

# 1

## Allgemeine Grundlagen elektrischer Maschinen

### ■ 1.1 Prinzipien elektrischer Maschinen

#### 1.1.1 Vorgaben im Elektromaschinenbau

**Bedeutung und Vorgaben.** Elektrische Maschinen sind in der Ausführung als

- Generatoren die Grundlage fast der gesamten Erzeugung elektrischer Energie in Wärme-, Wasser- und Windkraftanlagen eines Landes.
- Motoren ein entscheidendes Betriebsmittel aller Produktion in Industrie und Gewerbe sowie Bestandteil vieler Konsumgüter.

Der Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V. (ZVEI) gibt für das Jahr 2005 ein Produktionsvolumen für das gesamte Gebiet der elektrischen Antriebstechnik im Wert von ca. 6,8 Milliarden Euro an. Darin sind die verschiedenen Bereiche mit den folgenden Anteilen beteiligt:

36,8% - Kleinmotoren

26,6% - Drehstrommotoren

19,3% - Antriebsstromrichter

15,8% - Sonstige Motoren, Zubehör

1,5% - Gleichstrommaschinen

Nimmt man die Kraftwerkstechnik hinzu, so entsteht vom winzigen Schrittmotor in einer Quarzuhr mit einer Leistung von ca. 10  $\mu$ W bis zu den größten Drehstromgeneratoren von über 1000 MW eine geschlossene Leistungsreihe von 14 Zehnerpotenzen. Dazwischen liegen mit Stückzahlen von meist mehreren Millionen pro Jahr die Kleinmaschinen der verschiedenen Bauarten, wie z. B. die dauermagneterregten Gleichstrom-Hilfsantriebe im Kfz oder die Universalmotoren in Elektrowerkzeugen oder Hausgeräten. Industrieantriebe werden heute fast immer als Drehstrommotoren listenmäßig bis etwa 1000 kW angeboten, darüber hinaus fertigt man Sondermotoren bis ca. 30 MW. Auch bei Generatoren reicht die Fertigung von Millionen Lichtmaschinen pro Jahr über autarke, transportable Stromversorgungsanlagen (Notstromaggregate) ab einigen kVA, über Generatoren für Windrotoren, Blockheizkraftwerke und Staustufen in Flüssen bis in den MVA-Bereich und zu Großmaschinen für Wasser- und Wärmekraftwerke.

Beim Bau von elektrischen Maschinen muss der Entwickler eine Vielzahl von Normen und Vorschriften beachten. Sie betreffen die zulässige Ausnutzung der verwendeten Materialien, einzelne Betriebsdaten und vor allem auch die äußere Gestaltung. Diese Vorgaben sind heute fast alle Inhalt von Europeanormen EN und werden in Kapitel 8 zumindest in den Grundzügen aufgeführt. In Bild 1.1 sind die wichtigsten Vorgaben im Bezug zur Maschine dargestellt.

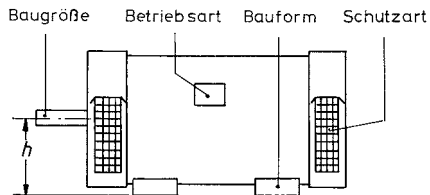


Bild 1.1 Vorgaben im Elektromaschinenbau

**Baugröße.** Zur Vereinheitlichung von Anbaumaßen und damit einer allgemeinen Austauschbarkeit werden vor allem die Industrieantriebe der Serienfertigung nur in abgestuften Baugrößen gefertigt. Als Bezugswert gilt die Achshöhe  $h$  in Abstufungen von 56 mm bis zu etwa 450 mm. Bei Drehstrommaschinen sind mit dem IEC-Normmotor auch weitere Anbaumaße festgelegt. Ausgenommen von dieser Vereinheitlichung von Anbaumaßen sind vielfach Kleinmotoren, wenn sie für einen vorbestimmten Einsatz z.B. in einem Kfz oder einem Hausgerät vorgesehen sind.

**Bauform.** Je nach Anwendung benötigt man Maschinen mit unterschiedlicher Anbaumöglichkeit, wie z.B. mit normaler Fußbefestigung oder einem Flanschanschluss. Die hier vorhandenen Unterscheidungen definiert die Bauform nach EN 60034-7. Die jeweilige Ausführung wird durch einen Code aus Buchstaben und Zahlen wie IM B3 (International Mounting) gekennzeichnet.

**Schutzart.** In der Normreihe EN 60034-5 werden Anforderungen an die Gehäuseausführung festgelegt, die den Schutzzumfang vor Berühren unter Spannung stehender Maschinenteile und das Eindringen von Fremdkörpern und Wasser definieren. Je nach Einsatzfall der Maschine ist ein bestimmter Schutzgrad einzuhalten, der durch die Kombination der Buchstaben IP (International Protection) mit zwei Zahlen, z.B. IP21, beschrieben wird.

**Betriebsart.** Mit den Vorschriften EN 60034-1 bzw. VDE 0530 Teil 1 werden zwischen Dauerbetrieb S1 und Kurzzeitbetrieb S2 zehn verschiedene Belastungsarten einer elektrischen Maschine geregelt. In keinem Fall darf die Erwärmung der Wicklungen eine der Wärmeklasse der eingesetzten Isoliermaterialien zugeordnete Höchsttemperatur überschreiten. Ferner gibt es Grenzwerte für zulässige Kurzschlussströme, Hochlaufmomente und Oberschwingungen.

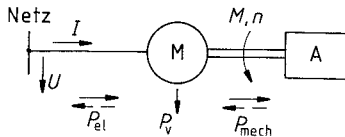
**Leistungsschild.** Eine elektrische Maschine erhält – ausgenommen sind wieder Kleinantriebe – ein Leistungsschild, das dem Anwender alle erforderlichen Betriebsdaten angibt. Dies sind vor allem die Werte für den Bemessungsbetrieb wie: Betriebsart S, Abgabeleistung  $P_N$ , Spannung  $U_N$ , Strom  $I_N$ , Leistungsfaktor  $\cos \varphi$ , Drehzahl  $n_N$ . Drehmoment und Wirkungsgrad werden nicht angegeben, da sie aus den vorstehenden Angaben zu berechnen sind.

### 1.1.2 Energiewandlung und Bezugspfeile

**Rotierende Energiewandler.** Rotierende elektrische Maschinen sind Energiewandler, die eine Umformung zwischen elektrischer und mechanischer Energie vornehmen. Die Leistung wird auf der einen Seite durch die Größen elektrische Spannung  $U$  und Strom  $I$ , auf der anderen durch das Drehmoment  $M$  und die Drehzahl  $n$  bestimmt. In Bild 1.2 ist dieses Prinzip der Energiewandlung schematisch dargestellt. Betrachtet man den stationären Betriebszustand, so gilt die Leistungsbilanz

$$P_{\text{mech}} = P_{\text{el}} \pm P_{\text{v}} \quad (1.1)$$

mit dem Minuszeichen für den Motorbetrieb. Die Umwandlungsverluste  $P_{\text{v}}$ , die von den Betriebsgrößen  $U$ ,  $I$  und  $n$  abhängen, werden in jedem Fall in Wärme umgesetzt und sind damit verloren.



**Bild 1.2** Elektrische Maschine M als Energiewandler  
A Arbeitsmaschine/Antrieb – Motor – – – Generator

Die mechanische Wellenleistung errechnet sich aus

$$P_{\text{mech}} = 2\pi \cdot n \cdot M \quad (1.2)$$

Für die elektrische Leistung gilt allgemein

$$P_{\text{el}} = m \cdot U \cdot I \cdot \lambda \quad (1.3)$$

wobei  $U$  und  $I$  die Wicklungswerte der Maschine mit der Strangzahl  $m$  sind. Die mechanische Leistung steht beim Motor zur Versorgung der angekuppelten Arbeitsmaschine A zur Verfügung und ist bei Generatorbetrieb die erforderliche Antriebsleistung. Der Leistungsfaktor

$$\lambda = g_1 \cdot \cos \varphi \quad (1.4)$$

erfasst mit dem Verschiebungsfaktor  $\cos \varphi$  die Phasenlage von Strom und Spannung bei Wechselstrom- und Drehstrommaschinen. Der Grundswingungsgehalt  $g_1$  berücksichtigt mögliche Oberschwingungen im Stromverlauf. Für Gleichstrommaschinen ist motorseitig  $m = 1$  und  $\lambda = 1$  zu setzen.

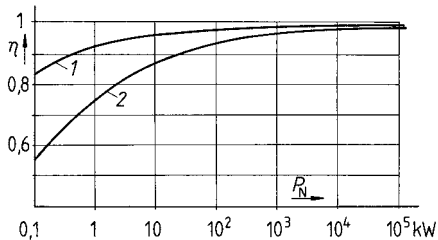
Das Verhältnis von Abgabe- und Aufnahmeleistung wird als Wirkungsgrad des Energiewandlers nach

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \tag{1.5}$$

bezeichnet. Im Motorbetrieb ist  $P_1 = P_{el}$  und  $P_2 = P_{mech}$  einzusetzen.

Zur Ermittlung der Verluste und des Wirkungsgrades elektrischer Maschinen gibt die VDE-Bestimmung 0530 Teil 2 für Gleich- und Drehstrommaschinen spezielle Mess- und Berechnungsverfahren an.

**Statische Energiewandler.** Transformatoren und die Schaltungen der Stromrichtertechnik sind ruhende Energiewandler, welche die elektrische Energie auf ein anderes Spannungsniveau bringen (Transformatoren) oder die Stromart ändern (Stromrichter). Da hier bewegte Teile fehlen, entstehen keine Reibungsverluste und im Fall des Transformators kann ohne Luftspalt ein optimaler magnetischer Kreis ausgeführt werden. Transformatoren und bei Stromrichterschaltungen vor allem die Gleichrichter besitzen daher hohe Umwandlungswirkungsgrade (Bild 1.3), welche die von rotierenden Maschinen vor allem bei kleinen Leistungen deutlich übertreffen. So erreichen Großtransformatoren bei rein ohmscher Belastung Werte von über 99 %.

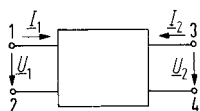


**Bild 1.3** Wirkungsgrade rotierender und statischer Energiewandler

- 1 Stromrichter, Transformatoren
- 2 Rotierende elektrische Maschinen

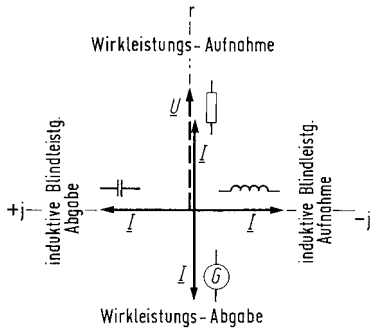
**Bezugspfeile.** Zur Berechnung eines elektrischen Stromkreises müssen für den Strom  $I$  und die Spannung  $U$  je eine positive Bezugsrichtung gewählt werden. In diesem Buch wird dazu ausschließlich das Verbraucherpfeilsystem verwendet, was den Vorteil hat, dass beim Übergang vom Motor- in den Generatorbetrieb einer Maschine keine neue Festlegung des Stromzeigers erfolgen muss.

Bei einer Vierpolschaltung wie in Bild 1.4 wird diese Pfeilanordnung auf beide Klemmenpaare angewandt, auch wenn wie z.B. bei einem Transformator stets eine Seite Energie abgibt. Dies äußert sich wie bei Generatorbetrieb einer Maschine im Zeigerdiagramm dadurch, dass die Wirkkomponente des betreffenden Stromes in Gegenphase zu seiner Spannung liegt.



**Bild 1.4** Anwendung des Verbraucher-Pfeilsystems auf einen Vierpol (Zweitor)

Art und Richtung der elektrischen Energie sind damit durch die Lage des Stromzeigers  $\underline{I}$  in Bezug zur Spannung  $\underline{U}$  im Koordinatensystem von Bild 1.5 eindeutig festgelegt. Benachbarte Quadranten stimmen in je einer Charakteristik überein. Bei einem Verbraucher liegt der Stromzeiger in den Quadranten 1 oder 2, bei Energieabgabe unterhalb der imaginären Achse ( $j$ -Achse). Bei der Bewertung von Blindleistungen wird auf die Unterscheidung induktiv oder kapazitiv verzichtet und stattdessen von der Aufnahme oder Abgabe von (induktiver) Blindleistung gesprochen. Eine Spule nimmt damit Blindleistung auf, ein Kondensator gibt sie ab.



**Bild 1.5** Festlegung der Belastungsart im Koordinatensystem für das Verbraucherpeilsystem

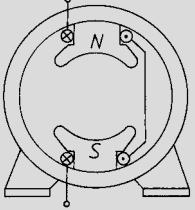
### 1.1.3 Bauarten und Gliederung elektrischer Maschinen

**Konstruktionsprinzipien.** Für den prinzipiellen Aufbau von Ständer (Stator) und Läufer (Rotor, Anker) von elektrischen Maschinen gibt es jeweils nur einige wenige grundsätzliche Ausführungen. Sie sind in Tabelle 1.1 angegeben und führen in ihrer Kombination zu den aufgeführten Hauptmaschinentypen.

**Tabelle 1.1** Konstruktionsprinzipien elektrischer Maschinen

	Läufer mit	Käfigwicklung	Drehstromwicklung mit Schleifringen	Einzelpole (auch Dauermagnete)	Stromwenderwicklung
Ständer mit					
Drehstromwicklung	Asynchron-Käfigläufer-Motor 	Asynchron-Schleifringläufer-Motor	Innenpol-Synchronmaschine	Drehstrom-Kommutator-Maschine	

**Tabelle 1.1** Konstruktionsprinzipien elektrischer Maschinen (Fortsetzung)

Einzelpole auch als Dauermagnete 	Spaltpolmotor	Außenpol-Synchronmaschine	Schrittmotor	Gleichstrom-Maschine
---	---------------	---------------------------	--------------	----------------------

**Bauarten.** Eine Gliederung der elektrischen Maschinen kann einerseits nach der verwendeten Stromart wie Gleichstrom-, Wechselstrom- oder Drehstrommaschinen, aber auch nach der Wirkungsweise wie Asynchron- oder Synchronmaschinen oder mit Stromwenderwicklung erfolgen. Innerhalb dieser Haupttypen gibt es meist eine ganze Reihe spezieller Bauarten, die sich in einem bestimmten Leistungs- oder Anwendungsbereich durchgesetzt haben: Tabelle 1.2 zeigt eine Zusammenstellung der elektrischen Maschinen im Rahmen dieser beiden Gliederungen. Dabei ist auch noch der früher als drehzahl geregelter Antrieb eingesetzte Drehstrom-Stromwendermotor aufgeführt. Alle angegebenen Maschinentypen werden in den verschiedenen Abschnitten des Buches besprochen. Die in Tabelle 1.2 angegebenen Anwendungsbereiche und Leistungen sind dabei nur als Schwerpunkte zu verstehen.

Hinweis: Die in Tafel 1.2 angegebenen Einsatzgebiete vor allem für Stromwendermaschinen sind durch die Entwicklung der Leistungselektronik eher historisch. So sind z. B. große Gleichstrommotoren in Walzwerken und Förderanlagen inzwischen durch umrichter gesteuerte Drehstromantriebe abgelöst; das Gleiche gilt für Werkzeugmaschinen und die heutigen Bahnmotoren.

**Tabelle 1.2** Gliederung und Einsatz elektrischer Maschinen

Stromart	Stromwendermaschine	Asynchronmaschine	Synchronmaschine	Haupteinsatzgebiete	Leistungsbereich des Maschinentyps
Gleichstrom	Dauermagnetmotor			Feinwerktechnik, Kfz-Elektrik, Servoantriebe	< 1 W bis 10 kW
	Fremderregter Motor			Hauptantrieb für Werkzeugmaschinen, Hebezeuge, Prüffelder, Walzwerke	10 kW bis 10 MW
	Reihenschlussmotor			Anlasser im Kfz, Fahrmotor in Bahnen	300 W bis 500 kW

**Tabelle 1.2** Gliederung und Einsatz elektrischer Maschinen (*Fortsetzung*)

Stromart	Stromwendermaschine	Asynchronmaschine	Synchronmaschine	Haupteinsatzgebiete	Leistungsbereich des Maschinentyps
Wechselstrom	Universalmotor			E-Werkzeuge, Haushaltsgeräte	50 W bis 2000 W
	Reihenschlussmotor			Fahrmotor in 16 <sup>2</sup> / <sub>3</sub> -Hz- und 50-Hz-Vollbahnen	100 kW bis 1000 kW
		Spaltpolmotor		Lüfter, Pumpen, Gebläse, Haushaltsgeräte	5 W bis 150 W
		Kondensatormotor		Haushaltsgeräte, Pumpen, Gebläse, Werkzeuge	50 W bis 2000 W
			Hysteresemotor	Uhrwerke, Feinwerktechnik, Hilfsantriebe	< 1 W bis 20 W
			Reluktanzmotor	Gruppenantriebe in der Textilindustrie, Extruder	100 W bis 10 kW
Drehstrom	Nebenschlussmotor (durch Umrichterantriebe abgelöst)			Druck- und Papiermaschinen, Textilindustrie	1 kW bis 150 kW
		Käfigläufermotor		Industriestandardantrieb, z. B. Pumpen, Gebläse, Bearbeitungsmaschinen, Fördertechnik, Umformer, Fahrmotor in Bahnen	100 W bis 50 MW
		Schleifringläufermotor		Hebezeuge, Pumpen- und Verdichter	10 kW bis 10 MW
		Linearmotor	Linearmotor	Fördertechnik, Schnellbahnen	100 W bis 10 MW
			Dauermagnetmotor	Servoantriebe, Gruppenantrieb	100 W bis 10 kW
			Schenkelpolmaschine	Notstromgenerator, langsamlaufender Industrieantrieb Wasserkraftgenerator	10 W bis 1000 MW
			Vollpolmaschine	Verdichter-, Mühlenantrieb, Turbogenerator im Kraftwerk	100 kW bis 1500 MW
Impulsstrom			Elektromotor	Feinwerktechnik, Textilindustrie	< 1 W bis 200 W
			Schrittmotor	Quarzuhren, Positionierantrieb	10 μW bis 500 W

### 1.1.4 Leistung und Bauvolumen elektrischer Maschinen

Nach Gl. (1.20) kann das Drehmoment  $M$  einer Maschine über die Tangentialkräfte  $F$  am Läufer mit dem Durchmesser  $d$  bestimmt werden. Führen die  $z$  Leiter den Strom  $I$ , so gilt in Verbindung mit Gl. (1.19)

$$M = F \cdot \frac{d}{2} = \frac{d}{2} \cdot z \cdot \alpha \cdot B \cdot l \cdot I$$

wobei der Polbedeckungsfaktor  $\alpha = 0,6$  bis  $0,8$  nach Gl. (2.13) den Unterschied zwischen der mittleren Flussdichte innerhalb eines Pols im Vergleich zum Maximalwert  $B$  erfasst. Bezieht man den Gesamtstrom aller Leiter  $z \cdot I$  auf den Läuferumfang  $d \cdot \pi$ , so erhält man mit

$$A = \frac{z \cdot I}{d \cdot \pi}$$

eine Strombelag  $A$  genannte Größe. Ihr Wert ist von den möglichen Nutabmessungen und damit vom Läuferdurchmesser sowie vom Kühlsystem der Maschine abhängig. Bei Luftkühlung wird etwa der Bereich  $A = 100 \text{ A/cm}$  bis  $600 \text{ A/cm}$  ausgeführt.

Mit Einsetzen des Strombelags in obige Momentenbeziehung ergibt sich für das Drehmoment

$$\boxed{M = 0,5 \cdot \pi \cdot \alpha \cdot A \cdot B \cdot d^2 \cdot l} \quad (1.6)$$

Das Produkt  $d^2 \cdot l$  bestimmt das so genannte Bohrungsvolumen  $V_b = d^2 \cdot l \cdot \pi/4$  der Maschine und proportional dazu ihr Gesamtvolumen und letztlich die Baugröße. Damit entstehen die folgenden grundsätzliche Aussagen:

1. Bei durch die zulässigen thermischen und magnetischen Belastungen des aktiven Materials vorgegebenem Produkt  $A \cdot B$  bestimmt allein das gewünschte Drehmoment  $M_N$  das Bohrungsvolumen und damit die Baugröße eines Motors.
2. Die einer Baugröße zuzuordnende Leistung  $P_N$  wird erst durch die verlangte Drehzahl  $n_N$  definiert und steigt proportional mit ihr an.

Maschinen für eine bestimmte Leistung werden also mit höherer Betriebsdrehzahl immer kleiner und leichter. Dieser Zusammenhang hat bei den tragbaren Elektrowerkzeugen zu Werten von  $n_N \leq 25000 \text{ min}^{-1}$  geführt.

Mit Gl. (1.2) erhält man die Leistung der Maschine mit

$$P = \pi^2 \cdot \alpha \cdot A \cdot B \cdot d^2 \cdot l \cdot n$$

Um eine spezifische Größe für die Materialausnutzung zu erhalten, definiert man als Ausnutzungsziffer oder Leistungszahl  $C$

$$\boxed{C = \pi^2 \cdot \alpha \cdot A \cdot B} \quad (1.7)$$



Ihre Verknüpfung mit der Leistung der Maschine ergibt

$$P = C \cdot d^2 \cdot l \cdot n \quad (1.8)$$

Die Ausnutzungsziffer ergibt einen ersten Richtwert für das erforderliche Produkt  $d^2 \cdot l$  einer geplanten Maschine. Ihr Wert steigt mit der Baugröße, liegt bei Leistungen im Bereich von 1 kW bei etwa  $1 \text{ kW min/m}^3$  und erreicht bei wassergekühlten Motoren mit  $10 \text{ kW min/m}^3$  das Zehnfache.

Anstelle der Leistungszahl  $C$  verwendet man zur Bewertung der Ausnutzung des aktiven Materials häufig auch die auf die Läuferoberfläche bezogene Tangentialkraft und bezeichnet mit

$$\sigma = \frac{F}{d \cdot \pi \cdot l} = \frac{2M}{d^2 \cdot \pi \cdot l}$$

diese Kraft/Flächeneinheit als Drehschub  $\sigma$ . Mit Gl. (1.6) erhält man

$$\sigma = \alpha \cdot A \cdot B \quad (1.9 \text{ a})$$

Zwischen Leistungszahl  $C$  und Drehschub  $\sigma$  besteht nach obigen Beziehungen die Zuordnung

$$C = \pi^2 \cdot \sigma \quad (1.9 \text{ b})$$

Gl. (1.8) ist auch der Grund für den Einsatz von Getriebemotoren. Bei Betriebsdrehzahlen von z. B. unter  $100 \text{ min}^{-1}$  würde das Produkt  $d^2 \cdot l$  für eine bestimmte Leistung so groß, dass der Aufwand für ein oft in das Gehäuse integriertes Getriebe zur Reduktion der dann möglichen hohen Motordrehzahl die wirtschaftlichste Lösung ist.



**Beispiel 1.1:** Für den Entwurf eines Drehstrommotors mit  $P = 11 \text{ kW}$ ,  $n = 1447 \text{ min}^{-1}$  kann  $C = 2,2 \text{ kW} \cdot \text{min/m}^3$  angenommen werden. Es ist eine langgestreckte Ausführung mit  $l = 2 \cdot d$  geplant. Welche Werte müssen Läuferdurchmesser  $d$  und Läuferlänge  $l$  etwa erhalten?

Nach Gl. (1.8) gilt

$$d^2 \cdot l = \frac{P}{C \cdot n} = \frac{11 \text{ kW}}{2,2 \text{ kW} \cdot \text{min/m}^3 \cdot 1447 \text{ min}^{-1}} = 3,455 \cdot 10^3 \text{ cm}^3$$

Wegen  $l = 2 d$  gilt

$$2d^3 = 3,455 \cdot 10^3 \text{ cm}^3, \quad d = 12 \text{ cm} \quad \text{und} \quad l = 24 \text{ cm}$$



**Beispiel 1.2:** Bei Gleichstrommaschinen erhält man als Ausnutzungskennziffer etwa  $C = 6,5 \cdot (A \cdot B)$ . Welche Leistung erreicht der in Beispiel 1.4 angegebene kleine Dauermagnetmotor bei  $n = 1200 \text{ min}^{-1}$ , wenn ein Strombelag von  $A = 100 \text{ A/cm}$  zulässig ist

$$\text{Es ist} \quad B_L = \frac{\Phi_L}{A_L} = \frac{0,507 \text{ mV} \cdot \text{s}}{17,1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2} = 0,297 \text{ T}$$

$$\text{und damit} \quad C = 6,5 \cdot 10 \frac{\text{kA}}{\text{m}} \cdot 0,297 \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} = 19,27 \frac{\text{kW} \cdot \text{s}}{\text{m}^3}$$

Mit  $d = 4 \text{ cm}$  und  $l = 3,5 \text{ cm}$  erhält man als etwaige Leistung

$$P = C \cdot d^2 \cdot l \cdot n = 19,27 \frac{\text{kW} \cdot \text{s}}{\text{m}^3} \cdot (0,04 \text{ m})^2 \cdot 0,035 \text{ m} \cdot 20 \text{ s}^{-1} = 21,6 \text{ W}$$

## ■ 1.2 Der magnetische Kreis elektrischer Maschinen

### 1.2.1 Aufbau magnetischer Kreise

**Aktiver Eisenweg.** Das entsprechend dem Induktionsgesetz in der Form  $U_q = B \cdot l \cdot v$  und der Kraftwirkung nach  $F = B \cdot l \cdot I$  für die Funktion der elektrischen Maschine erforderliche Magnetfeld der Luftspaltflussdichte  $B$  wird bis auf den zwischen Ständer und Läufer nötigen Luftspalt in ferromagnetischem Blech geführt. Nur so lässt sich entsprechend der Grundbeziehung im magnetischen Feld

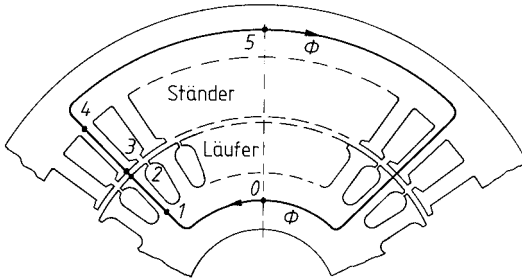
$$\boxed{B = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot H} \quad (1.10)$$

durch die hohe relative Permeabilität  $\mu_r \gg 1$  von Eisen die von der Magnetisierungswicklung aufzubringende magnetische Feldstärke  $H$  in vernünftigen Grenzen halten. Für den Luftspalt, der mit Weiten von teilweise unter 1 mm nur einen sehr kleinen Anteil des geschlossenen magnetischen Weges ausmacht, gilt bei  $\mu_r = 1$  die magnetische Feldkonstante

$$\boxed{\mu_0 = 0,4 \cdot \pi \cdot 10^{-6} \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A} \cdot \text{m}}} \quad (1.11)$$

Der Aufbau des magnetischen Kreises ist am Beispiel einer vierpoligen Drehstrom-Asynchronmaschine in Bild 1.6 für Ständer und Läufer gezeigt. Der magnetische Fluss  $\Phi$

schließt sich auf dem zur Achse 0-5 symmetrischen Weg über Läuferücken - Läuferzähne - Luftspalt - Ständerzähne - Ständerücken. In allen Abschnitten entstehen entsprechend den örtlichen Eisenquerschnitten  $A_{\text{Fe}}$  nach



**Bild 1.6** Magnetischer Kreis einer Drehstrom-Asynchronmaschine

$$B = \frac{\Phi}{A_{\text{Fe}}} \quad (1.12)$$

unterschiedliche magnetische Flussdichten oder Induktionen  $B$ , wobei etwa folgende Richtwerte gelten:

Luftspalt  $B_L = 0,6 \text{ T bis } 1,1 \text{ T}$

Zähne  $B_z = 1,5 \text{ T bis } 2,1 \text{ T}$

Rücken  $B_R = 1,2 \text{ T bis } 1,6 \text{ T}$

**Durchflutungsgesetz.** Zur Berechnung des magnetischen Kreises werden bei noch feinerer Unterteilung des Feldweges wie in Bild 1.6 die in den einzelnen Abschnitten auftretenden Flussdichten  $B_i$  bestimmt und dazu aus der Magnetisierungskennlinie  $B = f(H)$  die zugehörige magnetische Feldstärke  $H_i$  entnommen. Mit der jeweiligen Weglänge  $l_i$  in Feldrichtung erhält man dann die für diese Teilstrecke erforderliche magnetische Spannung

$$V_i = H_i \cdot l_i \quad (1.13)$$

Die Addition aller magnetischer Teilspannungen  $V_i$  über den geschlossenen Weg des Feldes  $\Phi$  ergibt die magnetische Umlaufspannung

$$V_0 = H_1 \cdot l_1 + H_2 \cdot l_2 + H \cdot l_3 + \dots = \sum_{i=1}^{i=n} H_i \cdot l_i = \Theta \quad (1.14 \text{ a})$$

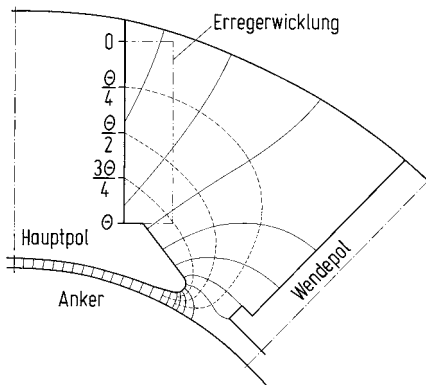
Diese Beziehung ist in der Form

$$\Theta = \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} \quad (1.14 \text{ b})$$

als Durchflutungsgesetz bekannt.

Die elektrische Durchflutung bestimmt bei einer Gleichstrommaschine das erforderliche Produkt Windungszahl mal Erregerstrom der Hauptpole. Bei Drehstrommaschinen ergibt sich aus der Durchflutung die Höhe des Magnetisierungsstromes in der Drehstromwicklung des Ständers.

**Bestimmung magnetischer Felder.** Zur bildlichen Beschreibung des magnetischen Feldes eignet sich die Vorstellung von Feldlinien, die an jeder Stelle die Richtung des Vektors  $\vec{B}$  festlegen. Die Darstellung wird zum Feldbild, wenn die Dichte der eingetragenen Feldlinien proportional zur örtlichen Flussdichte gewählt wird. Dies ist der Fall, sofern man eine Quadratstruktur zwischen den Feldlinien und den senkrecht dazu liegenden Niveaulinien realisiert. Letztere verbinden Punkte gleicher magnetischer Teilspannung  $V$ , wobei eine Eisenoberfläche mit  $V = 0$  belegt wird. Das Verfahren führt zu Ergebnissen wie in Bild 1.7 und hatte vor der Einführung der EDV eine große Bedeutung.

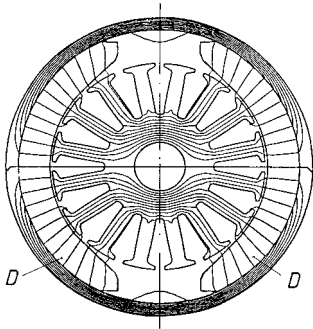


**Bild 1.7** Feldbild des Erregerfeldes einer vierpoligen Gleichstrommaschine  
– Feldlinien – – – Niveaulinien

**Numerische Feldberechnung.** Für die Bestimmung von örtlichen Flussdichten im magnetischen Kreis von Maschinen und Geräten verwendet man heute firmeneigene oder auch kommerzielle EDV-Rechenprogramme (PROFI, MAGGY). Sie berücksichtigen die Sättigungsabhängigkeit der magnetischen Daten aller Eisenteile und den Einfluss von Querschnittsänderungen z. B. durch Bohrungen, Nuten oder sonstige Verengungen.

Man überzieht die gegebene Konstruktion wie in der Technik der „Finiten Elemente“ mit einem feinmaschigen Netz, das umso dichter sein muss, je mehr sich die örtliche Flussdichte ändert. Für jedes Element sind die Permeabilität  $\mu = f(B)$  oder die Kennlinie  $B = f(H)$  des feldführenden Materials anzugeben. Mit Hilfe iterativer Rechenverfahren lässt sich dann über die Verknüpfung der Gleichungen des magnetischen Feldes die Flussdichte  $B$  in jedem Element bestimmen. Das Ergebnis kann man z. B. in Form einer geeichten Abstufung von Grautönen oder Farben unmittelbar in die Konstruktionszeichnung übertragen und erhält damit einen direkten optischen Eindruck der magnetischen Ausnutzung des Materials [4, 5].

Eine zweite Möglichkeit besteht darin, sich ein rechnergezeichnetes Feldlinienbild des gesamten magnetischen Kreises zu verschaffen. Bild 1.8 zeigt als Beispiel hierfür das Feldbild eines kleinen zweipoligen Gleichstrommotors mit 16 Ankernuten und Dauermagnet-erregung. Derartige Maschinen werden in der Kfz-Elektrik in großen Stückzahlen für Gebläse, Scheibenwischer usw. verwendet.



**Bild 1.8** Feldbild der Dauermagneten D eines zweipoligen Kleinmotors  
Ermittelt mit dem MAGGY-Programm  
(Valvo, Philips Bauelemente, Lit. 10)



**Beispiel 1.3:** Nach Bild 1.6 wird das Magnetfeld eines Motors bis auf den erforderlichen Luftspalt  $l_L$  zwischen Ständer und Läufer in Elektroblech geführt. Zwar sind die Flussdichten in den einzelnen Bereichen wie angegeben, unterschiedlich doch wird hier stark vereinfacht einheitlich angenommen:  $B_{Fe} = 1,5 \text{ T}$ ,  $l_{Fe} = 40 \text{ cm}$  und  $B_L = 0,8 \text{ T}$ , Luftspalt  $l_L = 0,4 \text{ mm}$

Aus einer Magnetisierungskennlinie ergibt sich  $B_{Fe} = f(H_{Fe}) \rightarrow H_{Fe} = 20 \text{ A/cm}$

Für einen Luftspalt gilt  $H_{Fe} = B_L / \mu_0 = 0,8 \text{ T} / (0,4 \pi \cdot 10^{-6} \text{ Vs/Am})$   $H_{Fe} = 6400 \text{ A/cm}$

Die Luftstrecke erfordert zum Transport des Magnetfeldes also etwa die 320-fache Feldstärke wie der Eisenweg. Mit obigen Daten erhält man weiter  $V_{Fe} = 800 \text{ A}$  und  $V_L = 510 \text{ A}$ . Obwohl die beiden Luftspalte mit  $0,8 \text{ mm}$  nur  $2\%$  des Eisenweges ausmachen, benötigt man fast einen gleichgroßen Durchflutungsanteil. Der Luftspalt wird daher bei Drehstrommotoren unter Berücksichtigung von Fertigungstoleranzen, Schwingungen und Geräuschen so gering wie möglich gehalten.

## 1.2.2 Elektrobleche und Eisenverluste

**Elektrobleche.** Der zur Aufnahme des Magnetfeldes einer Maschine erforderliche Eisenweg ist, von Gleichstrom-Kleinmotoren abgesehen, stets aus Elektroblechen geschichtet, die mit Nieten, Klammern oder einseitigem Schweißen zu einem so genannten Blechpaket gepresst werden. Handelt es sich wie bei Transformatoren oder Wechselstrommaschinen um ein zeitlich veränderliches Magnetfeld, so ist dieser Aufbau aus  $0,23 \text{ mm}$  bis  $0,6 \text{ mm}$  starken Blechen zur Reduzierung der Wirbelstromverluste zwingend. Das Material wird bereits am Ende des Walzprozesses durch eine dünne Silikatschicht oder wasserlösliche Lacke einseitig isoliert.

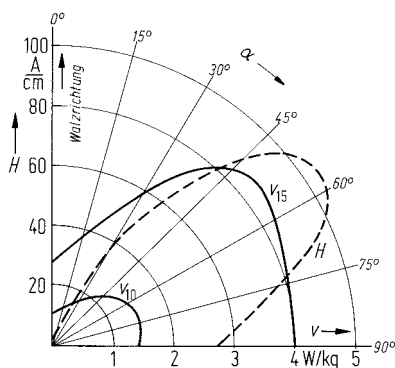
**Kaltgewalzte Bleche.** Drehstrommaschinen erhalten bis zu mittleren Leistungen ein aus einem Komplettschnitt geschichtetes Blechpaket. Das magnetische Feld wechselt dabei zwischen Rücken und Zähnen seine Richtung um  $90^\circ$ , so dass das verwendete Elektroblech keine magnetische Vorzugsrichtung haben darf. Man verwendet hier kaltgewalzte nicht kornorientierte Blechsorten häufig mit einer anschließenden Schlussglühung zum Abbau von Spannungen, die durch den Stanzvorgang entstehen. Das Gleiche gilt prinzipiell auch für Kleintransformatoren mit einem U- oder E-Schnitt, obwohl hier mitunter auch die nachstehend angesprochenen kornorientierten Qualitäten eingesetzt werden.

Zur Verringerung der elektrischen Leitfähigkeit und damit der Minderung von Wirbelstromverlusten erhält das Eisen einen bis zu ca. 4%igen Siliziumanteil. Von Nachteil ist dabei, dass mit höherem Si-Gehalt einmal die Sprödigkeit der Bleche zunimmt und vor allem aber die Magnetisierbarkeit – ausgedrückt durch die Polarisation  $J$  – abnimmt. Diese Größe bestimmt die allein durch das Eisen erzeugte Flussdichte ohne den Anteil des Luftspaltfeldes der Erregerspule nach der Beziehung  $J = B - \mu_0 \cdot H$ . Sie ist also ein Maß für die feldverstärkende Wirkung des Eisens.

Die Kennzeichnung der vielen verfügbaren Blechsorten erfolgt durch einen alphanumerischen Code, der die spezifischen Verluste  $v_{15}$  bei sinusförmiger Ummagnetisierung mit  $B = 1,5$  T und  $f = 50$  Hz sowie die Blechstärke  $d$  angibt. Als Beispiel sei die Sorte M250-50 A mit  $v_{15} = 2,5$  W/kg und  $d = 0,5$  mm genannt.

Vor allem für Serienmotoren kleinerer Leistung werden auch Bleche im nicht schlussgeglühten Zustand nach der Norm EN 10126 geliefert. Diese so genannten „semi-processed“ Sorten sind nicht siliziert und haben daher höhere Ummagnetisierungsverluste, aber dafür eine etwas höhere Polarisation. Semi-processed-Bleche werden erst als gestanzter Blechschnitt wärmebehandelt, wonach eine dünne Oxidschicht die Isolierung übernimmt.

**Kornorientierte Elektrobleche.** Für Eisenkerne von Leistungstransformatoren, in denen das Magnetfeld entlang der Blechstreifen geführt wird, verwendet man ausschließlich kornorientierte, schlussgeglühte Elektrobleche mit Stärken zwischen 0,23 mm bis 0,35 mm. Diese Bleche besitzen eine starke Abhängigkeit der Verlustwerte und der Polarisation von der Magnetisierungsrichtung. Erfolgt diese in Walzrichtung, so betragen die Ummagnetisierungsverluste nur etwa die Hälfte derjenigen bei richtungsunabhängigen Blechen. Ein weiterer Vorteil der kornorientierten Bleche ist der deutlich geringere Magnetisierungsbedarf wieder in Walzrichtung. Die erforderliche Durchflutung für eine bestimmte Flussdichte sinkt gegenüber nicht kornorientierten Blechen etwa um eine Größenordnung. Wie in Bild 1.9 zu erkennen ist, steigen die Verluste und der Magnetisierungsbedarf dagegen bei einer Quermagnetisierung auf ein Mehrfaches der günstigsten Werte an. Dies lässt sich aber durch die Gestaltung des Eisenkerns beim Transformatorrelativ einfach vermeiden [6, 7].



**Bild 1.9** Richtungsabhängigkeit der spezifischen Verluste  $v$  und der magnetischen Feldstärke  $H$  für  $B = 1,5$  T bei kornorientierten Elektroblechen  $\alpha$  Abweichung von der Walzrichtung

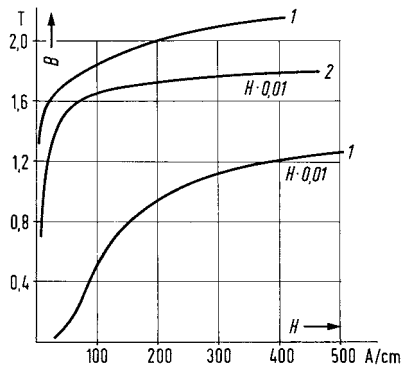
**Amorphe Elektrobleche.** Schon seit Jahren sind Elektrobleche aus Legierungen von im wesentlichen Eisen, Bor und Silizium bekannt, bei denen durch eine sehr rasche Abkühlung der Schmelze die Ausbildung der sonst üblichen geordneten Kristallstruktur ver-

hindert wird. Es entsteht vielmehr wie bei Glas ein Eisen mit zufälliger, d.h. amorpher Atomanordnung. Der erforderliche schnelle Wärmeentzug gestattet allerdings nur die Herstellung von sehr dünnen Bändern mit Dicken bis derzeit maximal 25  $\mu\text{m}$ .

Amorphe Elektrobleche besitzen eine sehr kleine Koerzitivfeldstärke, was wiederum geringe Ummagnetisierungsverluste bedeutet. Die sehr dünnen Wandstärken der Bänder und ein gegenüber kornorientierten Blechen etwa dreifacher spezifischer ohmscher Widerstand ergeben zudem deutlich kleinere Wirbelstromverluste.

Insgesamt haben Transformatoren mit amorphem Eisenkern damit Leerlaufverluste, die nur etwa ein Drittel der sonst üblichen Werte erreichen. Trotz der erforderlichen Ringkernanordnung der Bleche und einer wegen des Boranteils geringeren Sättigungsflussdichte von ca. 1.65 T – was zu größeren Querschnitten und damit mehr Masse führt – werden im Bemühen um Energieeinsparung inzwischen auch Leistungstransformatoren in Verteilernetzen aus amorphen Eisenkernen eingesetzt. Welche Möglichkeiten der Energieeinsparung sich dabei ergeben, wird in Abschnitt 3.1.3 behandelt.

**Magnetisierungskennlinie.** Alle ferromagnetischen Materialien zeigen eine starke Abhängigkeit der Permeabilität von der Flussdichte (Induktion)  $B$ . Für die praktische Berechnung magnetischer Kreise ist es jedoch zweckmäßiger, anstelle der Permeabilität gleich die Zuordnung  $B = f(H)$  in Form einer so genannten Magnetisierungskennlinie anzugeben (Bild 1.10). Mit Beginn der magnetischen Sättigung flachen die Kurven stark ab und streben dem linearen Endverlauf  $B = \mu_0 \cdot H$  zu. Die Kennlinien werden in den Katalogen der Blechhersteller nach Qualitäten geordnet angegeben.



**Bild 1.10** Gleichstrom-Magnetisierungskurven  
1 Elektroblech 0,5 mm, schlussgeglüht  
2 kornorientiertes Blech 0,35 mm

**Hystereseverluste.** Sie lassen sich vereinfacht als „Reibungswärme der Elementarmagnete“, welche die feldverstärkende Wirkung des Eisens bewirken, erklären. Durch eine Wechsellagerung der Frequenz  $f$  erfolgt eine periodische Umorientierung, die Energie benötigt. Es lässt sich zeigen, dass diese pro Zyklus der Fläche der Hystereseschleife des Materials proportional ist. Zwischen dem Flächeninhalt und der erreichten höchsten Flussdichte besteht je nach dem Sättigungsgrad und der Blechsorte die Abhängigkeit  $B^{1,6-2,4}$ . Für praktische Berechnungen setzt man näherungsweise eine quadratische Zuordnung und erhält für die Hystereseverluste pro Masseneinheit

$$\nu_{\text{H}} = c_{\text{H}} \cdot f \cdot B^2$$

(1.15)

**Wirbelstromverluste.** Ein Wechselfeld erzeugt in dem durchsetzten Eisen nach dem Induktionsgesetz Spannungen, die innerhalb jedes Bleches einen geschlossenen Stromkreis vorfinden. Auf Grund der relativ guten elektrischen Leitfähigkeit des Eisens entstehen damit über den Querschnitt verteilte Ströme. Die Stromwärme dieser Wirbelströme bezeichnet man als Wirbelstromverluste. Die Spannungen im Eisen ergeben sich zu

$$u \sim \frac{d\Phi}{dt} \sim f \cdot B$$

und die ohmschen Verluste mit

$$P_v \sim \frac{u^2}{r} \sim f^2 \cdot B^2$$

Damit erhält man für die Wirbelstromverluste pro Masseneinheit

$$\boxed{\nu_w = c_w \cdot f^2 \cdot B^2} \quad (1.16)$$

Durch die Blechung des Eisenquerschnitts werden die senkrecht zur Feldrichtung entstehenden Strombahnen auf den schmalen Bereich des Blechquerschnittes beschränkt, was die Verluste stark reduziert.

**Eisenverluste.** In der Praxis fasst man zur Kennzeichnung einer Blechqualität die spezifischen Wirbelstrom- und Hystereseverluste zu einer Gesamtverlustziffer  $\nu_{10}$  bzw.  $\nu_{15}$  zusammen. Bezugsbedingungen für diese Werte sind dabei eine sinusförmige Wechselmagnetisierung mit  $B = 1 \text{ T}$  bzw.  $1,5 \text{ T}$  bei einer Frequenz von  $50 \text{ Hz}$ . Die Bestimmung der Verlustziffer erfolgt messtechnisch an genormten Blechproben im so genannten Epsteinapparat.

Bei von den Bezugswerten abweichenden Betriebsgrößen  $B$  und  $f$  errechnet man die gesamten Eisenverluste der Masse  $m_{\text{Fe}}$  aus

$$\boxed{P_{\text{Fe}} = m_{\text{Fe}} \cdot \nu_{15} \cdot \left( \frac{B}{1,5 \text{ T}} \right)^2 \cdot k_f \cdot k_B} \quad (1.17)$$

Der Frequenzfaktor  $k_f$  berücksichtigt mit der Näherung  $k_f = (f/50 \text{ Hz})^{1,6}$  die unterschiedliche Abhängigkeit der Verlustanteile von der Frequenz. Ein Bearbeitungszuschlag  $k_B \approx 1,3$  erfasst die Wirkung des Stanzens und anderer Einflüsse.

### 1.2.3 Spannungen und Kräfte im Magnetfeld

**Induktionsgesetz.** Das von dem Engländer Michael Faraday 1831 entdeckte Gesetz über die Wirkung zeitlich veränderlicher magnetischer Felder wird bei elektrischen Maschinen mit nachstehender Übersicht in verschiedenen Beziehungen genutzt:



# Index

## A

Alleinbetrieb 326, 375  
AlNiCo-Magnete 30  
amorphe Bleche 24  
Anker 45  
Ankerdurchflutung 59  
Ankerquerfeld 59  
Ankerrückwirkung 56, 59, 83, 366, 370  
Ankerspannung 61  
Ankerstellbereich 90  
Ankerstrombelag 58  
Ankerstrom-Formfaktor 108  
Ankerumschaltung 100  
Ankervorwiderstände 89  
Ankerwicklung 45  
Ankerwirkungsgrad 89  
Anlassen von Schleifringläufermotoren 280  
Anlasswiderstände 94  
Anlauf 93  
Anlaufkondensatormotor 345  
Anschlussbezeichnungen 77  
Antriebsstrang 447  
Anziehungskräfte 424  
Anzugsmoment 343  
Arbeitspunkt 32  
asynchrone Oberfeldmomente 252  
asynchroner Anlauf 402  
asynchrones Drehmoment 219  
Asynchrongeneratoren 326  
Asynchronmaschinen 217  
Asynchronmaschinen, Betriebsbereiche 250  
Asynchronmaschinen, einphasige 338

Asynchronmaschinen, Stromrichterbetrieb 299  
Ausgleichsverbindungen 50  
Ausgleichswelle 329  
Ausgleichswicklung 163  
Aussetzbetrieb 485

## B

Barkhausen-Schaltung 120  
Bauformen 12, 471  
Baugrößen 12, 471  
Bauteile Gleichstrommaschine 42  
Bearbeitungszuschlag 26  
Belastung des Transformators 149  
Belastungskurve 251  
Bemessungswerte 487  
Berührungsschutz 472  
Betriebsart 12  
Betriebsbedingungen 482  
Betriebsdiagramme 90, 273, 387  
Betriebskondensatormotor 344  
Bewegungsspannung 26, 62, 71  
Bezugspfeile 13  
Blindlaststeuerung 387  
Blindleistung 15  
Blockstrom 422  
Bohrungsdurchmesser 183  
Boostbetrieb 451  
Bremsschaltungen des Asynchronmotors 286  
Bruchlochwicklungen 186, 192  
Bürstenfeuer 69, 123  
bürstenlose Erregung 362  
Bürstenverschiebung 77, 122

