

Kallenbach | Eick | Quendt | Ströhla | Feindt | Kallenbach

Elektromagnete

Kallenbach | Eick | Quendt |
Ströhla | Feindt | Kallenbach

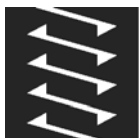
Elektromagnete

Grundlagen, Berechnung, Entwurf
und Anwendung

3., bearbeitete und ergänzte Auflage

Mit 277 Abbildungen und 34 Tabellen

STUDIUM



VIEWEG+
TEUBNER

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.

Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. h. c. Eberhard Kallenbach leitete bis 2002 das Fachgebiet Mechatronik an der TU Ilmenau und ist Leiter des Steinbeis Transferzentrums Mechatronik Ilmenau.

Dr.-Ing. Rüdiger Eick ist Entwicklungsingenieur bei der TRW Lucas Varity GmbH Koblenz.

Dr.- Ing. Peer Quendt ist Geschäftsführer der Lumundus GmbH Eisenach.

Jun.-Prof. Dr.-Ing. Tom Ströhl ist Leiter des Fachgebietes Entwurf mechatronischer Systeme an der TU Ilmenau.

Dr.-Ing. Karsten Feindt ist Entwicklungsingenieur bei der Innomas GmbH Ilmenau.

Dr.-Ing. Matthias Kallenbach forscht im Fachgebiet Mikrosystemtechnik an der TU Ilmenau.

1. Auflage 1994
2. Auflage 2003
- 3., bearbeitete und ergänzte Auflage 2008

Alle Rechte vorbehalten

© ViewegTeubner | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2008

Lektorat: Harald Wollstadt

Vieweg+Teubner ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.

www.viewegteubner.de



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Umschlaggestaltung: KünkelLopka Medienentwicklung, Heidelberg
Druck und buchbinderische Verarbeitung: Strauss Offsetdruck, Mörlenbach
Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.
Printed in Germany

ISBN 978-3-8351-0138-8

Vorwort zur 3. erweiterten Auflage

Die erste Auflage des Buches Elektromagnete wurde nach seinem Erscheinen im Jahre 1994 von der Fachwelt sehr gut aufgenommen und war relativ schnell vergriffen. Da inzwischen auch die 2003 erschienene zweite Auflage erneut vergriffen ist und eine große Nachfrage besteht, haben wir uns zur Herausgabe einer weiteren Auflage entschieden. Die nunmehr vorliegende 3. überarbeitete Auflage wird der Tatsache gerecht, dass der Einsatzbereich der Elektromagnete in der Industrie nach wie vor stark ansteigt. Das trifft besonders auf den Maschinenbau, die Automatisierungstechnik und die Kraftfahrzeugtechnik zu. In einem modernen PKW der mittleren Preisklasse sind heute sehr viele Elektromagnete enthalten, die u. a. in Einspritzventile, elektromagnetische Bremsen, Gaswechselventile integriert sind und den Kraftstoffverbrauch, die Sicherheit, die Umweltverträglichkeit der PKW entscheidend beeinflussen. Dabei hat sich die Tendenz fortgesetzt, dass die funktionellen Eigenschaften der Elektromagnete immer mehr durch leistungsfähige Steuerungen, Vernetzung über Bussysteme und räumliche Integration mit den zu betätigenden Funktionselementen im Sinne der Mechatronik verbessert werden können.

Vorrangige Entwicklungsziele von Elektromagneten sind Reduzierung des Bauraumes und der Bauelementanzahl, Verbesserung der dynamischen Eigenschaften bis an die physikalischen und technologischen Grenzen, Senkung der Verlustleistung, Erhöhung der Lebensdauer und Zuverlässigkeit sowie Senkung der Kosten. Elektromagnete sind im Vergleich zu anderen Magnetaktoren mit rotatorischer Ankerbewegung einfach aufgebaut und betätigen in der Regel direkt das Wirkelement. Sie lassen sich jedoch wegen der starken Nichtlinearität der Magnetisierungskennlinien und der Hystereseigenschaften der Magnetmaterialien sowie der auftretenden Wirbelströme nicht einfach modellieren. Deshalb sind genaue Kenntnisse der Gesetzmäßigkeiten des magnetischen Feldes und der Werkstoffe erforderlich, um die dem speziellen Anwendungsfall entsprechenden optimalen Parameter zu bestimmen und einen hohen Kundennutzen zu erreichen. Die größten Entwicklungsfortschritte im Bereich der Elektromagnete haben sich durch neue Magnetmaterialien, Ansteuerungen zur Optimierung der Dynamik und Senkung der Verlustleistung sowie die zunehmende Verbesserung des Entwurfsprozesses entsprechend der VDI 2206 "Entwurf mechatronischer Systeme" ergeben.

Die Überarbeitung der 3. Auflage umfasst die Korrektur von Fehlern, die Aufnahme neuer Literaturstellen, die Überarbeitung von Abschnitten über Magnetmaterialien und magnetische Mikroaktoren. Die Autoren bedanken sich bei allen, die zum Gelingen des Buches beigetragen haben. Unser Dank gilt ebenfalls Herrn Wollstadt vom Vieweg + Teubner Verlag für sein Drängen, das Buch möglichst schnell herauszubringen, sowie der Firma Ansoft Cooperation für die Bereitstellung der Studentenversion des Magnetfeldberechnungsprogramms Maxwell.

Ilmenau, im Februar 2008

Eberhard Kallenbach
Rüdiger Eick

Peer Quendt
Karsten Feindt

Tom Ströhla
Matthias Kallenbach

Vorwort zur 1. Auflage

Das Buch behandelt Elektromagnete, die als elektro-magneto-mechanische Energiewandler zur Erzeugung von Bewegungen in modernen Industriebereichen in immer größerem Umfang in sehr unterschiedlichen Anwendungsformen eingesetzt werden.

Es liegt in den Antriebseigenschaften der Elektromagnete begründet, dass sie als bewegungserzeugende Elemente in Direktantrieben unmittelbar an das Wirkelement angepasst werden müssen. Aus diesem Grund hat mit dem Anwachsen der Einsatzfälle auch die Zahl der Spezialmagnete ständig zugenommen. Die höchste Form der Anpassung ist die Integration des Elektromagneten mit dem zu betätigenden Wirkelement. So entstehen sogenannte funktionenintegrierte Konstruktionen (z. B. Magnetventile, Magnetkupplungen, Relais), mit denen sich vereinfachte Bauformen und verbesserte Funktionseigenschaften wie beispielsweise Lebensdauer und Dynamik erreichen lassen.

Der zunehmende Einsatz von Spezialmagneten bzw. von komplexen Funktionsgruppen mit integriertem Magnetantrieb führt auch dazu, dass die Entwicklung und der Einsatz der Magnetantriebe einem breiten Kreis von Entwicklern und Anwendern obliegt.

Der so vorhandene Bedarf an einem Buch, das sowohl die wichtigsten theoretischen Grundlagen, Berechnungs- und Entwicklungsmethoden als auch anwendungstechnische Gesichtspunkte enthält, war Anlass dieses Buch zu schreiben. Nach einer angemessenen Darstellung der theoretischen Grundlagen der elektro-magneto-mechanischen Energiewandlung werden die wichtigsten Berechnungsmethoden für die Feldgrößen und Integralparameter des magnetischen Feldes behandelt, die Berechnung der Magnetkräfte hergeleitet und die Erwärmung des Aktors aus anwendungstechnischer Sicht beschrieben.

Daran schließt sich eine Betrachtung des dynamischen Verhaltens der Elektromagnete an, wobei sowohl der Einfluss der Belastung als auch der der Leistungselektronik auf das dynamische Verhalten des Stellgliedes untersucht wird. Außerdem werden Grundkonstruktionen, technologische Besonderheiten und Gesichtspunkte zum optimalen Einsatz weich- und hartmagnetischer Werkstoffe behandelt.

Wesentlicher Bestandteil des Buches ist die optimale Dimensionierung nach statischen und dynamischen Gesichtspunkten und der konstruktive Entwurf von elektromagnetischen Antrieben. Dabei werden analytische Näherungsmethoden und rechnergestützte Methoden gleichermaßen vorgestellt.

Die Betrachtung des Bauelementes »Elektromagnet« wird schließlich durch Hinweise zum Einsatz elektro-magneto-mechanischer Antriebselemente in kompletten Antrieben, z. B. in geschlossenen Regelkreisen, ergänzt.

Die Autoren haben sich bemüht, die physikalischen und mathematischen Grundlagen in einer möglichst einfachen Form darzustellen, so dass zum Verständnis des Textes kein Spezialwissen aus der Elektrotechnik oder dem Maschinenbau vorausgesetzt werden muss. Das Buch kann als Lehrbuch an Universitäten und Hochschulen in den Studiengängen Elektrotechnik, Maschinenbau und Feinwerktechnik, Automatisierungstechnik

und Fahrzeugbau eingesetzt werden. Es ist jedoch auch für den in der Industrie tätigen Ingenieur als Arbeitsbuch gut geeignet.

Obwohl der Elektromagnet das älteste elektromagnetische Antriebselement ist – er wurde bereits 1825 von STURGEON in seinem Grundaufbau vorgestellt – ist seine wissenschaftliche Behandlung im Vergleich zu Gleich- und Wechselstrommotoren lange Zeit wenig beachtet worden.

