



Andreas Binder

Elektrische Maschinen und Antriebe

Grundlagen, Betriebsverhalten

2. Auflage

EBOOK INSIDE

 Springer Vieweg

Elektrische Maschinen und Antriebe

Andreas Binder

Elektrische Maschinen und Antriebe

Grundlagen, Betriebsverhalten

2., aktualisierte Auflage

Andreas Binder
Technische Universität Darmstadt
Darmstadt
Deutschland

Die Darstellung von manchen Formeln und Strukturelementen war in einigen elektronischen Ausgaben nicht korrekt, dies ist nun korrigiert. Wir bitten damit verbundene Unannehmlichkeiten zu entschuldigen und danken den Lesern für Hinweise.

ISBN 978-3-662-53240-9 ISBN 978-3-662-53241-6 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-53241-6>

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

Springer Vieweg

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2011, 2017

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, 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. Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

*Für Brigitte, Anna, Josef, Franziska, Elisabeth und
Simon, die mit großer Geduld die Entstehung
dieses Buches begleitet haben.*

Vorwort zur zweiten Auflage

Liebe Leserin! Lieber Leser!

Dank der guten Aufnahme dieses Lehrbuchs durch eine interessierte Leserschaft ist nun eine zweite Auflage entstanden. Der Inhalt der zweiten Auflage entspricht im Wesentlichen dem Inhalt der ersten Auflage, doch wurden diverse Fehler, die mir auch dankenswerter Weise von Lesern mitgeteilt wurden, ausgebessert. Weiter wurden manche Textpassagen überarbeitet, um besser verständlich zu sein, so z. B. beim Induktionsgesetz. Am Ende jedes Kapitels wird kurz auf die besondere Aufgabenstellung der Beispiele in dem begleitenden Übungsbuch „Binder, A.: Elektrische Maschinen und Antriebe, Übungsbuch: Aufgaben mit Lösungsweg, Springer, 2. Auflage“ eingegangen, die so eine wertvolle Ergänzung der theoretischen Überlegungen bilden, und nicht einfach nur Übungsbeispiele für die Vorbereitung auf eine Prüfung aus elektrischen Maschinen und Antrieben sind.

Ich danke Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Schuhmann, Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, und unserem Herrn M. Sc. Marcel Lehr für das Korrekturlesen, unserem Herrn Dipl.-Ing. Björn Deusinger für die Hilfe beim Einarbeiten der Korrekturen und Verbesserungen, und unserer Frau Anette Ptaschek für die Umsetzung der korrigierten technischen Abbildungen in *AutoCAD*®. Dem Springer-Verlag danke ich für die gute Zusammenarbeit. Für Hinweise zu etwaigen Fehlern bin ich weiterhin dankbar und natürlich zu Anregungen zur Verbesserung der Buchgestaltung offen.

Darmstadt im Dez. 2016

Andreas Binder

Vorwort

„So ist die Sach’!“ – Oh, wie so leise,
wenn überhaupt, sagt dies der Weise!

(Wilhelm Busch)

Liebe Leserin! Lieber Leser!

Die elektrischen Maschinen sind spröde, aber treue Bräute. Spröde deshalb, weil der Zugang zu ihrem tieferen Verständnis nicht leicht ist, sondern profunde Grundlagenkenntnisse auf den Gebieten der Physik und Mathematik bedarf. Hat man sich aber einmal diesen tieferen Zugang erarbeitet, so hilft einem dieses Wissen in der Regel zu einem gesicherten Broterwerb ein Leben lang. Insofern ist der oben gebrauchte Ausdruck von der Treue zu verstehen. Die elektrischen Maschinen ersetzen in vielen Fällen die Arbeit der Muskelkraft, die in früheren Jahrhunderten von Mensch und Tier zu leisten war, um z. B. Lasten zu heben oder zu bewegen. Sie sind also unverzichtbarer Bestandteil unseres täglichen Lebens. Sie sind seit über 160 Jahren einem technisch-evolutionären Veränderungsprozess unterworfen, der ganze Generationen von etablierten elektrischen Maschinen wie z. B. die Drehstrom-Kommutatormaschinen, Repulsionsmaschinen, Quersfeldmaschinen und Amplidynen aussterben hat lassen, während neue Technologien, besonders in Verbindung mit der Umrichterspeisung, auf dem Markt erschienen sind. Deshalb werden beständig Experten und Expertinnen auf dem Gebiet der elektrischen Maschinen und Antriebe benötigt, um diesen Fortschrittsprozess weiter zu tragen. Um auch künftigen Ingenieursgenerationen diesen vertieften Zugang zum Verständnis der elektrischen Maschinen zu erleichtern, wurde in diesem Buch versucht, ausgehend von den physikalischen Grundlagen einen Bogen zu schlagen bis hin zu einer Einführung in das dynamische Betriebsverhalten. Dabei fokussiert die Thematik auf die drei Hauptvertreterinnen elektrischer Maschinen, nämlich die Asynchronmaschine, die Synchronmaschine und die Gleichstrommaschine, und daraus abgeleitete Sonderformen wie die Reluktanzmaschinen, die doppeltgespeisten Asynchronmaschinen oder die permanentmagneterregten Maschinen. Da die hohe Ausnutzung der eingesetzten Werkstoffe aus wirtschaftlichen und teilweise auch technischen Gründen beim Bau elektrischer

Maschinen heute unabdingbar ist, wird auch ausführlich auf Parasitäreffekte z. B. durch Feldoberwellen oder durch verzerrte Kurvenformen von Strom und Spannung bei Umrichterspeisung eingegangen. Mit dem Fokus auf den drei Grundtypen elektrischer Maschinen wird ein Großteil der Einsatzgebiete elektrischer Maschinen von Großgeneratoren über industrielle Antriebe bis hin zu Traktionmaschinen abgedeckt. Trotzdem ist das Feld der elektrischen Maschinen so weit, dass viele Themen nicht ausführlich oder gar nicht behandelt werden konnten, wie z. B. Details zu Linearmaschinen oder Sonderbauformen wie Scheibenläufer. Auch müsste ein Grundsatzkapitel zu Transformatoren und über die Erwärmung und Kühlung elektrischer Maschinen und Transformatoren ergänzt werden, obwohl manches zur Erwärmung und Kühlung in diesem Buch an unterschiedlichen Stellen angesprochen wird. Es wird dazu auf die im Buch genannte umfangreiche vertiefende Spezialliteratur verwiesen. Aufgrund des nicht unbeträchtlichen Umfangs des vorliegenden Buchs wurde auf diese genannten zusätzlichen Kapitel bewusst verzichtet, und dafür durchgerechneten Beispielen breiterer Raum gegeben. Dabei habe ich einige Beispiele von meinen Lehrern *em. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. habil. Hans Kleinrath* und *Dipl.-Ing. Dr. techn. Gerhard Holzer*, beide *TU Wien*, und von meinem Amtsvorgänger *em. Prof. Dr.-Ing. Egon-Christian Andresen, TU Darmstadt*, übernommen. Die Herren sind zwischenzeitlich leider verstorben. Zahlreiche Beispiele zu Messungen stammen aus meiner Industrietätigkeit im Versuchsfeld der *Siemens AG in Bad Neustadt/Saale* und aus unserem Forschungslabor an der *TU Darmstadt*. Weitere Berechnungsbeispiele sind in einer begleitenden Aufgabensammlung „Elektrische Maschinen und Antriebe: Übungsbuch“ enthalten, die es Studierenden ermöglichen soll, sich besser auf die entsprechenden Klausuren zu elektrischen Maschinen und Antrieben in ihrem Studium vorzubereiten. Natürlich ist dieses Buch, wie jedes menschliche Werk, nicht frei von Fehlern. Der Autor ist dankbar für Hinweise dazu, die in einer möglichen späteren Auflage korrektiv einfließen können.

