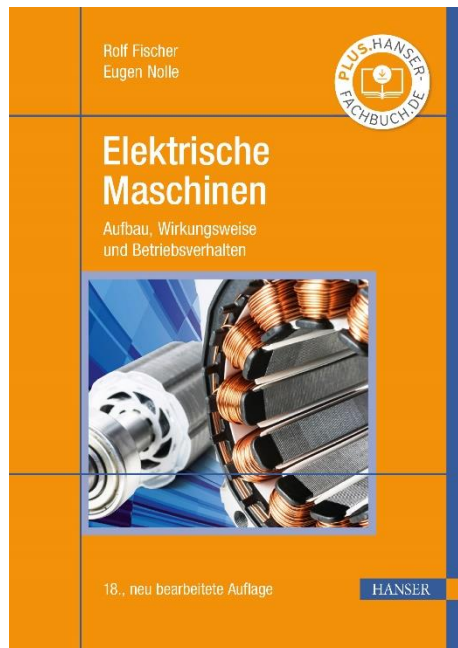


# HANSER



## Leseprobe

zu

## Elektrische Maschinen

von Rolf Fischer und Eugen Nolle

Print-ISBN: 978-3-446-46912-9

E-Book-ISBN: 978-3-446-46938-9

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446469129>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

# 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. Drehstrom-Kommutatormaschinen, die keine Bedeutung mehr besitzen, wird verzichtet. Dagegen erhalten die Kleinmaschinen der verschiedenen Bauarten, die wie z. B. Universal- und ec-Motoren 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 und Eugen Nolle*

## ■ Vorwort zur 18. Auflage

In dieser Auflage werden mit

### **Rolf Fischer und Eugen Nolle**

zwei Verfasser benannt. Damit deutet sich eine altersbedingte sukzessive Nachfolge der künftigen Pflege des im Jahr 1971 erstmals im Hanser Verlag erschienen Fachbuches an. Prof. em. Dr.-Ing. Eugen Nolle ist als mein Amtsnachfolger an der Hochschule Esslingen ein ausgezeichnete Fachmann im Bereich der Elektrischen Antriebstechnik mit großer Erfahrung in Lehre und Forschung und damit ein Garant für eine erfolgreiche Fortentwicklung der *Elektrischen Maschinen*.

Dank des stetigen, erfreulichen Interesses an diesem Fachbuch erscheint jetzt eine weitere Auflage. Es bleibt dabei das Bestreben, stets neue Techniken, den Stand der Normung und aktuelle Fragenstellungen aufzunehmen. Für die 18. Auflage wurden neben technischen Korrekturen folgende Neuerungen vorgenommen:

- **Abschnitt 1.2.5: Weichmagnetische Ferrite**  
Neben Elektroblechen und Dauermagneten wird ein heute wichtiger dritter Elektromagnetstoff vorgestellt.
- **Abschnitte 2.1.4 und 2.5: ec-Motoren und Universalmotoren**  
Beide Maschinenarten beherrschen mit großen Stückzahlen die Technik der Elektrowerkzeuge. Die Behandlung von Universalmotoren wurde als ebenfalls Stromwendertyp den Gleichstrommaschinen zugeordnet und damit Abschnitt 7 für die E-Mobilität freige-macht.
- **Abschnitt 3.4.4: Leistungsübertrager mit Ferritkernen**  
Dieser Abschnitt behandelt eine wichtige Anwendung der weichmagnetischen Ferrite.
- **Abschnitt 6.4.4: Synchroner Linearmotoren**  
In diesem Abschnitt werden die bislang räumlich getrennt dargestellten Beiträge (in 6.4.3 und 6.4.4) die aber thematisch zusammengehören, erfasst. Neu wird die von der Firma Thyssen-Krupp entwickelte seillose Aufzugstechnik mit einem eisenlosen Langstator-Linearmotor vorgestellt.
- **Kapitel 7: Antriebe für die Elektromobilität**  
Der Antrieb durch eine elektrische Maschine ist der zentrale Baustein zwischen den Komponenten Batterie, Leistungselektronik und der Antriebswelle des Motors. Die konträren Forderungen nach möglichst geringer Batteriemasse und hoher Reichweite des Fahrzeugs verlangen eine optimale Auslegung aller Bausteine des Antriebssystems.

Die Verfasser hoffen, dass auch diese 18. 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.