Nach dem Buch »Die Elektromagnete« von JASSE im Jahre 1930 ist erstmals von KALLENBACH mit dem Buch »Der Gleichstrommagnet« 1969 eine zusammenfassende Darstellung über dieses Antriebselement im deutschen Sprachraum vorgelegt worden, die im Ausbildungsprozess und in der industriellen Praxis sehr positiv aufgenommen wurde. Das nun vorliegende Buch erweitert den Betrachtungsgegenstand, indem es sich nicht nur auf neutrale Gleichstrommagnete beschränkt, sondern auch Wechselstrommagnete und polarisierte Elektromagnete mit einbezieht, die aufgrund der Fortschritte auf dem Gebiet der Dauermagnetwerkstoffe zunehmend eingesetzt werden. Die Betrachtung elektromagnetischer Antriebsprinzipien führt folgerichtig zu Schrittmotoren, die ausgehend von deren Bewegungsprinzip und konstruktiven Aufbau mit ihren dynamischen Eigenschaften und der notwendigen Ansteuerung beschrieben werden. Das Buch berücksichtigt die umfangreichen neuen Erkenntnisse und Erfahrungen, die von der Arbeitsgruppe »Elektromagnete« an der Technischen Universität Ilmenau sowohl in der Lehre als auch in der Forschung in den letzten 25 Jahren gesammelt wurden.

Die Autoren möchten sich an dieser Stelle bei allen bedanken, die zum Gelingen des Buches beigetragen haben, der Unterstützung unserer Familien gebührt insbesondere unser Dank. Unser Dank gilt den Mitarbeitern des Instituts für Mikrosystemtechnik, Mechatronik und Mechanik der TU Ilmenau für die fruchtbaren Diskussionen und wertvollen Anregungen. Frau Volk, Herrn Dipl.-Ing. Eccarius und Herrn M. Kallenbach danken wir für die Hilfe bei der Erstellung der Druckvorlage, die kritische Durchsicht des Manuskriptes übernahmen Herr Dr. Hermann, Herr Dr. Räumschüssel und Herr Dipl.-Ing. Glet - danke. Außerdem bedanken wir uns bei Herrn Dr. Schlembach und dem B. G. Teubner Verlag, Stuttgart, für die Unterstützung und gelegentliche Ermunterung bei der Erarbeitung des Manuskripts.

Eberhard Kallenbach
Rüdiger Eick
Peer Quendt
April 1994

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Allgemeines	1
1.2	Historische Entwicklung der Elektromagnete	3
1.3	Definitionen	5
1.4	Grundaufbau von Elektromagneten und elektromagnetischen Antriebs- elementen	7
1.5	Entwurfsprozess für elektromagnetische Antriebe	8
2	Grundgesetze des magnetischen Feldes	9
2.1	Das stationäre Magnetfeld	9
2.1.1	Grundgesetze und Grundgrößen	9
2.1.2	Magnetische Feldstärke und Flussdichte in magnetisch inhomogenen Feldgebieten	13
2.1.3	Grundlagen zur Berechnung einfacher magnetischer Kreise	14
2.1.4	Integralparameter des magnetischen Feldes	17
2.2	Grundgesetze des quasistationären elektromagnetischen Feldes	21
2.2.1	Das Induktionsgesetz	21
2.2.2	Wirbelströme und Feldverdrängung	24
2.3	Das System der Maxwellschen Gleichungen	26
2.4	Eigenschaften magnetischer Werkstoffe	28
2.4.1	Einteilung magnetischer Werkstoffe	28
2.4.2	Die Gefügestruktur	30
2.4.3	Magnetische Anisotropien, Magnetostriktion	31
2.4.4	Die Magnetisierungskurve	32
2.4.5	Beeinflussung der Eigenschaften weichmagnetischer Werkstoffe . .	35
2.4.6	Magnetisch halbharte Werkstoffe	39
2.4.7	Eigenschaften hartmagnetischer Werkstoffe	40
2.4.8	Kunststoffgebundene Dauermagnete	43

3	Magnetkraft und Energie	47
3.1	Allgemeines	47
3.2	Der Gleichstrommagnet als stationärer Energiewandler	48
3.2.1	Stationäre Betriebszustände	48
3.2.2	Die elektrische Grundstruktur	48
3.2.3	Die magnetische Grundstruktur des neutralen Magnetkreises	50
3.2.4	Die magnetische Grundstruktur polarisierter Elektromagnete	53
3.2.5	Energetische Kennziffern zur Bewertung der stationären Energiewandlung	56
3.2.6	Der Gesamtwirkungsgrad von Elektromagneten	59
3.3	Elektromagnete als dynamische Energiewandler	59
3.3.1	Die dynamische Energiewandlung	59
3.3.2	Der neutrale Elektromagnet	60
3.3.3	Energetische Kennziffern zur Bewertung der dynamischen Energiewandlung	61
3.4	Magnetkraftberechnung	63
3.4.1	Kraftwirkung im magnetischen Feld	63
3.4.2	Berechnung der Magnetkraft aus dem Ψ -I-Kennlinienfeld	67
3.4.3	Energie- und Kraftberechnung mit magnetischen Netzwerken	69
3.4.4	Magnetkraft und Maxwellschen Spannungen	72
3.5	Magnetkraftkennlinien	73
3.5.1	Magnetkraft-Hub- und Magnetkraft-Strom-Kennlinien	73
3.5.2	Beeinflussung der Magnetkraft-Hub-Kennlinie	75
3.5.3	Charakteristische Anker-Ankergegenstück-Systeme	77
3.5.4	Untersuchungen an Topfmagneten mit Kennlinienbeeinflussung	78
3.5.5	Analyse und Synthese der Kennlinienbeeinflussung	83
3.6	Wechselstrommagnete	87
4	Berechnung des magnetischen Feldes von Elektromagneten	95
4.1	Überblick über die Berechnungsverfahren	95
4.2	Magnetkreisberechnung mit Netzwerkmethoden	98
4.3	Magnetkreisberechnung mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode	103
4.3.1	Grundgleichungen	103
4.3.2	Datenvorbereitung	110
4.3.3	Datenauswertung	115
4.3.4	Adaptive FEM	119
4.4	Polarisierte Magnetkreise	122

5	Das dynamische Verhalten von Elektromagneten	125
5.1	Allgemeines	125
5.2	Das dynamische Verhalten von Gleichstrommagneten	127
5.2.1	Theoretische Grundlagen	127
5.2.2	Näherungsmethoden zur Berechnung des dynamischen Verhaltens von Gleichstrommagneten	133
5.2.3	Numerische Berechnung des dynamischen Verhaltens	144
5.2.4	Einfluss der Wirbelströme auf das dynamische Verhalten	150
5.2.5	Beeinflussung des dynamischen Verhaltens von Gleichstrommagneten in offener Steuerkette mittels elektronischer Schaltungen	160
5.2.6	Einteilung der elektro-magneto-mechanischen Antriebe bezüglich ihrer dynamischen Eigenschaften	168
5.2.7	Gleichstrommagnete als Stellelemente in Positionierantrieben	170
5.3	Dynamisches Verhalten von Wechselstrommagneten	182
5.3.1	Grundgleichungen	182
5.3.2	Berechnung der Schaltzeiten	183
5.3.3	Dynamisches Kennlinienfeld von Wechselstrommagneten	186
6	Erwärmungsberechnung	189
6.1	Allgemeines	189
6.2	Grundlagen der Wärmeübertragung	190
6.2.1	Wärmeleitung	191
6.2.2	Wärmeübertragung durch Konvektion	195
6.2.3	Wärmeabgabe durch Strahlung	196
6.3	Erwärmung von Gleichstrommagneten	199
6.3.1	Temperaturbegriffe	199
6.3.2	Spulenerwärmung unter idealen Bedingungen	199
6.3.3	Berechnung der Spulentemperatur bei Berücksichtigung der thermisch bedingten Leistungsänderung	201
6.3.4	Temperaturverhalten bei unterschiedlichen Betriebsarten	203
6.3.5	Temperaturverteilung über dem Hauptschnitt eines Topfmagneten	208
6.4	Betriebszuverlässigkeit	211
7	Elektromagnetische Schrittmotoren	215
7.1	Das Wesen elektromagnetischer Schrittmotoren	215
7.2	Konstruktiver Aufbau und Wirkungsweise	220
7.2.1	Besonderheiten elektromagnetischer Schrittmotoren	220
7.2.2	Wechselpol-schrittmotoren	225
7.2.3	Hybridschrittmotoren	229
7.3	Dynamische Eigenschaften von Schrittmotoren	237
7.3.1	Bewegungsgleichungen	237
7.3.2	Schrittmotorcharakteristik	242
7.3.3	Elektronische Schrittteilung	243
7.4	Die Ansteuerung von Schrittmotoren	246
7.4.1	Aufgaben der Ansteuerung	246
7.4.2	Leistungsstellglieder für Schrittmotoren	247
7.4.3	Schrittmotoren in Regelkreisen	252