Damit dieses umfangreiche Werk entstehen konnte, war neben guter Gesundheit und günstigen Lebensumständen des Autors auch die Hilfe anderer erforderlich. Es ist mir daher an dieser Stelle eine angenehme Pflicht, folgenden Personen für ihre Mithilfe zu danken:

Herrn *em. Prof. Dr.-Ing. Konrad Reichert, ETH Zürich*, für die Durchsicht des ersten Manuskriptentwurfs,

Herrn *em. Prof. Dr.-Ing. Manfred Liese, TU Dresden*, für die gründliche Durcharbeitung des Manuskripts und für zahlreiche wertvolle Ergänzungen, die in dieses Buch eingeflossen sind, den Herren *Dipl.-Ing. Stefan Dewenter, M.Sc. Nam Anh Dinh Ngoc, Dipl.-Ing. Thomas Knopik, Dipl.-Ing. Fabian Mink*, alle vom *Institut für Elektrische Energiewandlung, TU Darmstadt*, für das Korrekturlesen des finalen Texts und auch für zahlreiche Formatierungsarbeiten, die vom Verlag nicht übernommen wurden,

Herrn *Dipl.-Ing. Dr. techn. Georg Traxler-Samek, Alstom Hydrogeneratoren, Birr, Schweiz*, für die gründliche Kontrolle der Beispiele in der begleitenden Aufgabensammlung „Elektrische Maschinen und Antriebe: Übungsbuch“,

Frau *Anette Ptaschek*, *Institut für Elektrische Energiewandlung, TU Darmstadt*, für die graphische Umsetzung der technischen Abbildungen mit dem Programm *AutoCAD*®.

Weiter sei allen Firmen gedankt, die Bildmaterial für dieses Buch zur Verfügung stellten, wie es bei den einzelnen Bildern jeweils gesondert vermerkt ist. Dem *Springer-Verlag* danke ich für die mir entgegengebrachte Geduld, zog sich dieses Projekt doch über mehr als fünf Jahre aufgrund der Tatsache, dass die schriftstellerische Arbeit parallel zu den unvermindert eingeforderten sonstigen Pflichten des Autors erfolgte. Zu guter Letzt ist es mir ein Anliegen, meiner Gattin *Brigitte* und unseren Kindern *Anna*, *Josef*, *Franziska*, *Elisabeth* und *Simon* für das mir entgegengebrachte Verständnis zu danken, dass diese schriftstellerische Tätigkeit an zahlreichen Wochenenden und während vieler Abendstunden unter der Woche der Familie den Gatten bzw. den Vater entzogen hat.

Ich wünsche den Leserinnen und Lesern bei der Lektüre dieses Buches den ersehnten Erkenntnisgewinn und bin für Anregungen zur Verbesserung offen. Über das Sekretariat des *Instituts für Elektrische Energiewandlung, TU Darmstadt*, bin ich für Zuschriften erreichbar. Möge dieses Buch seinen Beitrag zur Ausbildung künftiger Ingenieursgenerationen auf dem Gebiet der elektrischen Maschinen und Antriebe leisten.

Darmstadt, im Jan. 2012

Andreas Binder

Inhaltsverzeichnis

1	Grundlagen elektromechanischer Energiewandler	1
1.1	Überblick und Bedeutung elektromechanischer Energiewandler	1
1.2	Vielfalt elektrischer Maschinen	5
1.3	Grundgesetze der Mechanik, Elektromagnetik und Drehstromtechnik	11
1.3.1	Mechanische Grundgesetze	11
1.3.2	Elektromagnetische Grundgesetze im Überblick	13
1.3.3	Erzeugung magnetischer Felder	15
1.3.4	Ampère'scher Durchflutungssatz und magnetischer Fluss	16
1.3.5	Verminderung des Magnetisierungsbedarfs durch den Einsatz von Eisen	19
1.3.6	Das Induktionsgesetz	24
1.3.7	Die elektromagnetische Kraft	33
1.3.8	Flussverkettungen und Induktivitäten	38
1.3.9	Ummagnetisierungsverluste	41
1.3.10	Erzeugung eines Drehstromsystems	45
1.3.11	Strangspannung und verkettete Spannung	47
1.3.12	Leistungen in Gleich-, Wechsel- und Drehstromsystemen	48
1.4	Elektromechanische Energiewandler	51
1.4.1	Grundsätzliches zur elektromechanischen Energiewandlung	51
1.4.2	Einfacher elektromechanischer Energiewandler	53
1.4.3	Zählpeilsysteme	56
2	Wicklungen für Drehfelder in elektrischen Maschinen	61
2.1	Was ist ein Drehfeld?	61
2.2	Vereinfachte Feldberechnung im Luftspalt elektrischer Maschinen	62
2.3	Erzeugung von magnetischen Drehfeldern	68
2.4	Ein- und Zweischichtwicklungen	72
2.5	Grundwellendrehfeld	83
2.6	Wahl der Wicklungsstrangzahl	90

2.7	Bruchlochwicklungen	99
2.8	Wanderwellenwicklungen	114
3	Mathematische Analyse von Luftspaltfeldern	119
3.1	Grund- und Ober- bzw. Unterwellen des Luftspaltfelds	119
3.2	Fourier-Reihenentwicklung der Felderregerkurve von 2m-Zonen-Ganzlochwicklungen	120
3.3	Fourier-Reihenentwicklung der Felderregerkurve von Bruchlochwicklungen	131
3.4	Fourier-Reihenentwicklung der Felderregerkurve weiterer Wicklungssysteme	145
3.5	Fourier-Analyse von gleichstromerregten Polradfeldern	147
3.6	Einfluss der Nutöffnungen und radialen Kühlkanäle auf das Luftspaltfeld	151
3.7	Zweidimensionales Luftspaltfeld	155
4	Induzierte Spannung und magnetische Kräfte in Drehstrommaschinen	161
4.1	Induzierte Spannung in einer gesehten Spule	161
4.2	Induzierte Strangspannung einer Drehfeldwicklung	167
4.3	Selbstinduktivität je Strang einer Drehfeldwicklung	176
4.4	Gegeninduktivität je Strang zweier Drehfeldwicklungen	184
4.5	Magnetische Energie	187
4.6	Kräfte in elektrischen Maschinen	194
4.7	Elektromagnetisches Drehmoment	210
4.8	Innere Leistung und elektromagnetische Ausnützung	215
5	Die Schleifringläufer-Asynchronmaschine	221
5.1	Funktionsweise der Schleifringläufer-Asynchronmaschine	221
5.2	Stationäres Betriebsverhalten der Asynchronmaschine	230
5.3	Asynchrone Energiewandlung	246
5.4	Kreisdiagramm der Asynchronmaschine	251
5.5	Anfahren eines Schleifringläufermotors mit Anfahrwiderständen	271
5.6	Drehzahlvariabler Betrieb von Schleifringläufer-Asynchronmaschinen	274
6	Die Kurzschlussläufer-Asynchronmaschine	277
6.1	Ströme und Spannungen im Käfigläufer	279
6.2	Stromverdrängung in den Stäben des Läuferkäfigs	285
6.3	Käfigformen und Anlaufmomenterhöhung	300
6.4	Abweichungen vom Kreisdiagramm	307
6.5	Oberwellentheorie der Käfigläufer-Asynchronmaschine	312
6.6	Zusätzliche Drehmomente durch Oberwellen	343
6.7	Paketquerströme	355

