



Adolf J. Schwab

# Elektro- energiesysteme

Erzeugung, Übertragung  
und Verteilung elektrischer Energie  
5. Auflage

 Springer Vieweg

---

# Elektroenergiesysteme

---

Adolf J. Schwab

# Elektroenergiesysteme

Erzeugung, Übertragung  
und Verteilung elektrischer Energie

5. Auflage

Adolf J. Schwab  
Karlsruhe, Deutschland

Unter anfänglicher Mitwirkung von:

Stefan Börninck  
Markus Hemmer  
Bernd Hoferer  
Yannick Julliard  
Rajiv Kumar  
Carsten Meinecke  
Michael Merkle  
Ricard Petranovic

ISBN 978-3-662-55315-2            ISBN 978-3-662-55316-9 (eBook)  
DOI 10.1007/978-3-662-55316-9

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 2006, 2009, 2012, 2015, 2017, korrigierte Publikation 2019

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. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist Teil von Springer Nature  
Die eingetragene Gesellschaft ist Springer-Verlag GmbH Deutschland  
Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

*Dieses Buch widme ich meiner Frau Gisela, die mich während meines beruflichen Lebens und auch im Ruhestand beim zeitraubenden Wissenserwerb und der Generierung neuen Wissens unermüdlich begleitet hat.*

Prof. Dr.-Ing. A. J. Schwab

## Vorwort zur 5. Auflage

Die rapide wachsende Nutzung erneuerbarer Energien im Rahmen des Generationenprojekts *Energiewende* sowie die hohe Fluktuation der aktuellen Gesetzgebung auf dem Energiesektor, nicht zuletzt die ungebrochene große Nachfrage einer breiten Leserschaft, machten erneut eine aktualisierte Neuauflage erforderlich. Sie berücksichtigt sowohl den aktuellen Stand der Technik als auch volkswirtschaftliche Aspekte im Kontext des aktuellen *Energiewirtschaftsgesetzes* (EnWG) und des *Erneuerbare-Energien-Gesetzes* (EEG). Überarbeitet wurden auch die Themen *Evolution der öffentlichen Stromversorgung*, *Smart Grids* und *Energiespeicherung*. Ferner konnten durch das Feedback wohlwollender Leser wieder einige Druckfehler korrigiert werden.

Die Stromerzeugung überwiegend aus erneuerbaren Energien macht große Fortschritte, wenngleich Dampf- und Gaskraftwerke mit rückläufiger Stromproduktion die Energiewende noch lange begleiten werden. Systemrelevante thermische Kraftwerke werden während Wind- und Solarflauten in Form kalter und warmer Reserve auch nach Abschluss der Energiewende im Einsatz sein. Die künftigen Smart Grids werden beweisen müssen, dass sie genau so robust sind wie klassische Verteilnetze, die Strompreise werden vermutlich auf Grund des weitgehenden Wegfalls von Primärenergiekosten langfristig unter den heutigen liegen. Der Stromverbrauch wird wegen der Elektromobilität zunehmen, allfällige Schadensersatzansprüche infolge des Veränderungsprozesses *Energiewende* werden gerichtlich geklärt werden, Ingenieure der Elektrotechnik und Informationstechnik werden unvermindert spannenden technischen Herausforderungen begegnen.

In der Hoffnung, dass diese 5. Auflage Studierenden, Fachleuten und auch technischen Laien einen noch überzeugenderen Einblick in die ungeheure Komplexität moderner Elektroenergiesysteme, und die Breite und Tiefe des Wissens der diese Systeme planenden und betreibenden

Ingenieure vermitteln kann, übergebe ich dieses Buch meinen geschätzten Leserinnen und Lesern.

