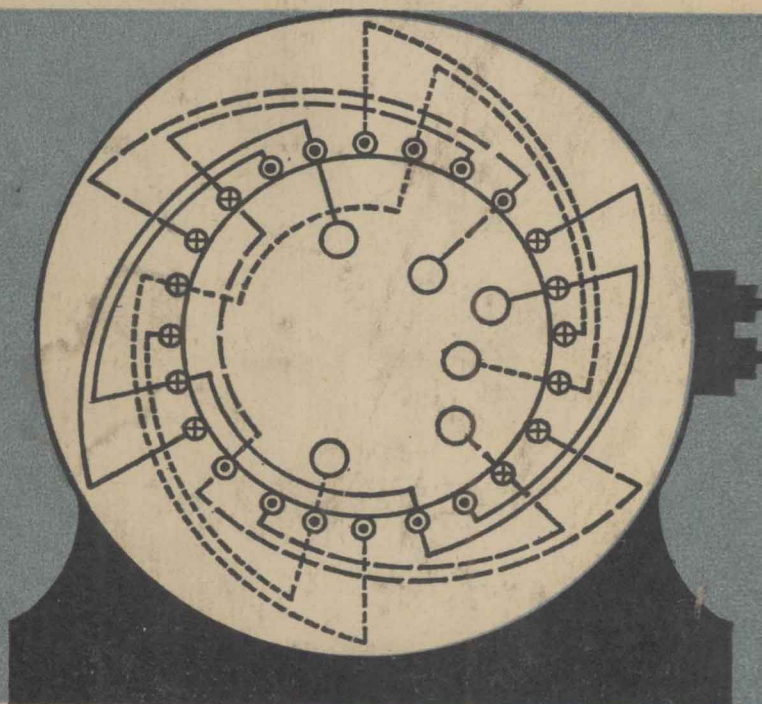


LEHRBUCH FÜR DIE BERUFSBILDUNG

Wicklungen und Montage rotierender elektrischer Maschinen



Wicklungen und Montage rotierender elektrischer Maschinen

LEHRBUCH FÜR DIE BERUFSBILDUNG

Wicklungen und Montage rotierender elektrischer Maschinen

2., durchgesehene Auflage
218 Bilder, 10 Tafeln



VEB VERLAG TECHNIK BERLIN

Als berufsbildende Literatur für die Ausbildung der Lehrlinge zum Facharbeiter und für Werk tätige, die zum Facharbeiter ausgebildet werden, für verbindlich erklärt

1. 9. 1978

Ministerium für Elektrotechnik und Elektronik

Dieses Lehrbuch wurde mit Unterstützung der Zentralstelle für Aus- und Weiterbildung am Institut für Rationalisierung des Industriebereichs Elektrotechnik/Elektronik entwickelt.

Autoren

Dipl.-Ing.-Päd., Ing. Walter Much, Dresden, federführender Autor

Dipl.-Gwl, Günter Albrecht, Karl-Marx-Stadt

Dipl.-Ing. Jürgen Broschat, Berlin

Ing. Rudolf Löbel, Karl-Marx-Stadt

Ing. Peter Rittner, Dresden

Ing. Hans Schiewart, Dresden

© VEB Verlag Technik, Berlin, 1978

Unveränderter Nachdruck 1979

Lizenz 201 · 370/177/79

DK 621.3.045 + 621.313 · LSV 3512 · VT 5/5277-2

Lektor: Oberlehrer Dipl.-Gwl. Wolfgang Wosnizok

Einband: Kurt Beckert

Printed in the German Democratic Republic

Satz und Druck: Druckerei August Bebel Gotha

Buchbinderische Verarbeitung: Papier- und Plastverarbeitung Leipzig

Redaktionsschluß: 20. November 1978

Bestellnummer: 552 645 2

DDR 8,75 M

Vorwort

Das Lehrbuch soll für die Ausbildung von Elektromaschinenbauern dienen. Es enthält die theoretischen Grundlagen der gebräuchlichen Gleich- und Wechselstromwicklungen, den konstruktiven Aufbau der Wicklungen sowie deren Fertigungsverfahren. Darüber hinaus werden auch die speziellen Werkstoffe, die Bauteile und die Prüfung der rotierenden elektrischen Maschine behandelt.

Vorausgesetzt werden beim Leser Kenntnisse über den Aufbau, die Wirkungsweise und das Betriebsverhalten rotierender elektrischer Maschinen. Zu deren Erwerb wird das Lehrbuch „Rotierende elektrische Maschinen“ angeboten, das für die Ausbildung der Elektromonteurs und Elektromaschinenbauer entwickelt wurde.

Die bisher in der Ausbildung von Elektromaschinenbauern verwendete „Fachkunde Elektromaschinenbauer“ wird von dem vorliegenden und dem obengenannten Lehrbuch abgelöst.

Die 2. Auflage wurde auf Satz- und Druckfehler durchgesehen. Beide Auflagen sind im Unterricht nebeneinander verwendbar.

Allen, die an der Entwicklung dieses Werkes beteiligt waren, sei auf diesem Wege gedankt. Für Mitteilungen über die Erfahrungen aus der Arbeit mit dem Buch sind wir dankbar.

VEB Verlag Technik, Berlin

Inhaltsverzeichnis

1. Wicklungen rotierender elektrischer Maschinen	13
1.1. Die Wicklung — ein Hauptteil rotierender elektrischer Maschinen	13
1.1.1. Aufgaben der Wicklung	13
1.1.2. Allgemeine Wicklungsbezeichnungen	13
1.1.2.1. Wicklungsverteilung	13
1.1.2.2. Wicklungselemente	14
1.1.2.3. Polteilung und Spulenweite	17
1.1.2.4. Gesehnte Spulen	18
1.1.2.5. Wicklungsschichten	19
1.1.3. Wicklungsdarstellung verteilter Wicklungen	19
1.1.3.1. Kreis- oder Stirnbild	20
1.1.3.2. Mantelabwicklung	21
1.2. Kommutatorläuferwicklungen	23
1.2.1. Grundlagen	23
1.2.1.1. Die Wicklung als ein geschlossener Stromkreis	23
1.2.1.2. Spulenseitenanordnung	25
1.2.1.3. Spule und Kommutator	27
1.2.1.4. Einteilung der Kommutatorläuferwicklungen	28
1.2.2. Eingängige Schleifenwicklung	28
1.2.2.1. Merkmale	28
1.2.2.2. Wicklungsverlauf	30
1.2.2.3. Verkürzte Wicklungsdarstellung	32
1.2.3. Eingängige Wellenwicklung	33
1.2.3.1. Merkmale	33
1.2.3.2. Wicklungsverlauf	34
1.2.3.3. Verkürzte Wicklungsdarstellung	36
1.2.4. Zweigängige Schleifenwicklung	38
1.2.4.1. Merkmale	38
1.2.4.2. Wicklungsverlauf	38
1.2.5. Zweigängige Wellenwicklung	40
1.2.5.1. Merkmale	40
1.2.5.2. Wicklungsverlauf	40
1.2.6. Ausgleichsverbindungen	41
1.2.6.1. Wicklungen mit $2a = 2$	41
1.2.6.2. Wicklungen mit $2a > 2$	42
1.2.6.3. Latour-Wicklung, Wicklung mit Selbstausgleich	45

1.2.7.	Unsymmetrische Wicklungen	46
1.2.7.1.	Lösungen bei Kleinläufern mit $S \neq k$	46
1.2.7.2.	Wellenwicklung mit Blindspule	46
1.2.7.3.	Wellenwicklung mit künstlichem Schluß	47
1.2.8.	Wicklungen kleiner Kommutatorläufer	50
1.2.8.1.	Knäuelwicklung	50
1.2.8.2.	Verlegung der Schaltenden	52
1.2.9.	Die Wahl der Wicklung	55
1.2.9.1.	Läuferspannung	55
1.2.9.2.	Polzahl und Leistung	57
1.3.	Gleichstrom-Polwicklungen	57
1.3.1.	Hauptpolwicklungen	57
1.3.2.	Wendepolwicklungen	59
1.3.3.	Kompensationswicklungen	60
	Aufgaben	62
1.4.	Wechselstromwicklungen	63
1.4.1.	Besonderheiten	63
1.4.1.1.	Wicklungsverteilung	63
1.4.1.2.	Einteilung der Wechselstromwicklungen	66
1.4.1.3.	Spannungserzeugung und Wicklungsfaktoren	67
1.4.2.	Dreistrang-Ganzloch-Einschichtwicklungen	71
1.4.2.1.	Merkmale	71
1.4.2.2.	Spulen gleicher und ungleicher Weite	71
1.4.2.3.	Wicklungsverlauf	72
1.4.3.	Dreistrang-Ganzloch-Zweischichtwicklungen	77
1.4.3.1.	Merkmale	77
1.4.3.2.	Gesehnte Wicklungen	77
1.4.3.3.	Wicklungsverlauf	78
1.4.4.	Dreistrang-Stabwicklungen	79
1.4.4.1.	Merkmale	79
1.4.4.2.	Wicklungsverlauf	79
1.4.5.	Dreistrang-Bruchlochwicklungen	83
1.4.5.1.	Merkmale	83
1.4.5.2.	Wicklungsverlauf	84
1.4.6.	Dreistrangwicklungen für Polumschaltung	87
1.4.6.1.	Merkmale	87
1.4.6.2.	Wicklungsverlauf	90
1.4.7.	Einstrangwicklungen	92
1.4.7.1.	Merkmale	92
1.4.7.2.	Wicklungsverlauf	93
	Aufgaben	94

1.5.	Umrechnungen von Wicklungen	95
1.5.1.	Spannungsänderungen	95
1.5.1.1.	Spannung und Schaltung der Wicklungen	96
1.5.1.2.	Spannungsänderung von Gleichstromwicklungen	96
1.5.1.3.	Spannungsänderung von Wechselstromwicklungen	97
1.5.2.	Drehzahländerung	97
1.5.2.1.	Drehzahländerung von Gleichstrommaschinen	97
1.5.2.2.	Drehzahländerung von Wechselstrommaschinen	98
1.5.3.	Frequenzänderung	98
1.5.4.	Änderung des Leitermaterials	98
	Aufgaben	99
2.	Herstellung, Einbau und Befestigung von Wicklungen	100
2.1.	Allgemeines über Wicklungen	100
2.1.1.	Zusammenhang zwischen Funktionssicherheit der Maschine und Wicklung	100
2.1.2.	Gesichtspunkte zur Einteilung der Wicklungen	100
2.1.3.	Ökonomie und Technologie	101
2.2.	Handwicklungen	101
2.2.1.	Anwendung und ökonomische Betrachtungen	101
2.2.2.	Herstellung und Befestigung	102
	Aufgaben	103
2.3.	Maschinenwicklungen	103
2.3.1.	Anwendung und ökonomische Betrachtungen	103
2.3.2.	Herstellung und Befestigung	105
	Aufgaben	108
2.4.	Träufelwicklungen	108
2.4.1.	Erklärung und Anwendung	108
2.4.2.	Herstellung der Spulen	109
2.4.3.	Einbau und Befestigung	112
2.4.4.	Ökonomische Betrachtungen	114
	Aufgaben	114
2.5.	Durchzieherwicklungen	114
2.5.1.	Erklärung und Anwendung	114
2.5.2.	Herstellung und Befestigung	115
2.5.3.	Ökonomische Betrachtungen	118
	Aufgaben	119

2.6	Formspulenwicklungen	119
2.6.1.	Erklärung und Anwendung	119
2.6.2.	Herstellung der Formspulen	120
2.6.2.1.	Geschlossene Formspulen	120
2.6.2.2.	Offene Formspulen	121
2.6.3.	Einbau und Befestigung	123
2.6.4.	Ökonomische Betrachtungen	125
	Aufgaben	125
2.7.	Halbformspulenwicklungen	126
2.7.1.	Erklärung und Anwendung	126
2.7.2.	Herstellung	127
2.7.3.	Einbau und Befestigung	127
2.7.4.	Ökonomische Betrachtungen	127
	Aufgaben	128
2.8.	Formstab- und Halbformstabwicklungen	128
2.8.1.	Erklärung und Anwendung	128
2.8.2.	Herstellung	129
2.8.3.	Einbau und Befestigung	130
2.8.4.	Ökonomische Betrachtungen	131
	Aufgaben	131
2.9.	Feldwicklungen	131
2.9.1.	Erklärung und Anwendung	131
2.9.2.	Herstellung	132
2.9.3.	Montage und Befestigung	133
2.9.4.	Ökonomische Betrachtungen	134
	Aufgaben	134
2.10.	Läuferkäfige	135
2.10.1.	Erklärung und Anwendung	135
2.10.2.	Herstellung und Befestigung	135
2.10.3.	Ökonomische Betrachtungen	138
	Aufgaben	138
2.11.	Schaltungen von Wicklungen	138
2.11.1.	Bedeutung des Schaltens im Elektromaschinenbau	138
2.11.2.	Herstellung der Schaltverbindungen	138
	Aufgaben	139
3.	Isolation der Wicklung	140
3.1.	Allgemeines	140
3.1.1.	Aufgaben der Isolierstoffe	140
3.1.2.	Allgemeiner Aufbau der Isolierstoffe	140

3.1.3.	Beanspruchung der Isolierstoffe	140
3.1.4.	Alterung der Isolation	141
	Aufgaben	142
3.2.	Aufbau der Wicklungsisolation	142
3.2.1.	Draht- und Stabisolation	142
3.2.2.	Nutisolation	143
3.2.3.	Wickelkopfisolation	146
3.2.4.	Feldspulenisolation	150
3.2.4.1.	Isolation ruhender Feldspulen	150
3.2.4.2.	Isolation umlaufender Erregerspulen	150
3.2.5.	Glimmschutzmaßnahmen	151
3.2.6.	Lackieren und Trocknen der Wicklungen	153
	Aufgaben	153
3.3.	Isoliervverfahren	153
3.3.1.	Einbinden	153
3.3.1.1.	Anwendung	153
3.3.1.2.	Verfahren	154
3.3.1.3.	Fehlermöglichkeiten	156
3.3.2.	Umbügeln	157
3.3.2.1.	Anwendung	157
3.3.2.2.	Verfahren	157
3.3.2.3.	Fehlermöglichkeiten	159
3.3.3.	Imprägnieren	160
3.3.3.1.	Anwendung	160
3.3.3.2.	Verfahren	160
3.3.3.3.	Fehlermöglichkeiten	162
	Aufgaben	162
4.	Bauteile rotierender elektrischer Maschinen und deren Montage	163
4.1.	Prinzipieller Aufbau der rotierenden elektrischen Maschinen	163
4.2.	Herstellen der eisenfertigen Ständer	166
4.2.1.	Ständer mit ausgeprägten Polen	166
4.2.2.	Ständer mit Blechpaket	168
	Aufgaben	173
4.3.	Herstellen der eisenfertigen Läufer	174
4.3.1.	Blechpaketläufer	174
4.3.2.	Polräder	177
4.3.3.	Turboläufer	180

4.3.4.	Lüfter	183
	Aufgaben	185
4.4.	Stromübertragende Teile	185
4.4.1.	Kommutatoren	185
4.4.2.	Schleifringe	189
4.4.3.	Bürstengestelle	191
4.4.4.	Bürsten	193
4.4.5.	Anschlüsse und Klemmenbretter	195
	Aufgaben	196
4.5.	Lagerung	196
4.5.1.	Lagerarten	196
4.5.2.	Gleitlager	196
4.5.3.	Wälzlager	199
4.5.4.	Lagerträger	200
	Aufgaben	201
4.6.	Montage rotierender elektrischer Maschinen	201
4.6.1.	Auswuchten des Läufers	201
4.6.2.	Einfahren des Läufers	202
4.6.3.	Montage der Lagerung	203
4.6.4.	Komplettierung	205
	Aufgaben	206
5.	Prüfung elektrischer Maschinen	207
5.1.	Bedeutung der Prüfung	207
5.2.	Grundlage der Prüfungen	207
5.3.	Prüfungen während der Fertigung	208
5.4.	Allgemeine Prüfungen an elektrischen Maschinen	209
5.4.1.	Ermittlung der Wicklungswiderstände	209
5.4.1.1.	Allgemeine Gesichtspunkte	209
5.4.1.2.	Wicklungen von Drehstrommaschinen	210
5.4.1.3.	Wicklungen von Gleichstrommaschinen	210
5.4.2.	Nachweis des Isoliervermögens	211
5.4.2.1.	Messung des Isolationswiderstands	211
5.4.2.2.	Wicklungsprüfung	212
5.4.2.3.	Windungsprüfung	213
5.4.3.	Leerlaufmessung	214

5.4.3.1. Motorverfahren	214
5.4.3.2. Magnetisierungskennlinie	214
5.4.3.3. Bestimmung der Leerlaufverluste	215
5.4.4. Belastungsmessung	216
5.4.5. Erwärmungsmessung	217
5.4.5.1. Gesichtspunkte zur Erwärmungsprüfung	217
5.4.5.2. Durchführung des Erwärmungsversuchs	217
5.4.5.3. Bestimmung der Wicklungstemperatur über die Widerstands- zunahme	218
5.4.6. Bestimmung des Wirkungsgrads	221
5.4.6.1. Direkte Ermittlung des Wirkungsgrads	221
5.4.6.2. Indirekte Ermittlung des Wirkungsgrads	222
5.5. Typgebundene Prüfungen an elektrischen Maschinen	224
5.5.1. Gleichstrommaschinen	224
5.5.1.1. Einstellung der Bürstenbrücke in die „neutrale Zone“	224
5.5.1.2. Aufnahme von Last- und Regelkennlinien	224
5.5.1.3. Bestimmung der Kommutierungskurven	226
5.5.1.4. Bestimmung des Wirkungsgrads	227
5.5.2. Drehstrom-Asynchronmotoren	229
5.5.2.1. Leerlaufmessung	229
5.5.2.2. Belastungsmessung	230
5.5.2.3. Bestimmung des Wirkungsgrads	232
Aufgaben	233
Formelverzeichnis	234
Sachwörterverzeichnis	237

1. Wicklungen rotierender elektrischer Maschinen

1.1. Die Wicklung — ein Hauptteil rotierender elektrischer Maschinen

1.1.1. Aufgaben der Wicklung

Die Arbeitsweise rotierender elektrischer Maschinen beruht auf dem Durchflutungsgesetz, dem Induktionsgesetz und dem Gesetz der Kraftwirkung zwischen stromdurchflossenen Leiter und Magnetfeld.

Leiter und Blechpaket bzw. Eisenkern zählen deshalb zu den aktiven Bauteilen elektrischer Maschinen, während die Bauteile, die erstere nur aus konstruktiven Gründen unterstützen, zu den nichtaktiven gerechnet werden. In rotierenden elektrischen Maschinen werden die Leiter und die aus ihnen gebildeten Wicklungen wegen der sehr guten magnetischen Leitfähigkeit der Ferromagnetika auf Spulenkernen oder in genuteten Blechpaketen untergebracht und erfüllen so verschiedene Funktionen:

1. Erzeugung des magnetischen Feldes

Bei Gleichstrommaschinen obliegt diese Aufgabe den Hauptpolwicklungen, während bei den Wechselstrommaschinen als Beispiel die Ständerwicklungen der Drehstrom-Asynchronmotoren genannt seien.

2. Erzeugung von Spannungen oder Kräften

Diese Aufgabe erfüllen die Ständerwicklungen bei Innenpol- und die Läuferwicklungen bei Außenpolmaschinen der Synchronmaschinen, die Läuferwicklungen der Kommutatormaschinen und der Asynchronmotoren.

3. Beeinflussung unerwünschter Magnetfelder

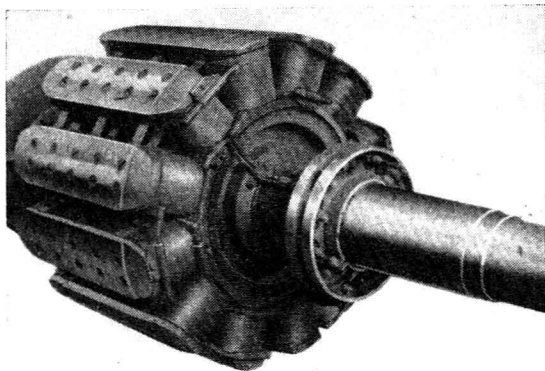
Als Hilfswicklungen rotierender elektrischer Maschinen bewirken Wendepol-, Kompensations- und Dämpferwicklungen verbesserte Betriebseigenschaften.

Bei der Behandlung der Gesetzmäßigkeiten von Wicklungen, der Darstellung der Wicklungen in speziellen Schaltplänen und der Änderung der Wicklungsangaben wird auf die funktionelle Einteilung der Wicklungen keine Rücksicht genommen und einer anderen Gliederung entsprochen.

