

Carsten Fräger, Wolfgang Amrhein (Hrsg.)
Handbuch Elektrische Kleinantriebe

Weitere empfehlenswerte Titel



Handbuch Elektrische Kleinantriebe
Band 2: Kleinantriebe, Systemkomponenten, Auslegung
Hrsg. von Wolfgang Amrhein / Carsten Fräger, 2021
ISBN 978-3-11-044147-5, e-ISBN 978-3-11-044150-5,
e-ISBN (EPUB) 978-3-11-043324-1



Maschinenelemente 1
4. Auflage
Hubert Hinzen, 2017
ISBN 978-3-11-054082-6, e-ISBN 978-3-11-054087-1,
e-ISBN (EPUB) 978-3-11-054104-5



Maschinenelemente 2
4. Auflage
Hubert Hinzen, 2018
ISBN 978-3-11-059707-3, e-ISBN 978-3-11-059708-0,
e-ISBN (EPUB) 978-3-11-059758-5



Maschinenelemente 3
2. Auflage
Hubert Hinzen, erscheint 2019
ISBN 978-3-11-064546-0, e-ISBN 978-3-11-064707-5,
e-ISBN (EPUB) 978-3-11-064714-3



Mechatronische Netzwerke
Praxis und Anwendungen
Jörg Grabow, 2018
ISBN 978-3-11-047084-0, e-ISBN 978-3-11-047085-7,
e-ISBN (EPUB) 978-3-11-047095-6



Eingebettete Systeme
Entwurf, Modellierung und Synthese
Oliver Bringmann / Walter Lange / Martin Bogdan, 2018
ISBN 978-3-11-051851-1, e-ISBN 978-3-11-051852-8,
e-ISBN (EPUB) 978-3-11-051862-7

Handbuch Elektrische Kleinantriebe



Band 1: Kleinmotoren, Leistungselektronik

5. Auflage

DE GRUYTER

Herausgeber

Prof. Dr.-Ing. Carsten Fräger
Hochschule Hannover
Fakultät 2 Mechatronik – Elektrische Antriebe
Ricklinger Stadtweg 120
30459 Hannover
Carsten.Fraeger@HS-Hannover.de

Univ.-Prof. Dr. Wolfgang Amrhein
Johannes Kepler Universität
Institut für Elektrische Antriebe
und Leistungselektronik
Linz Center of Mechatronics
Altenberger Str. 69
4040 Linz
Österreich
wolfgang.amrhein@jku.at

ISBN 978-3-11-056247-7
e-ISBN (PDF) 978-3-11-056532-4
e-ISBN (EPUB) 978-3-11-056248-4

Library of Congress Control Number: 2020945768

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

© 2020 Walter de Gruyter GmbH, Berlin/Boston
Bildnachweis: Fa. Faulhaber, Schönaich
Satz: le-tex publishing services GmbH, Leipzig
Druck und Bindung: CPI books GmbH, Leck

www.degruyter.com

Vorwort

Mit der stetig wachsenden Technisierung und Automatisierung haben die elektromagnetischen Kleinantriebe heute eine fast unübersehbare Anwendungsvielfalt erreicht. Die Ursache dafür sind zum einen Fortschritte in der Werkstofftechnik, in der Mikro- und Leistungselektronik sowie in der Regelungs- und Steuerungstechnik, die eine außergewöhnliche Variationsbreite der Antriebsausführungen schaffen. Zum anderen sind es aber auch moderne Berechnungs-, Simulations- und Messverfahren, die zu verbesserten und neuartigen Antrieben führen.

Vielfach gibt es für ein Antriebsproblem mehrere Lösungsmöglichkeiten. Der Anwender von Kleinantrieben muss deshalb über Wissen und Urteilsvermögen verfügen, um die unter den Gesichtspunkten von Funktion, Integration, Bedienung, Zuverlässigkeit, Geräuschen und Schwingungen sowie Beschaffung und Kosten zu realisierende Problemlösung zu erarbeiten. Dieses Buch soll bei der Antriebsauswahl helfen, um die jeweiligen Anforderungen an einen Antrieb optimal mit dem erforderlichen Aufwand zu erfüllen.

Um den kompletten Antrieb in all seinen Facetten erarbeiten zu können, behandelt Band 1 die Komponenten des Antriebs, also die Motoren und die Leistungselektronik. Hier werden alle heute relevanten Motorarten und Elektronikschaltungen für kleine Leistungen behandelt.

Band 2 behandelt die kompletten Antriebe aus Motoren, Elektronik und mechanischen Übertragungselementen sowie spezielle Antriebe und Magnetlager. Besonderes Augenmerk wird den geregelten Antrieben gewidmet. Hierzu gehören die Servoantriebe mit ihrer hochdynamischen Winkel- und Drehzahlregelung, aber auch die drehzahlgeregelten Gleichstrom- und Wechselstromantriebe.

Die Antriebsprojektierung wird anhand von Beispielen dargestellt. Zahlreiche Literaturstellen und die Angabe der wichtigsten Vorschriften und Normen sollen helfen, bei Bedarf tiefer in die Technik und Normung der einzelnen Antriebe einzudringen.

Das Buch ist für Ingenieure gemacht, die zur Lösung von Projektierungsaufgaben Kleinantriebe einsetzen wollen, beispielsweise in der Kfz-Technik, im Werkzeugmaschinenbau, in der Hausgerätetechnik, in der Büro- und Datentechnik, in der Medizin- und Labortechnik sowie in der Robotertechnik.

In der 5. Auflage sind Themen der geregelten Antriebe (Servoantriebe, Sensoren) und der elektromagnetischen Verträglichkeit neu hinzugekommen. Alle bestehenden Kapitel sind aktualisiert und größtenteils stark überarbeitet worden. Aufgrund der Fülle an neuen Themen und Beiträgen haben sich die Herausgeber in Abstimmung mit dem Verlag entschlossen, das Handbuch Elektrische Kleinantriebe in zwei Bänden herauszugeben.

Die Autoren aus Industrie und Hochschule haben ihre Kenntnisse und Erfahrungen in gestraffter Form dargestellt und sich um eine einheitliche Darstellung bemüht. Gleichwohl werden individuelle Schwerpunkte bei den verschiedenen Themen gesetzt.

Hannover, Linz, im Februar 2020

Carsten Fräger, Wolfgang Amrhein

Inhalt

Vorwort — V

Hans-Dieter Stölting und Carsten Fräger

- 1 Einleitung Elektrische Kleinantriebe — 1**
- 1.1 Allgemeines — 1
- 1.1.1 Wirtschaftliche Bedeutung der Kleinantriebe — 1
- 1.1.2 Kennzeichen kostengünstiger elektrischer Kleinantriebe — 1
- 1.1.3 Kennzeichen hochwertiger Kleinantriebe — 4
- 1.2 Das elektromagnetische Antriebssystem — 4
- 1.3 Die Antriebskomponenten — 6
- 1.3.1 Motoren — 6
- 1.3.2 Elektronische Schaltungen — 10

Carsten Fräger und Hans-Dieter Stölting

- 2 Magnetkreis, Permanentmagnete, Kraft- und Drehmomentenerzeugung — 19**
- 2.1 Magnetfeld in elektrischen Maschinen — 19
- 2.2 Zusammenhänge im Magnetfeld, Fluss und Flussverkeftung — 20
- 2.3 Magnetischer Kreis — 20
- 2.3.1 Unverzweigter magnetischer Kreis — 21
- 2.3.2 Verzweigter magnetischer Kreis — 21
- 2.4 Ferromagnetische Materialien für Kleinmotoren — 23
- 2.5 Permanentmagnete — 23
- 2.5.1 Entwicklung der Magnetmaterialien und des maximalen Energieprodukts — 24
- 2.5.2 Magnetische Eigenschaften der Permanentmagnete — 25
- 2.5.3 Reale Magnetkreise mit Permanentmagneten — 35
- 2.5.4 Permanentmagnetwerkstoffe für Hysteresemotoren — 39
- 2.5.5 Aufmagnetisierung und Stabilisierung von Permanentmagneten — 40
- 2.6 Kraft- und Drehmomentenerzeugung in elektrischen Maschinen — 41
- 2.6.1 Entstehung der Kräfte und Drehmomente — 41
- 2.6.2 Berechnung der Kräfte und Drehmomente — 46

Andreas Möckel, Tobias Heidrich und Heinz Weißmantel

- 3 Kommutatormotoren – Allgemeines und Kommutatorsystem — 52**
- 3.1 Übersicht — 52
- 3.2 Kontaktsystem — 55
- 3.2.1 Bestandteile des Kontaktsystems — 55
- 3.2.2 Aufbau der Kommutatoren — 56

- 3.3 Ankerstromkommutierung — 58
- 3.3.1 Kommutierungsvorgang allgemein — 58
- 3.3.2 Qualitative Beschreibung des Kommutierungsvorgangs — 61
- 3.3.3 Zusammensetzung und Eigenschaften des Bürstenkörpers — 67
- 3.4 Funkentstörung bei Kommutatormotoren — 70
- 3.5 Geräuschverhalten — 71

Andreas Möckel, Tobias Heidrich und Heinz Weißmantel

4 Dauermagneterregte Gleichstrom-Kommutatormotoren — 72

- 4.1 Konstruktiver Aufbau — 72
- 4.1.1 Ständer — 72
- 4.1.2 Läufer — 73
- 4.1.3 Kommutierungssystem — 74
- 4.1.4 Lager — 75
- 4.1.5 Motoren mit eisenlosem Läufer — 76
- 4.2 Stationäres Betriebsverhalten — 78
- 4.2.1 Betriebskennlinien — 78
- 4.2.2 Wirkungsgrad — 81
- 4.2.3 Betriebsweise — 83
- 4.3 Dynamisches Betriebsverhalten — 84

Andreas Möckel, Tobias Heidrich und Heinz Weißmantel

5 Kommutatorreihenschlussmotoren, Universalmotoren — 89

- 5.1 Bezeichnung — 89
- 5.2 Charakteristische Merkmale — 91
- 5.3 Prinzipielles Betriebsverhalten — 94
- 5.3.1 Beschreibung der vereinfachten Anordnung — 94
- 5.3.2 Gleichstrombetrieb — 95
- 5.3.3 Wechselstrombetrieb — 96
- 5.4 Auslegung der Ständerwicklung für den Betrieb als Universalmotor — 99
- 5.5 Drehzahlstellung — 100
- 5.5.1 Anforderungen an die Drehzahl — 100
- 5.5.2 Spannungsstellung mit Transformator — 100
- 5.5.3 Ohmsche Widerstände zur Drehzahlstellung — 101
- 5.5.4 Wicklungsanzapfung — 102
- 5.5.5 Drehzahlstellung durch elektronische Stellglieder — 102
- 5.5.6 Stillsetzen des Motors — 104
- 5.5.7 Drehrichtungsumkehr — 105

Carsten Fräger und Hans-Dieter Stölting

- 6 Asynchronmotoren, Induktionsmotoren — 106**
- 6.1 Eigenschaften — 106
 - 6.2 Einsatzgebiete, Anwendungsbeispiele — 107
 - 6.3 Ausführungsarten — 109
 - 6.3.1 Aufbau — 109
 - 6.3.2 Blechschnitt — 111
 - 6.3.3 Rotor — 112
 - 6.4 Schaltungs- und Ausführungsarten der Ständerwicklung — 114
 - 6.4.1 Dreisträngige Motoren für Dreiphasen-Anschluss — 114
 - 6.4.2 Dreisträngige Motoren für Einphasen-Anschluss mit Kondensator — 115
 - 6.4.3 Zweisträngige Motoren für Einphasen-Anschluss mit Kondensatorhilfsstrang — 117
 - 6.5 Wirkungsweise — 121
 - 6.5.1 Asynchron-Drehstrommotoren — 121
 - 6.5.2 Asynchron-Wechselstrommotoren mit Kondensator-Hilfsstrang — 126
 - 6.5.3 Asynchron-Wechselstrommotoren mit Widerstandshilfsstrang — 135
 - 6.5.4 Feldoberwellen — 137
 - 6.6 Reversierbetrieb — 138
 - 6.6.1 Vertauschen von Haupt- und Hilfsstrang — 138
 - 6.6.2 Umkehr der Stromrichtung in einem Strang — 139
 - 6.7 Drehzahlstellen bei Asynchronmotoren — 139
 - 6.7.1 Polumschaltung — 139
 - 6.7.2 Änderung des Schlupfs bzw. der Rotorfrequenz — 141
 - 6.7.3 Frequenzänderung — 143
 - 6.8 Spannungsumschaltung — 145
 - 6.9 Spaltpolmotor — 146
 - 6.9.1 Einsatzgebiete — 146
 - 6.9.2 Wirkungsprinzip — 147
 - 6.9.3 Ausführungsarten — 148
 - 6.9.4 Betriebskennlinien — 149
 - 6.9.5 Änderung der Drehrichtung — 149
 - 6.9.6 Änderung der Drehzahl — 150

Carsten Fräger und Hans-Dieter Stölting

- 7 Synchronmotoren und -generatoren — 151**
- 7.1 Eigenschaften — 151
 - 7.1.1 Drehzahlverhalten — 151
 - 7.1.2 Lastwinkel — 152
 - 7.2 Einsatzgebiete, Anwendungsbeispiele — 153
 - 7.3 Ausführungsarten — 154

- 7.3.1 Synchronmotoren mit Magnetläufern — **158**
- 7.3.2 Hysteresemotor — **165**
- 7.3.3 Reluktanzmotor — **167**
- 7.3.4 Permanentmagneterregte Motoren mit anisotropem Läufer — **170**
- 7.3.5 Synchron-Klauenpolgenerator mit elektrischer Erregung — **172**
- 7.4 Betriebsverhalten Synchronmotor mit Kondensatorhilfsstrang — **176**
- 7.4.1 Symmetrischer Betrieb dreisträngiger Motor mit Kondensatorhilfsstrang — **176**
- 7.4.2 Symmetrischer Betrieb zweisträngiger Motor mit Kondensatorhilfsstrang — **177**
- 7.4.3 Komplexe Spannungsgleichungen einsträngiger Betrieb — **178**
- 7.4.4 Komplexe Spannungsgleichungen mit Kondensatorhilfsstrang, symmetrische Wicklung — **179**
- 7.4.5 Komplexe Spannungsgleichungen mit Kondensatorhilfsstrang, quasisymmetrische Wicklung — **183**
- 7.5 Anlauf von Permanentmagnet-Synchronmotoren ohne Anlaufkäfig — **184**
- 7.6 Reversierbetrieb — **186**
- 7.7 Drehzahlstellen, Drehzahlregelung bei der Synchronmaschine — **187**

Wolfgang Amrhein

- 8 Bürstenlose Permanentmagnetmotoren mit Block- und Sinuskommutierung — 188**
- 8.1 Einleitung — **188**
- 8.1.1 Definitionen — **188**
- 8.1.2 Verwandtschaften zu anderen Motorarten — **189**
- 8.2 Konstruktive Besonderheiten und resultierende Applikationen — **192**
- 8.2.1 Ausführung und Auswahl der Statorwicklung — **195**
- 8.2.2 Ausführung und Auswahl der Permanentmagnetbauformen — **202**
- 8.2.3 Ausführung und Auswahl der Motorbauform — **207**
- 8.3 Mathematische Modellierung des permanentmagneterregten Synchronmotors — **213**
- 8.3.1 Einfaches Maschinenmodell — **213**
- 8.3.2 Zweisträngiges Ersatzmodell für die feldorientierte Steuerung — **216**
- 8.3.3 Feldschwächbetrieb — **221**
- 8.3.4 Aus der Spannungsgleichung gewonnene Übertragungsfunktion — **222**
- 8.3.5 Beispiel für eine feldorientierte Regelung — **225**
- 8.3.6 Flussbasiertes Maschinenmodell — **226**
- 8.4 Elektronische Unterdrückung von Drehmomentschwankungen — **228**
- 8.4.1 Motor mit Mittelpunktanschluss der Wicklung — **229**
- 8.4.2 Motor ohne Mittelpunktanschluss der Wicklung — **230**