8 Entwurf elektromagnetischer Antriebe	257
8.1 Struktur des Entwurfsprozesses	257
8.2 Einteilungskriterien für magnetische Aktoren	261
8.3 Berechnung der Magnethauptabmessungen	263
8.4 Besonderheiten bei der konstruktiven Auslegung	266
8.4.1 Der Eisenkreis	267
8.4.2 Luftspalte im Magnetkreis	271
8.4.3 Allgemeine Gestaltungsrichtlinien	276
8.5 Aufbau und Technologie der Erregerspule	279
8.5.1 Allgemeines	279
8.5.2 Füllfaktoren	281
8.5.3 Die Berechnung der Spulendaten von Gleichstrommagneten	283
8.5.4 Spulenkörper und Kontaktierung	286
9 Spezielle Magnetkonstruktionen	293
9.1 Hubmagnete	295
9.2 Polarisierte Magnete	298
9.3 Ventilmagnete	300
9.3.1 Schaltventilmagnete	302
9.3.2 Proportionalmagnete	307
9.4 Drehmagnete	311
9.5 Haftmagnete	315
9.6 Elektromagnetisch schaltbare Bremsen und Kupplungen	317
9.7 Elektromagnetische Relais	321
10 Magnetische Mikroaktoren	323
10.1 Einführung	323
10.2 Ähnlichkeitsgesetze	324
10.3 Herstellungstechnologien magnetischer Mikroaktoren und Magnetwerkstoffe	328
10.3.1 Spulenminiaturisierung	329
10.3.2 Herstellung von miniaturisierten Spulen	331
10.3.3 Mikroplanarspulen auf Halbleitersubstraten	332
10.3.4 Keramik- und Folienspulen	335
10.3.5 Eisenkreis	340
10.3.6 Dauermagnetmaterialien	344
10.4 Mikrotechnische Funktionsgruppen	346
Literaturverzeichnis	351
Formelzeichenverzeichnis	369
Anhang	373
Stichwortverzeichnis	391

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Allgemeines

Elektromagnete werden als **Antriebs Elemente** nach wie vor in vielen Bereichen der Technik in wachsendem Umfang eingesetzt. Zu ihnen gehören Gleichstrommagnete, Wechselstrommagnete und polarisierte Elektromagnete, aber auch elektromagnetische Baugruppen nach dem Reluktanzprinzip, die integrale Bestandteile komplexerer Funktionsgruppen sind. Als Ventilmagnete für Pneumatik und Hydraulik, Betätigungsmagnete in Relais, Kupplungen, Bremsen, Druckmagnete in Mosaikdruckern werden sie in großen Stückzahlen angewendet. Von Magnetherstellern werden teilweise mehrere Millionen Stück von einer Type produziert. Bemerkenswert sind sowohl der schon seit Jahrzehnten anhaltende durchschnittliche Zuwachs des Produktionsumfanges von mehr als 10 % jährlich, als auch die ständig anwachsenden technischen Anforderungen, insbesondere hinsichtlich statischer und dynamischer Eigenschaften, Miniaturisierung, Schnellwirkung und Zuverlässigkeit, aber auch der sich verstärkende Preisdruck, so dass technologische Bedingungen einer effektiveren Produktion im Entwurfsprozess stärker berücksichtigt werden müssen.

Es besteht deshalb ein großes Interesse sowohl von Herstellern als auch von Anwendern der Elektromagnete, die **funktionellen Eigenschaften aus antriebstechnischer Sicht** genau zu beurteilen und zu beschreiben sowie ihre Vor- und Nachteile im Vergleich zu alternativen Antrieben (z. B. Piezoantrieben, magnetostriktiven Antrieben, elektrodynamischen Linearmotoren) zu kennen.

Elektromagnete dienen vorrangig der Erzeugung von **begrenzten, linearen oder rotatorischen wechselsinnigen Bewegungen** mit Rast, wobei die beiden Raststellungen den stabilen Zuständen entsprechen, die sich nach dem Ein- bzw. Ausschalten der Erregerspule einstellen. Für Elektromagnete ist es auf Grund des ihrer Wirkungsweise zugrunde liegenden Energiewandlungsprinzips (Reluktanzprinzip) charakteristisch,

dass mit Hilfe der magnetischen Feldkräfte eine Ankerbewegung in nur **einer** Bewegungsrichtung (aktive Bewegungsrichtung) hervorgerufen wird, während die Rückstellung des Ankers (passive Bewegungsrichtung) durch äußere Kräfte (z. B. Federkräfte) erfolgen muss. Üblicherweise arbeiten Elektromagnete in Zweistellungsantrieben in offener Steuerkette. Der Bewegungsvorgang wird deshalb allein durch die elektrischen, magnetischen und mechanischen Ausgleichsvorgänge bestimmt, die beim Übergang von dem einen in den anderen stabilen Zustand auftreten.

Durch **geometrische Integration** und Kombination der funktionellen Eigenschaften mehrerer Elektromagnete entstehen elektromagnetische Antriebselemente, die eine wesentlich erweiterte Antriebsfunktion besitzen. Das sind z. B. aktive Bewegungen in zwei Bewegungsrichtungen (Umkehrhubmagnete), vergrößerte bzw. unbegrenzte Bewegungsbereiche (Mehrstellungsmagnete, Schrittmotoren), Erzeugung von Bewegungen mit einem Bewegungsfreiheitsgrad $F > 1$ (Mehrkoordinatenhybridschrittmotoren). Elektromagnetische Schrittmotoren erlauben häufig zusammen mit leistungsfähigen Ansteuerschaltungen für viele antriebstechnische Probleme sehr günstige technische Lösungen (z. B. Positioniersysteme ohne Lagemesssystem).

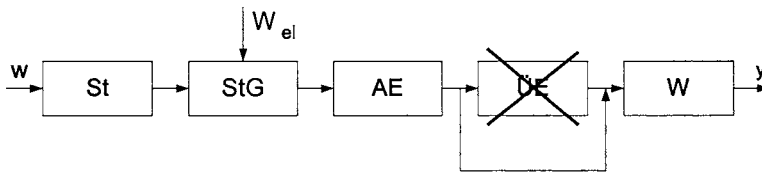


Bild 1.1: Blockschaltbild von Direktantrieben in offener Steuerkette
StG Leistungsstellglied, AE Antriebselement, ÜE Übertragungselement, W Wirkelement, St Steuereinrichtung, W_{el} elektrische Energie, w Führungsgröße, y Ausgangsgröße

Es liegt in den Betriebseigenschaften der Elektromagnete begründet, dass sie als **direkt wirkende Antriebselemente** (zwischen dem Elektromagnet und dem Wirkelement ist kein mechanisches Übertragungselement angeordnet) im Sinne einer optimalen Systemlösung an den vorliegenden Anwendungsfall angepasst werden müssen (Bild 1.1, Tabelle 1.1).

Tabelle 1.1: Vor- und Nachteile von Direktantrieben

Vorteile:	Nachteile:
einfacher mechanischer Aufbau	Anpassung des Antriebselements an das Wirkelement konstruktiv und funktionell notwendig
kein Übertragungselement	problemspezifische Auslegung
hohe Genauigkeit	keine Reduzierung der Last- und Störgrößen
hohes Beschleunigungsvermögen bei kleinen Hüben	höherer Steuerungsaufwand
gute Integrationsmöglichkeit	

Deshalb sind die Mehrzahl der heute produzierten Elektromagnete **Spezialmagnete**. Häufig sind Elektromagnete als höchste Form der Anpassung an einen vorgegebenen Belastungsfall auch unmittelbar mit dem zu betätigenden Wirkelement integriert, wodurch Lösungen entstehen (z. B. Magnetventile, Relais, Magnetkupplungen), in denen die Elektromagnete nur ein Teilsystem eines komplexeren Funktionselementes darstellen, mit denen sich jedoch verbesserte Funktionseigenschaften (kleineres Bauvolumen, kürzere Schaltzeiten, höhere Lebensdauer) und z. T. beträchtliche Kostensenkungen erreichen lassen.

Seit langem ist bekannt, dass mit Hilfe von »intelligenten« **Ansteuerschaltungen** das statische und dynamische Betriebsverhalten von Elektromagneten sehr stark beeinflusst werden kann, wodurch Möglichkeiten der flexiblen Anpassung an vorgegebene Antriebsaufgaben entstehen, von denen zunehmend Gebrauch gemacht wird.

Mit Ansteuerschaltungen aus diskreten elektronischen Bauelementen waren die steuerungstechnischen Möglichkeiten anfangs noch sehr begrenzt, vergleicht man sie mit den Mitteln, die mit modernen informationsverarbeitenden und leistungssteuernden integrierten Schaltkreisen heute zur Verfügung stehen. Korrektur der nichtlinearen Magnetkraftkennlinien, Kompensation der Reibung, Realisierung einer schnellen Positionierbewegung auch bei relativ großen Stellkräften durch optimale Steuerung des dynamischen Verhaltens sind mögliche **Funktionsverbesserungen**, die sich durch Integration von Mechanik, Elektromagnetik, Leistungs- und Mikroelektronik im Sinne einer **mechatronischen** Lösung erreichen lassen, wobei das Verbesserungspotenzial z. Zt. bei weitem noch nicht ausgeschöpft ist.

Gerade der zunehmende Einsatz von Spezialmagneten und die Integration der Magnetantriebe in komplexere Funktionseinheiten sowie die wachsende Bedeutung der Schnittstelle zum informationsverarbeitenden System hat dazu geführt, dass Entwicklung und Einsatz von Elektromagneten und elektromagnetischen Antrieben nicht nur einer relativ kleinen Gruppe von Magnetherstellern vorbehalten bleiben kann, sondern sie muss von einem breiten Kreis von Entwicklern, Herstellern und Anwendern gemeinsam realisiert werden.

1.2 Historische Entwicklung der Elektromagnete

Der Elektromagnet ist das älteste elektromagnetische Antriebselement der Elektrotechnik überhaupt. Er wurde 1825 von **STURGEON**¹ der Britischen Akademie der Wissenschaften vorgestellt und noch im gleichen Jahrzehnt als Relaisantrieb technisch genutzt.

