinanderliegen. Abb. 198a zeigt den Querschnitt durch eine Nut mit Runddraht, Abb. 198b durch eine solche mit Profildraht.

Wenn die Gefahr besteht, daß durch Unebenheiten der Nutenwand die Spulenisolation verletzt werden kann, ordnet man noch eine zusätzliche Nutauskleidung aus dünnem Preßspan oder Lederspan an.

Die in einem Wicklungselement vereinigten Spulenseiten (bei $u > 1$) brauchen im allgemeinen nicht besonders gegeneinander isoliert zu werden (vgl. Abb. 198a u. b). Bei Treppenwicklungen jedoch, bei denen die in der Nut zusammenliegenden Spulenseiten der Oberschicht erst beim Einlegen gemeinsam isoliert werden können, sieht man zweck-

Tafel 15. Gesamtstärke der Isolation in der Nut¹ (in mm).

Die Zahlen enthalten bei Stabwicklungen die Summe aus der Isolation der Stäbe und der Nutauskleidung, bei Drahtwicklung jedoch nicht die Umspinnung der Einzeldrähte.

Art der Wicklung	Isolation in der Breite				Nutverschluss	Isolation in der Tiefe		
	Zahl der Leiter quer zur Nut <i>u</i>	Nennspannung in Volt				Nennspannung in Volt		
		bis 500	500 bis 800	800 bis 1200		bis 500	500 bis 800	800 bis 1200
Drahtwicklung (Formspulen)	beliebig	1,8	2,0	2,2	Bandagen oder Keil	3,5	4,5	5,5
Stabwicklung	1	1,8	2,2	2,4	Bandage Keil (K = Keilstärke)	4,0 K + 5	5,0 K + 6	6,0 K + 7
	2	2,6	3,0	3,2				
	3	3,0	3,4	3,6				
	4	3,5	3,9	4,1				

mäßig Zwischenlagen aus Preßspan (ca. 0,2 mm) vor (Abb. 199). Die Gesamtstärke der Isolation in der Nut hat bei normalen Verhältnissen

etwa die in Tafel 15 angegebenen Werte.

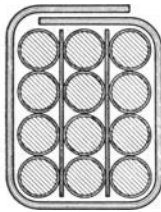


Abb. 199. Schnitt durch ein Wicklungselement mit besonderer Spulenseitenisolation (bei Treppenwicklungen).

b) Stabwicklung. Für Spannungen unter 500 V und für Maschinen, die nicht unter besonders schwierigen Verhältnissen arbeiten, entspricht die Nutisolation ungefähr derjenigen bei den Drahtwicklungen (Abb. 198c). Für höhere Spannungen und bei Maschinen für raue Betriebe (z. B. Walzwerke) werden die Nutenleiter mit Mikafolium umpreßt (vgl. S. 159). Die einzelnen Stäbe können dabei wieder durch Umandeln isoliert (Abb. 200a) oder durch L-förmige Streifen getrennt sein (Abb. 200b). Zwischen Ober- und Unterschicht wird zweckmäßig ein Preßspanstreifen gelegt, um Platz dafür zu schaffen, daß die Umandelung der Stirnverbindungen bis über die Ränder der Nutenhülsen ausgedehnt werden kann. Bei Spannungen über etwa 500 V ist diese Zwischenlage unbedingt notwendig.

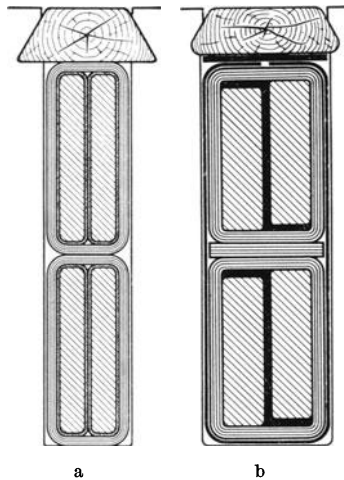


Abb. 200. Nut mit umpreßten Nutenleitern (Hülsenstärke 0,8 mm). a) Spulenseiten ummandelt, b) Spulenseiten durch L-Streifen getrennt.

¹ Nach Trettin in v. Rziha und Seidener: Starkstromtechnik, 7. Aufl. Bd. 1. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn 1930.

2. Wechselstrom-Ständerwicklungen.

a) **Drahtwicklung.** Die Nutisolation bei den eingeträufelten Wicklungen kleiner Maschinen erfolgt grundsätzlich in gleicher Weise wie bei den eingeträufelten Stromwender-Wicklungen (vgl. Abb. 59). Auf eine bestimmte Reihenfolge der aufeinanderfolgenden Windungen wird dabei nicht geachtet.

Bei größeren Maschinen, mag es sich um eingeträufelte, eingefädelte, Formspulen- oder Halbformspulen-Wicklungen handeln, liegen die Leiter in bestimmter Ordnung. Man unterscheidet „Längswicklung“ und „Querwicklung“; bei der Längswicklung folgen die Leiter nach Abb. 201a aufeinander, bei der Querwicklung je nach den Besonderheiten des Herstellungsverfahrens entsprechend der Numerierung nach Abb. 201 b oder so, daß die Querreihen alle in der gleichen Richtung, also alle von links nach rechts oder alle von rechts nach links durchlaufen werden. Längswicklung wird im allgemeinen nur für geringe Spannungen angewandt; die Querwicklung ist vom isolationstechnischen Standpunkt aus besser, weil die höchste zwischen benachbarten Leitern auftretende Spannung stets geringer ist als bei der Längswicklung.

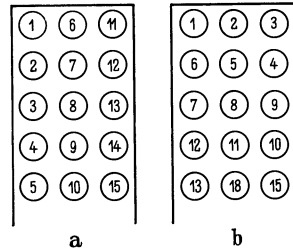


Abb. 201. Reihenfolge der Leiter in der Nut,
a) bei Längswicklung,
b) bei Querwicklung.

Wenn die einzelnen Drähte eine Isolation nach Tafel 14 haben, ist eine besondere Lagenisolation nicht erforderlich. Die Isolation genügt dann auch den höheren Ansprüchen, denen die ersten Nuten der Wicklungsstränge (Eingangsnuten) ausgesetzt sind. Für die anderen Nuten (Innennuten) kann im Notfalle auch in den drei letzten Reihen der Tafel 14 eine Papierlage weniger genommen werden. In den Eingangsnuten muß man dann, falls der gleiche Draht Verwendung finden soll, die Nachteile der schlechteren Isolation dadurch ausgleichen, daß man Zwischenlagen aus Preßspan zwischen die einzelnen Lagen legt. Diese müssen in gleicher Stärke auch in den Spulenköpfen vorgesehen werden. Als Eingangsnuten rechnet man bis zu 10% der gesamten Nutenzahl eines Stranges. Der Platz für die verstärkte Isolation der Eingangsnuten kann dadurch gewonnen werden, daß in diese Nuten eine geringere Zahl von Windungen gelegt wird oder dadurch, daß in ihnen ein etwas schwächerer Leiterquerschnitt vorgesehen wird. In Abb. 202 ist je ein Querschnitt



Abb. 202. Verschiedene Isolation von Eingangs- und Innennut (nach Siemens-Z. 1921, S. 21).
a) Eingangsnut, b) Innennut.

durch eine Innennut und eine Eingangsnut der gleichen Maschine mit verschiedener Isolation dargestellt. Im allgemeinen zieht man es heute vor, alle Nuten gleichmäßig zu isolieren.

Zuweilen werden Zwischenlagen in den Nuten auch als Füllstoffe benutzt, wenn die Drähte allein die Nut nicht voll ausfüllen. In diesem Falle brauchen die Zwischenlagen im Wicklungskopf nicht vorhanden zu sein.

Die Nutauskleidung besteht bei Spannungen bis etwa 600 V wieder aus Streifen, die an einer Seite überlappt sind. Für höhere Spannungen erhalten die Nuten geschlossene Hülsen, die entweder aus Hartpapier (bis etwa 3000 V) oder aus Mikanit hergestellt sind (vgl. Abb. 170). Die Wicklung muß dann eingefädelt werden. Besser ist es aber, bei halbgeschlossenen Nuten Halbformspulen und bei offenen Nuten Formspulen anzuwenden, bei denen die Nutenleiter mit Mikafolium umpreßt werden.

Bei Spannungen von etwa 4000 V ab werden alle Hohlräume zwischen den Leitern und innerhalb der Umspinnung der Leiter mit Füllmasse ausgefüllt (kompoundierte Spulen), weil in eingeschlossenen Lufträumen „Glimmerscheinungen“ auftreten würden, die im Laufe der Zeit zur Zerstörung der Isolation führten. Die vollständige Kompoundierung auch in den Spulenköpfen ist nur bei den Formspulen für offene Nuten möglich, wie sie neuerdings für mittlere und große Maschinen mit Vorliebe Verwendung finden.

Die Nutisolation wird nicht nur elektrischen, sondern auch mechanischen Beanspruchungen ausgesetzt insbesondere dadurch, daß bei Temperaturänderungen der Maschine Eisen, Nutenkupfer und Nutenhülse sich verschieden stark ausdehnen oder zusammenziehen und sich so aneinander reiben. Diese Beanspruchungen sind um so stärker, je länger die Maschine ist. Daher ist die erforderliche Hülsenstärke nicht

Tafel 16. Nutisolation von Wechselstrom-Ständerwicklungen

Nennspannung bis Volt	Hülsenstärke in mm bei Maschinenlänge			Ausladung der Hülse mm	Zwischenlage zwischen Unter- und Oberschicht bei Zweischicht- wicklungen mm
	bis 80 cm	bis 160 cm	bis 320 cm		
600	1,0	1,5	—	15	1,0
1200	1,2	1,5	—	20	2,0
2400	1,5	1,8	—	25	2,0
3900	1,8	2,0	—	35	2,5
5800	2,0	2,5	3,0	50	2,5
7500	2,5	3,0	3,5	60	3,0
9000	3,0	3,5	4,0	70	3,5
11000	3,5	4,0	4,5	80	4,0
Spielraum zwischen Hülse und Nutwand (einseitig) in mm	0,3	0,6	0,8		

nur von der Höhe der Nennspannung (bzw. Prüfspannung), sondern auch von der Eisenlänge der Maschine abhängig.

Die Hülsen müssen auf beiden Seiten noch ein Stück aus dem Eisen hervorragen. Die Größe dieser Ausladung richtet sich nach der Höhe der Nennspannung. Bei Zweischichtwicklungen müssen zwischen Ober- und Unterschicht Zwischenlagen aus Isolierstoff eingelegt werden, um bei den Stirnverbindungen einen ausreichenden Abstand zwischen ihnen zu erzielen.

Eine Zusammenstellung über die Bemessung der Nutisolation enthält Tafel 16. Die dort angegebenen Werte für die Ausladung der Hülse setzen voraus, daß die Übergangsstelle am Ende der Hülse sehr sorgfältig isoliert ist (vgl. S. 156).

b) Stabwicklung. Bei Stabwicklungen enthält jede Nut im allgemeinen einen oder zwei Stäbe. Diese werden grundsätzlich in der gleichen Weise isoliert wie die Spulenseiten bei den Drahtwicklungen. Bei niedrigen Spannungen werden die Stäbe mit Preßspan umwickelt; darüber kommt eine Umwicklung mit Band, die zum Halten des Preßspans dient. Für höhere Spannungen werden die Stäbe mit Mikafolium umpreßt.

Die Isolation der Teilleiter von Kunststoffstäben ist schon auf S. 134 beschrieben worden.

3. Läuferwicklungen von Asynchronmaschinen.

Die Läufer ganz kleiner Maschinen erhalten eingefädelt oder eingeträufelt Drahtwicklungen. Die Isolation entspricht dabei derjenigen der Ständerwicklung. Größere Läufer erhalten stets zweischichtige Stabwicklungen, die in ähnlicher Weise isoliert werden wie die Stabwicklungen von Stromwenderankern. Einen Querschnitt durch eine Läufernut mit Stabwicklung zeigt Abb. 203.

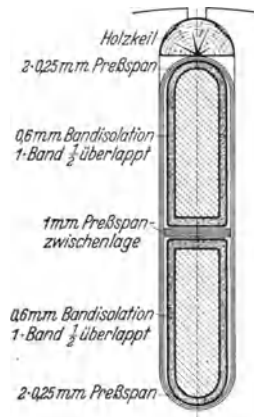


Abb. 203. Nutisolation einer Läufer-Stabwicklung.

E. Isolation der Wicklungsköpfe.

Die Spulenköpfe werden im allgemeinen durch Umwickeln mit Band isoliert. Das Band wird fast stets halbüberlappt gewickelt, so daß der Auftrag einer Schicht mindestens doppelt so groß ist als die Stärke des Bandes. Für Spannungen bis 600 Volt genügt eine Lage Baumwollband, für höhere Spannungen wird Lackleinenband oder Glimmer-Faserstoff-Band in einer oder mehreren Lagen und darüber als Abschluß eine Lage Baumwollband verwendet (Tafel 17).

Tafel 17. Isolation der Wicklungsköpfe von Wechselstrom-Ständerwicklungen.

B = Baumwollband; L = Lackleinenband (oder Glimmer-Faserstoff-Band).

Nennspannung bis Volt	Art der Isolation			Mindestabstände		
	Lagenzahl	Art der Aufbringung	Auftrag (einseitig) etwa mm	Wicklung gegen blankes Eisen mm	Wicklungsstrang gegen Wicklungsstrang	
					Einschicht- wicklung mm	Zweischicht- wicklung mm
600	1 B	trocken, nur Lackauftrag auf die oberste Lage	0,6	5	5	3
1200	1 L + 1 B		1,2	10	10	3
2400	1 L + 1 B	Anstrich auf jede Lage	1,2	15	10	4
3900	2 L + 1 B		1,8	20	15	4
5800	2 L + 1 B	Anstrich auf jede Lage	2,4	25	20	5
7500	3 L + 1 B		3,0	35	25	6
9000	4 L + 1 B	Anstrich auf jede Lage	3,5	40	30	8
11000	5 L + 1 B		4,0	50	30	8

Bei Spannungen unter 4000 Volt können die einzelnen Lagen trocken aufeinander gewickelt werden, am Schluß wird auf die oberste Lage ein Lackauftrag aufgebracht. Bei Spannungen über 4000 Volt muß darauf gesehen werden, daß Luftpfeifen innerhalb der Isolation vermieden werden. Man trägt daher auf jede Bandlage einen Auftrag aus Lack oder einem geeigneten, elastisch bleibenden Füllstoff auf; der Isolationsauftrag wird dadurch etwas höher.