- 8.4.3 Praktische Ausführung einer Korrekturstromspeisung — 231
- 8.5 Entmagnetisierung der Permanentmagnete — 233
- 8.6 Motorkennlinien — 236

Wolfgang Amrhein und Johannes Schmid

- 9 Geschaltete Reluktanzmotoren — 238**
 - 9.1 Grundlagen — 239
 - 9.1.1 Energiewandlung und Drehmomentbildung — 241
 - 9.1.2 Radialkraftbildung — 244
 - 9.2 Mathematisches Modell — 245
 - 9.3 Typische Kennfelder — 247
 - 9.4 Leistungselektronik und Ansteuerung — 249
 - 9.4.1 Schaltzustände der Leistungselektronik — 250
 - 9.5 Motorischer und generatorischer Betrieb — 253
 - 9.6 Stromformung — 254

Marcus Herrmann und Thomas Roschke

- 10 Elektromagnetische Schrittantriebe — 256**
 - 10.1 Überblick — 256
 - 10.2 Bauformen von Schrittmotoren — 257
 - 10.3 Betriebsverhalten des Schrittmotors — 263
 - 10.3.1 Der Schrittmotor als Teil eines Antriebssystems — 263
 - 10.3.2 Schrittwinkel und Rotorausrichtung — 265
 - 10.3.3 Drehzahl — 268
 - 10.3.4 Drehmoment — 269
 - 10.3.5 Reibung und Positioniergenauigkeit — 273
 - 10.3.6 Schritt-Zeit-Verlauf — 274
 - 10.3.7 Betriebsbereiche und Grenzkennlinien — 277
 - 10.3.8 Ersatzmodell des Schrittmotors — 280
 - 10.4 Ansteuerung von Schrittmotoren — 282
 - 10.4.1 Ansteuerregime (Softwareeinfluss) — 282
 - 10.4.2 Elektrische Beschaltung von Schrittmotoren (Hardwareeinfluss) — 289
 - 10.5 Dynamik und Bewegungsabläufe — 297
 - 10.5.1 Dynamik von Schrittmotor und Antriebssystem — 297
 - 10.5.2 Typische Bewegungsabläufe — 298
 - 10.5.3 Referenzpunktbestimmung und Anschlagerkennung — 300
 - 10.5.4 Resonanzfrequenzen — 302
 - 10.6 Auswahlkriterien und Spezifikation für die Anwendung — 305

Axel Mertens

- 11 Leistungselektronik und Regler für Kleinantriebe — 306**
 - 11.1 Einleitung — 306

- 11.2 Elektronische Stellelemente — **306**
- 11.2.1 Analoge Stellelemente — **307**
- 11.2.2 Grundprinzip schaltender Stellelemente — **308**
- 11.2.3 Leistungselektronische Bauelemente — **309**
- 11.2.4 Gleichstromsteller — **317**
- 11.2.5 Wechselrichter — **322**
- 11.2.6 Dreiphasiger Wechselrichter — **323**
- 11.2.7 Diodengleichrichter — **328**
- 11.2.8 Gesteuerte Gleichrichter — **330**
- 11.2.9 Wechselstromsteller — **333**
- 11.3 Regler — **335**
- 11.3.1 Regelung der Gleichstrommaschine — **336**
- 11.3.2 Regelung eines Permanentmagnet-Synchronmotors — **347**
- 11.3.3 Regelung eines Asynchronmotors/Induktionsmotors — **353**

Thomas Bertolini und Thomas Fuchs

- 12 Schwingungen und Geräusche — 358**
- 12.1 Einführung — **358**
- 12.1.1 Relevanz der Geräuscentwicklung elektrischer Antriebe — **358**
- 12.1.2 Grundsätzliches zur Geräuscentstehung in elektromechanischen Systemen — **358**
- 12.2 Geräuscentwicklung bei elektrischen Kleinantrieben — **359**
- 12.2.1 Mechanisch verursachte Wechselkräfte — **359**
- 12.2.2 Elektromotorisch verursachte Wechselkräfte — **362**
- 12.3 Messung, Analyse und Prüfung von Geräuschen und Schwingungen — **363**
- 12.3.1 Messmittel nach aktuellem Stand der Technik — **363**
- 12.3.2 Vorgehensweise zur Analyse und Prüfung von Geräuschen — **365**
- 12.4 Hören und Hörempfinden — **372**
- 12.4.1 Bewertungskurven — **373**
- 12.4.2 Psychoakustische Größen — **374**

Andreas Wagener

- 13 Elektromagnetische Verträglichkeit bei elektrischen Kleinantrieben — 376**
- 13.1 Einführung in die EMV — **376**
- 13.2 Rechtlicher Rahmen — **377**
- 13.2.1 Maschinenrichtlinie (2006/42/EG) — **378**
- 13.2.2 Niederspannungsrichtlinie — **378**
- 13.2.3 EMV-Richtlinie — **378**
- 13.3 Elektromagnetische Kopplungen bei elektrischen Kleinantrieben — **380**
- 13.3.1 Leitungsgebundene Störungen — **381**

13.3.2	Kapazitive Kopplungen —	381
13.3.3	Induktive Kopplungen —	383
13.3.4	Galvanische Kopplung —	383
13.4	Funkausbreitung —	385
13.5	Typische Beobachtungen bei elektrischen Antrieben —	385
13.5.1	Störungen durch Schaltvorgänge und Funkenbildung —	385
13.5.2	Überspannung am Gerät durch elektrostatische Aufladung —	387
13.5.3	Überspannung durch unbeabsichtigte Schaltvorgänge —	388
13.6	EMV-Effekte im Überblick —	388
13.6.1	Störfestigkeit —	389
13.6.2	Störaussendung —	390
13.7	Messverfahren zur Bewertung der EMV —	391
13.8	Funktionserdung als Basis —	393
13.8.1	Schutzerdung —	394
13.8.2	Funktionserdung —	394
13.9	Räumliche Anordnung von Leitungen —	395
13.10	Entstörung durch Filter und Schirmung —	396
13.10.1	Kapazitive Filter —	397
13.10.2	Kombinierte Filter —	398
13.10.3	Schirmung und Gehäuse —	399
13.11	Entstörung eines DC-Motors —	400
13.11.1	Störverhalten bei unterschiedlicher Leitungslänge —	400
13.11.2	Entstörung des Motors über ein Vorschaltfilter —	405
13.12	Schutzmaßnahmen für elektronische Schaltungen —	405
13.12.1	Überspannungseffekte – Auswirkungen und Abhilfe —	405
13.12.2	LatchUp-Effekt —	408
13.12.3	Abhilfemaßnahmen —	409
13.12.4	Robuste Signalkodierung am Beispiel von Quadratursignalen —	411

Formelzeichen und Formelschreibweise — 415

Tabellenverzeichnis — 419

Abbildungsverzeichnis — 421

Die Autoren — 437

Literatur — 441

Stichwortverzeichnis — 457

Hans-Dieter Stölting und Carsten Fräger

1 Einleitung Elektrische Kleinantriebe

Schlagwörter: Umsatz, Absatz, Kennzeichen Kleinantriebe, Antriebssystem, Komponenten

1.1 Allgemeines

1.1.1 Wirtschaftliche Bedeutung der Kleinantriebe

Elektrische Kleinantriebe, deren obere Leistungsgrenze bei etwa 1 kW liegt, haben eine erhebliche wirtschaftliche Bedeutung. Nach der Statistik des Verbandes Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V. (ZVEI) betrug der Produktionswert der elektrischen Motoren und Generatoren in 2015 ca. 4,8 Mrd. € (Zeitraum 2010 bis 2015, siehe Abb. 1.1). Hinzu kommen die Stromrichter für drehzahlveränderbare Antriebe.

Die elektrischen Kleinmotoren erzielten in 2015 mit einer Stückzahl von 104 Mio. Stück und einem Produktionswert von 1,7 Mrd. € einen Anteil von 35 % am Gesamtproduktionswert für elektrische Maschinen. Abb. 1.1 zeigt die Aufteilung nach Produktgruppen und den Verlauf des Produktionswerts und der Stückzahlen von 2010 bis 2015. Gleichstrommotoren machten in 2015 mit mehr als 1 Mrd. € und 66 Mio. Stück den größten Anteil der Kleinmotoren aus. Kleinantriebe bis 37,5 W und Drehstrommotoren bis 750 W haben etwa den gleichen Produktionswert von 500 Mio. €.

Nach einem Rückgang in den Jahren 2012 und 2013 zeigen Stückzahl und Produktionswert besonders bei den Gleichstrommotoren seit 2014 wieder nach oben. Hingegen verlieren die Einphasenwechselstrommotoren zugunsten der Gleichstrommotoren sowohl beim Produktionswert als auch bei der Stückzahl an Bedeutung.

1.1.2 Kennzeichen kostengünstiger elektrischer Kleinantriebe

Kennzeichen elektromagnetischer Kleinantriebe ist die außerordentliche Vielfalt ihrer Einsatzgebiete. Werden sie in Konsumgütern verwendet, sind bei zum Teil sehr großen Stückzahlen (> 1 Mio. Stück pro Jahr) die Fertigungskosten so gering wie möglich zu halten. Diese Gegebenheiten erfordern, dass kostengünstige Kleinantriebe (low cost drives) nicht nur die elektromechanischen Bedingungen des speziellen Anwendungsfalles erfüllen, sondern auch konstruktiv möglichst gut sowohl an den anzutreibenden Mechanismus (Gerät) als auch an das wirtschaftlichste Fertigungsverfahren angepasst sein müssen. Typische Bedingungen sind zum Beispiel:

Hans-Dieter Stölting, Leibniz Universität Hannover

Carsten Fräger, Hochschule Hannover

<https://doi.org/10.1515/9783110565324-001>

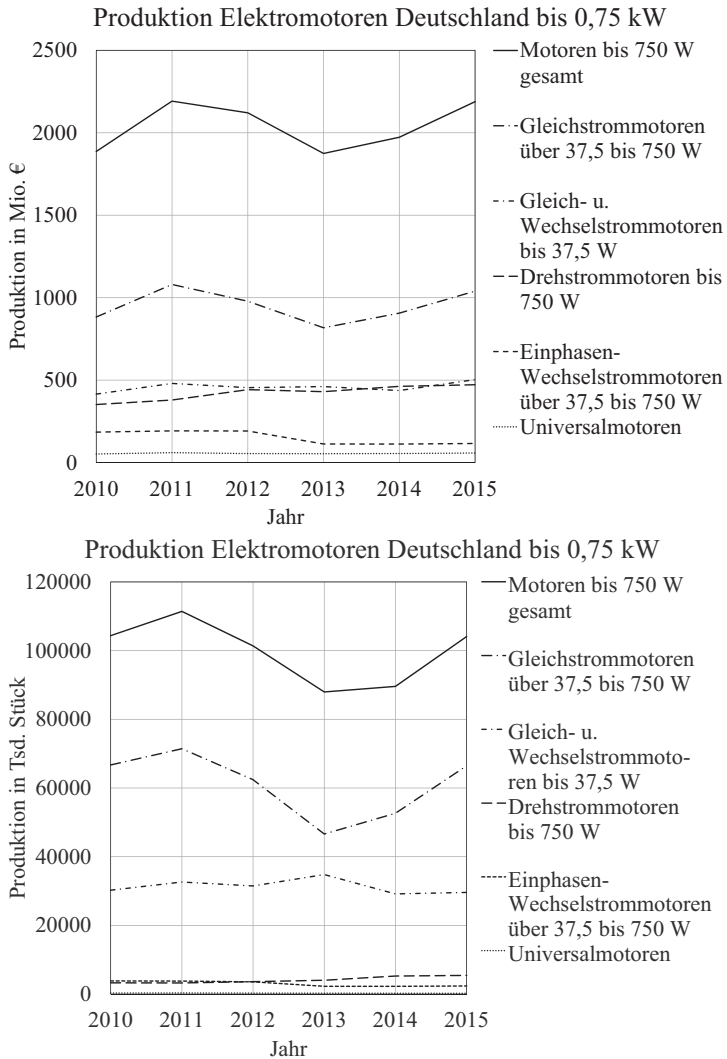


Abb. 1.1: Produktion von Kleinmotoren mit einer Bemessungsleistung $P_N < 750$ W in Deutschland von 2010–2015 [50].

- keine überzogenen Anforderungen an Leistungsgewicht und Wirkungsgrad;
- Integration in Gerät bzw. Übernahme von Gerätefunktionen durch Motorteile, z. B.:
 - Motorlagerschild ist gleichzeitig ein Teil des Pumpengehäuses, die Motorlagerung ist auch Lagerung für das Pumpenlaufrad, Abb. 1.2.
 - Motorlagerung ist Lagerung für die Pumpe, Motor ist im Pumpengehäuse integriert, Abb. 1.3.

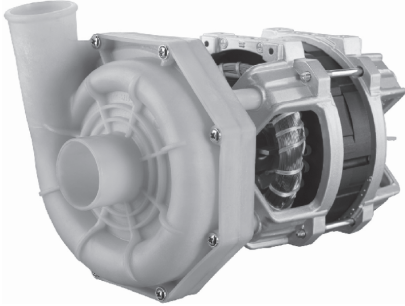


Abb. 1.2: Gehäuseloser Asynchronmotor und Pumpe als integrierter Antrieb, Motorlager sind auch Lager für das Pumpenrad, Motorlagerschild ist Teil der Pumpe (Werkbild Hanning).



Abb. 1.3: BLDC-Motor und Pumpe für Medizinanwendungen als integrierter Antrieb (Werkbild Johnson Medtec).

- weitgehend automatische Fertigung in Großserie:
 - Stanz-Biege-Füge-Technik;
 - Verwendung handelsüblicher Bauteile (keine Sonderausführungen z. B. für Magnete, Lager, Kondensatoren);
 - bei Drehzahlen unter 3000 1/min Ständer- und Läuferpakete aus unlegiertem Blech (Standardblech, oft ungeglüht eingesetzt), Ferritmagnete;
 - grobe Stufung der Abmessungen bei Motorfamilien (Außen-, Innendurchmesser, Paketlänge), großer Luftspalt;
 - geringer Nutfüllfaktor, möglichst einfache Wicklung, Backlackdraht;
 - möglichst wenig gestufte Wellen, Gleitlager;
 - möglichst einfache Elektronik.

So lassen sich einfache Gleichstrommotoren und Schrittmotoren sowie Synchron- und Asynchronmotoren in Großserien für den Consumer-Bereich produzieren.

1.1.3 Kennzeichen hochwertiger Kleinantriebe

Bei hochwertigen Kleinantrieben werden in der Regel deren Eigenschaften und Kennzeichen durch besondere, oft auch extreme Anforderungen der Applikation bestimmt. Dies führt z. B. zu folgenden Ausführungen und Kennzeichen:

- optimale elektromechanische und konstruktive Anpassung an das Gerät;
- Kleinserie: spanabhebende Bearbeitung, Zusammenfügen durch Schrauben, hochwertige Bauteile (Dynamoblech oder verlustarmes Spezialblech, Seltenerd-Magnete – selten SmCo, meistens NdFeB –, Wälzlager);
- gegebenenfalls Vier-Quadranten-Betrieb;
- besondere Eigenschaften bezüglich Leistungsgewicht, Wirkungsgrad (geringer Energiebedarf, geringe Erwärmung), Drehzahl, Rundlauf, Gleichlauf, Dynamik (geringe mechanische und/oder elektrische Zeitkonstante), Positionierung, Überlastbarkeit, Lebensdauer, Robustheit, Wartungsfreiheit, Geräusch- und Schwingungsarmut, Elektromagnetische Verträglichkeit, Unempfindlichkeit gegenüber ungünstigen Umweltbedingungen (Temperatur, Schwingungen, Beschleunigungen, Druck, Verschmutzung (staub-, wasser-, gasdicht), elektrische und magnetische Felder).

Infolge dieser unterschiedlichen Bedingungen entwickelte sich im Laufe der Zeit eine fast unübersehbare Ausführungsvielfalt, die sich durch neuere Entwicklungen der Mikro- und Leistungselektronik sowie der Werkstoffe, und zwar insbesondere der Magnetwerkstoffe, ständig erweitert. Herstellerkataloge geben eher das jeweilige Produktionsspektrum wieder als die vom Lager zu beziehenden Standardprodukte. Eine intensive Abstimmung zwischen Hersteller und Anwender von Antrieben für die jeweilige Anwendung ist daher im Allgemeinen unumgänglich.

1.2 Das elektromagnetische Antriebssystem

Ein elektromagnetisches Antriebssystem (Aufbau siehe Abb. 1.4) dient zur Erzeugung von Bewegungen. Es besteht aus einem informationsverarbeitenden Teilsystem, der Steuereinrichtung und energieübertragenden Funktionseinheiten, dem Stellelement, dem Antriebselement, dem Übertragungselement und dem Wirkelement. Je nach Aufgabe kann diese Struktur sehr komplex sein, z. B. mehrere Regler, mehrere Rückkopplungen, mehrere Beobachter usw. Zurzeit ist der klare Trend in der Antriebstechnik, einen größeren Teil der Funktion durch Leistungselektronik, Steuerung und Regelung abzubilden. So findet z. B. vermehrt ein Wechsel von den Gleichstrommotoren mit Kommutator zu den elektronisch kommutierten Motoren statt.

Die Aufgaben des Antriebssystems sind folgendermaßen auf seine Komponenten verteilt. Die Komponenten übernehmen dabei häufig mehrere Aufgaben gleichzeitig.

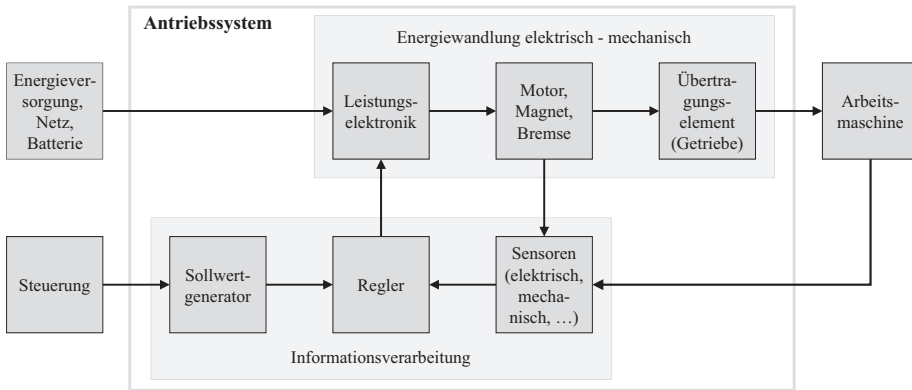


Abb. 1.4: Elektrisches Antriebssystem: Informationsverarbeitung, elektrischer Steller, elektromechanischer Energiewandler und Mechanik.

- **Aufgaben des informationsverarbeitenden Teilsystems** (Steuereinrichtung):
 - Vergleich der vorgegebenen Führungsgrößen bzw. Sollwerte (z. B. Drehmoment, Drehzahl, Drehwinkel; Kraft, Geschwindigkeit, Position usw.) mit den entsprechenden Istwerten bzw. Messwerten der Sensoren und Bildung der sich aus der Regelabweichung ergebenden Stellgrößen;
 - Erfassung der Störgrößen und Überwachung sowie Schutz des Antriebssystems einschließlich des angetriebenen Elements;
 - Ausgabe von Meldegrößen an übergeordnete Überwachungseinrichtungen oder Systeme;
- **Aufgaben des elektrischen Energie- bzw. Leistungsumformers** (Stellelement, Leistungsteil, Endstufe):
 - Umformung der elektrischen Energie/Leistung (z. B. von Drehstrom in Gleichstrom);
 - Anpassung der Motorspannung an die Versorgungsspannung;
 - Umsetzung der Eingangssignale (Stellgröße) in die vom Motor nutzbaren Ströme, d. h., im Stellelement treffen sich der Energie- und der Informationsfluss;
- **Aufgaben des elektromechanischen Energiewandlers** (Antriebselement, Motor):
 - Erzeugung eines Drehmoments oder einer Kraft;
 - Erzeugung einer stetigen oder schrittweisen, rotatorischen oder translatorischen Bewegung;
 - indirekte Messung von Kraft oder Drehmoment aus dem erforderlichen Strom;
- **Aufgaben des mechanischen Energieumformers** (Übertragungselement, Getriebe):
 - Änderung des Drehmoments und der Drehzahl;

- Verringerung des Trägheitsmoments der Last;
- Umformung einer rotatorischen in eine translatorische Bewegung;
- Übertragung der Bewegungsinformation von der Last auf den Antrieb zur indirekten Lage- und Geschwindigkeitsmessung, Kraft- oder Drehmomentmessung.

1.3 Die Antriebskomponenten

1.3.1 Motoren

1.3.1.1 Motorsystematik – Möglichkeiten zur Kommutierung elektrischer Antriebe

In elektrischen Antrieben muss für eine kontinuierliche Bewegung in allen praktisch relevanten Motoren der Strom in den einzelnen Wicklungsteilen kommutiert/gewendet werden. Die grundsätzlichen Eigenschaften elektrischer Motoren hängen damit unter anderem mit dem Verfahren zusammen, mit dem ihre Wicklungen an Spannung gelegt werden, sodass der Strom jeweils in der passenden Richtung fließt.

Es gibt dabei grundsätzlich die Kommutierung durch die Motordrehung oder durch eine vorgegebene Wechselspannung. Die Kommutierung durch die Motordrehung kann mechanisch oder elektronisch erfolgen. So gibt es folgende drei grundsätzliche Möglichkeiten der Kommutierung:

- **selbstgeführte mechanische Kommutierung:** Kommutierung durch die Motordrehung mit einem mechanischen Kommutator und Bürsten (Gleichstrommotor, Universalmotor);
- **selbstgeführte elektronische Kommutierung:** Kommutierung durch die Motordrehung mit einer von der Motordrehung gesteuerten Leistungselektronik (bürstenloser Permanentmagnetmotor mit Blockkommutierung (BLDC) oder Sinuskommutierung (BLAC));
- **fremdgeführte Kommutierung** mit der vorgegebenen Wechselspannung des Netzes oder eines Umrichters (Synchronmotoren, Asynchronmotoren).

Zurzeit ist ein starker Trend zur elektronischen Kommutierung zu verzeichnen. Für viele neue Anwendungen, die eine Drehzahlstellung erfordern, werden elektronisch kommutierte Permanentmagnetmotoren mit Block- oder Sinuskommutierung statt des klassischen Gleichstrommotors mit Spannungsstellung eingesetzt.

Tabelle 1.1 zeigt die wichtigsten Arten elektromagnetischer Kleinmotoren. Die grundsätzliche Unterscheidung erfolgt wie oben dargestellt nach der Kommutierung. Die Aussagen bezüglich ihrer Eigenschaften gelten nur im Vergleich von Motortypen gleicher Größe bzw. Leistung.

Die grundsätzlichen Schaltungen elektrischer Kleinmotoren bei direktem Netz- bzw. Batteriebetrieb einschließlich der typischen Drehzahl-Drehmoment-Kennlinien sowie die Möglichkeiten der Drehzahlstellung zeigt Abb. 1.5.

Tab. 1.1: Motorsystematik elektrischer Antriebe, Art der Kommutierung.

selbstgeführte Antriebe		fremdgeführte Antriebe	
mechanische Kommutierung	elektronische Kommutierung	vorgegebene Frequenz	
Wechselstrom-Kommutator-Motoren (siehe Kapitel 5)	Gleichstrom-Kommutator-Motoren (siehe Kapitel 4)	elektronisch kommutierte Gleichstrommotoren (BLDC-Motoren) (siehe Kapitel 8)	elektronisch kommutierte Synchronmotoren (BLAC-Motoren) (siehe Kapitel 8)
Permanente-erregter Gleichstrommotor	Permanente-erregter Gleichstrommotor	Motor mit Permanentmagnetläufer, Blockstromtechnik	Motor mit Permanentmagnetläufer oder Hybridläufer, mit Anlaufvorrichtung (Kurzschlusskäfig o. ä.), 3~ oder 1~
Reihenschlussmotor, Nebenschlussmotor, fremderregter Motor	geschalteter Reluktanzmotor	Motor mit Permanentmagnetläufer oder Hybridläufer, Sinusstromtechnik	Motor mit Permanentmagnetläufer oder Hybridläufer, mit Anlaufvorrichtung (Kurzschlusskäfig 3~ oder 1~ o. ä.), 3~ oder 1~
weiter Drehzahlbereich $n \gg 3000 \frac{1}{\text{min}}$ möglich \rightarrow kleine, leichte Antriebe	weil $n \gg 3000 \frac{1}{\text{min}}$ möglich \rightarrow kleine, leichte Antriebe	1~Motoren mit Kondensator, Reluktanzläufer, Hystereseläufer, Schrittmotoren mit Magnetläufer, Reluktanzläufer, Hybridläufer	Kondensatormotor, Widerstandshilfsstrang-Motor, Spaltpolmotor
wegen Kommutator weniger robust, geringe Lebensdauer, vergleichsweise laut	robust und geräuscharm	am 50 Hz-Netz Drehzahl $n \leq 3000 \frac{1}{\text{min}}$, höhere Drehzahlen und Drehzahlstellung über Frequenzänderung mit Frequenzumrichter	Asynchronmotoren, Induktionsmotoren, ohne Regelung lastabhängige Drehzahl (siehe Kapitel 6)
Elektronik zur Drehzahlstellung kostengünstig	Leistungselektronik relativ teuer, zurzeit aber starke Kostensenkung bei kleinen Leistungen durch monolithische Schaltungen, die sowohl die Leistungselektronik als auch die Steuerelektronik enthalten, sowie Schaltungen, welche die gesamte Steuerung und Regelung enthalten und neben den Leistungstransistoren nur wenige externe Bauteile benötigen	robust und geräuscharm, bei konstanter Drehzahl am Wechselspannungsnetz sehr kostengünstig	
abnehmender Anteil \curvearrowright	zunehmender Anteil \curvearrowleft		

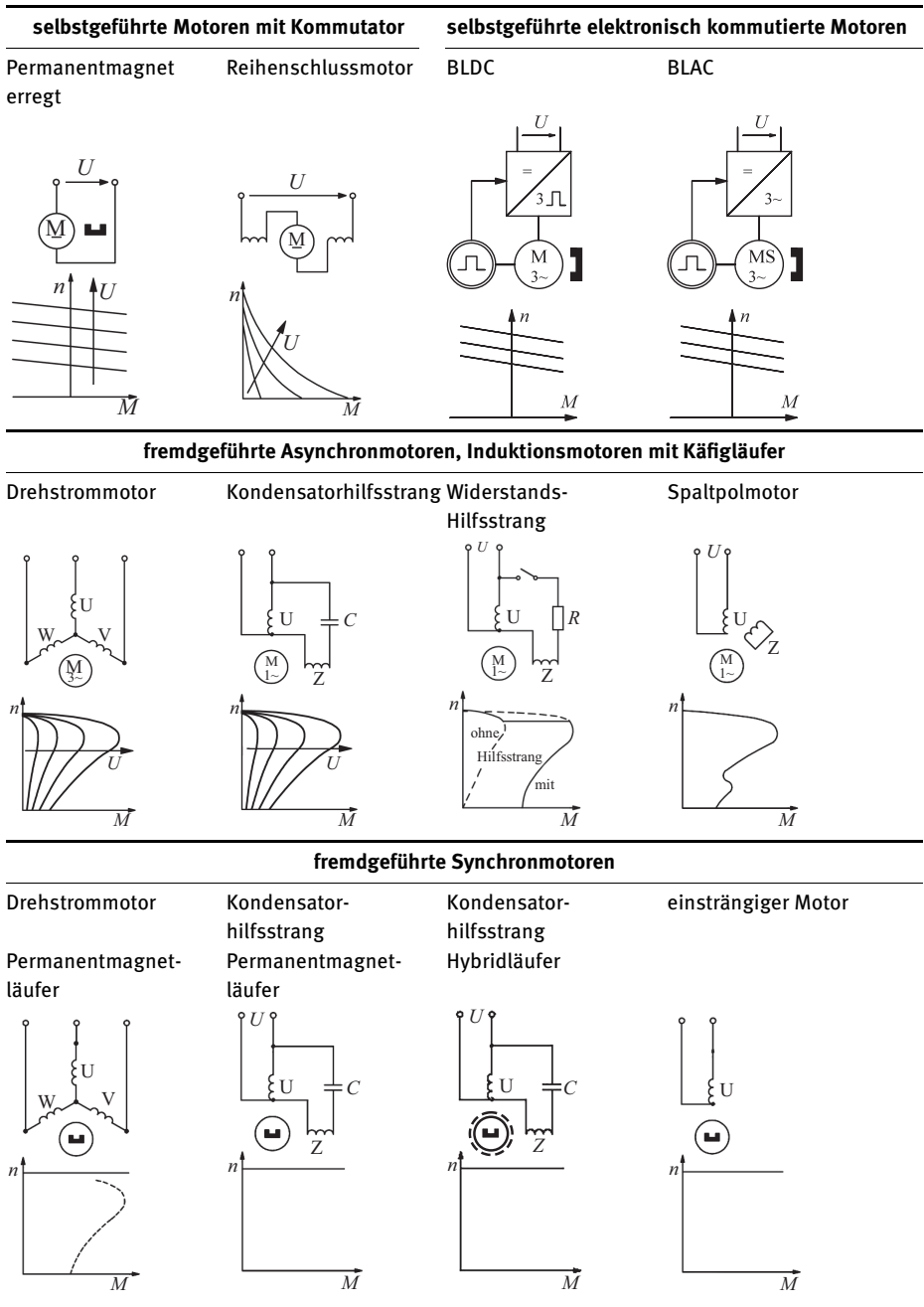


Abb. 1.5: Motorsystematik und Schaltungen direkt an der Versorgungsspannung betriebener Kleinmotoren, Gleichspannungsnetz oder Wechselspannungsnetz, Auswahl häufig vorkommender Ausführungen.

1.3.1.2 Grundsätzliche Konstruktionsmöglichkeiten

Im Folgenden sind wichtige Konstruktionsmöglichkeiten mit ihren besonderen Eigenschaften stichwortartig beschrieben. Da jede elektrische Maschine in fast allen der folgenden Ausführungsvarianten und Kombinationen gebaut werden kann, ergibt sich die schon oben erwähnte fast unübersehbare Vielfalt.

- **Ständer-Läufer-Konfiguration** (Abb. 1.6)
 - **Walzenläufer:** häufigste Bauform wegen kostengünstiger Fertigung, geringem Motordurchmesser und geringem Trägheitsmoment (besonders bei schlankem Läufer);
 - **Scheibenläufer:** geringe Baulänge, oft mit eisenloser Wicklung, Gefahr hoher axialer Kräfte bei Läufern mit hart- oder weichmagnetischen Bauteilen (geringe Lagerlebensdauer und Gefahr von Lagerschäden), in der Regel größeres mechanisches Trägheitsmoment;
 - **Innenläufer:** häufigste Bauform wegen guter Kühlung der Ständerwicklung, einfacherer Lagerung und des einfachen Einbaus (kein rotierender Außenmantel);
 - **Zwischenläufer:** Ausführung als Glockenläufer oder Scheibenläufer, insbesondere bei eisenloser Wicklung geringe elektrische und mechanische Zeitkonstanten, günstigere Kommutierung, gutes Gleichlaufverhalten, Glockenläufer aus mechanischen Gründen nur für kleinere Leistungen (i. Allg. < 100 W) bzw. bei größeren Leistungen (bis ca. 250 W) nur für geringere Drehzahlen, bei EC- und Asynchronmotoren aufwendige Ständerfertigung (Blechpaket, Wicklung); Zwischenständer: insbesondere bei nutenloser Ständerwicklung gutes Gleichlaufverhalten, bei mitrotierendem magnetischem Rückschluss keine Wirbelstrommomente und -verluste;
 - **Außenläufer:** für besondere Anwendungszwecke wie Lüfter und Wickler, Antriebe mit gutem Gleichlaufverhalten, oft einfacheres Bewickeln des Ständers, schlechtere Ständerkühlung;
- **Schnittsymmetrie** (Abb. 1.7)
 - **Zweiachsig symmetrische Schnitte** (Ständer und Läufer liegen konzentrisch zueinander): oft günstiger einbaubar, bessere Ständerkühlung;
 - **Einachsig symmetrische Schnitte** (unsymmetrische, U-Schnitte, skeleton type): meistens kostengünstiger zu fertigen, manchmal Geräuschprobleme dadurch, dass Wechselflüsse die einseitig befestigten Pole zum Schwingen anregen;
- **Polfolge** (Abb. 1.8)
 - **Heteropolar-Motoren/Wechsepol-Motoren** (Abb. 1.8 links): entlang dem Umfang wechselnde Polarität, infolge des großen magnetischen Flusses günstiges Leistungsgewicht, daher überwiegend gefertigt;
 - **Homopolar-Motoren/Gleichpol-Motoren** (Abb. 1.8 rechts): entlang der Achse wechselnde Polarität, wicklungsloser Läufer mit großer Anzahl von

Zähnen infolge der Luftspaltschwankungen zwar geringe, aber hochpolige Flussschwankungen;

– **Wicklungsausführung**

- In Nuten verteilte Wicklung: teuer, aber i. Allg. günstigere Form des magnetischen Felds (geringere Verluste); Anwendung bei Statorwicklungen für Asynchronmotoren, Synchronmotoren sowie Rotorwicklungen für Gleichstrommotoren und Wechselstrommotoren mit Kommutator;
- Konzentrierte Wicklung auf ausgeprägten Polen: einfache Fertigung, elektromagnetisch ungünstiger bei Synchron- und Asynchronmotoren; Anwendung bei Synchronmotoren, Spaltpol-Asynchronmotoren, bürstenlose Gleichstrommotoren, Erregerwicklungen (bei Kleinantrieben selten);
- Luftspaltwicklung, eisenlose, nutenlose, selbsttragende Wicklung: gutes Gleichlaufverhalten, günstigere Kommutierung wegen geringerer Wicklungsinduktivität, Motorausnutzung geringer wegen größerem Luftspalt;
- Ringwicklung: für Klauenpolsysteme (siehe Abschnitt 7.3), einfachste Konstruktion für hohe Polzahlen; Nachteil von Klauenpolen: starke Streuung, hohe Wirbelstromverluste bei Wechsel- und Drehfeldern; Anwendung vor allem bei Schrittmotoren;

– **Bewegungsart**

- Rotation: überwiegend Motoren mit rotierendem Läufer wegen günstigerer Kosten, häufig mit Getriebe; ggf. Umwandlung der Rotation in eine Translation mit Zahnriemen, Spindeln oder Hebeln;
- Translation: Linearmotoren wegen höherer Kosten im Konsumgüterbereich nicht verwendet (statt dessen rotierende Motoren mit Spindeln, auch als Hohlwelle, Zahnstangen oder Zahnriemen), begrenzte Bewegung, Antriebe individuell an Gerät angepasst;
- Direktantriebe ohne Getriebe für Rotation oder Translation: Vorteil: Getriebe-probleme entfallen, z. B. kein Spiel bei Positionsantrieben; Nachteil: wegen fehlendem Getriebe keine Vergrößerung des Motormoments bzw. Verringerung des Lastträgheitsmoments möglich; in der Regel teurer als Lösungen mit Getriebe;
- Motoren mit sehr kurzer Bewegung: Elektromagnete, Schwinganker- und Tauchspul-Motoren;
- stetige, schrittweise oder schwingende Bewegung;
- dauernder, kurzzeitiger, aussetzender usw. Betrieb.

1.3.2 Elektronische Schaltungen

Abbildung 1.9 zeigt die Möglichkeiten elektronisch betriebener Kleinantriebe, die im Folgenden für eine erste Orientierung stichwortartig beschrieben werden. Einzelheiten zur Leistungselektronik gibt Kapitel 11 wieder.

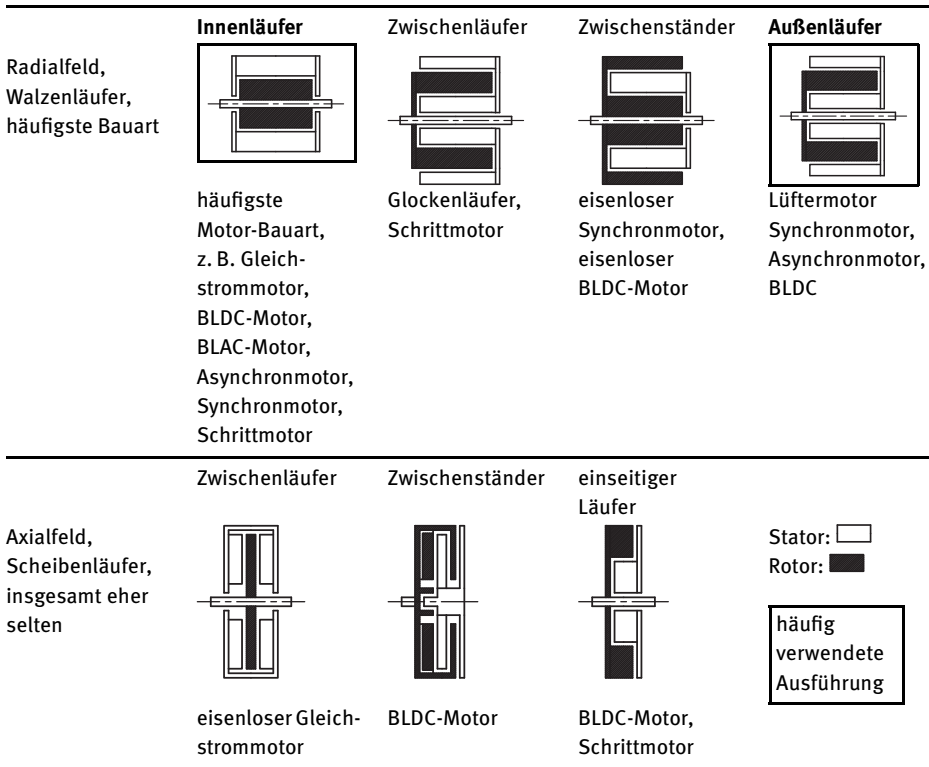


Abb. 1.6: Motorensystematik: Ständer-Läufer-Konfigurationen, typische Verwendungen der einzelnen Konfigurationen.

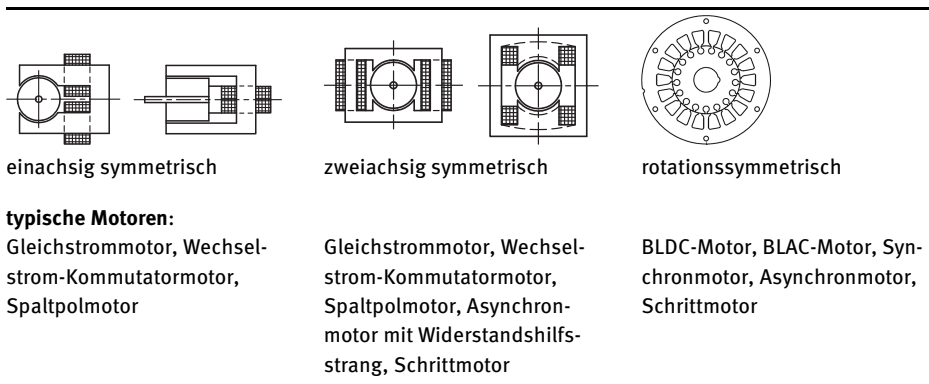
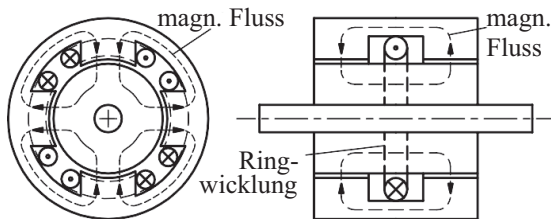


Abb. 1.7: Motorsystematik: Schnittsymmetrie.

1.3.2.1 Schaltungen für Gleichstrommotoren mit Kommutator

Zur Drehzahlstellung beim Betrieb am Gleichspannungsnetz, z. B. Batterienetz, werden häufig Chopper eingesetzt (Abb. 1.9a). Die Gleichspannung wird gepulst, sodass

**Wechselpolmotor:**

Magnetpole in Umfangsrichtung abwechselnd Nord- und Südpole

Gleichpolmotor:

in Umfangsrichtung immer Nord- bzw. Südpol, Stärke des Magnetfelds variiert in Umfangsrichtung

Abb. 1.8: Motorsystematik: Polfolge in Umfangsrichtung.

der Mittelwert der Spannung über das Puls-Pausen-Verhältnis eingestellt werden kann. Die Transistoren arbeiten als Schalter, so entstehen nur geringe Verluste und ein günstiger Wirkungsgrad.

Bei nur einer Drehrichtung und einer Drehmomentenrichtung reicht ein Transistor mit Freilaufdiode (Ein-Quadranten-Betrieb, 1Q-Betrieb). Die Freilaufdiode übernimmt den Motorstrom nach dem Abschalten des Transistors.

Für beide Drehrichtungen und beide Drehmomentenrichtungen (Vier-Quadranten-Betrieb, 4Q-Betrieb) sind vier Transistoren und Freilaufdioden in einer Brückenschaltung (H-Brücke) erforderlich:

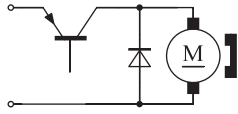
- geringer bis mittlerer Aufwand für die Elektronik, für kleine Leistungen als komplette integrierte Schaltung erhältlich;
- gute Bürstenlebensdauer, da der Strom nicht lückt;
- je nach Umfang der Schaltung Ein-Quadranten- bis Vier-Quadranten-Betrieb möglich.

Der Betrieb am Wechselstromnetz erfolgt mit einem ungesteuerten Brücken-Gleichrichter. Zur Drehzahlstellung wird der Gleichrichter mit einer Phasenanschnittsteuerung mit Triac kombiniert (Abb. 1.9b):

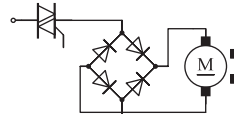
- sehr einfache Schaltung
- Reduzierung der Lebensdauer durch lückenden Strom
- hohe Stromüberschwingungen

Problem bei permanentmagneterregten Motoren: Die Ankerwicklung muss für Netzspannung ausgelegt werden. Dies bedeutet eine hohe Kommutatorstegzahl und eine hohe Nutzahl, damit die Spannung zwischen zwei Stegen auf einen zulässigen Wert begrenzt wird (Details siehe Kapitel 3 und 4). Bei einfachen Antrieben erfolgt keine zusätzliche Glättung mit einem Kondensator. Der Motor wird also mit Misch-

Gleichstrom
Kommutatormotor

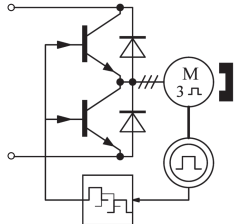


(a) Chopper

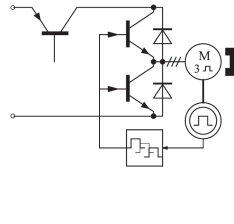


(b) Phasenanschnitt
mit Gleichrichter

bürstenloser
Gleichstrommotor

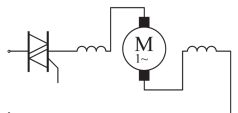


(c) Blockkommutierung
ohne Chopper



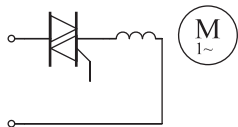
(d) Blockkommutierung mit Chopper

Wechselstrom
Kommutatormotor

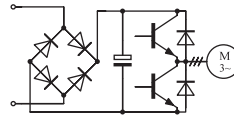


(e) Phasenanschnitt

Asynchronmotor

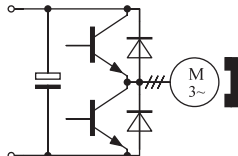


(f) Phasenanschnitt

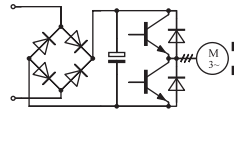


(g) Pulswechselrichter
mit Gleichrichter

Synchronmotor

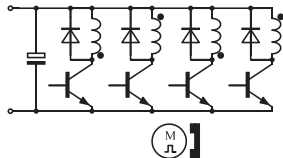


(h) Pulswechselrichter

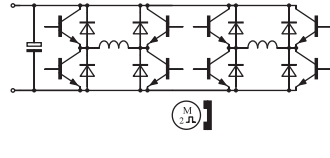


(i) Pulswechselrichter
mit Gleichrichter

Schrittmotor



(j) unipolar



(k) bipolar

Abb. 1.9: Übersicht über elektronisch betriebene Kleinantriebe, Hinweis: Es werden in den Schaltungen einheitlich Bipolartransistoren angegeben, auch wenn in realen Schaltungen häufig MOS-Feld-effekt-Transistoren eingesetzt werden. Details siehe Kapitel 11 und die Abschnitte zu den einzelnen Motorarten.

strom (Gleichstrom + Wechselstrom) betrieben. Der Wechselstrom kann zur Entmagnetisierung der Permanentmagnete führen.

Für eine etwa konstante Drehzahl wird die Spannung stromabhängig angehoben. Bei hohen Anforderungen an die Drehzahlkonstanz erfolgt eine Drehzahlregelung mit einem Drehzahlsensor und Regler.

Positionsregelung/Winkelregelung gegebenenfalls einschließlich Erzeugung eines Haltemoments: H-Brücke und Sensor zur Positionserfassung, Reglerstruktur ist üblicherweise Kaskadenregelung mit Positionsregler und unterlagerter Drehzahl- und Stromregelung, Vorteil von GM: nur ein Stromwert muss geregelt werden.

1.3.2.2 Schaltungen für bürstenlose Gleichstrommotoren

Die Leistungselektronik besteht aus einem dreiphasigen Wechselrichter, der an die Stränge blockförmige Spannungen anlegt. Die Ansteuerung des Wechselrichters erfolgt durch den Winkelgeber am Motor. Die Elektronik schaltet die Wicklungsstränge im Stator in Abhängigkeit von der Rotorlage zyklisch weiter (Abb. 1.9c):

- mittlerer Aufwand für die Leistungselektronik, bei kleinen Leistungen häufig als komplette integrierte Schaltung verfügbar;
- hohe Lebensdauer des Antriebs, da Bürstenverschleiß entfällt;
- leiser Antrieb, da Bürstengeräusche entfallen;
- hoher Verdrahtungsaufwand.

Da nur eine blockförmige Spannung erzeugt wird, muss der Winkelgeber nur sechs Schaltzustände an den Wechselrichter melden. Daher sehr kostengünstig realisierbar: häufig aus einem Permanentmagnetrad und drei Hallsensoren mit binärer Auswertung. Alternativ erfolgt die Erfassung der Rotorlage durch im Stator integrierte Sensoren oder sensorlos durch Auswertung der im gerade nicht bestromten Statorstrang induzierten Spannung.

Zur Drehzahlstellung wird in Reihe mit dem Wechselrichter ein Chopper geschaltet oder drei der sechs Schalter des Wechselrichters werden gepulst (Abb. 1.9d). Zum Betrieb am Wechselstromnetz wird der Wechselrichter mit Chopper aus einem Gleichrichter mit Gleichspannungszwischenkreis gespeist.

Für eine Drehzahlregelung wird entweder ein einfacher Tacho angebaut oder es wird die im gerade nicht bestromten Statorstrang induzierte Spannung zur Drehzahlmessung herangezogen. Die Positionsregelung/Winkelregelung erfolgt wie bei Gleichstrommotoren mit Kommutator, allerdings müssen zwei oder drei Ströme geregelt werden. Es ist aber eine höhere Dynamik möglich, weil die Kommutierung nicht mechanisch erfolgt.

1.3.2.3 Schaltungen für Wechselstrom-Kommutator-Motor/Universalmotor

Anwendungen für Wechselstrom-Kommutator-Motoren sind hauptsächlich im Konsumgüterbereich zu finden, weil ein direkter Wechselstrombetrieb möglich ist und ei-

ne elektronische Drehzahlstellung mit der Phasenanschnittsteuerung besonders einfach und kostengünstig realisiert werden kann.

Typischerweise erfolgt eine Vollwellensteuerung mit Triac entsprechend Abb. 1.9e. So werden beide Stromhalbschwingungen genutzt, daher ist diese Schaltung auch für größere Leistungen bis zu mehreren kW geeignet. Die Zündung des Triac erfolgt zunehmend durch einen Phasenanschnittsteuer-IC, da damit eine zuverlässige Zündung gewährleistet werden kann und der Antrieb gleichmäßig läuft:

- sehr kostengünstig
- sehr klein, lässt sich leicht z. B. in den Handgriff integrieren
- starke Oberschwingungen
- reduzierte Bürstenlebensdauer

Für höhere Ansprüche wird der Anschchnittsteuerung eine Gleichrichtung nachgeschaltet, die folgende Vorteile bietet:

- Strom lückt nicht mehr
- Verbesserung der Kommutierung, Erhöhung der Lebensdauer
- höhere Leistung des Motors bei gleicher Baugröße

Problem von Universalmotoren/Wechselstrom-Kommutatormotoren: Die Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie wird bei kleiner Spannung weicher, die Drehzahl sinkt im gesteuerten Betrieb überproportional mit zunehmender Belastung. Daher ist oft eine Drehzahlsteuerung oder -regelung erforderlich:

- kostengünstig: Kennliniensteuerung mit stromabhängiger Spannungsanpassung (kann im Phasenanschnittsteuer-IC integriert werden);
- genau: Drehzahlgeber und Regler zur Steuerung der Phasenanschnittsteuerung.

Für viele Anwendungen, z. B. Bohrmaschinen, Küchengeräte, ist eine Steuerung vollkommen ausreichend.

1.3.2.4 Schaltungen für Asynchron-Motoren, Induktionsmotoren

Phasenanschnittsteuerung zur Spannungsstellung

Es ist die einfachste und kostengünstigste Schaltung (siehe Abb. 1.9f), die aber nur einen sehr eingeschränkten Drehzahlstellbereich besitzt. Die Frequenz bleibt konstant, sodass auch die synchrone Drehzahl konstant bleibt. Die Drehzahlstellung erfolgt durch Vergrößerung des Schlupfs s bei kleinen Spannungen (Details in Abschnitt 6.7.2):

- sehr eingeschränkter Drehzahlstellbereich;
- schlechte Überlastbarkeit, da Kippmoment wegen $M_{\text{kipp}} \sim U_S^2$ sehr stark mit der Spannung zurück geht;
- hohe Verlustleistung, da die Verluste wegen $P_{\text{VR}} \sim s$ bei kleinen Drehzahlen ansteigen.

Frequenzumrichter

Aufwendige Wechselrichterschaltung für dreisträngige Motoren: Drehstrom-Asynchronmotoren und Drehstrom-Synchronmotoren, Schaltung in Abb. 1.9g. Stellung der Drehzahl durch Variation von Spannung und Frequenz mit einem Pulswechselrichter (Details in Abschnitt 6.7.3):

- Drehzahlstellung vom Stillstand bis zur Bemessungsdrehzahl mit hohem Kippmoment und Dauerdrehmoment;
- Feldschwächung, d. h., weitere Drehzahlerhöhung weit über die Bemessungsdrehzahl hinaus mit abnehmendem Drehmoment möglich;
- bei Wahl hoher Pulsfrequenzen: geräuscharmer Betrieb.

Für eine konstante Motorausnutzung ist ein konstantes Verhältnis induzierte Spannung/Frequenz U_1/f Voraussetzung. Mit zunehmender Drehzahl/Frequenz verringert sich wegen des abnehmenden Spannungsabfalls an der Statorwicklung der Unterschied zwischen U_1 und (konstanter) Klemmenspannung U_S und damit U_1/f . Um über den gesamten Drehzahlbereich ein gleichbleibendes Drehmoment oder eine belastungsunabhängige Drehzahl zu erreichen, ist daher gegebenenfalls Abhilfe erforderlich:

- $I \cdot R$ -Kompensation für gleichbleibendes Drehmoment;
- Schlupffrequenzkompensation für belastungsunabhängige Drehzahl.

Bei der $I \cdot R$ -Kompensation wird die Klemmenspannung um einen stromproportionalen Anteil höher als die gewünschte induzierte Spannung gewählt.

Bei der Schlupfkompensation erfolgt die Berechnung der Schlupffrequenz für die erwartete Belastung aus den Motordaten. Die Summe aus erwarteter Drehzahl- und Schlupffrequenz ist die vom Frequenzumrichter zu liefernde Drehfeldfrequenz.

Verbesserung der Antriebseigenschaften durch Regelung

- Drehzahlregelung zur Verbesserung der Drehzahlkonstanz: Der Frequenzumrichterantrieb wird um einen Drehzahlsensor (Tachogenerator, Inkrementalgeber) und einen Regler erweitert.
- Drehmomentregelung: Zweck ist die schnelle und genaue Einstellung des Drehmoments wie beim GM; da beim ASM die Lage des Drehfelds bezüglich der Läuferlage variabel ist, ist eine Umrechnung der Motorströme und -spannungen des dreiphasigen Systems in ein sich an einer elektrischen Größe (Fluss) orientierendes Koordinatensystem erforderlich (feldorientierte Regelung, Vektorregelung). Die Berechnung des Motorflusses und der Stellgrößen erfolgt mit einem Motormodell.
- Positionsregelung/Winkelregelung zum genauen Anfahren und Halten von Positionen, Abfahren von Konturen: Ähnlich wie beim GM, Positionsregler mit unterlagerter Drehzahl- und Stromregelung sowie zusätzlicher Flussregelung.

Vektor- und Positionsregelung werden häufig im Frequenzumrichter integriert angeboten.

1.3.2.5 Schaltungen für Synchron-Motoren

Aufwendige Wechselrichterschaltung für dreisträngige Motoren (Drehstrom-Synchronmotoren), Schaltung in Abb. 1.9h und i. Stellung der Drehzahl durch Variation von Spannung und Frequenz mit einem Pulswechselrichter (Details in Abschnitt 7.7):

- Drehzahlstellung vom Stillstand bis zur Bemessungsdrehzahl mit hohem Kippmoment und Dauerdrehmoment;
- bei Wahl hoher Pulsfrequenzen: geräuscharmer Betrieb;
- Feldschwächung, d. h., weitere Drehzahlerhöhung weit über die Bemessungsdrehzahl hinaus mit abnehmendem Drehmoment je nach Motorauslegung nur eingeschränkt möglich, da das Magnetfeld weitgehend durch die Permanentmagnete festgelegt ist.

Eine separate Drehzahlregelung ist wegen der festen Zuordnung zwischen Frequenz und Drehzahl häufig nicht erforderlich. Zur Verbesserung der Betriebseigenschaften erfolgt häufig eine Schwingungsdämpfung durch gezielte Variation der Phasenlage der Statorspannung in Abhängigkeit vom Statorstrom.

- Drehzahlstellung mit Frequenzumrichter ohne Drehzahlsensor: Beschleunigung und Verzögerung entlang einer Frequenzrampe;
- Drehzahlregelung: zusätzlich Drehzahlgeber und -regler;
- Positionsregelung/Winkelregelung: zusätzlicher Positionsgeber, Reglerstruktur identisch der für GM und ASM: Positionsregler mit unterlagertem Drehzahl- und Stromregler als Kaskadenregler.

Die Struktur der Regelung ist einfacher als bei Asynchronmotoren, da das Feld im Rotor eingepreßt ist und so die Richtung des Magnetfelds über den gemessenen Rotorwinkel bekannt ist.

1.3.2.6 Schaltungen für Schrittmotoren

Die Positionierung erfolgt bei gegebener Schrittweite über die Anzahl der Impulse (Voll- oder Halbschrittbetrieb). Steuerfrequenz wird von Elektronik vorgegeben. Die Ansteuerung kann unipolar erfolgen, d. h., in einer Spule fließt der Strom immer in der gleichen Richtung (Abb. 1.9j). Alternativ erfolgt eine bipolare Ansteuerung mit wechselnden Stromrichtungen in den Spulen (Abb. 1.9k):

- offener Steuerkreis für die Positionierung, daher kostengünstig;
- angepasste Impulsfolge für Starten und Stoppen erforderlich;
- unipolare Schaltung mit geringerem Elektronikaufwand aber geringerer Motorausnutzung;
- bipolare Schaltung mit höherem Elektronikaufwand aber besserer Motorausnutzung.

Für kleine Leistungen stehen komplett integrierte Schaltungen zur Verfügung, die sowohl den Steuerungs- als auch den Leistungsteil enthalten.

Eine feinere Positionierung erfolgt durch Mikroschrittbetrieb: Unterteilung eines Vollschriffs in eine Anzahl Mikroschritte durch pulswellenmodulierte (PWM) Ansteuerung benachbarter Wicklungen.

Gelegentlich werden Schrittmotoren als Servoantrieb mit Positionsgeber und Reglerstruktur ähnlich der von anderen Antriebsarten für Stellantriebe verwendet. Durch den Mikroschrittbetrieb und die Positionsrückführung sind dabei eine kontinuierliche Drehbewegung und eine exakte Positionierung möglich.

Carsten Fräger und Hans-Dieter Stölting

2 Magnetkreis, Permanentmagnete, Kraft- und Drehmomenterzeugung

Schlagwörter: Permanentmagnete, Magnetmaterialien, Magnetkreis, Krafterzeugung, Drehmomenterzeugung

2.1 Magnetfeld in elektrischen Maschinen

Bei den meisten elektrischen Maschinen erfolgt die Energieumwandlung zwischen elektrischem und mechanischem System durch das Magnetfeld der Maschine. Dies betrifft fast alle Maschinen und Aktuatoren in diesem Buch:

- Gleichstrommotoren mit Kommutator
- Reihenschlussmaschinen mit Kommutator
- Asynchronmotoren
- Synchronmotoren
- bürstenlose Gleichstrommotoren
- Reluktanzmotoren
- Elektromagnetische Schrittmotoren
- Elektromagnete
- Magnetlager

Nur wenige Maschinen nutzen andere Mechanismen der Energiewandlung, z. B. piezoelektrische Antriebe.

Zum Verständnis der Wirkungsweise der Maschinen ist daher die Kenntnis des Magnetfelds erforderlich.

Bei Kleinmaschinen haben dabei die Permanentmagnete eine besonders hohe Bedeutung im Vergleich zu den Maschinen größerer Leistung. Bei Kleinmaschinen kann durch einen relativ geringen Einsatz von Magnetmaterial eine deutliche Steigerung der Drehmoment- und Leistungsdichte sowie des Wirkungsgrads erzielt werden.

Die Steigerung des Wirkungsgrads ist insbesondere für den Einsatz in batterie- oder akkubetriebenen Geräten zur Verlängerung der Laufzeit oder zur Verringerung der Kosten für Batterien oder Akkus sehr wichtig. Aber auch bei Antrieben mit hoher Betriebsdauer, wie z. B. Heizungsumwälzpumpen oder Kühlaggregaten in Kühl- und Gefrierschränken, spielt der Wirkungsgrad eine große Rolle.

Carsten Fräger, Hochschule Hannover
Hans-Dieter Stölting, Leibniz Universität Hannover

<https://doi.org/10.1515/9783110565324-002>

In den folgenden Abschnitten finden sich einige grundsätzliche Zusammenhänge zum Magnetfeld und zum magnetischen Kreis sowie eine ausführliche Darstellung zu den Permanentmagneten und ihren Eigenschaften.

2.2 Zusammenhänge im Magnetfeld, Fluss und Flussverketzung

Die Größen des magnetischen Felds sind die Flussdichte \mathbf{B} und die Feldstärke \mathbf{H} , zwischen denen mit der Stoffgröße μ folgender Zusammenhang besteht:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H}, \quad B = \mu H = \mu_0 \mu_r H \quad (2.1)$$

Größere Bereiche des Magnetfelds werden durch den magnetischen Fluss und die magnetische Spannung beschrieben:

$$\Phi = \iint_A \mathbf{B} \, d\mathbf{A}, \quad \text{bzw.} \quad \Phi = \iint_A B \, dA \quad \text{für } \mathbf{B} \text{ parallel zu } d\mathbf{A} \quad (2.2)$$

$$V_{\text{mag}} = \int_s \mathbf{H} \, d\mathbf{s}, \quad \text{bzw.} \quad V_{\text{mag}} = \int_s H \, ds \quad \text{für } \mathbf{H} \text{ parallel zu } d\mathbf{s} \quad (2.3)$$

Für ein homogenes Magnetfeld mit konstanter Flussdichte und Feldstärke vereinfachen sich die Integrale zu Produkten mit der Fläche bzw. der Länge:

$$\Phi = B A, \quad V = H s \quad (2.4)$$

Die Flussverketzung Ψ (Verkettungsfluss, Spulenfluss) beschreibt den insgesamt von einer Spule umfassten Fluss. Umfassen alle Windungen den gleichen Fluss, ergibt sich die Flussverketzung zu

$$\Psi = N \Phi = w \Phi \quad (2.5)$$

Ebenso können auch verkettete Wicklungs- oder Strangflüsse definiert werden.

Die Ursache des Magnetfelds sind Ströme bzw. Durchflutungen. Der Durchflutungssatz beschreibt dies für geschlossene Wege im Magnetfeld. Für kleine Frequenzen kann die in der allgemeinen Form vorhandene Verschiebungsdichte vernachlässigt werden. So lautet der Durchflutungssatz für kleine Frequenzen:

$$\Theta = \iint_A \mathbf{J} \, d\mathbf{A} = \oint_c \mathbf{H} \, d\mathbf{s}, \quad \text{bei konzentrierten Strömen: } \Theta = NI \quad (2.6)$$

2.3 Magnetischer Kreis

Das Magnetfeld lässt sich in vielen Fällen gut mit Hilfe des magnetischen Kreises berechnen. Für einfache Fragestellungen eignet sich der einfache magnetische Kreis ohne Verzweigungen. Eine detaillierte Darstellung findet sich z. B. in [62, Kapitel 4].

2.3.1 Unverzweigter magnetischer Kreis

Im magnetischen Kreis ohne Verzweigungen ist der magnetische Fluss Φ an allen Stellen des Kreises gleich (siehe Abb. 2.1). Häufig kann der magnetische Kreis in eine Anzahl von Abschnitten mit jeweils näherungsweise homogenem Magnetfeld mit den Längen l_i , den Querschnitten A_i und den Permeabilitäten μ_i aufteilt werden (Abb. 2.1).

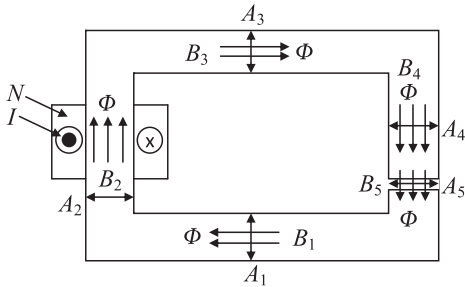


Abb. 2.1: Magnetkreis: magnetischer Fluss Φ , Wicklung mit Strom I und Windungszahl N , Luftspalt.

Dadurch kann der Durchflutungssatz besonders einfach zur Berechnung des Magnetfelds und der Induktivitäten angewendet werden. Die einzelnen Abschnitte haben jeweils eine magnetische Spannung, sodass das Integral des Durchflutungssatzes (2.6) zu einer Summe mit magnetischen Spannungen wird:

$$\Theta = \sum_k N_k I_k = \sum_n V_n = \sum_n H_n l_n = \sum_n \frac{B_n l_n}{\mu_{rn} \mu_0} = \sum_n \frac{\Phi l_n}{A_n \mu_{rn} \mu_0} = \Phi \sum_n R_{\text{mag } n} \quad (2.7)$$

Die magnetischen Widerstände ergeben sich aus der Geometrie und der Permeabilität der einzelnen Abschnitte:

$$R_{\text{mag } n} = \frac{l_n}{A_n \mu_{rn} \mu_0} \quad (2.8)$$

2.3.2 Verzweigter magnetischer Kreis

In realen elektrischen Maschinen ist der Fluss nicht an allen Stellen des Magnetkreises konstant. Dies kann dadurch berücksichtigt werden, dass mehrere Wege für den magnetischen Fluss betrachtet werden. Jeder Weg wird wie im unverzweigten Magnetkreis durch magnetische Widerstände R_{mag} , Durchflutungen Θ und magnetische Spannungen V_{mag} beschrieben. Abbildung 2.2 zeigt zwei Beispiele für einen Elektromagnet (Abb. 2.2a) und für eine Synchronmaschine mit Dauermagneten/Permanentmagneten (Abb. 2.2b). Weitere Beispiele und Berechnungen zeigt [62].

Die Berechnung verzweigter Magnetkreise mit abschnittsweise homogenen Magnetfeldern erfolgt sinngemäß wie beim Gleichstromkreis mit Maschen- und Knotengleichungen sowie magnetischen Widerständen und magnetischen Spannungen:

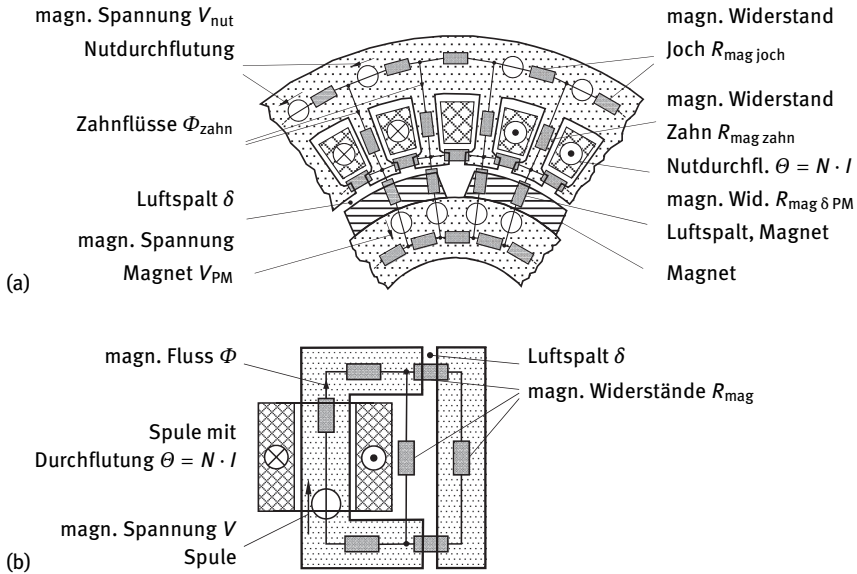


Abb. 2.2: Verzweigte Magnetkreise mit Geometrie und magnetischem Ersatzschaltbild aus magnetischen Spannungen und magnetischen Widerständen: (a) PM-Synchronmaschine, (b) Elektromagnet.

- Knotengleichung:

$$\sum \Phi_{zu} = \sum \Phi_{ab} \quad (2.9)$$

- Maschengleichung:

$$\sum V_{mag\ mit} = \sum V_{mag\ gegen} \quad (2.10)$$

- magnetische Spannungen an Widerständen:

$$V_{mag\ R} = R_{mag} \Phi \quad (2.11)$$

- Spannung durch eingeschlossene Durchflutungen:

$$V_{mag\ \theta} = N I \quad (2.12)$$

- Spannungen durch Permanentmagnete:

$$V_{mag\ PM} = h_{PM} H_{PM} = h_{PM} \frac{B_r}{\mu_0 \mu_r} \quad (2.13)$$

Mit den Gleichungen lässt sich das Gleichungssystem für einen kompletten Magnetkreis aufstellen und lösen. Die Lösung erfolgt mit den gleichen Methoden, wie sie für den Gleichstromkreis angewendet werden.

Da die Eisenteile eines Magnetkreises in der Regel stark gesättigt sind, ist üblicherweise eine iterative Lösung des Gleichungssystems mit veränderlichen magnetischen Widerständen erforderlich.

2.4 Ferromagnetische Materialien für Kleinmotoren

Bei kleinen Elektroantrieben spielen die Ummagnetisierungsverluste und Wirbelstromverluste häufig eine untergeordnete Rolle gegenüber den ohmschen Verlusten in den Wicklungen. Daher werden aus Kostengründen vielfach Elektrobleche mit höheren Verlusten, Elektrobleche ohne separate Isolierschicht oder sogar Standardbleche eingesetzt. Im Gegensatz dazu werden bei größeren Motoren in der Regel verlustarme Elektrobleche mit Isolierschicht eingesetzt.

Standardbleche haben den Nachteil größerer Ummagnetisierungs- und Wirbelstromverluste. Jedoch lassen sie sich ähnlich gut magnetisieren wie Elektrobleche, sodass ggf. bei kleinen Motoren aus Kostengründen die Verlusterhöhung in Kauf genommen wird. Abbildung 2.3 zeigt verschiedene Magnetisierungskurven. Es ist zu erkennen, dass sich das Blech M800-50A mit den höheren Verlusten leichter magnetisieren lässt als das verlustärmere Bleich M400-50A. Das Standardmaterial hat eine etwas schlechtere Magnetisierungskennlinie als die Elektrobleche.

Deutlich ist die starke Nichtlinearität bei höheren Flussdichten zu erkennen. Reale Maschinen werden häufig im gesättigten Bereich betrieben. Bei kleinen Motoren mit Permanentmagneten treten Flussdichten im Bereich bis zu 2,0 T auf.

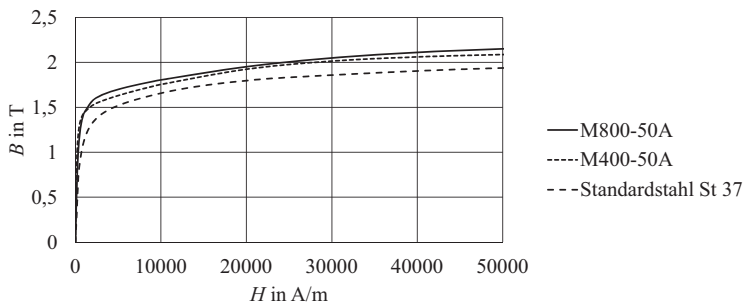


Abb. 2.3: Magnetisierungskennlinien: Standardmaterial und Elektrobleche M400-50A und M800-50A [64].

2.5 Permanentmagnete

Die Permanentmagnete haben bei Kleinmaschinen im Vergleich zu größeren Maschinen eine besonders hohe Bedeutung. Permanentmagnete werden in Magnetsystemen, Wechsel- und Gleichstromgeneratoren, Gleichstrom-, Synchron- und Elektromotoren (Bauformen für Rotoren mit Permanentmagneten für Synchronmotoren und Elektromotoren siehe Abb. 7.22, Abb. 7.23, Abb. 8.10, Abb. 8.11) sowie in Planar- und Linearantrieben, in Kupplungen und magnetischen Lagern zum Aufbau eines Luftspaltfelds verwendet.

Zum Einsatz kommen Aluminiumlegierungen (AlNiCo), Ferritmagnete (Eisen-, Barium- und Strontiumoxide) und Seltenerd-Magnete, zu denen Samarium-Kobalt-Magnete (SmCo) und Neodym-Eisen-Bor-Magnete (NdFeB) gehören. Sie unterscheiden sich in ihren magnetischen Eigenschaften und durch ihre Bearbeitungsmöglichkeiten. Bei Kleinmaschinen kann durch einen relativ geringen Einsatz von Magnetmaterial eine deutliche Steigerung der Drehmoment- und Leistungsdichte sowie des Wirkungsgrads erzielt werden.

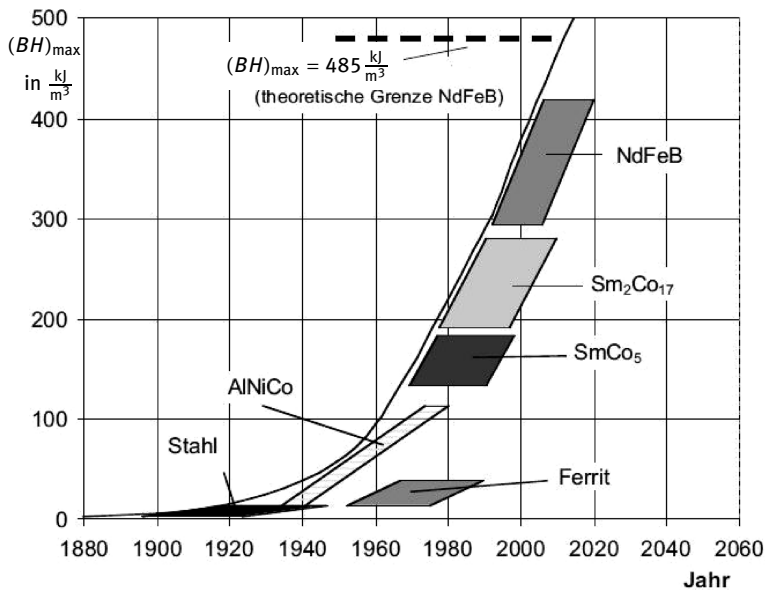


Abb. 2.4: Permanentmagnete: Entwicklung des maximalen Energieprodukts $(BH)_{\max}$ von 1880 bis heute ([59], ©Vacuumschmelze GmbH & Co. KG).

2.5.1 Entwicklung der Magnetmaterialien und des maximalen Energieprodukts

Das wichtigste Kriterium für die Charakterisierung der Magnete ist das maximale Energieprodukt $(BH)_{\max}$, das sich in einem magnetischen Kreis mit unendlich guter Leitfähigkeit $\mu_{\text{fe}} \rightarrow \infty$ einstellt. Ausgehend von Stahlmagneten im Jahre 1880 wurde das Energieprodukt von $7,8 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}$ bis zum Jahr 2014 auf $415 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}$ bei Neodymeisenmagneten ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$) erhöht [59] (zeitliche Entwicklung in Abb. 2.4). Die theoretische Grenze liegt bei $485 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}$ für NdFeB-Magnete. Legt man die Sättigungspolarisation des Eisens von 2,17 T zu Grunde, errechnet sich eine theoretische Grenze der Energiedichte von $930 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}$ [54]. Bei Betrachtung austauschgekoppelter Permanentmagnete aus einer magnetisch harten und einer magnetisch weichen Phase, errechnet sich sogar eine Energiedichte von $1000 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}$ [55]. Diese Grenzen sind aber praktisch nicht erreichbar.

Während AlNiCo-Magnete und Ferrite sehr korrosionsbeständig sind, neigen Seltenerd-Magnete zu einer starken Korrosion. Die gesinterten NdFeB-Magnete haben ein mehrphasiges Gefüge, das sich aus hartmagnetischen $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ -Körnern, Nd-reichen Gefügebestandteilen und Nd-Oxiden zusammensetzt [61]. Zur Verringerung der Korrosion erfolgt eine Substitution der Nd-reichen Gefügebestandteile durch nicht so reaktive NdCoCuAl-Phasen. Damit wird ein Korrosionsverhalten erreicht, das in etwa dem von normalem Stahl entspricht.

Wird eine höhere Korrosionsfestigkeit benötigt, werden die Magnete mit galvanischen Beschichtungen, Lacken oder Tränklarzen geschützt. Bei weitergehenden Anforderungen erhalten die Magnete metallische Schichten aus Zinn (Sn), Nickel (Ni) und Aluminium (Al). In vielen Fällen sorgt eine Beschichtung der NdFeB-Magnete mit Epoxidharz für eine ausreichende Korrosionsfestigkeit bei geringen Kosten. Die Oberflächenschichten dürfen auch im Betrieb der jeweiligen Anordnung nicht beschädigt werden, sodass die Magnete vor staubhaltigen Luftströmen geschützt sein müssen. Sie werden mit ihrem Einbauort verklebt oder vergossen, um jede Relativbewegung, durch welche die Schutzschicht zerstört wird, zu vermeiden.

Neben den reinen Magnetwerkstoffen kommen Verbundwerkstoffe zum Einsatz. Magnetpulver wird in Elastomere und in Thermo- oder Duroplaste eingebunden, wodurch zwar das maximale Energieprodukt pro Volumeneinheit auf 50 % bis 80 % der reinen Stoffe sinkt, aber hochproduktive Fertigungsverfahren, die keine energieintensiven Hochtemperaturprozesse erfordern, einsetzbar sind. Träger- und Dauermagnetmaterial, Füllgrad, Benetzung des Magnetpulvers sowie magnetische und mechanische Ausrichteffekte beeinflussen die Eigenschaften dieser Kompositmagnete. In Abhängigkeit von den geometrischen Formen werden sie durch Extrudieren (Bänder und Profile), Kalandrieren (Folien und Platten) oder durch Spritzgießen und Pressen gefertigt. Sowohl die flexiblen Magnete als auch die stabilen Formen sind einfach zu bearbeiten. Mit Spritzgießeinrichtungen sind komplizierte geometrische Formen auch ohne nachträgliche Bearbeitung bei hoher Maßhaltigkeit kostengünstig in hohen Stückzahlen herstellbar. Sie können mit anderen Konstruktionsteilen leicht kombiniert werden.

Dauermagnete werden im Allgemeinen einbaufertig in vielfältigen geometrischen Formen und Abmessungen geliefert. Sie werden durch Federn, Kleber, Nieten oder Schrauben im Motor befestigt. Geklebte Magnete dämpfen Störgeräusche. Da Dauermagnete mit Ausnahme der leicht montierbaren flexiblen Ausführungen sehr spröde sind, können sie bei der Motormontage leicht beschädigt werden. Magnetisches Material im Luftspalt verursacht Motorausfälle.

2.5.2 Magnetische Eigenschaften der Permanentmagnete

2.5.2.1 Charakteristische Daten

Hartmagnetische Werkstoffe weisen eine hohe magnetische Anisotropie auf, die sich in einer großen Koerzitivfeldstärke $H_c > 1\text{kA/m}$ dokumentiert, sodass sie schwer ent-

magnetisierbar sind. Ausdruck dieser Eigenschaften ist im Vergleich zu weichmagnetischen Werkstoffen (z. B. Fe) eine große Fläche der Hysteresekurve (Abb. 2.5).

Zur Charakterisierung der hartmagnetischen Eigenschaften dienen folgende Größen:

- Remanenzflussdichte, Remanenzinduktion B_r
- Koerzitivfeldstärke der Flussdichte H_{cB}
- Koerzitivfeldstärke der Polarisation H_{cJ}
- maximales Energieprodukt $(BH)_{\max}$
- Temperaturkoeffizient der Remanenzflussdichte α_{Br}
- Temperaturkoeffizient der Koerzitivfeldstärke α_{HcJ}
- maximale Einsatztemperatur T_{\max} bzw. ϑ_{\max}

Einige Richtwerte der magnetischen Eigenschaften von bevorzugt eingesetzten Materialkombinationen sind in Tab. 2.1 angegeben.

Der Variantenreichtum entsteht aufgrund verschiedener chemischer Zusammensetzungen, aber auch durch die Herstellungsverfahren, die wesentlichen Einfluss auf die magnetischen Eigenschaften haben. So kann z. B. das Pressen des Magnetpulvers mit und ohne Magnetfeld erfolgen. Werden die Magnete im Magnetfeld gepresst, erzielt man eine magnetische Vorzugsrichtung (anisotrope Magnete), durch die im Vergleich zum Pressen ohne Magnetfeld beim Aufmagnetisieren etwa die doppelte Remanenzinduktion in der Vorzugsrichtung erreicht wird. Je nach Einsatzfall und Form des Magneten sind radiale, axiale, diametrale und auch gekrümmte Vorzugsrichtungen (z. B. Halbach-Magnetisierungen) möglich. Nicht im Magnetfeld gepresste Magnete (isotrope Magnete) besitzen in allen Magnetisierungsrichtungen etwa gleiche magnetische Eigenschaften.

Die Wahl der Magnetsorte wird von den Kosten und den zu erfüllenden Randbedingungen des Einsatzfalls bestimmt. Ein großes Energieprodukt spricht für NdFeB-Magnete, hohe Temperaturbereiche und die niedrigsten Kosten erzielt man mit den Hartferriten (keramische Magnete). Diese Merkmale sind den vielen anderen Gesichtspunkten gegenüberzustellen.

2.5.2.2 Hysteresekurven der Permanentmagnete

Für die visuelle Erfassung der magnetischen Eigenschaften von Dauermagnetwerkstoffen eignet sich die Darstellung der Flussdichte als Funktion der Feldstärke im Magneten, die wie bei allen ferromagnetischen Werkstoffen nicht eindeutig ist (Hysteresekurve). Sie wird mit der in Abb. 2.5 angegebenen Anordnung, die aus einem Dauermagneten, einer Spule und einem ferromagnetischen Flussleitstück mit $\mu_{fe} \gg \mu_0$ besteht, durchfahren.

Erregt man die Spule erstmalig mit einem Strom von null beginnend, dann steigt die Flussdichte in Abhängigkeit von der magnetischen Feldstärke entlang einer nicht-linearen Kurve, der Neukurve, bis sie ab der Sättigungsfeldstärke H_S mit einer kon-

Tab. 2.1: Permanentmagnete: charakteristische Eigenschaften handelsüblicher Permanentmagnetwerkstoffe.

Magnetmaterial	B_r	H_{cb}	H_{cj}	$(BH)_{max}$		α_{Br}	α_{Hcj}	ϑ_{max}
	T	kA/m	kA/m	kJ/m ³	MGOe	%/K	%/K	°C
AlNiCo	0,65...1,25	45...95	46...140	12...70	1,5...8,7	-0,02	-0,02	500
Hartferrit isotrop	0,21	135	230	8	1	-0,2	+0,3	250
Hartferrit kunststoffgebunden	0,22...0,25	160...175	1000...3000	9,5...11,5	1,2...1,4	-0,2	+0,3	120
Hartferrit anisotrop	0,38...0,42	130...360	140...370	21...35	2,6...4,3	-0,2	+0,3	250
NdFeB kunststoffgebunden	0,6...1,0	380	1400	55	6,8	-0,13	-0,4	120
SmCo	0,9...1,1	530...820	1270...2000	160...225	20...28	-0,04	-0,25	350
NdFeB allgemein	1,08...1,47	800...1100	870...2600	220...415	27...52	-0,10	-0,19	130...220
NdFeB hohes Energieprodukt, korrosionsfest	1,4...1,47	900...1100	870...1100	380...415	47...52			
NdFeB hohe Entmagnetisierbarkeit, korrosionsfest	1,08...1,29	800...900	2000...2600	220...315	27...39			

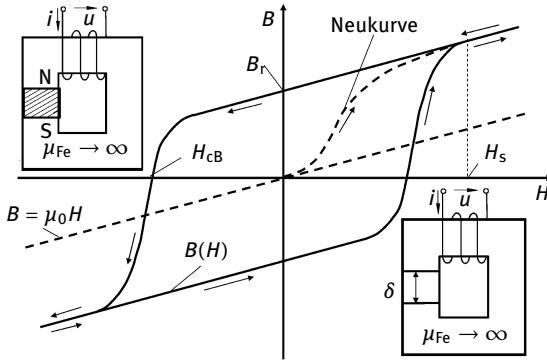


Abb. 2.5: Permanentmagnete: Neukurve und Hysteresekurve.

stanten Steigung, die annähernd der Permeabilität μ_0 des Vakuums entspricht, zunimmt (Abb. 2.5).

Mit der Absenkung des Spulenstroms wird die Flussdichte nicht gemäß der Neukurve, sondern langsamer kleiner, sodass bei dem Strom $i = 0$ bzw. der Feldstärke $H = 0$ ein Restfeld mit der Remanenzflussdichte B_r vorhanden ist. Bei Vergrößerung des Stroms mit umgekehrtem Vorzeichen bleibt der Anstieg der Magnetisierungskurve erhalten, bis sich eine steile Änderung der Flussdichte einstellt. Sie erreicht bei der Koerzitivfeldstärke der Flussdichte den Wert $H_{CB} = 0$ und nimmt beim weiteren Anstieg des Stroms mit negativem Vorzeichen schnell zu, bis ihr Betrag wieder proportional mit dem Strom ansteigt. Wird der Strombetrag wieder verkleinert, erfolgt eine lineare Verringerung des Flussdichtebetrags, bis sich bei positiven Strömen bzw. Feldstärken wieder eine steile Änderung der Flussdichte einstellt und die Gerade des ersten Aufmagnetisierungsvorgangs bei der Sättigungsfeldstärke erreicht wird. Die geschlossene Hysteresekurve kann nur in der durch die eingezeichneten Pfeile gekennzeichneten Richtung durchlaufen werden.

Nach Unterbrechung des Spulenstroms ist die magnetische Feldstärke $H = 0$ und die verbleibende Flussdichte im Magneten, die Remanenzflussdichte, ist gleich der Polarisation $J_r = B_r$.

Die Polarisation stellt die Flussdichteerhöhung durch das Magnetmaterial dar. Sie ist bei starken Magneten über einen bestimmten Bereich nahezu konstant und ändert mit steilem Anstieg bei der Koerzitivfeldstärke der Polarisation H_CJ das Vorzeichen (Abb. 2.6). Wird der Dauermagnet aus dem magnetischen Kreis entfernt (Abb. 2.5), sodass an seiner Stelle ein Luftspalt verbleibt, dann gilt zwischen der Flussdichte und der Feldstärke im Luftspalt der Zusammenhang $B = \mu_0 H$, der im Abb. 2.5c als gestrichelte Gerade durch den Nullpunkt dargestellt ist. Sie verläuft annähernd parallel zu den Abschnitten der Hysteresekurve mit konstanten Anstiegen. Dementsprechend ist die Flussdichte $B(H)$ im Magneten nach Abb. 2.5 auch durch eine additive Überlagerung der Flussdichte $\mu_0 H$ und der magnetischen Polarisation J

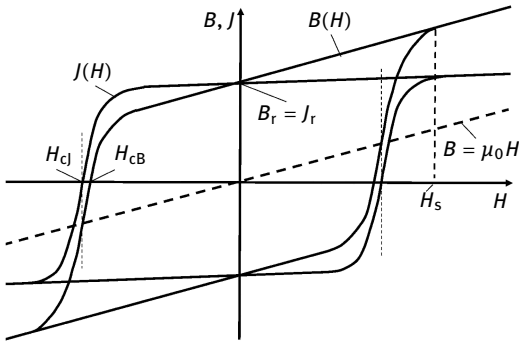


Abb. 2.6: Permanentmagnete: Polarisation $J(H)$ und Flussdichte $B(H)$ als Funktion der Feldstärke H .

darstellbar (Abb. 2.6):

$$B_{PM} = \mu_r \mu_0 H_{PM} = \mu_0 H_{PM} + J \quad (2.14)$$

2.5.2.3 Magnetkreis, Lage der Arbeitspunkte auf der Hysteresekurve

Die Eigenschaft der Dauermagnete, ein magnetisches Feld außerhalb des Magneten auch dann aufrechtzuerhalten, wenn die elektrische Durchflutung Θ des elektromagnetischen Kreises null ist, wird genutzt, um magnetische Felder in den Luftspalten zu erzeugen, die zur Spannungsinduktion in beweglichen Spulen oder zur Ausbildung von Kräften auf Grenzflächen oder stromdurchflossene Leiter dienen.

Prinzipiell entsprechen die magnetischen Kreise elektromechanischer Energiewandler mit Permanentmagneten einer Anordnung nach Abb. 2.7, in der von dem Dauermagneten und der stromdurchflossenen Spule mit der Windungszahl w ein Luftspaltfeld aufgebaut wird.

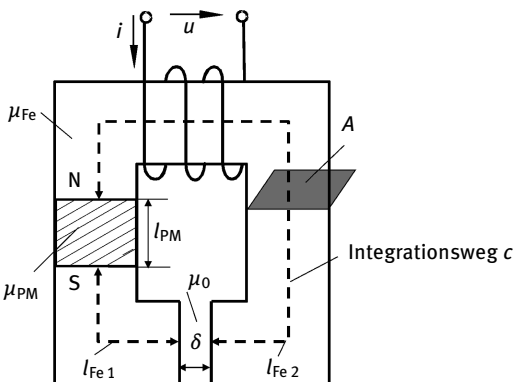


Abb. 2.7: Magnetkreis: prinzipieller Aufbau des magnetischen Kreises elektromagnetischer Energiewandler.

Der Durchflutungssatz liefert für den geschlossenen Integrationsweg c

$$\oint_c \mathbf{H} \, d\mathbf{s} = \Theta \quad (2.15)$$

Wird der Integrationsweg parallel zur Feldstärke gewählt, wird $\mathbf{H} \, d\mathbf{s} = H \, ds$.

Bei vernachlässigter Streuung ist der Fluss Φ überall entlang des magnetischen Kreises konstant. Bei abschnittsweise homogenem Magnetfeld $\mathbf{B} = \text{konst.}$, Querschnittsflächen senkrecht zur Flussdichte und Normalenvektor parallel zur Flussdichte $\mathbf{B} \parallel d\mathbf{A}$ ergibt sich der magnetische Fluss zu

$$\Phi = \iint_A \mathbf{B} \, d\mathbf{A} = AB \quad (2.16)$$

Umgekehrt liefert der entlang des magnetischen Kreises konstante Fluss Φ die vom Querschnitt abhängige Flussdichte und die Magnetisierungskurve des Materials die Feldstärke:

$$B = \frac{\Phi}{A}, \quad H = H(B) = \frac{B}{\mu} = \frac{B}{\mu_r \mu_0} \quad (2.17)$$

Die Durchflutung Θ ergibt sich aus dem Durchflutungssatz (2.15). Wird der Integrationsweg parallel zur Feldstärke gewählt ($\mathbf{H} \parallel d\mathbf{s}$) ergibt sich:

$$\Theta = wI = \oint H \, ds = \oint \frac{\Phi}{A\mu} \, ds \quad (2.18)$$

Ist die Feldstärke abschnittsweise über die Längen l_i konstant, lässt sich das Integral durch eine Summe ersetzen:

$$\Theta = wI = \sum_i \frac{\Phi}{A_i \mu} l_i \quad (2.19)$$

Betrachtet man nur die Abschnitte Permanentmagnet (H_{PM}, l_{PM}, A_{PM}), Luftspalt ($H_\delta, \delta, A_\delta$) und Eisen ($H_{Fe}, l_{Fe} = l_{Fe} + l_{Fe2}, A_{Fe}$) mit abschnittsweise konstanten Größen, so ergibt sich die Durchflutung nach folgender Gleichung:

$$\Theta = wI = \oint_s \mathbf{H} \, d\mathbf{s} = H_{PM} l_{PM} + H_\delta \delta + H_{Fe} l_{Fe} = H_{PM} l_{PM} + \frac{\Phi \delta}{\mu_0 A_\delta} + \frac{\Phi l_{Fe}}{\mu_{Fe} A_{Fe}} \quad (2.20)$$

Der Permanentmagnet wirkt hier wie eine Spule mit der Durchflutung $H_{PM} l_{PM}$. Mit den Annahmen $I = 0$ und $\mu_{Fe} \rightarrow \infty$ bzw. $H_{Fe} = 0$ ergibt sich der Zusammenhang zwischen den Feldstärken im Magneten H_{PM} und dem Fluss bzw. der Flussdichte im Luftspalt zu

$$H_{PM} = -\frac{\Phi \delta}{\mu_0 A_\delta l_{PM}} = -\frac{\delta}{\mu_0 l_{PM}} B_\delta \quad (2.21)$$

Ferner gilt wegen dem konstanten Fluss Φ (Streuungsfreiheit) folgender Zusammenhang zwischen den Flussdichten im Magneten und im Luftspalt:

$$B_{PM} = \frac{\Phi}{A_{PM}} = \frac{A_\delta}{A_{PM}} B_\delta \quad (2.22)$$

Demzufolge ist die Feldstärke im Magneten negativ, sodass für den technischen Einsatz der Dauermagnete ihre Eigenschaften im zweiten Quadranten der B - H -Kennlinie in Abb. 2.5 entscheidend sind. Im Grenzfall, wenn die Luftspaltlänge null ist, ist die magnetische Feldstärke null und es stellt sich die Remanenzflussdichte B_r ein.

Bei endlicher Luftspaltlänge oder bei realen magnetischen Kreisen mit $H_{fe} \neq 0$ bzw. endlichem μ_{fe} ergibt sich ein Arbeitspunkt, der durch eine negative Feldstärke und eine kleinere Flussdichte als die Remanenzflussdichte gekennzeichnet ist. Aus diesem Grund wird der Abschnitt der Hysteresekurve im zweiten Quadranten als Entmagnetisierungskennlinie bezeichnet. In Abb. 2.8 sind für einzelne Magnetmaterialien Bereiche angegeben, in denen ihre Entmagnetisierungskennlinien bei Raumtemperatur liegen.