Zur Darstellung der Entwicklung der Magnettechnik, charakterisiert durch neue Lösungen, Entwurfsmethoden und neue Anwendungsbereiche sollen nachfolgend Entwicklungsetappen abgegrenzt werden:

¹William Sturgeon, 1783 ... 1850, wirkte in Manchester; Elektromagnetismus, Gerätebau

1. Aussteuerung der magnetischen Kreise im linearen Bereich [1.11].
Charakteristische Bauformen:
 - Gleichstrommagnete mit flachem Anker
 - Gleichstrommagnete mit quasilinearer Kennlinienbeeinflussung
 - Wechselstrommagnete mit Kurzschlussring
2. Ausnutzung der Nichtlinearität der B-H-Kennlinie (Hysterese, Sättigung) zur Verbesserung bzw. Erweiterung der Magnetfunktion.
Charakteristische Bauformen:
 - polarisierte Gleichstrommagnete
polarisierte Haftmagnete
verbesserte Dynamik (Sperrmagnet, DUFFING [1.6] 1930)
Erhöhung der Empfindlichkeit von Relais
 - Gleichstrommagnet mit nichtlinearer Kennlinienbeeinflussung
(BINDER [1.2] 1941)
Anpassung der Magnetkraft-Hub-Kennlinie an den Belastungsfall
Volumenreduzierung
Verbesserung der dynamischen Eigenschaften
3. Beeinflussung der Funktion des Elektromagneten mittels elektronischer Ansteuer- und Bedämpfungsschaltungen bei Betrieb in offener Steuerkette (ab 1950).
 - Volumenreduzierung durch Sparschaltungen
 - Beeinflussung der Anzugszeit t_1 und der Abfallzeit t_2
 - Verringerung der elektromagnetischen Wechselwirkung durch Stromeinprägung
 - Berücksichtigung von Wirbelströmen auf die Dynamik
4. Entwicklung von Näherungsmethoden zur Berechnung von magnetischen Kreisen auf der Basis der Integralparameter des magnetischen Feldes und der Netzwerkmethoden [1.5] (1960).
 - Berechnung stationärer Magnetkraft-Hub-Kennlinien
 - Berechnung der Dynamik mittels Ψ -I-Kennlinienfeld
5. Durchführung von Optimierungsrechnungen an nichtlinearen Gleichstrommagneten auf der Grundlage von Energiebetrachtungen (KALLENBACH [1.13] 1969).
 - Bestimmung der Hauptabmessungen bei Vorgabe der Magnetarbeit
 - Ableitung von Ähnlichkeitsgesetzen für optimale Gleichstrommagnete
6. Erarbeitung von rechnergestützten Entwurfsverfahren für Elektromagnete auf der Basis antriebstechnischer Aufgabenstellungen (NIKITENKO [1.17], EICK [1.7], SCHÄFER-JOTTER [1.23], ULLRICH [1.26]).

7. Anwendung der numerischen Feldberechnung zur Ermittlung von stationären sowie dynamischen Kräften (REICHERT [1.20], ALDEFELD [1.1], MÜLLER [1.16], QUENDT [1.18], FETZER [1.9], KURZ [1.12], [1.10]).
8. Entwurf elektromagnetischer Direktantriebe gekennzeichnet durch funktionelle Wechselwirkung der mechanischen, magnetischen und mikroelektronischen Subsysteme und deren zunehmende geometrische Integration (mechatronische Systemlösung).

Charakteristische Merkmale: Grundfunktionen (Steuerung, Regelung, Signalverarbeitung) werden durch Zusatzfunktionen (Kennlinienkorrektur, Reibungs- und Hysteresekompensation, Identifikation, Adaption, Notlaufeigenschaften) ergänzt (RAAB [1.19], ROSCHKE [1.21]).

Tendenziell nimmt der Informationsfluss an Intensität zu. Es entstehen intelligente elektromagnetische Antriebssysteme, in denen die Verlagerung von Teilfunktionen in den Mikrorechner die Flexibilität und Kompatibilität erhöht und Volumenreduzierungen und höhere Kompaktheit ermöglicht.

9. Die Entwicklung von synthesefreundlichen Entwurfsmethoden auf der Basis von parametrisierbaren Netzwerken mit deren Hilfe die Bestimmung der optimalen Abmessungen der Elektromagneten bei vorgegebener Funktion unter Berücksichtigung von Wirbelströmen und der magnetischen Hysterese möglich ist (BIRLI [1.3], STRÖHLA [1.25], FEINDT [1.8]).
10. Konsequente Miniaturisierung von Elektromagneten und effektive Herstellung von magnetischen Mikroaktoren (batch processing) mit Hilfe von Technologien der Mikrosystemtechnik (GATZEN, BÜTTGENBACH [1.4], [1.24]).
11. Doppelhubmagnet mit integriertem Federmassesystem, wobei dessen Schaltzeiten durch die Resonanzfrequenz des Federmassesystems bestimmt werden. Der Elektromagnet dient vorrangig zum Fangen und Halten des Ankers. Die in der Regel kürzeren Schaltzeiten werden durch die Resonanzfrequenz und die Abschaltvorgänge bestimmt [1.15], [1.22], [1.28].

1.3 Definitionen

Elektromagnete lassen sich nach unterschiedlichen Gesichtspunkten charakterisieren. Während den Anwender insbesondere die antriebstechnisch relevanten Eigenschaften interessieren, muss der Entwickler die physikalischen Grundlagen der funktionellen Eigenschaften kennen und modellieren können, damit er während des Entwurfsprozesses weitgehend optimale Lösungen schaffen kann.

Antriebstechnischer Aspekt:

Elektromagnete sind Antriebselemente für begrenzte rotatorische und lineare Bewegungen kleiner Leistung. Als Betätigungsmagnete besitzen sie in der Regel zwei stabile Positionen. (Anfangslage des Ankers S_1 , $x = 0$, $\delta = \delta_N$, Endlage des Ankers S_2 ,

$x = x_N, \delta = 0$) und nur eine aktive Wirkungsrichtung von S_1 nach S_2 . Das ist die Bewegungsrichtung infolge magnetischer Feldkräfte in Richtung des minimalen magnetischen Widerstandes des magnetischen Kreises (Reluktanzprinzip).

Die Rückstellbewegung (passive Wirkungsrichtung von S_2 nach S_1) muss durch äußere Kräfte (Federkräfte, Gewichtskräfte, Magnetkräfte eines zweiten Elektromagneten) erfolgen. Typische Bewegungsabläufe sind wechselsinnige Bewegungen mit unterschiedlichem Rastverhalten (siehe Bild 1.2).

Während Betätigungsmagnete (Hubmagnete, Zugmagnete) in der Regel zwei Raststellungen aufweisen, besitzen Stanz- und Druckmagnete nur eine Raststellung. Die Anker von Schwingmagneten bewegen sich zwischen den Endlagen ohne Raststellung hin und her.

Sonderformen von Elektromagneten mit mehr als zwei Raststellungen sind z. B.: Doppelhubmagnete mit drei Raststellungen und elektromagnetische Schrittmotoren (siehe Kapitel 7).

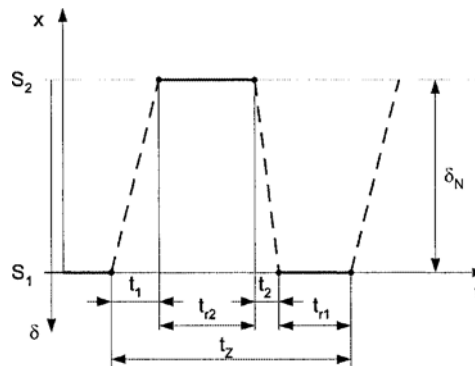


Bild 1.2: Wechselsinnige Bewegung mit doppelter Rast; t_1 Anzugszeit, t_2 Abfallzeit, t_{r1} Rastzeit in Anfangslage, t_{r2} Rastzeit in Endlage, t_z Zykluszeit

Physikalischer Aspekt:

Elektromagnete sind elektro-magneto-mechanische Energiewandler, welche elektrische Energie über die Zwischenform der magnetischen Energie in mechanische Bewegungsenergie umwandeln. Voraussetzung für die Wirkungsweise ist die Abhängigkeit des Energiezustandes des steuerbaren Magnetfeldes von mindestens einer Bewegungskordinate.

Informationstechnischer Aspekt:

Elektromagnete sind Übertragungselemente mit in der Regel zwei stabilen Positionen des Magnetankers, die in offener Steuerkette mit Hilfe elektrischer Eingangssignale mechanische Ausgangssignale erzeugen.

Im Allgemeinen sind diese Eingangssignale Sprungfunktionen der Erregerspannung oder des Erregerstromes. Der zeitliche Verlauf der mechanischen Ausgangssignale wird in erster Linie durch das Übertragungsverhalten des Elektromagneten und die Belastung bestimmt. In zunehmendem Maße werden heute Elektromagnete auch als Antriebselemente in Antriebsregelkreisen eingesetzt (z. B. Proportionalmagnete).

Aus systemtechnischer Sicht sind Elektromagnete Elemente in übergeordneten Antriebssystemen, die als Ganzheit betrachtet werden müssen.