6.8	Magnetisch erregte Geräusche	371
6.9	Zusatzverluste in Käfigläufer-Asynchronmaschinen	390
7	Antriebstechnik mit der Asynchronmaschine	403
7.1	Arbeitsmaschinen	403
7.2	Hochlauf der Asynchronmaschine am Netz	405
7.3	Stabile und instabile Arbeitspunkte – Quasistatische Stabilität	417
7.4	Abbremsen von Asynchronmaschinen	420
7.5	Drehzahlveränderbarer Betrieb von Asynchronmaschinen	424
7.6	Untersynchrone Stromrichter-kaskade	447
7.7	Betrieb der Asynchronmaschine bei veränderlicher Ständerfrequenz	451
7.8	Asynchronmaschine mit Frequenzumrichterspeisung	461
7.9	Auswirkungen der Stromüberschwingungen auf das Betriebsverhalten der Asynchronmaschine bei Frequenzumrichterspeisung	497
8	Die elektrisch erregte Synchronmaschine	517
8.1	Funktionsprinzip und Läuferbauweisen	517
8.2	Ständerspannungsgleichung der Vollpolmaschine	522
8.3	Ständerspannungsgleichung der Schenkelpolmaschine	530
8.4	Betriebsverhalten der Vollpolmaschine am „starren“ Netz	534
8.4.1	Zeigerdiagramme für unterschiedliche Betriebszustände am starren Netz	534
8.4.2	Zeigerdiagramme für besondere Betriebszustände	536
8.4.3	Drehmoment bei unterschiedlichem Polradwinkel	539
8.4.4	Statische Stabilität der Synchron-Vollpolmaschine	541
8.5	Betriebsverhalten der Schenkelpolmaschine am „starren“ Netz	544
8.6	Verlustbilanz bei Synchronmaschinen	550
8.7	Synchrongeneratoren im Inselbetrieb	555
8.8	Stromortskurven und Betriebskennlinien von Synchronmaschinen	562
8.9	Auslegungsmerkmale von Grenzleistungsturbogeneratoren	572
8.10	Elektrische Erregereinrichtungen	576
8.11	Leerlauf- und Kurzschlusskennlinie, Erregerbedarf, Potier-Reaktanz	582
8.12	Elektrisch erregte Synchronmaschinen mit Dämpferwicklung	594
8.13	Die Dämpferwicklung bei Schiefast und Oberwellen	608
8.14	Anlauf und Synchronisierung von großen Synchronmaschinen	612
8.15	Einphasen-Synchrongeneratoren	614
9	Permanentmagneterregte Synchronmaschinen	617
9.1	Magnetkreise mit Permanentmagneten	619
9.2	Funktionsweise von Permanentmagnet-Synchronmaschinen	635
9.2.1	Luftspalt-Flussdichteverteilung im Leerlauf	635

9.2.2	Induzierte Leerlaufspannung (Polradspannung) bei PM-Synchronmaschinen	637
9.2.3	Reluktanzwirkung von Permanentmagnetläufern	650
9.2.4	Drehmomentbildung bei Polradlagegebersteuerung	651
9.3	Blockstromspeisung und Sinusstromspeisung	656
9.3.1	Drehmoment bei Blockstromspeisung und Sinusstromspeisung	656
9.3.2	Antriebe mit Blockstromspeisung und Sinusstromspeisung ..	664
9.3.3	Betriebsgrenzen von PM-Synchronmaschinen mit Querstromspeisung	670
9.4	Drehmomentwelligkeit	674
9.4.1	Wirkung der Drehmomentwelligkeit	675
9.4.2	Drehmomentwelligkeit von PM-Synchronantrieben	679
9.5	Feldschwächung bei Permanentmagnet-Synchronmaschinen	695
9.6	Permanentmagnet-Synchronmaschinen mit Zahnspulen und High-Torque-Synchronmaschinen	708
9.7	Permanentmagnet-Synchronmaschinen mit Anlaufkäfig ohne Polradlagegeber	737
9.7.1	Stationäres Betriebsverhalten	737
9.7.2	Beanspruchung der Permanentmagnete bei Störung des Synchronbetriebs	739
9.7.3	Das bremsende Drehmoment der Permanentmagnete während des asynchronen Hochlaufs	741
9.7.4	Synchronisierung nach erfolgtem Hochlauf	744
10	Reluktanzmaschinen und Schrittmotoren	751
10.1	Geschaltete Reluktanzantriebe („Switched Reluctance Drives“)	752
10.1.1	Das „Geschaltete Reluktanz“-Prinzip	752
10.1.2	Flussverkettung je Strang	757
10.1.3	Spannungs- und Drehmomentgleichung	760
10.1.4	Idealisierter Betrieb der geschalteten Reluktanzmaschine ...	763
10.1.5	Drehmomentberechnung in gesättigten geschalteten Reluktanzmaschinen	766
10.1.6	Realer Betrieb der geschalteten Reluktanzmaschine	771
10.1.7	Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie	779
10.1.8	Umrichterbemessung	782
10.1.9	Motor-Technologie und Betriebsverhalten	784
10.1.10	Anwendungen von geschalteten Reluktanzantrieben	789
10.2	Synchrone Reluktanzmaschinen	791
10.2.1	Grundfunktion der Synchron-Reluktanzmaschine	791
10.2.2	Spannungs- und Drehmomentgleichung, Stromortskurve ...	794
10.2.3	Netzbetrieb der Synchron-Reluktanzmaschine	801

10.2.4	Statorflussverkettung und Eisensättigung	806
10.2.5	Betriebsverhalten und Einsatzgebiete	812
10.2.6	Asynchroner Anlauf von Synchron-Reluktanzmaschinen . . .	815
10.2.7	Spezielle Rotorbauformen für hohe Reluktanz-Verhältnisse	824
10.3	Schrittmotor-Antriebe	824
10.3.1	Funktionsprinzip von Schrittmotoren	826
10.3.2	Ausführungsformen von Schrittmotoren	838
10.3.3	Ansteuerverfahren von Schrittmotoren	846
10.3.4	Drehmomente von Schrittmotoren	851
11	Gleichstromantriebe	859
11.1	Die Funktionsweise der Gleichstrommaschine	859
11.2	Ankerwicklungen	871
11.2.1	Schleifenwicklung	871
11.2.2	Wellenwicklung	878
11.2.3	Vergleich Schleifen- mit Wellenwicklung	882
11.2.4	Mehrgängige Schleifen- und Wellenwicklungen	883
11.2.5	Spannungsgrenze der Gleichstrommaschine	887
11.3	Induzierte Spannung, elektromagnetisches Drehmoment, Verluste, Ausnutzung	888
11.4	Ankerrückwirkung und Kompensationswicklung	896
11.5	Kommutierung des Ankerstroms und Funktion der Wendepole	902
11.6	Generator- und Motorschaltungen der Gleichstrommaschine	917
11.7	Der drehzahlveränderbare Gleichstromantrieb	930
11.8	Wirkungsgrad, Stabilität und Leistungsgrenzen der Gleichstrommaschine	937
11.9	Der Einphasen-Reihenschlussmotor	940
11.10	Die Unipolarmaschine	946
12	Dynamik elektrischer Maschinen	951
12.1	Motivation: Warum benötigen wir eine dynamische Theorie elektrischer Maschinen?	951
12.2	Methoden zur Berechnung dynamischer Vorgänge in elektrischen Maschinen	952
12.2.1	Differentialgleichungen anstelle algebraischer Gleichungen	952
12.2.2	Lösungsmethodik linearer Differentialgleichungen	954
12.2.3	Lösungsmethodik für nichtlineare Differentialgleichungen . .	958
13	Dynamik der Gleichstrommaschine	965
13.1	Dynamische Systemgleichungen der fremderregten Gleichstrommaschine	965
13.2	Dynamisches Verhalten des elektrischen und mechanischen Subsystems	968