Die *Elektrischen Maschinen* sind inzwischen aus Leipzig an ihren „Geburtsort“, den Carl Hanser Verlag in München, zurückgekehrt und werden wie in den ersten Jahren dort wieder bestens betreut. Diesmal gilt unser Dank dem Lektorat mit Herrn Frank Katzenmayer und Frau Christina Kubiak.

# 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
1.2.5	Weichmagnetische Ferrite .....	36
<b>2</b>	<b>Gleichstrommaschinen</b> .....	<b>39</b>
2.1	Aufbau und Bauteile .....	40
2.1.1	Prinzipieller Aufbau .....	40
2.1.2	Bauteile einer Gleichstrommaschine .....	42
2.1.3	Ankerwicklungen .....	45
2.1.4	Dauermagneterregte Kleinmaschinen und ec-Motoren .....	52
2.2	Luftspaltfelder und Betriebsverhalten .....	56
2.2.1	Erregerfeld und Ankerrückwirkung .....	56
2.2.2	Spannungserzeugung und Drehmoment .....	61
2.2.3	Stromwendung .....	67
2.2.4	Wendepole und Kompensationswicklung .....	72
2.3	Kennlinien und Steuerung von Gleichstrommaschinen .....	77
2.3.1	Anschlussbezeichnungen und Schaltbilder .....	77
2.3.2	Kennlinien von Gleichstrommaschinen .....	79
2.3.3	Verfahren zur Drehzahländerung .....	88
2.3.4	Dynamisches Verhalten von Gleichstrommaschinen .....	96
2.4	Stromrichterbetrieb der Gleichstrommaschine .....	97
2.4.1	Netzgeführte Stromrichterantriebe .....	98
2.4.2	Antriebe mit Gleichstromsteller .....	103
2.4.3	Probleme der Stromrichterspeisung .....	105
2.5	Universalmotoren .....	115
2.5.1	Aufbau und Einsatz .....	115
2.5.2	Ersatzschaltung und Zeigerdiagramm .....	116

---

2.5.3	Verfahren der Drehzahländerung .....	120
2.5.4	Kommutierung .....	121
<b>3</b>	<b>Transformatoren .....</b>	<b>125</b>
3.1	Aufbau und Bauformen .....	126
3.1.1	Eisenkerne von Einphasen- und Drehstromtransformatoren .....	126
3.1.2	Wicklungen .....	129
3.1.3	Wachstumsgesetze und Kühlung .....	130
3.2	Betriebsverhalten von Einphasentransformatoren .....	139
3.2.1	Spannungsgleichungen und Ersatzschaltung .....	139
3.2.2	Leerlauf und Magnetisierung .....	144
3.2.3	Verhalten bei Belastung .....	149
3.2.4	Kurzschluss des Transformators .....	153
3.2.5	Transformatorgeräusche .....	158
3.3	Betriebsverhalten von Drehstromtransformatoren .....	159
3.3.1	Schaltzeichen und Schaltgruppen .....	159
3.3.2	Schaltgruppen bei unsymmetrischer Belastung .....	160
3.3.3	Direkter Parallelbetrieb .....	165
3.3.4	Regelbare Ortsnetztransformatoren (RONT) .....	168
3.4	Sondertransformatoren .....	169
3.4.1	Änderung der Übersetzung und der Strangzahl .....	169
3.4.2	Kleintransformatoren und Messwandler .....	171
3.4.3	Spartransformatoren und Drosselspulen .....	172
3.4.4	Leistungsübertrager mit Ferritkernen .....	178
<b>4</b>	<b>Allgemeine Grundlagen der Drehstrommaschinen .....</b>	<b>182</b>
4.1	Drehstromwicklungen .....	182
4.1.1	Ausführungsformen von Drehstromwicklungen .....	182
4.1.2	Wicklungsfaktoren .....	186
4.2	Umlaufende Magnetfelder .....	193
4.2.1	Durchflutung und Feld eines Wicklungsstranges .....	193
4.2.2	Drehfelder .....	196
4.2.3	Blindwiderstände der Drehstromwicklung .....	205
4.2.4	Spannungserzeugung und Drehmoment .....	207
4.3	Symmetrische Komponenten .....	210
4.3.1	Drehstromsystem .....	210
4.3.2	Zweiphasensystem .....	214
<b>5</b>	<b>Asynchronmaschinen .....</b>	<b>217</b>
5.1	Aufbau und Wirkungsweise .....	218
5.1.1	Ständer und Läufer der Asynchronmaschine .....	218
5.1.2	Asynchrones Drehmoment und Frequenzumformung .....	219
5.1.3	Drehtransformatoren .....	225
5.2	Darstellung der Betriebseigenschaften .....	227
5.2.1	Spannungsgleichungen und Ersatzschaltung .....	227
5.2.2	Einzelleistungen und Drehmoment .....	230
5.2.3	Stromortskurve .....	238
5.2.4	Betriebsbereiche und Kennlinien .....	250
5.2.5	Drehmomente und Kräfte der Oberfelder .....	252

5.3	Steuerung von Drehstrom-Asynchronmaschinen	261
5.3.1	Verfahren zur Drehzahländerung	261
5.3.2	Ersatzschaltung und Betrieb mit frequenzvariabler Spannung	269
5.3.3	Anlass- und Bremsverfahren	280
5.3.4	Unsymmetrische Betriebszustände	290
5.3.5	Dynamisches Verhalten von Asynchronmaschinen	296
5.4	Stromrichterbetrieb von Asynchronmaschinen	299
5.4.1	Spannungsänderung mit Drehstromstellern	300
5.4.2	Untersynchrone Stromrichter-Kaskade	305
5.4.3	Einsatz von Frequenzumrichtern	310
5.4.4	Motorrückwirkungen bei Umrichterbetrieb	316
5.5	Spezielle Bauformen und Betriebsarten der Asynchronmaschine	319
5.5.1	Stromverdrängungs- und Doppelstabläufer	319
5.5.2	Linearmotoren	322
5.5.3	Asynchrongeneratoren	326
5.5.4	Die elektrische Welle	329
5.5.5	Doppeltgespeiste Schleifringläufermotoren	330
5.5.6	Energiesparmotoren mit Wirkungsgrad-Klassifizierung	332
5.6	Einphasige Asynchronmaschinen	338
5.6.1	Einphasenmotoren ohne Hilfswicklung	338
5.6.2	Einphasenmotoren mit Kondensatorhilfswicklung	340
5.6.3	Einphasenmotoren mit Widerstandshilfswicklung	346
5.6.4	Der Drehstrommotor am Wechselstromnetz	349
5.6.5	Spaltpolmotoren	353
<b>6</b>	<b>Synchronmaschinen</b>	<b>356</b>
6.1	Aufbau der Synchronmaschine	357
6.1.1	Bauformen	357
6.1.2	Erregersysteme	361
6.1.3	Synchronmaschinen mit Dauermagneterregung	364
6.1.4	Synchronmaschinen mit Zahnpulenwicklungen	367
6.2	Betriebsverhalten der Vollpolmaschine	369
6.2.1	Erregerfeld und Ankerrückwirkung	369
6.2.2	Zeigerdiagramm und Ersatzschaltung	374
6.2.3	Synchronmaschinen im Alleinbetrieb	375
6.2.4	Synchronmaschinen im Netzbetrieb	385
6.2.5	Besonderheiten der Schenkelpolmaschine	393
6.3	Verhalten der Synchronmaschine im nichtstationären Betrieb	401
6.3.1	Drehzahlsteuerung und Stromrichterbetrieb	401
6.3.2	Pendelungen und unsymmetrische Belastung	405
6.3.3	Die Synchronmaschine in Zweiachsendarstellung	408
6.3.4	Stoßkurzschluss	413
6.4	Spezielle Bauarten von Synchronmaschinen	418
6.4.1	Turbogeneratoren	418
6.4.2	Die Einphasen-Synchronmaschine	420
6.4.3	Betriebsverhalten dauermagneterregter Synchronmotoren	421
6.4.4	Synchrone Linearmotoren	423
6.4.5	Transversalflussmotoren	429