1.4 Grundaufbau von Elektromagneten und elektromagnetischen Antriebselementen

Im Laufe der über 170-jährigen Entwicklung von Elektromagneten und elektromagnetischen Antriebselementen sind sehr viele verschiedene konstruktive Ausführungen von Elektromagneten entstanden, die sich auf wenige Grundformen zurückführen lassen. Eisenkreis, Erregerspule und Arbeitsluftspalt sind die funktionsrelevanten Elemente jedes Elektromagneten. Der magnetische Kreis besteht aus dem Anker als dem beweglichen Teil, dem magnetischen Eisenrückschluss (Stator), der mit der Erregerspule gestellfest verbunden ist sowie dem Arbeitsluftspalt (siehe Bild 1.3), in dem die Magnetkraft erzeugt wird. Je nach der konstruktiven Gestaltung dieser Funktionselemente können Elektromagnete mit unterschiedlichen Magnetkraft-Hub-Kennlinien entworfen werden, die den technischen Forderungen der antriebstechnischen Aufgabenstellung mehr oder weniger nahe kommen.

Während für Elektromagnete als Funktionselemente vor allem die in Bild 1.3 dargestellten drei Magnetgrundformen charakteristisch sind, können durch Modifikation (Bild 1.4) und Integration von mehreren Elektromagneten zu elektromagnetischen Schrittmotoren (Bild 1.5) oder durch Integration mit dem Wirkelement (z. B. Magnetventile, Bild 9.11) sehr unterschiedliche Magnetkreise entstehen. Wesentlichen Einfluss auf den Verlauf der für den Antriebsvorgang bedeutsamen Magnetkraft-Hub-Kennlinie besitzt die Gestalt des Arbeitsluftspaltes.

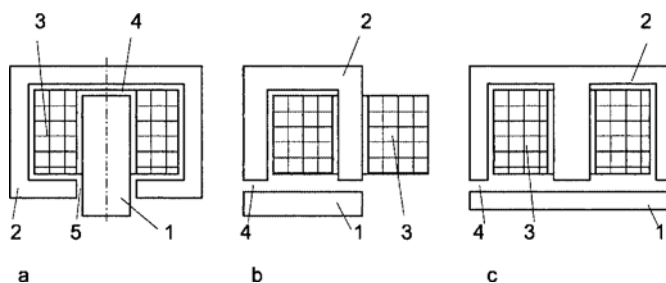


Bild 1.3: Grundformen von Elektromagneten: a) Topfmagnet, b) U-Magnet, c) E-Magnet, 1 Anker, 2 Stator, 3 Erregerspule, 4 Arbeitsluftspalt, 5 parasitärer Luftspalt

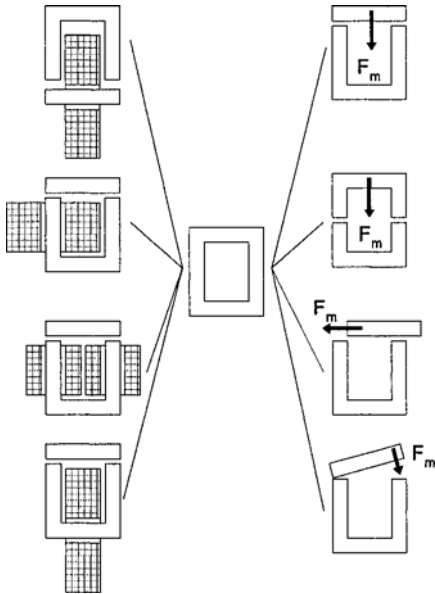


Bild 1.4: Modifikation von Magnetgrundformen am Beispiel des U-Magneten

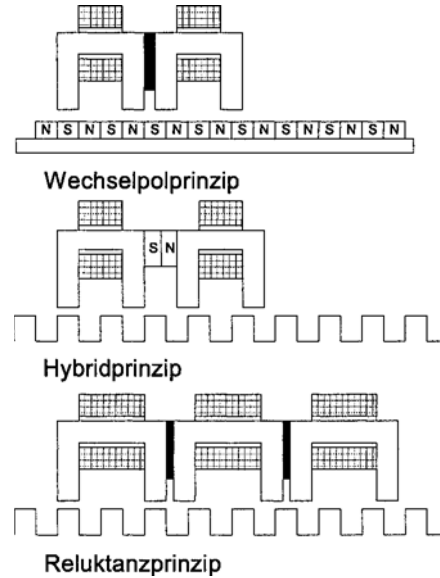


Bild 1.5: Grundprinzipien elektromagnetischer Schrittantriebe

1.5 Entwurfsprozess für elektromagnetische Antriebe

Die ständig wachsenden technischen Anforderungen an die Elektromagnete als Elemente elektromagnetischer Antriebe und die Notwendigkeit der weitgehenden Anpassung der Antriebs Elemente an die Antriebsfunktion erfordert die Ableitung von **Entwurfsmethoden** und **Entwurfswerkzeugen**, die dem Hersteller und Anwender ein schnelles Reagieren auf Markterfordernisse ermöglichen. Elektromagnete können nur entworfen werden, wenn das Antriebssystem im Zusammenhang mit dem Belastungsfall (Wirkelement) und dem Leistungsstellglied sowie der Steuereinrichtung als Ganzheit aufgefasst wird [1.14] [1.27].

Die Vielzahl an Einflussgrößen und technischen Forderungen erlaubt keinen direkten Syntheseprozess, sondern erfordert einen schrittweisen Entwurf (Kapitel 8). Der Erfolg des Entwurfsprozesses hängt sehr wesentlich von den verfügbaren mathematischen und physikalischen Modellen und Rechenprogrammen ab. Oft treten große Unsicherheiten in der frühen Entwurfsphase bei der Bestimmung des Antriebsprinzips und der geometrischen Grundstruktur auf. Mit numerischen Feldberechnungsmethoden können vorgegebene Elektromagnete heute bereits mit für ingenieurtechnische Zwecke genügender Genauigkeit berechnet werden.

Es ist ein wesentliches Anliegen dieses Buches neben der Beschreibung der physikalischen Vorgänge, den Entwickler moderner Elektromagnete und elektromagnetischer Antriebe mit mathematischen Modellen zu unterstützen.

Kapitel 2

Grundgesetze des magnetischen Feldes

2.1 Das stationäre Magnetfeld

2.1.1 Grundgesetze und Grundgrößen

In der Umgebung eines stromdurchflossenen Leiters können experimentell Kraftwirkungen auf eine Magnetnadel oder Eisenspäne festgestellt werden, die dazu führen, dass sich die Magnetnadel oder die Eisenspäne in einer bestimmten Weise ausrichten. Diese Kraftwirkungen werden von dem magnetischen Feld des stromdurchflossenen Leiters verursacht. Wenn bei einer Bewegung der Magnetnadel um den Leiter die Orientierung der Nadel aufgezeichnet wird, erhält man eine bildliche Darstellung des magnetischen Feldes. Im Fall eines unendlich langen geraden stromdurchflossenen Leiters ergeben sich als Feldbild konzentrische Kreise (Bild 2.1).

Das magnetische Feld wird mit der magnetischen Feldstärke¹ \mathbf{H} und der magnetischen Flussdichte² \mathbf{B} beschrieben. Nach dem Durchflutungsgesetz gilt für das Linienintegral der magnetischen Feldstärke bei einem Umlauf um den Leiter:

$$\oint_l \mathbf{H} \, dl = I. \quad (2.1)$$

¹Die magnetische Feldstärke wird in A/m gemessen.

²Die magnetische Flussdichte wird in Vs/m² bzw. Tesla (T) gemessen. Es gilt 1 T = 1 Vs/m². Eine ältere heute nicht mehr benutzte Einheit ist das Gauß (G). Es gilt 1 G = 10⁻⁴ T.

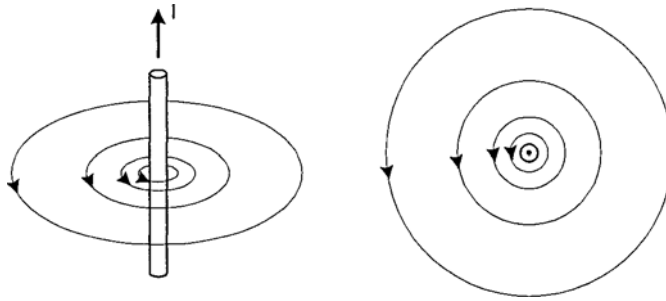


Bild 2.1: Feldbild eines unendlich langen geraden stromdurchflossenen Leiters; die Richtung der Feldlinien bildet mit der Stromrichtung eine Rechtsschraube.

Werden von dem Integrationsweg mehrere Ströme umfasst, so ist das Linienintegral der magnetischen Feldstärke gleich der vorzeichenbehafteten Summe der Ströme.

$$\oint \mathbf{H} \, d\mathbf{l} = \sum I = \Theta. \quad (2.2)$$

Da die Summe der Ströme die von dem Umlaufweg berandete Fläche durchflutet (durchströmt), wird diese Stromsumme auch als Durchflutung Θ^3 bezeichnet. Für den in Bild 2.2a dargestellten Integrationsweg gilt:

$$\Theta = I_2 + I_3 - I_4. \quad (2.3)$$

In dem in Bild 2.2b gezeigten Fall einer Spule mit w Windungen ist die Durchflutung gleich dem Produkt aus Strom und Windungszahl:

$$\Theta = w I. \quad (2.4)$$

Dabei ist es für das magnetische Feld gleichgültig, ob zum Beispiel eine Spule mit 1000 Windungen mit einer Stromstärke von 1 A oder eine Spule mit 10 Windungen mit einer Stromstärke von 100 A betrieben wird.

Wenn man den Integrationsweg bei der Berechnung des Umlaufintegrals (2.1) in einzelne Abschnitte aufteilt, erhält man für jeden dieser Abschnitte ein einzelnes Linienintegral.