13.2.1	Dynamik des mechanischen Subsystems	968
13.2.2	Nenn-Anlaufdauer elektrischer Maschinen	971
13.2.3	Dynamik des elektrischen Subsystems	972
13.3	Dynamik des gekoppelten elektrisch-mechanischen Systems	973
13.4	Linearisiertes Modell für veränderlichen Hauptfluss	976
13.5	Übertragungsfunktion der fremderregten Gleichstrommaschine	978
13.6	Simulationsergebnisse zum dynamischen Verhalten fremderregter Gleichstrommaschinen	984
13.7	Stromrichter gespeiste fremderregte Gleichstrommaschinen	995
14	Raumzeigerrechnung und bezogene Größen	1005
14.1	Definition des Durchflutungsraumzeigers	1005
14.2	Durchflutungsraumzeiger und Strangströme	1010
14.3	Raumzeiger für Strom, Spannung und Flussverkettung	1013
14.4	Raumzeiger-Transformation	1021
14.5	Einfluss des Nullsystems auf die Raumzeigerbildung	1026
14.6	Das Rechnen mit bezogenen Größen	1031
14.7	Verwendung unterschiedlicher Koordinatensysteme	1039
14.8	Elektrische Leistung und magnetische Energie	1043
15	Dynamik der Asynchronmaschine	1049
15.1	Dynamische Spannungsgleichung in unterschiedlichen Bezugssystemen	1049
15.2	Raumzeigergleichungen für die Flussverkettung	1054
15.3	Die Raumzeiger-Drehmomentgleichung	1059
15.4	Das dynamische Gleichungssystem im statorfesten Bezugssystem	1065
15.5	Lösungen der dynamischen Gleichungen für konstante Drehzahl	1069
15.6	Lösungen der dynamischen Gleichungen für variable Drehzahl	1092
15.7	Übertragungsfunktion des linearisierten Gleichungssystems im drehfeldfesten Bezugssystem	1103
15.8	Umrichter gespeiste Asynchronmaschinen mit feldorientierter Regelung	1124
16	Dynamik der Synchronmaschine	1135
16.1	Flussverkettungen in der Synchronmaschine bei dynamischen Vorgängen	1135
16.1.1	Flussverkettungen bei der Vollpolmaschine	1136
16.1.2	Flussverkettungen bei der Schenkelpolmaschine	1145
16.1.3	Flussverkettungen der Synchronmaschine in bezogener Darstellung	1153
16.1.4	Ersatzschaltbild für die Flussverkettungen der Synchronmaschine	1155

16.1.5	Charakteristische Größen der Synchronmaschine aus den Ersatzschaltbildern	1160
16.1.6	Bedeutung der Koppelinduktivität für die Bestimmung rotorseitiger subtransienter Ströme	1170
16.2	Dynamisches Gleichungssystem der Synchronmaschine	1172
16.3	Dynamisches Verhalten der Synchronmaschine bei konstanter Drehzahl	1180
16.4	Zeitkonstanten der elektrisch erregten Synchronmaschine mit Dämpferkäfig	1198
16.5	Berechnung des dreisträngigen Stoßkurzschlusses	1202
16.5.1	Vereinfachte Betrachtung des Stoßkurzschlusses	1202
16.5.2	Stoßkurzschluss bei Berücksichtigung der Widerstände	1208
16.5.3	Stoßkurzschlussmoment	1221
16.5.4	Experimentelle Bestimmung der dynamischen Parameter	1224
16.6	Transientes Kippmoment	1224
16.7	Transiente Stabilität und kritische Fehlerklärungszeit	1232
Literatur	1245
Stichwortverzeichnis	1265

Allgemeines

Das griechische Alphabet

<i>A</i>	α	Alpha
<i>B</i>	β	Beta
<i>Γ</i>	γ	Gamma
Δ	δ	Delta
<i>E</i>	ε	Epsilon
<i>Z</i>	ζ	Zeta
<i>H</i>	η	Eta
Θ	ϑ	Theta
<i>I</i>	ι	Jota
<i>K</i>	κ	Kappa
Λ	λ	Lambda
<i>M</i>	μ	My (mue)
<i>N</i>	ν	Ny (nue)
Ξ	ξ	Xi
<i>O</i>	\omicron	Omikron
Π	π	Pi
<i>P</i>	ρ	Rho
Σ	σ	Sigma
<i>T</i>	τ	Tau
Υ	υ	Ypsilon
Φ	φ	Phi
<i>X</i>	χ	Chi
Ψ	ψ	Psi
Ω	ω	Omega

Auswahl der wichtigsten Formelzeichen und Symbole

(Die Formelzeichen werden im Text erläutert an der ersten Stelle ihres Auftretens!)

a	–	Anzahl paralleler Wicklungszweige bei Drehfeldmaschinen, aber: HALBE Anzahl paralleler Wicklungszweige bei Gleichstrommaschinen
a_i	–	Anzahl paralleler Leiter je Windung
A	A/m	Strombelag
A	m ²	Fläche
b	m	Breite
b_p	m	Polschuhbreite
b_{Stab}	m	Stabbreite
B	T	magnetische Induktion (magnetische Flussdichte)
c_d, c_q	–	Feldfaktoren der Längs-, Querachse
c_\emptyset	Nm/rad	Ersatzfederkonstante der Synchronmaschine
C	kVA min/m ³	Esson'sche Ausnutzungsziffer
C	m	Integrationsweg
d_E	m	Eindringtiefe
d_{si}	m	Bohrungsdurchmesser
D	As/m ²	elektrische Verschiebung (elektrische Flussdichte)
E	V/m	elektrische Feldstärke
f	Hz	elektrische Frequenz
F	N	Kraft
g	–	ganze Zahl
g	m/s ²	Erdbeschleunigung (9.81 m/s ²)
h	m	Höhe
H	A/m	magnetische Feldstärke
I	A	elektrische Stromstärke
j	–	imaginäre Einheit
J	A/m ²	elektrische Stromdichte
J	kg·m ²	polares Trägheitsmoment
k	–	Ordnungszahl
k_C	–	Carter-Faktor
k_d	–	Zonenfaktor
k_{Fe}	–	Eisenfüllfaktor
k_K	–	Leerlauf-Kurzschluss-Verhältnis
k_p	–	Sehnungsfaktor