**C**

Carter-Faktor 57  
 CE-Kennzeichnung 468  
 cW-Wert 460

**D**

Dahlander-Schaltung 267  
 Dauerbetrieb 484  
 Dauerkurzschluss 153, 378  
 Dauermagneten 29  
 Dauermagneterregung 52, 364  
 Dauermagnetmotor 402  
 direkte H<sub>2</sub>-Kühlung 418  
 direkter Anlauf 299  
 direkter Parallelbetrieb 165  
 Direktumrichter 404  
 Doppelkäfigläufer 321  
 Doppelkondensatormotor 344  
 Doppelschlussmotoren 85  
 Doppelstab-Käfigläufer 219  
 doppeltgespeiste Schleifringläufermotoren 330  
 Drehfelder 196, 200  
 Drehfeld-Erregerkurve 196  
 Drehfeld-Raumdiagramm 224  
 Drehmoment 18, 28, 40, 64, 86, 207, 209, 219, 231, 390, 398  
 Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie 81, 118  
 Drehmoment-Frequenz-Diagramm 444  
 Drehmomentgleichung 232  
 Drehmomentmaßstab 245  
 Drehregler 225  
 Drehstrom-Asynchronmaschinen, Steuerung 261  
 Drehstrombank 126, 176  
 Drehstromkerne 128  
 Drehstrommaschinen 182  
 Drehstromsteller 300  
 Drehstromtransformator 125, 159  
 Drehstromwicklungen 182  
 Drehtransformatoren 225  
 Drehzahländerung 83, 88, 120, 261  
 drehzahlgeregelte Antriebe 402  
 Drehzahlkennlinie 120  
 Drehzahlstabilität 82

Dreiphasensystem 210  
 Dreischenkelkern 128  
 Drosselspulen 172, 176  
 Durchflutungsgesetz 21  
 Durchflutungsgleichgewicht 150, 160  
 Durchgangsleistung 172  
 Durchmesserwicklung 46, 184  
 dynamische Antriebsaufgabe 462  
 dynamischer Fahrbetrieb 462  
 dynamisches System 457  
 dynamisches Verhalten 96

**E**

Eckdrehzahl 449  
 ec-Motoren 54  
 Eigenkühlung 483  
 Einphasen-Kerntransformator 128  
 Einphasen-Manteltransformator 128  
 Einphasenmotoren 338  
 Einphasen-Synchronmaschine 420  
 Einphasentransformatoren 139  
 Einschaltströme 297  
 Einschaltstromstoß 147  
 Einschichtwicklungen 183  
 einsträngige Belastung 161  
 Einzelverluste 477  
 Eisenkerne 126  
 Eisen- und Zusatzverlust 279  
 Eisenverluste 23, 26, 229  
 Eisenweg 20  
 elektrische Ausgleichswelle 329  
 Elektrobleche 23  
 Elektrofahrzeug 445  
 Elektromobilität 445  
 elektronischer Anlasser 283  
 elektronische Transformatoren 178  
 EMV 468  
 Energiebedarf 450  
 Energierückgewinnung 453, 458  
 Energiespeicher 446  
 Energiewandlung 13  
 Entmagnetisierung 33  
 Entmagnetisierungsfaktor 31  
 Entmagnetisierungskurve 29  
 Erregerfeld 56, 369  
 Erregerleistung 361

Erregerstrom 379  
 Erregersysteme 361  
 Erregerwicklung 77, 78, 83  
 Ersatzschaltbild 116, 228  
 Ersatzschaltung 139, 374, 375  
 Erwärmung 478  
 Europeanorm 468  
 explosionsgeschützte Ausführungen 474

**F**

Fahranforderung 452  
 Fahrmotor 87  
 Fahrzeugdynamik 462  
 Feldbild 22  
 Felderregerkurve 193  
 Feldkräfte 28  
 Feldkurve 369  
 Feldlinien 22  
 Feldschwächbereich 274, 277  
 Feldschwächung 120  
 Feldstellbereich 90  
 Feldumkehr 101  
 Fernübertragung 125  
 Ferrite 30  
 Ferritkern 36  
 fiktive Zusatzmasse 463  
 Flüssigkeitskühlung 419  
 Flywheel 451  
 Fourieranalyse 179  
 Fremderregung 83  
 Fremdkörperschutz 473  
 Fremdkühlung 483  
 Frequenzfaktor 26  
 Frequenzumformer 221  
 frequenzvariable Spannung 269  
 Fünfschenkelkern 129  
 Funkstörung 115

**G**

galvanische Trennung 178  
 Ganzlochwicklung 186, 188  
 Gasexplosionsschutz 474  
 Gegenfeld 201  
 Gegenstrombremsung 289  
 Gegensystem 211

Geräusche 318  
 Geräuschquelle 158  
 geschaltete Reluktanzmaschine (SRM) 456  
 Gießharzisolierung 138  
 Gleichpol-Bauweise 441  
 Gleichstrombremsung 286  
 Gleichstrom-Erregermaschine 361  
 Gleichstrommaschinen 39, 77, 79  
 Gleichstromsteller 103  
 Gliederung elektrischer Maschinen 16  
 Görges'sches Phänomen 293  
 Grundswingungsgehalt 13  
 Gruppenfaktor 187  
 GTO-Thyristoren 104

**H**

Hangabtriebskraft 460  
 hartmagnetische Werkstoffe 29  
 Hauptpol 42, 57, 353  
 Hauptreaktanz 205  
 HF-Litze 179  
 Hilfsreihenschlusswicklung 75, 85  
 Hochlaufmoment 297  
 Hysteresemotor 438  
 Hystereseschleife 25, 29  
 Hystereseverluste 25

**I**

IEC-Normen 468  
 Induktionsgesetz 26  
 innere Leistung 64  
 inneres Moment 232  
 Isolation 129  
 Isolationsschäden 318

**K**

Käfigläufer 219  
 Kapp'sches Dreieck 150  
 Kennlinie 79  
 Kennzahl 159  
 Kernaufbau 127  
 kinematische Grundgleichungen 458  
 Kippunkte 234

Kleinmaschinen 434  
Kleintransformatoren 171  
Kloß'sche Gleichung 234  
Kohlebürsten 40  
Kollektor 40  
Kommutator 40  
Kommutierung 67, 121  
Kommutierungszeit 67  
Kompensationswicklung 72, 74  
Kompoundierung 363  
Kompoundwicklung 75, 85  
Kondensatorhilfswicklung 340  
Konstantspannungsgenerator 363  
Konstruktionsprinzipien 15  
kornorientierte Elektrobleche 24  
Kräfte 428  
Kraftwirkung 27  
Kreisdiagramm 238  
Kühlarten 483  
Kühlsysteme 420  
Kühlung 130  
Kühlungsarten 137  
Kurzschlussspannung 154  
Kurzschlussstrom 173  
Kurzstator-Linearmotor 325  
Kurzstatormotor 325  
Kurzzeitbetrieb 484  
Kusa-Schaltung 286

**L**

Ladeinfrastruktur 446  
Lademanagementsystem 451  
Lamellenspannung 62  
Langstator-Linearmotor 325, 426  
Langstatormotor 325  
Lärmbekämpfung 158  
Lastverteilung 165  
Läufer 218, 363  
Läuferrückspeisung 305  
Läuferspannung 220  
Läuferstrang, Ausfall 293  
Läufervorwiderstände 262  
Leerlauf 144  
Leerlaufdaten 145  
Leerlaufdrehzahl 83  
Leerlaufkennlinie 79

Leerlauf-Kurzschluss-Verhältnis 381  
Leerlaufversuch 246  
Leichtbauweise 457  
Leistungsbereich 39, 126, 217  
Leistungsbilanz 230  
Leistungsdiagramm 391  
Leistungsdichte 450, 454  
Leistungsfaktor 13  
Leistungsmaßstab 245  
Leistungsminderung 110  
Leistungsschild 12, 486  
Leistungsschildangaben 483  
Leistungsübertrager 36, 38, 178  
Leistungsverhältnis 166  
Li-Ion 449  
linearer Positionierantrieb 423  
Linearmotoren 322  
Luftkühlung 418  
Luftwiderstand 460