Im Laufe der Evolution dieses Buches haben zunehmend mehr Personen durch konstruktive Hinweise und fachlichen Rat zu einer stets auf dem aktuellen Stand der Technik befindlichen Darstellung der komplexen Thematik beigetragen. Ihnen allen sei an dieser Stelle, auch im Namen künftiger Leserinnen und Leser, einmal mehr sehr herzlich gedankt. Ohne Priorisierung seien in alphabetischer Reihenfolge erwähnt: Dipl. Volkswirt *Christian Bantle*, Prof. Dr.-Ing. *Kurt-Volker Boos*, Prof. Dr.-Ing. *Manfred Braun*, Dr.-Ing. *Clemens Cremer*, Prof. Dr. *Utz Claassen*, Dr. *Eckart Ehlers*, Dipl.-Ing. *Johannes Elwardt*, Dipl.-Ing. *Markus Fürst*, Dr.-Ing. *Dietmar Giselbrecht*, Dipl.-Ing. *Raphael Goerner*, Prof. Dr.-Ing. *Thomas Hartkopf*, B. Eng. *Sebastian Högner*, Dipl.-Ing. *Kathleen Hummel*, Dipl.-Ing. *Horst Janisch*, PD Dr. *Jörg Jasper*, Dr.-Ing. *Klaus Kasper*, Dipl.-Ing. *Helge Lorenzen*, Dipl.-Ing. *Lennart Luckert*, Dipl.-Ing. *Ute Messmer*, Prof. Dr. *Wolfram Münch*, Dipl.-Ing. *Mischa Nagel*, Dipl.-Ing. *Hendrick Neef*, Dipl.-Ing. *Rolf Neumaier*, Dr. *Thomas Niedrig*, Dipl.-Ing. *Sven Nossek*, Dipl.-Wirtschaftsjurist *Philipp-Nikolas Otto*, Dipl.-Ing. *Robert Pischinger*, M. Sc. *Tim Plößer*, M. Sc. *Robert Prophet*, B. Sc. *Marie Siglind Reichert*, Dipl.-Ing. *Yannick Rink*, Dipl.-Ing. *Claus Rohr*, Dipl.-Ing. *Matthias Roidl*, Prof. Dr.-Ing. *Werner Rupprecht*, Dipl.-Ing. *Torsten Schmidt*, Dipl.-Ing. *Andreas Schoknecht*, Dipl.-Ing. *Christian Schorn*, Prof. Dr.-Ing. *Wolfgang Schröppel*, B. Sc. *Anna Schwabedal*, Dipl.-Ing. *Volker Siedentopp*, Dipl.-Ing. *Robert Steffens*.

Größter Dank gilt Frau Dipl.-Wirt.-Ing. (FH) *Petra Wöhr* für das Aktualisieren der Grafiken und das äußerst sorgfältige Schreiben des druckreifen Manuskripts. Für allzeit gewährte großzügige IT-Unterstützung danke ich den Herren Dipl.-Ing. *Daniel Geissler* und Dipl.-Ing. *Nico Meyer-Hübner*. Schließlich danke ich einmal mehr dem *Karlsruher Institut für Technologie*, KIT, seinem Vizepräsidenten für Forschung und Information Prof. Dr.-Ing. *Oliver Kraft* sowie der *Karlsruher Hochschulgesellschaft*. Meinem Nachfolger, Herrn Professor Dr.-Ing. *Thomas Leibfried*, danke ich für die Möglichkeit der Erstellung des Manuskripts an meiner früheren Arbeitsstätte. Herrn Dr. Grün und Frau Ulrike Butz vom Springer-Verlag gebührt mein Dank für die schnelle Drucklegung der Hardcover-Version und die Herausgabe des e-books (PDF).

Dieses Übersichtswerk hätte wegen seiner hohen Druckkosten nicht in der vorliegenden leicht lesbaren Form zu einem auch für Studierende noch akzeptablen Preis erscheinen können, hätte nicht die *Siemens AG* einen Teil der Druckkosten bezuschusst. Ihr gebührt großer Dank des Autors und künftiger Leserinnen und Leser.

Zum Wohl der Leser und Leserinnen einer 6. Auflage bittet der Verfasser um Rückmeldung etwaiger Fehler sowie um Anregungen zur Verbesserung dieses Buches an [a.schwab@kit.edu](mailto:a.schwab@kit.edu) oder [a.schwab@ieee.org](mailto:a.schwab@ieee.org).

Karlsruhe, im Mai 2017

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. hc. mult. Adolf J. Schwab

## Vorwort zur 1. Auflage

Das vorliegende Buch entstand aus den Unterlagen zu meinen Vorlesungen „*Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie*“ und „*Elektrische Anlagen und Elektroenergiesysteme I, II*“, die ich seit 1980 neben den Vorlesungen „*Hochspannungstechnik I, II*“, „*Hochspannungsmesstechnik*“ und „*Elektromagnetische Verträglichkeit*“ an der Universität Karlsruhe gehalten habe. Da seit dieser Zeit ständig technologische Innovationen stattfanden und mich zunehmend Mitarbeiter in manchen Vorlesungen vertreten haben, wurden Teile des Stoffs überarbeitet bzw. auch neu verfasst.