k_R, k_L	–	Stromverdrängungsfaktoren
k_R	Vs/A	Proportionalitätskonstante der Reaktanzspannung
k_w	–	Wicklungsfaktor
K	–	Anzahl der Kommutatorsegmente
l	m	Länge (axial)
l_e	m	ideelle Eisenlänge
L	H	Selbstinduktivität
L	m	Gesamtlänge
L_p	dB	Schalldruckpegel
m	–	Strangzahl
m	kg	Masse
M	H	Gegeninduktivität
M	Nm	Drehmoment
M_b	Nm	asynchrones statisches Kippmoment
M_{p0}	Nm	synchrones statisches Kippmoment
M_s	Nm	Kupplungsmoment, Wellenmoment (shaft)
M_1	Nm	Anfahrmoment der Asynchronmaschine (Schlupf $s = 1$)
n	1/s	Drehzahl
N	–	Windungszahl je Strang
N_c	–	Spulenwindungszahl
p	–	Polpaarzahl
p	W/m ³	Leistungsdichte
P	W	Wirkleistung
q	–	Lochzahl (Nuten pro Pol und Strang)
Q	–	Nutzahl
Q	VA _r	Blindleistung (1 VA _r = 1 VA reaktiv)
R	Ω	elektrischer Widerstand
r	–	elektrischer Widerstand in „per unit“-Angabe
r	–	Kraftwellenordnungszahl
s	–	Schlupf
s	1/s	Laplace-Operator
s	m	Weglänge
s_Q	m	Nutöffnungsbreite
S	VA	Scheinleistung
t	s	Zeit
T	s	Zeitkonstante, Periodendauer
T_J	s	Nenn-Anlaufdauer

u	–	Spulenseiten je Nut und Schicht
U	V	elektrische Spannung
U_f	V	elektrische Spannung der Erregerwicklung
U_p	V	Polradspannung
\ddot{u}	–	Übersetzungsverhältnis
\ddot{u}_U, \ddot{u}_I	Spannungs-, Stromüber- setzungs- verhältnis	
v	m/s	Geschwindigkeit
v_{10}	W/kg	Ummagnetisierungsverluste bei 1.0 T, 50 Hz je 1 kg
v_{15}	W/kg	Ummagnetisierungsverluste bei 1.5 T, 50 Hz je 1 kg
V	A	magnetische Spannung
V	m ³	Volumen
W	J	Energie
W	m	Spulenweite
x	m	Umfangskoordinate
X	Ω	Reaktanz
X_d, X_q	Ω	synchrone Längs-, Querreaktanz
y	–	Weite einer Spule, gezählt in Nutteilungen
z	–	gesamte Leiterzahl
Z	Ω	Impedanz
α	rad	Zündwinkel
α_e	–	ideelle (äquivalente) Polbedeckung
α_Q	rad	Nutwinkel
γ	rad	Umfangswinkel
δ	m	Luftspaltweite
δ_e	m	ideelle (äquivalente) Luftspaltweite
ε	As/(Vm)	Dielektrizitätskonstante
η	–	Wirkungsgrad
ϑ	rad	Polradwinkel
Θ	A	elektrische Durchflutung
κ	S/m	elektrische Leitfähigkeit
Λ	Vs/A	magnetischer Leitwert
μ	–	Ordnungszahl
μ	Vs/(Am)	magnetische Permeabilität
μ_0	Vs/(Am)	magnetische Permeabilität des Vakuums ($4\pi \cdot 10^{-7}$ Vs/(Am))

ν	–	Ordnungszahl
ξ	–	„reduzierte“ Leiterhöhe
σ	–	Blondel'scher Koeffizient der Gesamtstreuung, Streuziffer
σ_0	–	Streuziffer der Oberfelderstreuung
τ_c	m	Kommutatorstegeteilung
τ_Q	m	Nutteilung
τ_p	m	Polteilung
φ	rad	Phasenwinkel
Φ	Wb	magnetischer Fluss
Ψ	Vs	magnetische Flussverkettung
ω	1/s	elektrische Kreisfrequenz
Ω_m	1/s	mechanische Winkelgeschwindigkeit
Ω	1/s	elektrische Winkelgeschwindigkeit

Indizes

a	Anker, außen
av	Mittelwert
b	Bürste, asynchrones Kippen
B	Batterie
Batt	Batterie
c	Spule, Kommutator
com	Kommutierungs-
C	Koerzitiv-
Cu	Kupfer
d	direct (längs), DC (Gleichgröße), Zone (distribution), Verluste (dissipation)
D	Dämpferwicklung in der Längsachse
dyn	dynamisch
e	elektrisch, äquivalent
f	Feld
fr	Reibung
Fe	Eisen
Ft	Foucault-Verluste (Wirbelstromverluste)
ges	gesättigt, gesamt
h	Haupt-
i	induziert, innen
i	Zählvariable
in	zugeführt
k	Kurzschluss-

LL	verkettet (Linienspannung)
m	Magnetisierungs-
m	mechanisch
mag	magnetisch
N	Nenn
out	abgegeben
o	Oberfelder
p	Pol, Polrad, Sehnung (pitch)
ph	Phasenwert
q	quadrature (quer)
Q	Dämpferwicklung in der Querachse
Q	Nut
r	Rotor
R	Reaktanz- (Gleichstrommaschine), Remanenz, Reibung
s	Stator
s	Welle (shaft)
S	Strang
syn	Synchron
sh	Shunt
T	Takt
v	Vorwiderstand
w	Wicklung
W	Wendepol
y	Joch
Z	Zusatzverluste, Zugkraft
δ	Luftspalt
σ	Streu-
0	Leerlauf
1	Anfahrpunkt ($s = 1$ bei Asynchronmaschine)

Notationen

i	Kleinbuchstabe: z.B.: elektrische Stromstärke, Augenblickswert
I	Großbuchstabe: z.B.: elektrische Stromstärke, Effektivwert oder Gleichstromwert
X, x	Großbuchstabe: z.B. Reaktanz, Kleinbuchstabe: z.B. bezogene Reaktanz (p.u. - Wert)
\underline{I}	unterstrichen: komplexe Größe
\hat{I}	Spitzenwert, Amplitude

I'	auf Ständerwicklungsdaten umgerechnet
X', X''	transiente, subtransiente Reaktanz
I^*	konjugiert komplexer Wert von \underline{I}
$\text{Re}(\cdot)$	Realteil von ...
$\text{Im}(\cdot)$	Imaginärteil von ...

Verwendete Abkürzungen

B2H	Halbgesteuerte zweipulsige Gleichrichterbrücke
B2C	Vollgesteuerte zweipulsige Gleichrichterbrücke
B6C	Vollgesteuerte sechspulsige Gleichrichterbrücke
EZS	Erzeugerzählpeilsystem
GR	Gleichrichter
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
IVP	Induktiver Volllastpunkt
PEM	Polymer-Elektrolyt-Membran
PM	Permanentmagnete
PWM	Pulsweitenmodulation
PKW	Personenkraftwagen
ü.e.	übererregt
u.e.	untererregt
VZS	Verbraucherzählpeilsystem
WR	Wechselrichter
ZK	Zwischenkreis



Grundlagen elektromechanischer Energiewandler

1

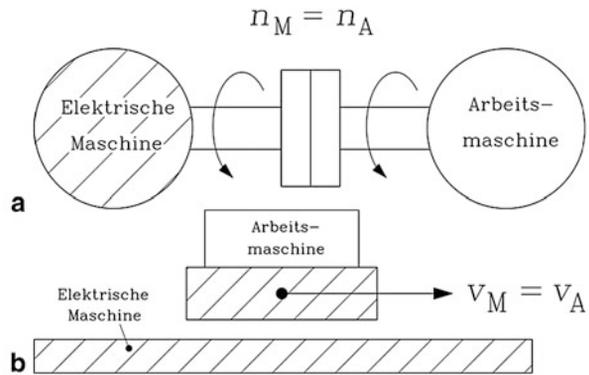
In [Kap. 1](#) werden nach einem Überblick über die Vielfalt unterschiedlicher elektromechanischer Energiewandler und Schwerpunkte ihrer Einsatzgebiete die elektrotechnischen Grundlagen zusammengestellt, die für das Verständnis der Funktionsweise der elektromechanischen Energiewandlung notwendig sind. Auf weiterführende Literatur wird in allen Kapiteln durch Nennung entsprechender Literaturstellen im Text verwiesen, die im Anhang detailliert aufgelistet sind. Dabei wurde hauptsächlich deutschsprachige und englischsprachige Literatur aufgeführt. Eine Übersetzung englischer Fachbegriffe ins Deutsche (und umgekehrt) gelingt ausgezeichnet mit dem Fachwörterbuch (Bezner 1993).

1.1 Überblick und Bedeutung elektromechanischer Energiewandler

Elektrische Maschinen sind elektromechanische Energiewandler und formen als Motoren elektrische Energie in mechanische Bewegungsenergie um, während sie als Generatoren umgekehrt mechanische Bewegungsenergie in elektrische Energie umwandeln.

a) Mechanische Charakterisierung der Energiewandler: Bei elektromechanischen Energiewandlern kann die mechanische Bewegung linear oder rotierend erfolgen, sodass zwischen Linearmaschinen und rotierenden elektrischen Maschinen unterschieden wird. Dabei muss das bewegte Medium nicht notwendigerweise ein Festkörper sein. Bei den magnetohydrodynamischen (MHD-)Wandlern wird ein elektrisch leitfähiges Fluid, zumeist ein heißes, ionisiertes Gas, in einem Magnetfeld bewegt (MHD-Generator: Schmidt 1975; Komarek 1995), oder durch elektromagnetische Kräfte bewegt (z. B. MHD-Plasmaantrieb für Satelliten). Das feststehende Teil der elektrischen Maschine heißt i. A. Stator (Ständer), das bewegte Teil Rotor (Läufer). Beim Beispiel des MHD-Generators ist der Läufer

Abb. 1.1 Elektrische Maschine als Antrieb einer mit ihr gekoppelten Arbeitsmaschine: (a) rotatorisches Prinzip, (b) translatorisches Prinzip (Linearprinzip)



ein bewegtes Fluid. Erfolgt die Bewegung nicht kontinuierlich, sondern diskontinuierlich in Bewegungsschritten, spricht man von Schrittantrieben, die hauptsächlich im kleinen Leistungsbereich unter typisch 100 W eingesetzt werden.

Beispiel 1.1 (Elektromotor (Abb. 1.1a))

Der Elektromotor ist ein rotatorischer elektromechanischer Energiewandler, der elektrische Energie aus dem elektrischen Netz entnimmt und in mechanische Energie umformt. Diese Energie wird zum Antrieb einer mechanischen Arbeitsmaschine, z. B. einer mit dem Elektromotor gekoppelten Pumpe benötigt. Die Drehzahl des rotierenden Läufers (Rotors) des Elektromotors n_M ist bei direkter Kupplung mit der Arbeitsmaschine auch die Drehzahl n_A dieser Arbeitsmaschine.

Beispiel 1.2 (Linearmotor (Abb. 1.1b))

Linear bewegende Elektromotoren (Linearmaschinen) sind durch die Geschwindigkeit v_M ihres bewegten Sekundärteils gekennzeichnet, die in der Regel auch die Geschwindigkeit v_A der angetriebenen Arbeitsmaschine ist. Linearmaschinen werden z. B. in Werkzeugmaschinen verwendet, aber auch bei Hochgeschwindigkeitszügen im Verbund mit magnetischem Schweben (z. B. Transrapid-Versuchsstrecke im Emsland: $v_{M,max} = 500$ km/h, Transrapid in Schanghai/China: $v_{M,max} = 430$ km/h, Yamanashi-Projekt in Japan: $v_{M,max} = 550$ km/h).

b) Elektrische Charakterisierung der Energiewandler: Die elektrische Energie wird überwiegend entweder in Gleichstromsystemen oder in Wechselstromsystemen bzw. Drehstromsystemen verwendet. Demgemäß wird zwischen Gleichstrom- oder Wechselstrom- bzw. Drehstrommaschinen unterschieden. Für diese unterschiedlichen Systeme unterscheiden sich die Bauweisen der elektrischen Maschinen grundsätzlich. Die elektrische Energie kann dabei in der Form konstanter Gleich- oder Wechselspannungen,

im letzteren Fall mit konstanter Frequenz, für den Betrieb der elektrischen Maschinen verwendet werden. Man spricht vom Netzbetrieb z. B. am Batterienetz bei Gleichstrommaschinen oder am öffentlichen Drehstromnetz bei Drehstrommaschinen. Mithilfe rotierender elektrischer Umformer – das sind wieder elektrische Maschinen – oder mithilfe leistungselektronischer Schaltungen können die Amplituden der Gleich- und Wechselspannungen und im letzteren Fall auch ihre Frequenz verändert werden, sodass die damit gespeisten elektrischen Maschinen ebenfalls ihr Betriebsverhalten verändern, z. B. eine in weiten Bereichen veränderbare Drehzahl aufweisen. Dabei überwiegen in der Anwendung heute die Wechsel- und Drehstrommaschinen, sodass in diesem Buch nach einer Zusammenstellung der wichtigsten elektrotechnischen Grundlagen in diesem [Kap. 1](#) mit den Grundlagen für das Verständnis der Wechsel- und Drehstrommaschinen begonnen wird ([Kap. 2](#) bis [4](#)). Da eine elektromechanische Energiewandlung mit Mehrphasensystemen (Drehstromsysteme) im Vergleich zum Einphasensystem (Wechselstromsystem) einen deutlich besseren Wirkungsgrad aufweist und keine zeitlich pulsierende Leistung verursacht, sind die meisten größeren elektrischen Maschinen ab einer Bemessungsleistung von ca. 1 kW mehrphasig ausgeführt. Diese mehrphasigen elektrischen Maschinen funktionieren auf der Basis rotierender magnetischer Felder, die in der Regel von im Stator ruhenden, elektrisch betriebenen Spulensystemen erregt werden. Es werden zwei Gruppen unterschieden. Bei den Synchronmaschinen bewegt sich der Läufer gleich schnell wie das magnetische Feld, bei den Asynchronmaschinen ist der Läufer i. A. entweder langsamer oder schneller als das Magnetfeld. [Kap. 5](#) bis [7](#) sind den Asynchronmaschinen gewidmet, [Kap. 8](#) bis [10](#) den Synchronmaschinen. [Kap. 11](#) beschreibt die Gleichstrommaschinen. Alle diese Maschinentypen können als Linear- oder als Rotationsmaschinen ausgeführt werden. Wegen der überwiegend rotativ eingesetzten elektrischen Maschinen sind die Darstellungen hauptsächlich auf die Rotationsbewegungen beschränkt.

c) Charakterisierung der Energiewandler anhand der Betriebsweise: Man unterscheidet das stationäre und das dynamische Betriebsverhalten elektromechanischer Energiewandler. Beim stationären Betriebsverhalten sind die wesentlichen mechanischen und elektrischen Betriebsgrößen Drehzahl, Drehmoment, Spannungs- und Stromamplitude bzw. bei Wechsel- und Drehstrommaschinen auch deren Frequenz oder Phasenwinkel zeitlich konstant. In den [Kap. 5](#) bis [11](#) wird dieses stationäre Betriebsverhalten der Wechselstrom-/Drehstrommaschinen und Gleichstrommaschinen anhand der stationären Betriebskennlinien beschrieben. Beim Einschalten oder Ausschalten elektrischer Maschinen, bei plötzlichen Laständerungen, aber auch bei Betriebsstörungen wie dem elektrischen plötzlichen Kurzschluss, ändern sich die Betriebsgrößen u. U. sehr rasch (z. B. im Millisekundenbereich). Dieses dynamische Betriebsverhalten kann in der Regel nicht mehr durch Kennlinien beschrieben werden, sondern wird durch den Zeitverlauf der Betriebsgrößen charakterisiert. Die Grundlagen zum Verständnis des dynamischen Betriebsverhaltens werden für die drei Grundtypen Gleichstrommaschine, Asynchronmaschine, Synchronmaschine in den [Kap. 12](#) bis [16](#) dargestellt.

d) Bedeutung der elektromechanischen Energiewandler: Der effiziente Bau und der verlustarme Betrieb moderner Energiewandler fußt nicht nur auf der tiefen Kenntnis der elektromagnetischen Grundgesetze, die bereits in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts bekannt waren, sondern auch auf dem Fortschritt der Werkstofftechnologie, der Fertigungstechnik und des Maschinenbaus, sowie auf dem vermehrten Einsatz ausgefeilter numerischer Berechnungsmethoden wie z. B. mechanischer und elektromagnetischer Berechnungen mit der Methode der Finiten Elemente, der erst durch die moderne Computertechnologie möglich ist (Eriksson 2001). Die Wirkungsprinzipien elektromechanischer Energiewandler sind als überliefertes Wissensgut der Elektroingenieure der ersten Stunde aus der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts anzusehen. Neben der elektromechanischen Energiewandlung waren übrigens nahezu alle uns heute bekannten Wandlerprinzipien bereits zur vorigen Jahrhundertwende bekannt, so z. B. auch das Funktionsprinzip der Brennstoffzelle, der elektrochemischen Batterien und Akkumulatoren, aber auch der MHD-Wandler (Schmidt 1975). Ihr effizienter Einsatz ist jedoch nur durch das unermüdlige Bestreben, die Umsetzung dieser Wirkprinzipien zu verbessern und durch den Einsatz der Leistungselektronik, um den Energiewandlern neue Einsatzbereiche zu eröffnen, möglich geworden (Leijon 1998). Aktuelle Entwicklungen bei den elektromechanischen Energiewandlern wie

- Hochdrehzahlantriebe, [Abb. 1.2a](#), (Canders 1998; Schneider et al. 2006),
- supraleitende Generatoren, [Abb. 1.2b](#), (Komarek 1995; Eckels und Snichtler 2005),
- Plasma- und Ionenantriebe (Auweter-Kurtz 1992),
- Erhöhung der Ausnutzung der Wandler zwecks Volumenverringerng,
- Ersatz von verschleißbehafteten mechanischen Komponenten (z. B. Getriebe, Ventile) durch elektrische Antriebselemente (Direktantriebe (Gißler 2005), Magnetlager (Schweitzer et al. 1993),
- Erhöhung des Wirkungsgrads zwecks Senkung der Kosten und Schonung der Umwelt (Doppelbauer 2007),
- Anpassung an das Optimum des Prozesses durch Drehzahlveränderbarkeit (z. B. bei Pumpen und Schiffsantrieben als Ersatz von Festdrehzahlantrieben), wiederum verbunden mit deutlichen Wirkungsgradvorteilen (Auinger 2000), kennzeichnen diesen Fortschritt.

Basis dazu sind der Elektromagnetismus und sein Zusammenwirken mit der Leistungselektronik, der Regelungs- und Automatisierungstechnik, der Mikroelektronik und Sensortechnik und den vielfältigen Anwendungen im Maschinenbau, die im unteren Leistungsbereich unter dem Schlagwort mechatronische Antriebslösungen zusammengefasst werden. Dank der ständigen Weiterentwicklung dieser elektromechanischen Energiewandler in der Form von Generatoren als wesentliche Komponenten der elektrischen Energieerzeugung und -verteilung, und in der Form von Motoren für die elektrische Energieanwendung in der Industrie, in Gewerbe und Haushalt ist es uns möglich, die komfortable elektrische Energie nutzbringend für unsere Gesellschaft flächendeckend,

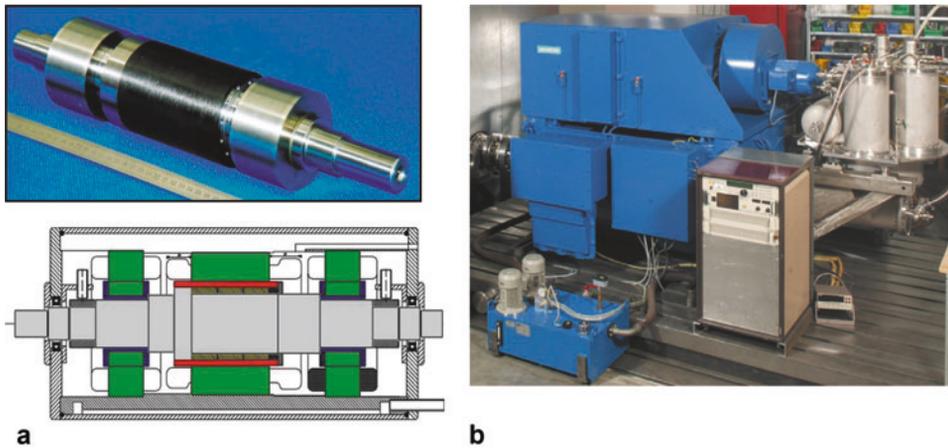


Abb. 1.2 (a) Magnetgelagerter 40 kW-Permanentmagnet-Synchronmotor mit Kohlefaserbandage zur Läufermagnetbefestigung bei 40000/min als Kompressorantrieb, oben: PM-Läufer mit zwei Radialmagnetlagern, unten: axialer Schnitt durch den Motor (Mitte) und die beiden Radialmagnetlager (links und rechts) (Quelle: Klohr 2007), (b) Zweipoliger 4 MW-Synchrongenerator für Schiffe, 3600/min, 60 Hz, Hochtemperatur-Supraleiterwicklung im Läufer, Neon-Kaltgaskühlung, 30 K (Quelle: Siemens AG)

kostengünstig, mit gleichbleibender Qualität und zu jeder Zeit gesichert zur Verfügung zu haben. Elektrische Energiewandler haben damit einen bedeutenden Anteil am hohen Niveau des Wohlstands unserer Gesellschaft.