Zwischen Wicklungsköpfen und Eisen sowie auch zwischen den Wicklungsköpfen der einzelnen Spulen (besonders, wenn sie verschiedenen Strängen angehören) müssen bestimmte Mindestabstände eingehalten werden. Bei den gebräuchlichen Einschichtwicklungen, wie sie in Verbindung mit halbgeschlossenen Nuten Verwendung finden, werden die Abstände zwischen den einzelnen Strängen erheblich reichlicher gewählt als bei den Zweischichtwicklungen, deren Spulen in offene Nuten gelegt werden (Tafel 17). Da nämlich bei den für halbgeschlossene Nuten gebräuchlichen Einschichtwicklungen die Spulenköpfe (wenigstens teilweise) nach dem Einbau der Spulen isoliert werden müssen, kann dies nicht so sorgfältig geschehen wie bei den außerhalb der Maschine fertigestellten Spulen der Zweischichtwicklungen; andererseits ist es bei den Zweischichtwicklungen nicht möglich, so große Abstände einzuhalten, wie sie bei den Einschichtwicklungen üblich sind. Die Angaben für das Umbandeln in Tafel 17 genügen bei sorgfältiger Ausführung der Isolation für die geringeren Abstände der Zweischichtwicklung. Bei Einschichtwicklungen mit größeren Abständen kann unter Umständen die Zahl der Lackbandlagen (etwa um eine) verringert werden.

Besonders sorgfältig sind die Stoßstellen an den Enden der Nutenhülsen zu behandeln. Früher wurde die Umbandlung der Spulenköpfe über die Hülsenenden bis zum Eisen fortgesetzt (Abb. 204a). Dabei traten leicht Luftpolster auf, die ihren verderblichen Einfluß auf die

Haltbarkeit der Isolation ausübten. Man mußte daher die Ausladung der Hülsen sehr groß machen. Heute wird das Band meistens unter die Hülse geschnürt (Abb. 204b) oder wenigstens ein Teil der Lagen. Für die Hülsenausladung kommt man dann mit den in Tafel 16 angegebenen Werten aus, sofern durch Anwendung von Füllmassen Luftpolster vermieden werden.

Bei ganz kleinen Maschinen werden die Spulenköpfe entweder gar nicht isoliert, oder es werden zwischen die einzelnen Spulen im Wicklungskopf nur Zwischenlagen aus Lackleinen gelegt. Dies gilt sowohl für kleine Stromwenderanker als auch für Ständer und Läufer von Asynchronmotoren. Besonders bei den als Zweischichtwicklung ausgeführten Ständerwicklungen kleiner Drehstrommotoren unterbleibt das Umbandeln der Spulenköpfe. Zwischenlagen sind aber hier stets zwischen solchen Spulen vorzusehen, die verschiedenen Wicklungssträngen angehören.

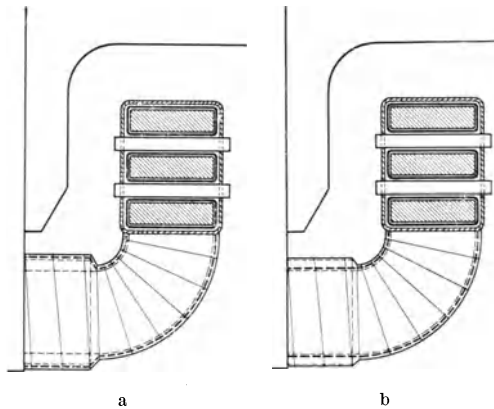


Abb. 204. Isolation der Stoßstellen
(nach Siemens-Z. 1921, S. 16).;

a) Bandumwicklung über der Hülse, b) Bandumwicklung unter der Hülse.

F. Herstellung von Spulen mit Füllmasse (kompoundierten Spulen).

Die Spulen werden zunächst gewickelt (Abb. 178a), weitläufig umbandelt und in die endgültige Form gezogen (Abb. 178b). In einem Kessel, der luftleer gepumpt wird, werden sie sodann getrocknet. Die in einem Nachbarkessel geschmolzene Füllmasse läßt man nun einfließen und setzt sie unter einen Überdruck von 4...6 at, damit die Masse in alle Poren eindringt. Nach etwa $\frac{1}{2}$ Stunde drückt man die überschüssige Masse durch Luftdruck in den Schmelzkessel zurück. Die Spulen läßt man abtropfen, verputzt sie (meistens unter Benutzung von heißen Bügeleisen) und preßt sie in einer geheizten Form auf Maß (Abb. 178c). Die Spulenseiten werden nun mit Mikafolium umwickelt, das durch Bügelmaschinen fest aufgebügelt wird.

Von einem sorgfältigen Aufbügeln hängt die Güte der Isolation wesentlich ab. Beim Bügeln darf die Spulenseite nicht verformt und keinen Biegungsbeanspruchungen ausgesetzt werden. Eine neuzeitliche

Bügelmaschine zeigt Abb. 205. Die ganze Spule wird um die zu bügelnde Spulenseite gedreht; diese selbst dreht sich dabei in einer

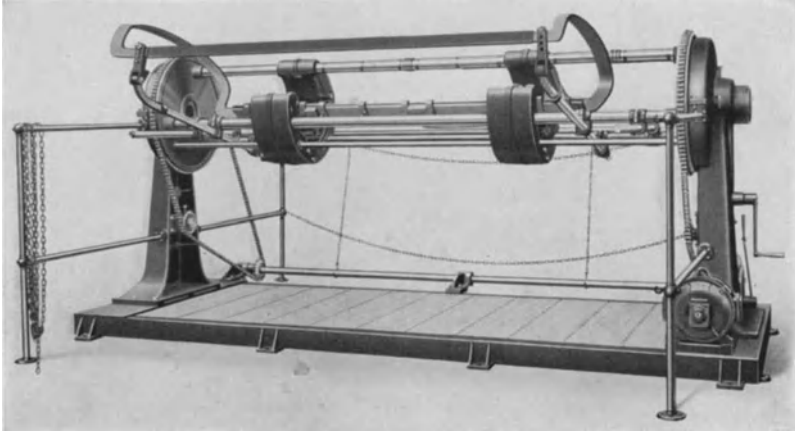


Abb. 205. Bügelmaschine für geschlossene Spulen (Werkbild Micafil).

Mulde, die elektrisch geheizt wird, von oben drückt ein Plätteisen auf sie (Abb. 206).

Nach dem Bügeln werden die Spulenseiten wieder in eine Warmpresse (Abb. 207) gelegt und auf richtiges Maß gepreßt, so daß sie spätergenau in die Nuten passen.



Abb. 206. Schnitt durch die Bügelmulde (mit Spulenseite) der Bügelmaschine nach Abb. 205 (Werkbild Micafil).

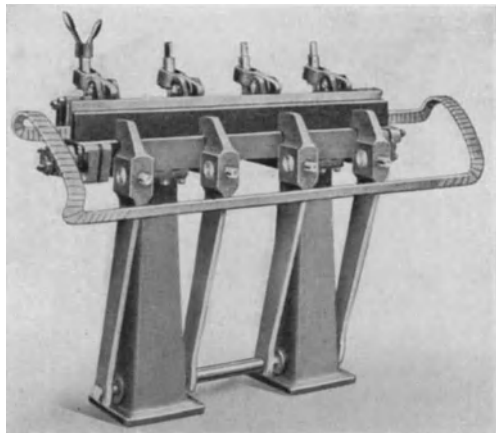


Abb. 207. Spulennpresse (Werkbild Micafil).

Die Spulenköpfe werden durch Umbandeln isoliert und lackiert. Die fertige Spule zeigt Abb. 178d. In Abb. 208 ist eine compoun-

dierte Spule mit je einer Schnittstelle im Nutenleiter und im Spulenkopf dargestellt.

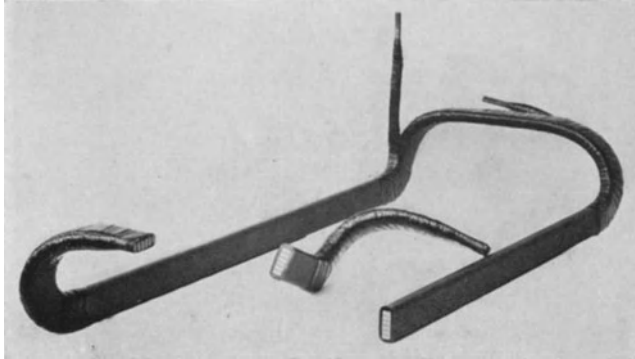


Abb. 208. Schnitt durch Spulenseite und Spulenkopf einer Spule mit Füllmasse (Werkbild Siemens).

Die Nutenstäbe der Stabwicklungen für hohe Spannungen werden in gleicher Weise umpreßt wie die Spulenseiten.

G. Trocknen und Lackieren der Wicklungen.

Wicklungen, die nicht in Füllmasse getränkt werden, müssen, wenn sie mit Faserstoffen isoliert sind, lackiert werden. Bei Spulen und Stäben, die in fertigem Zustande eingebaut werden können, geschieht das Lackieren vor dem Einbau, sonst nachher.

Die Spulen bzw. die bewickelten Maschinenteile werden in einen Kessel gebracht und durch einen warmen Luftstrom von etwa 110° getrocknet. Nach dem Trocknen, das etwa $\frac{1}{2}$ bis 1 Stunde dauert, wird die Luft aus dem Kessel ausgepumpt und aus einem anderen Behälter der Lack eingelassen. Um das Eindringen des Lackes in die Poren der Faserstoffe zu begünstigen, kann noch ein Überdruck von etwa 4...6 at auf den Lack gesetzt werden.

Nach dem Lackieren werden die Gegenstände im Trockenofen getrocknet. Da der Lack während dieser Zeit einen Oxydationsvorgang durchmacht, muß für reichlichen Luftzutritt gesorgt werden. Das Lackieren und Trocknen kann bei Bedarf wiederholt werden.

Wenn bewickelte Maschinenteile so große Abmessungen haben, daß sie nicht in die Tränkanlage hineingebracht werden können, werden sie in einem gewöhnlichen Trockenofen getrocknet, dann mit Lack gespritzt und wieder getrocknet.

Zum Abschluß werden gewöhnlich alle zugänglichen Teile der Wicklungen (Wicklungsköpfe) mit lufttrocknendem Lack gespritzt.

IX. Sichern der Wicklungen gegen mechanische Kräfte.

A. Sichern gegen Kurzschlußkräfte.

Wenn zwei von elektrischen Strömen durchflossene Leiter nebeneinander verlaufen, so üben sie Kräfte aufeinander aus, die um so größer sind, je höher die Ströme in den Leitern sind und je geringer der Abstand der Leiter voneinander ist. Derartigen Kräften sind auch die Wicklungen elektrischer Maschinen ausgesetzt. Die in Nuten liegenden Wicklungsteile können solchen Kräften nicht nachgeben, da sie fest gelagert sind; jedoch besteht bei den Stirnverbindungen die Gefahr, daß sie durch starke mechanische Kräfte verbogen und zerstört werden.

In normalem Betriebszustand sind die Kräfte nicht so groß, daß sie der Wicklung gefährlich werden, bei Kurzschlüssen jedoch können sie auf solche Werte anwachsen, daß die Stirnverbindungen ihnen nur standhalten können, wenn sie besonders befestigt sind. Die Gefahr beschränkt sich jedoch auf Maschinen großer Leistung; sie ist am größten bei den schnelllaufenden Maschinen (Turbomaschinen).

Am meisten durch Kurzschlußkräfte gefährdet sind bei Synchronmaschinen die Wicklungsköpfe des Ständers, bei Stromwenderankern die Stirnverbindungen der Ankerwicklung. Bei Asynchronmaschinen sind die Köpfe weniger gefährdet, weil bei ihnen das Verhältnis des größten Kurzschlußstromes zum Nennstrom geringer ist als bei den Synchronmaschinen.

Die Spulenköpfe der Stromwenderwicklungen großer Maschinen sind gegen ein Verbiegen in radialer Richtung durch Wicklungsträger und Bandagen (vgl. S. 46) geschützt. Auch eine Verschiebung in Umfangsrichtung ist nicht leicht möglich, da die Köpfe zwischen Träger und Bandage fest eingeklemmt sind. Noch wirksamer wird eine solche Verschiebung verhindert, wenn man unter der Bandage zwischen die einzelnen Spulenköpfe Trennstücke aus Isolierstoff einlegt.

Bei Ständerwicklungen von Synchronmaschinen ist die Befestigung der Wicklungsköpfe am einfachsten, wenn alle Spulen gleiche Form haben, wie es bei den neuerdings bevorzugten Zweischichtwicklungen mit Formspulen für offene Nuten der Fall ist. Zur Befestigung, wenn sie notwendig ist, genügt meistens ein einfacher metallischer mit Isolierstoff umwickelter Ring, der außen um die Stirnverbindungen herumgelegt wird und an den die einzelnen Spulenköpfe mit Band festgebunden werden (Abb. 140). Der Ring braucht in den meisten Fällen nicht einmal am Gehäuse befestigt zu sein, sondern er wird von der Gesamtheit der Wicklungsköpfe getragen. Nur bei besonders schwierigen Verhältnissen wird der Ring gegen das Gehäuse abgestützt.