Elektroenergiesysteme involvieren nahezu alle Disziplinen der Elektrotechnik und zählen wegen der Vielfalt und Komplexität der Fragestellungen zu den anspruchvollsten systemtechnischen Ingenieuraufgaben. Während Hochspannungstechnik, Elektromaschinenbau und Leistungselektronik die technologischen Voraussetzungen für die Erzeugung, Übertragung und Verteilung großer Mengen elektrischer Energie bereitstellen, leisten die elektrische Anlagentechnik, Regelungstechnik, Netzwerktheorie, Nachrichtentechnik und Prozessleittechnik sowie eine Vielzahl von Informationssystemen ihren Beitrag bei Planungsaufgaben sowie im Netz- und Kraftwerksbetrieb. Ziel des Buchs ist nicht die Erläuterung des inneren konstruktiven Aufbaus von Betriebsmitteln oder der gasentladungsphysikalischen Vorgänge beim Löschen des Lichtbogens eines Leistungsschalters. Vielmehr stehen systemtechnische Aspekte wie die Begriffswelt und das Betriebsverhalten, die Verknüpfung und das Zusammenwirken von Betriebsmitteln in einem Elektroenergiesystem sowie ihre mathematische Modellierung im Vordergrund. So versteht sich die „*Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie*“ nicht nur als verständliche Einführung für Studierende der Elektrotechnik, sondern auch als Übersichtswerk für Ingenieure und Quereinsteiger anderer Disziplinen, die in engerem oder weiterem Sinne mit Elektroenergiesystemen befasst sind und einen pro-

blemlosen Einstieg in die umfangreiche Spezialliteratur suchen. Darüber hinaus sollen zumindest Teile dieses Buchs politischen Entscheidungsträgern und all jenen, für die der Strom aus der Steckdose kommt, eine Einsicht in die ungeheure Komplexität hochverfügbarer und preiswerter Stromversorgung in einer Industriegesellschaft vermitteln.

Beginnend mit einem Einblick in die volkswirtschaftliche Bedeutung elektrischer Energie, in die Evolution von Elektrizitätsversorgungsunternehmen und ihren grundsätzlichen Aufbau werden in systematischer Reihenfolge der Bedarf an elektrischer Energie, die großtechnische Umwandlung von Primärenergie in elektrische Energie, die Übertragung großer Mengen elektrischer Energie von Erzeuger- zu Verbraucherschwerpunkten sowie die Verteilung elektrischer Energie an die Endabnehmer behandelt.

Der Kernenergie und der Kernkraftwerkstechnik wird wegen ihres hohen Potenzials zur  $CO_2$ -armen Deckung des mittel- und langfristigen Energiebedarfs sowie der mit ihrem Einsatz verbundenen besonderen Probleme mehr Raum gewidmet als Wasserkraftwerken, die bereits einen hohen Ausbaugrad erreicht haben. Eher exotische, additive Energietechnologien oder die *Hochtemperatur-Brennstoffzelle*, die zwar in höchstem Maß wünschenswert sind, sich aber wegen ihrer geringen Leistungsdichte oder wegen inhärenter Lebensdauer- und Geometrie-probleme zur großtechnischen Erzeugung elektrischer Energie nur bedingt eignen, werden der Vollständigkeit halber gestreift.

Ein kurzer Abriss der Thermodynamik erhellt den physikalisch bedingten, viel beklagten „niedrigen“ Wirkungsgrad thermischer Kraftwerke und die Grenzen der Abwärmenutzung. Zusammen mit der Beschreibung wichtiger Kraftwerkskomponenten liefert dieses Kapitel einführende Hintergrundinformation für die Kraftwerkleittechnik.

Abschnitte über die Berechnung von Leitungen und Netzen sowohl im stationären Betrieb als auch bei symmetrischen und unsymmetrischen Netzstörungen zeigen die Wurzeln der heute verwendeten Rechenprogramme für Lastfluss-, Kurzschluss-, Stabilitäts- und Optimierungsrechnungen auf. Die ausführliche Behandlung der Entkopplung von Drehstromsystemen sowie die Modellbildung von Betriebsmitteln zeigen den hohen Anteil rechnergestützter Ingenieur-tätigkeit im Aufgabenbereich der mit der Erzeugung, Übertragung und Verteilung

elektrischer Energie befassten Ingenieure. Ausführliche Kapitel über Generatoren und Transformatoren, Eigenbedarfs- und Schaltanlagen, