

Rudolf Busch

Elektrotechnik und Elektronik

Rudolf Busch

# Elektrotechnik und Elektronik

für Maschinenbauer und Verfahrenstechniker

5., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage

Mit 429 Abbildungen und 132 Übungsaufgaben  
mit Lösungen

STUDIUM



**VIEWEG+**  
**TEUBNER**

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

Prof. Dr.-Ing. Rudolf Busch wechselte nach fast zwanzigjähriger Tätigkeit in der Industrie in das Hochschulwesen und lehrte zuletzt über zehn Jahre an der Universität Essen, wo er das Fachgebiet Elektrotechnik leitete und mit der Ausbildung von Maschinenbauingenieuren betraut war.

1. Auflage 1994
2. Auflage 1996
3. Auflage 2003
4. Auflage 2006
- 5., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage 2008

Alle Rechte vorbehalten

© Vieweg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2008

Lektorat: Harald Wollstadt | Ellen Klabunde

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

[www.viewegteubner.de](http://www.viewegteubner.de)



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

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

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

ISBN 978-3-8351-0248-4

*Wenn Du ein Schiff bauen willst,  
dann trommle nicht Männer zusammen,  
um Holz zu beschaffen,  
Aufträge zu vergeben  
oder Arbeit zu verteilen,  
sondern lehre sie die Sehnsucht  
nach dem weiten, endlosen Meer.*

*Antoine de Saint - Exupéry*

## **Vorwort**

Das vorliegende Buch ist aus Vorlesungen entstanden, die ich über viele Jahre hinweg für Studierende der Ingenieurwissenschaften in nichtelektrotechnischen Studienrichtungen an der Technischen Universität „Otto von Guericke“ Magdeburg gehalten habe und seit 1991 an der Universität GH Essen durchführe.

Es gehört zu den wichtigen Erfahrungen meiner Lehrtätigkeit, dass es den Lernenden, die keinen elektrotechnischen Beruf ausüben oder ausüben wollen, sich jedoch mit Elektrotechnik und Elektronik befassen müssen, häufig sehr schwerfällt, sich in der Gedankenwelt der Elektrizitätslehre zurechtzufinden. Allzu oft treten dann Misserfolg und Resignation ein und die Studierenden sind froh, wenn endlich die Elektrotechnikprüfung abgelegt und dieses Fach „überstanden“ ist. Von dem vermittelten Stoff bleiben bei ihnen oft nur einige wenige Begriffe oder diffuse Vorstellungen im Gedächtnis, mit denen sie in ihrer Ingenieurpraxis wenig anzufangen wissen.

Nach meiner Überzeugung kann man dem entgegenwirken, wenn das in so genannten „Nebenfächern“ oft praktizierte „black-box-Denken“ verlassen und mehr danach gefragt wird, was sich in der „box“ verbirgt, welche grundlegenden physikalischen Zusammenhänge dort existieren, d.h., wenn man sich darum bemüht, die Erscheinungen wirklich zu verstehen. Denn nur mit dem, was man begriffen hat, kann man erfolgreich arbeiten, beispielsweise weitergehende Studien durchführen oder Schlussfolgerungen für das eigene Fachgebiet ziehen. Allein auf der Basis soliden Grundlagenwissens wird man ein guter Spezialist in der Praxis. Es gibt für mich keinen erkennbaren Grund, hier das „Nebenfach“ (ich gebrauche dieses Wort ungern) auszuschließen, weil es nicht nur Bestandteil des Studiums, sondern ohne Zweifel auch der Praxis ist, was in besonderem Maße für die Elektrotechnik zutrifft, der man in Wissenschaft und Technik auf Schritt und Tritt begegnet.

Das vorliegende Buch habe ich mit dem Ziel geschrieben, auch den diesem Fachgebiet ferner stehenden Studierenden, Ingenieuren und anderen Interessierten die physikalischen Zusammenhänge in der Elektrizitätslehre und in deren wichtigsten Anwendungsgebieten deutlich zu machen. Dabei war ich stets bemüht, von einfachen, der Leserin oder dem Leser oft aus eigener Erfahrung bekannten Phänomenen auszugehen und darauf Schritt für Schritt aufbauend zu komplizierteren Zusammenhängen zu führen.