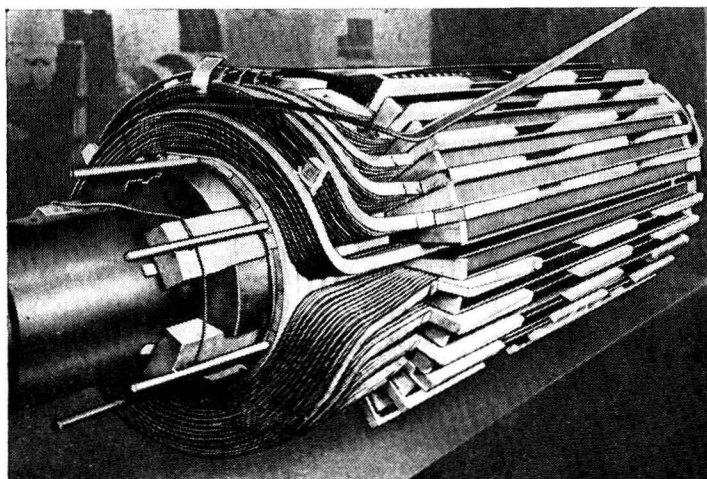
1.1.2. Allgemeine Wicklungsbezeichnungen

1.1.2.1. Wicklungsverteilung

Die Wicklungen rotierender elektrischer Maschinen werden auf oder in magnetisch wirksamen Bauteilen untergebracht. Geschieht dies auf ausgeprägten Polen (Bild 1.1), so heißt die erforderliche Wicklungsanordnung *konzentrierte Wicklung*. Die Wicklung umschließt den Polkern und den von ihr erzeugten Magnetfluß (s. Abschn. 1.3.1.). Wird die Wicklung jedoch über den Umfang verteilt und in Form von einzelnen Spulen in die Nuten eines Blechpakets eingelegt, so spricht man von *verteilter Wicklung*. Bild 1.2 zeigt diese Anordnung bei einer Polwicklung, Bild 1.3 bei einer typischen Drehstrom-Ständerwicklung.



*Bild 1.1. Konzentrierte Wicklung
Erregerwicklung einer Synchronmaschine mit Schenkelpollläufer*



*Bild 1.2. Verteilte Wicklung
Erregerwicklung einer Synchronmaschine mit Volltrommelläufer*

Polwicklungen sind vorwiegend konzentrierte Wicklungen; Kommutatorläufer- und die meisten Wechselstromwicklungen sind verteilte Wicklungen.

1.1.2.2. Wicklungselemente

Bei den hauptsächlich vorkommenden verteilten Wicklungen befinden sich die *Leiter* in Nuten. Als aktive oder *wirksame Leiterlänge* wird nur der im Blechpaket liegende Leiterteil betrachtet. Zwei derartige Leiterteile unterschiedlicher Spannungsrichtung aus verschiedenen Nuten werden mit der (inaktiven) hinteren

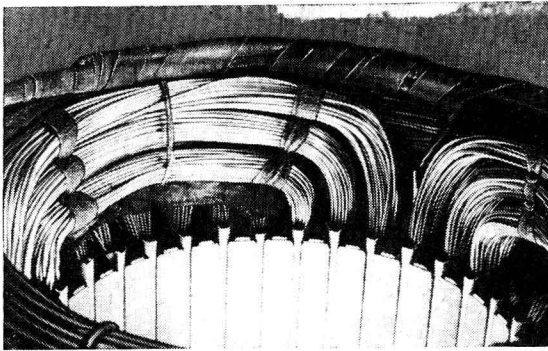


Bild 1.3. Verteilte Wicklung
Ständerwicklung einer Drehstrommaschine

Stirnverbindung zu einer Leiterschleife oder Windung zusammengeschaltet. Befinden sich in den betrachteten Nuten weitere Leiter, so werden auch sie zu Windungen vereinigt. Schaltet man die Windungen in Reihe, so entsteht eine Spule mit Spulenseiten und Spulenköpfen (Stirnverbindungen).

