



Leseprobe

Rolf Fischer

Elektrische Maschinen

ISBN (Buch): 978-3-446-45218-3

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-45218-3>

sowie im Buchhandel.

# Vorwort

Das vorliegende Buch befasst sich mit Aufbau, Wirkungsweise und Betriebsverhalten der elektrischen Maschinen und Transformatoren. Der Maschinenentwurf wird schon aus Platzgründen nicht behandelt. Dieses nur einen kleineren Leserkreis interessierende Fachgebiet, das heute eng mit der EDV verbunden ist, wäre in einem eigenen Buch darzustellen. Eine Ausnahme wird bei der Auslegung von Dauermagnetkreisen gemacht, da diese Technik auch das Betriebsverhalten der so erregten Maschine beeinflusst und wachsende Bedeutung erlangt. Um dem Leser jedoch Anhaltspunkte für die möglichen spezifischen Belastungen in den Maschinenteilen zu geben, werden der Begriff der Ausnutzungsziffer erläutert und, wo immer sinnvoll, Richtwerte für typische Kenngrößen angegeben.

Stoffauswahl und Umfang wurden nach dem Gesichtspunkt festgelegt, ein vorlesungsbegleitendes Buch für das Studium der elektrischen Maschinen während der Ingenieurausbildung anzubieten. Daneben soll es aber auch dem in der Praxis stehenden Ingenieur bei der Auffrischung und Vertiefung seiner Fachkenntnisse von Nutzen sein. Vorausgesetzt sind die Höhere Mathematik der ersten Semester, die komplexe Rechnung und die allgemeinen Grundlagen der Elektrotechnik.

Auf die Behandlung so spezieller Maschinentypen wie z. B. Repulsionsmotoren oder die Drehstrom-Kommutatormaschinen, die keine Bedeutung mehr besitzen, wird verzichtet. Dagegen erhalten die Kleinmaschinen der verschiedenen Bauarten, die wie z. B. Universalmotoren in sehr großen Stückzahlen pro Jahr gefertigt werden, in den jeweiligen Hauptkapiteln eigene Abschnitte. Das Gleiche gilt für besondere Bauformen wie die Linearmotoren oder den Turbogenerator großer Leistung.

Besonderer Wert ist auf die Darstellung der Methoden zur Drehzahlsteuerung gelegt, wobei hier eingehend die Verbindungen zur Leistungselektronik gezeigt und die dabei auftretenden Maschinenprobleme behandelt werden.

Zur Kennzeichnung der Größen sind in der Regel die Formelzeichen nach DIN 1304 Teil 1 und Teil 7 verwendet; eine Liste aller Zeichen mit ihrer Bedeutung ist im Anhang enthalten. Bezugspfeile werden bei allen Anschlüssen nach dem Verbraucherpfeilsystem gesetzt. Ein ausführliches Literaturverzeichnis ermöglicht bei vielen Teilgebieten einen ersten Zugang zu weiterführenden, speziellen Veröffentlichungen.

*Rolf Fischer*

## ■ Vorwort zur 17. Auflage

Dank des erfreulich stetigen Interesses an den *Elektrischen Maschinen* erscheint hiermit eine weitere Auflage. Es bleibt dabei das Bestreben, stets neue Techniken, den Stand der Normung und aktuelle Fragenstellungen aufzunehmen. Da bei der mittlerweile Vollbleichung aller Maschinen der Einfluss einer Wirbelstromdämpfung fast ohne Bedeutung ist, konnte Abschnitt 2.4.3 stark reduziert werden. So bleibt der Seitenumfang in etwa konstant, obwohl in die neue Auflage folgende Themen aufgenommen wurden:

### **Abschnitt 3.3.4**

#### **Regelbare Ortsnetztransformatoren (RONT)**

Sie verdanken ihren Einsatz den Problemen der Spannungshaltung bei vorherrschend regenerativer Energieeinspeisung, vor allem von Photovoltaikanlagen in das Niederspannungsnetz.

### **Abschnitt 8.6**

#### **Vergleich drehzahl geregelter Antriebe**

Es wird eine Gegenüberstellung der wichtigsten Kenngrößen vor allem im dynamischen Verhalten der Maschinentypen GM, AsM, SM aufgelistet.

Der Verfasser hofft, dass auch diese 17. Auflage der *Elektrischen Maschinen* das Interesse der Kollegen an den Hochschulen findet. Den Praktikern in Industrie und Gewerbe sowie natürlich allen Studierenden der verschiedenen Ingenieurwissenschaften möge das Buch weiterhin eine verlässliche Hilfe sein. Alle Hinweise und Anregungen werden von jeder Seite sehr dankbar angenommen und nach Möglichkeit integriert. Bei meinem Fachnachfolger Prof. Dr.-Ing. E. Nolle ist diese wertvolle Unterstützung (Abschnitt 8.6) schon dankbare Tradition.

Die beste Zusammenarbeit mit dem Carl Hanser Verlag währt nun schon über vier Jahrzehnte, natürlich auch mit wechselnden Mitarbeitern. Diesmal gilt mein Dank für die Betreuung Frau Franziska Jacob, M. A. (Lektorat) und wieder Frau Dipl.-Ing. F. Kaufmann (Herstellung).

Esslingen, Frühjahr 2017

*Rolf Fischer*

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Allgemeine Grundlagen elektrischer Maschinen</b> .....	<b>11</b>
1.1	Prinzipien elektrischer Maschinen .....	11
1.1.1	Vorgaben im Elektromaschinenbau .....	11
1.1.2	Energiewandlung und Bezugspfeile .....	13
1.1.3	Bauarten und Gliederung elektrischer Maschinen .....	15
1.1.4	Leistung und Bauvolumen elektrischer Maschinen .....	18
1.2	Der magnetische Kreis elektrischer Maschinen .....	20
1.2.1	Aufbau magnetischer Kreise .....	20
1.2.2	Elektrobleche und Eisenverluste .....	23
1.2.3	Spannungen und Kräfte im Magnetfeld .....	26
1.2.4	Der magnetische Kreis mit Dauermagneten .....	29
<b>2</b>	<b>Gleichstrommaschinen</b> .....	<b>37</b>
2.1	Aufbau und Bauteile .....	38
2.1.1	Prinzipieller Aufbau .....	38
2.1.2	Bauteile einer Gleichstrommaschine .....	40
2.1.3	Ankerwicklungen .....	43
2.1.4	Dauermagneterregte Kleinmaschinen und Sonderbauformen ....	50
2.2	Luftspaltfelder und Betriebsverhalten .....	54
2.2.1	Erregerfeld und Ankerrückwirkung .....	54
2.2.2	Spannungserzeugung und Drehmoment .....	59
2.2.3	Stromwendung .....	65
2.2.4	Wendepole und Kompensationswicklung .....	69
2.3	Kennlinien und Steuerung von Gleichstrommaschinen .....	75
2.3.1	Anschlussbezeichnungen und Schaltbilder .....	75
2.3.2	Kennlinien von Gleichstrommaschinen .....	76
2.3.3	Verfahren zur Drehzahländerung .....	86
2.3.4	Dynamisches Verhalten von Gleichstrommaschinen .....	94
2.4	Stromrichterbetrieb der Gleichstrommaschine .....	95
2.4.1	Netzgeführte Stromrichterantriebe .....	96
2.4.2	Antriebe mit Gleichstromsteller .....	100
2.4.3	Probleme der Stromrichterspeisung .....	103