Dieser Orientierung habe ich u.a. dadurch Rechnung getragen, dass die Behandlung der Felder an den Anfang des Lehrbuches gestellt wurde. Aus ihnen lassen sich die technischen Grundlagen der Elektrotechnik anschaulich ableiten. Bei der Darlegung der Anwendungen war ich darüber hinaus bestrebt, auch modernste Entwicklungen einzubeziehen.

Das Buch wendet sich an alle, für die in Studium oder Beruf Kenntnisse der Grundlagen der Elektrotechnik und Elektronik sowie ihrer Anwendungen notwendig sind. Der Stoff entspricht etwa den Anforderungen, die heute an eine moderne Ingenieurausbildung, bei der Elektrotechnik nicht das Hauptfach bildet, gestellt werden. Das Buch ist auch für Studierende der Elektrotechnik in den Anfangssemestern geeignet.

Vorkenntnisse in Physik und Mathematik sind im Rahmen dessen wünschenswert, was in natur- und ingenieurwissenschaftlichen Studienrichtungen an Universitäten, Technischen Hochschulen und Fachhochschulen im ersten Studienjahr geboten wird.

Die den Hauptabschnitten nachgestellten Übungsaufgaben sind bezüglich ihres Schwierigkeitsgrades dem Leserkreis angemessen. Ihre Lösungen werden am Ende des Buches angegeben. Sie sollen dazu dienen, den Stoff zu vertiefen und die Kenntnisse zu erweitern.

Bei meinem wissenschaftlichen Mitarbeiter, Herrn Dipl.-Ing. Sven Hilfert, möchte ich mich für die wertvolle Hilfe bei der computergestützten Erstellung der Bilder und beim Durchrechnen der Übungsaufgaben bedanken. Weiterhin gilt mein Dank Herrn Dr. Jens Schlembach vom Teubner-Verlag für die gute Zusammenarbeit, den im Text genannten Firmen für die Überlassung von Bildmaterial und meinen ehemaligen Magdeburger Kollegen für die Beisteuerung einiger Übungsaufgaben. Schließlich bedanke ich mich bei meiner Frau Ingrid für viele Hinweise und tatkräftige Unterstützung beim Korrekturlesen.

Essen, im Frühjahr 1994

Rudolf Busch

## **Vorwort zur 2. Auflage**

Die erste Auflage dieses Lehrbuches hat eine gute Aufnahme gefunden, so dass sich schon nach relativ kurzer Zeit eine zweite Auflage erforderlich machte. Ich habe sie zum Anlass genommen, den Text einer vollständigen Überarbeitung zu unterziehen. Außerdem erfolgte die Korrektur einiger Druckfehler sowie kleinerer Fehler in den zeichnerischen Darstellungen. An verschiedenen Stellen wurde die Darbietung des Stoffes präzisiert und klarer gestaltet. Statistische Angaben habe ich auf den neuesten Stand gebracht. In den Abschnitt „Elektrische Messtechnik“ sind die Festlegungen der im Januar 1995 erschienenen Neuauflage der Norm DIN 1319 „Grundlagen der Messtechnik. Teil 1: Grundbegriffe“ eingearbeitet worden. Weiterhin habe ich versucht, durch eine größere Zahl von fett oder kursiv gedruckten Hervorhebungen und durch die Unterlegung wichtiger Gleichungen und Merksätze den Text noch besser zu strukturieren und dadurch übersichtlicher zu machen.

Zu Dank bin ich meinem Mitarbeiter, Herrn Dipl.-Ing. Sven Hilfert sowie meiner Frau verpflichtet. Beide haben mich bei der Vorbereitung dieser zweiten Auflage wiederum mit Engagement unterstützt.

