

Rolf Fischer

# Elektrische Maschinen



16., aktualisierte Auflage

HANSER



**Bleiben Sie auf dem Laufenden!**

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

**[www.hanser-fachbuch.de/newsletter](http://www.hanser-fachbuch.de/newsletter)**



Rolf Fischer

# Elektrische Maschinen

16., aktualisierte Auflage

Mit 448 Bildern, 74 Beispielen, 61 Aufgaben und Lösungen

HANSER

**Autor:**

**Prof. Dr.-Ing. Rolf Fischer**

Hochschule Esslingen



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISBN: 978-3-446-43813-2

E-Book-ISBN: 978-3-446-43767-8

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2013 Carl Hanser Verlag München

Internet: <http://www.hanser-fachbuch.de>

Lektorat: Mirja Werner, M.A.

Herstellung: Dipl.-Ing. Franziska Kaufmann

Satz: druckhaus Köthen GmbH

Coverconcept: Marc Müller-Bremer, [www.rebranding.de](http://www.rebranding.de), München

Coverrealisierung: Stephan Rönigk

Druck und Bindung: Friedrich Pustet KG, Regensburg

Printed in Germany

## Vorwort

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

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

Auf die Behandlung so spezieller Maschinentypen wie z. B. Repulsionsmotoren oder die Drehstrom-Kommutatormaschinen, die keine Bedeutung mehr besitzen, wird verzichtet. Dagegen erhalten die Kleinmaschinen der verschiedenen Bauarten, die wie z. B. Universalmotoren in sehr großen Stückzahlen pro Jahr gefertigt werden, in den jeweiligen Hauptkapiteln eigene Abschnitte. Das Gleiche gilt für besondere Bauformen wie die Linear motoren 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 Verbraucher Pfeilsystem gesetzt. Ein ausführliches Literaturverzeichnis ermöglicht bei vielen Teilgebieten einen ersten Zugang zu weiterführenden, speziellen Veröffentlichungen.

*Rolf Fischer*

## **Vorwort zur 16. Auflage**

Der Verfasser sieht den Umfang des Lehrbuchs *Elektrische Maschinen* inzwischen als weitgehend abgeschlossen an. Es bleibt aber – wie schon bei früheren Auflagen – immer das Bestreben, neue Techniken und aktuelle Fragestellungen aufzunehmen, was den Seitenumfang dann doch etwas erweitert. In diesem Sinne sind daher in die neue Auflage folgende Themen aufgenommen:

### **Abschnitt 1.2.2**

Entwicklungen auf dem Gebiet der Elektroleche

### **Abschnitt 3.1.3**

Auslegung von Transformatoren für erhöhte Frequenz.

Energieeinsparung bei Verteilertransformatoren durch amorphe Eisenkerne.

### **Abschnitt 5.3.3**

Anlaufwärme bei Käfigläufermotoren auch mit Drehstromsteller.

Der Verfasser hofft, dass die *Elektrischen Maschinen* für die Kollegen an den Hochschulen, den Praktikern in Industrie und Gewerbe sowie natürlich den Studierenden der verschiedenen Ingenieurwissenschaften weiterhin eine verlässliche Hilfe bieten.

Alle Hinweise und Anregungen werden von jeder Seite sehr dankbar angenommen und nach Möglichkeit integriert. Bei meinem Fachnachfolger Prof. Dr.-Ing. E. Nolle ist diese wertvolle Unterstützung schon dankbare Tradition.