<b>3</b>	<b>Transformatoren</b>	<b>114</b>
3.1	Aufbau und Bauformen	115
3.1.1	Eisenkerne von Einphasen- und Drehstromtransformatoren	115
3.1.2	Wicklungen	118
3.1.3	Wachstumsgesetze und Kühlung	119
3.2	Betriebsverhalten von Einphasentransformatoren	128
3.2.1	Spannungsgleichungen und Ersatzschaltung	128
3.2.2	Leerlauf und Magnetisierung	133
3.2.3	Verhalten bei Belastung	138
3.2.4	Kurzschluss des Transformators	142
3.2.5	Transformatorgeräusche	147
3.3	Betriebsverhalten von Drehstromtransformatoren	148
3.3.1	Schaltzeichen und Schaltgruppen	148
3.3.2	Schaltgruppen bei unsymmetrischer Belastung	149
3.3.3	Direkter Parallelbetrieb	154
3.3.4	Regelbare Ortsnetztransformatoren (RONT)	157
3.4	Sondertransformatoren	158
3.4.1	Änderung der Übersetzung und der Strangzahl	158
3.4.2	Kleintransformatoren und Messwandler	160
3.4.3	Spartransformatoren und Drosselspulen	161
<b>4</b>	<b>Allgemeine Grundlagen der Drehstrommaschinen</b>	<b>167</b>
4.1	Drehstromwicklungen	167
4.1.1	Ausführungsformen von Drehstromwicklungen	167
4.1.2	Wicklungsfaktoren	171
4.2	Umlaufende Magnetfelder	178
4.2.1	Durchflutung und Feld eines Wicklungsstranges	178
4.2.2	Drehfelder	181
4.2.3	Blindwiderstände der Drehstromwicklung	190
4.2.4	Spannungserzeugung und Drehmoment	192
4.3	Symmetrische Komponenten	195
4.3.1	Drehstromsystem	195
4.3.2	Zweiphasensystem	199
<b>5</b>	<b>Asynchronmaschinen</b>	<b>202</b>
5.1	Aufbau und Wirkungsweise	203
5.1.1	Ständer und Läufer der Asynchronmaschine	203
5.1.2	Asynchrones Drehmoment und Frequenzumformung	204
5.1.3	Drehtransformatoren	210
5.2	Darstellung der Betriebseigenschaften	212
5.2.1	Spannungsgleichungen und Ersatzschaltung	212
5.2.2	Einzelleistungen und Drehmoment	215
5.2.3	Stromortskurve	222
5.2.4	Betriebsbereiche und Kennlinien	234
5.2.5	Drehmomente und Kräfte der Oberfelder	236

5.3	Steuerung von Drehstrom-Asynchronmaschinen	245
5.3.1	Verfahren zur Drehzahländerung	245
5.3.2	Ersatzschaltung und Betrieb mit frequenzvariabler Spannung	253
5.3.3	Anlass- und Bremsverfahren	264
5.3.4	Unsymmetrische Betriebszustände	274
5.3.5	Dynamisches Verhalten von Asynchronmaschinen	280
5.4	Stromrichterbetrieb von Asynchronmaschinen	283
5.4.1	Spannungsänderung mit Drehstromstellern	284
5.4.2	Untersynchrone Stromrichter-kaskade	289
5.4.3	Einsatz von Frequenzumrichtern	294
5.4.4	Motorrückwirkungen bei Umrichterbetrieb	300
5.5	Spezielle Bauformen und Betriebsarten der Asynchronmaschine	303
5.5.1	Stromverdrängungs- und Doppelstabläufer	303
5.5.2	Linearmotoren	306
5.5.3	Asynchrongeneratoren	310
5.5.4	Die elektrische Welle	313
5.5.5	Doppeltgespeiste Schleifringläufermotoren	314
5.5.6	Energiesparmotoren mit Wirkungsgrad-Klassifizierung	316
5.6	Einphasige Asynchronmaschinen	322
5.6.1	Einphasenmotoren ohne Hilfswicklung	322
5.6.2	Einphasenmotoren mit Kondensatorhilfswicklung	324
5.6.3	Einphasenmotoren mit Widerstandshilfswicklung	330
5.6.4	Der Drehstrommotor am Wechselstromnetz	333
5.6.5	Spaltpolmotoren	337

## **6 Synchronmaschinen** 340

6.1	Aufbau der Synchronmaschine	341
6.1.1	Bauformen	341
6.1.2	Erregersysteme	345
6.1.3	Synchronmaschinen mit Dauermagneterregung	348
6.1.4	Synchronmaschinen mit Zahnspulenwicklungen	351
6.2	Betriebsverhalten der Vollpolmaschine	353
6.2.1	Erregerfeld und Ankerrückwirkung	353
6.2.2	Zeigerdiagramm und Ersatzschaltung	358
6.2.3	Synchronmaschinen im Alleinbetrieb	359
6.2.4	Synchronmaschinen im Netzbetrieb	369
6.2.5	Besonderheiten der Schenkelpolmaschine	377
6.3	Verhalten der Synchronmaschine im nichtstationären Betrieb	385
6.3.1	Drehzahlsteuerung und Stromrichterbetrieb	385
6.3.2	Pendelungen und unsymmetrische Belastung	389
6.3.3	Die Synchronmaschine in Zweiachsendarstellung	392
6.3.4	Stoßkurzschluss	397
6.4	Spezielle Bauarten von Synchronmaschinen	402
6.4.1	Turbogeneratoren	402
6.4.2	Die Einphasen-Synchronmaschine	404
6.4.3	Betriebsverhalten dauermagneterregter Synchronmotoren	405

---

6.4.4	Synchrone Langstator-Linearmotoren	410
6.4.5	Transversalflussmotoren	412
6.5	Synchrone Kleinmaschinen	417
6.5.1	Reluktanzmotoren	417
6.5.2	Hysteresemotoren	421
6.5.3	Schrittmotoren	423
<b>7</b>	<b>Stromwendermaschinen für Wechsel- und Drehstrom</b>	<b>428</b>
7.1	Übersicht	428
7.2	Universalmotoren	430
7.2.1	Aufbau und Einsatz	430
7.2.2	Ersatzschaltung und Zeigerdiagramm	431
7.2.3	Verfahren der Drehzahländerung	435
7.2.4	Stromwendung	437
<b>8</b>	<b>Betriebsbedingungen elektrischer Maschinen</b>	<b>441</b>
8.1	Elektrotechnische Normung und Vorschriften	441
8.2	Bauformen und Schutzarten	445
8.3	Explosiongeschützte Ausführungen	448
8.4	Verluste, Erwärmung und Kühlung	451
8.5	Betriebsarten und Leistungsschildangaben	457
8.6	Motoren für drehzahlgeregelte Antriebe	463
<b>9</b>	<b>Anhang</b>	<b>465</b>
	Formelzeichen und Einheiten	465
	Indizes	469
	Schreibweise von Formelzeichen elektrischer und magnetischer Größen	469
	Berechnung der Aufgaben	470
	<b>Literatur</b>	<b>477</b>
	Schrifttum	477
	Elektrische Maschinen (Auswahl)	477
	Verzeichnis verwendeter oder weiterführender Fachliteratur	478
	<b>Index</b>	<b>485</b>

# 2

## Gleichstrommaschinen

**Geschichtliche Entwicklung.** Auf Grund der geschichtlichen Entwicklung der Starkstromtechnik, die mit der Energie von galvanischen Elementen ihren Anfang nahm, entstand als erster elektromechanischer Energiewandler die Gleichstrommaschine. Bereits 1832 baute der Franzose H. Pixii den ersten Generator für zweiwelligen Gleichstrom. Die weitere Entwicklung ist u. a. mit den Namen A. Pacinotti, der 1860 einen Motor mit Ringwicklung und vierteiligem Stromwender fertigte, und F. v. Hefner-Alteneck, der 1872 den Trommelanker erfand, verknüpft. Einen wesentlichen Beitrag leistete im Jahre 1866 W. Siemens mit der Entdeckung des dynamoelektrischen Prinzips. Durch die damit gegebene Möglichkeit der Selbsterregung von Generatoren war eine Voraussetzung für den Großmaschinenbau geschaffen.