Essen, im Februar 1996

Rudolf Busch

## Vorwort zur 3. Auflage

Die vorliegende dritte Auflage wurde einer gründlichen Überarbeitung unterzogen, die sich hauptsächlich auf die völlig neue Gestaltung des Hauptabschnittes „Elektronik“ konzentrierte. Abweichend von den Ausführungen zu diesem Gebiet in den früheren Auflagen wurden zwei getrennte Abschnitte „Leistungselektronik“ (Abschnitt 7.4) und „Informationselektronik“ (Abschnitt 7.5) verfasst. Da die elektronischen Bauelemente dieser beiden Gebiete im wesentlichen die gleichen sind, wurden deren Eigenschaften und Hauptanwendungsaspekte in einem vorangehenden Abschnitt über „Elektronische Bauelemente“ (Abschnitt 7.3) ausführlich beschrieben, so dass die leistungselektronischen und informationselektronischen Schaltungen frei vom Ballast zusätzlicher Ausführungen zu Bauelementefunktionen beschrieben und erklärt werden konnten. Wie bereits in den früheren Auflagen habe ich mich bemüht, niemals nur reine Fakten und Phänomene global darzustellen, sondern immer die physikalischen und elektrotechnischen Hintergründe zu zeigen und herauszuarbeiten.

Zu den Inhalten der Abschnitte „Leistungselektronik“ und „Informationselektronik“ ist folgendes zu bemerken: Beide Abschnitte wurden selbstverständlich auf den neuesten Stand gebracht und entsprechend erweitert, was wegen der rasanten Fortschritte auf diesen Gebieten auch erforderlich ist. Besonders die Ausführungen zur Leistungselektronik wurden gegenüber den früheren Auflagen wesentlich ausgebaut. Das hat zweierlei Gründe. Einerseits sind leistungselektronische Prinzipien gerade in den letzten Jahren tief in die Arbeitsgebiete von Maschinenbau- und Verfahrenstechnik-Ingenieuren eingedrungen und andererseits gibt es zur Zeit kein Fachbuch der Leistungselektronik, welches sich direkt an Studenten oder Ingenieure wendet, die sich nicht mit Elektrotechnik im Hauptfach oder in der beruflichen Praxis befassen. Die ausgezeichneten Bücher über Leistungselektronik, über die wir verfügen, sind hauptsächlich für Elektrotechniker geschrieben und sind deshalb für diesem Gebiet ferner Stehende oft schwierig lesbar. Natürlich ist mir andererseits auch klar, dass das, was in dem vorliegenden Buch über Leistungselektronik gebracht werden konnte, nicht ausreicht, um auch nur einen Teil der anfallenden Aufgaben zu lösen. Ich bin allerdings auch der Auffassung, dass eine elementare Darstellung eines neuen bzw. fremden Gebietes den Zugang zur vertiefenden Literatur nicht nur wesentlich erleichtert, sondern auch motiviert.

Die anderen Abschnitte des Buches betreffend, ergibt sich das folgende Bild: Der frühere Abschnitt „Feldtheorie“ wurde gestrichen, da er wohl für einen Ingenieur, für den Elektrotechnik nicht das Hauptfach darstellt, entbehrlich ist und dessen Platz für die erweiterten Ausführungen zum Abschnitt „Elektronik“ benötigt wurde. Die Grundlagenabschnitte 1 bis 6 sowie der Abschnitt 10 („Elektrische Messtechnik“) sind im wesentlichen unverändert geblieben. Im Teil „Elektrische Maschinen und Antriebe“ (Abschnitt 8) wurden einige kurze Bemerkungen zu Kleinmaschinen eingeführt, die insbesondere als Stellglieder in der Automatisierungstechnik eine große Bedeutung haben. Die Ausführungen und Statistiken im Abschnitt „Elektrische Energieversorgung“ (Abschnitt 9) wurden auf den neuesten Stand gebracht, ebenso die Literaturangaben und das Sachwortverzeichnis.

Meiner Frau bin ich wiederum zu Dank verpflichtet. Besonderer Dank gebührt meinem wissenschaftlichen Mitarbeiter, Herrn Dipl.-Ing. Kai Müller, der, obwohl er sich in der Endphase der Erarbeitung seiner Dissertation befand, mir mit großer Einsatzbereitschaft und mit großem Zeitaufwand bei der computergestützten Erstellung des Manuskriptes dieses Buches zur Seite gestanden hat.