Zur Befestigung solcher Spulenköpfe, wie sie bei den Einschichtwicklungen meistens üblich sind, werden im Kreise angeordnete isolierte Bolzen vorgesehen, die durch die Zwischenräume zwischen den Spulenköpfen hindurchtreten. Auf diese werden z. B. ringförmige Körper aus Isolierstoff geschoben, die die Abstände zwischen Spulenköpfen und Eisen und zwischen Spulenköpfen verschiedener Etagen sichern. Die ganze Anordnung wird dann durch Schrauben zusammengepreßt (Abb. 209).

Sind größere Kurzschlußkräfte zu erwarten, so ist eine Befestigung nach Abb. 147 vorzuziehen. Hier sind zwei Bolzenreihen vorgesehen, und je ein innerer und ein äußerer Bolzen sind durch Laschen über-

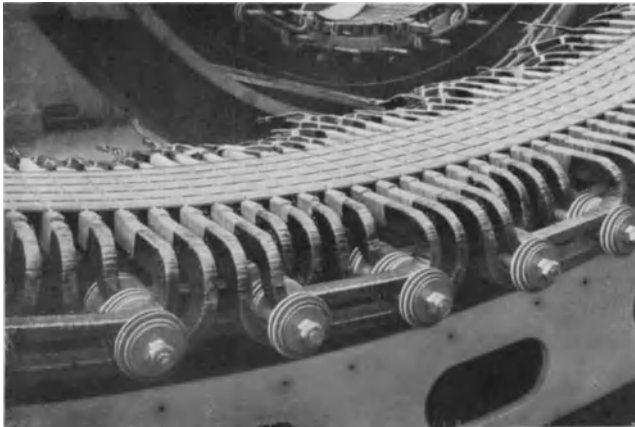


Abb. 209. Befestigung der Spulenköpfe von Einschichtwicklungen (Werkbild AEG).

brückt, zwischen denen die Spulenköpfe fest eingepreßt sind. Die Laschen bestehen entweder aus Isolierstoff großer mechanischer Festigkeit (Hartpapier) oder aus Messing mit unterlegtem Isolierstoff.

Diese Ausführungsform wird meistens bei den schnelllaufenden Maschinen (Turbogeneratoren) angewandt. Häufig wird jede Bolzenreihe in sich noch durch einen Ring versteift (Abb. 144). Bei diesen Maschinen müssen meistens noch die aus den Nuten hervorragenden Teile der Nutenstäbe gegen Kurzschlußkräfte gesichert werden. Dies geschieht zweckmäßig durch die Anordnung sog. Kämmen (Abb. 144), die mit ähnlichen Nuten versehen sind, wie sie das Blechpaket hat. Die Kämmen werden ebenfalls durch die erwähnten Bolzen gehalten.

B. Sichern gegen Fliehkräfte.

Gegen die Einwirkung der Fliehkräfte müssen die Wicklungen gesichert werden, die sich im umlaufenden Teil einer Maschine befinden.

Die Art der Befestigung ist verschieden für die in Nuten liegenden Wicklungsteile und für die Stirnverbindungen.

Bei Ankeren von Stromwendermaschinen und Läufern von Asynchronmaschinen mit halboffenen Nuten werden die Nutenleiter durch Keile gehalten, die die Nut abschließen. Wenn die Fliehkräfte nur gering sind, genügt als Keil schon ein Streifen aus Preßspan. Bei Stromwenderankern, die offene Nuten mit Formspulenwicklung haben, wendet man meistens keinen Keilverschluß an, wenn es sich um kleinere Maschinen handelt; die Nutenleiter werden vielmehr in gleicher Weise wie die



Abb. 210. Bandagen zum Halten der Stirnverbindungen eines großen Gleichstromankers (Werkbild Siemens).

Stirnverbindungen durch Bandagen gehalten. Bei dieser Ausführung spart man den Platz für den Nutenkeil und erzielt eine bessere Kühlung. Bei größeren Maschinen reicht diese Befestigung nicht aus. Die offenen Nuten werden dann oben schwalbenschwanzförmig ausgebildet und durch Keile aus Holz oder Fiber verschlossen. Sind die Fliehkräfte besonders groß, wie bei den Läufern der Turbomaschinen, werden Nutenverschlußkeile aus Messing verwendet.

Die Wicklungsköpfe der verteilten Wicklungen werden meistens durch Bandagen gegen die Einwirkung der Fliehkräfte gesichert. Die Bandagen werden aus Stahldraht oder Bronzedraht hergestellt und auf eine Unterlage aus Isolierstoff gewickelt. Bei großen Maschinen mit geringer Drehzahl werden zuweilen Bandagen verwendet, die getrennt von der Maschine hergestellt, dann aufgelegt und durch ein Bandagenschloß zusammengeschlossen werden. Diese Ausführungsform hat den Vorzug, daß die Bandagen bei Instandsetzungsarbeiten an der Wicklung leicht abgenommen und wieder aufgelegt werden können: sie lassen sich aber nur mit einer Drahtlage ausführen.

Bei größeren Beanspruchungen (schnellaufenden Maschinen) müssen mehrlagige Bandagen angeordnet werden. Sie werden auf eine Isolierstoffunterlage unmittelbar auf die Wicklung aufgewickelt und auf dem ganzen Umfang weich verlötet. An einzelnen Stellen des Umfanges werden Zwingen aus Weißblech angebracht, welche die Einzeldrähte zusammenhalten (Abb. 210); sie werden mit verlötet. Werden mehrere

Lagen übereinander gewickelt, so werden sie durch Zwischenlagen aus Glimmerstoff getrennt, um die Wirbelstromverluste klein zu halten. Aus dem gleichen Grunde dürfen die Bandagen im allgemeinen nicht breiter als 30 mm sein; ist eine größere Breite notwendig, so werden zwei oder mehr Bandagen getrennt nebeneinander aufgebracht (Abb. 210).

In noch höherem Maße muß die Bildung von Wirbelströmen unterdrückt werden bei den oben erwähnten Bandagen, die als Ersatz für Nutenkeile dienen, weil diese im magnetischen Feld der Maschine bewegt werden. Die Breite der Einzelbandage darf hier nicht größer als 10 mm sein, als Werkstoff muß unmagnetischer Stahldraht oder Bronzedraht verwendet werden.

Die Bandagen werden unter großer Vorspannung aufgewickelt. Dies ist notwendig, weil sie sonst infolge des Schwindens der Isolierstoffunterlage beim Trocknen locker werden würden. Um die gewünschte Vorspannung während des Wickelns dauernd gleichmäßig aufrechterhalten und nachprüfen zu können, bedient man sich sogenannter Bandagenbremsen (Abb. 211). Die

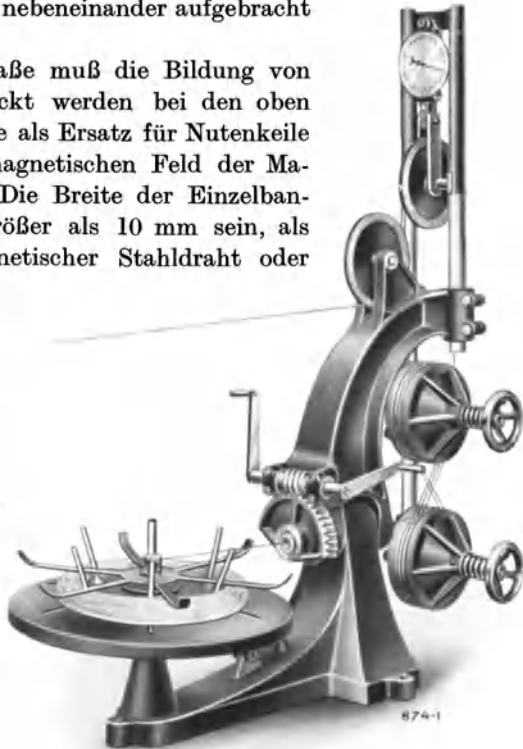


Abb. 211. Bandagenbremse (Werkbild Micafil).

Drahtspannung kann an dem eingebauten Zugmesser abgelesen werden. Das Aufwickeln des Drahtes wird auf einer gewöhnlichen Wickelbank vorgenommen, ebenso das Verlöten.

Bei zweischichtigen Wicklungen drücken die Bandagen auf die Oberschicht der Stirnverbindungen, die Unterschicht liegt auf dem Wicklungsträger auf. Der Hohlraum zwischen Ober- und Unterschicht muß an der Stelle, an der die Bandage liegt, mit Isolierstoff ausgefüllt werden, damit die Oberschicht nicht von der Bandage eingedrückt wird. Zum Ausfüllen dienen Streifen aus Preßspan oder ähnlichem Stoff. In Abb. 63 sind diese zwischen Ober- und Unterschicht liegenden Streifen, die mit weißem Band weitläufig umwickelt sind, deutlich zu erkennen.

Läufer von Asynchronmaschinen mit Drahtwicklung, die nur bei kleinen Leistungen vorkommt, erhalten keine Bandagen. Die Spulenköpfe werden dort einfach mit einer Schnur an einen Ring oder an eine auf der Welle sitzende geschlitzte Scheibe angebunden. Bei ganz kleinen Stromwenderankern erübrigt sich ebenfalls das Bandagieren der Wicklungsköpfe, dagegen muß eine Schnurbandage aufgebracht werden, welche die Zuleitungen zum Stromwender hält.

Bei den Trommelläufern der Turbomaschinen kann die Befestigung der Wicklungsköpfe ebenfalls durch Drahtbandagen erfolgen. An ihrer Stelle werden aber häufig massive Kappen aus unmagnetischem Stahl oder Bronze verwendet, die auf vorbereitete Sitzflächen an den Zähnen aufgeschraubt und an besonderen Ansätzen der Welle festgeschraubt

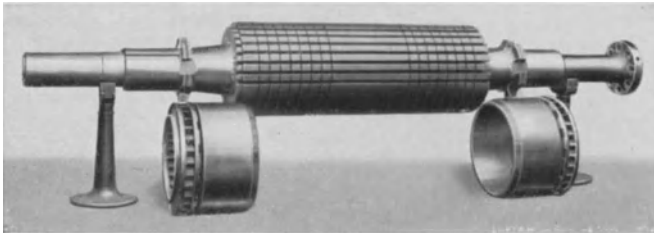


Abb. 212. Läuferkörper mit Stahlkappen (Werkbild Siemens).

werden (Abb. 212). Die Kappen tragen oft die Lüfter, die die Kühlluft durch die Maschine treiben.

Für die Polwicklungen der Schenkelpolmaschinen ist bei kleinen Einheiten meistens keine besondere Befestigung notwendig, bei größeren werden Polwicklungsstützen vorgesehen, die verhindern, daß Windungen seitlich aus dem Spulenkasten heraustreten (Abb. 97). Bei langen Läufern können mehrere derartige Stützen nebeneinander angeordnet werden.

X. Prüfen der Wicklungen.

A. Prüfung der fertigen neuen Wicklungen¹.

Die Prüfungen, denen neu hergestellte Wicklungen zu unterwerfen sind, sind in VDE 0530/1934 (Regeln für die Bewertung und Prüfung von elektrischen Maschinen) festgelegt. Es sind drei Proben für die Wicklungen und eine Probe für die Klemmen vorgesehen.

1. Wicklungsprobe.

Sie dient zur Feststellung der ausreichenden Isolierung von Wicklungen gegeneinander und gegen Körper. Die Probe erfolgt in der Weise,

¹ Vgl. VDE 0530/1934, § 48 bis 53.

daß der eine Pol einer Wechselstromquelle (Frequenz im allgemeinen 50 Hz) an die zu prüfende Wicklung, der andere Pol an die Gesamtheit der untereinander und mit dem Körper verbundenen anderen Wicklungen gelegt wird. Man steigert langsam die Spannung bis zu der in Tafel 18 angegebenen Prüfspannung (mit höchstens 50 % dieses Wertes beginnend) und hält die Prüfspannung 1 Minute lang aufrecht.

Tafel 18. Prüfspannungen für die Wicklungsprobe
(nach VDE 0530/1934).

	I	II		III	IV
	Wicklung	Bereich		Prüfspannung in Volt (der größere der Werte)	
1	Alle Wicklungen mit Ausnahme von 5...8	Nennleistung kleiner als 1 kW		$2U + 500$	
2		Nennleistung von 1 kW an	bis 1000 Volt	$2U + 1000$	1500
3			bis 3000 Volt	$3U$	
4			über 3000 Volt	$2U + 3000$	
5	Erreger- wicklungen von Einanker- umformern und Synchron- motoren	mit stets geschlossenem Erregerkreise ohne oder mit Drehstromanlauf ¹		$2U + 1000$	1500
6		mit für den Anlauf unterteilter Erregerwicklung ohne oder mit Drehstromanlauf ¹		$10U + 1000$	1500
7		mit abschaltbarem Erregerkreise	ohne Drehstromanlauf	$10U + 1000$	1500
8			mit Drehstromanlauf	$20U + 1000$, jedoch max. 8000	1500

¹ Der Erregerkreis von Einankerumformern und Synchronmotoren gilt als geschlossen, wenn der äußere Widerstand nicht mehr als das 10fache des inneren beträgt.
Empfohlen wird, die Erregerwicklung von Einankerumformern und Synchronmaschinen stets geschlossen zu halten oder sie für den Anlauf zu unterteilen.

In Tafel 18 bedeutet U

1. die höchste auf dem Leistungsschild angegebene Nennspannung der Maschine, bei Feldwicklungen die Nenn-Erregerspannung,
2. bei leitend verbundenen Wicklungen einer oder mehrerer Maschinen die höchste gegen Körper beim Körperschluß eines Poles auftretende Spannung,
3. bei Läuferwicklungen von Asynchronmotoren, die dauernd in einer Richtung umlaufen, die Läuferspannung und bei Umkehr-Asynchronmotoren $1,5 \times$ Läuferspannung,
4. bei dauernd mit dem Außenpol geerdeten Maschinen $1,25 \times$ Nennspannung,

5. bei Maschinen, die im Sternpunkt kurz geerdet sind, $0,8 \times$ Nennspannung.