Mit der Einführung des Drehstroms etwa ab 1890 verlor die Gleichstrommaschine ihre beherrschende Stellung an die Synchrongeneratoren und Induktionsmotoren. Begünstigt durch ihre sehr gute Regelbarkeit mit galvanisch und magnetisch getrennten Kreisen für Ankerwicklung und Erregerwicklung sowie den einfachen Aufbau gesteuerter Gleichrichter mit hoher Regelqualität hat die Gleichstrommaschine bislang einen begrenzten Marktanteil behauptet [152].

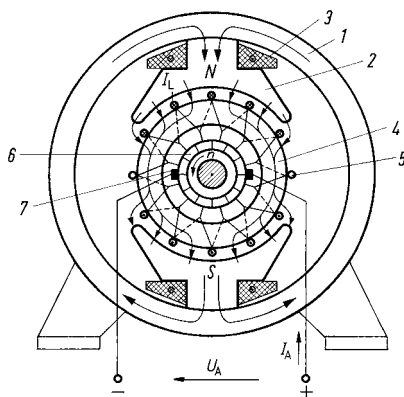
**Leistungsbereich.** Der mögliche Fertigungsbereich reicht von Kleinstmotoren mit Leistungen von unter einem Watt für die Feinwerktechnik bis zu den Großmaschinen. Dauermagneterregte Motoren bis ca. 100 W werden in großer Stückzahl in der Kfz-Elektrik als Scheibenwischer-, Gebläse- und Stellmotoren eingesetzt. Im Bereich der Servoantriebe bis zu Leistungen von einigen kW gibt es auch eine Reihe spezieller Bauformen wie Scheibenläufer- und Glockenankermotoren. Den früher vorherrschenden Einsatz als drehzahl geregelter Industrieantrieb in Werkzeugmaschinen, Förderanlagen, Walzenstraßen und auch als Fahrmotor in Bahnen hat der Gleichstrommotor vollständig an die Drehstrommotoren verloren. In ihrer Hochzeit bis in die 70er Jahre wurden Motoren mit Leistungen von über 10 MW gebaut. Der Gleichstromgenerator hat dagegen seit der Erfindung der gesteuerten Stromrichter keine Bedeutung mehr.



## ■ 2.1 Aufbau und Bauteile

### 2.1.1 Prinzipieller Aufbau

**Erzeugung eines Drehmoments.** Die Grundkonstruktion einer Gleichstrommaschine kann man am Beispiel des Motorbetriebs anschaulich als Anwendung des Kraftwirkungsgesetzes nach  $F = B \cdot l \cdot I$  erklären. Man benötigt danach ein Magnetfeld der Flussdichte  $B$  im Luftspalt der Feldpole und darin drehbar angeordnet Leiter der Länge  $l$ , die einen Strom  $I$  führen. Die Stromzufuhr muss dabei so erfolgen, dass stets alle Leiter eines Polbereichs gleichsinnig durchflossen sind. Dieser Gedanke ist in der einfachen Anordnung nach Bild 2.1, das bereits alle wesentlichen Bauteile der Gleichstrommaschine enthält, verwirklicht.



**Bild 2.1** Prinzipieller Aufbau einer Gleichstrommaschine

- 1 Jochring
- 2 Hauptpol
- 3 Erregerwicklung
- 4 Ankerblechpaket
- 5 Ankerwicklung
- 6 Stromwender
- 7 Kohlebürsten

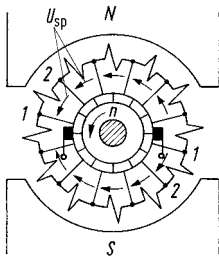
Der feststehende Ständer aus massivem oder geblechtem Eisen trägt einen Elektromagneten, dessen Erregerwicklung die zum Aufbau des Feldes erforderliche Durchflutung liefert. Die Enden des Magneten, die Hauptpole, sind nach innen durch so genannte Polschuhe erweitert, um gleichzeitig eine möglichst große Leiterzahl zu erfassen. Den äußeren magnetischen Rückschluss stellt der Jochring sicher.

Die Welle der Maschine trägt einen aus Dynamoblechen geschichteten Eisenkörper, der in Bild 2.1 als Ring dargestellt ist. Der magnetische Kreis ist damit bis auf den erforderlichen Luftspalt ganz aus Eisen mit  $\mu_r \gg 1$  aufgebaut. Alle Leiterstäbe bilden zusammen mit ihren Verbindungen die Ankerwicklung, die in Bild 2.1 wie in den Anfängen des Elektromaschinenbaus als Ringwicklung ausgeführt ist. Man bezeichnet den ganzen rotierenden Teil als Anker der Gleichstrommaschine.

**Funktion des Stromwenders.** Damit die mit  $I_L$  (Bild 2.1) stromdurchflossenen Leiter im Ständerfeld fortwährend ein Drehmoment erzeugen können, muss beim Wechsel des Polbereichs während der Drehung eine Umschaltung der Stromrichtung im Ankerleiter erfolgen. Dies erreicht man durch den Stromwender, auch Kommutator oder Kollektor genannt, der aus voneinander isolierten Kupfersegmenten oder Lamellen besteht und fest mit dem Blechpaket auf der Welle sitzt. Die einzelnen Spulen der Ankerwicklung sind mit ihren Anfängen und Enden nacheinander an die Segmente angeschlossen. Die Stromzufuhr in die Ankerwicklung erfolgt dann über Kohlebürsten, die mit dem rotierenden Stromwender

einen Gleitkontakt geben und die Wicklung zwischen den Hauptpolen einspeisen. Wechselt ein Leiter durch diese neutrale Zone, so ändert sich nach Bild 2.1 auch seine Stromrichtung. Der Stromwender erfüllt damit die Funktion eines mechanischen Schalters, und in den Ankerstäben fließt ein zeitlich etwa rechteckiger Wechselstrom.

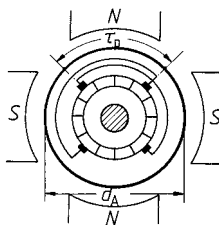
**Erzeugung einer Gleichspannung.** Rotiert ein Gleichstromanker im Ständerfeld der Luftspalt-Flussdichte  $B$ , so wird in den Leiterstäben entlang des Umfangs nach  $U_q = B \cdot l \cdot v$  eine Spannung induziert. Durch die Reihenschaltung der Spulen addieren sich deren Spannungen  $U_{sp}$  zwischen benachbarten Kohlebürsten (Bild 2.2) und bilden in ihrer Summe die Quellenspannung der Maschine. Der Stromwender sorgt wieder dafür, dass stets der Maximalwert und damit eine Gleichspannung an den Ankerklemmen auftritt.



**Bild 2.2** Addition der Spulenspannungen  $U_{sp}$  durch den Stromwender

Der Aufbau einer Gleichstrommaschine nach Bild 2.1 gestattet also ohne Änderungen den Motor- und den Generatorbetrieb. Die in der Ankerwicklung induzierte Gesamtspannung zwischen den Kohlebürsten hat beim Generator die Funktion einer Quellenspannung, beim Motor wirkt sie als induzierte Spannung der von außen angelegten Gleichspannung entgegen.