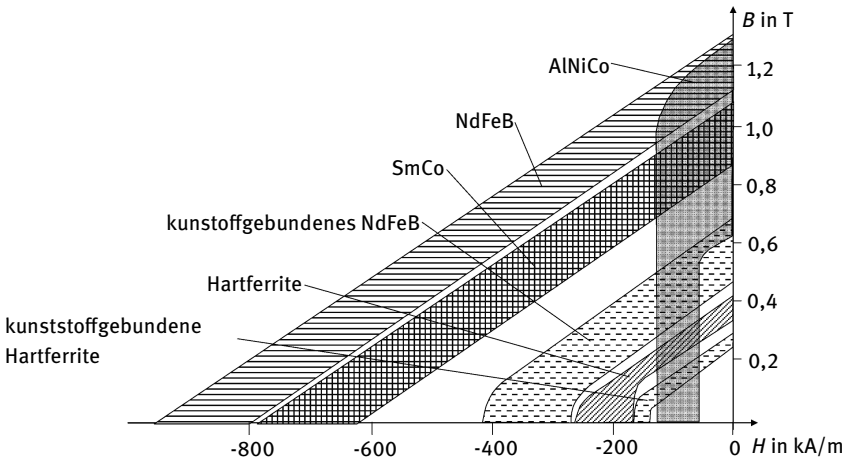


Abb. 2.8: Permanentmagnete: Prinzipielle Entmagnetisierungskurven verschiedener Permanentmagnetwerkstoffe bei Raumtemperatur.

Aus den Gleichungen (2.21) und (2.22) ergibt sich der Arbeitspunkt des Magneten im zweiten Quadranten. Aus den beiden Gleichungen erhält man folgendes Verhältnis für den Arbeitspunkt des Magneten:

$$\frac{H_{PM}}{B_{PM}} = -\frac{1}{\mu_0} \frac{\delta}{l_{PM}} \frac{A_{PM}}{A_\delta} \quad (2.23)$$

Die Verbindung des Arbeitspunkts mit dem Nullpunkt des B - H -Diagramms wird als Arbeitsgerade bezeichnet (Abb. 2.9). Ihre Steigung verändert sich mit dem Querschnittsverhältnis A_{PM}/A_δ und mit dem Längenverhältnis δ/l_{PM} . Eine größere Luftspaltfläche führt zu einer kleiner entmagnetisierenden Feldstärke im Magneten; ein größerer Luftspalt führt zu einer größeren Feldstärke im Magneten.

Die gleichen Arbeitspunkte auf der Entmagnetisierungskennlinie ergeben sich bei einem magnetischen Kreis ohne Luftspalt (vgl. Abb. 2.5), wenn die Spulenströme eine negative Feldstärke aufbauen, welche die Flussdichte im Dauermagneten verkleinert.

Nimmt man einen bestimmten Luftspalt im magnetischen Kreis an, dann existiert bei stromloser Spule eine Arbeitsgerade durch den Nullpunkt des B - H -Koordinatensystems. Gegendurchflutungen aus dem Strom der Wicklung zur Erzeugung eines Drehmoments verschieben sie in negativer Richtung der Feldstärkeachse, wie es in Abb. 2.9 dargestellt ist.

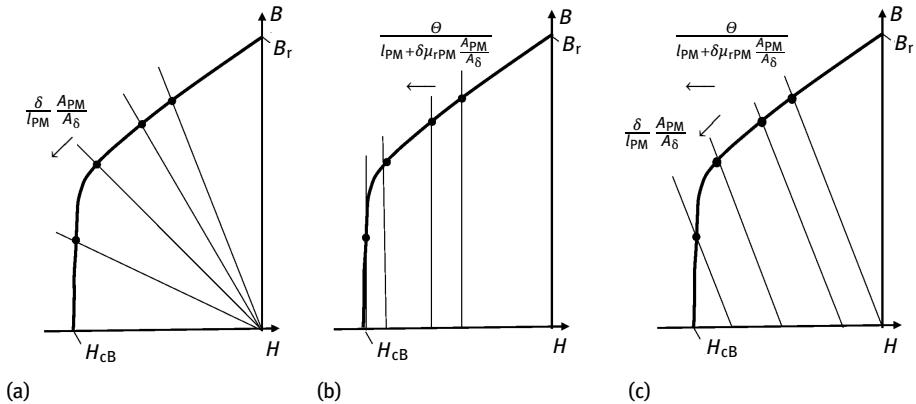


Abb. 2.9: Permanentmagnete: Möglichkeiten zur Einstellung der Arbeitspunkte auf der Entmagnetisierungskennlinie (a) Veränderung des Luftspalts δ und der Luftspaltfläche A_δ , (b) Variation der Durchflutung θ , (c) Überlagerung von (a) und (b) für konstanten Luftspalt.

Dies ist in den dauermagneterregten elektrischen Maschinen besonders dann kritisch, wenn durch Betrieb mit Überlast, Einschalt- oder Kurzschlussströme die Gegendurchflutungen so groß werden, dass sich Schnittpunkte im steilen Abschnitt der Entmagnetisierungskennlinie einstellen und es dadurch zu dauerhaften, irreversiblen Abmagnetisierungen kommt.

Die Maschine verliert dadurch an Permanentmagnetfluss und bekommt dadurch veränderte Eigenschaften:

- geringeres Drehmoment bei gleichem Strom;
- erhöhte Leerlaufdrehzahl, z. B. bei Gleichstrommaschinen, BLDC und BLAC;
- verstärkte Drehmomentschwankungen, z. B. durch größere Nutrastmomente.

Die Entmagnetisierung muss durch eine entsprechende Auslegung des Magnetkreises verhindert werden:

- Eine größere Magnetlänge l_{PM} verringert den Einfluss des Luftspalts δ und der Durchflutung θ .

- Eine Flusskonzentration mit $\frac{A_{PM}}{A_\delta} > 1$ verringert den Einfluss der Durchflutung Θ , vergrößert aber den Einfluss des Luftspalts δ .

Bei der Dimensionierung ist jeweils der größte Luftspalt mit Rücksicht auf Fertigungstoleranzen, die größte Durchflutung (z. B. bei größter Spannung beim Anlauf oder höchster Drehzahl beim Kurzschluss) und die Magnettemperatur mit geringster Koerzitivfeldstärke H_{cJ} relevant.

2.5.2.4 Verschiebung der Arbeitspunkte im dynamischen Betrieb

Liegen die Arbeitspunkte im Bereich der Entmagnetisierungskennlinie mit konstantem Anstieg, dann ergeben sich bei Veränderung der Luftspalllänge immer wieder die gleichen Arbeitspunkte, d. h., die Vorgänge spielen sich reversibel im remanenten Bereich der Entmagnetisierungskennlinie ab.

Befindet sich der Arbeitspunkt im steil abfallenden Abschnitt der Entmagnetisierungskennlinie, dann wird durch eine Verkleinerung des Luftspalts bis $\delta = 0$ nicht mehr die Remanenzflussdichte B_r , sondern nur noch die Permanenz B_p unterhalb der Remanenzflussdichte erreicht (Abb. 2.10).

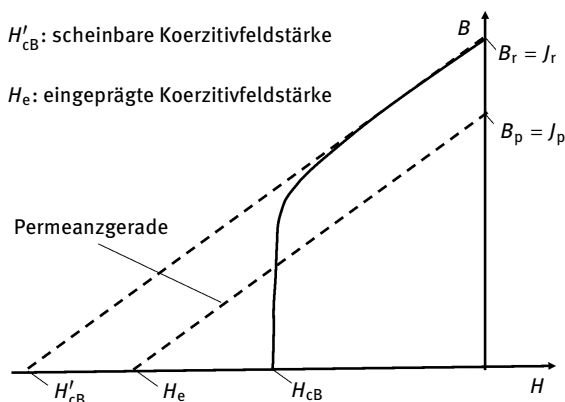


Abb. 2.10: Permanentmagnete: scheinbare und eingeprägte Koerzitivfeldstärke von permanentmagneterregten magnetischen Kreisen.

Der Anstieg der Permeanzgeraden ist proportional der Permeabilität μ_{rec} . Ihre Verlängerung bis zum Schnittpunkt mit der Feldstärkeachse fixiert die eingeprägte magnetische Feldstärke H_e des Permanentmagneten, deren Definition sich aus der Beziehung

$$B = \mu_0 \mu_{rec} H + J_P = \mu_0 \mu_{rec} \left(H + \frac{J_P}{\mu_0 \mu_{rec}} \right) \quad (2.24)$$

ergibt:

$$H_e = \frac{J_P}{\mu_0 \mu_{rec}} \quad (2.25)$$

Befinden sich die Arbeitspunkte im linearen Bereich der äußeren Entmagnetisierungskennlinie, dann wird zu ihrer Beschreibung die scheinbare Koerzitivfeldstärke definiert als

$$H'_{\text{CB}} = \frac{J_{\text{r}}}{\mu_0 \mu_{\text{rPM}}} \quad (2.26)$$

die sich aus der Gleichung für die Flussdichte

$$B = \mu_0 \mu_{\text{rPM}} H + J_{\text{r}} = \mu_0 \mu_{\text{rPM}} \left(H + \frac{J_{\text{r}}}{\mu_0 \mu_{\text{rPM}}} \right) \quad (2.27)$$

ergibt, in der μ_{rPM} die relative Permeabilität des Magnetwerkstoffs ist.

2.5.2.5 Veränderung der magnetischen Eigenschaften bei Temperaturänderungen

Die Eignung der Dauermagnete für einen Einsatzfall wird wesentlich von der maximalen Einsatztemperatur und von der Temperaturabhängigkeit ihrer magnetischen Eigenschaften bestimmt. Mit steigender Temperatur verändern sich die Koerzitivfeldstärken und die Remanenzflussdichten, zunächst reversibel und oberhalb der maximalen Einsatztemperatur irreversibel bis zur Curietemperatur T_{C} . Praktisch nutzbar ist nur der reversible Bereich, der durch die maximale Einsatztemperatur begrenzt ist. Gegenwärtig sind 40 % bis 70 % der Curietemperatur des jeweiligen Werkstoffs als maximale Einsatztemperatur realisierbar. Kobalthaltige Magnete besitzen hohe Einsatztemperaturen (Tab. 2.1).

Im praktisch nutzbaren reversiblen Temperaturbereich ist die Temperaturabhängigkeit linear. Man gibt deshalb für $B_{\text{r}}(T)$ bzw. $B_{\text{r}}(\vartheta)$ und $H_{\text{c}}(T)$ bzw. $H_{\text{c}}(\vartheta)$ die reversiblen Temperaturkoeffizienten an, die bis auf die Temperaturkoeffizienten der Ferrite (keramische Magnete) und einiger AlNiCo-Magnete negativ sind. In Abb. 2.11a sind die Kennlinien der Flussdichte eines NdFeB-Magnetens, dessen Temperaturkoeffizient negativ ist, dargestellt. Mit steigender Temperatur nähert sich der Arbeitspunkt dem Knickpunkt der Entmagnetisierungskennlinie, bis er sich im irreversiblen Bereich befindet, sodass eine bleibende Abmagnetisierung zu verzeichnen ist. Dann ist die maximale Einsatztemperatur dieses Magnetwerkstoffs überschritten. Bei Ferriten nimmt die Koerzitivfeldstärke H_{CB} mit sinkender Temperatur ab (Abb. 2.11b).

In Motoren ist das besonders kritisch, weil die Magnete teilweise Gegenfeldern ausgesetzt sind, die mit sinkender Temperatur größer werden. Ursache dafür ist der Einschaltstrom, der aufgrund des kleineren Wicklungswiderstands bei tiefen Temperaturen ansteigt. Der Arbeitspunkt wandert in den irreversiblen Bereich, die Magnete werden ab- bzw. sogar entmagnetisiert. Bei Erwärmung nimmt der Erregerfluss im Leerlauf ab, weil die Remanenzflussdichte kleiner wird. Die Leerlaufdrehzahl vergrößert sich.

Um die Auswirkungen der Temperaturkoeffizienten auf die Remanenzflussdichte und auf die Koerzitivfeldstärke der Polarisation deutlich zu machen, wird die B - H -Kennlinie im zweiten und dritten Quadranten betrachtet (Abb. 2.12a). Ihre Schnittpunkte mit der B - H -Kennlinie des Vakuums liefern die jeweiligen Koerzitivfeldstärken

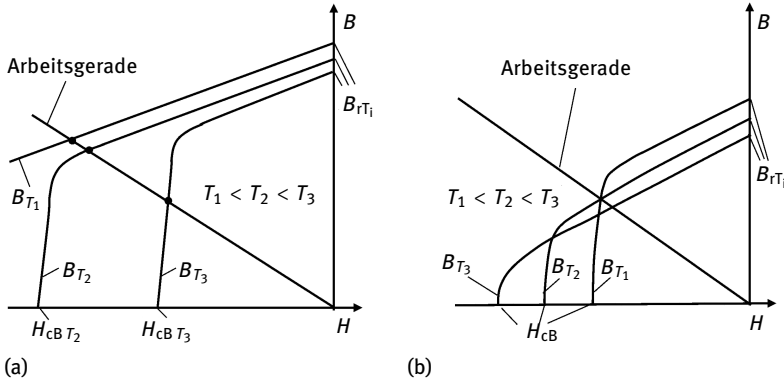


Abb. 2.11: Permanentmagnete: Temperaturabhängigkeit der Entmagnetisierungskennlinien von Werkstoffen (a) mit negativem und (b) mit positivem Temperaturkoeffizienten für die Koerzitivfeldstärke H_{cB} , Temperaturkoeffizient für die Remanenzflussdichte B_r in beiden Fällen negativ.

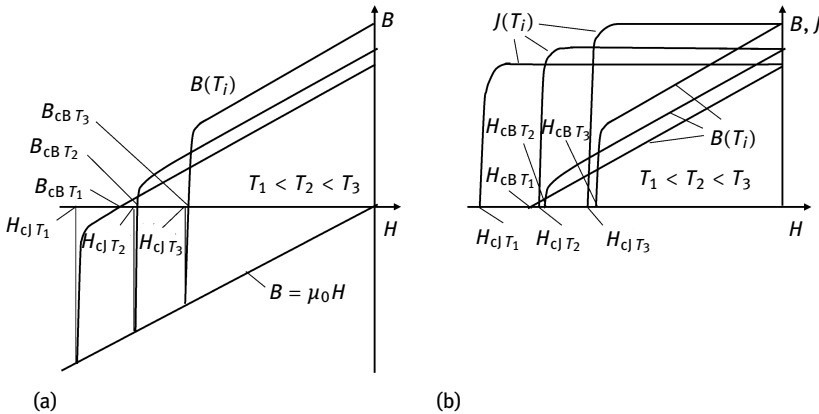


Abb. 2.12: Permanentmagnete: Flussdichte B und Polarisation J mit Temperatur T als Parameter: (a) Flussdichte im Vergleich mit der Kennlinie des Vakuums, (b) Flussdichte und Polarisation.

der Polarisation H_{cB} . Sehr häufig werden aber die Kennlinien der Polarisation und der Entmagnetisierung in einem Diagramm getrennt dargestellt (Abb. 2.12b).

2.5.3 Reale Magnetkreise mit Permanentmagneten

In realen elektromechanischen Energiewandlern mit $\mu_{Fe} \neq \infty$, die den prinzipiellen Anordnungen in Abb. 2.7 entsprechen, ist es das Ziel, mit dem Dauermagneten ein möglichst großes Luftspaltfeld aufzubauen. Der Arbeitspunkt auf der Magnetisierungskennlinie ist sowohl abhängig von den Abmessungen des Dauermagneten als auch von der Gestaltung des übrigen magnetischen Kreises. Für eine überschlä-