Kurzschlußwicklungen brauchen nicht geprüft zu werden.

2. Sprungwellenprobe.

Sie dient dazu, festzustellen, daß die Windungsisolation gegenüber den im Betrieb auftretenden Sprungwellen ausreicht. Für Synchron- und Asynchronmaschinen benutzt man die in Abb. 213 dargestellten Schaltungen. Q bedeutet in Abb. 213a u. b die Erregermaschine, in

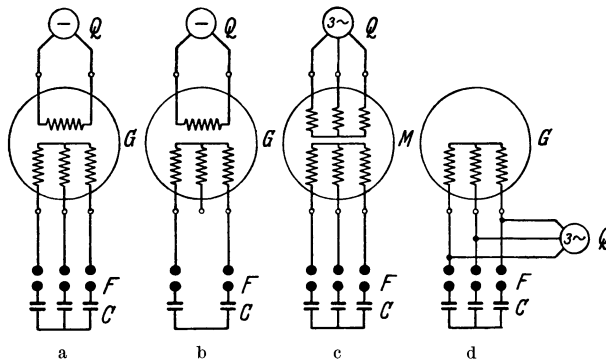


Abb. 213. Schaltungen zur Durchführung der Sprungwellenprobe (nach VDE 0530/1934, Abb. 3).

Abb. 213c u. d eine dreiphasige Wechselstromquelle (Generator oder Regeltransformator). Die zu prüfende Wicklung ist über Funkenstrecken F aus massiven Kupferkugeln von mindestens 50 mm Durchmesser auf Kapazitäten C geschaltet, die nach Tafel 19 zu bemessen sind. Es ist darauf zu achten, daß die Verbindungsleitungen möglichst kurz werden.

Tafel 19. Prüfkapazität (nach VDE 0530/1934).

Nennspannung kV	Kapazität in jeder Leitung mindestens μF
2,5...6	0,05
bis 15	0,02
über 15	0,01

Der Kugelabstand jeder Funkenstrecke wird für einen Überschlag bei $1,1 U$ eingestellt. An den Klemmen der zu prüfenden Wicklung wird nun bei mindestens normaler Frequenz eine Spannung von etwa dem 1,3fachen der Nennspannung hergestellt. Die Funkenstrecken werden auf beliebige Weise gezündet (etwa durch vorübergehendes Annähern der Kugeln oder Überbrücken der Zwischenräume) und ein Funkenspiel von 10 Sekunden Dauer aufrechterhalten. Die Funkenstrecken sind dabei mit einem Luftstrom von etwa 3 m/s Geschwindigkeit anzublase.

3. Windungsprobe.

Sie dient zur Feststellung der ausreichenden Isolierung benachbarter Windungen gegeneinander und zum Auffinden von Wicklungsdurchschlägen, die durch die Sprungwellenprobe eingeleitet sind.

Die Prüfung erfolgt bei Leerlauf durch Erhöhung der angelegten oder erzeugten Spannung (Motoren oder Generatoren) auf die in Tafel 20 angegebenen Werte. Die Frequenz bzw. Drehzahl kann entsprechend erhöht werden. Die Prüfdauer beträgt 3 Minuten.

Die höhere Spannung unter 1 und 2 soll ein Ersatz für die nicht durchführbare Wicklungsprobe von Strang zu Strang sein.

Tafel 20. Prüfspannungen für die Windungsprobe
(nach VDE 0530/1934).

	I	II
	Wicklungsart	Prüfspannung Nennspannung
1	Wicklungen, die der Wicklungsprobe von Strang zu Strang (vgl. S. 165) nicht unterworfen werden (Wicklungen von Maschinen für weniger als 1000 Volt mit unlösbaren Verbindungen)	1,5
2	Wicklungen mit abgestufter Isolation für dauernde Erdung eines Poles	1,5
3	Alle anderen Wicklungen	1,3

4. Klemmenprobe.

Die Klemmen von Maschinen müssen eine Prüfspannung gleich der 1,5fachen Prüfspannung der Wicklung (s. Tafel 18) aushalten.

Die Dauer der Prüfung beträgt 1 Minute.

Die Ausführung dieser Prüfung kann aber nur entweder an den zur Maschine gehörenden Klemmenbrettern vor dem Anschluß an die Wicklung oder bei Verzicht auf diese Art der Prüfung an Klemmenbrettern gleicher Type verlangt werden.

B. Prüfung teilweise erneuerter Wicklungen.

Die Werte der Tafeln 18 und 20 gelten nur für die Prüfung ganz neuer Wicklungen. Für ausgebesserte oder teilweise erneuerte Wicklungen bestehen bis heute keine VDE-Vorschriften; jedenfalls dürfen an ihnen nicht so scharfe Proben vorgenommen werden wie an neuen Wicklungen. Auf eine Sprungwellenprobe verzichtet man am besten ganz; die Windungsprobe führt man zweckmäßig mit einer Spannung durch, die 10...15% über der Nennspannung liegt.

Bei der Wicklungsprobe kann der erneuerte Wicklungsteil für sich allein der vollen Prüfspannung nach Tafel 18 unterworfen werden,

wenn bei dieser Probe die alten Wicklungsteile nicht ebenfalls beansprucht werden. Nach endgültiger Fertigstellung wird die ganze Wicklung einer Probe mit verminderter Prüfspannung unterworfen. Im allgemeinen prüft man mit etwa 70% der Werte nach Tafel 18; wenn jedoch die nicht erneuerten Wicklungsteile schon mehrere Jahre alt sind, begnügt man sich zweckmäßig mit noch geringeren Werten.

C. Prüfung während der Herstellung der Wicklungen.

Es ist erwünscht, daß Fehler, die bei der Herstellung der Wicklungen auftreten, sobald als möglich entdeckt werden. Man nimmt daher schon während der Herstellung Proben vor, die im wesentlichen der Wicklungs- und Windungsprobe an der fertigen Maschine entsprechen. Hierzu kommen noch Prüfverfahren, die dazu dienen, die Stelle zu finden, an der ein festgestellter Fehler liegt.

1. Prüfung von Stromwendern und Schleifringen.

Bei Stromwenderankern und Läufern mit Schleifringen untersucht man vor dem Wickeln Stromwender und Schleifringe auf Körperschluß mit einer Prüfspannung, die zweckmäßig noch etwas höher gewählt wird, als der Tafel 18 entspricht. Einen Pol der Stromquelle legt man

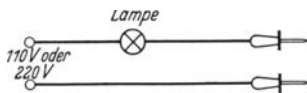


Abb. 214. Schaltung einer Prüflampe.

an Körper (z. B. an die Welle), den andern an die Stromwenderstege oder an die Schleifringe. Damit alle Stromwenderstege gleichzeitig der Prüfung unterworfen werden, schlingt man um den Stromwender einen blanken Kupferdraht, der alle Stege miteinander verbindet. Die Durchführung der Probe erfolgt genau wie bei der Wicklungsprobe.

Bei Stromwendern prüft man noch die einzelnen Stege, ob sie gegeneinander isoliert sind; dies geschieht mit Hilfe der sog. Prüflampe (am besten Glimmlampe), deren Schaltung Abb. 214 zeigt. Die Leitungen endigen in Metallspitzen, die in isolierte Handgriffe eingesetzt sind.

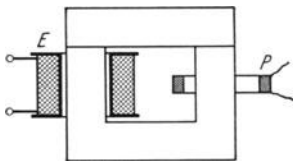


Abb. 215. Induktionsprüfgerät.

Die Spitzen werden auf benachbarte Stege aufgesetzt; das Aufleuchten der Lampe zeigt einen Fehler in der Isolation an.

2. Prüfung von Spulen und Wicklungen.

Formspulen und Halbformspulen werden meistens vor dem Einlegen in die Nuten geprüft. Bei Formspulen ist die wichtigste Probe diejenige auf Windungsschluß. In einfachster Weise kann sie mit dem Induktionsprüfgerät vorgenommen werden (Abb. 215). Die zu prüfende Spule *P*

wird um einen Schenkel eines U-förmigen geblechten Eisenkernes gelegt, der dann durch ein aufgelegtes Joch geschlossen wird. Es ist darauf zu achten, daß die Drahtenden der zu prüfenden Spule sich nicht berühren. Speist man die Erregerwicklung E mit Wechselstrom, so werden in der zu prüfenden Spule Wechselspannungen erzeugt; Ströme können jedoch nur beim Vorliegen eines Windungsschlusses auftreten. Ein Windungsschluß kann sich anzeigen entweder dadurch, daß die Spule warm wird, oder dadurch, daß die Stromaufnahme der Erregerwicklung nach Einlegen des Prüflings höher ist als vorher. Das Prüfen einer Turboläuferspule mit Hilfe eines solchen Prüfgerätes zeigt Abb. 216.



Abb. 216. Prüfen einer Induktorspule auf Windungsschluß (Werkbild Siemens).

Eine ähnliche auf Induktionswirkung beruhende Einrichtung, die unter dem Namen Ankerprüfeinrichtung bekannt ist, dient zur Untersuchung von Spulen und Wicklungen, die in Nuten liegen.

Ein U-förmiger Elektromagnet (Erregermagnet) mit einer von Wechselstrom gespeisten Spule wird so an den zu prüfenden Anker (Abb. 217 a) oder Ständer (Abb. 217 b) gelegt, daß das Eisenpaket des Prüflings als Schlußjoch für den Magneten

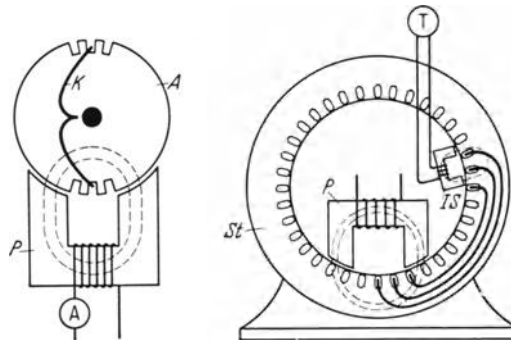


Abb. 217. Prüfung in Nuten liegender Spulen auf Windungsschluß (Werkbild Siemens)

a) bei einem zweipoligen Stromwenderanker, b) bei einem vierpoligen Wechselstromständer.

wirkt. Wenn der Magnet erregt ist, werden in den Wicklungen Spannungen induziert.

Bei offenen Wicklungen (z. B. Wechselstrom-Ständerwicklungen nach Abb. 217b) treten nur dann Ströme auf, wenn ein Windungsschluß in einer der unter Spannung stehenden Spule vorhanden ist. Zur Feststellung solcher einen Windungsschluß andeutenden Ströme setzt man auf die gleichen Nutöffnungen, die der Erregermagnet umfaßt oder auf die um die Spulenweite entfernten Nuten einen zweiten kleineren U-förmigen Eisenkörper (Suchmagnet) auf (JS in Abb. 217b), der eine

Spule trägt, deren Enden an einen Hörer (T in Abb. 217b) angeschlossen sind. Wenn der Suchmagnet über eine Nut greift, in der ein Fehlerstrom fließt, hört man im Hörer einen Ton.

An Stelle des Suchmagneten läßt sich auch ein schmaler Streifen Eisenblech verwenden, der auf die Nutenöffnungen gehalten wird. Fließt in der Nut ein Fehlerstrom, so wird das Blech angezogen.

Auch in einer geschlossenen Stromwenderwicklung (Abb. 217a) fließt bei Erregung des Erregermagneten kein Strom, wenn die Wicklung symmetrisch und fehlerfrei ist. Außer einem einfachen Windungsschluß können bei einem solchen Anker noch andere Fehler vor-



Abb. 218. Ankerprüfeinrichtung im Betrieb (Werkbild Siemens).

kommen; die Fehler machen sich in verschiedener Weise bemerkbar.

Ein Windungsschluß zeigt sich wieder an, wenn man mit dem an den Hörer angeschlossenen Suchmagneten über eine Nut kommt, in der die fehlerhafte Spule liegt; auch die Benutzung eines Blechstreifens ist wieder möglich. Oft erkennt man den Windungsschluß aber auch an einer größeren Stromaufnahme der Spule des Erregermagneten (Strommesser A in Abb. 217a). Ob ein festgestellter Windungsschluß in der Spule selbst liegt, oder ob die zugehörigen Stromwenderstege sich berühren, kann man feststellen, wenn man die Spulenenden auslötet.

Wenn bei einer Ankerspule Anfang und Ende beim Einlöten vertauscht worden sind, hört man im Hörer des Suchmagneten einen Ton über den ganzen oder einen größeren Teil des Ankerumfangs. Eine ähnliche Erscheinung tritt auf, wenn ein sog. Lagenschluß vorhanden ist, d. h. wenn in einer Nut ein Leiter der Oberschicht Berührung hat mit einem solchen der Unterschicht. Beim Vorliegen eines Lagenschlusses

verschwindet der Ton gerade dann, wenn der Erregermagnet oder der Suchmagnet gerade die Nut umfaßt, in der der Lagenschluß liegt. Die Anwendung des Ankerprüfgerätes bei einem zweipoligen Gleichstromanker zeigt Abb. 218.

Die Ergebnisse der Prüfung mit dem einfachen Induktionsverfahren unter Verwendung normaler Wechselstromfrequenz sind nicht immer einwandfrei. Insbesondere kommen sog. unvollkommene Windungsschlüsse nicht zum Vorschein. Besser ist in dieser Hinsicht die Hochfrequenzprobe, deren Schaltung Abb. 219 zeigt. Ein aus der Spule L_1 und dem Kondensator C_1 bestehender Schwingungskreis liegt an der Sekundärwicklung des Transformators T . Ein Funkenübergang an der Funkenstrecke F ruft in dem Schwingungskreis Schwingungen hoher Frequenz hervor. Ein zweiter Schwingungskreis bestehend aus L_2 und C_2 wird durch den Drehkondensator C_2 auf den ersten Kreis abgestimmt. Der Resonanzzustand zeigt sich durch den größten Ausschlag des eingebauten Strommessers A an. Wird nun die zu prüfende Spule P in das magnetische Feld der Spulen L_1 und L_2 gebracht, so wird beim Vorhandensein eines Windungsschlusses die Resonanz gestört, und der Ausschlag des Strommessers A geht zurück.