**Polteilung.** Größere Gleichstrommaschinen werden nicht nur mit zwei Hauptpolen, sondern höherpolig ausgeführt (Bild 2.3). Der Bereich eines Poles am Ankerumfang, die Polteilung, sinkt dann auf den Betrag



**Bild 2.3** Kohlebürsten und Polteilung der vierpoligen Gleichstrommaschine

$$\tau_p = \frac{d_A \cdot \pi}{2p} \tag{2.1}$$

wobei  $p$  die Polpaarzahl bedeutet. Jedes Polpaar erhält je eine Plus- und eine Minusbürste, wobei gleichnamige Bürsten untereinander verbunden sind. Die nach Bild 2.1 erläuterte, grundsätzliche Wirkungsweise der Maschine bleibt vollständig erhalten.



**Beispiel 2.1:** Wie viel Leiter  $z_{\text{ges}}$  am Ankerumfang benötigt eine vierpolige Gleichstrommaschine mit Ringwicklung nach Bild 2.1 und einem Ankerdurchmesser  $d_A = 34 \text{ cm}$ , der Länge  $l = 20 \text{ cm}$  bei  $n = 1800 \text{ min}^{-1}$  zur Erzeugung der Leerlaufspannung  $U_0 = 220 \text{ V}$ ? Das Erregerfeld besitze einen rechteckförmigen Verlauf der Luftspaltflussdichte von konstant  $B_L = 0,86 \text{ T}$  und erfasse gleichmäßig 70 % der Polteilung.

Spannung eines Leiters  $U_q = B_L \cdot l \cdot \nu$ ,  $\nu = \pi \cdot d_A \cdot n$

$$U_q = 0,86 \cdot 10^{-4} \text{ V} \cdot \text{s/cm}^2 \cdot 20 \text{ cm} \cdot \pi \cdot 34 \text{ cm} \cdot 30 \text{ s}^{-1} = 5,51 \text{ V}$$

Zwischen zwei Bürsten tragen  $0,7 \cdot z_{\text{ges}}/2p$  Leiter zur Spannungsbildung bei, damit ist

$$U_0 = \frac{z_{\text{ges}} \cdot 0,7}{2p} \cdot U_q$$

$$\text{und } z_{\text{ges}} = \frac{220 \text{ V} \cdot 4}{0,7 \cdot 5,51 \text{ V}} = 228 \text{ Leiter}$$



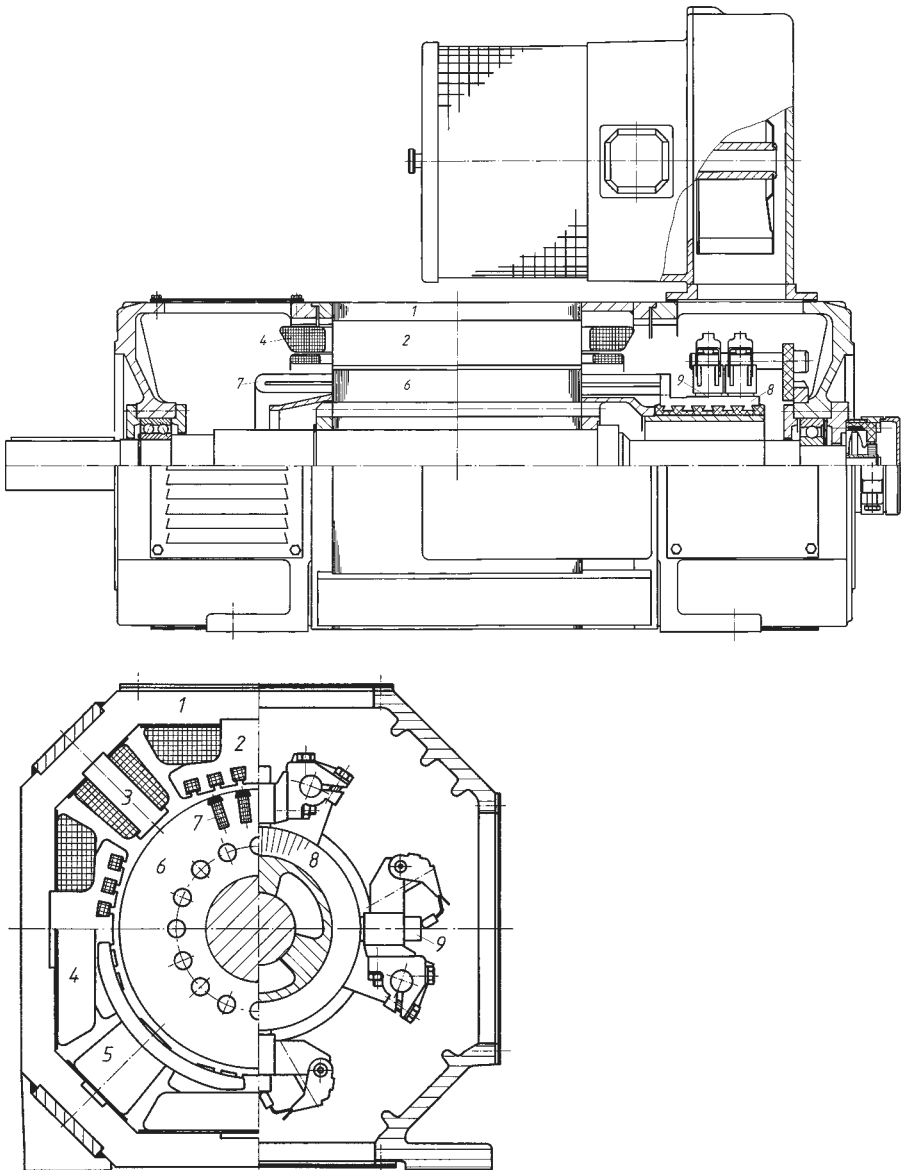
**Aufgabe 2.1:** Obiger Ringanker wird in einen passenden zweipoligen Ständer eingebaut. Die Luftspaltflussdichte beträgt wieder  $B_L = 0,86 \text{ T}$  über 70 % der neuen Polteilung. Bei welcher Drehzahl wird jetzt die Leerlaufspannung  $U_0 = 220 \text{ V}$  erreicht?

Ergebnis:  $n = 900 \text{ min}^{-1}$

## 2.1.2 Bauteile einer Gleichstrommaschine

Die Anforderungen der Stromrichtertechnik, deren Schaltungen heute fast immer die Energieversorgung und Steuerung der Gleichstrommaschine übernehmen, haben deren Konstruktion wesentlich verändert. So wurde aus dem klassischen Aufbau mit einem runden Ständergehäuse aus Massivstahl die vollgeblechte, eckige Ausführung der Schnittzeichnung in Bild 2.4 [13, 14].

**Ständer.** Zur Aufnahme der magnetischen Gleichfelder der Haupt- und Wendepole genügt prinzipiell ein Massivmaterial, so dass für Maschinen mit geringen regeltechnischen Anforderungen ein Jochring 1 aus Walzstahl gewählt werden kann. Die Hauptpole 2 bestehen immer aus gestanzten Blechen, die mit mehreren Bolzen zu einem festen Paket zusammengepresst werden. Über dem Polkern liegt die Erregerwicklung 4, während bei Bedarf in Nuten entlang des Polschuhs eine Kompensationswicklung untergebracht ist. Zwischen den Hauptpolen sitzen Wendepole 3, die wie später dargestellt, für einen funkenfreien Betrieb des Stromwenders erforderlich sind. Alle Pole erhalten radiale Gewindelöcher und können so von außen mit Schrauben am Jochinnenmantel befestigt werden.