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

Esslingen, Frühjahr 2013

*Rolf Fischer*

# Inhaltsverzeichnis

1 Allgemeine Grundlagen elektrischer Maschinen .....	11
1.1 Prinzipien elektrischer Maschinen .....	11
1.1.1 Vorgaben im Elektromaschinenbau .....	11
1.1.2 Energiewandlung und Bezugspfeile .....	12
1.1.3 Bauarten und Gliederung elektrischer Maschinen .....	15
1.1.4 Leistung und Bauvolumen elektrischer Maschinen .....	17
1.2 Der magnetische Kreis elektrischer Maschinen .....	19
1.2.1 Aufbau magnetischer Kreise .....	19
1.2.2 Elektroleche und Eisenverluste .....	21
1.2.3 Spannungen und Kräfte im Magnetfeld .....	25
1.2.4 Der magnetische Kreis mit Dauermagneten .....	27
2 Gleichstrommaschinen .....	33
2.1 Aufbau und Bauteile .....	33
2.1.1 Prinzipieller Aufbau .....	33
2.1.2 Bauteile einer Gleichstrommaschine .....	36
2.1.3 Ankerwicklungen .....	38
2.1.4 Dauermagneterregte Kleinmaschinen und Sonderbauformen .....	45
2.2 Luftspaltfelder und Betriebsverhalten .....	48
2.2.1 Erregerfeld und Ankerrückwirkung .....	48
2.2.2 Spannungserzeugung und Drehmoment .....	52
2.2.3 Stromwendung .....	57
2.2.4 Wendepole und Kompensationswicklung .....	61
2.3 Kennlinien und Steuerung von Gleichstrommaschinen .....	65
2.3.1 Anschlussbezeichnungen und Schaltbilder .....	65
2.3.2 Kennlinien von Gleichstrommaschinen .....	67
2.3.3 Verfahren zur Drehzahländerung .....	75
2.3.4 Dynamisches Verhalten von Gleichstrommaschinen .....	82
2.4 Stromrichterbetrieb von Gleichstrommaschinen .....	83
2.4.1 Netzgeführte Stromrichterantriebe .....	83
2.4.2 Antriebe mit Gleichstromsteller .....	87
2.4.3 Probleme der Stromrichterspeisung .....	90
3 Transformatoren .....	100
3.1 Aufbau und Bauformen .....	101
3.1.1 Eisenkerne von Wechsel- und Drehstromtransformatoren .....	101
3.1.2 Wicklungen .....	104
3.1.3 Wachstumsgesetze und Kühlung .....	104
3.2 Betriebsverhalten von Einphasentransformatoren .....	113
3.2.1 Spannungsgleichungen und Ersatzschaltung .....	113
3.2.2 Leerlauf und Magnetisierung .....	117



3.2.3 Verhalten bei Belastung .....	122
3.2.4 Kurzschluss des Transformators.....	125
3.2.5 Transformatorgeräusche .....	129
3.3 Betriebsverhalten von Drehstromtransformatoren .....	130
3.3.1 Schaltzeichen und Schaltgruppen.....	130
3.3.2 Schaltgruppen bei unsymmetrischer Belastung.....	132
3.3.3 Direkter Parallelbetrieb .....	136
3.4 Sondertransformatoren.....	138
3.4.1 Änderung der Übersetzung und der Strangzahl .....	138
3.4.2 Kleintransformatoren und Messwandler .....	139
3.4.3 Spartransformatoren und Drosselspulen .....	140
4 Allgemeine Grundlagen der Drehstrommaschinen .....	146
4.1 Drehstromwicklungen .....	146
4.1.1 Ausführungsformen einer Drehstromwicklung .....	146
4.1.2 Wicklungsfaktoren.....	149
4.2 Umlaufende Magnetfelder.....	155
4.2.1 Durchflutung und Feld eines Wicklungsstranges .....	155
4.2.2 Drehfelder.....	158
4.2.3 Blindwiderstände einer Drehstromwicklung .....	165
4.2.4 Spannungserzeugung und Drehmoment.....	167
4.3 Symmetrische Komponenten .....	169
4.3.1 Drehstromsystem .....	169
4.3.2 Zweiphasensystem .....	172
5 Asynchronmaschinen .....	175
5.1 Aufbau und Wirkungsweise .....	175
5.1.1 Ständer und Läufer der Asynchronmaschine.....	175
5.1.2 Asynchrones Drehmoment und Frequenzumformung .....	177
5.1.3 Drehtransformatoren .....	181
5.2 Darstellung der Betriebseigenschaften.....	184
5.2.1 Spannungsgleichungen und Ersatzschaltung .....	184
5.2.2 Einzelleistungen und Drehmomente .....	186
5.2.3 Stromortskurve.....	192
5.2.4 Betriebsbereiche und Kennlinien .....	202
5.2.5 Drehmomente und Kräfte der Oberfelder .....	204
5.3 Steuerung von Drehstrom-Asynchronmaschinen .....	212
5.3.1 Verfahren zur Drehzahländerung .....	212
5.3.2 Ersatzschaltung und Betrieb mit frequenzvariabler Spannung .....	219
5.3.3 Anlass- und Bremsverfahren.....	228
5.3.4 Unsymmetrische Betriebszustände.....	237
5.3.5 Dynamisches Verhalten von Asynchronmaschinen .....	242