Diese Linienintegrale der magnetischen Feldstärke bestimmen in Analogie zur elektrischen Spannung eine magnetische Spannung V . Für die magnetische Spannung $V_{1,2}$

³Die Durchflutung wird mit dem griechischen Buchstaben Θ gekennzeichnet und in Ampere (A) gemessen. Im Sprachgebrauch wird als Einheit der Durchflutung häufig auch Amperewindungen (Aw) verwendet.

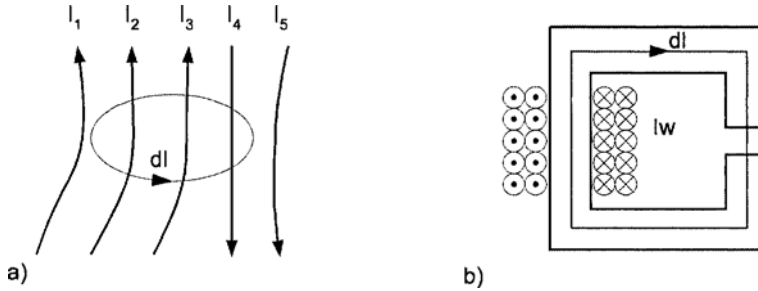


Bild 2.2: Durchflutung als geschlossenes Linienintegral der magnetischen Feldstärke
a) stromdurchflossene Leiter, b) einfacher Magnetkreis

zwischen zwei Punkten P_1 und P_2 gilt somit:

$$V_{1,2} = \int_{P_1}^{P_2} \mathbf{H} \, d\mathbf{l}. \quad (2.5)$$

Neben der magnetischen Feldstärke \mathbf{H} ist die magnetische Flussdichte \mathbf{B} , die auch als magnetische Induktion bezeichnet wird, eine weitere Größe zur Beschreibung des magnetischen Feldes. Für den Zusammenhang zwischen der magnetischen Flussdichte und der magnetischen Feldstärke gilt:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}. \quad (2.6)$$

Der Proportionalitätsfaktor μ zwischen der magnetischen Flussdichte \mathbf{B} und der magnetischen Feldstärke \mathbf{H} wird als Permeabilität bezeichnet. Die Permeabilität kennzeichnet den Einfluss verschiedener Materialien auf das magnetische Feld. Im allgemeinen Fall wird der Zusammenhang zwischen \mathbf{B} und \mathbf{H} durch eine Vektorfunktion mit einer richtungs-, orts- und feldstärkeabhängigen Permeabilität (Tensorgröße) beschrieben [2.31]. Die Richtungsabhängigkeit tritt bei anisotropen Stoffen, die Ortsabhängigkeit bei inhomogenen Stoffen und die Feldstärkeabhängigkeit bei nichtlinearen Stoffen auf.

Mit der relativen Permeabilität μ_r kann die absolute Permeabilität als ein Vielfaches der Induktionskonstanten μ_0 dargestellt werden.

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (2.7)$$

Die Induktionskonstante μ_0 ist gleich der Permeabilität des Vakuums. Sie beträgt:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} = 1.256 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}. \quad (2.8)$$

Die relative Permeabilität μ_r ist ein stoffspezifischer dimensionsloser Faktor (Abschnitt 2.4).

Die Differenz zwischen der magnetischen Flussdichte und dem Wert $\mu_0 \mathbf{H}$ wird als magnetische Polarisation \mathbf{J}_m bezeichnet.

$$\mathbf{J}_m = \mathbf{B} - \mu_0 \mathbf{H} \quad (2.9)$$

Die magnetische Polarisation kennzeichnet somit den Beitrag, den das magnetische Material zur magnetischen Flussdichte liefert.

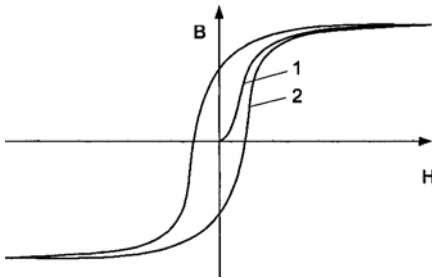


Bild 2.3: B-H-Kennlinie eines Eisenmaterials, 1 - Neukurve, 2 - Hysteresekurve

Die Größe

$$\mathbf{M} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{H} \quad (2.10)$$

wird als Magnetisierung bezeichnet. Neben der Permeabilität μ wird auch die magnetische Suszeptibilität

$$\chi = \mu_r - 1 \quad (2.11)$$

zur Kennzeichnung von Materialien im magnetischen Feld verwendet. Ist die Permeabilität eines Stoffes von der magnetischen Feldstärke unabhängig, spricht man von einem linearen Verhalten des Stoffes im Magnetfeld. Die in technischen Magnetkreisen eingesetzten Eisenmaterialien zeigen im Gegensatz dazu ein nichtlineares Verhalten. Der Zusammenhang zwischen der magnetischen Feldstärke und der Flussdichte ist bei diesen Materialien nichtlinear und nicht eindeutig (Bild 2.3). Die Materialien zeigen ein Hystereseverhalten (Abschnitt 2.4.4).

Eine weitere für die Beschreibung von Magnetfeldern wichtige Größe ist der magnetische Fluss⁴ Φ . Er lässt sich aus der magnetischen Flussdichte innerhalb einer Fläche A mit der Gleichung

$$\Phi = \int_A \mathbf{B} \, dA \quad (2.12)$$

bestimmen.

Für den magnetischen Fluss gilt, dass der gesamte in ein Volumenteil hineinströmende Fluss gleich dem aus diesem Volumen herauströmenden Fluss ist. Die Feldlinien der magnetischen Flussdichte sind entweder stets in sich geschlossen oder verlaufen vom

⁴Der magnetische Fluss wird in Vs oder Weber (Wb) gemessen. Es gilt: $1 \text{ Wb} = 1 \text{ Vs}$.

Unendlichen zum Unendlichen. Mathematisch lässt sich diese Aussage in dem Satz von der Quellenfreiheit des magnetischen Flusses beschreiben [2.6], [2.22].

$$\oint_A \mathbf{B} \, d\mathbf{A} = 0 \quad (2.13)$$

2.1.2 Magnetische Feldstärke und Flussdichte in magnetisch inhomogenen Feldgebieten

Wenn sich in dem betrachteten Feldgebiet Bereiche mit unterschiedlicher Permeabilität befinden, so wird dieses Gebiet als magnetisch inhomogen bezeichnet.

Die Permeabilität kann sich an Grenzflächen zwischen verschiedenen Stoffen innerhalb ferromagnetischer Materialien infolge unterschiedlicher Aussteuerungen und durch Materialinhomogenitäten ändern.

Da das Feld der magnetischen Flussdichte ein quellenfreies Feld ist, ist eine Änderung der Permeabilität mit einer Änderung der magnetischen Feldstärke verbunden. Dies führt dazu, dass Grenzflächen zwischen Materialien mit verschiedenen Permeabilitäten Quellen oder Senken von Feldlinien sind (Bild 2.4a).

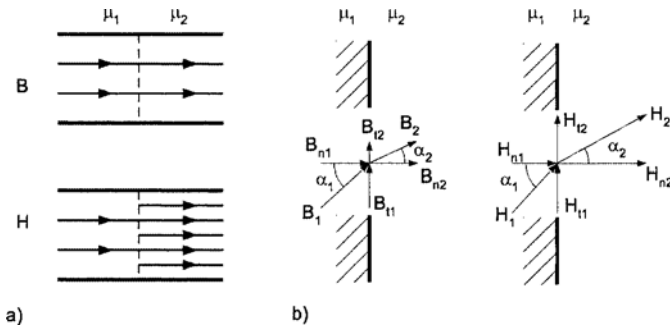


Bild 2.4: Verhalten der magnetischen Flussdichte und der magnetischen Feldstärke an der Grenzfläche zwischen Materialien mit verschiedenen Permeabilitäten ($\mu_1 = 2\mu_2$); a) Feldverlauf senkrecht zur Grenzfläche; b) Normal- und Tangentialkomponenten von \mathbf{B} und \mathbf{H} bei beliebigem Verlauf zur Grenzfläche

Verläuft die Grenzfläche nicht senkrecht zu den Feldlinien, so entsteht an der Grenzfläche ein Feldlinienknick. An einer Grenzfläche sind die Normalkomponenten der magnetischen Flussdichte und die Tangentialkomponenten der magnetischen Feldstärke stetig:

$$B_{n1} = B_{n2} \quad (2.14)$$

$$H_{t1} = H_{t2}. \quad (2.15)$$

Weiterhin gilt für die Tangentialkomponenten der magnetischen Flussdichte

$$\frac{B_{t1}}{B_{t2}} = \frac{\mu_1}{\mu_2} \quad (2.16)$$

und für die Normalkomponenten der magnetischen Feldstärke

$$\frac{H_{n1}}{H_{n2}} = \frac{\mu_2}{\mu_1} \quad (2.17)$$

Für den Ein- bzw. Austrittswinkel der Feldlinien gegenüber der Flächennormalen an einer Grenzfläche kann mit (2.14)-(2.17) die Gleichung

$$\frac{\tan \alpha_1}{\tan \alpha_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2} \quad (2.18)$$

abgeleitet werden. Bei dem Übergang von einem nicht bis zur Sättigung angesteuerten ferromagnetischen Material ($\mu_r \gg 1$) zu Luft ($\mu_r \approx 1$) ist der Unterschied der Permeabilitäten so groß, dass die Feldlinien nahezu senkrecht aus dem ferromagnetischen Material austreten.

2.1.3 Grundlagen zur Berechnung einfacher magnetischer Kreise

Sind ferromagnetische Körper in einem magnetischen Feld so angeordnet, dass auf Grund der hohen Permeabilität des ferromagnetischen Materials die Feldlinien der magnetischen Flussdichte hauptsächlich innerhalb dieser ferromagnetischen Körper verlaufen, spricht man in Analogie zum elektrischen Stromkreis vom magnetischen Kreis.

Eine bei der Berechnung magnetischer Kreise nützliche Größe ist der magnetische Widerstand R_m . Der magnetische Widerstand eines Abschnittes des Magnetkreises ist gleich dem Quotienten aus der magnetischen Spannung über diesem Abschnitt und dem magnetischen Fluss, der durch diesen Abschnitt fließt.

$$R_m = \frac{V}{\Phi} \quad (2.19)$$

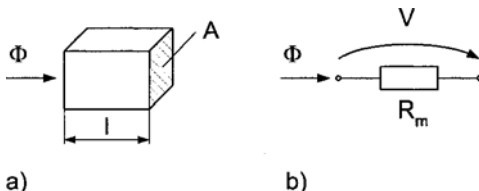


Bild 2.5: Magnetischer Widerstand: a) geometrische Größen für die Dimensionierung, b) Schaltbild

Der Kehrwert des magnetischen Widerstands wird als magnetischer Leitwert G_m bezeichnet.

$$G_m = \frac{1}{R_m} \quad (2.20)$$

Der magnetische Widerstand und der magnetische Leitwert sind in der Mehrzahl der technisch interessanten Fälle nichtlinear. In einem homogenen magnetischen Feld (B und μ konstant) bestimmt sich der magnetische Widerstand eines Magnetkreisabschnittes (Bild 2.5) mit der Länge l , der Querschnittsfläche A und der Permeabilität μ mit der Dimensionierungsgleichung

$$R_m = \frac{l}{\mu A}. \quad (2.21)$$

Eine weitere wichtige Größe für die Berechnung magnetischer Kreise ist der Streufaktor. Die Einführung eines Streufaktors resultiert aus der Tatsache, dass sich in einem technischen Magnetkreis der magnetische Gesamtfluss Φ in einen Nutzfluss Φ_δ im Luftspalt und einen Streufluss Φ_σ außerhalb des Luftspaltes aufteilt.

$$\Phi = \Phi_\delta + \Phi_\sigma \quad (2.22)$$

Das Verhältnis des Streuflusses zum Gesamtfluss wird als Streufaktor bezeichnet.

$$\sigma = \frac{\Phi_\sigma}{\Phi} \quad (2.23)$$

Der Fall, dass der gesamte magnetische Fluss als Nutzfluss durch den Arbeitsluftspalt verläuft, ist nur theoretisch möglich. In einem technischen Magnetkreis ist der mit (2.23) definierte Streufaktor stets größer Null. Eine allgemeine Aussage über die Größe des Streufaktors eines Magnetkreises ist nicht möglich. Er hängt von der Geometrie des Magnetkreises, den Luftspaltgrößen, der Erregung und vom verwendeten Magnetmaterial ab. Methoden, mit denen sich der Streufaktor berechnen lässt, werden in den Kapiteln 3.4 und 4 beschrieben.

Unter der Annahme, dass das Magnetfeld bereichsweise homogen ist, kann folgendes Verfahren zur Berechnung eines einfachen magnetischen Kreises (Bild 2.6) angewendet werden.

Der magnetische Kreis wird in Bereiche mit konstantem Querschnitt und homogenem magnetischen Material aufgeteilt. Für den magnetischen Gesamtfluss im Eisenkreis gilt:

$$\Phi_{Fe} = \Phi_\delta + \Phi_\sigma. \quad (2.24)$$

Wenn die Streuung vernachlässigt werden kann, gilt für den magnetischen Fluss im Eisen und im Luftspalt:

$$\Phi_{Fe} = \Phi_\delta. \quad (2.25)$$

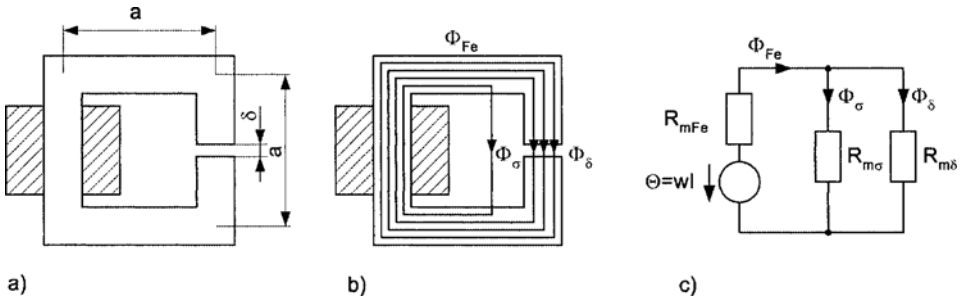


Bild 2.6: Berechnung eines einfachen Magnetkreises a) Geometrie b) idealisierter Feldverlauf c) magnetisches Ersatzschaltbild

Bei gleicher Querschnittsfläche A ist die Flussdichte im Eisen und im Luftspalt konstant.

$$B_{Fe} = B_{\delta} \quad (2.26)$$

Durch die Anwendung des Durchflutungsgesetzes lässt sich eine Gleichung zur Bestimmung der magnetischen Feldstärke ableiten.

$$\Theta = H_{Fe} l_{Fe} + H_{\delta} \delta \quad (2.27)$$

Die mittlere Eisenweglänge

$$l_{Fe} = 4a - \delta \quad (2.28)$$

ist dabei die mittlere Länge, die der magnetische Fluss im Eisen zurücklegt. Somit gilt

$$\Theta = H_{Fe} l_{Fe} + \frac{B_{\delta}}{\mu_0} \delta. \quad (2.29)$$

Wenn der Zusammenhang $B = f_1(H)$ bzw. $H = f_2(B)$ zwischen der Flussdichte und der magnetischen Feldstärke im Eisenkreismaterial bekannt ist, kann die Flussdichte im Magnetkreis unmittelbar mit der Gleichung

$$\Theta = f_2(B)(4a - \delta) + \frac{B}{\mu_0} \delta \quad (2.30)$$

bestimmt werden. Zur graphischen Lösung (Bild 2.7) ermittelt man den Schnittpunkt P zwischen der aus (2.29) und (2.26) ermittelten Geradengleichung

$$B_{Fe} = f(H_{Fe}) = \frac{\mu_0(\Theta - H_{Fe} l_{Fe})}{\delta} \quad (2.31)$$

und der Magnetisierungskurve $B = f_1(H)$.

Bei Berücksichtigung der Hysterese der Magnetisierungskurve und einer Aussteuerung des Magnetkreises bis zur Grenzkurve des Magnetmaterials ergeben sich zwei mögliche Arbeitspunkte P_1 und P_2 . Welcher der beiden Arbeitspunkte sich einstellt, hängt

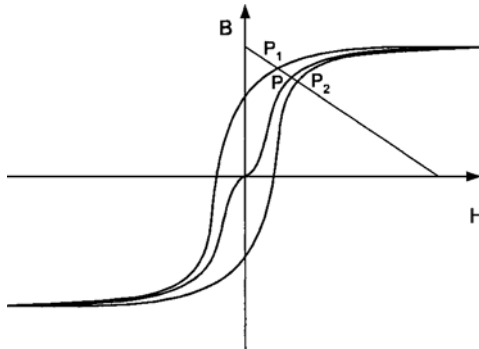


Bild 2.7: Graphische Ermittlung des Arbeitspunktes

von dem vorherigen Magnetisierungszustand ab. Erfolgt nur eine teilweise Aussteuerung auf einer inneren Hystereseschleife, dann liegen die möglichen Arbeitspunkte auf den Schnittpunkten der inneren Hystereseschleife mit der Arbeitsgeraden (2.31) (siehe Abschnitt 2.4.4).

Werden mit diesem einfachen Verfahren Magnetkreise aus weichmagnetischem Material (Abschnitt 2.4) berechnet, so sind die Fehler infolge der angenommenen Näherungen (homogene Magnetkreisabschnitte, Streuung) im Allgemeinen größer als der Fehler infolge der Vernachlässigung der Hysterese, so dass in diesen Fällen eine Berücksichtigung der Hysterese nicht erforderlich ist.

2.1.4 Integralparameter des magnetischen Feldes

Die Größen magnetischer Fluss Φ , verketteter magnetischer Fluss Ψ , magnetischer Widerstand R_m , magnetischer Leitwert G_m und Induktivität L werden als Integralparameter des magnetischen Feldes bezeichnet, da sie im weitesten Sinne durch Integration aus den magnetischen Feldgrößen bestimmt werden.

Für den magnetischen Fluss gilt nach (2.12):

$$\Phi = \int_A \mathbf{B} \, d\mathbf{A}. \quad (2.32)$$

Wenn die Fläche A , die von einer Leiterschleife begrenzte Fläche darstellt, so nennt man diesen Fluss den mit der Windung verketteten Fluss oder Windungsfluss. Der verkettete Fluss einer Spule mit w Windungen ist die Summe aller dieser Windungsflüsse.

$$\Psi = \sum_w \int_A \mathbf{B} \, d\mathbf{A} \quad (2.33)$$

Bei Vernachlässigung der Streuflüsse durch die Spule sind die einzelnen Windungsflüsse gleich, so dass für den verketteten Fluss der Spule gilt:

$$\Psi = w\Phi = w \int_A \mathbf{B} \, d\mathbf{A}. \quad (2.34)$$

In linearen Magnetkreisen ist der verkettete Fluss dem durch die Spule fließenden Strom proportional.

$$\Psi = L I. \quad (2.35)$$

Der Proportionalitätsfaktor zwischen dem verketteten Fluss Ψ und dem Strom I wird als Induktivität⁵ L (statische Induktivität, Gleichstrominduktivität) bezeichnet. Wird mit (2.35) auch in nichtlinearen Magnetkreisen eine Induktivität definiert, ist zu beachten, dass in diesem Fall die Induktivität nicht konstant ist, sondern vom Strom abhängt. Es ist daher bei einer nichtlinearen Beziehung zwischen Ψ und I zweckmäßig eine weitere Induktivitätsgröße, die differentielle Induktivität

$$L_d = \frac{d\Psi}{dI} \quad (2.36)$$

einzuführen. Die differentielle Induktivität in einem Arbeitspunkt P_1 ist gleich dem Anstieg der Tangente an die Ψ - I -Kennlinie (Bild 2.8). Im Unterschied dazu ist die Induktivität gleich dem Anstieg der Sekante, die durch den Koordinatenursprung und den Arbeitspunkt P_1 verläuft.

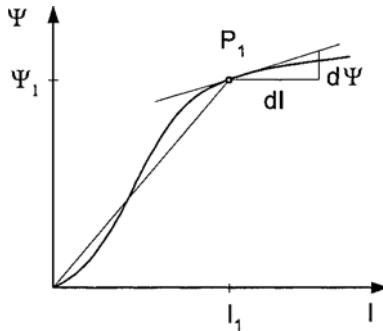


Bild 2.8: Induktivität $L = \Psi_1/I_1$ und differentielle Induktivität $L_d = d\Psi/dI$

Unter Beachtung von (2.19) und (2.35) gilt für die Induktivität in einem linearen Magnetkreis:

$$L = \frac{\Psi}{I} = w^2 \frac{\Phi}{\Theta} = \frac{w^2}{R_m} = w^2 G_m, \quad (2.37)$$

wobei R_m den magnetischen Gesamtwiderstand des linearen magnetischen Kreises darstellt. Zur Erläuterung des Einflusses der Windungszahl werden zwei Magnete A und

⁵Die Induktivität wird in Vs/A oder Henry (H) gemessen. Es gilt $1 \text{ H} = 1 \text{ Vs/A}$.

B betrachtet, die den gleichen Magnetkreis (gleiche Abmessungen, gleiches Material) besitzen und sich nur durch die Wicklung unterscheiden. Die Magnete werden mit Spannungseinprägung betrieben und besitzen folgende technische Daten:

Magnet A: Nennspannung $U_N = 22\text{ V}$, Nennstrom $I_N = 1\text{ A}$, Windungszahl $w = 1000$.

Magnet B: Nennspannung $U_N = 220\text{ V}$, Nennstrom $I_N = 0,1\text{ A}$, Windungszahl $w = 10000$.

Beide Magnete besitzen die gleiche Nenndurchflutung und die gleiche Magnetkraft-Hub-Kennlinie. Nach (2.37) besitzt der Magnet B die 100-fache Induktivität des Magneten A. Wenn beide Magnete mit ihrer jeweiligen Nennspannung betrieben werden, hat dieser Induktivitätsunterschied keinen Einfluss auf das dynamische Verhalten. Die die Geschwindigkeit des Ausgleichsvorgangs beim Ein- bzw. Ausschalten eines linearen Elektromagneten bestimmende Zeitkonstante $\tau = L/R$ ist bei gleichbleibender Wickelfensterfläche A_w und unverändertem Kupferfüllfaktor⁶ k_{Cu} **unabhängig** von der Windungszahl w der Spule, da für den ohmschen Widerstand der Magnetspule (ϱ spezifischer elektrischer Widerstand; l_m mittlere Windungslänge)

$$R = w^2 \frac{\varrho l_m}{k_{Cu} A_w} \quad (2.38)$$

gilt und mit (2.37) für die Zeitkonstante folgt:

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{G_m k_{Cu} A_w}{\varrho l_m}. \quad (2.39)$$

Zur Erläuterung der Unterschiede zwischen der Induktivität und der differentiellen Induktivität wird der im Bild 2.9 gezeigte Topfmagnet betrachtet.

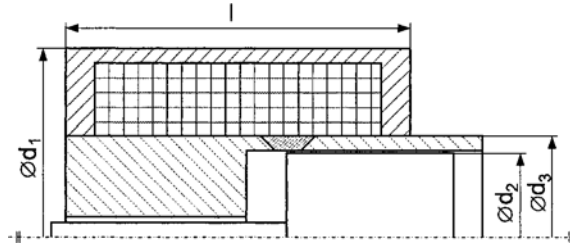


Bild 2.9: Topfmagnet ($l = 50\text{ mm}$, $\varnothing d_1 = 45\text{ mm}$, $\varnothing d_2 = 18\text{ mm}$, $\varnothing d_3 = 22,5\text{ mm}$)

Im Bild 2.10 sind für diesen Magneten das Ψ -I-Kennlinienfeld und das Magnetkraft-Hub-Kennlinienfeld dargestellt.

Diese beiden Kennlinienfelder sind mit der Gleichung (Abschnitt 3.4.2)

$$F_m = \frac{\partial}{\partial \delta} \int_0^i \psi(\delta, i) di \quad (2.40)$$

⁶Der Kupferfüllfaktor ist von der Drahtstärke und der Wickeltechnologie abhängig. Bei sehr dünnen Drähten, die nicht mehr geordnet gewickelt werden, sinkt der Kupferfüllfaktor ab (siehe Kap. 8).

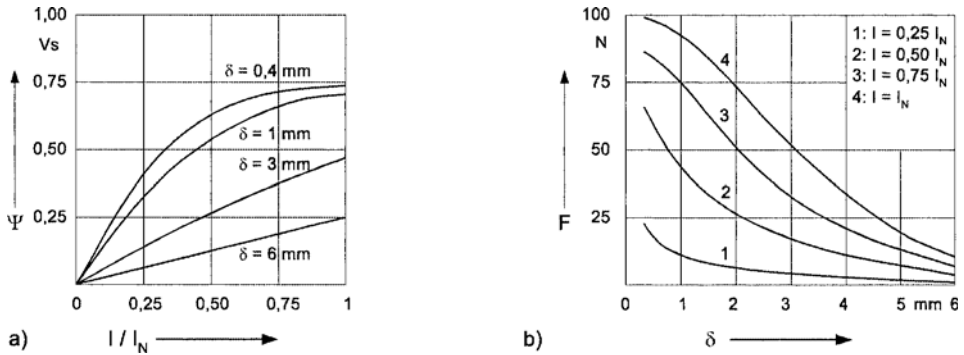


Bild 2.10: Kennlinienfelder für den Topfmagneten nach Bild 2.9 ($w = 1600$, $I_N = 0,7 A$)

verknüpft. Diese Beziehung ermöglicht bei bekanntem Ψ - I -Kennlinienfeld die Berechnung des Magnetkraft-Hub-Kennlinienfeldes. Aus dem Ψ - I -Kennlinienfeld (Bild 2.10a) ist zu erkennen, dass das Eisenmaterial des betrachteten Magneten bei kleinen Luftspalten ($\delta = 0,4 \text{ mm}$) bis in die Sättigung angesteuert wird. Die entsprechende Ψ - I -Kennlinie steigt bei großen Strömen nur noch schwach an. Diese Kennlinie ist nicht-linear. Im Unterschied dazu verläuft die Ψ - I -Kennlinie bei einem großen Luftspalt ($\delta = 6 \text{ mm}$) infolge der Scherung der nichtlinearen Kennlinie des Eisenmaterials mit der Kennlinie des Luftspalts fast geradlinig. Je größer der Luftspalt, um so mehr wird die Ψ - I -Kennlinie linearisiert. Aus dem Ψ - I -Kennlinienfeld kann mit (2.35) für jeden Arbeitspunkt die Induktivität L des Magneten berechnet werden.

Der in Bild 2.11a dargestellte Induktivitätsverlauf zeigt folgende charakteristische Eigenschaften:

– **Stromabhängigkeit** der Induktivität:

Die Induktivität sinkt bei kleinen Luftspalten mit steigendem Strom. Mit zunehmenden Luftspalten wird die Abhängigkeit vom Strom durch die Scherung vermindert, so dass bei großen Luftspalten die Induktivität nahezu unabhängig vom Strom ist.

– **Luftspaltabhängigkeit** der Induktivität:

Mit kleiner werdendem Luftspalt nimmt die Induktivität zu. Diese Zunahme ist bei großen Strömen geringer als bei kleinen Strömen.

Einen anderen Verlauf zeigt die differentielle Induktivität (Bild 2.11b). Dieses Kennlinienfeld bestimmt sich aus dem Anstieg der Kurven im Ψ - I -Kennlinienfeld. Während bei kleinen Strömen die differentielle Induktivität mit kleiner werdendem Luftspalt ansteigt, sinkt sie bei großen Strömen nach Erreichen eines Maximums mit kleiner werdendem Luftspalt.

Die Unterschiede zwischen der Induktivität und der differentiellen Induktivität sind bei der Beurteilung des dynamischen Verhaltens zu beachten. Wird ein Elektromagnet