## **Vorwort zur 4. Auflage**

Nachdem die 3. Auflage eine so gute Aufnahme zu verzeichnen hatte, machte sich relativ schnell eine erneute Auflage erforderlich. Sie wurde zum Anlass genommen, das gesamte Manuskript in das Textverarbeitungssystem WORD zu konvertieren, wodurch das äußere Erscheinungsbild wesentlich verbessert werden konnte. Darüber hinaus wurden die statistischen Angaben auf den neuesten Stand gebracht.

Danken möchte ich Herrn Dr. Martin Feuchte vom Verlag B.G. Teubner für sein Engagement bei der Vorbereitung der vorliegenden 4. Auflage.

Farsleben bei Magdeburg, im November 2005

Rudolf Busch

## **Vorwort zur 5. Auflage**

Die 5. Auflage ist das Ergebnis einer umfangreichen Überarbeitung und Erweiterung wesentlicher Teile dieses Lehrbuches. Bezeichnungen und Symbole wurden den heute üblichen Standards angepasst, was sich auf nahezu alle Hauptabschnitte ausgewirkt hat. Bei der Berechnung von Netzwerken wurde zusätzlich zur bisher beschriebenen Spannungsquelle die Stromquelle eingeführt und ein Ausblick auf die Zweipoltheorie gegeben. Der Abschnitt „Informationselektronik“ ist durch mehrere praktische Beispiele, wie den Einsatz von Operationsverstärkern als Regler und die Anwendung von Flipflops als Zähler und Schieberegister, ergänzt worden. Im Abschnitt „Elektrische Energieversorgung“ sind die neuesten Trends und statistischen Daten der Stromerzeugung in Deutschland berücksichtigt. Die Liste der Literaturangaben wurde, wie auch das Sachwortverzeichnis, auf den neuesten Stand gebracht.

Die wesentlichste Änderung in der vorliegenden Auflage ist die Neuaufnahme eines größeren Abschnittes über die Anwendung von Personalcomputern (PC's) in der elektrischen Messtechnik. Damit möchte ich einerseits der Tatsache ständig zunehmender Komplexität von Messaufgaben Rechnung tragen und andererseits die großen Möglichkeiten einer computergestützten Messtechnik aufzeigen, um auch Maschinenbauer und Verfahrenstechniker und natürlich auch Studenten und Ingenieure anderer Disziplinen zu ermuntern, sich dieser überaus leistungsfähigen Technik zu bedienen. Bei der Ausarbeitung dieses neuen Abschnittes wurde ich mit Bildmaterial von zwei Firmen der Messtechnikbranche, die bei den Bildern genannt sind, unterstützt. Dafür möchte ich mich nochmals bedanken.

Seit dem Erscheinen der 1. Auflage habe ich sehr viele Rezensionen mit Ratschlägen und Hinweisen erhalten, für die ich mich bei den Fachkollegen, deren Nennung wegen ihrer Vielzahl hier nicht möglich ist, ebenfalls bedanken möchte. Die mir sinnvoll erscheinenden Hinweise habe ich selbstverständlich berücksichtigt.

Ich bin der Auffassung, dass sich das vorliegende Lehrbuch wiederum auf dem Stand befindet, der für eine moderne Ingenieurausbildung erforderlich ist. Hinweise zur weiteren Verbesserung sind mir jederzeit willkommen.

Farsleben bei Magdeburg, im Juni 2008

Rudolf Busch

# Inhaltsverzeichnis

<b>Teil A: Grundlagen der Elektrotechnik</b> .....	1
<b>1 Das elektrische Feld</b> .....	1
1.1 Feldbegriff. Darstellung von Feldern .....	1
1.2 Das stationäre elektrische Strömungsfeld .....	2
1.2.1 Ladung. Strom. Stromdichte .....	2
1.2.2 Potenzial. Spannung. Feldstärke .....	7
1.2.3 Elektrischer Widerstand. Ohmsches Gesetz .....	12
1.2.4 Der elektrische Stromkreis .....	14
1.2.5 Die Gesetze von Kirchhoff .....	16
1.3 Das elektrostatische Feld .....	18
1.3.1 Entwicklung aus dem Strömungsfeld .....	18
1.3.2 Kenngrößen des elektrostatischen Feldes .....	20
1.3.3 Kapazität. Kondensatoren .....	21
1.3.4 Kondensatorstrom .....	22
1.3.5 Energie und Kräfte im elektrostatischen Feld .....	23
1.4 Übungsaufgaben .....	25
<b>2 Das magnetische Feld</b> .....	27
2.1 Magnetische Erscheinungen .....	27
2.2 Magnetische Kenngrößen .....	29
2.2.1 Magnetischer Fluss und magnetische Flussdichte .....	29
2.2.2 Durchflutung. Magnetische Spannung. Magnetischer Widerstand .....	30
2.2.3 Die magnetische Feldstärke .....	32
2.3 Das Durchflutungsgesetz .....	33
2.4 Materie im Magnetfeld .....	36
2.4.1 Die Permeabilität. Einteilung der Stoffe .....	36
2.4.2 Hystereseschleife und Magnetisierungskurve .....	37
2.5 Das Induktionsgesetz .....	41
2.5.1 Grundlagen. Der Versuch von Faraday .....	41
2.5.2 Anwendungen des Induktionsgesetzes .....	47
2.6 Selbst- und Gegeninduktion .....	49
2.6.1 Selbstinduktion .....	49
2.6.2 Gegeninduktion .....	52
2.7 Energie und Kräfte im magnetischen Feld .....	54
2.7.1 Energieinhalt des Magnetfeldes .....	54
2.7.2 Kraftwirkungen im magnetischen Feld .....	54
2.7.2.1 Kräfte an Grenzflächen .....	54
2.7.2.2 Kräfte auf stromdurchflossene Leiter .....	55
2.8 Übungsaufgaben .....	57
<b>3 Die passiven Bauelemente der Elektrotechnik</b> .....	61



<b>4</b>	<b>Berechnung von Stromkreisen bei Gleichstrom</b> .....	62
4.1	Der unverzweigte Gleichstromkreis .....	62
4.1.1	Der elektrische Widerstand .....	62
4.1.2	Lineare und nichtlineare Widerstände .....	63
4.1.3	Energie und Leistung im Gleichstromkreis .....	64
4.1.4	Der Grundstromkreis .....	65
4.1.5	Leistungsumsatz im Stromkreis .....	69
4.2	Der verzweigte Gleichstromkreis .....	71
4.2.1	Vereinfachung von Widerstandsnetzwerken .....	71
4.2.2	Teilerregeln .....	75
4.2.2.1	Die Stromteilerregel .....	75
4.2.2.2	Die Spannungsteilerregel .....	76
4.2.3	Berechnung verzweigter Stromkreise mittels der Gesetze von Kirchhoff .....	78
4.2.4	Spannungsquellen und Stromquellen. Zweipoltheorie .....	81
4.3	Übungsaufgaben .....	82
<b>5</b>	<b>Berechnung von Stromkreisen bei Wechselstrom</b> .....	85
5.1	Erzeugung von Wechselstrom. Bestimmungsgrößen .....	85
5.2	Kenngrößen .....	86
5.2.1	Zeitliche Mittelwerte .....	86
5.2.2	Zählpeile .....	89
5.3	Darstellung sinusförmiger elektrischer Größen im Zeigerdiagramm .....	90
5.4	Spannungs- und Stromzeiger bei den Grundschaltelementen .....	91
5.5	Zeigerdiagramme bei gemischten Wechselstromschaltungen .....	92
5.5.1	Reihenschaltung von Kondensator und Widerstand .....	92
5.5.2	Parallelschaltung von Spule und Widerstand .....	94
5.5.3	Gemischte Schaltung .....	94
5.6	Die komplexe Darstellung von Zeigern .....	95
5.7	Komplexe Zeiger der Grundschaltelemente .....	97
5.8	Komplexer Widerstand und komplexer Leitwert .....	100
5.8.1	Komplexer Widerstand .....	100
5.8.2	Komplexer Leitwert .....	104
5.9	Wirk- und Blindkomponenten von Spannung und Strom .....	105
5.10	Wechselstromleistung .....	106
5.11	Drehstrom (Dreiphasenwechselstrom) .....	111
5.11.1	Erzeugung von Drehstrom .....	111
5.11.2	Die Verkettung des Drehstromsystems .....	113
5.11.3	Spannungen und Ströme im symmetrischen Drehstromsystem .....	115
5.11.4	Drehstromleistung .....	118
5.12	Übungsaufgaben .....	119
<b>6</b>	<b>Ausgleichsvorgänge in Stromkreisen</b> .....	124
6.1	Die Schaltgesetze .....	124
6.2	Aufladung eines Kondensators .....	125
6.3	Kurzschluss einer stromdurchflossenen Spule .....	128
6.4	Entladung eines Kondensators in einem Reihenschwingkreis .....	130
6.5	Schlussbemerkungen .....	133
6.6	Übungsaufgaben .....	133

<b>Teil B: Anwendungen der Elektrotechnik</b> .....	135
<b>7 Elektronik</b> .....	135
7.1 Einleitende Bemerkungen .....	135
7.2 Physikalische Grundlagen .....	136
7.2.1 Eigenleitung .....	136
7.2.2 Störstellenleitung .....	138
7.2.3 Eigen- und Störstellenleitung im Bändermodell .....	139
7.2.4 Der <i>pn</i> -Übergang .....	142
7.3 Elektronische Bauelemente .....	144
7.3.1 Halbleiterwiderstände .....	144
7.3.2 Halbleiterdioden .....	145
7.3.2.1 Aufbau. Kennlinien. Typen .....	145
7.3.2.2 Diode als Gleichrichter .....	148
7.3.3 Transistoren .....	150
7.3.3.1 Bipolartransistoren .....	151
7.3.3.2 Feldeffekttransistoren .....	155
7.3.3.3 Insulated Gate Bipolar Transistors (IGBTs) .....	158
7.3.3.4 Betriebsarten von Transistoren .....	159
7.3.3.5 Transistoren als Verstärker .....	161
7.3.3.6 Transistoren als Schalter .....	164
7.3.4 Thyristoren .....	165
7.3.4.1 Aufbau und Wirkungsweise. Typen .....	165
7.3.4.2 Thyristoren als gesteuerte Gleichrichter .....	168
7.3.5 Optoelektronische Bauelemente .....	171
7.3.5.1 Lichtempfangende Bauelemente .....	171
7.3.5.2 Lichtaussendende Bauelemente .....	173
7.3.5.3 Andere optoelektronische Bauelemente .....	174
7.4 Leistungselektronik .....	175
7.4.1 Einführung. Arten und Wirkungsweise von Stromrichtern .....	175
7.4.2 Gleichrichter .....	178
7.4.2.1 Gleichrichter mit Dioden (Ungesteuerte Gleichrichter) .....	178
7.4.2.1.1 Einphasengleichrichter .....	178
7.4.2.1.2 Dreiphasengleichrichter .....	180
7.4.2.2 Gleichrichter mit Thyristoren (Gesteuerte Gleichrichter) .....	180
7.4.2.2.1 Gesteuerte Einphasengleichrichter .....	180
7.4.2.2.2 Gesteuerte Dreiphasengleichrichter (B6C,B6H) .....	184
7.4.2.2.3 Zusammenfassung gesteuerte Gleichrichter .....	184
7.4.2.2.4 Umkehrstromrichter .....	186
7.4.3 Wechselrichter .....	188
7.4.4 Gleichstromumrichter .....	189
7.4.5 Wechselstromumrichter. Frequenzumrichter .....	190
7.5 Informationselektronik .....	193
7.5.1 Einführung .....	193
7.5.2 Analoge und digitale Größen und Signale .....	194
7.5.3 Analogschaltungen .....	197
7.5.3.1 Wechselspannungsverstärker .....	197
7.5.3.2 Operationsverstärker .....	198