---

5.4	Stromrichterbetrieb von Asynchronmaschinen	245
5.4.1	Spannungsänderung mit Drehstromstellern	245
5.4.2	Untersynchrone Stromrichter-kaskade	249
5.4.3	Einsatz von Frequenzumrichtern	254
5.4.4	Motorrückwirkung bei Umrichterbetrieb	260
5.5	Spezielle Bauformen und Betriebsarten der Asynchronmaschine	262
5.5.1	Stromverdrängungs- und Doppelstabläufer	262
5.5.2	Linearmotoren	265
5.5.3	Asynchrongeneratoren	269
5.5.4	Die elektrische Welle	271
5.5.5	Doppeltgespeiste Schleifringläufermotoren	272
5.5.6	Energiesparmotoren	274
5.6	Einphasige Asynchronmaschinen	279
5.6.1	Einphasenmotoren ohne Hilfswicklung	279
5.6.2	Einphasenmotoren mit Kondensatorhilfswicklung	281
5.6.3	Einphasenmotoren mit Widerstandshilfswicklung	286
5.6.4	Der Drehstrommotor am Wechselstromnetz	288
5.6.5	Spaltpolmotoren	292
6	Synchronmaschinen	295
6.1	Aufbau von Synchronmaschinen	295
6.1.1	Bauformen	295
6.1.2	Erregersysteme	299
6.1.3	Synchronmaschinen mit Dauermagneterregung	303
6.1.4	Synchronmaschinen mit Zahnspulenwicklungen	306
6.2	Betriebsverhalten der Vollpolmaschine	308
6.2.1	Erregerfeld und Ankerrückwirkung	308
6.2.2	Zeigerdiagramm und Ersatzschaltung	312
6.2.3	Synchronmaschinen im Alleinbetrieb	313
6.2.4	Synchronmaschinen im Netzbetrieb	321
6.2.5	Besonderheiten der Schenkelpolmaschine	327
6.3	Verhalten der Synchronmaschine im nichtstationären Betrieb	334
6.3.1	Drehzahlsteuerung und Stromrichterbetrieb	334
6.3.2	Pendelungen und unsymmetrische Belastung	338
6.3.3	Die Synchronmaschine in Zweiachsendarstellung	341
6.3.4	Stoßkurzschluss	345
6.4	Spezielle Bauarten von Synchronmaschinen	349
6.4.1	Turbogeneratoren	349
6.4.2	Die Einphasen-Synchronmaschine	352
6.4.3	Betriebsverhalten dauermagneterregter Synchronmotoren	352
6.4.4	Synchrone Langstator-Linearmotoren	357
6.4.5	Transversalflussmotoren	359
6.5	Synchrone Kleinmaschinen	363
6.5.1	Reluktanzmotoren	363
6.5.2	Hysteresemotoren	366
6.5.3	Schrittmotoren	368

---

7 Stromwendermaschinen für Wechsel- und Drehstrom .....	373
7.1 Übersicht .....	373
7.2 Universalmotoren .....	375
7.2.1 Aufbau und Einsatz .....	375
7.2.2 Ersatzschaltung und Zeigerdiagramm .....	376
7.2.3 Verfahren der Drehzahländerung .....	379
7.2.4 Stromwendung .....	380
8 Betriebsbedingungen elektrischer Maschinen .....	384
8.1 Elektrotechnische Normung und Vorschriften .....	384
8.2 Bauformen und Schutzarten .....	387
8.3 Explosionsgeschützte Ausführungen .....	390
8.4 Verluste, Erwärmung und Kühlung .....	393
8.5 Betriebsarten und Leistungsschildangaben .....	399
9 Anhang .....	405
Schrifttum .....	405
Formelzeichen und Einheiten .....	412
Berechnung der Aufgaben .....	416
Sachwortverzeichnis .....	421

# 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.  $10 \mu\text{W}$  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 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 abgestuften Baugrößen gefertigt. Als Bezugswert gilt die Achshöhe  $h$  in Abstufungen von

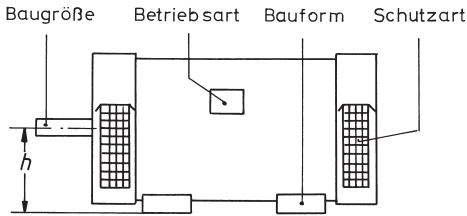


Bild 1.1 Vorgaben im Elektromaschinenbau

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.

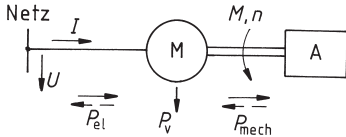


Bild 1.2 Elektrische Maschine M als Energiewandler  
A Arbeitsmaschine/Antrieb — Motor - - - Generator

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 Transformator-

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 %.

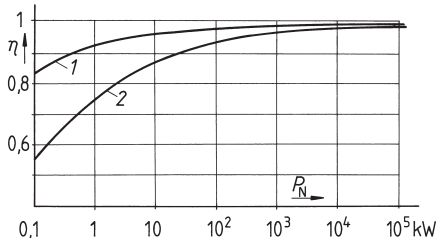


Bild 1.3 Wirkungsgrade rotierender und statischer Energiewandler  
 1 Stromrichter, Transformatoren  
 2 Rotierende elektrische Maschinen

**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 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.

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 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.

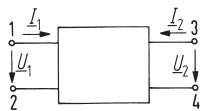


Bild 1.4 Anwendung des Verbraucher-Pfeilsystems auf einen Vierpol (Zweitor)

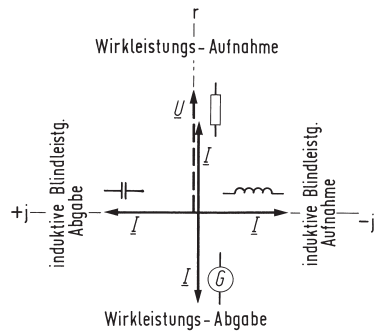
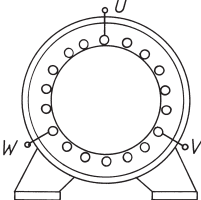
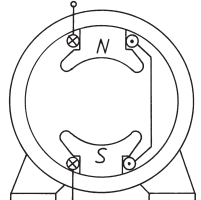


Bild 1.5 Festlegung der Belastungsart im Koordinatensystem für das Verbraucherpfeilsystem

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
<p>Drehstromwicklung</p>  <p>Einzelpole auch als Dauermagnete</p> 	<p>Asynchron-Käfigläufer-Motor</p> <p>Spaltpolmotor</p>	<p>Asynchron-Schleifringläufer-Motor</p> <p>Außenpol-Synchronmaschine</p>	<p>Innenpol-Synchronmaschine</p> <p>Schrittmotor</p>	<p>Drehstrom-Kommutator-Maschine</p> <p>Gleichstrom-Maschine</p>

**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 (durch Umrichterantriebe abgelöst)	Käfigläufermotor		Druck- und Papiermaschinen, Textilindustrie	1 kW bis 150 kW
				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  $F$  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

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

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 grundsätzlich 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  $n_N \leq 25\,000 \text{ min}^{-1}$  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  $C$

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

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

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

**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 31 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

$$B = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot H \tag{1.10}$$

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

$$\mu_0 = 0,4 \cdot \pi \cdot 10^{-6} \frac{V \cdot s}{A \cdot m} \tag{1.11}$$

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  $A_{Fe}$  nach

$$B = \frac{\Phi}{A_{Fe}} \tag{1.12}$$

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

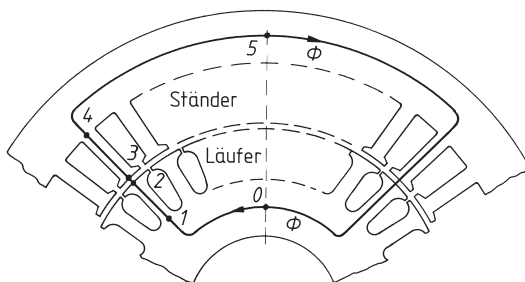


Bild 1.6 Magnetischer Kreis einer Drehstrom-Asynchronmaschine

**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.

**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 Konstruktionszeich-

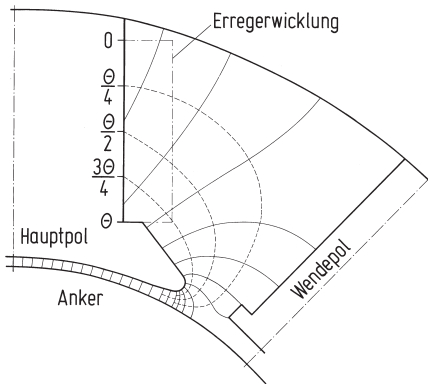


Bild 1.7 Feldbild des Erregerfeldes einer vierpoligen Gleichstrommaschine  
 — Feldlinien - - - Niveaulinien

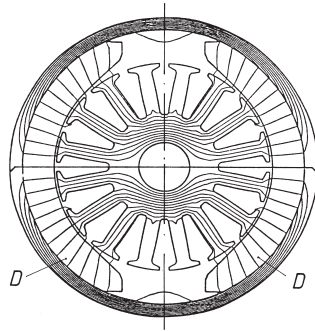


Bild 1.8 Feldbild der Dauermagneten D eines zweipoligen Kleinmotors  
 Ermittelt mit dem MAGGY-Programm  
 (Valvo, Philips Bauelemente, Lit. 10)

nung 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 Dauermagneterregung. Derartige Maschinen werden in der Kfz-Elektrik in großen Stückzahlen für Gebläse, Scheibenwischer usw. verwendet.

**Beispiel 1.3:** Nach Bild 1.6 wird das Magnetfeld eines Motors bis auf den erforderlichen Luftspalt  $l_L$  zwischen Ständer und Läufer in Elektrolech 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 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 Elektroleche und Eisenverluste

**Elektroleche.** Der zur Aufnahme des Magnetfeldes einer Maschine erforderliche Eisenweg ist, von Gleichstrom-Kleinmotoren abgesehen, stets aus Elektrolechen 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 mm bis 0,6 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°, so dass das verwendete Elektroblech keine magnetische Vorzugsrichtung haben darf. Man verwendet hier kalt-gewalzte 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  $\nu_{15}$  bei sinusförmiger Ummagnetisierung mit  $B = 1,5$  T und  $f = 50$  Hz sowie die Blechstärke  $d$  angibt. Als Beispiel sei die Sorte M250–50A mit  $\nu_{15} = 2,5$  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 0,5 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 Transformator relativ einfach vermeiden [6, 7].

**Amorphe Elektrobleche.** Schon seit Jahren sind Elektrobleche aus Legierungen von im Wesentlichen Eisen, Bor und Silizium bekannt, bei denen durch eine sehr rasche

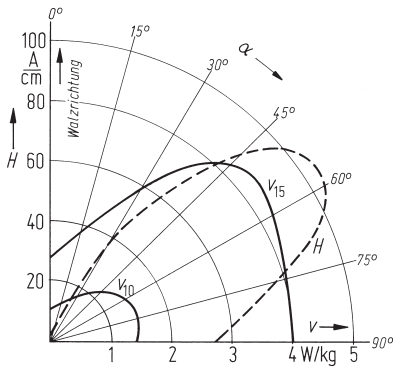


Bild 1.9 Richtungsabhängigkeit der spezifischen Verluste  $v$  und der magnetischen Feldstärke  $H$  für  $B = 1,5 \text{ T}$  bei kornorientierten Elektroblechen  $\alpha$  Abweichung von der Walzrichtung

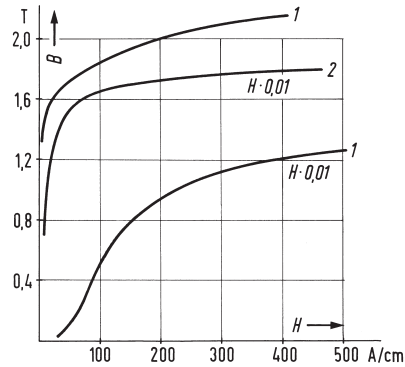


Bild 1.10 Gleichstrom-Magnetisierungskurven  
 1 Elektroblech 0,5 mm, schlussgeglüht  
 2 kornorientiertes Blech 0,35 mm

Abkühlung der Schmelze die Ausbildung der sonst üblichen geordneten Kristallstruktur verhindert 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.

**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

$$\boxed{v_H = c_H \cdot f \cdot B^2} \quad (1.15)$$

**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

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

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  $v_{10}$  bzw.  $v_{15}$  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.

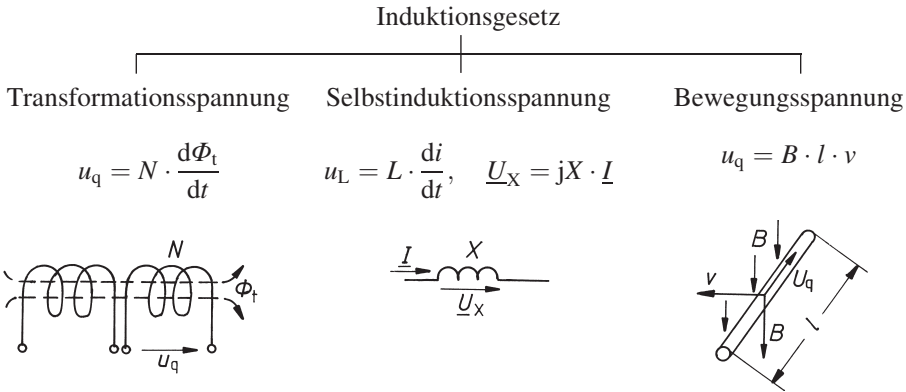
Bei von den Bezugswerten abweichenden Betriebsgrößen  $B$  und  $f$  errechnet man die gesamten Eisenverluste der Masse  $m_{\text{Fe}}$  aus

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

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:



Die obigen Beziehungen sind im Übrigen alle in der allgemeinen Form des Induktionsgesetzes als totales Differenzial nach

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{\partial\Phi}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{\partial\Phi}{\partial t}$$

mit der Addition von Bewegungs- und Ruheterm enthalten.

Besonders die Gleichung für die Bewegungsspannung

$$U_q = B \cdot l \cdot v \tag{1.18}$$

wird gerne zur Auslegung der Wicklung eines Generators benutzt. In der obigen einfachen Form ist vorausgesetzt, dass die Leiter der Länge  $l$ , der Vektor der Flussdichte  $B$  und die Richtung der Bewegung alle senkrecht aufeinander stehen. Dies ist durch die Konstruktion des Generators sichergestellt.