---

6.5	Synchrone Kleinmaschinen .....	434
6.5.1	Reluktanzmotoren .....	434
6.5.2	Hysteresemotoren .....	438
6.5.3	Schrittmotoren .....	440
<b>7</b>	<b>Antriebe für die Elektromobilität .....</b>	<b>445</b>
7.1	Einführung .....	445
7.1.1	Aktuelle Situation .....	445
7.1.2	Konzepte der Elektrofahrzeuge .....	446
7.2	Der elektrische Antriebsstrang .....	447
7.2.1	Gesamtkonzept eines Elektrofahrzeuges .....	447
7.2.2	Momentverlauf und Drehzahlniveau der elektrischen Maschine ..	448
7.3	Hauptkomponenten des elektrischen Antriebsstranges .....	449
7.3.1	Energiespeicher .....	449
7.3.2	Leistungselektronik .....	451
7.3.3	Elektrische Maschine .....	452
7.3.4	Getriebe, ggf. mit Differential .....	456
7.3.5	Fahrzeug .....	457
7.3.6	Übergeordnete Steuerung .....	457
7.4	Quantitative Beschreibung von Fahrsituationen .....	458
7.4.1	Kinematische Grundgleichungen .....	458
7.4.2	Stationärer Fahrbetrieb .....	459
7.4.3	Dynamischer Fahrbetrieb, quasistationäre Fahrsituation .....	462
7.5	Download-Material zu Kapitel 7 .....	466
<b>8</b>	<b>Betriebsbedingungen elektrischer Maschinen .....</b>	<b>467</b>
8.1	Elektrotechnische Normung und Vorschriften .....	467
8.2	Bauformen und Schutzarten .....	471
8.3	Explosionsgeschützte Ausführungen .....	474
8.4	Verluste, Erwärmung und Kühlung .....	477
8.5	Betriebsarten und Leistungsschildangaben .....	483
8.6	Motoren für drehzahleregelte Antriebe .....	489
<b>9</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>491</b>
	Formelzeichen und Einheiten .....	491
	Berechnung der Aufgaben .....	496
	<b>Literatur .....</b>	<b>504</b>
	<b>Index .....</b>	<b>513</b>

# 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.

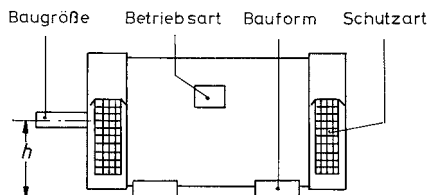


Bild 1.1 Vorgaben im Elektromaschinenbau

**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.

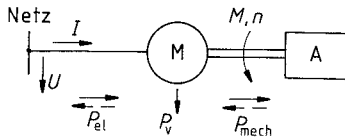
**Leistungsschild.** Eine elektrische Maschine erhält – ausgenommen sind wieder Kleinantriebe – ein Leistungsschild, das dem Anwender alle erforderlichen Betriebsdaten angibt. Dies sind vor allem die Werte für den Bemessungsbetrieb wie: Betriebsart S, Abgabeleistung  $P_N$ , Spannung  $U_N$ , Strom  $I_N$ , 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.

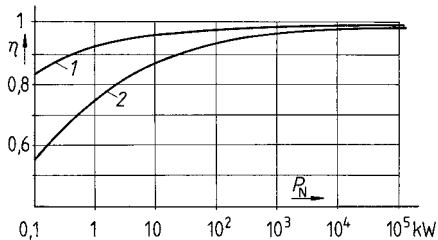
Das Verhältnis von Abgabe- und Aufnahmeleistung wird als Wirkungsgrad des Energiewandlers nach

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

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 %.

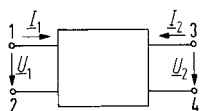


**Bild 1.3** Wirkungsgrade rotierender und statischer Energiewandler

- 1 Stromrichter, Transformatoren
- 2 Rotierende elektrische Maschinen

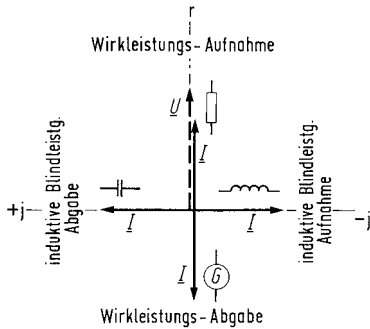
**Bezugspfeile.** Zur Berechnung eines elektrischen Stromkreises müssen für den Strom  $I$  und die Spannung  $U$  je eine positive Bezugsrichtung gewählt werden. In diesem Buch wird dazu ausschließlich das Verbraucherpfeilsystem verwendet, was den Vorteil hat, dass beim Übergang vom Motor- in den Generatorbetrieb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

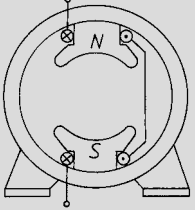
### 1.1.3 Bauarten und Gliederung elektrischer Maschinen

**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  $C$

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