7.5.3.3	Schwingungserzeuger .....	200
7.5.4	Digitalschaltungen .....	201
7.5.4.1	Kombinatorische Schaltungen .....	201
7.5.4.1.1	Logische Verknüpfungen .....	201
7.5.4.1.2	Gatter .....	203
7.5.4.2	Sequenzielle Schaltungen .....	205
7.5.4.2.1	Kippschaltungen .....	205
7.5.4.2.2	Flipflops .....	206
7.6	Mikroelektronik .....	210
7.6.1	Schaltungsintegration .....	210
7.6.2	Schaltkreisfamilien .....	212
7.6.3	Mikroprozessoren und Mikrorechner .....	213
7.6.3.1	Komponenten des Mikrorechnersystems .....	213
7.6.3.2	Mikrorechner als Prozessrechner .....	222
7.6.3.3	Weitere Ergebnisse der Mikrorechentechnik .....	226
7.7	Übungsaufgaben .....	228
<b>8</b>	<b>Elektrische Maschinen und Antriebe .....</b>	<b>232</b>
8.1	Einleitung .....	232
8.2	Die Gleichstrommaschine .....	233
8.2.1	Aufbau und Funktionsprinzip .....	233
8.2.2	Erregung der Gleichstrommaschine .....	235
8.2.3	Der Gleichstromnebenschlussmotor .....	236
8.2.3.1	Ersatzschaltbild und Kennlinien .....	236
8.2.3.2	Drehzahlstellung .....	239
8.2.3.3	Anlassen und Bremsen .....	240
8.2.4	Der Gleichstromreihenschlussmotor .....	243
8.2.5	Spezielle Typen .....	244
8.3	Der Transformator .....	244
8.3.1	Grundsätzlicher Aufbau und Funktionsprinzip .....	244
8.3.2	Der ideale Transformator .....	245
8.3.2.1	Definition und Ersatzschaltbild .....	245
8.3.2.2	Induzierte Spannung und Klemmenspannung .....	246
8.3.2.3	Zeigerdiagramme und Wirkungsweise .....	247
8.3.2.4	Widerstandstransformation .....	250
8.3.3	Der technische Transformator .....	251
8.3.3.1	Ersatzschaltbild .....	251
8.3.3.2	Spezielle Betriebsfälle .....	253
8.3.3.3	Betriebsverhalten .....	256
8.3.4	Drehstromtransformatoren .....	259
8.3.5	Spezielle Transformatortypen .....	261
8.4	Rotierende Drehstrommaschinen .....	262
8.4.1	Das Drehfeld .....	262
8.4.2	Arten von Drehfeldmaschinen .....	264
8.4.3	Der Drehstromasynchronmotor .....	266
8.4.3.1	Aufbau .....	266
8.4.3.2	Ersatzschaltbild .....	268
8.4.3.3	Drehzahl-Drehmomenten-Kennlinie .....	269