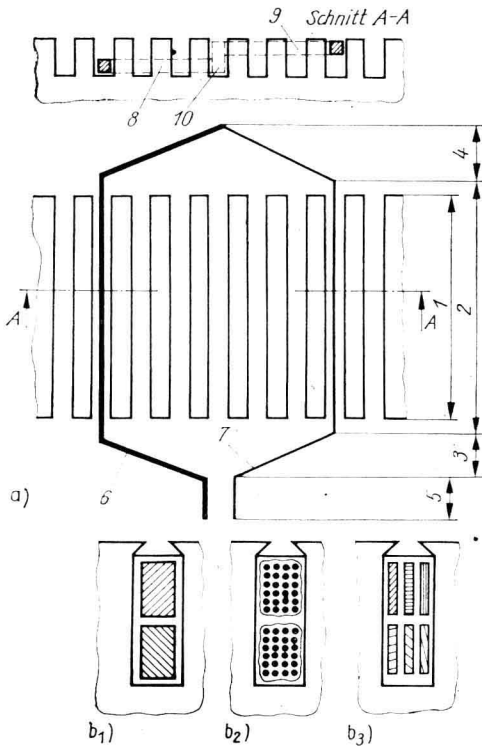


Bild 1.4

Bezeichnungen an der Spule

- a) Spule einer Zweischichtwicklung
- b) Spule und Spulenelement
- b_1 Spule mit $w_{sp} = 1$ (Stabwicklung)
- b_2 Spule mit $w_{sp} > 1$ (Spulenwicklung)
- b_3 Spulenelement mit drei Teilspulen in Stabwicklung
- 1 wirksame Leiterlänge; 2 Leiter- oder Spulenseite; 3 vordere Stirnverbindung; 4 hintere Stirnverbindung; 5 Schaltende; 6 Eingangsseite; 7 Ausgangsseite; 8 Unterlage; 9 Oberlage; 10 Spulenaug

Entsprechend der noch zu erwähnenden Zählweise wird die linke Spulenseite als *Eingangsseite*, die rechte als *Ausgangsseite* bezeichnet. Anfang und Ende einer Spule heißen *Spulen- oder Schaltenden* und werden mit anderen Spulen zur Wicklung verbunden.

Bei der häufig vorkommenden Zweischichtwicklung (s. Abschn. 1.1.2.5.) wird die Eingangsseite im Nutgrund als *Unterlage*, die Ausgangsseite in ihrer Nut als *Oberlage* untergebracht. Der notwendige Höhenausgleich wird mit einer Kröpfung der Spule, dem *Spulenaug*, erreicht (Bild 1.4).

Nach der Anzahl der Windungen je Spule werden die *Stabwicklung* mit $w_{sp} = 1$ und die *Spulenwicklung* mit $w_{sp} > 1$ erklärt. Als Leiterform kommen für die Spulenwicklung Rund- und Flachdrähte, für die Stabwicklung ausschließlich Flachdrähte zur Anwendung. Mit zunehmendem Querschnitt verringert sich die Bearbeitbarkeit der massiven Leiter. Deshalb werden sie entweder aus voneinander isolierten Teileleitern aufgebaut, oder der erforderliche Leiterquerschnitt wird mit parallelen Drähten erreicht. Das Wickeln mit parallelen Drähten bietet technologische Vorteile und steht auch im Zusammenhang mit der vorhandenen Nutschlitzbreite.

Wenn nicht ausdrücklich anders erklärt, wird im folgenden nur von dem wirksamen Leiterquerschnitt ausgegangen und bei der zeichnerischen Darstellung der Wicklungen die Windungszahl $w_{sp} = 1$ angewendet.

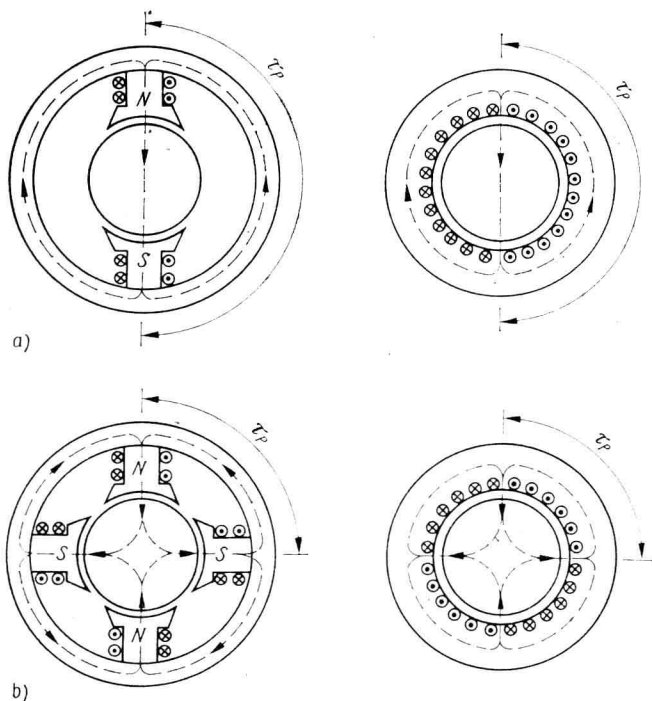


Bild 1.5. Feldverlauf in rotierenden elektrischen Maschinen
a) bei einer zweipoligen Maschine; b) bei einer vierpoligen Maschine