**Bild 2.4** Längs- und Querschnitt einer vierpoligen, vollgeblechten Gleichstrommaschine in Viereckbauweise 38 kW, 400 V,  $1460 \text{ min}^{-1}$

(Franz Kessler KG, Bad Buchau)

1 Ständerblech mit Hauptpolen (2) und Wendepolen (3)

4 Erregerwicklung

5 Wendepolwicklung

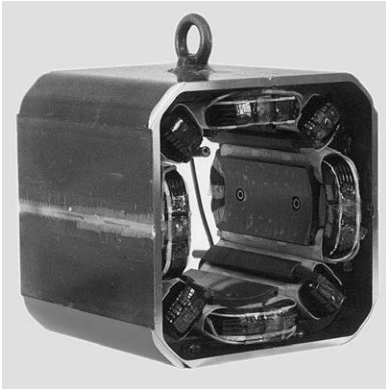
6 Anker

7 Ankerwicklung

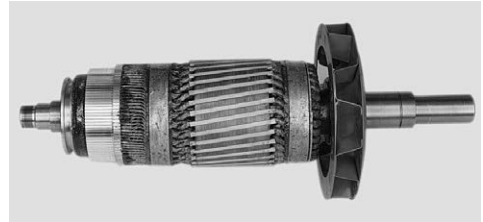
8 Stromwender

9 Kohlebürsten

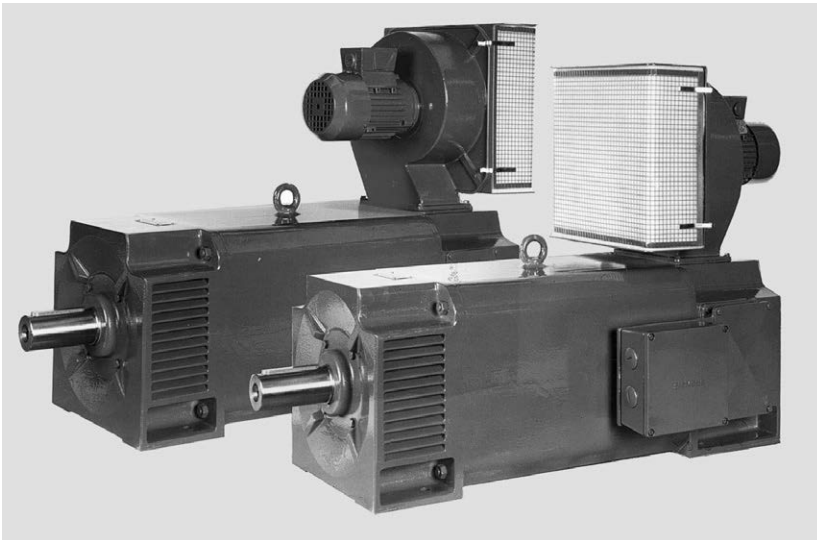
Ist z. B. für den Einsatz als Hauptantrieb einer Werkzeugmaschine eine gute Dynamik der Maschine erforderlich, so müssen möglichst rasche Stromänderungen zulässig sein. In diesem Fall ist zur Vermeidung einer Wirbelstromdämpfung der gesamte magnetische Kreis aus isolierten Blechen auszuführen. Nur so lässt sich eine einwandfreie Funktion der Wendepole und eine möglichst kleine Feldumkehrzeit erreichen (s. Abschnitt 2.4.3). Bei den unteren Baugrößen verwendet man gerne einen Komplettschnitt, bei dem wie in Bild 7.4 Jochring, Haupt- und Wendepol aus einem Blech sind. Ansonsten wird der Jochring aus Blechen geschichtet und zu einem Paket verschweißt. Der gesamte Ständer erhält bei diesen vollgeblechten Maschinen heute oft eine rechteckige Form, wie dies auch in den Bildern 2.5 und 2.7 zu sehen ist [151].



**Bild 2.5** Ständer einer vierpoligen Gleichstrommaschine in Viereckbauweise 12 kW, 1500 min<sup>-1</sup> (Siemens AG, Bad Neustadt)



**Bild 2.6** Anker zu Ständer in Bild 2.5 (Siemens AG, Bad Neustadt)



**Bild 2.7** Gleichstrommaschinen mit Fremdlüfter für Hauptspindelantriebe (Siemens AG, Bad Neustadt) 40 kW, 1500 min<sup>-1</sup>

**Anker.** Das Blechpaket des Ankers (Bild 2.6) besteht aus isolierten Dynamoblechen mit 0,5 mm Stärke, wodurch die Eisenverluste bei der Rotation im Ständerfeld klein gehalten werden. Die Bleche enthalten zur Aufnahme der Ankerwicklung entlang des Umfangs Nuten, die mit einem Keil verschlossen werden. Bei Maschinen kleinerer Leistung verwendet man halbgeschlossene, konische Nuten mit parallelen Zahnflanken und eine Runddrahtwicklung. Für große Leistungen sind parallele Nutflanken mit Schwalbenschwanzkeil und einer Profildrahtwicklung nach Bild 2.10 üblich. Das ganze Blechpaket wird samt seinen Pressringen bei kleineren Maschinen direkt, sonst über Tragarme, auf der Welle befestigt.

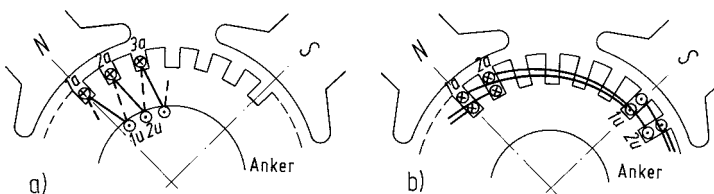
**Stromwender.** Der Stromwender (Kollektor, Kommutator) wird heute überwiegend in einer Pressstoffausführung, wie in Bild 2.4 im Schnitt dargestellt, gefertigt. Die keilförmigen Kupfersegmente, auch Stege oder Lamellen genannt, sind durch eine 0,5 mm bis 1 mm starke Isolierschicht getrennt und in eine Pressmasse eingebettet. Armierungsringe nehmen die Fliehkräfte auf.

Im stromwenderseitigen Lagerschild ist ein verstellbarer Bürstenbrückenring angebracht, der im Abstand einer Polteilung isolierte Bolzen zur Aufnahme der Bürstenhalter trägt. Die darin sitzenden Kohlebürsten werden durch Federdruck auf den Stromwender aufgelegt.

### 2.1.3 Ankerwicklungen

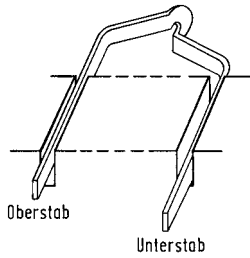
**Trommelwicklung.** Die von Pacinotti angegebene Ringwicklung, die wegen ihres einfachen Aufbaus gerne zu prinzipiellen Darstellungen verwendet wird, ist konstruktiv ungünstig, da die Verbindungsleitungen der oberen Leiterstäbe zwischen Ankerblech und Welle hindurchgeführt werden müssen. Zur Spannungsbildung tragen diese Rückleiter ohnehin nichts bei, da der Innenraum praktisch feldfrei ist.