**Kraftwirkung.** Für die Wirkungsweise elektrischer Maschinen ist neben dem Induktionsgesetz vor allem die Kraftwirkung auf einen stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld von Bedeutung. Nach Bild 1.11 erfährt ein Stab der Länge  $l$  auf einem Läufer, der den Strom  $I$  führt, die Tangentialkraft  $F$  mit der Verknüpfung

$$\vec{F} = I \cdot (\vec{l} \times \vec{B}) \tag{1.19 a}$$

Der Vektor  $\vec{l}$  ist dabei in die Stromrichtung gelegt.

Bilden Feldrichtung und Leiter einen rechten Winkel, so vereinfacht sich Gl. (1.19 a) zu

$$F = B \cdot l \cdot I \tag{1.19 b}$$

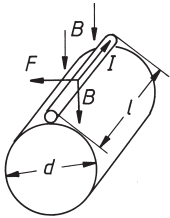


Bild 1.11 Tangentialkraft  $F$  auf einen stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld

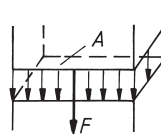


Bild 1.12 Feldkräfte  $F$  zwischen gegenüberliegenden Eisenflächen

Gl. (1.19 b) ist die Grundlage für die Berechnung des Drehmomentes elektrischer Maschinen. Es ergibt sich nach

$$M = \frac{d}{2} \cdot \sum_{i=1}^{i=n} F_i \quad (1.20)$$

aus der Summe aller Tangentialkräfte multipliziert mit dem Läuferadius  $d/2$  als Hebelarm. Wie nachstehend gezeigt, gilt dies, obwohl die Strom führenden Leiter in Nuten und damit in einem fast feldfreien Bereich liegen.

**Feldkräfte.** In Bild 1.12 stehen sich zwei Eisenflächen gegenüber, zwischen denen die Flussdichte  $B$  herrscht. Über eine Energiebetrachtung lässt sich berechnen, dass auf die Austrittsfläche  $A$  der Feldlinien eine Anziehungskraft nach

$$F = \frac{B^2 \cdot A}{2\mu_0} \quad (1.21)$$

auftritt. Auf derartigen Feldkräften beruht auch das in elektrischen Maschinen nach Gl. (1.20) entstehende Drehmoment. Die hierfür wirksamen Tangentialkräfte greifen im Wesentlichen nicht am Leiter an, sondern nach [1, 2] an den Zähnen.

Die wirksamen Tangentialkräfte  $F_i$  elektrischer Maschinen entstehen hauptsächlich durch Maxwell'sche Zugspannungen an den Zahnflanken. Bei stromloser Nut und symmetrischem Feldverlauf heben sich die gleich großen nach innen gerichteten Feldkräfte auf (Bild 1.13). Durch das Eigenfeld des Nutstromes ergeben sich dann ungleiche Flussdichten in den Zähnen mit entsprechend unterschiedlichen Werten  $F_1$  und  $F_2$ . Auf den Umfang bezogen erhält man zusammen mit dem kleinen Anteil  $F_s$  auf den Leiter genau die Tangentialkraft  $F_i = B_L \cdot l \cdot I$ . Das Drehmoment kann damit nach Gl. (1.20) aus der Flussdichte  $B_L$  im Luftspalt bei Leerlauf und einem aus den Nutströmen errechneten Strombelag am Umfang bestimmt werden.

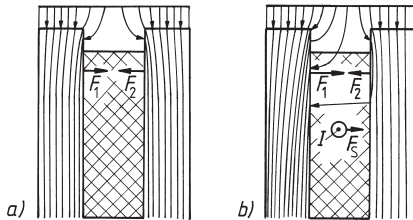


Bild 1.13 Magnetische Feldkräfte an den Zahnflanken einer Nut

a) Nut stromlos,  $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = 0$

b) Nut mit Strom  $I$ ,  $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 > 0$

**1.2.4 Der magnetische Kreis mit Dauermagneten**

**Hartmagnetische Werkstoffe.** Im magnetischen Kreis von Maschinen mit elektrischer Felderregung werden zur Minimierung der erforderlichen Durchflutung und der Umagnetisierungsverluste stets so genannte weichmagnetische Eisensorten mit möglichst hoher Sättigungsinduktion und schmaler Hystereseschleife verwendet. Im Unterschied zu diesen zuvor besprochenen Elektroblechen benötigt man für die Herstellung von Dauer- oder Permanentmagneten Materialien, die eine möglichst hohe Koerzitivfeldstärke  $H_c$  besitzen (Bild 1.14). Im Bereich elektrischer Maschinen werden Dauermagnete zur Erregung von Gleichstrom-Kleinmotoren z. B. für die Kfz-Elektrik sowie für Schritt- und Servomotoren verwendet [8–12, 113–118].