1.2 Vielfalt elektrischer Maschinen

a) Unterschiedliche Bauarten elektrischer Maschinen: Elektrische Maschinen werden in einem weiten Leistungsbereich von ca. 12 Zehnerpotenzen von ca. 1 mW bei Kleinstantrieben bis ca. 2 GW bei den weltgrößten Kernkraftwerksgeneratoren gebaut und eingesetzt (Sedlazeck et al. 2009). Neben den bereits erwähnten Grundtypen der Gleichstrom- und Wechselstrommaschinen sind eine Vielzahl weiterer Kombinationen bekannt und viele davon auch in größeren Stückzahlen im Einsatz. Diese Sonderbauarten elektrischer Maschinen wurden u. A. deshalb erfunden, um auch am Drehstromnetz ohne Einsatz der Leistungselektronik oder rotierender Umformer drehzahlveränderbare Antriebe zu erhalten. Wesentliche Vertreter sind die Drehstrom-Kommutatormaschinen, deren Aufbau dem der Gleichstrommaschinen ähnlich ist, aber die am Drehstromnetz drehzahlveränderbar betrieben werden (Richter 1950; Andresen 1960). Ebenfalls auf der Bauweise der Gleichstrommaschine basiert der für den drehzahlveränderbaren Betrieb am Wechselstromnetz geeignete Repulsionsmotor. Eine Sonderform der Gleichstrommaschine ist die

Unipolarmaschine, die – anders als die Gleichstrommaschine – nicht nur an ihren Klemmen, sondern auch in ihrem „Inneren“ – nur elektrische Gleichgrößen aufweist (Kap. 11). Für die Umwandlung von Gleichstrom in Wechselstrom und umgekehrt wurden – wieder auf Basis der Gleichstrommaschinen-Bauform – Einankerumformer entwickelt, für die Umformung von Einphasen- in Mehrphasensysteme größerer Leistung rotierende Umformersätze, die sich der Sonderbauform der Scherbius-Hintermaschine als einer Komponente des Umformersatzes bedienen. Für die Erzeugung oder den Betrieb bei deutlich höheren Frequenzen als 50 Hz oder 60 Hz wurden als Sonderformen der Synchronmaschinen „Mittelfrequenzmaschinen“ im Bereich bis ca. 2 kHz erfunden, die als Hetero- oder Homopolarmaschinen ausgeführt wurden (Richter und Brüderlink 1963). Diese und weitere neuere Sonderbauformen (z. B. Binder 1996a) sind aber im Vergleich zu den unten angeführten Grundtypen elektrischer Maschinen weit weniger verbreitet. Vor allem sind sie durch den zunehmenden Einsatz der Leistungselektronik, die eine Umformung von Gleichstrom- und Wechselstromsystemen ohne bewegte mechanische Teile gestattet, verdrängt worden. Durch die Kombination leistungselektronischer Steller mit den drei Grundtypen elektrischer Maschinen Gleichstrommaschine, Synchron- und Asynchronmaschine lassen sich alle wesentlichen Betriebscharakteristiken am Gleichstrom- und Wechselstrom- bzw. Drehstromnetz darstellen, sodass auf die erwähnten Sonderbauformen in der Regel verzichtet werden kann. Deshalb ist dieses Buch nur den drei Grundtypen der elektrischen Maschine gewidmet, der Asynchronmaschine, der Synchronmaschine und der Gleichstrommaschine. Ihr Einsatzbereich ist sehr breit gefächert (Binder et al. 2003, 2005) und wird im Folgenden – ohne Anspruch auf Vollständigkeit – stichwortartig überflogen.

b) Unterschiedliche Einsatzgebiete elektrischer Maschinen:

b1) Gleichstrommaschinen:

Kleinmotoren: Kleinmotoren mit Permanentmagneterregung (Abb. 1.3a) sind im Bereich von wenigen Watt bis einigen 100 Watt Leistung im Einsatz z. B. als Hilfsantriebe im Kraftfahrzeug (Fensterheber, Spiegelverstellung, ...), als Spielzeugmotoren (Modellbahn, Modellflug, ...), in Konsumgütern (Videogeräte, HiFi-Anlagen, ...), in feinmechanischen Instrumenten, ... (Lazarioiu und Slaiher 1976; Stölting und Kallenbach 2001).

Drehzahlveränderbare Antriebe: In der drehzahlveränderbaren Antriebstechnik im Leistungsbereich von einigen hundert Watt bis mehreren Megawatt Maschinenleistung sind Gleichstrommaschinen (Abb. 1.3b) zumeist in Kombination mit Stromrichtern im Einsatz. Die Veränderung der Drehzahl ist auf Grund der variablen Gleichspannung durch den Stromrichter möglich, daher ergibt sich ein vielfältiger Einsatz in Elektroautos und Gabelstaplern, als Antrieb in Kranen, Drahtziehmaschinen, Walzwerken,

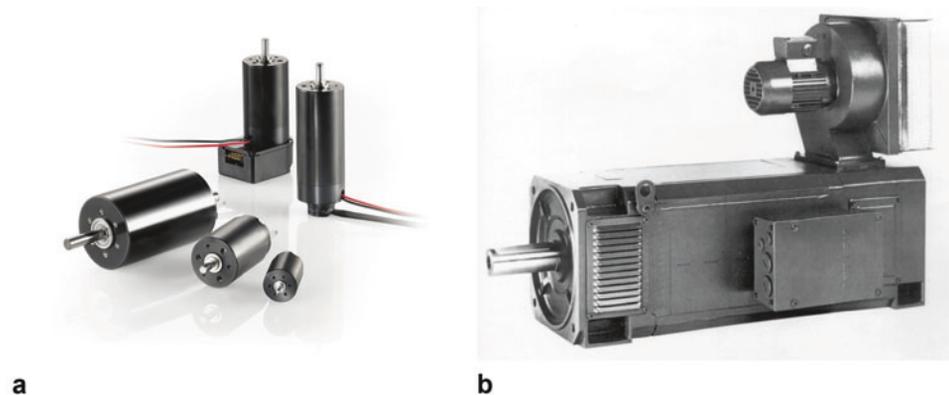


Abb. 1.3 (a) Gleichstrom-Kleinstmotoren für Präzisionsantriebe im Wattbereich (Quelle: Faulhaber), (b) Fremderregte unkomensierte vierpolige Gleichstrommaschine mit aufgebautem Fremdlüfter als drehzahlveränderbarer Industrieantrieb 0 ... 4500/min, 100 kW, 400 V (Quelle: Siemens AG)

Papier- und Druckmaschinen, Extrudern, Kalandern, Prüfstandsgeneratoren, als U-Boot-Unterwasserantriebe, Straßenbahn-, U-Bahn-, Vollbahnantriebe, ... (Auernhammer et al. 1992; Heil 1995).

b2) *Wechselstrommaschinen*: Diese Maschinen werden direkt am Einphasen-Wechselstromnetz (z. B. 230 V, 50 Hz) betrieben.

Kleinmotoren: Der Leistungsbereich der Wechselstrom-Kleinmotoren umfasst wenige Watt bis einige hundert Watt bzw. einige kW (Lazaroiu und Slaiher 1976; Stölting und Kallenbach 2001), wobei unterschiedliche Bauweisen unterschieden werden.

Universalmotoren: Universalmotoren sind Gleichstrommotoren mit Reihenschluss-Erregerwicklung mit einfachem Stromrichter als Phasenanschnittsteuerung (Triac-Schaltung) als drehzahlveränderbarer Antrieb in einer Vielzahl von Haushaltsgeräten (Staubsauger, Mixer, Waschmaschinen, Elektrowerkzeuge wie Bohr- und Schleifmaschinen, Elektrorasenmäher, ...).

Einphasen-Asynchronmaschinen und Spaltpol-Asynchronmaschinen: Diese Käfigläufer-Asynchronmaschinen sind Konstantdrehzahlantriebe in Kleingeräten als Lüfterantriebe, in Klimageräten, Haushaltspumpen, Waschmaschinen, ...

Großmaschinen: Wechselstrommaschinen wurden als Motoren bis ca. 1.5 MW gebaut, und zwar nur als Einphasen-Reihenschluss-Kommutatormotoren (= „überdimensionaler Universalmotor“) bei Vollbahnen als Lokomotivantrieb älterer Bauart, der noch bei