

**CARL HANSER VERLAG**

Rolf Fischer

**Elektrische Maschinen**

3-446-22693-1

[www.hanser.de](http://www.hanser.de)

# 1 Allgemeine Grundlagen elektrischer Maschinen

Elektrische Maschinen werden jeweils in verschiedenen Bauarten für Gleich-, Wechsel- und Drehstrom hergestellt. Die Auslegung und die äußere Gestaltung unterliegen einer Vielzahl von Normen und Vorschriften. Zu beidem soll nachstehend ein Überblick gegeben werden.

Entscheidendes Bauprinzip einer elektrischen Maschine ist der Aufbau eines optimalen magnetischen Kreises. Den hier gültigen Grundsätzen und Beziehungen sowie den Daten von Elektroblechen und Dauermagneten als Werkstoffe gilt der zweite Teil dieses einleitenden Kapitels.

## 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.

Nach der Statistik des Zentralverbandes der Deutschen Elektroindustrie ZVEI betrug der Umsatz mit elektrischer Antriebstechnik im Jahr 2001 ca. 6,5 Milliarden Euro. Vom kleinsten Schrittmotor in einer Quarzuhr mit einer Leistung von ca.  $10 \mu\text{W}$  bis zu den größten Drehstromgeneratoren in Kernkraftwerken von über 1000 MW existiert eine geschlossene Leistungslinie von etwa 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 und 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/a über autarke, transportable Stromversorgungsanlagen (Notstromaggregate) ab einigen kVA, über Generatoren für Windrotoren, Blockheizkraftwerke und Staustufen in Flüssen bis in den MVA-Bereich bis 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 Europannormen EN und werden in Kapitel 8 zumindest in den Grundzügen aufgeführt. In Bild 1.1 sind die wichtigsten Vorgaben im Bezug zur Maschine dargestellt.

**Baugröße.** Zur Vereinheitlichung von Anbaumaßen und damit einer allgemeinen Austauschbarkeit werden vor allem die Industrieantriebe der Serienfertigung nur in abge-

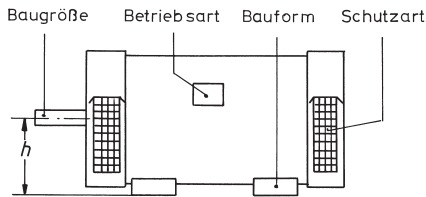


Bild 1.1 Vorgaben im Elektromaschinenbau

stufen 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 S6 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.

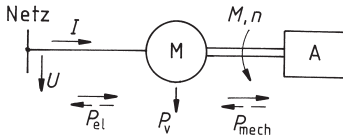


Bild 1.2 Elektrische Maschine M als Energiewandler  
A Arbeitsmaschine/Antrieb — Motor - - - Generator

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 Grundschwingungsgehalt  $g_1$  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

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (1.5)$$

bezeichnet. Im Motorbetrieb ist  $P_1 = P_{\text{el}}$  und  $P_2 = P_{\text{mech}}$  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 Transfor-

motors 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 %.

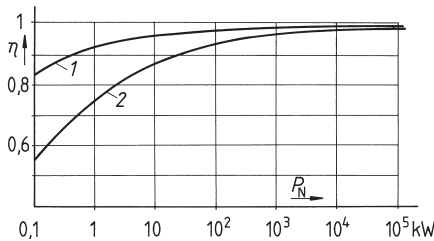


Bild 1.3 Wirkungsgrade rotierender und statischer Energiewandler  
 1 Stromrichter, Transformatoren  
 2 Rotierende elektrische Maschinen

**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 Verbraucherpfilsystem 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.

Art und Richtung der elektrischen Energie sind damit durch die Lage des Stromzeigers  $I$  in Bezug zur Spannung  $U$  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  $j$ -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.

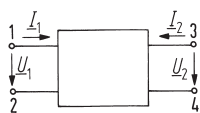


Bild 1.4 Anwendung des Verbraucher-Pfeilsystems auf einen Vierpol

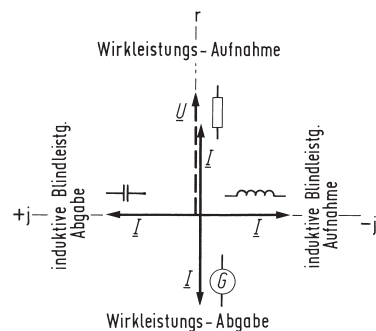
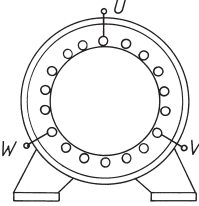
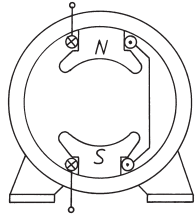


Bild 1.5 Festlegung der Belastungsart im Koordinatensystem für das Verbraucherpfilsystem

### 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 Tafel 1.1 angegeben und führen in ihrer Kombination zu den aufgeführten Hauptmaschinentypen.

Tafel 1.1 Konstruktionsprinzipien elektrischer Maschinen

Läufer mit Ständer mit	Käfigwicklung	Drehstromwicklung mit Schleifringen	Einzelpole (auch Dauermagnete)	Stromwenderwicklung
Drehstromwicklung 	Asynchron-Käfigläufer-Motor	Asynchron-Schleifringläufer-Motor	Innenpol-Synchronmaschine	Drehstrom-Kommutator-Maschine
Einzelpole 	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: Tafel 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 Tafel 1.2 angegebenen Anwendungsbereiche und Leistungen sind dabei nur als Schwerpunkte zu verstehen.