Kennzeichnend für ein Dauermagnetmaterial ist seine Entmagnetisierungskurve im 2. Quadranten des  $B = f(H)$ -Kennlinienfeldes (Bild 1.15) und daraus das maximale Produkt  $(B \cdot H)_{max}$ , das in der Einheit  $\text{kJ/m}^3$  die Energiedichte bestimmt. Als Materialien stehen heute zur Verfügung:

1. Legierungen der Metalle Al, Co, Ni, Ti, aus denen meist in einem Gussverfahren die gewünschte Magnetform hergestellt wird. Diese AlNiCo-Magnete genannten Legierungen erreichen mit  $B_{rem} \leq 1,3 \text{ T}$  zwar hohe Remanenzwerte, besitzen aber nur die geringe Koerzitivfeldstärke von Kurve 1 in Bild 1.15.

AlNiCo-Magnete sind damit sehr anfällig gegen eine Entmagnetisierung durch Fremdfelder oder eine Luftspaltvergrößerung, z. B. durch den Ausbau des Läufers. In elektrischen Maschinen werden sie nur selten eingesetzt.

2. Keramische Werkstoffe, die durch Pressen und Sintern von Erdalkalioxiden und Eisenoxiden gewonnen und als Ferrite bezeichnet werden. Diese Magnete lassen sich mit  $H_c \leq 2,5 \text{ kA/cm}$  (Kurve 2) wesentlich schlechter entmagnetisieren, erreichen aber nur  $B_{rem} \leq 0,4 \text{ T}$ . Ferrite stellen auf Grund ihres günstigen Preises heute noch den Hauptteil der in der Praxis vielfältig eingesetzten Dauermagnete. Als Beispiele seien alle Kfz-Hilfsantriebe und die Haltemagnete an Möbeln usw. genannt.

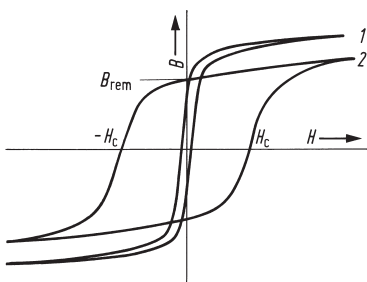


Bild 1.14 Hystereseschleife  
1 weichmagnetisches Material  
2 hartmagnetisches Material

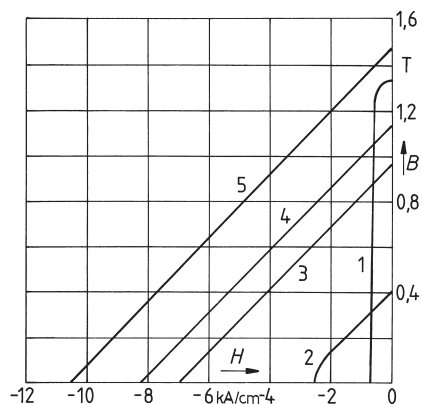


Bild 1.15 Kennlinien von Dauermagnetwerkstoffen (Vacuumschmelze Hanau)

- 1 AlNiCo
- 2 Hartferrit
- 3 Selten-Erde  $\text{SmCo}_5$
- 4 Selten-Erde  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$
- 5 Selten-Erde NdFeB

3. Legierungen aus Verbindungen der Seltenen Erden haben zur jüngsten Gruppe von Dauermagnetwerkstoffen geführt, die entsprechend den Geraden 3 bis 5 in Bild 1.15 sowohl eine hohe Remanenz wie große Koerzitivfeldstärke besitzen. Sie werden etwa wie die Ferrite hergestellt und erreichen Energiedichten bis ca.  $450 \text{ kJ/m}^3$ . Dauermagnete aus Seltenen Erden werden vor allem zur Erregung von Gleichstrom- und Synchronservomotoren eingesetzt.

**Magnetischer Kreis.** Die grundsätzliche Berechnung eines magnetischen Kreises mit einem Dauermagneten soll über die Anordnung in Bild 1.16 gezeigt werden. Sie enthält mit dem Magneten, einem Weicheisenteil mit Luftspalt und einer Spule (mit deren Strom  $I$  eine Auf- oder Gegenmagnetisierung möglich ist) alle in der Praxis vorhandenen Komponenten.