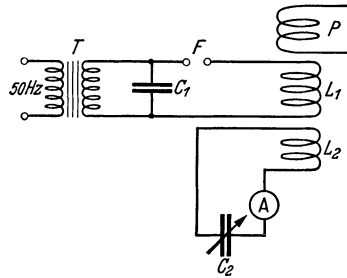


Abb. 219. Schaltung zur Windungsprobe mit Hochfrequenz.

Das beschriebene Prüfverfahren kann auch bei Spulen angewandt werden, die schon in die Nuten gelegt sind. Die Spulen L_1 und L_2 müssen dann beim Abstimmen des zweiten Kreises die gleiche Lage zum Eisenkörper der Maschine haben wie beim Prüfen der Spulen. Auf diese Weise können also auch Halbformspulen sowie eingefädelte und eingeträufelte Wicklungen nach ihrer Fertigstellung geprüft werden.

Bei umpreßten Formspulen und Halbformspulen wird meistens auch die Nutisolation vor dem Einlegen der Spulen geprüft. Jede Spulen-seite wird auf der Länge, auf der sie später in der Nut liegt, mit Stanniol umwickelt oder in eine sog. künstliche Nut gelegt, in der sie allseitig von Metall umgeben ist. Ein Pol der Spannungsquelle wird an das Stanniol oder an die künstliche Nut, der andere an die Spulenenden gelegt. Die Prüfspannung wird gewöhnlich etwas höher gewählt, als sie sich nach Tafel 18 für die fertige Wicklung ergibt.

3. Aufsuchen von Fehlerstellen.

Bei der Feststellung eines Windungsschlusses nach den beschriebenen Prüfverfahren ergibt sich gleich auch die Lage der fehlerhaften Spule.

Dies ist nicht ohne weiteres der Fall, wenn ein Körperschluß vorliegt. Hier muß der Ort des Fehlers meistens besonders festgestellt werden.

In vielen Fällen kann man den Fehler „herausbrennen“. Man läßt bei der Wicklungsprobe den Strom so lange übergehen, bis sich die Fehlerquelle durch Rauchentwicklung oder durch einen Lichtbogen bemerkbar macht. Wenn der Übergangswiderstand an der Fehlerstelle gering ist, müßte man, um ein Ausbrennen zu ermöglichen, eine Stromquelle großer Leistungsfähigkeit nehmen, um hohe Stromstärken zu erzielen; dabei besteht die Gefahr, daß Beschädigungen des Eisenkörpers auftreten.

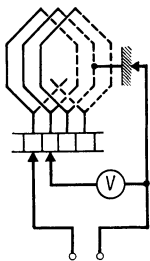


Abb. 220.
Schaltung zum
Auffinden von
Fehlerstellen in
Gleichstrom-
ankern.

Bei Gleichstromankern benutzt man daher oft ein anderes Verfahren. Man führt einem beliebigen Stromwendersteg einen Gleichstrom konstanter Stärke zu, der über die Fehlerquelle zum Körper fließt (Abb. 220). Mittels eines Spannungsmessers V mißt man die Spannung zwischen Körper und Stegen. An den mit der schadhafte Spule unmittelbar in Verbindung stehenden

Stegen zeigt sich die geringste Spannung. Das Verfahren läßt sich auch bei Wechselstromwicklungen anwenden, wenn man an den Verbindungsstellen der einzelnen Spulen blanke Stellen herstellt, an die der Spannungsmesser angeschlossen werden kann.

Anhang:

Umschalten und Umwickeln.

Es besteht häufig das Bedürfnis, eine vorhandene Maschine mit einer Spannung oder einer Drehzahl zu betreiben, für die sie nicht gebaut ist. Es ist dann meistens notwendig, die Wicklung der Maschine umzuschalten oder sie durch eine neue Wicklung mit anderer Windungszahl und anderem Leiterquerschnitt zu ersetzen. Besonders Instandsetzungswerkstätten sehen sich oft vor derartige Aufgaben gestellt.

A. Gleichstromwicklungen.

Bei Gleichstrommaschinen kommen im wesentlichen die zwei Fälle vor, daß eine Maschine bei gleichbleibender Drehzahl mit einer anderen Spannung oder bei gleichbleibender Spannung mit einer anderen Drehzahl betrieben werden soll. Ob es sich dabei um einen Motor oder Generator handelt, ist für die Lösung der Aufgabe meistens gleichgültig.

1. Änderung der Spannung bei gleichbleibender Drehzahl.

a) Ankerwicklung. Die Zahl der in Reihe geschalteten Ankerleiter muß sich in dem gleichen Verhältnis ändern, in dem sich die Spannung

ändert. Da die kleineren genormten Gleichstromspannungen im Verhältnis 1 : 2 aufeinanderfolgen (110, 220, 440 Volt), ist häufig auch die Zahl der in Reihe geschalteten Ankerleiter in diesem Verhältnis zu ändern, eine Umwicklung von 110 Volt auf 220 Volt z. B. bedingt eine Verdoppelung.

Wenn die Art und Schaltung der Wicklung dieselbe bleibt, kann die Änderung nur dadurch erfolgen, daß die Windungszahl jeder Spule im Verhältnis der neuen zur alten Spannung geändert, beim Übergang von 110 Volt auf 220 Volt also verdoppelt wird. Bei einer Vergrößerung der Windungszahl wird der für den einzelnen Leiter zur Verfügung stehende Raum in der Nut im gleichen Verhältnis geringer, bei einer Verkleinerung der Windungszahl größer. Der Querschnitt des Leiters (einschl. Isolation!) muß sich also im umgekehrten Verhältnis ändern wie die Windungszahl. Ist man im Zweifel, ob die notwendige Leiterzahl mit dem vorgesehenen Querschnitt in der Nut Platz findet, so läßt man den Versuch entscheiden, den man mit kurzen Drahtstücken durchführen kann.

Wenn bei der Änderung der gesamte reine Kupferquerschnitt einer Nut der gleiche bleibt, ändert sich die Leistung und die Erwärmung der Maschine nicht. Meistens ist aber bei geringer Leiterzahl je Nut die Ausnutzung des Nutenraumes für den reinen Kupferquerschnitt günstiger als bei größerer Leiterzahl. Bei gleichbleibender Stromdichte und Wicklungserwärmung kann daher die Leistung der Maschine bei Erhöhung der Leiterzahl etwas geringer, bei Verringerung der Leiterzahl etwas höher werden.

Beispiel: Abb. 198c stellt den Querschnitt durch eine Nut mit einer Wicklung für 110 Volt dar. Der reine Kupferquerschnitt eines Leiters ist $3,7 \times 13 = 48 \text{ mm}^2$, der Strom im Ankerleiter 196 A, mithin die Stromdichte $\frac{196}{48} = 4,09 \text{ A/mm}^2$. Jeder Leiter nimmt mit Isolation eine Fläche von $4,1 \times 13,4 \text{ mm}^2$ ein. Soll die Wicklung durch eine solche für 220 Volt ersetzt werden, so müssen auf diesem Raum zwei isolierte Leiter untergebracht werden, die mit Isolation also die Abmessungen $4,1 \times 6,7 \text{ mm}^2$ haben dürfen. Bei gleicher Stärke der Isolation sind dann Abmessungen des blanken Drahtes $3,7 \times 6,3 = 22,2 \text{ mm}^2$. Bei unveränderter Stromdichte ergibt sich ein Strom im Leiter von $22,2 \times 4,09 = 91 \text{ A}$, während bei gleichbleibender Leistung der Strom $\frac{196}{2} = 98 \text{ A}$ betragen müßte.

Die Zahl der in Reihe geschalteten Leiter kann man auch dadurch ändern, daß man die Wicklung umschaltet. Nach Abschnitt I D gilt für die Zahl $2a$ der parallelen Ankerzweige

bei der eingängigen Wellenwicklung $2a = 2$

bei der eingängigen Schleifenwicklung $2a = 2p$

bei der zweigängigen Wellenwicklung $2a = 4$

bei der zweigängigen Schleifenwicklung $2a = 4p$.

Kleine Maschinen sind meistens vierpolig ($p = 2$); bei ihnen hat also die Schleifenwicklung doppelt so viel parallele Ankerzweige wie die Wellenwicklung gleicher Gangzahl. Demgemäß ist bei der Wellenwicklung die Zahl der in Reihe geschalteten Leiter bei gleicher Spulenzahl und gleicher Windungszahl je Spule doppelt so groß wie bei der Schleifenwicklung.

Wenn also ein vierpoliger Anker eine Schleifenwicklung hat und für die doppelte Spannung abgeändert werden soll, so kann dies grundsätzlich durch Umschaltung in eine Wellenwicklung geschehen; ebenso läßt sich eine vorhandene Wellenwicklung durch Umschalten in eine Schleifenwicklung für die halbe Spannung herrichten.

Bei einer solchen Umschaltung bleiben die Spulen vollständig erhalten, nur die Enden werden anders abgebogen (vgl. Abb. 27 u. 29). Die Änderung ist aber praktisch nur bei Drahtwicklung, also bei kleinen Ankern durchführbar, und selbst bei diesen scheidet das Umschalten häufig daran, daß die Spulenenden für die neue Schaltung zu kurz sind.

Die Umschaltung der Wellenwicklung in die Schleifenwicklung macht hinsichtlich der Erfüllung der Wicklungsgesetze nie Schwierigkeiten, da die Schleifenwicklung für beliebige Spulen- und Nutenzahlen ausführbar ist. Soll jedoch eine Schleifen- in eine Wellenwicklung umgeschaltet werden, so ist erst zu prüfen, ob mit der vorhandenen Zahl der Nuten, Spulen und Stege eine Wellenwicklung überhaupt ausführbar ist. Falls eine symmetrische Wellenwicklung nicht möglich ist, wird häufig eine Wicklung mit blinder Spule oder eine künstlich geschlossene Wicklung möglich sein.

b) Feld-, Wendepol- und Kompensationswicklung. Bei gleichbleibender Drehzahl muß bei diesen Wicklungen die Durchflutung, d. i. das Produkt aus Strom und Windungszahl, unverändert bleiben. Wenn z. B. die Maschine für das Doppelte der früheren Spannung umgewickelt wird, so verringern sich alle Ströme auf die Hälfte, wenn man voraussetzt, daß die Leistung den früheren Wert behält. Die Windungszahl muß dann verdoppelt, der Querschnitt der Leiter auf die Hälfte verringert werden. Der Widerstand erhöht sich dabei auf das Vierfache des früheren Wertes. Bei Reihenschlußwicklungen, Wendepol- und Kompensationswicklungen braucht man es bei der Querschnittsumrechnung nicht sehr genau zu nehmen, da die Größe des durch sie fließenden Stromes nicht durch den Widerstand der Wicklungen bestimmt wird. Bei der Nebenschlußwicklung von Motoren muß aber der Widerstand möglichst genau vervierfacht werden, wenn die Ankerspannung verdoppelt wird, da nur in diesem Fall die Durchflutung und damit der magnetische Fluß ungeändert bleiben. Eine Änderung des Flusses würde eine Änderung der Drehzahl zur Folge haben.

Eine Verwendung der bisherigen Feld- und Wendepolspulen kommt bei einer Erhöhung der Spannung auf das Doppelte nur in Frage, wenn die Wicklungen bisher parallele Stromzweige aufwiesen. Die Zahl der parallelen Zweige muß dann auf die Hälfte verringert werden, d. h. aus einer Parallelschaltung von zwei Zweigen muß eine Reihenschaltung dieser beiden Zweige werden.

Bei einer Verringerung der Spannung auf die Hälfte des früheren Wertes können die vorhandenen Spulen der Feld- und Wendepolwicklung stets verwendet werden. Man hat einfach die Zahl der parallelen Zweige zu verdoppeln; wenn also bisher reine Reihenschaltung vorhanden war, sieht man nunmehr zwei parallele Zweige vor, und zwar zweckmäßig in der Weise, daß der eine Zweig die Spulen aller Nordpole, der andere die aller Südpole enthält.

2. Änderung der Drehzahl bei gleichbleibender Spannung.

Diese Änderung kommt im wesentlichen nur bei Motoren vor. Kleine Drehzahländerungen (bis etwa $+10\%$) kann man erzielen durch Änderung des Luftspaltes der Hauptpole. Eine Vergrößerung des Luftspaltes hat eine Drehzahlerhöhung, eine Verkleinerung des Luftspaltes Drehzahlverringern zur Folge. Eine Verkleinerung des Luftspaltes wird dadurch vorgenommen, daß man zwischen Joch und Polwurzel passend zugeschnittene Eisenbleche legt, eine Vergrößerung dadurch, daß man etwa vorhandene Eisenbleche herausnimmt oder sie durch Messingbleche ersetzt. Sind keine Bleche vorhanden, so muß die Polwurzel abgedreht oder abgefeilt werden.

Eine Erhöhung der Drehzahl kann bei Nebenschlußmotoren außerdem durch Einbau von Widerständen in den Erregerstromkreis bewirkt werden. Wenn auf diese Weise die Drehzahl in hohem Maße gesteigert wird (bis etwa um 50%), so kann die Maschine, falls sie reine Nebenschlußmaschine ist, instabil werden und zum Durchgehen neigen. Um dies zu verhindern, ordnet man auf den Hauptpolen eine zusätzliche schwache Reihenschlußwicklung an, welche magnetisch im gleichen Sinne wie die Nebenschlußwicklung wirkt (Hilfsreihenschlußwicklung). Die Leistung bleibt unverändert, wenn die Änderung der Drehzahl nach einem der beiden genannten Verfahren vorgenommen wird.

Bei sehr starker Änderung der Drehzahl (etwa im Verhältnis $1:2$) muß der Anker umgewickelt oder umgeschaltet werden. Die Zahl der in Reihe geschalteten Ankerleiter ist dabei der Drehzahl umgekehrt proportional. Um z. B. eine Verdoppelung der Drehzahl bei gleichbleibender Spannung zu erzielen, ist der Anker in der gleichen Weise abzuändern, als wenn bei gleichbleibender Drehzahl die Spannung auf die Hälfte verringert werden soll (vgl. Anhang A 1 a). In entsprechender Weise sind auch die Wicklungen abzuändern, die mit dem Anker in

Reihe geschaltet sind, d. h. Reihenschluß-Feldwicklungen, Wendepol- und Kompensationswicklungen (vgl. Anhang A 1 b).

Im Gegensatz zu einer Änderung für kleinere oder größere Spannung bei gleichbleibender Drehzahl (nach Anhang A 1) bleiben jedoch bei Verringerung oder Erhöhung der Drehzahl und gleichbleibender Spannung die Nebenschluß-Feldwicklungen ungeändert.

Bei der Umwicklung des Ankers ändert sich die Leistung etwa im Verhältnis der Drehzahlen, wenn die Kühlungsverhältnisse sich nicht wesentlich ändern. Bei starker Herabsetzung der Drehzahl wird aber die Kühlung meistens schlechter; dadurch wird eine weitere Verringerung der Leistung bewirkt.

Bei einer erheblichen Erhöhung der Drehzahl ist noch zu prüfen, ob die umlaufenden Teile der Maschine den höheren Fliehkräften gewachsen sind, besonders ob die Ankerwicklung für die neue Drehzahl hinreichend gut befestigt ist.

B. Wechselstromwicklungen.

Bei Synchronmaschinen kommen Änderungen der Wicklung praktisch nur im Ständer vor. Auch bei der Induktionsmaschine wird meistens nur die Ständerwicklung geändert, die Läuferwicklung nur dann, wenn die Maschine eine andere Polzahl erhalten soll. Für Änderungen der Wicklungen von Wechselstrom-Stromwendermaschinen gilt hinsichtlich des Ankers das, was über die Änderung der Gleichstromanker gesagt wurde. Änderungen von Nebenschlußwicklungen können nur auf Grund genauerer Rechnungen durchgeführt werden. Da außerdem Änderungen an derartigen Maschinen nicht häufig vorkommen, werden sie hier nicht besprochen.

1. Änderung der Spannung bei gleichbleibender Polzahl und Frequenz.

Diese Änderung tritt am häufigsten auf und kommt für die Ständerwicklungen der Synchronmaschinen und Induktionsmaschinen in Frage. Wenn bei der Änderung die magnetischen Verhältnisse in der Maschine bestehen bleiben sollen, stehen wie beim Gleichstromanker die Spannungen im gleichen Verhältnis wie die Zahlen der in Reihe geschalteten Leiter. Die Leiterquerschnitte müssen auch hier etwa im umgekehrten Verhältnis wie die Leiterzahlen geändert werden. Hinsichtlich der Raumverhältnisse in den Nuten sind die gleichen Überlegungen anzustellen wie bei den Gleichstromankern. Die Wechselstrommaschinen der erwähnten Arten kommen meistens als Drehstrommaschinen vor; bei diesen stehen die Spannungen seltener im Verhältnis 1 : 2.

Beispiel: Eine Wicklung für 500 Volt (Sternschaltung) und 32,7 A hat je Nut 26 Drähte. Der Drahtdurchmesser ist 2,2 mm blank, 2,5 mm

isoliert; zwei Drähte sind parallel geschaltet. Der Nutenschlitz ist 3,5 mm breit. Es soll für die Maschine eine neue Wicklung für 380 Volt (Sternschaltung) entworfen werden.

Für 500 Volt beträgt die Zahl der in Reihe geschalteten Leiter je Nut $\frac{26}{2} = 13$. Für 380 Volt sind erforderlich $13 \cdot \frac{380}{500} \approx 10$ Leiter je Nut.

Für jeden Draht muß mit einem Raum gerechnet werden, der seinem umschriebenen Quadrat entspricht (Abb. 221). Für jeden Leiter der bisherigen Wicklung sind also $2,5 \times 2,5 = 6,25 \text{ mm}^2$, insgesamt also $26 \times 6,25 = 162,5 \text{ mm}^2$ notwendig. Bei der neuen Wicklung würden also, wenn keine parallelen Drähte notwendig wären, für jeden Draht $\frac{162,5}{10} = 16,25 \text{ mm}^2$ zur Verfügung stehen. Der Durchmesser des isolierten Drahtes dürfte dann $\sqrt{16,25} = 4,04$ sein. Da dieser Draht nicht durch die Nutöffnung hindurchgeht, müssen, falls die Wicklung eingeträufelt werden soll, parallele Drähte vorgesehen werden. Bei zwei parallelen Drähten stehen je Draht $\frac{16,25}{2} = 8,12 \text{ mm}^2$ zur Verfügung, entsprechend einem Durchmesser des isolierten Drahtes von $\sqrt{8,12} = 2,85$ mm. Es werde ein Draht gewählt, der blank 2,5 mm, isoliert 2,8 mm Durchmesser hat.



Abb. 221.
Erläuterung
des Raumbedarfs
eines
Runddrahtes.

Wir untersuchen noch die Stromdichte bei beiden Wicklungen, wenn wir in beiden Fällen die gleiche Leistung zugrunde legen. Bei der Wicklung für 500 Volt steht dem Strom zur Verfügung $2 \times 2,2^2 \cdot \frac{\pi}{4} = 7,60 \text{ mm}^2$. Die Stromdichte beträgt $\frac{32,7}{7,60} = 4,31 \text{ A/mm}^2$. Der Strom ändert sich etwa im umgekehrten Verhältnis der Spannungen; er beträgt für die 380-Volt-Wicklung $32,7 \cdot \frac{500}{380} = 43 \text{ A}$. Für diesen Strom stehen zur Verfügung $2 \times 2,5^2 \cdot \frac{\pi}{4} = 9,88 \text{ mm}^2$; die Stromdichte ist demnach $\frac{43,0}{9,88} = 4,35 \text{ A/mm}^2$. Hinsichtlich der Stromdichten besteht also kein wesentlicher Unterschied zwischen den beiden Wicklungen; die Maschine kann also in beiden Fällen die gleiche Leistung abgeben.

Wenn die neue Spannung die Hälfte der bisherigen ist (z. B. 110 Volt an Stelle von 220 Volt), so ist meistens eine Umschaltung jedes Wicklungsstranges in zwei parallele Spulengruppen möglich (vgl. Abschnitt VI E). Umgekehrt ist bei einer Verdoppelung der Spannung eine Umschaltung nur möglich, wenn eine gerade Zahl von parallelen Spulengruppen schon vorhanden ist. Es genügt nicht etwa, daß in den einzelnen Spulen parallele Drähte vorhanden sind; denn eine Umschaltung innerhalb einer Spule kommt nicht in Frage, weil sie zur Zerstörung der Isolation führt.

Wenn die neue Spannung sich zur bisherigen verhält wie $1:\sqrt{3}$ ($= 1:1,73$), so kann die Wicklung in Dreieck umgeschaltet werden, wenn sie bisher in Sternschaltung arbeitete. Umgekehrt ist zuweilen eine Umschaltung von Dreieck auf Stern möglich, wenn die neue Spannung um das $\sqrt{3}$ fache höher ist als die bisherige. In diesem Falle, also bei einer Erhöhung der Spannung ist aber zu prüfen, ob die Isolation der Wicklung gegen das Eisen der höheren Spannung gewachsen ist.

Bei einer Umänderung der Ständerwicklung für andere Spannung bleibt die Läuferwicklung in jedem Falle unverändert sowohl bei der Induktionsmaschine als auch bei der Synchronmaschine.

2. Änderung der Frequenz bei gleichbleibender Polzahl.

Bei gleichbleibender Polzahl ist mit einer Änderung der Frequenz im gleichen Verhältnis eine Änderung der (synchronen) Drehzahl verbunden. Wenn sich verhältnismäßig mit der Frequenz auch die Spannung ändert, kann die Wicklung bestehen bleiben. Ist z. B. ein vierpoliger Drehstrommotor für 4 kW bei 220 Volt und 50 Hz bemessen, so ist seine synchrone Drehzahl 1500 U/min. Mit der gleichen Wicklung ist der Motor brauchbar für 110 Volt und 25 Hz, wobei die Leistung auf 2 kW, die synchrone Drehzahl auf 750 U/min herabgeht. Dabei ist noch nicht berücksichtigt, daß bei der geringeren Drehzahl die Lüftung schlechter ist, so daß aus diesem Grunde die Leistung noch weiter verringert werden muß.

Wird die Frequenz nach oben erheblich geändert, so tritt eine andere Schwierigkeit auf. Da in diesem Falle die Eisenverluste der Maschine stark zunehmen, ist mit einer zu hohen Erwärmung zu rechnen; allerdings ist zu bedenken, daß bei der höheren Drehzahl, welche die Frequenzerhöhung mit sich bringt, auch die Lüftung im allgemeinen besser wird.

Wenn sich nur die Frequenz ändern soll, nicht aber die Spannung, so muß die in Reihe geschaltete Leiterzahl im umgekehrten Verhältnis der Frequenz umgerechnet werden. Soll z. B. ein Motor, der für 60 Hz gewickelt ist und 10 Leiter je Nut besitzt, für 40 Hz bei derselben Spannung Verwendung finden, so ist die Zahl der Leiter je Nut im Verhältnis $\frac{60}{40}$, also auf 15 zu erhöhen, wobei die Schaltung der Wicklung die gleiche bleibt. Mit der Erhöhung der Leiterzahl muß natürlich wieder eine entsprechende Verringerung des Leiterquerschnittes vorgenommen werden. Die Leistung geht auch hier mindestens im Verhältnis der Frequenz herunter, wenn die neue Frequenz geringer ist als die bisherige; bei einer Frequenzsteigerung ist wieder Rücksicht auf die Zunahme der Eisenverluste zu nehmen.

3. Änderung der Polzahl bei gleichbleibender Spannung und Frequenz.

Eine solche Änderung kommt nur bei der Induktionsmaschine vor; sie bringt eine Änderung der Zahl der magnetischen Kreise und eine Änderung des magnetischen Flusses eines Poles mit sich. Bei gleicher Stärke des magnetischen Feldes im Luftspalt zwischen Ständer und Läufer ist der Polfluß um so größer, je kleiner die Polzahl ist. Die Höhe des Eisenrückens im Ständer und Läufer muß aber nach der Größe des Polflusses bemessen sein. Man erkennt daraus, daß eine Verringerung der Polzahl eine Vergrößerung der Rückenlänge notwendig machen würde. Da dies praktisch nicht durchführbar ist, kommt im allgemeinen nur eine Vergrößerung der Polzahl in Frage.

Bei einer Vergrößerung der Polzahl kann man von den in Abschnitt VI F besprochenen Polumschaltungen keinen Gebrauch machen; man muß daher eine neue Wicklung vorsehen. Die Windungszahl eines Wicklungsstranges, also auch die Zahl der Leiter je Nut muß verhältnisgleich mit der Polzahl wachsen, wenn bei gleichbleibender Spannung auch die Stärke des magnetischen Feldes im Luftspalt die gleiche bleiben soll. Die Leistung der Maschine geht in dem gleichen Verhältnis zurück, in dem die Polzahl zunimmt, vorausgesetzt, daß die schlechtere Lüftung bei geringerer Drehzahl nicht eine größere Abnahme der Leistung bedingt.

Bei der Erhöhung der Polzahl ist häufig die neue Wicklung nicht als Ganzlochwicklung ausführbar, auch dann nicht, wenn die alte eine solche war. Unter Umständen wird man sogar auf eine der schwierigeren Bruchlochwicklungen geführt, die in diesem Buche nicht behandelt sind.

Eine Änderung der Ständerwicklung für andere Polzahl erfordert auch eine entsprechende Änderung der Läuferwicklung, falls der Läufer nicht eine Käfigwicklung besitzt. Auch im Läufer kann hierbei eine Bruchlochwicklung notwendig werden. Der Entwurf der einfacheren Bruchlochwicklungen (alle Nuten bewickelt) ist im Abschnitt VI D gezeigt, sowohl für Draht- als auch für Stabwicklungen.

Sachverzeichnis.

- Abbiegen der Wicklungsköpfe 81, 83, 94, 123, 136.
Aluminium für Käfigwicklungen 139.
Änderung der Drehzahl 175.
— der Frequenz 178.
— der Polzahl 179.
— der Spannung 172, 176.
Anker der Gleichstrommaschine 6, 9.
Ankerfeld 8.
Ankerprüfeinrichtung 169.
Ankerzweige, parallele, bei der eingängigen Schleifenwicklung 21.
— — bei der eingängigen Wellenwicklung 22.
— — bei der mehrgängigen Wellenwicklung 34.
— — bei der zweigängigen Schleifenwicklung 32.
— — bei der zweigängigen Wellenwicklung 33.
Anlaufwicklungen im Läufer 14, 79, 139.
— im Ständer 10, 79, 91.
Anschlußpunkte für Schleifringe 44, 111, 137.
Anwendung von Schleifen- und Wellenwicklungen 38.
Apyrodraht 148.
Asbest 144.
Asbestdraht 148.
Asynchronmaschine 14.
Aufbügeln der Isolation 157.
Aufsuchen von Fehlerstellen 171.
Aufteilen der Wicklungsköpfe 94.
Ausbrennen von Fehlern 172.
Ausführbarkeit von Stromwenderwicklungen 27, 29, 32, 33.
Ausgleichstrom bei Wicklungen mit blinder Spule 37.
Ausgleichsverbindungen 40.
— Ausführungsarten 41.
— bei der eingängigen Schleifenwicklung 41.
— bei der zweigängigen Schleifenwicklung 42.
— bei der zweigängigen Wellenwicklung 43.
— Herstellung 58.
Ausladung der Nutenhülsen 155.
Außenpolmaschine 4.
Auswechseln von Spulen 129.
Bakelite s. Kunstharz.
Bandagen als Ausgleichsverbindungen 59.
— für Läuferwicklungen 46, 52, 160, 162, 164.
— für Wendepolspulen 75.
Bandagenbreite 163.
Bandagenbremse 163.
Baumwollband 145.
Beanspruchungen der Isolierstoffe 140.
Befestigung der Nutenleiter 162.
— der Spulenköpfe 160, 162, 164.
Berührung von Fahnen, Vermeidung der 57.
Biegetrommel 53.
Bindemittel 144.
Blinde Spulen bei Wellenwicklungen 35.
Blockglimmer 141.
Bruchlochwicklungen, dreiphasige 108.
— einphasige 88.
Bügelmaschine 157.
Bügelverbinder für Ausgleichsleitungen 41, 58.
— für Wechselstromwicklungen 84, 134.
Bündelspulen 133.
Bürsten 7, 9.
Bürstenlage bei Kleinankern 61.
Bürstensätze, Zahl der 23.
Bürstenabheber 15.
Dahlanderschaltung 116.
Dämpferwicklung 13, 14, 78, 79.
Doppelkopfformspule 50.
Doppelnutläufer 139.
Doppelschlußmaschine 7.
Doppelschlußwicklung 69.
Doppelstabläufer 139.
Drahtabroller 67.
Drahtbandagen s. Bandagen.
Drahtführungsdüse 68.
Drahtspannungsausgleicher 69.
Drahtwicklung für Stromwenderanker 46.

- Drahtwicklung für Wechselstromläufer 135.
 — für Wechselstromständer 122.
 Drehfeld, magnetisches 11.
 Drehrichtung bei der Polumschaltung 118.
 Drehzahl, synchrone 10, 14
 Dreieckschaltung 11, 115, 119.
 Drei-Etagen-Wicklung 94.
 Dreileitermaschinen, Wicklung für 44.
 Durchflutung 2.
 Durchmesserwicklung für Stromwenderanker 20.
 — für Wechselstrom 85.

 Einankerformer 9.
 — Wicklung für 44.
 Einfädeln bei Läufern 136.
 — bei Ständern 126.
 Eingängige Schleifenwicklung 23.
 — Wellenwicklung 27.
 Eingangsspulen 153.
 Einlegen der Formspulen 127.
 — der Spulen bei Stromwenderankern 51.
 Einphasenwicklung 80.
 — aus zwei Strängen einer Dreiphasenwicklung 115.
 Einsichtwicklung 19, 80, 92.
 Einschieben von Formspulen 128.
 — von Halbformspulen 131.
 Einträufeln 52, 123.
 Enden s. Spulenden und Wicklungsenden.
 Erregermaschine 11.
 Erregerwicklung 3.
 Erwärmung 140.
 Evolventenwicklung 105.
 Exzelsiorleinen 145.

 Fahnen 7, 57.
 Fehlerstellen, Aufsuchen von 171.
 Feld, magnetisches 1.
 Feldwicklung 3.
 — für Gleichstrommaschinen und Einankerformer 69.
 — für Schenkelpolmaschinen 72.
 — für Turbomaschinen 74.
 Fischform 47.
 Flächenformspule 50.
 Flexibel-Mikanit 143.
 Fliehkräfte, Berücksichtigung der 72.
 — Sicherung gegen 161.
 Fluß, magnetischer 1.
 Formspulen für Stromwenderanker 47.
 — für Wechselstrom 127.
 — für Zweischichtwicklungen 128.
 Füllmasse 130, 145, 154.
 Füllmassespulen 157.
 Füllstoff 156.

 Gabelverbinder als Ausgleichsverbindungen 41, 58.
 — bei Stirnwicklungen 55.
 — bei Wechselstromwicklungen 85.
 Gegossene Käfigwicklung 139.
 Gekreuzte Wicklung 25, 28.
 Gekröpfte Spulengruppe 98.
 Generator 2.
 Gesamtschritt 22.
 Geschichtete Isolation 150.
 Geteilter Ständer 96.
 Gewöhnliche Wicklung 19.
 Gleichgeformte Spulengruppen 90, 99.
 Gleichstrommaschine 5.
 Gleichwertige Punkte bei Stromwenderwicklungen 40, 59.
 — Spulengruppen 113.
 — Stege bei Stromwendern 40.
 — Wicklungszweige 113.
 Gleichwertigkeit von Spulen bei Stabwicklungen 114.
 — von Spulen verschiedener Weite 113.
 Glimmer 141.
 Glimmer-Asbest 143.
 Glimmer-Batist 143.
 Glimmer-Erzeugnisse 141.
 Glimmer-Lacktuch 143.
 Glimmer-Papier 143.
 Glimm-Erscheinungen 154.
 Glimmer-Seide 143.

 Halbformspulen 91, 131.
 Hartform-Mikanit 143.
 Hartleinen 145.
 Hartpapier 144.
 Hauptschluß s. Reihenschluß.
 Heiz-Mikant 143.
 Hilfspole s. Wendepole.
 Hochfrequenzprobe 171.
 Holzformen 126, 131.
 Hülsen s. Nutenhülsen.

 Induktionslinien 1.
 Induktionsmaschine 14.
 Induktionsprüfgerät 168.
 Induktor 10.
 Innenpolmaschine 4.
 Ionisation 145.
 Isolation der Bügel und Gabeln 134, 155.
 — der Drähte und Stäbe 145.
 — — — von Feldspulen 69, 72.
 — — — von Wechselstrom-Ständerwicklungen 148.
 — der Feldspulen 149.
 — der Nutzenleiter 151.
 — — — von Kompensationswicklungen 77.

- Isolation der Nutenleiter von Stromwenderwicklungen 51, 150.
 — — — von Turboläufern 74.
 — — — von Wechselstrom-Läuferwicklungen 155.
 — — — von Wechselstrom-Ständerwicklungen 153.
 — der Stoßstellen 156.
 — der Teilleiter von verdrehten Stäben 134.
 — der Verbindungsstellen von Stabwicklungen 135.
 — der Wendepolwicklungen 75.
 — der Wicklungsköpfe 155.
 — — — von Formspulen 130.
 — — — von Halbformspulen 132.
 — — — von Stromwenderwicklungen 51.
 Isolationsauftrag 146, 147, 148.
 Isolierlack 145.
 Isolierschlauch 145.
 Japanpapier 144.
 Joch 5.
 Kabelpapier 144.
 Käfigwicklung 14, 15, 138.
 — als Anlaufwicklung 10, 14, 79.
 — als Dämpferwicklung 10, 14, 78.
 — gegossene 139.
 Kamm zur Befestigung 161.
 Kappen 164.
 Keil s. Nutenkeil.
 Kleinankerwicklungen 60.
 Klemmenanordnung 115.
 Klemmenprobe 167.
 Klemmhülsen 72.
 Kommutator s. Stromwender.
 Kommutator-Mikanit 143.
 Kommutierung d. Stromwendung.
 Kompensationswicklung 8, 76.
 Kompoundierte Spulen s. Spulen in Füllmasse.
 Kompoundmasse s. Füllmasse.
 Konzentrierte Wicklung 4, 69.
 Körperschlußprobe 168.
 Kräfte bei Kurzschluß 160.
 Kraftwirkung im Magnetfeld 2.
 Kreis, magnetischer 2.
 Kröpfung von Gabelverbindern 134.
 — von Spulengruppen 98.
 Kühlungsoberfläche, Vergrößerung 70, 74.
 Kunstharz 144, 145.
 Künstlich geschlossene Wellenwicklung 37.
 Kunststab 121, 134.
 Kurze Spulen 97.
 Kurzschlußläufer 15, 138.
 Kurzschlußbringe 78, 138.
 Lackdraht 146.
 Lackfilm 145.
 Lackieren der Wicklung 159.
 Lackpapier 144.
 Lagenisolation 153.
 Lange Spulen 97.
 Langpole 72.
 Längswicklung 153.
 Lamellen s. Stege.
 Laschen zur Befestigung 161.
 Läuferspannung 135.
 Läuferwicklungen von Asynchronmaschinen 135.
 — — — für Polumschaltung 119.
 — von Synchronmaschinen 72.
 — von Turbomaschinen 74.
 Leatheroid s. Lederspan.
 Lederspan 144.
 Magnetfeld einer Spule 1.
 Magnetischer Fluß 1.
 — Kreis 2.
 Manilapapier 144.
 Mantelwicklung s. Zylinderwicklung.
 Mehrgängige Wellenwicklung 34.
 Mikafolium 143.
 Mikanit 141.
 Mikanit-Batist 143.
 Mikanit-Faserstoffzeugnisse 143.
 Mikanit-Leinen 143.
 Mikanit-Papier 143.
 Mikanit-Seide 143.
 Mindestabstände 156.
 Motor 2.
 Nebenschlußmaschine für Drehstrom 16.
 — für Gleichstrom 7.
 Nebenschlußwicklung 69.
 Neptun-Asbestdraht 148.
 Neutrale Zone 6.
 Nordpol, magnetischer 2.
 Normalformspule 49, 50.
 Nuten 4, 13.
 — für Anlauf- und Dämpferkäfige 78.
 — für Käfigwicklungen der Asynchronmaschine 138.
 — für Kompensationswicklungen 77.
 — für Turboläufer 13.
 Nutenformen 4, 13, 19, 138.
 Nutenhülsen 126, 154.
 Nutenkeile 13, 52, 74, 128, 162.
 Nutenschritt 23.
 Nutisolation s. Isolation von Spulen-seiten.
 — Prüfung der 171.
 Ofenlack 145.
 Offene Nuten, Vorteil 129.
 Ölleinen 145.
 Ölpapier 144.

- Ölseide 145.
Oxydation des Lacks 159.
- Papier 144.
Paraffinpapier 144.
Parallele Zweige bei Feldwicklungen 72.
— — bei Stromwenderwicklungen 21, 22, 32, 33, 34.
— — bei Wechselstromwicklungen 112.
— — bei Wendepol- und Kompensationswicklungen 77.
Parallelwicklung s. Schleifenwicklung.
Pol der Gleichstrommaschine 5.
— der Synchronmaschine 11, 72.
Polkern 5.
Polpaarzahl 4.
— der Asynchronmaschine 14.
— der Gleichstrommaschine 5.
— der Synchronmaschine 10.
— bei Wicklungen für Polumschaltung 118.
Polrad 11.
Polschuh 6, 11.
Polteilung 5.
Polumschaltung bei Einschichtwicklungen 115.
— bei Zweischichtwicklungen 118.
Polwicklungsstützen 164.
Polwurzel 6.
Polzahl s. Polpaarzahl.
Pressen von Spulenseiten 158.
Preßspan 144.
Prüfkapazitäten für die Sprungwellenprobe 166.
Prüfspannungen für die Wicklungsprobe 165.
— für die Windungsprobe 167.
Prüfung der Wicklung während der Herstellung 168.
— von Kunststäben 134.
- Querwicklung 153.
- Reihenparallelwicklung s. zwei- und mehrgängige Wellenwicklung.
Reihenschlußmaschine für Gleichstrom 7.
— für Wechselstrom 16.
Reihenschlußwicklung 69, 71.
Reihenwicklung s. eingängige Wellenwicklung.
Repulsionsmotor 16.
Rillenspulen 71.
Ringleitungen als Ausgleichsverbindungen 41, 59.
Roebelstab 122, 134.
Röhrenwicklung 70.
Rotpapier 144.
- Rücklaufverbindung 107.
Rundpol 72, 74.
- Schaltschritt 22.
Schaltung der Feldwicklungen 71, 72.
— der Kompensationswicklungen 77.
— der Spulen 112.
— der Stränge 11, 112.
— der Wendepolwicklungen 76.
— der Wicklungen für Polumschaltung 119.
Scheibenwicklung 70.
Schenkelpolmaschine 11.
Schiebehülse 57.
Schleifenwicklung 21.
— eingängige 23.
— für Wechselstrom 84.
— zweigängige 31.
Schleifringe, Anschlußpunkte für 44, 45, 137.
— für Asynchronmaschinen 15.
— für Dreileitermaschinen 44.
— für Einankerumformer 9, 44.
— für Synchronmaschinen 10, 12.
Schleifringläufer 15.
Schleifringprüfung 168.
Schlүpfung s. Schlupf.
Schlupf 15.
Schluß, künstlicher 37.
Schnurbandage 164.
Schweißtransformator 131.
Schwingungskreis 171.
Segmente s. Stege.
Sehnenwicklung für Stromwenderanker 20.
— für Wechselstrom 85, 87, 103.
Spaltglimmer 141.
Spannungsteilung 44.
Spreizeinrichtungen 48, 130.
Spreizen der Spulen 47, 53, 130.
Sprungwellenprobe 166.
Spulen gleicher Weite 82, 94, 101.
— in Füllmasse 157.
— verschiedener Weite 82, 94.
Spulenbreite 82.
Spulenden, Herausführung der — bei Feldspulen 71.
— Lage bei Stromwenderspulen 49.
Spulengruppen 82.
— gekröpfte 98.
— gleichgeformte 90, 99.
— gleichwertige 113.
Spulenkästen 70, 72.
Spulenköpfe, Abbiegen der 123.
— bei dreiphasigen Drei-Etagen-Wicklungen 95.
— — Zwei-Etagen-Wicklungen 97.
— bei einphasigen Wechselstromwicklungen 83, 84.