Diesen Nachteil vermeidet die heute verwendete Trommelwicklung dadurch, dass sie die Innenleiter (Index u) unter einen äußeren Stab der nächsten Polteilung (Bild 2.8) legt. Im Rückleiter jeder Spule wird so eine gleiche negative Spannung wie im Hinleiter induziert und somit die Gesamtspannung im Vergleich zur Ringwicklung verdoppelt. Die 1872 von Hefner-Alteneck angegebene Trommelwicklung der Gleichstrommaschine stellt also eine Zweischichtwicklung dar, deren Spulen außerhalb des Ankers fertig hergestellt und in die Nuten eingelegt werden können (Bild 2.9).



**Bild 2.8** Schaltung der Ankerleiter zur Wicklung

- a) Ringwicklung
- b) Trommelwicklung

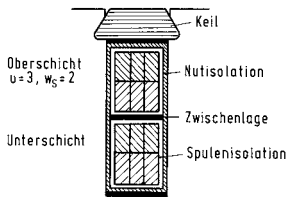


**Bild 2.9** Ober- und Unterseite einer Spule mit gekröpfter Stirnverbindung

Da jede Spule mit Anfang und Ende an je eine Stromwenderlamelle angeschlossen ist, stimmt die Anzahl der Spulen mit der Lamellen- oder Stegzahl  $K$  überein. Die Nutzahl des Ankers  $Q$  wird im Allgemeinen kleiner als die Lamellenzahl gewählt, so dass

$$u = \frac{K}{Q} \tag{2.2}$$

Spulenseiten einer Schicht nebeneinander in einer Nut liegen. Hat eine Spule zudem die Windungszahl  $N_s$ , so ergibt sich eine Nutfüllung mit  $2u \cdot N_s$  Stäben/Nut. Für eine größere Gleichstrommaschine erhält man dann einen prinzipiellen Aufbau des Nutquerschnitts nach Bild 2.10. Hier liegen die in Reihe geschalteten Stäbe jeder Schicht untereinander und die  $u$  Spulenseiten nebeneinander in der Nut. Die Gesamtzahl der Leiterstäbe am Ankerumfang ergibt sich zu  $z_A = 2u \cdot N_s \cdot Q$  oder mit Gl. (2.2) zu



**Bild 2.10** Querschnitt durch eine Ankermitte mit parallelen Flanken und Rechteckdraht

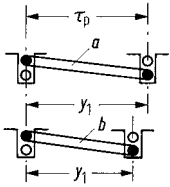
$$z_A = 2 \cdot K \cdot N_s \tag{2.3}$$

**Durchmesser- und Sehnwicklung.** In der üblichen Darstellung der Ankerwicklung nummeriert man die Stäbe nach der Lamellenzahl und gibt alle Schaltverbindungen in Lamellenschritten an. So entspricht eine Polteilung einem Schritt von  $K/2p$  Lamellen.

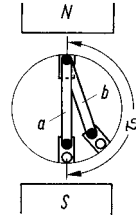
Als Spulenweite  $y_1$  führt man entweder genau eine Polteilung oder etwas weniger aus (Bild 2.11). Im ersten Fall ergibt sich die Durchmesserwicklung mit

$$y_1 = \frac{K}{2p} \tag{2.4 a}$$

ansonsten die Sehnwicklung mit



**Bild 2.11** Bestimmung der Spulenweite  
 a) Durchmesserwicklung  
 b) gesehnte Wicklung



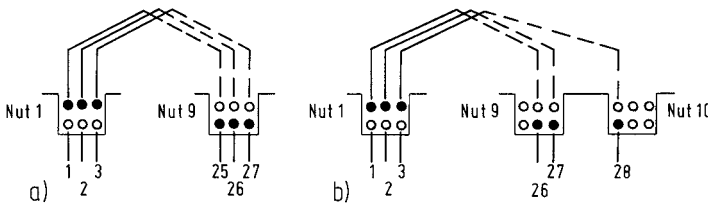
**Bild 2.12** Darstellung der Spulenweite bei der zweipoligen Maschine  
 a) Durchmesserwicklung  
 b) gesehnte Wicklung

$$y_1 < \frac{K}{2p}$$

(2.4 b)

Beide Bezeichnungen ergeben sich aus der Darstellung (Bild 2.12) für die zweipolige Maschine.

Will man die  $u$  Spulenseiten einer Oberschicht auch in der Unterschicht in einer Nut beieinander haben, dann muss man die Spulenweite so wählen, dass sie durch  $u$  teilbar ist. Für diese Spulen gleicher Weite (Bild 2.13 a) gilt damit als Bedingung für den Nutschritt



**Bild 2.13** Lage von Ober- und Unterschicht einer Spule  
 a) Spulen gleicher Weite  $y_1 = 24, y_{10} = 8$   
 b) Treppenwicklung  $y_1 = 25, y_{10} = 8/8/9$

$$y_{10} = \frac{y_1}{u} = \text{ganzzahlig}$$

(2.5)

Erfüllt man diese Forderung nicht, so verteilen sich die  $u$  Spulenseiten der Unterschicht auf zwei Nuten (Bild 2.13 b) und man erhält eine Treppenwicklung. Letztere sind in der Herstellung aufwändiger als eine Wicklung mit Spulen gleicher Weite, wirken sich aber günstig auf die Stromwendung der Maschine aus (s. Abschn. 2.2.4).

**Wicklungsarten.** Für die Zusammenschaltung der einzelnen Spulen zu einer geschlossenen Wicklung und damit die Addition der Teilspannungen bestehen zwei grundsätzliche Möglichkeiten.

In der Schleifenwicklung (Bild 2.14) wird das Ende einer Spule unmittelbar mit dem Anfang der benachbarten verbunden. Auf diese Weise werden fortlaufend alle Spulenspannungen im Bereich eines Polpaares aufsummiert.



# Index

## A

Akku-Handwerkzeuge 51  
Alleinbetrieb 310, 359  
AlNiCo-Magnete 30  
amorphe Bleche 24  
Anker 43  
Ankerdurchflutung 57  
Ankerquerfeld 56  
Ankerrückwirkung 54, 57, 81, 350, 354  
Ankerspannung 59  
Ankerstellbereich 87  
Ankerstrombelag 56  
Ankerstrom-Formfaktor 106  
Ankerumschaltung 98  
Ankervorwiderstände 86  
Ankerwicklung 43  
Ankerwirkungsgrad 87  
Anlassen von Schleifringläufermotoren 264  
Anlasswiderstände 91  
Anlauf 91  
Anlaufkondensatormotor 329  
Anschlussbezeichnungen 75  
Anziehungskräfte 408  
Anzugsmoment 327  
Arbeitspunkt 32  
asynchrone Oberfeldmomente 236  
asynchroner Anlauf 386  
asynchrones Drehmoment 204  
Asynchrongeneratoren 310  
Asynchronmaschine, Betriebsbereiche 234  
Asynchronmaschinen 202  
Asynchronmaschinen, einphasige 322

