
Springer-Lehrbuch

Dierk Schröder

Elektrische Antriebe – Grundlagen

Mit durchgerechneten Übungs- und
Prüfungsaufgaben

5., erweiterte Auflage

Dierk Schröder
TU München LS für Elektrische
Antriebssysteme
München, Deutschland

OnlinePLUS Material zu diesem Buch finden Sie auf
<http://www.springer-vieweg.de/978-3-642-30470-5>

ISSN 0937-7433

ISBN 978-3-642-30470-5

ISBN 978-3-642-30471-2 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-642-30471-2

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 Berlin Heidelberg 1994, 2000, 2007, 2009, 2013

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 dürfen.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.
www.springer-vieweg.de

Vorwort zur fünften Auflage

Das vorliegende Buch „Elektrische Antriebe - Grundlagen“ ist Teil eines umfassenden Werks des Autors und enthält neben „Elektrische Antriebe - Grundlagen“ die Bücher „Elektrische Antriebe - Regelung von Antriebssystemen“, „Intelligente Verfahren - Identifikation und Regelung nichtlinearer Systeme“ sowie die Bücher „Leistungselektronische Schaltungen“ und „Leistungselektronische Bauelemente“.

Diese Bücher fassen das Fachwissen für die zunehmend wichtigen Gebiete der elektrischen Antriebstechnik und angrenzender Gebiete zusammen. Um dem Leser zielgerichtet diese Wissensgebiete mit den Aufgabenstellungen zu erschließen und bestehende Verfahren zur Lösung dieser Aufgabenstellungen aufzuzeigen, wurde ein Kompendium erstellt. Es ist thematisch wie die obigen Bücher gegliedert und enthält ein Stichwortverzeichnis sowie einen einführenden Text mit Hinweisen zu den entsprechenden Kapiteln des betreffenden Buchs sowie Querverweise zu den angrenzenden Gebieten in den anderen Büchern. Eine Inhaltsangabe zu Beginn und ein Stichwortverzeichnis am Ende ergänzen das Kompendium. Zusätzlich werden auch Gebiete, welche die Komponenten der elektrischen Antriebstechnik verwenden, wie die Pulsleichrichtersysteme (Netzgeräte), Photovoltaik, Blindleistungskompensation, aktive Filter, StatCom Anlagen sowie Erweiterungen in den Anwendungen wie bei der Mechatronik, der Schwingungsdämpfung, bei technologischen Anlagen und der Simulation beschrieben. Alle diese Wissensgebiete erfordern vertiefte Kenntnisse, um den steigenden Anforderungen kostengünstig zu genügen. Diese Entwicklung wird durch umfassende Vermittlungen der verknüpften Wissensgebieten und dem somit erleichterten Zugang aufgrund des Kompendiums berücksichtigt. Es wurde größte Aufmerksamkeit auf hohe Verständlichkeit gelegt. Weiterhin wurden im Text des Buches selbst Querverweise gegeben. Nützen Sie die umfangreichen Erfahrungen der Autoren.

Im Buch wurde die aktuelle und bewährte Einführung in die Grundlagen der Antriebstechnik beibehalten. Behandelt werden u.a. geregelte Antriebsanordnungen der Gleichstrommaschinen sowie der Drehfeldmaschinen mit Asynchron- und Synchronmaschinen. Sie werden anhand der Systemgleichungen, der Signalfusspläne sowie der Stellglied- und Regelungsvarianten diskutiert. Anregungen von Lesern wurden selbstverständlich berücksichtigt.

Die Zielgruppen

Das vorliegende Buch wendet sich an Studenten der Elektrotechnik, des Maschinenbaus oder verwandter Studienrichtungen sowohl an den Technischen Universitäten als auch an den Fachhochschulen. Aufgrund des Kompendiums ist es aber auch hervorragend als generelles Nachschlagewerk in der industriellen Praxis geeignet.

Ich danke Herrn Professor Marquardt, Herrn Professor Kolar, Herrn Professor Silber und Herrn Professor Steimel für die sorgfältige Durchsicht und die konstruktiven Hinweise beim Kompendium.

Herr Ebert und Herr Kombas haben mir bei der Erstellung dieser Auflage sehr geholfen, vielen Dank.

Ganz besonderer Dank gebührt aber meiner Frau, die mich - trotz meines sehr schlechten gesundheitlichen Zustandes - liebevoll unterstützt.

Der Autor

Univ.-Prof.i.R. Dr.-Ing. Dr.-Ing. h.c. Dierk Schröder,
Technische Universität München, Lehrstuhl für Elektrische Antriebssysteme
und Leistungselektronik.

München, im Sommer 2013

Dierk Schröder

Kompodium - Teil 1

Einführung

In dem vorliegenden ersten Teil des Kompodiums wird anhand der folgenden Bücher:

1. **Elektrische Antriebe - Grundlagen**, 5. Auflage, 2013
2. **Elektrische Antriebe Regelung von Antriebssystemen**, 3. Auflage, 4. Auflage in Vorbereitung, 2013 - 2014
3. **Leistungselektronische Schaltungen**, 3. Auflage, 2012, 4. Auflage elektronisch in Vorbereitung, 2014
4. **Leistungselektronische Bauelemente**, 2. Auflage, 2005
5. **Intelligente Verfahren Identifikation und Regelung nichtlinearer Systeme**, 1. Auflage, 2010

ein breites Spektrum unterschiedlicher Wissensgebiete vorgestellt. Diese Bücher umfassen die beruflichen und die wissenschaftlichen Arbeitsgebiete des Autors beginnend mit den Eigenschaften der leistungselektronischen Bauelemente, vertieft dem Tieftemperaturverhalten und dem Nachweis des drag-Effekts [27], resultierend in einem verbesserten Beweglichkeitsmodell der Ladungsträger, über physikalische Simulationsmodelle zum optimierten Entwurf von leistungselektronischen Schaltungen [28] [29] [30] [31], den I-Umrichter mit Phasenfolgelöschung [34], den resonanten Schaltungen [39] [40], der Großsignal-Approximation netzgeführter Stellglieder [20], von prädiktiv optimierten Pulsmustern [21] [22] [23] [24], Regelung von kontinuierlichen Fertigungsanlagen [1] [41] [32], der Schwingungsdämpfung mittels hybrider Resonatoren [25] und elektronischer Signaladaptation, der hochdynamischen Blindleistungskompensation zur Flickerminderung [18] [19] [36], der angepaßten Regelung für ein optimiertes Bewegungsverhalten bei Robotern [37] [38] bis hin zu anwendungsfähigen intelligenten Verfahren bei nichtlinearen Systemen [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14] [26] [35] [33], mit den Anwendungen in der Medizintechnik, den Werkzeugmaschinen, der Robotik und den Verbrennungsmotoren. Ein weiteres Arbeitsgebiet waren die Hybridfahrzeuge, eine hochkomplexe Aufgabenstellung ist die optimale Betriebsführung und daraus folgend die Auslegung der Komponenten. Durch eine intensive Zusammenarbeit mit theoretischen Mathematikern konnte ein Optimierungsprogramm erarbeitet werden, beispielsweise [43] [42]. Das umfangreiche Gebiet der Anwendungen kann in die folgenden Wissensgebiete gegliedert werden.

Das erste Wissensgebiet sind die elektrischen Antriebe in den verschiedenen Ausführungsformen wie die Gleichstromantriebe oder die Drehstromantriebe mit Asynchron- oder Synchronmotoren, einschließlich der Regelungen und den Auslegungsregeln.

Ein zweites Wissensgebiet sind die Einsatzgebiete für die Antriebe beispielsweise in mechatronischen und/oder technologischen Anlagen wie die “rigid link - elastic joint Roboter”, bei der Schwingungsdämpfung, bei den Bahnen oder bei den kontinuierlichen Fertigungsanlagen.

Bei den elektrischen Antrieben werden als Stellglieder leistungselektronische Schaltungen verwendet. Diese leistungselektronischen Schaltungen werden aber auch in anderen Anwendungen eingesetzt. Typische Einsatzgebiete sind die Photovoltaik, die Blindleistungskompensation, die Symmetrierung unsymmetrischer Lasten, die aktive Filterung von Oberschwingungen sowie StatCom-Systeme oder zunehmend auch in der Lichttechnik, ein drittes, sehr weites Wissensgebiet.

Wenn es um die Erschließung neuer Arbeitsgebiete geht, wie beispielsweise den Hybridfahrzeugen oder dem “smart grid”, dann sind Kenntnisse der Halbleiterphysik und darauf aufbauend der Leistungshalbleiter eine der Voraussetzungen, dies ist das vierte Wissensgebiet.

Durch die Nutzung neuer mathematischer Verfahren wie dem “Computational Intelligence” d.h. Intelligenter Verfahren zur Identifikation unbekannter nichtlinearer Systeme und deren Regelung, [101] oder der POD (Proper Orthogonal Decomposition), lassen sich weitere, interessante Einsatzgebiete eröffnen, ein fünftes Wissensgebiet.

Um in diesen umfangreichen Wissensgebieten und in der Verknüpfung miteinander eine Übersicht über die Aufgabenstellungen und deren Lösungen zu erreichen, werden die Aufgabenstellungen und deren Lösungen mittels Stichworten, dem Einführungstext und Hinweisen auf die relevanten Kapitel konzentriert dargestellt. Mit diesem Ansatz soll ein erleichternder Zugang mittels eines “roten Fadens” ermöglicht werden. Vielleicht entsteht auch die Anregung, sich angrenzende Wissensgebiete zu erschließen.

Im Kompendium werden die fünf Bücher in der obigen Reihenfolge Kapitel für Kapitel vorgestellt. Die Hinweise auf das betreffende Kapitel und benachbarte relevante Kapitel im gleichen Buch werden direkt angegeben, beispielsweise Kapitel 13.4.1. Hinweise auf relevante Kapitel in den anderen Büchern werden gekennzeichnet durch beispielsweise [54], Kapitel 2.3.

Beachten Sie bitte: Es gibt in den Büchern jeweils Kapitel 1 und 2 und 3 usw., es werden daher die folgenden Kennzeichen vereinbart: Grundlagenbuch G, Regelungsbuch R, Leistungselektronisches Schaltungenbuch S, Leistungselektronisches Bauelementebuch B, Intelligente Verfahren I, Kompendium K. Diese Kennzeichen erscheinen sowohl bei der Buchbenennung als auch bei den Kapitelbenennungen des Kompendiums. Im Kompendium werden sowohl je Buchkapitel ein Kompendiumkapitel angelegt, dann gilt beispielsweise „R2 erfasst Kapitel 3“, als auch mehrere Buchkapitel in einem Kompendiumkapitel, dann gilt „S4 erfasst Kapitel 4,5,6“. Wenn nur die Bezeichnung des Kapitels genannt wird, dann ist diese Ziffer die Kapitelziffer. Die folgenden drei Beispiele sollen zeigen, wie das Kompendium zu nutzen ist. Es werden die voraussichtlich relevanten Kapitel genannt.

Erstes Beispiel: Antrieb mit der Gleichstrom-Nebenschlußmaschine, die folgenden Wissensgebiete sind relevant: G3 Gleichstrommaschine; R3 Optimierungskriterien; R5 Regelkreisstrukturen; R7 Regelungen für Gleichstrommaschinen; R9 Großsignal-Approximation; R8 Überlagerte Regelkreise; R19.1 Elastisches Mehrmassensystem: (R20 Schwingungsdämpfung); S2 Netzgeführte Stromrichter; B1 Halbleiterphysik; (B3.2 Leistungstransistor); B4 Thyristor.

Zweites Beispiel: Drehstromantrieb mit Asynchronmotor, ASM-Antrieb: G5 Drehfeldmaschinen; G12 Umrichter-Antriebe; R13 ASM Regelungen; R13.1 Zusammenfassung [91]; R13.2 Entkopplung; R13.3 Feldorientierung; R15 Stromregelung; S6 I-Umrichter; (S8.1 U-Wechselrichter); S8.2 Grundlagen; S8.4 Mehrpunkt-Wechselrichter; S8.5 Anwendungs-Aspekte; S8.8 Zusatzbeanspruchungen; (S8.7 Auslegung); S8.3 Pulsweitenmodulation; (B1 Halbleiterphysik); B5 IGCT; B7 IGBT; R19.1 Elastisches Mehrmassensystem; (entsprechend den Anforderungen der Aufgabenstellung sind die Kapitel I bis I18, beispielsweise I12 „Nichtlineare Regelungsverfahren“ zur Realisierung des Projekts notwendig).

Drittes Beispiel: technologisches System, Hybrid-Fahrzeug; es wird dabei vorausgesetzt, dass die Optimierung der Komponenten bereits erfolgte: R16.2 PM-Synchronmaschine; R15 Stromregelung; R19.1 Elastisches Mehrmassensystem; R20 Schwingungsdämpfung; S8.1 U-Wechselrichter; S8.5 Anwendungs-Aspekte; S8.8 Zusatzbeanspruchungen; S8.3 Pulsweitenmodulation; B6 Unipolare Bauelemente; B7 IGBT; (entsprechend den Anforderungen der Aufgabenstellung sind die Kapitel I bis I18, beispielsweise I16 „Lernfähiger Beobachter“ zur Realisierung des Projekts notwendig).

Die Kapitel im Kompendium nennen für das betreffende Gebiet zuerst Stichworte für die relevanten Themen, es folgen einführende Einordnungen zu den Aufgabenstellungen sowie deren Lösungen. Zusätzlich werden spezifische Hinweise auf die benachbarte Kapitel im gleichen Buch sowie Querverweise zu vertiefenden Gebieten in den anderen Büchern gegeben.

Um den Umfang des Grundlagenbuchs nicht um weitere 100 Seiten zu vergrößern, ist im Grundlagenbuch nur das Einführungskapitel des Kompendiums und das Inhaltsverzeichnis aufgenommen worden. Die vollständige Fassung des Kompendiums ist unter <http://www.springer-vieweg.de/978-3-642-30470-5> kostenfrei zu erhalten. Die Literaturstellen des Kompendiums sind im Literaturverzeichnis des Grundlagenbuchs aufgeführt.

Bei dem Studium dieses sehr interessanten und weiten Wissensgebietes wünsche ich Ihnen einen guten Wirkungsgrad, ein schnelles Finden der gesuchten Fragestellung sowie der Lösung. Lassen Sie mich wissen, wenn Sie Vorschläge beispielsweise zur verbesserten Darstellung oder Fehler gefunden haben. Sie helfen damit vielen interessierten Lesern.

Zu Ihrer Information bezüglich des Teil 2 des Kompendiums folgt das Inhaltsverzeichnis des Kompendiums.

Buch: Elektrische Antriebe - Grundlagen

- | | | |
|-----|-----------------------------------|--|
| G0 | Einführung | |
| G | Elektrische Antriebe - Grundlagen | |
| G1 | Dimensionierung Antriebe | |
| G3 | Gleichstrommaschine | |
| | Einführung | |
| | Theorie der Felder | |
| | Magnetischer Kreis | |
| | Physikalisches Grundprinzip, | |
| | Systemgleichungen | |
| | Signalflußplan | |
| | Übergangsverhalten | |
| | Steuerung | |
| | Stellglieder, Regelungen | |
| G5 | Drehfeldmaschinen | |
| | Einführung | |
| | Asynchronmaschine | |
| | Raumzeiger-Darstellung | |
| | Allgemeine Drehfeldmaschine, | |
| | Systemgleichungen | |
| | Asynchronmaschine, | |
| | stationärer Betrieb | |
| | Asynchronmaschine, | |
| | Umrichterbetrieb | |
| | Synchronmaschinen | |
| | Funktionsweise | |
| | Schenkelpolmaschine | |
| | ohne Dämpferkäfig | |
| | Schenkelpolmaschine | |
| | mit Dämpferkäfig | |
| | Vollpolmaschine | |
| | ohne / mit Dämpferkäfig | |
| | Permanentmagnet-Synchron- | |
| | maschine | |
| G7 | Antriebs-Varianten | |
| | Transversalflußmaschine, | |
| | geschaltet | |
| | Reluktanzmaschinen | |
| | Linearmotoren | |
| | Lagerlose PM-Motoren | |
| | Kleinantriebe | |
| G12 | Umrichter-Antriebe | |
| | Direktumrichter | |
| | Matrix-Umrichter | |
| | Untersynchrone Kaskaden | |
| | Stromrichteromotor | |
| | I-Umrichter, | |
| | Phasenfolgelöschung | |
| | Selbstgeführter I-Umrichter | |
| | U-Umrichter | |
| | Regelungen | |
| | Entkopplungen | |
| | Feldorientierungen | |
| | Übungsaufgaben | |
| | Prüfungsaufgaben | |

Buch: Elektrische Antriebe Regelung von Antriebssystemen

R	Regelung von Antriebssystemen
R0	Einleitung
R1	Grundlagen der Regelung
R3	Optimierungskriterien
R5	Regelkreis Strukturen
R5.1	Begrenzungen
R6	Abtastsysteme
R7	Gleichstrommaschinen- Regelungen
R9	Großsignal Approximation
R8	Überlagerte Regelkreise
R13	Asynchronmaschinen- Regelungen
R13.1	Zusammenfassung [91]
R13.2	Entkopplungs-Regelungen
R13.3	Feldorientierung Asynchronma- schine
R13.4	Parameter-Identifikation
R15	Stromregelverfahren
R14	Regelung ohne Drehzahlsensor
R16	Synchronmaschine
R16.1	BL-Synchronmaschine
R16.2	PM-Synchronmaschine
R18	Identifikation linearer dynami- scher Systeme
R19	Sondergebiete, Mechatronik, Technologie
R19.1	Elastische Mehrmassensysteme
R20	Schwingungsdämpfung
R21	Objektorientierte Modellierung und Simulation
R22	Kontinuierliche Fertigungsanla- gen
R22.1	Papier- und Folienmaschinen
R22.2	Rotationsdruckmaschinen
R22.3	Dezentrale Regelung

Buch: Leistungselektronische Schaltungen

S	Leistungselektronische Schaltun- gen
S1	Einleitung
S2	Netzgeführte Stromrichter
S3.1	Direktumrichter
S3.2	Matrix-Umrichter
S4	Untersynchrone Stromrichter- kaskade
S5	Stromrichtermotor
S6	I-Umrichter
S6.1	I-Umrichter mit Phasenfolgelö- schung
S6.2	Selbstgeführter I-Umrichter
S7.1	Gleichspannungswandler
S7.2	Dreiphasige Pulsleichrichtersy- steme
S8	U-Wechselrichter
S8.1	Übersicht U-Wechselrichter
S8.2	Grundlagen
S8.3	Pulsweitenmodulation
S8.4	Mehrpunkt-Wechselrichter
S8.5	Anwendungs-Aspekte
S8.6	Entlastungsschaltungen
S8.7	Auslegung U-Wechselrichter
S8.8	Zusatzbeanspruchungen
S9	Resonant schaltentlastete Wand- ler
S10	Blindleistungs-Kompensation
S11.1	Oberschwingungs-Kompensation
S11.2	Elektrische Triebfahrzeuge
S11.3	Photovoltaik
S11.4	Lichttechnik
S12	Simulation

Buch: Leistungselektronische Bauelemente

B	Leistungselektronische Bauelemente
B0	Einleitung
B1	Halbleiterphysik
B2.1	Signaldiode
B2.2	Leistungsdiode
B3.1	Bipolarer Signaltransistor
B3.2	Leistungs transistor
B4	Thyristor
B5	GTO, GTC, IGTC
B6	Unipolare Bauelemente
B7	IGBT
B8	Smart Power Bauelemente
B9	Material SiC, GaN
B10	Aufbau- und Verbindungstechnik
B11	Physikalische Modelle
B12	Stromerfassung

Buch: Intelligente Verfahren Identifikation und Regelung nichtlinearer Systeme

I	Intelligente Verfahren Identifikation und Regelung nichtlinearer Systeme
I1	Einleitung
I3	Funktions-Approximatoren
I4	Lernmodelle
I5	Lernfähiger Beobachter
I6	Rekurrente Netze
I7	Identifikation linearer dynamischer Systeme
I9	Dynamische Nichtlinearitäten
I10	Lokale Lernverfahren
I11	Globale Lernverfahren
I12	Nichtlineare Regelungsverfahren
I13	Regelungs-Varianten
I13.1	Modellbasierte Adaptive Regelung
I14	Disturbance Rejection
I15	Lernende Automaten
I16	Funnel Control
I18	Fuzzy Regelung

Vorwort zur vierten Auflage

Die elektrische Antriebstechnik erweitert ihre Anwendungsbereiche ständig. Ein Beispiel sind die elektrischen Antriebsstränge sowohl bei hybriden PKWs als auch bei Nutzfahrzeugen. Die elektrische Antriebstechnik wird somit immer mehr eine wesentliche Komponente bei komplexen mechatronischen Systemen. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wurden weitere Vertiefungen der Darstellungen insbesondere bei den elektrischen Maschinen vorgenommen.

Da die Simulation bei der Analyse und Synthese mechatronischer Systeme immer wichtiger wird, wurde als Ergänzung in der dritten Auflage des Buches „Elektrische Antriebe - Regelung von Antriebssystemen“ (ISBN 978-3-540-89612-8)

eine sehr ausführliche Darstellung mechatronischer Systeme, die als eine der Komponenten die elektrische Antriebstechnik — einschließlich der Leistungselektronik — enthalten, eingefügt.

Ich hoffe, daß damit eine äußerst wichtige Ergänzung geschaffen wurde, die allen Interessierten eine erweiterte Basis der Kenntnisse sicherstellt.

München, im Frühjahr 2009

Dierk Schröder

Vorwort zur dritten Auflage

Es freut mich sehr, daß das Lehrbuch „Elektrische Antriebe – Grundlagen“ weiterhin eine gute Resonanz hat, so daß eine weitere Neuauflage notwendig ist. Wiederum wurde diese Chance genutzt, um umfangreiche Verbesserungen in der Verständlichkeit vorzunehmen.

Ein ganz wesentlicher Aspekt bei der Verständlichkeit ist, daß zunehmend auch Studenten anderer Fachrichtungen – wie dem Maschinenbau oder der Informatik – die elektrische Antriebstechnik als notwendige Ergänzung zu ihrem Fachgebiet erkennen. Es ist verständlich, daß damit die grundlegenden Vorkenntnisse für die prinzipielle Funktion der elektrischen Maschinen nicht gegeben sind. Für diese Leser/-innen wurden sowohl für die Gleichstrommaschine als auch die Drehfeldmaschinen zusätzliche Kapitel eingefügt, in denen in neuer Art und sehr anschaulich die prinzipielle Funktion erläutert wird. Bei der Bearbeitung dieser komplexen Aufgabenstellung - einerseits den Lesern und Leserinnen ohne große Vorkenntnisse die Funktionsweise der Maschinen zu vermitteln und dabei andererseits die für den Fachmann gebotene Präzision der Darstellung beizubehalten - haben meine wissenschaftlichen Mitarbeiter Herr Dipl.-Ing. Hans Schuster und Herr Dipl.-Ing. Christian Westermaier einen wesentlichen Beitrag geleistet.

Eine Anregung war, die Simulation zu nutzen, um einen noch effizienteren Einstieg in das Gebiet der geregelten elektrischen Antriebe zu gewährleisten. Dies ist im vorliegenden Fall relativ einfach, denn die Signalflußpläne können direkt in beispielsweise das Simulationsprogramm 'Matlab / Simulink' ¹⁾ übertragen werden.

Als Einführung in das Simulationsprogramm 'Matlab / Simulink / Stateflow' sei [46] empfohlen.

Ein weiteres Simulationsprogramm ist 'Modelica / Dymola' ²⁾, eine objektorientierte Version, in der die in diesem Buch und in [97] genutzten Signalflußpläne bereits im Programm enthalten sind. Es besteht somit die sehr vorteilhafte Situation, daß die Simulationsprogramme eine zusätzliche Chance zur Vertiefung des Verständnisses bieten.

München, im Frühjahr 2007

Dierk Schröder

¹⁾ The MathWorks, Inc.; <http://www.mathworks.de> ; [46]

²⁾ Dynasim AB; <http://www.dynasim.com> ; [93, 94]

Vorwort zur zweiten Auflage

Die vorliegende Buchreihe und damit auch der einführende Band „*Elektrische Antriebe 1: Grundlagen*“ haben eine erfreuliche Akzeptanz gefunden, so daß eine Neuauflage erforderlich ist.

Dies wurde von mir als Chance und Aufforderung gesehen, umfangreiche Verbesserungen in der Verständlichkeit und Erweiterungen einzufügen. Beispielsweise wurde das Kapitel der Synchronmaschinen umfassender gestaltet und die Varianten mit Dämpferwicklung eingeschlossen. In konsequenter Berücksichtigung des technischen Standes folgen danach Erläuterungen zu permanenterregten Synchronmaschinen, Transversalflußmaschinen, Reluktanzmaschinen, Linearmotoren, lagerlosen Motoren und Kleinantrieben.

Ich freue mich sehr, daß Herr Prof. Dr. Wolfgang Amrhein, ACCM/Johannes Kepler Universität Linz, Herr Prof. Dr.-Ing. Heinz Bausch, Universität der Bundeswehr München, Herr Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Gerhard Henneberger, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, und Herr Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. h.c. Herbert Weh, Technische Universität Braunschweig, sich bereiterklärt haben, mir bei diesem Vorhaben behilflich zu sein, und danke ihnen für ihre Unterstützung.

Ich werde bei den weiteren Neuauflagen – insbesondere bei der Neuauflage des Bandes 2 „*Regelung von Antrieben*“ – dieses Vorgehen beibehalten.

In diesem Zusammenhang möchte ich auf das Buch „*Intelligent Observer and Control Design for Nonlinear Systems*“ des Springer-Verlags verweisen, das eine Erweiterung der regelungstechnischen Lösungen im Gebiet der Mechatronik und Technologien darstellt. In diesem Buch werden intelligente Verfahren (Neuro, Fuzzy, Neuro-Fuzzy) zur Identifikation, Beobachtung und verschiedene Regelungsvorschläge bei nichtlinearen Strecken vorgestellt. Ich bin sicher, daß durch diese lernfähigen Verfahren eine entscheidende Neuorientierung zur Optimierung des elektromechanischen Gesamtsystems erreicht werden wird.

Es würde mich freuen, wenn ich auch in der Zukunft Unterstützung für das weite, interessante und wichtige Gebiet der Antriebstechnik, der Leistungselektronik, der Regelung und der Erweiterungen in den Gebieten Mechatronik sowie technologische Verfahren finden würde.

Vielen Dank für ihre Unterstützung bei diesem Vorhaben.

Vorwort zur ersten Auflage

Die Erarbeitung eines Vorlesungsmanuskripts und darauf aufbauend einer Einführung in ein Wissensgebiet in Buchform ist ein komplexer und zeitaufwendiger Prozeß.

Ich möchte an dieser Stelle zuerst meiner Familie für die Unterstützung und das Verständnis in all den Jahren danken, da ich ihr an vielen Abenden und Wochenenden fehlte.

Danken möchte ich auch allen meinen wissenschaftlichen und nichtwissenschaftlichen Mitarbeitern, die durch Diskussionen untereinander und mit mir zusammen zum Gelingen des Vorhabens beigetragen haben. Unser gemeinsames Ziel war eine umfassende aber dennoch leicht verständliche Einführung in das Gebiet der elektrischen Antriebe.

Ich wünsche den Lesern dieses Buches, daß sie – soweit es im Rahmen einer Einführung möglich ist – alle Erläuterungen zu den interessierenden Fragen der Grundlagen der elektrischen Antriebe finden.

Für ein tieferes Eindringen in spezielle Gebiete wie der Leistungselektronik und der Regelung – insbesondere der Drehfeldmaschinen – sei auf die entsprechende Literatur und die nachfolgenden Bände zwei bis vier dieser Buchreihe verwiesen.

Zur Kontrolle des Verständnisses können die Leser die Übungs- und Prüfungsaufgaben verwenden. Es wird empfohlen, die Aufgaben ohne vorherige Information des beiliegenden Lösungswegs durchzurechnen. Für die Prüfungen war eine Bearbeitungszeit von 120 Minuten vorgegeben. Der Überhang beträgt etwa 20–30 %.

Meine Mitarbeiter und ich haben uns bemüht, eine möglichst klare Darstellung zu finden und die Tippfehler zu eliminieren. Wir bitten die Leser, uns bei diesem Vorhaben zu unterstützen.

München, im Frühjahr 1994

Dierk Schröder

Inhaltsverzeichnis

Einführung	1
1 Antriebsanordnungen: Grundlagen	9
1.1 Mechanische Grundgesetze	9
1.1.1 Analogien zwischen Translation und Rotation	9
1.1.2 Übertragungsstellen und Getriebe	13
1.1.3 Drehmomentbilanz im Antriebssystem	17
1.1.4 Normierung der Gleichungen und Differentialgleichungen	18
1.2 Zeitliches Verhalten des rotierenden mechanischen Systems	21
1.2.1 Analytische Behandlung	21
1.2.2 Graphische Behandlung von Bewegungsvorgängen	24
1.2.3 Numerische Lösung über Differenzgleichung	27
1.3 System Arbeitsmaschine–Antriebsmaschine	28
1.3.1 Stationäres Verhalten der Arbeitsmaschine	28
1.3.1.1 Widerstandsmoment $M_W = \text{const.}$	28
1.3.1.2 Widerstandsmoment $M_W = f(N, V)$	29
1.3.1.3 Widerstandsmoment $M_W = f(\varphi)$	30
1.3.1.4 Widerstandsmoment $M_W = f(r)$	30
1.3.1.5 Widerstandsmoment $M_W = f(t)$	31
1.3.2 Stationäres Verhalten der Antriebsmaschinen: $M_M = f(N, \varphi)$	31
1.3.2.1 Asynchrones bzw. Nebenschluß-Verhalten	32
1.3.2.2 Konstant-Moment-Verhalten	33
1.3.2.3 Synchrones Verhalten	33
1.3.2.4 Beispiel: Gleichstrom–Nebenschlußmaschine	34
1.3.3 Statische Stabilität im Arbeitspunkt	36
1.3.3.1 Graphische Methoden	36
1.3.3.2 Rechnerische Stabilitätsprüfung über die linearisierte Differentialgleichung im Arbeitspunkt	37
1.3.3.3 Stabilitätsprüfung über die Laplace-Transformation	38
1.3.4 Bemessung der Antriebsanordnung	40
1.3.4.1 Arbeitsmaschinen	40
1.3.4.2 Antriebsmaschinen	41

2	Verluste und Erwärmung im Antriebssystem	44
2.1	Verluste an der Übertragungsstelle	44
2.1.1	Leistungsbilanz	44
2.1.2	Verlustarbeit an der Übertragungsstelle „Motor“	47
2.1.3	Verluste beim Beschleunigen	49
2.2	Erwärmung elektrischer Maschinen	52
2.2.1	Verlustleistung und Temperatur	52
2.2.2	Rechengang: mathematische Grundlagen	56
2.2.3	Strombelastung und Verlustleistung	57
2.2.4	Normen und Betriebsarten	59
2.2.4.1	Betriebsarten und Bemessungsdaten	61
2.2.4.2	Dauerbetrieb (Betriebsart S1)	62
2.2.4.3	Kurzzeitbetrieb (Betriebsart S2)	62
2.2.4.4	Aussetzbetrieb (Betriebsart S3)	63
2.2.4.5	Aussetzbetrieb mit Einfluß des Anlaufvorgangs (Betriebsart S4)	65
2.2.4.6	Aussetzbetrieb mit elektrischer Bremsung (Betriebsart S5) . . .	66
2.2.4.7	Ununterbrochener periodischer Betrieb mit Aussetzbelastung (Betriebsart S6)	66
2.2.4.8	Unterbrochener periodischer Betrieb mit elektrischer Bremsung (Betriebsart S7)	66
2.2.4.9	Ununterbrochener periodischer Betrieb mit Last- und Drehzahl- änderungen (Betriebsart S8)	68
2.2.4.10	Ununterbrochener Betrieb mit nichtperiodischer Last- und Dreh- zahländerung (Betriebsart S9)	68
2.2.4.11	Betrieb mit diskretem konstantem Belastungszustand (Betriebsart S10)	69
2.2.5	Mittelwertbetrieb bei periodischer Belastung	69
2.3	Maschinen mit mehreren Bemessungsbetrieben	72
2.4	Aufstellungshöhe, Temperatur und Kühlmittel	72
2.4.1	Belüftung und Kühlung	73
2.4.2	Elektrische Bedingungen	74
3	Gleichstrommaschine	80
3.1	Einführung	80
3.2	Theorie der Felder	81
3.2.1	Elektrostatisches Feld, Coulomb-Kraft	82
3.2.2	Magnetfeld - Lorentzkraft	84
3.2.3	Magnetfeld - Induktionsspannung	87
3.2.3.1	Wechselwirkungen zwischen Ladungen – Lenz’sche Regel	90
3.2.4	Magnetische Feldstärke	90
3.2.5	Magnetische Flussdichte	94
3.2.5.1	Lorentzkraft	94

3.2.5.2	Materialabhängigkeit der Lorentzkraft bzw. magnetischen Flussdichte	95
3.2.5.3	Magnetische Flussdichte in nicht ferromagnetischen Materialien	100
3.2.5.4	Magnetische Flussdichte in ferromagnetischen Materialien (Hysteresekurve)	100
3.2.6	Wichtige Eigenschaften des magnetischen Feldes für das Verständ- nis elektrischer Maschinen	106
3.2.6.1	Magnetfeldbündelnde Wirkung ferromagnetischer Materialien	106
3.2.6.2	Quellenfreiheit des magnetischen Feldes	107
3.2.6.3	Kraft auf bewegte Ladungen im Luftspalt zwischen ferromagne- tischen Materialien	108
3.2.6.4	Oberflächenströme	109
3.2.6.5	Wechselwirkung zwischen ferromagnetischen Werkstoffen	110
3.2.6.6	Magnetischer Kreis	114
3.2.6.7	Grenzflächenkräfte: magnetischer Querdruck und Längszug . . .	120
3.2.6.8	Brechungsgesetze für magnetische Feldlinien	126
3.2.7	Zusammenfassung	137
3.3	Physikalisches Funktionsprinzip der Gleichstrommaschine	138
3.3.1	Prinzip der Momenterzeugung – Ableitung der Momenten-Grundgleichung	139
3.3.1.1	Betrachtung der Gleichstrommaschine als magnetischen Kreis .	139
3.3.1.2	Kommutator	143
3.3.1.3	Ableitung der Momenten-Grundgleichung	147
3.3.1.4	Rotor mit Nuten	148
3.3.2	Beschleunigung des Rotors – Ableitung der Mechanik-Grundgleichung	152
3.3.3	Entstehung einer Gegenspannung – Ableitung der Bewegungsinduktions-Grundgleichung	152
3.3.4	Eigeninduktivität des Rotors – Ableitung der Ankerkreis-Grundgleichung	155
3.4	Signalflußplan der Gleichstrom–Nebenschlußmaschine	157
3.4.1	Ankerkreis	157
3.4.2	Feldkreis, Erregerkreis	163
3.4.3	Zusammenfassung von Ankerkreis und Erregerkreis	170
3.5	Signalflußpläne, Übergangsverhalten	176
3.5.1	Führungsverhalten und Führungs-Übertragungsfunktion	176
3.5.2	Lastverhalten und Stör-Übertragungsfunktion	179
3.5.3	Einfluß von ψ auf n (Feldschwächung)	179
3.5.4	Zusammengefaßter Plan (linearisiert, überlagert, vereinfacht) . .	182
3.6	Steuerung der Drehzahl	184
3.6.1	Drehzahlsteuerung durch die Ankerspannung	184
3.6.2	Steuerung durch den Fluß	186
3.6.3	Steuerung durch Ankerspannung und Feld	187

3.6.3.1	Stationäres Verhalten, Kennlinien	187
3.6.3.2	Zeitverhalten	189
3.6.4	Drehzahl-Steuerung durch Vorwiderstand im Ankerkreis	189
3.6.4.1	Drehzahlverstellung durch geschaltete Vorwiderstände	190
3.7	Zeitliches Verhalten bei Spannungs- und Stromsteuerung	194
3.7.1	Drehzahländerung durch Spannungsumschaltung	194
3.7.2	Drehzahländerung mit konstantem Strom	195
3.8	Arbeitsbereich-Grenzen der fremderregten Gleichstrommaschine	197
3.8.1	Bereich 1: Spannungsverstellung im Ankerkreis	197
3.8.2	Bereich 2: Feldverstellung	198
3.8.3	Bereich 3: Erhöhung der Drehzahl bei konstanter Spannung und konstantem Fluß	198
3.9	Gleichstrom-Hauptschlußmaschine	200
4	Stellglieder und Regelung für die Gleichstrommaschine	206
4.1	Einleitung Leistungselektronik	206
4.2	Gleichstromsteller, DC-DC-Wandler	207
4.2.1	Tiefsetzsteller	208
4.2.2	Steuerverfahren für Gleichstromsteller	212
4.2.2.1	Pulsweitensteuerung (T konstant)	212
4.2.2.2	Pulsfolgesteuerung (T variabel)	212
4.2.2.3	Hysteresee-Regelung des Gleichstromstellers	214
4.2.3	Gleichstromstellerschaltungen für Ein- und Mehr-Quadrant- Betrieb von Gleichstrommaschinen	217
4.2.3.1	Prinzip des Tiefsetzstellers (Buck-Wandler)	217
4.2.3.2	Prinzip des Hochsetzstellers (Boost-Wandler)	217
4.2.3.3	Motorischer Ein-Quadrant-Betrieb	219
4.2.3.4	Generatorischer Ein-Quadrant-Betrieb	221
4.2.3.5	Zwei-Quadrant-Betrieb	222
4.2.3.6	Vier-Quadrant-Betrieb	226
4.2.4	Antriebssystem Gleichstromsteller-Gleichstrommaschine	229
4.3	Netzgeführte Stromrichter-Stellglieder	232
4.3.1	Grundprinzip	233
4.3.2	Dreiphasen-Mittelpunktschaltung	234
4.3.3	Dreiphasen-Brückenschaltung (B6-Schaltung)	240
4.3.4	Netzstrom, Verschiebungsfaktor $\cos \varphi_1$ und Leistungsfaktor λ .	242
4.3.5	Grenzen des Betriebsbereichs von Stromrichter und Maschine .	247
4.3.6	Verfahren zur Drehmomentumkehr bei Stromrichtern	250
4.3.6.1	Drehmomentumkehr durch Wenden des Ankerstroms	251
4.3.6.2	Drehrichtungsumkehr eines Gleichstromantriebes, der von einem kreisstromfreien Umkehrstromrichter gespeist wird	254
4.3.6.3	Drehmomentumkehr durch Wenden des Feldstroms	255
4.4	Strom- und Drehzahlregelung der Gleichstrommaschine	261
4.4.1	Ankerstromregelung	262

4.4.2	Drehzahlregelung	265
4.4.3	Querverweise Gleichstrommaschine - Regelung	268
4.4.4	Führungs- und Störverhalten von Regelkreisen	271
5	Drehfeldmaschinen	277
5.1	Einführung	277
5.2	Funktionsweise von Asynchronmaschinen	278
5.2.1	Erzeugung eines Drehfeldes im Luftspalt durch den Stator . . .	279
5.2.2	Spannungsinduktion im Rotor	290
5.2.3	Stromaufbau im Rotor	295
5.2.4	Entstehung des Drehmoments, stationäre Drehzahl-Drehmoment- Kennlinie	297
5.2.5	Höhere Polpaarzahlen	299
5.3	Raumzeiger-Darstellung	301
5.3.1	Definition eines Raumzeigers	302
5.3.2	Rücktransformation auf Momentanwerte	305
5.3.3	Koordinatensysteme	306
5.3.4	Differentiation im umlaufenden Koordinatensystem	308
5.4	Allgemeine Drehfeldmaschine	309
5.5	Asynchronmaschine: Signalfußplan mit Verzögerungsgliedern .	323
5.6	Asynchronmaschine im stationären Betrieb	325
5.6.1	Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie der Asynchronmaschine	326
5.6.2	Elektrische Verhältnisse im stationären Betrieb	333
5.6.2.1	Ersatzschaltbilder der Asynchronmaschine	333
5.6.2.2	Stromortskurve des Statorstroms	334
5.7	Asynchronmaschine bei Umrichterbetrieb	338
5.7.1	Steuerverfahren bei Statorflußorientierung	339
5.7.2	Steuerverfahren bei Rotorflußorientierung	350
5.7.3	Asynchronmaschine am Umrichter mit eingepprägtem Statorstrom	359
6	Synchronmaschine	360
6.1	Funktionsweise von Synchronmaschinen	360
6.2	Synchron-Schenkelpolmaschine ohne Dämpferwicklung	365
6.2.1	Beschreibendes Gleichungssystem	365
6.2.2	Synchron-Schenkelpolmaschine in normierter Darstellung	370
6.2.3	Signalfußplan Synchron-Schenkelpolmaschine – Spannungseinprägung	374
6.2.4	Signalfußplan Synchron-Schenkelpolmaschine – Stromeinprägung	378
6.2.5	Ersatzschaltbild der Synchron-Schenkelpolmaschine	380
6.3	Schenkelpolmaschine mit Dämpferwicklung	382
6.4	Synchron-Vollpolmaschine	386
6.4.1	Beschreibendes Gleichungssystem und Signalfußpläne	386
6.4.2	Ersatzschaltbild der Synchron-Vollpolmaschine	392

6.4.3	Steuerbedingungen der Synchron-Vollpolmaschine ohne Dämpferwicklung	394
6.5	Permanentmagneterregte Maschinen	401
7	Transversalflußmaschine	406
	Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c. H. Weh	
7.1	Die neueren Entwicklungen in der Antriebstechnik	406
7.2	Magnetkreise bei Longitudinalfluß(LF)- und Transversalfluß(TF)-Anordnung	410
7.2.1	Longitudinalfluß-Anordnung (LF) mit Permanentmagneten	410
7.2.2	Zahlenbeispiel	412
7.3	Magnetkreise der Transversalfluß-Familie (TF)	413
7.3.1	Übergang von der Flachmagnet- zur Sammleranordnung	415
7.3.2	Zu erwartende TFM-Ergebnisse	422
8	Geschaltete Reluktanzmaschinen	425
	Prof. Dr. H. Bausch, Universität d. Bundeswehr München	
8.1	Einleitung	425
8.2	Aufbau	428
8.3	Betriebsverhalten	430
8.4	Energieumwandlung	439
8.5	Stromrichterschaltungen	442
8.6	Steuerung und Regelung	448
9	Linearmotoren	455
	Prof. Dr. G. Henneberger, RWTH Aachen	
9.1	Einführung	455
9.2	Technik von Linearmotoren	455
9.3	Industrielle Anwendungsmöglichkeiten	463
9.4	Hochgeschwindigkeits-Anwendungen	466
10	Lagerlose Permanentmagnetmotoren	469
	Prof. Dr. W. Amrhein; Dr. S. Silber ACCM/ Johannes Kepler Universität Linz	
10.1	Einleitung	469
10.2	Kraft- und Drehmomentberechnung	473
10.2.1	Magnetische Koenergie	474
10.2.2	Maxwellscher Spannungstensor	474
10.2.2.1	Fourier-Reihendarstellung der Feldgrößen	478
10.2.2.2	Drehmomentberechnung	480
10.2.2.3	Kraftberechnung	481
10.2.2.4	Interpretation der Ergebnisse	482

10.3	Ausführungsbeispiele zu lagerlosen Permanentmagnetmotoren	484
10.4	Regelung und elektronische Ansteuerung	488
10.5	Applikationen lagerloser Scheibenläufermotoren	491
11	Kleinantriebe	499
11.1	Schrittmotoren	499
11.1.1	Einführung, Funktionsprinzip	499
11.1.2	Grundtypen von Schrittmotoren	501
11.1.2.1	Reluktanz-Schrittmotor	501
11.1.2.2	Permanentmagneterregter Schrittmotor	503
11.1.2.3	Hybrid-Schrittmotor	505
11.1.3	Gegenüberstellung Drehfeld–Schrittfeld	507
11.1.4	Betriebskennlinien, Betriebsverhalten	508
11.1.4.1	Statischer Drehmomentverlauf	508
11.1.4.2	Statisches Lastverhalten	510
11.1.4.3	Einzelschritt-Fortschaltung	511
11.1.4.4	Grenzkennlinien, Betriebsbereiche	513
11.1.5	Ansteuerung, Leistungselektronik	516
11.1.5.1	Ersatzschaltbild eines Motorstrangs	516
11.1.5.2	Unipolare und bipolare Speisung der Strangwicklungen	516
11.1.5.3	Leistungstreiber	517
11.1.5.4	Betriebsarten: Voll-, Halb- und Mikroschrittbetrieb	519
11.1.5.5	Bestromungstabellen	522
11.1.6	Positioniergenauigkeit, Schrittwinkelfehler	523
11.1.7	Drehzahlverhalten, Resonanzfrequenzen	525
11.1.7.1	Parametrische Anregung	527
11.1.7.2	Dämpfung	529
11.1.8	Modellbildung	529
11.1.9	Auslegung von Schrittmotorantrieben	532
11.1.9.1	Ermittlung der Startgrenzfrequenz	533
11.1.9.2	Berechnung von linearen Frequenzrampen	533
11.2	Elektronisch kommutierte Gleichstrommaschine	537
12	Umrichterantriebe	538
12.1	Direktumrichter	539
12.1.1	Matrix-Umrichter	543
12.2	Untersynchrone Stromrichter-kaskade (USK)	545
12.2.1	Querverweise untersynchrone Stromrichter-kaskade, USK	550
12.3	Stromrichtermotor	551
12.3.1	Prinzipielle Funktion	552
12.3.2	Lastgeführte Kommutierung	554
12.3.3	Anfahrvorgang	558
12.3.4	Drehmomentpendelungen	559

12.3.5	Regelung des Stromrichter-motors	561
12.3.6	Querverweise Stromrichter-motor	563
12.4	Selbstgeführter Stromrichter mit Phasenfolgelöschung und eingepprägtem Strom	564
12.4.1	Prinzipielles Systemverhalten	564
12.4.2	Kommutierung des selbstgeführten Stromrichters	566
12.4.3	Steuer- und Regelverfahren	575
12.4.4	Weiterentwicklungen der selbstgeführten I-Umrichter	577
12.4.5	Querverweise I-Umrichter	578
12.5	Selbstgeführte Umrichter mit Gleichspannungszwischenkreis	580
12.5.1	Umrichter mit variabler Zwischenkreisspannung	581
12.5.2	Umrichter mit konstanter Zwischenkreisspannung (Pulsumrichter)	585
12.5.3	Modulationsverfahren bei Pulsumrichtern	588
12.5.3.1	Zweipunktregelung (Prinzipdarstellung)	588
12.5.3.2	Pulsweitenmodulation (PWM)	589
12.5.3.3	Raumzeiger-Darstellung	595
12.5.4	Bewertung „U-Umrichter - I-Umrichter“	597
12.5.5	Mehrpunkt-Wechselrichter	600
12.5.6	Leistungsfaktor-Korrektur (PFC)	606
13	Grundsätzliche Überlegungen zur Regelung von Drehfeldmaschinen	607
13.1	Entkopplung	608
13.1.1	Querverweise Entkopplung	611
13.2	Feldorientierung	612
13.2.1	Querverweise Feldorientierung	616
	Übungsaufgaben	618
	Prüfungsaufgaben	659
	Variablenübersicht	686
	Literaturverzeichnis	702
	Kompodium	702
	Antriebstechnik und benachbarte Gebiete (Bücher)	705
	Elektroantrieb allgemein	710
	Leistungshalbleiter	711
	Leistungselektronik: Ansteuerung, Beschaltung, Kühlung	714
	Gleichstromsteller, DC-DC-Wandler	715
	Netzgeführte Stromrichter: Schaltungstechnik und Auslegung	717

Netzgeführte Stromrichter: Regelung	719
Direktumrichter	724
Untersynchrone Kaskade (USK)	726
Stromrichteremotor	728
Stromzwischenkreis-Umrichter (I-Umrichter)	730
Spannungszwischenkreis-Umrichter (U-Umrichter)	732
Asynchronmaschine: Regelung	734
Synchronmaschine	739
Reluktanzmaschine	740
Geberlose Reluktanzmaschine	746
Linearmotoren	747
Lagerlose Permanentmagnetmotoren	749
Kleinantriebe	754
Stichwortverzeichnis	758

Einführung

Die elektrischen Antriebe sind eine typische und wichtige Komponente zwischen der Informationsverarbeitung von technologischen Systemen einerseits und den zu beeinflussenden technologischen Systemen und Verfahren andererseits. Die elektrischen Antriebe entsprechen somit den Muskeln im menschlichen System. Die Bedeutung dieser Antriebe läßt sich aus den beiden folgenden Vergleichen erkennen:

- In industrialisierten Ländern werden ca. 60 % der insgesamt erzeugten elektrischen Energie mittels elektromechanischen Wandlern in mechanische Energie umgesetzt.
- Etwa 40 % der elektrischen Antriebe werden geregelt betrieben, d.h. sie sind in der Drehzahl und im Drehmoment im Betriebsbereich frei einstellbar. Dieser Typ von Antrieben hat einen kontinuierlichen Zuwachs aufzuweisen, z.B. aufgrund steigender Anforderungen aus den technologischen Verfahren und/oder aufgrund von Energie-Einsparungen.

Das Einsatzgebiet der elektrischen Antriebe ist daher einerseits sehr weit und damit der Bereich der Anforderungen groß. Andererseits ist die zur Verfügung stehende Zahl der möglichen Antriebslösungen vielfältig. Ausgehend von der Technologie und den zugehörigen technologischen Bearbeitungsverfahren müssen somit die Anforderungen an die Antriebe und die Energie-Einspeisung für die möglichen Antriebslösungen ermittelt werden – eine komplexe Aufgabenstellung. Um diese Aufgabenstellung etwas zu erleichtern, wurde ein **Kompendium** erstellt. Das **Kompendium** enthält eine konzentrierte Beschreibung der Aufgabenstellungen und deren Lösungen, die in den folgenden fünf Büchern beschrieben werden:

1. **Elektrische Antriebe - Grundlagen**, 5. Auflage, 2013
2. **Elektrische Antriebe Regelung von Antriebssystemen**, 4. Auflage, 5. Auflage in Vorbereitung, 2013-2014
3. **Leistungselektronische Schaltungen**, 3. Auflage, 2012, 4. Auflage elektronisch in Vorbereitung, 2014

4. **Leistungselektronische Bauelemente**, 2. Auflage, 2005

5. **Intelligente Verfahren Identifikation und Regelung nichtlinearer Systeme**, 1. Auflage, 2010

Im fünften Buch werden in der Anwendung erprobte intelligente Verfahren für nichtlineare Systeme und im zweiten Buch für lineare Systeme vorgestellt, damit können Aufgabenstellungen aus dem Bereich der Technologie bearbeitet werden. Die Bücher eins und zwei stellen die möglichen Antriebslösungen und deren Regelung vor. Das dritte Buch behandelt im Detail die Funktion sowie die Auslegung der Stellglieder und im vierten Buch erfolgt eine Diskussion der verfügbaren Leistungshalbleiter und deren Einfluss auf das Verhalten der Stellglieder. Wesentliche Merkmale des **Kompendiums** sind die konzentrierte Darstellung der Inhalte, die thematischen Querverweise für die fünf Bücher und die kritischen Anmerkungen. Damit liegt eine recht umfassende Darstellung der oben genannten Fragestellungen vor.

Zur Darlegung der unterschiedlichen Fragestellungen dienen die nun folgenden Antriebsaufgaben.

Als Beispiel für den ersten Vergleich kann die **Anordnung Motor–Pumpe** dienen. Hier wurde bisher als elektrischer Antrieb (Motor) nur ein elektromechanischer Wandler allein eingesetzt, d.h. der elektromechanische Wandler, beispielsweise eine Asynchronmaschine, wird über einen Schalter direkt an das versorgende Drehspannungsnetz angeschlossen.

Der elektromechanische Wandler und die Pumpe bilden aber eine Einheit, die allerdings häufig nur einen sehr engen Arbeitsbereich der Pumpe und damit des Motors ausnutzen. Eine Verstellung des Materialstroms und des Drucks in einem weiten Bereich ist daher mit dieser Einheit allein nicht möglich.

Um eine Anpassung des Materialstroms und des Drucks zu erreichen, kann entweder ein Druckreduzier-Ventil in der Wirkungsrichtung oder ein Rückspeise-Ventil entgegen der Wirkungsrichtung eingebaut werden. Wesentlich bei beiden Lösungen ist, daß der elektromechanische Wandler und die Pumpe auf den ungünstigsten Betriebszustand ausgelegt werden und damit kontinuierlich mit maximaler Leistung und höchstem Energieverbrauch arbeiten müssen.

Es ist einsichtig, daß derartige Lösungen nur dann wirtschaftlich sind, wenn die laufenden Energiekosten gegenüber den Anschaffungskosten gering sind. Bei Pumpen, die hohe Leistungen – z.B. Kesselspeisepumpen von 20 MW in Kraftwerken – aufweisen und steuerbar sein müssen, sind derartige Lösungen unwirtschaftlich. Günstiger ist in diesem Fall, das System Motor und Pumpe um eine leistungselektronische Energiewandlung und eine Steuerung und Regelung für den leistungselektronischen und elektromechanischen Wandler zu erweitern, um eine elektronische Steuerung bzw. Regelung des Drucks und des Materialstroms zu erreichen. Gleiche Überlegungen gelten inzwischen allgemein, beispielsweise

werden Hydraulikversorgungen in Fahrzeugen zunehmend mit geregelten elektrischen Antrieben ausgestattet, um Kraftstoff zu sparen.

Der finanzielle Mehraufwand für die leistungselektronische Wandlung und die zugehörige Steuerung und Regelung kann durch Einsparungen beim Energieverbrauch in ein bis zwei Jahren amortisiert sein.

Hybride PKWs haben einen Antriebsstrang mit Verbrennungsmotor und Getriebe sowie parallel dazu mit Batterie, leistungselektronischem Stellglied und Drehstrommotor. Beim Stillstand des Fahrzeugs wird der Verbrennungsmotor ausgeschaltet. Der Verbrennungsmotor bleibt ausgeschaltet, wenn das Fahrzeug rein elektrisch fährt. In den beiden Betriebszuständen wird somit vermieden, daß der Verbrennungsmotor in den ungünstigen Verbrauchsbereichen arbeitet. In einem weiteren Betriebszustand arbeiten beide Momentenquellen parallel, die Batterie wird so geladen, dass der Verbrennungsmotor in günstigen Verbrauchsbereichen arbeiten kann. Beim Bremsen wird die Bremsenergie rekuperiert. Mit diesem Ansatz ist – bei richtiger Auslegung der Komponenten, siehe die Dissertationen des Lehrstuhls – eine deutliche Verbrauchsreduzierung zu erreichen.

Bahntriebe: Sie benötigen im Stillstand und bei niedrigen Drehzahlen ein hohes Drehmoment. Bei hohen Drehzahlen wird dagegen ein Betrieb mit konstanter Leistung angestrebt. Dies bedeutet, daß Bahntriebe prinzipiell in der Drehzahl und im Drehmoment verstellbar sein müssen. Eine Lösung, die viele Jahre eingesetzt wurde, war die Reihenschlußmaschine, deren Stromaufnahme und damit Drehzahl durch stufig verstellbare Serienwiderstände eingestellt werden konnte. Nachteilig ist bei dieser Lösung vor allem die verlustbehaftete und lastabhängige Drehzahl- und Drehmoment-Einstellung.

Heutige Lösungen verwenden leistungselektronische Stellglieder und zugehörige elektronische Signalverarbeitungen, um höhere Wirkungsgrade, Energieflüsse in beiden Richtungen und somit auch Energierückspeisung und stufenlose Einstellung des Drehmoments an der Reibkennlinie des Systems Rad–Schiene zu gewährleisten.

Produktionsanlagen mit kontinuierlicher Verarbeitung des Materials (Dressierstraßen, Druckmaschinen, Kalandr- oder Papiermaschinen): Bei derartigen Aufgabenstellungen muß eine große Zahl von elektrischen Antrieben so in der Drehzahl geregelt werden, daß beispielsweise der Zug bzw. die Bahnkraft zwischen den Bearbeitungsstationen einstellbar ist, damit die technologischen Bedingungen erfüllt werden.

Werkzeugmaschinen und Handhabungsgeräte: Das Werkzeug folgt einer mehrdimensionalen Bahn. Die elektrischen Antriebe müssen bei derartigen Anwendungen nicht nur in der Drehzahl und im Drehmoment, sondern auch im Drehwinkel (Lage) regelbar sein.

Aus diesen wenigen Beispielen ist zu erkennen, daß das technologische Verfahren und das zugehörige physikalische System – im folgenden Arbeitsmaschine genannt – nach Aufgabenstellung, statischem und dynamischem Verhalten, Grenzdaten, optimalen bzw. zulässigen Betriebszuständen bekannt sein muß, um die Anforderungen an den elektrischen Antrieb festzulegen.

Wenn somit eine derartige technische Anlage entwickelt, projektiert und anschließend realisiert werden soll, dann müssen ausgehend von der betrachteten Aufgabenstellung und der Technologie die Anforderungen an die elektrischen Antriebe ermittelt werden. Die Anforderungen an die elektrischen Antriebe sind z.B. die Nennleistungsdaten wie Drehzahl, Drehmoment sowie Ein-, Zwei- oder Vierquadrant-Betrieb. Zusätzlich sind die regelungstechnischen Anforderungen wie erforderliche statische Genauigkeit oder dynamische Anforderungen abzuklären. Ein weiterer Aspekt sind die Kühlungs- und Umweltbedingungen sowie der Wartungsaufwand.

Ausgehend von diesen Anforderungen der Technologie an die elektrischen Antriebe müssen auch die baulichen Fragen abgeklärt werden, d.h. können die Antriebe direkt an die Arbeitsmaschine gekuppelt werden oder sind mechanische Komponenten wie Kupplungen, Wellen oder Getriebe zusätzlich notwendig.

Alle diese Punkte, von denen hier nur ein kleiner Ausschnitt genannt wurde, sollten genau diskutiert und umfassend dokumentiert werden, so daß alle Punkte wie Annahmen und Vereinbarungen jederzeit und vollständig von allen Beteiligten nachvollziehbar und überprüfbar sind.

Bei komplexeren Fragestellungen empfiehlt sich eine Systemanalyse mittels Simulation. Um diese Simulation zu ermöglichen, ist eine Modellbildung aller Komponenten notwendig. Die Modellbildung ist schwierig und fehleranfällig, da es zu entscheiden gilt, welche Eigenschaften der Komponenten wichtig sind und andererseits, welche Eigenschaften nur vernachlässigbare Nebeneffekte betreffen; eine Validierung der Modelle ist daher notwendig. Mit den Modellen kann dann das Simulationsmodell des Gesamtsystems erstellt werden.

Es folgt die Analyse des betrachteten Systems, um kritische Kombinationen von Komponenten und deren Parameter zu erkennen. Beispielsweise ist eine Eigenfrequenz der mechanischen Verbindung zwischen elektrischem Antrieb und Arbeitsmaschine, die im Bereich der Durchtrittsfrequenz der elektrischen Drehmomentregelung ist, unzulässig. Dies bedeutet, mit der Simulation und der Analyse können die Parameter der Komponenten ganzheitlich analysiert, angepaßt bzw. optimiert werden.

Ein weiterer Schritt ist der Reglerentwurf, die Festlegung der Reglerparameter, der Sensorik, der Signalverarbeitung (kontinuierlich, diskontinuierlich) und damit die Festlegung der erreichbaren statischen und dynamischen Eigenschaften.

Wenn diese Ergebnisse erarbeitet sind, ist eine gute Basis für die Projektierung geschaffen. Allerdings lassen sich im allgemeinen nicht alle Komponenten entsprechend den Vereinbarungen und Anforderungen in den vorliegenden Schritten realisieren, so daß Wiederholungen der Schritte entsprechend den fortschreitenden Erkenntnissen notwendig sein können.

Auf die Bedeutung einer vollständigen, übersichtlichen und verständlichen Dokumentation kann hier nur nochmals hingewiesen werden.

Die erarbeiteten Unterlagen und Ergebnisse können eine wertvolle Hilfe während der Realisierung und Inbetriebnahme sein. Eine Validierung der Annah-

men, Modelle und Ergebnisse nach der Inbetriebnahme ist wünschenswert, um bei nachfolgenden Projekten eine verbesserte Ausgangsbasis zu haben.

Das vorliegende Buch und die anderen Bände dieser Buchreihe berücksichtigen dieses Vorgehen und versuchen vom Systemaspekt in dieses komplexe Gebiet einzuführen.

In **Kapitel 1** werden deshalb die **Grundlagen der unterschiedlichen Antriebsanordnungen** dargestellt. Das Ziel ist die Auslegung des elektrischen Antriebs. Um dieses Ziel erreichen zu können, werden beispielsweise die mechanischen Grundgesetze, die Drehmomentbilanzen, das statische und dynamische Verhalten des Systems Arbeitsmaschine–Antriebsmaschine sowie die Stabilitätsprüfung am Arbeitspunkt dargestellt.

In **Kapitel 2** wird in die **Leistungsbilanzen**, die Verluste sowie die daraus folgende **Erwärmung** der elektromechanischen Wandler eingeführt.

Nachdem in den ersten beiden Kapiteln prinzipiell dargestellt wurde, wie das Anforderungsprofil an den elektrischen Antrieb erarbeitet werden kann, werden in den folgenden Kapiteln die Komponenten der unterschiedlichen elektrischen Antriebe vorgestellt. Wesentlich ist, daß bei diesen Darstellungen die regelungstechnischen Aspekte und die informationstechnischen Zusammenhänge schwerpunktmäßig berücksichtigt werden.

In **Kapitel 3** werden die Gleichstrom-Nebenschluß- und die Gleichstrom-Hauptschlußmaschine behandelt. Der Schwerpunkt liegt hier bei der Darstellung der **Gleichstrom-Nebenschlußmaschine**. Erarbeitet werden der Signalflußplan, das Führungs-, Last- und Störverhalten, die unterschiedlichen Steuerungseingriffe zur Drehzahl- und Drehmoment-Verstellung sowie das dynamische Verhalten bei Spannungs- und Stromeinprägung.

In **Kapitel 4** werden die unterschiedlichen **leistungselektronischen Stellglieder**, das sind die Gleichspannungswandler und die netzgeführten Stromrichter-Stellglieder, abgehandelt. Zusätzlich wird das System drehzahl- und drehmoment-geregelter Gleichstromantrieb einschließlich der **grundlegenden Optimierungsregeln** für den Strom- und den Drehzahlregelkreis dargestellt. Da sowohl das Gebiet der Leistungselektronik als auch das Gebiet der Regelung der Gleichstrommaschine sehr umfangreich sind, können nur die wesentlichen Grundlagen beider Gebiete behandelt werden. Zur Vertiefung sei auf die Spezialliteratur und die weiteren Bände 2 bis 4 dieser Buchreihe „*Elektrische Antriebe 1 – 4*“ sowie das Buch „*Intelligente Verfahren Identifikation und Regelung nichtlinearer Systeme*“ verwiesen.

In **Kapitel 5 und 6** werden die **Signalflußpläne der Drehfeldmaschinen „Asynchronmaschine“** und „**Synchronmaschine**“ abgeleitet. Wesentliches Ziel bei beiden Ableitungen ist die durchgängige, mathematisch strenge, aber dadurch leicht verständliche Vorgehensweise. Damit sollen die Grundlagen zum Verständnis der Steuerung und Regelung derartiger Antriebsmaschinen gelegt werden. Um dieses Verständnis zu vertiefen, werden insbesondere bei der Asynchronmaschine die Betriebszustände Netzbetrieb, Steuerverfahren bei kon-

stantem Stator- und Rotorfluß ausführlich abgehandelt. Durch dieses Vorgehen soll der heutigen Bedeutung der Drehfeldmaschine Rechnung getragen werden.

In das Kapitel „Synchronmaschine“ ist nun auch eine Darstellung der **permanentmagneterregten Synchronmaschine** mit aufgenommen worden, da diese Maschinen ein günstigeres Leistungsgewicht als Asynchronmaschinen haben und regelungstechnisch einen ähnlich einfachen Signalfußplan wie die Gleichstrom-Nebenschlußmaschinen haben.

In **Kapitel 7** werden die **Transversalflußmaschinen** von Herrn Professor Weh vorgestellt. Transversalflußmaschinen sind eine interessante Variante der permanenterrregten Maschinen, die aufgrund des nochmals gesteigerten Leistungsgewichts gegenüber den permanenterrregten Synchronmaschinen zunehmend Beachtung finden.

Der **Reluktanzeffekt** wurde bereits bei der Drehmomentbildung der Synchron-Schenkelpolmaschine mit Erregerwicklung ausführlich diskutiert. Dieser Reluktanzeffekt wird bei den Reluktanzmaschinen alleine genutzt und führt im Rotor zu konstruktiv sehr einfachen Maschinen. Prinzipiell gibt es Reluktanzmaschinen mit synchron umlaufendem Drehfeld wie die Synchron-Schenkelpolmaschine – allerdings ohne Erregerwicklung – und die geschaltete Reluktanzmaschine. Letztere Maschine wurde bis vor wenigen Jahren als ein Exot für nur sehr kleine Leistungen angesehen. Durch ein verbessertes technisches Verständnis ist die geschaltete Reluktanzmaschine inzwischen aber eine weitere, konstruktiv sehr einfache und aussichtsreiche Antriebsvariante bei kleinen und mittleren Leistungen. Herr Professor Bausch erläutert in **Kapitel 8** ausführlich die **geschaltete Reluktanzmaschine**. Da diese Antriebsvariante in den folgenden Bänden dieser Reihe nicht mehr behandelt wird, beschreibt Herr Professor Bausch auch die Stellgliedvarianten sowie die Steuerung bzw. Regelung des geschalteten Reluktanzmotors detailliert.

Bisher wurden rotierende elektromechanische Energiewandler beschrieben. In vielen Anwendungsfällen sind aber **lineare Bewegungen** erwünscht. In das Gebiet der linearen Bewegungen und damit in das Gebiet der **Linearmotoren** führt Herr Professor Henneberger in **Kapitel 9** ein. Wesentliche Erkenntnis dieses Kapitels ist erstens, daß mit den unterschiedlichen Varianten der Linearantriebe systemtechnische Lösungen erreichbar sind, die mit rotierenden Maschinen und einer mechanischen Umsetzung rotierend zu linear nicht zu realisieren sind. Ein zweites wichtiges Ergebnis ist, daß die in Kapitel 5 und 6 abgeleiteten Signalfußpläne und somit die Wirkungsprinzipien direkt auf die Linearmotoren übertragbar sind, wenn systemtechnische Aspekte wie beispielsweise die Steuerung und Regelung von Bedeutung sind.

Die bisher dargestellten elektromechanischen Energiewandler benötigten Lager (Gleit- oder Kugellager) zur Fixierung des Rotors. Die technische Entwicklung der elektrischen Komponenten hat inzwischen zu so langen Lebensdauern dieser Komponenten geführt, daß nunmehr die Lager die Lebensdauer des elektrischen Antriebssystems begrenzen. Diese Aussage gilt sowohl für Gleichstrommaschinen, bei denen die Kommutator- und die Bürsten-Standzeit die Lager-

lebensdauer übertreffen, als auch für Drehfeldmaschinen. Aufgrund der durch die begrenzte Lagerlebensdauer eingeschränkten Einsatzdauer der elektrischen Maschinen sind lagerlose elektrische Maschinen ein verständlicher Wunsch.

In **Kapitel 10** stellen Herr Professor Amrhein und Herr Dr. Silber Varianten von **lagerlosen elektrischen Maschinen** vor. Die Beschreibung umfaßt detailliert die konstruktiven und elektromagnetischen Belange. Wesentliches Ziel bei der Entwicklung ist, Lösungen zu finden, bei denen der Zusatzaufwand so gering wie möglich gehalten werden kann. Der Beitrag wurde für die fünfte Auflage umfangreich überarbeitet und beschreibt den neuesten Stand der Technik.

In **Kapitel 11** werden antriebstechnische Lösungen mit **Kleinantrieben** vorgestellt. Die wesentliche Einschränkung bei derartigen Antrieben ist, daß bei Kleinantrieben der Aufwand bei der Sensorik, der Signalverarbeitung und dem leistungselektronischen Stellglied wie bei Antrieben mit mittleren und höheren Leistungen im allgemeinen nicht möglich ist. Es erschien mir deshalb interessant und notwendig, auch dieses Gebiet in der überarbeiteten Fassung des ersten Bandes dieser Buchreihe zu berücksichtigen, insbesondere da die Zahl dieser Kleinantriebe sehr groß ist.

In **Kapitel 12** werden verschiedene **Drehfeldmaschinen-Antriebssysteme** mit den **Regelverfahren** bei quasistatischen Betriebszuständen wie der Antrieb mit Direktumrichter, der Stromrichtermotor und die I- und U-Umrichter prinzipiell vorgestellt. Es gelten hier die gleichen Aussagen wie bei der Leistungselektronik und der Regelung der Gleichstrommaschine; d.h. diese Gebiete sind so umfangreich, daß hier nur eine Einführung gegeben werden kann.

In **Kapitel 13** wird wie bei der Gleichstrommaschine eine kurze Einführung in die **dynamische Regelung der Drehfeldmaschinen** mittels Entkopplung und Feldorientierung gegeben.

Da das **Gebiet der elektrischen Antriebe** und deren Einsatzbereiche **außerordentlich weit** ist und in einer Einführung nur die wesentlichen Aspekte behandelt werden können, wurde großer Wert auf ein ausführliches weiterführendes **Literaturverzeichnis** gelegt, auch hinsichtlich der Konstruktionsprinzipien der speziellen Maschinen. Abschließend ist eine Zusammenstellung von Übungs- und Prüfungsaufgaben beigelegt, die zur Absicherung genutzt werden kann.

Ich wünsche Ihnen bei der Durcharbeitung der verschiedenen Kapitel dieser Einführung in die Grundlagen der elektrischen Antriebe Freude, einen hohen Wirkungsgrad und viele Erfolgserlebnisse beim besseren Verständnis dieses komplexen Gebiets.