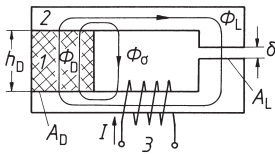


Bild 1.16 magnetischer Kreis mit Dauermagnet

- 1 Dauermagnet
- 2 Weicheisen
- 3 Spule zur Aufmagnetisierung

Der Fluss  $\Phi_D$  des Dauermagneten teilt sich in den Hauptanteil  $\Phi_L$  über den Luftspalt  $\delta$  und einen kleinen Streufluss  $\Phi_\sigma$ . Mit der Streuziffer  $\sigma = \Phi_\sigma / \Phi_L$  erhält man die Flussgleichungen

$$\Phi_D = \Phi_L \cdot (1 + \sigma)$$

bzw. 
$$B_D \cdot A_D = B_L \cdot A_L \cdot (1 + \sigma) \quad (1.22)$$

Durch den Spulenstrom  $I$  erhält der magnetische Kreis die Durchflutung  $\Theta$ , welche die magnetische Teilspannung für Magnet, Luftspalt und Eisenweg aufbringt. Es gilt damit die Durchflutungsgleichung

$$\Theta = V_D + V_L + V_{Fe} \quad (1.23)$$

mit  $V_D = H_D \cdot h_D$  und  $V_L = H_L \cdot \delta$

Der Durchflutungsanteil  $V_{Fe}$  für den Weicheisenweg kann über den so genannten Sättigungsfaktor des Kreises

$$k_s = 1 + \frac{V_{Fe}}{V_L}$$

und  $V_L + V_{Fe} = V_L \cdot k_s = H_L \cdot k_s \cdot \delta$

als Vergrößerung des Luftspaltes um den Faktor  $k_s > 1$  erfasst werden.

Setzt man vorstehende Beziehungen in die Gl. (1.23) ein und teilt durch die Magnethöhe  $h_D$ , so erhält man die Feldstärke im Magneten zu

$$H_D = \frac{\Theta}{h_D} - H_L \cdot \frac{\delta}{h_D} \cdot k_s \quad (1.24)$$

Kombiniert man diese Gleichung mit Gl. (1.22), so ergibt sich wegen  $B_L = \mu_0 \cdot H_L$

$$H_D = \frac{\Theta}{h_D} - \frac{B_D}{\mu_0} \cdot \frac{A_D}{A_L} \cdot \frac{\delta}{h_D} \cdot \frac{k_s}{1 + \sigma}$$

In dieser Gleichung ist das Produkt hinter der Größe  $B_D$  als Verhältnis von Längen und Flächen eine reine Zahl, die mit

$$N_D = \frac{A_D}{A_L} \cdot \frac{\delta}{h_D} \cdot \frac{k_s}{1 + \sigma} \tag{1.25}$$

als Entmagnetisierungsfaktor bezeichnet wird. Er kann aus den geometrischen Abmessungen des magnetischen Kreises, dem gewählten Sättigungsfaktor  $k_s$  und der Streuziffer  $\sigma = 0,02$  bis  $0,1$  berechnet werden.

Mit der Definition des Entmagnetisierungsfaktors erhält man für die magnetische Feldstärke im Dauermagneten die Beziehung

$$H_D = \frac{\Theta}{h_D} - \frac{B_D}{\mu_0} \cdot N_D \tag{1.26 a}$$

Sie beschreibt im  $B$ - $H$ -Diagramm die Gleichung der so genannten Schergeraden  $g_D$  und ist neben der Entmagnetisierungskurve des Werkstoffes ein weiterer geometrischer Ort für die Lage des Arbeitspunktes  $P$  des Dauermagnetkreises. Dieser liegt also stets im Schnittpunkt von Schergeraden und Magnetkennlinie.

Wirkt mit  $\Theta = 0$  keine äußere Durchflutung, so vereinfacht sich Gl. (1.26 a) zu der Ursprungsgeraden

$$H_D = - \frac{B_D}{\mu_0} \cdot N_D \tag{1.26 b}$$

in Bild 1.17. Im Magnetkreis mit Luftspalt bleibt die Remanenz  $B_{rem}$  also nicht erhalten, sondern der Magnet verringert seine Flussdichte und erreicht dadurch negative  $H_D$ -Werte, mit denen er die Bedingung  $H_D \cdot h_D + H_L \cdot k_s \cdot \delta = 0$  realisiert. Wie stark diese Teilentmagnetisierung im Vergleich zum Remanenzwert auftritt, hängt von der Größe des Entmagnetisierungsfaktors  $N_D$  ab. Dieser bestimmt mit  $\tan \alpha_D = \overline{OH}_D / \overline{OB}_D$  die Steigung der Schergeraden  $g_D$ .

**Lage des Arbeitspunktes.** Die Lage des Arbeitspunktes  $P$  auf der Magnetkennlinie lässt sich so wählen, dass für eine im Luftspalt gewünschte Flussdichte  $B_L$  das kleinstmögliche Magnetvolumen  $V_D$  und damit die geringsten Kosten für das Dauermagnetma-

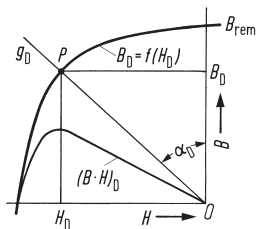


Bild 1.17 Teilentmagnetisierung eines Dauermagnetkreises durch einen Luftspalt,  $g_D$  Schergerade