- Spulenköpfe bei Läuferwicklungen von Asynchronmaschinen 136.
 — bei Spulen gleicher Weite 84, 101.
 — bei Stromwenderwicklungen 46.
 — bei zweiphasigen Wechselstromwicklungen 89.
 — in vier Ebenen 105.
 — Isolation der 51, 123, 130, 155.
 Spulenpresse 158.
 Spulenseiten 18.
 Spulenseitengruppen 80.
 Spulenweite bei Stromwenderwicklungen 20.
 — bei Wechselstromwicklungen 82, 93.
 — bei Zweischichtwicklungen 87.
 Stab, verdrillter 121, 134.
 Stabelemente 52, 86, 104, 133.
 Stabwicklungen für Läufer von Asynchronmaschinen 136.
 — für Stromwenderanker 52, 55.
 — für Wechselstromständer 133.
 — — — dreiphasige 99, 104.
 — — — einphasige 84.
 — — — zweiphasige 91.
 Stege des Stromwenders 7.
 Sternschaltung 11, 115, 119.
 Stirnverbindungen 18.
 Stirnwicklung 55.
 Stoßstellen, Isolation der 156.
 Streufeld 2.
 Strom im Ankerleiter bei Stromwenderwicklungen 22, 23, 32.
 Stromverdrängung 120, 138.
 Stromwärmeverluste, zusätzliche 120.
 Stromwender 6, 9.
 Stromwender-Mikanit 143.
 Stromwenderprüfung 168.
 Stromwendersteg 7.
 Stromwendung 8, 20.
 Stützen für Polwicklungen 164.
 Suchmagnet 170.
 Südpol, magnetischer 2.
 Synchrone Drehzahl 10, 14.
 Synchronmaschine 10.

 Tauchen s. Tränken.
 Tausch von Spulenseiten 110.
 Teileiter 120.
 — Isolation der 134.
 Teilung des Ständers 96.
 Träger für Ausgleichsverbindungen 59.
 — für Wicklungsköpfe 46, 160.
 Tränken der Formspulen 47, 130.
 — der Wicklungen 73, 159.
 — des Drahtes 127.
 — des Papiers 144.
 Träufelwicklung für Stromwenderanker 52.
 — für Wechselstrom 122.

 Trennstücke für Spulenköpfe 160.
 Treppenwicklung 19.
 Trocknen der Wicklung 159.
 Turbogenerator 13.
 — Wicklungen für 74, 105, 132.

 U-Kästen 75.
 Umbandeln von Spulen 130, 150.
 — von Spulenköpfen 51, 123, 130, 155.
 — von Stäben 149.
 Umformer 2.
 — Einanker- 9, 44.
 Umkehrung 107.
 Umlaufsinn von Feldspulen 71.
 Umleitung 107.
 Umschalten 172.
 — auf andere Polzahl 115.
 Umwickeln 172.
 Ungekreuzte Wicklung 25, 27.
 Ungeteilte Wicklung 19.
 Unsymmetrische Wellenwicklung 35.

 Verbindung der Stäbe von Käfigläufern 134.
 — zwischen Stäben und Bügeln 135.
 — zwischen Wicklung und Schleifring 136, 137.
 — — — und Stromwender 56.
 Verbindungsleitungen (Ausgleichsleitungen) 42.
 Verbindungsschritt 40.
 Verbindungsstellen, Isolation der 135.
 Verdrillung im Spulenkopf 121.
 Verkettung 11, 91, 115.
 Verlöten bei Halbformspulen 131.
 — bei Stabwicklungen 54, 133, 135.
 — bei Stromwenderwicklungen 58.
 Verschweißen bei Halbformspulen 131.
 Verteilte Wicklungen 4, 69.
 Vorspannung beim Wickeln von Bandagen 163.

 Wärmeausdehnung, Berücksichtigung der 78, 154.
 Wärmebeständigkeit der Isolierstoffe 140.
 Wechselstrom-Läuferwicklung 135.
 Wechselstrom-Ständerwicklung, dreiphasige 92.
 — einphasige 80.
 — zweiphasige 89.
 Weite von Spulen s. Spulenweite.
 Wellenwicklung 22.
 — eingängige 27.
 — für Wechselstrom 84.
 — künstlich geschlossen 37.
 — mehrgängige 34.
 — mit blinder Spule 35.
 — unsymmetrische 35.
 — zweigängige 32.

- Wendepol 8, 16.
 Wendepolwicklung 8, 16, 75.
 Wickelform 124.
 Wickelform für Spulen gleicher Weite 125.
 — — — verschiedener Weite 125.
 — für Stromwenderwicklungen 47.
 Wickelmaschinen für Kleinanker 66.
 Wicklungselement 20, 53.
 Wicklungsenden bei Läufern 111, 114, 137.
 — bei Ständern 112, 114.
 Wicklungsgang 31.
 Wicklungsprobe 164, 167.
 Wicklungsstrang 11, 89.
 Wicklungsträger 46, 160.
 Wicklungsweige, gleichwertige 113.
 Widerstandserhöhung 138.
 Windungsisolation s. Isolation.
 Windungsprobe 167, 168, 170, 171.
 Winkel, elektrischer und räumlicher 5.
 Wirbelstromläufer 138.
 Wirbelstromverlust in Bandagen 163.
- Zählrichtung 80.
 — bei Polumschaltung 117.
 Zellstoffzeugnisse 144.
- Zonen bei der dreiphasigen Wicklung 93.
 — bei der einphasigen Wicklung 81.
 Zonen bei der Zweischichtwicklung 102.
 Zonenbreite 82.
 Zuleitungen bei Läuferwicklungen 111, 114, 137.
 — bei Ständerwicklungen 112, 114.
 Zwei-Etagen-Wicklung bei Läufern 136.
 — dreiphasige bei Ständern 96.
 — zweiphasige bei Ständern 89.
 Zweifach geschlossene Wicklungen 31, 33.
 Zweigängige Schleifenwicklung 31.
 — Wellenwicklung 32.
 Zweischichtwicklung als Bruchlochwicklung 110.
 — dreiphasige 101.
 — einphasige 86.
 — für Stromwenderanker 19.
 — zweiphasige 91.
 Zwingen für Bandagen 162.
 — für Stabwicklungen 54, 133.
 — für Stromwenderstege 57.
 Zwischenlagen für Kunststäbe 134.
 — für Nuten 52, 153.
 — für Zwingen 54.
 Zylinderwicklung 46.

Firmen-Verzeichnis.

- AEG = Allgemeine Elektrizitätsgesellschaft, Berlin.
BBC = Brown, Boveri & Cie, Aktiengesellschaft, Mannheim-Käfertal.
Felten & Guillaume = Felten & Guillaume Carlswerk Aktiengesellschaft, Köln-Mülheim.
Froitzheim & Rudert = Froitzheim & Rudert, Maschinenfabrik, Berlin-Weißensee, Langhansstraße 126—131.
Garbe-Lahmeyer = Deutsche Elektrizitätswerke zu Aachen, Garbe, Lahmeyer & Co., Aktiengesellschaft.
Micafil = Micafil Aktiengesellschaft, Zürich-Altstetten (Schweiz).
Sachsenwerk = Sachsenwerk Licht- und Kraft-Aktiengesellschaft, Niedersedlitz-Dresden.
Schlegel = Elektrowerkhilfe Kurt Schlegel, Teterow (Mecklenburg).
Schümann = Heinrich Schümann, Lübeck, Schwartzauer Allee 14a.
Siemens = Siemens-Schuckertwerke Aktiengesellschaft (SSW) oder Siemens & Halske Aktiengesellschaft (S & H), Berlin-Siemensstadt.

Elektrische Maschinen. Von Prof. Dr.-Ing. **Rudolf Richter**, Karlsruhe.
Erster Band: Allgemeine Berechnungselemente. Die Gleichstrommaschinen. Mit 453 Textabbildungen. X, 630 Seiten. 1924. Gebunden RM 28.80
Zweiter Band: Synchronmaschinen und Einankerumformer. Mit Beiträgen von Prof. Dr.-Ing. Robert Brüderlink, Karlsruhe. Mit 519 Textabbildungen. XIV, 707 Seiten. 1930. Gebunden RM 35.10
Dritter Band: Die Transformatoren. Mit 230 Textabbildungen. VIII, 321 Seiten. 1932. Gebunden RM 19.50
Vierter Band: Die Induktionsmaschinen. Mit etwa 260 Textabbildungen. Etwa 450 Seiten. Erscheint im Sommer 1936.
Fünfter Band: Die Kommutatormaschinen. In Vorbereitung.

Theorie der Wechselstrommaschinen mit einer Einleitung in die Theorie der stationären Wechselströme. Nach Prof. Dr.-Ing. e. h. **O. S. Bragstad** †, Drontheim. Nach dem hinterlassenen norwegischen Manuskript übersetzt und bearbeitet von Prof. **R. S. Skancke**, Drontheim. Mit 431 Textabbildungen. XII, 382 Seiten. 1932. Gebunden RM 29.50

Krankheiten elektrischer Maschinen, Transformatoren und Apparate, Ursachen und Folgen, Behebung und Verhütung. Unter Mitarbeit von Ing. Hans Knöpfel, Ing. Franz Roggen, Ing. August Meyerhans, Ing. Robert Keller und Dr. chem. Hans Stäger, bearbeitet und herausgegeben von Prof. Dipl.-Ing. **Robert Spieser**, Winterthur. Mit 218 Abbildungen im Text. XII, 357 und 2 Seiten. 1932. Gebunden RM 23.50

Elektrotechnische Meßkunde. Von Prof. Dr.-Ing. **P. B. Arthur Linker**, Hannover. Vierte, völlig umgearbeitete und erweiterte Auflage. Mit 450 Textabbildungen. X, 619 Seiten. 1932. Gebunden RM 31.50

Hilfsbuch für die Elektrotechnik. Unter Mitwirkung namhafter Fachgenossen bearbeitet und herausgegeben von Dr. **Karl Strecker**, Berlin. Zehnte, umgearbeitete Auflage.
Starkstromausgabe. Mit 560 Abbildungen. XII, 739 Seiten. 1925. Gebunden RM 18.—
Schwachstromausgabe (Fernmeldetechnik). Mit 1057 Abbildungen. XXII, 1137 Seiten. 1928. Gebunden RM 37.80

Die symbolische Methode zur Lösung von Wechselstromaufgaben. Einführung in den praktischen Gebrauch. Von **Hugo Ring**. Zweite, vermehrte und verbesserte Auflage. Mit 50 Textabbildungen. VII, 80 Seiten. 1928. RM 4.05

Anleitungen zum Arbeiten im Elektrotechnischen Laboratorium. Von **E. Orlich**.
Erster Teil. Dritte, durchgesehene Auflage. Mit 88 Textbildern. IV, 98 Seiten. 1934. RM 2.90
Zweiter Teil. Mit 162 Textbildern. V, 224 Seiten. 1931. RM 7.20

Ankerwicklungen für Gleich- und Wechselstrommaschinen. Ein Lehrbuch von Professor Dr.-Ing. **Rudolf Richter**, Karlsruhe. Mit 377 Textabbildungen. XI, 423 Seiten. 1920. Berichtigter Neudruck 1922. Gebunden RM 18.--

Aufgaben und Lösungen aus der Gleich- und Wechselstromtechnik. Ein Übungsbuch für den Unterricht an technischen Hoch- und Fachschulen sowie zum Selbststudium von Professor **H. Vieweger** und Ing. **W. Vieweger**. Zehnte, umgearbeitete Auflage. Mit 289 Textabbildungen zu 349 Aufgaben und einer Tafel mit Magnetisierungskurven. VIII, 341 Seiten. 1931. RM 10.35; gebunden RM 11.70

Aufgabensammlung für Elektroingenieure. Aufgaben aus dem Gebiet der Starkstromtechnik mit ausführlichen Lösungen. Von Dozent Dipl.-Ing. **Kurt Fleischmann**, Mannheim. Mit 59 Abbildungen im Text und auf 5 Tafeln. VIII, 171 Seiten. 1931. RM 9.45; gebunden RM 10.80

Kurzer Leitfaden der Elektrotechnik in allgemeinverständlicher Darstellung für Unterricht und Praxis. Von **Rudolf Krause**. Fünfte, erweiterte Auflage, neubearbeitet von Ingenieur **W. Vieweger**. Mit 413 Abbildungen. VIII, 275 Seiten. 1929. RM 9.--; geb. RM 10.35

Kurzes Lehrbuch der Elektrotechnik. Von Professor Dr. **A. Thomälen**, Karlsruhe. Zehnte, stark umgearbeitete Auflage. Mit 581 Textbildern. VIII, 359 Seiten. 1929. Gebunden RM 13.05

Einführung in die theoretische Elektrotechnik. Von Professor **K. Küpfmüller**, Danzig. Mit 320 Textabbildungen. VI, 285 Seiten. 1932. RM 18.--; gebunden RM 19.50

Grundzüge der Starkstromtechnik. Für Unterricht und Praxis. Von Dr.-Ing. **K. Hoerner**. Zweite, durchgesehene und erweiterte Auflage. Mit 347 Textabbildungen und zahlreichen Beispielen. V, 209 Seiten. 1928. RM 6.30; gebunden RM 7.38

Die Elektrotechnik und die elektromotorischen Antriebe. Ein elementares Lehrbuch für technische Lehranstalten und zum Selbstunterricht. Von Professor Dipl.-Ing. **W. Lehmann**, Berlin. Zweite, stark umgearbeitete Auflage. Mit 701 Textabbildungen und 112 Beispielen. VII, 302 Seiten. 1933. RM 12.60; gebunden RM 13.80

Elektrische Starkstromanlagen. Maschinen, Apparate, Schaltungen, Betrieb. Kurzgefaßtes Hilfsbuch für Ingenieure und Techniker sowie zum Gebrauch an technischen Lehranstalten. Von Oberstudienrat Dipl.-Ing. **Emil Kosack**, Magdeburg. Siebente, durchgesehene und ergänzte Auflage. Mit 308 Textabbildungen. XI, 342 Seiten. 1928. RM 7.65; gebunden RM 8.55

Schaltungsbuch für Gleich- und Wechselstromanlagen. Dynamomaschinen, Motoren und Transformatoren, Lichtanlagen, Kraftwerke und Umformerstationen. Ein Lehr- und Hilfsbuch von Oberstudienrat Dipl.-Ing. **Emil Kosack**, Magdeburg. Dritte, erweiterte Auflage. Mit 292 Abbildungen im Text und auf 2 Tafeln. X, 213 Seiten. 1931. RM 7.65; gebunden RM 8.55