---

8.4.3.4	Drehzahlstellung .....	271
8.4.3.5	Anlassen von Asynchronmotoren .....	273
8.4.3.6	Spezielle Typen von Asynchronmotoren .....	274
8.4.4	Die Synchronmaschine .....	275
8.4.4.1	Ersatzschaltbild .....	275
8.4.4.2	Betrieb am starren Drehstromnetz .....	276
8.4.4.3	Inselbetrieb des Synchrongenerators .....	281
8.4.4.4	Spezielle Typen von Synchronmotoren .....	282
8.5	Elektrische Antriebstechnik .....	283
8.5.1	Mechanische Struktur elektrischer Antriebe .....	283
8.5.2	Grundgesetze elektrischer Antriebe .....	284
8.5.2.1	Die Bewegungsgleichung .....	284
8.5.2.2	Stabilität stationärer Arbeitspunkte .....	287
8.5.2.3	Wellenlast bei Übertragungsgliedern .....	287
8.5.3	Betriebsarten elektrischer Maschinen .....	289
8.5.3.1	Motorwicklungserwärmung .....	289
8.5.3.2	Nennbetriebsarten .....	290
8.5.3.3	Motorauswahl .....	291
8.5.4	Ein- und Mehrquadrantenantriebe .....	293
8.5.5	Regelung elektrischer Antriebe .....	295
8.5.6	Ergänzende Bemerkungen .....	297
8.6	Übungsaufgaben .....	298
<b>9</b>	<b>Elektrische Energieversorgung .....</b>	<b>301</b>
9.1	Einleitung .....	301
9.2	Überblick zu Kraftwerken .....	302
9.3	Elektrotechnische Komponenten eines Kraftwerkes .....	308
9.4	Übertragungssysteme für elektrische Energie .....	312
9.5	Drehstromnetze .....	313
9.5.1	Spannungsebenen .....	313
9.5.2	Drehstromleitungen .....	315
9.5.2.1	Die Leitungsgleichungen .....	315
9.5.2.2	Übertragung auf Hoch- und Höchstspannungsleitungen (Fernübertragung) .....	316
9.5.2.3	Übertragung auf Mittel- und Niederspannungsleitungen .....	320
9.5.2.4	Praktische Ausführung von Drehstromleitungen .....	323
9.5.3	Netzgestaltung .....	327
9.5.3.1	Sternpunktbehandlung in Drehstromnetzen .....	327
9.5.3.2	Netzstrukturen .....	330
9.6	Schaltanlagen .....	331
9.6.1	Arten von Schaltanlagen .....	331
9.6.2	Schaltgeräte der elektrischen Energietechnik .....	331
9.6.2.1	Schalten von Wechselstrom .....	331
9.6.2.2	Niederspannungsschaltgeräte .....	333
9.6.2.3	Schaltgeräte für Spannungen > 1000 V .....	335
9.6.2.4	Hochleistungssicherungen .....	336
9.6.3	Praktische Ausführung von Schaltanlagen .....	337
9.7	Personenschutz in Niederspannungsnetzen .....	338

9.7.1	Gefährdung des Menschen .....	338
9.7.2	Schutzmaßnahmen .....	340
9.8	Übungsaufgaben .....	342
<b>10</b>	<b>Elektrische Messtechnik .....</b>	<b>344</b>
10.1	Einleitung .....	344
10.2	Grundlegende Begriffe der elektrischen Messtechnik .....	344
10.3	Elektrische Messwerke .....	347
10.3.1	Drehspulmesswerk .....	347
10.3.2	Dreheisenmesswerk .....	348
10.3.3	Elektrodynamisches Messwerk .....	349
10.3.4	Induktionsmesswerk .....	349
10.4	Messgeräte .....	350
10.4.1	Vielfachmesser .....	350
10.4.2	Elektronenstrahloszilloskope .....	352
10.4.3	Registriergeräte .....	355
10.4.4	Zählmessgeräte .....	357
10.5	Messverfahren für elektrische Größen .....	359
10.5.1	Messung von Strom und Spannung .....	359
10.5.2	Messung von Widerständen und Impedanzen .....	360
10.5.3	Messung der elektrischen Leistung .....	361
10.5.4	Zeit- und Frequenzmessung .....	363
10.6	Elektrische Messung nichtelektrischer Größen .....	364
10.6.1	Allgemeines .....	364
10.6.2	Messung von Wegen und Winkeln .....	364
10.6.3	Messung von Kräften und Momenten .....	366
10.6.4	Drehzahlmessung .....	367
10.6.5	Temperaturmessung .....	368
10.7	Messtechnik mit dem PC .....	369
10.7.1	Einleitende Bemerkungen .....	369
10.7.2	Geräte mit integrierter digitaler Schnittstelle .....	371
10.7.3	Messkarten .....	374
10.8	Störbeeinflussung von Messkreisen .....	378
10.9	Übungsaufgaben .....	380
	Lösungen der Übungsaufgaben .....	383
	Literatur .....	398
	Sachwortverzeichnis .....	401