Asynchronmaschine, Stromrichterbetrieb 283

Ausgleichsverbindungen 48

Ausgleichswelle 313

Ausgleichswicklung 152

Aussetzbetrieb 459

## B

Barkhausen-Schaltung 435

Bauformen 12, 445

Baugrößen 12, 445

Bauteile Gleichstrommaschine 40

Bearbeitungszuschlag 26

Belastung des Transformators 138

Belastungskurve 235

Bemessungswerte 461

Berührungsschutz 446

Betriebsart 12

Betriebsbedingungen 456

Betriebsdiagramme 88, 257, 371

Betriebskondensatormotor 328

Bewegungsspannung 26, 60, 69

Bezugspfeile 13

Blindlaststeuerung 371

Blindleistung 15

Blockstrom 406

Bohrungsdurchmesser 168

Bremsschaltungen des Asynchronmotors 270

Bruchlochwicklungen 171, 177

Bürstenfeuer 66, 430, 439

bürstenlose Erregung 346

Bürstenverschiebung 74, 438

**C**

Carter-Faktor 55  
CE-Kennzeichnung 442

**D**

Dahlander-Schaltung 251  
Dauerbetrieb 458  
Dauerkurzschluss 142, 362  
Dauermagneten 29  
Dauermagneterregung 50, 348  
Dauermagnetmotor 386  
direkte H<sub>2</sub>-Kühlung 402  
direkter Anlauf 283  
direkter Parallelbetrieb 154  
Direktumrichter 388  
Doppelkäfigläufer 305  
Doppelkondensatormotor 328  
Doppelschlussmotoren 83  
Doppelstab-Käfigläufer 204  
doppeltgespeiste Schleifringläufermotoren 314  
Drehfelder 181, 185  
Drehfeld-Erregerkurve 181  
Drehfeld-Raumdiagramm 209  
Drehmoment 18, 28, 38, 61, 84, 192, 194, 204, 216, 374, 382  
Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie 78, 434  
Drehmoment-Frequenz-Diagramm 427  
Drehmomentgleichung 217  
Drehmomentmaßstab 229  
Drehregler 210  
Drehstrom-Asynchronmaschinen, Steuerung 245  
Drehstrombank 115, 165  
Drehstromkerne 117  
Drehstrommaschinen 167  
Drehstrom-Nebenschlussmotors 429  
Drehstromsteller 284  
Drehstromtransformator 114, 148  
Drehstromwicklungen 167  
Drehtransformatoren 210  
Drehzahländerung 81, 86, 245, 435  
drehzahlgeregelte Antriebe 386  
Drehzahlkennlinie 436  
Drehzahlstabilität 79

Dreiphasensystem 195  
Dreischenkelkern 117  
Drosselspulen 161, 165  
Durchflutungsgesetz 21  
Durchflutungsgleichgewicht 139, 149  
Durchgangsleistung 161  
Durchmesserwicklung 44, 169  
dynamisches Verhalten 94

**E**

Eigenkühlung 457  
Einphasen-Kerntransformator 117  
Einphasen-Manteltransformator 117  
Einphasenmotoren 322  
Einphasen-Reihenschlussmotor 430  
Einphasen-Synchronmaschine 404  
Einphasentransformatoren 128  
Einschaltströme 281  
Einschaltstromstoß 136  
Einschichtwicklungen 168  
einsträngige Belastung 150  
Einzelverluste 451  
Eisenkerne 115  
Eisen- und Zusatzverlust 263  
Eisenverluste 23, 26, 214  
Eisenweg 20  
elektrische Ausgleichswelle 313  
Elektrobleche 23  
Elektronikmotor 53  
elektronischer Anlasser 267  
EMV 442  
Energiewandlung 13  
Entmagnetisierung 33  
Entmagnetisierungsfaktor 31  
Entmagnetisierungskurve 29  
Erregerfeld 54, 353  
Erregerleistung 345  
Erregerstrom 363  
Erregersysteme 345  
Erregerwicklung 75, 76, 80  
Ersatzschaltbild 213, 431  
Ersatzschaltung 128, 358, 359  
Erwärmung 452  
Europannorm 442  
explosionsgeschützte Ausführungen 448

**F**

Fahrmotor 85  
 Feldbild 22  
 Felderregerkurve 178  
 Feldkräfte 28  
 Feldkurve 353  
 Feldlinien 22  
 Feldschwächbereich 258, 261  
 Feldschwächung 435  
 Feldstellbereich 87  
 Feldumkehr 98  
 Fernübertragung 114  
 Ferrite 30  
 Flüssigkeitskühlung 403  
 Fremderregung 80  
 Fremdkörperschutz 447  
 Fremdkühlung 457  
 Frequenzfaktor 26  
 Frequenzumformer 206  
 frequenzvariable Spannung 253  
 Fünfschenkelkern 118  
 Funkstörung 431

**G**

Ganzlochwicklung 171, 173  
 Gasexplosionsschutz 448  
 Gegenfeld 186  
 Gegenstrombremsung 273  
 Gegendsystem 196  
 Geräusche 302  
 Geräuschquelle 147  
 Gießharzisolierung 127  
 Gleichpol-Bauweise 424  
 Gleichstrombremsung 270  
 Gleichstrom-Erregermaschine 345  
 Gleichstrommaschinen 37, 75, 76  
 Gleichstromsteller 100  
 Gliederung elektrischer Maschinen 16  
 Görges'sches Phänomen 277  
 Grundswingungsgehalt 13  
 Gruppenfaktor 172  
 GTO-Thyristoren 102

**H**

hartmagnetische Werkstoffe 29  
 Hauptpol 40, 54, 337  
 Hauptreaktanze 190  
 Hilfsreihenschlusswicklung 73, 83  
 Hochlaufmoment 281  
 Hysterese motor 421  
 Hysterese schleife 25, 29  
 Hystereseverluste 25

**I**

IEC-Normen 442  
 Induktionsgesetz 26  
 innere Leistung 62  
 inneres Moment 217  
 Isolation 118  
 Isolationsschäden 302

**K**

Käfigläufer 204  
 Kapp'sches Dreieck 139  
 Kennlinie 76  
 Kennzahl 148  
 Kernaufbau 116  
 Kippunkte 219  
 Kleinmaschinen 417  
 Kleintransformatoren 160  
 Kloß'sche Gleichung 219  
 Kohlebürsten 38  
 Kollektor 38  
 Kommutator 38  
 Kommutierung 65  
 Kommutierungszeit 65  
 Kompensationswicklung 69, 71  
 Compoundierung 347  
 Compoundwicklung 73, 83  
 Kondensatorhilfswicklung 324  
 Konstantspannungsgenerator 347  
 Konstruktionsprinzipien 15  
 kornorientierte Elektrobleche 24  
 Kräfte 412  
 Kraftwirkung 27  
 Kreisdiagramm 222  
 Kühlarten 457

Kühlsysteme 404  
Kühlung 119  
Kühlungsarten 126  
Kurzschlussspannung 143  
Kurzschlussstrom 162  
Kurzstator-Linearmotor 309  
Kurzstatormotor 309  
Kurzzeitbetrieb 458  
Kusa-Schaltung 270

**L**

Lamellenspannung 59  
Langstator-Linearmotor 309, 410  
Langstatormotor 309  
Lärmbekämpfung 147  
Lastverteilung 154  
Läufer 203, 347  
läufergespeister Drehstrom-Stromwender-  
motor 429  
Läuferrückspeisung 289  
Läuferspannung 205  
Läuferstrang, Ausfall 277  
Läufervorwiderstände 246  
Leerlauf 133  
Leerlaufdaten 134  
Leerlaufdrehzahl 81  
Leerlaufkennlinie 77  
Leerlauf-Kurzschluss-Verhältnis 365  
Leerlaufversuch 230  
Leistungsbereich 37, 115, 202  
Leistungsbilanz 215  
Leistungsdiagramm 375  
Leistungsfaktor 13  
Leistungsmaßstab 229  
Leistungsminderung 107  
Leistungsschild 12, 460  
Leistungsschildangaben 457  
Leistungsverhältnis 155  
linearer Positionierantrieb 407  
Linearmotoren 306, 410  
Luftkühlung 402