**M**

magnetische Feldkonstante 20  
magnetischer Kreis 20, 30  
Magnetisierungsdurchflutung 223  
Magnetisierungskennlinie 25  
Magnetisierungsstrom 146  
Magnetostriktion 158  
Magnetschwebebahn 426  
Maschinentransformatoren 126  
Maschinenumformer 221  
Mehrquadrantenbetrieb 98  
Messwandler 171  
Mitfeld 201  
Mitsystem 211  
Modellmaschine 412  
Motorauswahl 476  
Motorbetrieb 250  
Muschelkurven 453

**N**

Nebenschlussverhalten 83  
NEFZ-Verfahren 450  
Netzbetrieb 385  
Netztransformatoren 126  
neutrale Zone 60

nicht-sinusförmige Spannungen 178  
 Normung 467  
 Nullsystem 211  
 numerische Feldberechnung 22  
 Nutschrägung 257  
 Nutstreuung 206  
 Nutungsharmonische 191, 258  
 Nutzbremmung 94  
 Nutzwiderstand 229

**O**

Oberfelder 204  
 Oberschwingungen 105  
 Oberwellendrehfelder 252  
 Oberwellenstreuung 206  
 Ortskurve 238

**P**

Parallelbetrieb 165  
 Parallelhybrid 447  
 Park'sche Transformation 409  
 Pendelmomente 112, 318  
 Pendelungen 406  
 Phasenschieberbetrieb 387  
 Phasenvervielfacher 170  
 Plug-In-Hybrid 446  
 Polbedeckungsfaktor 57  
 Polteilung 41  
 Polumschaltung 267  
 Positionierantriebe 424  
 Potier-Dreieck 379  
 Pulsbetrieb 103

**Q**

quasistationäre Antriebsaufgabe 463  
 Querspannung 71

**R**

Radnabenmaschine 449  
 Raumzeiger 315  
 Reaktanzspannung 68  
 Reaktionsmoment 399  
 Regelung, feldorientierte 315

Reibkraft 459  
 Reihenschlussmotor 86, 91  
 Rekuperation 446, 453  
 relative Kurzschlussspannung 154  
 Reluktanzmotor 434  
 Reluktanzschrittmotor 442  
 Remanenzspannung 79  
 Ringmotor 447  
 Roebel-Stab 357  
 Rundfeuer 63  
 Rüttelkräfte 259

**S**

Sättigungsfaktor 31  
 Sättigungsverhalten 38  
 Schaltbilder 77, 78  
 Schaltgruppen 159  
 Schaltgruppen, Auswahl 164  
 Schaltungsvarianten 178  
 Schaltverschiebung 122  
 Schaltzeichen 159  
 Scheibenläufermotor 54  
 Scheibenwicklung 129  
 Schenkelpolgenerator 359  
 Schenkelpolmaschine 357, 393  
 Schergerade 32  
 Schiefast 408  
 Schleifenwicklung 47, 49  
 Schleifringläufer 218  
 Schleifringläufermotor 330  
 Schlupferhöhung 262  
 Schlupfgerade 243  
 Schrägschnitt 127  
 Schrittarten 442  
 Schrittmotor 440  
 Schubkraft 323  
 Schubkräfte 323, 424  
 Schutzarten 12, 471  
 Sechspuls-Brückenschaltung 99  
 Sehnenwicklung 46  
 Sehnungsfaktor 188  
 selbsterregte Asynchrongeneratoren 326  
 selbsterregte, komprimierte Synchron-  
 generatoren 363  
 Selbsterregung 80  
 Selbstinduktionsspannung 26

Selbstkühlung 483  
Seltene Erden 30  
SE-Magnete 34  
Semi-processed-Bleche 24  
Seriell-Hybridkonzept 447, 449  
Sicherheits- und Komfortfunktionen 458  
Skin- und Proximity-Effekt 179  
Sondertransformatoren 169  
Spaltpol 353  
Spaltpolmotoren 353  
Spannungsabsenkung 266  
Spannungsänderung 151  
Spannungsformel 144  
Spannungsgleichung 139, 227  
Spannungshaltung 327  
Spannungspulsdauer 179  
Spannungswandler 172  
Spartransformator 172  
Speicherkapazität 450  
Spulenweite 46  
Ständer 42, 218  
Ständerlängsdurchflutung 393  
Ständerquerdurchflutung 393  
Ständerstrom 414  
stationärer Fahrbetrieb 459  
Stator-Mantelkühlung 452  
Steinmetzformel 37  
Steinmetz-Schaltung 349  
Stelltransformator 176  
Stern-Dreieck-Anlauf 285, 299  
Stern-Dreieck-Schaltung 284  
Sternpunktverlagerung 163  
Steuerkennlinie 272  
Stirnstreuung 206  
Stoßkurzschluss 156, 413  
Stoßkurzschlussstrom 415  
Strangfeld 196  
Streureaktanzen 142, 206  
Streuziffer 30, 233  
Strombelag 195  
Stromdiagramm 371  
Stromgleichung 394  
Strommaßstab 245  
Stromortskurve 118, 238, 270, 388, 396  
Stromrichterbetrieb 97, 105, 401  
Stromrichtererrregung 361  
Stromrichterkaskade, USK 305

Stromrichtermotor 402  
Stromrichterschaltungen 99  
Stromverdrängung 319  
Stromverdrängungsläufer 320  
Stromwandler 171  
Stromwelligkeit 106  
Stromwender 40, 45  
Stromwendespannung 68, 121, 122  
Stromwendung 67  
Stufenschalter 169  
symmetrische Komponenten 210  
synchrone Oberfeldmomente 254  
Synchronisation 401  
synchronisierendes Moment 405  
Synchronmaschine 356, 367, 375, 385  
Synchronmaschine, Reaktanzen 414  
Synchronreaktanz 374

## T

Taktfrequenz 105  
Tempeltyp 128  
Temperatureinfluss 36  
Toleranzen 487  
Transformationesspannung 26, 121, 123  
Transformator 125  
Transformatorgeräusche 158  
Transistorsteller 104  
TRANSRAPID 426  
Transversalflussmotor 429  
Trapezumrichter 405  
Triacsteuerung 121  
Trockentransformator 138  
Trommelwicklung 45  
Turbogeneratoren 358, 418  
Typenleistung 173

## U

Übersetzungsverhältnisse 228  
Umkehrstromrichter 101  
Universalmotor 115, 116  
unsymmetrische Betriebszustände 290  
untersynchrone Stromrichterkaskade 305

**V**

vereinfachtes Ersatzschaltbild 150  
Verlustaufteilung 244  
Verluste 317, 477  
Verschiebungsfaktor 13  
V-Kurven 389  
Vollpolmaschine 357, 369

**W**

Wachstumsgesetze 130  
Wandertransformatoren 126  
Wärmeklasse 479, 481  
Wärmequellennetz 479  
Wasserschutz 473  
Wasserstoff-Kühlung 418  
Wechselpol-Bauweise 441  
Wellblechkessel 138  
Wellenwicklung 48, 49  
Wendefeldspannung 71, 121  
Wendepole 42, 72  
Wicklung 129  
Wicklungsarten 47  
Wicklungsfaktor 186, 189  
Wicklungsstrang 193

Widerstandsbremmung 94  
Widerstandshilfswicklung 346  
Widerstandsstufen des Anlassers 281  
Wiedereinschalten 299  
Wirbelstromverluste 26  
Wirkungsgrad 14, 131, 477  
Wirkungsgradkurve 131  
WLTP/WLTC-Verfahren 450

**Z**

Zahnspulenwicklungen 367  
Zeigerdiagramm 229, 374  
Zickzackschaltung 159  
Zonenfaktor 187  
Zündschutzart 475  
Zusatzeisenverluste 257  
Zweiachsendarstellung 408  
Zweiphasenmotor 340  
Zweiphasensystem 214  
Zweipuls-Brückenschaltung 99  
Zweischichtwicklungen 185  
zweisträngige Belastung 161  
zweisträngiger Schrittmotor 442  
Zylinderwicklung 129