Tafel 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
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			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 kW bis 1000 MW
		Vollpolmaschine	Verdichter-, Mühlenantrieb, Turbogenerator im Kraftwerk	100 kW bis 1500 MW	
Impulsstrom			Elektronikmotor	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  $F$  auf die insgesamt  $z$  stromdurchflossenen Leiter des Läufers mit dem Durchmesser  $d$  berechnet werden. In Verbindung mit Gl. (1.19) ergibt dies die Beziehung

$$M = k_M \cdot d \cdot z \cdot B \cdot l \cdot I$$

wobei für die Konstante  $k_M \leq 0,5$  gilt. Bezieht man den Gesamtstrom  $z \cdot I$  aller Leiter 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 der möglichen Nuttiefe 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

$$M = \pi \cdot k_M \cdot A \cdot B \cdot d^2 \cdot l \quad (1.6)$$

Das Produkt  $d^2 \cdot l$  bestimmt das so genannte Bohrungsvolumen der Maschine und proportional auch ihr Gesamtvolumen und somit letztlich die Baugröße. Damit entstehen die folgenden grundsätzlichen Aussagen:

1. Die Baugröße einer elektrischen Maschine wird bei vorgegebenem Produkt  $A \cdot B$  allein durch das von ihr geforderte Drehmoment bestimmt.
2. Die einer Baugröße zugeordnete Leistung steigt proportional mit der Drehzahl.

Maschinen für eine bestimmte Leistung werden also mit höherer Drehzahl kleiner und leichter. Bei den tragbaren Elektrowerkzeugen hat dies zu Antrieben mit Betriebsdrehzahlen bis ca.  $20\,000 \text{ min}^{-1}$  geführt.

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

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

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

$$C = 2\pi^2 \cdot k_M \cdot A \cdot B \quad (1.7)$$

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 und liegt im Bereich  $1 \text{ kW} \cdot \text{min/m}^3$  bis  $10 \text{ kW} \cdot \text{min/m}^3$  bei wassergekühlten Maschinen.



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  $C = 2,2 \text{ kW} \cdot \text{min}/\text{m}^3$  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

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

Wegen  $l = 2 d$  gilt

$$2 d^3 = 3,455 \cdot 10^3 \text{ cm}^3$$

$$d = 12 \text{ cm} \text{ und } l = 24 \text{ cm}$$

**Beispiel 1.2:** Bei Gleichstrommaschinen erhält man als Ausnutzungskennziffer etwa  $C = 6,5 \cdot (A \cdot B)$ . Welche Leistung erreicht der in Beispiel 1.3 auf Seite 21 angegebene kleine Dauermagnetmotor bei  $n = 1200 \text{ min}^{-1}$ , wenn ein Strombelag von  $A = 100 \text{ A/cm}$  zulässig ist?

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

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

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

$$P = C \cdot d^2 \cdot l \cdot n$$

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

## 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

$$\boxed{B = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot H} \quad (1.9)$$

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  $1 \text{ mm}$  nur einen sehr kleinen Anteil des geschlossenen magnetischen Weges ausmacht, gilt bei  $\mu_r = 1$  die magnetische

Feldkonstante

$$\mu_0 = 0,4 \cdot \pi \cdot 10^{-6} \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A} \cdot \text{m}} \quad (1.10)$$

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

$$B = \frac{\Phi}{A_{\text{Fe}}} \quad (1.11)$$

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

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

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

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

**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

$$V_i = H_i \cdot l_i \quad (1.12)$$

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

$$V_0 = H_1 \cdot l_1 + H_2 \cdot l_2 + H \cdot l_3 + \dots = \sum_{i=1}^{i=n} H_i \cdot l_i = \Theta \quad (1.13)$$

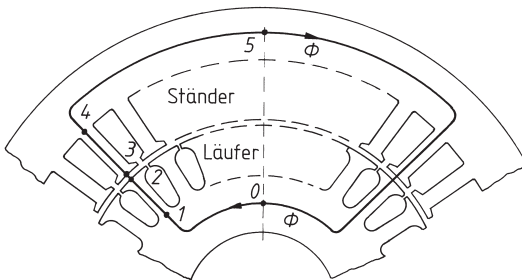


Bild 1.6 Magnetischer Kreis einer Drehstrom-Asynchronmaschine

Diese Beziehung ist in der Form

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

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.

**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

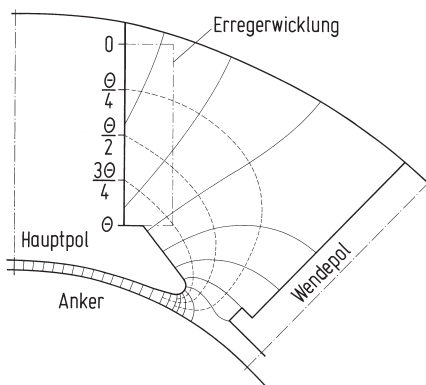


Bild 1.7 Feldbild des Erregerfeldes einer vierpoligen Gleichstrommaschine  
— Feldlinien - - - Niveaulinien

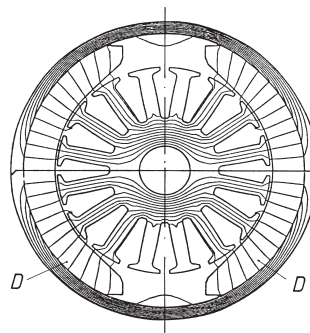


Bild 1.8 Feldbild der Dauermagneten D eines zweipoligen Kleinmotors  
Ermittelt mit dem MAGGY-Programm  
(Valvo, Philips Bauelemente, Lit. 10)