**M**

magnetische Feldkonstante 20  
magnetischer Kreis 20, 30

Magnetisierungsdurchflutung 208  
Magnetisierungskennlinie 25  
Magnetisierungsstrom 135  
Magnetostriktion 147  
Magnetschwebebahn 410  
Maschinentransformatoren 115  
Maschinenumformer 206  
Mehrquadrantenbetrieb 96  
Messwandler 160  
Mitfeld 186  
Mitsystem 196  
Modellmaschine 396  
Motorauswahl 450  
Motorbetrieb 234

**N**

Nebenschlussverhalten 81  
Netzbetrieb 369  
Netztransformatoren 115  
neutrale Zone 57  
Normung 441  
Nullsystem 196  
numerische Feldberechnung 22  
Nutschrägung 241  
Nutstreuung 191  
Nutzungsharmonische 176, 242  
Nutzbremsung 92  
Nutzwiderstand 214

**O**

Oberfelder 189  
Oberschwingungen 103  
Oberwellendrehfelder 236  
Oberwellenstreuung 191  
Ortskurve 222

**P**

Parallelbetrieb 154  
Park'sche Transformation 393  
Pendelmomente 110, 302  
Pendelungen 390  
Phasenschieberbetrieb 371  
Phasenvervielfacher 159  
Polbedeckungsfaktor 55

Polteilung 39  
 Polumschaltung 251  
 Positionierantriebe 408  
 Potier-Dreieck 363  
 Pulsbetrieb 100

## Q

Querfeldspannung 68

## R

Raumzeiger 299  
 Reaktanzspannung 65  
 Reaktionsmoment 383  
 Regelung, feldorientierte 299  
 Reihenschlussmotor 84, 88  
 relative Kurzschlussspannung 143  
 Reluktanzmotore 417  
 Reluktanzschrittmotor 425  
 Remanenzspannung 77  
 Roebel-Stab 341  
 Rundfeuer 61  
 Rüttelkräfte 243

## S

Sättigungsfaktor 31  
 Schaltbilder 75, 76  
 Schaltgruppen 148  
 Schaltgruppen, Auswahl 153  
 Schaltverschiebung 438  
 Schaltzeichen 148  
 Scheibenläufermotor 52  
 Scheibenwicklung 118  
 Schenkelpolgenerator 343  
 Schenkelpolmaschine 341, 377  
 Schergerade 32  
 Schiefast 392  
 Schleifenwicklung 45, 47  
 Schleifringläufer 203  
 Schleifringläufermotor 314  
 Schlupferhöhung 246  
 Schlupfgerade 227  
 Schrägschnitt 116  
 Schrittarten 425  
 Schrittmotor 423

Schubkraft 307  
 Schubkräfte 307, 408  
 Schutzarten 12, 445  
 Sechspuls-Brückenschaltung 96  
 Sehnenwicklung 44  
 Sehnungsfaktor 173  
 selbsterregte Asynchrongeneratoren 310  
 selbsterregte, komponentierte Synchron-  
 generatoren 347  
 Selbsterregung 77  
 Selbstinduktionsspannung 26  
 Selbstkühlung 457  
 Seltenen Erden 30  
 SE-Magneten 34  
 Semi-processed-Bleche 24  
 Sondertransformatoren 158  
 Spaltpol 337  
 Spaltpolmotoren 337  
 Spannungsabsenkung 250  
 Spannungsänderung 140  
 Spannungsformel 133  
 Spannungsgleichung 128, 212  
 Spannungshaltung 311  
 Spannungswandler 161  
 Spartransformator 161  
 Spulenweite 44  
 Ständer 40, 203  
 ständergespeister Drehstrom-Strom-  
 wendermotor 428  
 Ständerlängsdurchflutung 377  
 Ständerquerdurchflutung 377  
 Ständerstrom 398  
 Steinmetz-Schaltung 333  
 Stelltransformator 165  
 Stern-Dreieck-Anlauf 269, 283  
 Stern-Dreieck-Schaltung 268  
 Sternpunktverlagerung 152  
 Steuerkennlinie 256  
 Stirnstreuung 191  
 Stoßkurzschluss 145, 397  
 Stoßkurzschlussstrom 399  
 Strangfeld 181  
 Streureaktanzen 131, 191  
 Streuziffer 30, 218  
 Strombelag 180  
 Stromdiagramm 355  
 Stromgleichung 378

Strommaßstab 229  
Stromortskurven 222, 254, 372, 380, 433  
Stromrichterbetrieb 95, 103, 385  
Stromrichtererrregung 345  
Stromrichtererkaskade, USK 289  
Stromrichtermotor 386  
Stromrichterschaltungen 96  
Stromverdrängung 303  
Stromverdrängungsläufer 304  
Stromwandler 160  
Stromwelligkeit 104  
Stromwender 38, 43  
Stromwendermaschinen 428  
Stromwendespannung 65, 437, 438  
Stromwendung 65, 437  
Stufenschalter 158  
symmetrische Komponenten 195  
synchrone Oberfeldmomente 238  
Synchronisation 385  
synchronisierendes Moment 389  
Synchronmaschine 340  
Synchronmaschinen 340, 351, 359, 369  
Synchronmaschine, Reaktanzen 398  
Synchronreaktanzen 359

**T**

Taktfrequenz 102  
Tempeltyp 117  
Toleranzen 461  
Transformationsspannung 26, 437, 439  
Transformator 114  
Transformatorgeräusche 147  
Transistorsteller 102  
TRANSRAPID 410  
Transversalflussmotor 412  
Trapezumrichter 389  
Triacsteuerung 436  
Trockentransformator 127  
Trommelwicklung 43  
Turbogeneratoren 342, 402  
Typenleistung 162

**U**

Übersetzungsverhältnisse 213  
Umkehrstromrichter 99

Universalmotor 430, 431  
unsymmetrische Betriebszustände 274  
untersynchrone Stromrichtererkaskade 289

**V**

vereinfachtes Ersatzschaltbild 139  
Verlustaufteilung 228  
Verluste 301, 451  
Verschiebungsfaktor 13  
V-Kurven 373  
Vollpolmaschine 341, 353

**W**

Wachstumsgesetze 119  
Wandertransformatoren 115  
Wärmeklasse 453, 455  
Wärmequellennetz 453  
Wasserschutz 447  
Wasserstoff-Kühlung 402  
Wechselpol-Bauweise 424  
Wechselstrom-Bahnmotor 429  
Wellblechkessel 127  
Wellenwicklung 46, 47  
Wendefeldspannung 69, 437  
Wendepole 40, 69  
Wicklung 118  
Wicklungsarten 45  
Wicklungsfaktor 171, 174  
Wicklungsstrang 178  
Widerstandsbremung 92  
Widerstandshilfswicklung 330  
Widerstandsstufen des Anlassers 265  
Wiedereinschalten 283  
Wirbelstromdämpfung 112  
Wirbelstromverluste 26  
Wirkungsgrad 14, 120, 451  
Wirkungsgradkurve 120

**Z**

Zahnspulenwicklungen 351  
Zeigerdiagramm 214, 358  
Zickzackschaltung 148  
Zonenfaktor 172

Zündschutzart 449  
Zusatzeisenverluste 241  
Zweiachsendarstellung 392  
Zweiphasenmotor 324  
Zweiphasensystem 199  
Zweipuls-Brückenschaltung 96  
Zweischichtwicklungen 170  
zweisträngige Belastung 150  
zweisträngiger Schrittmotor 425  
Zylinderwicklung 118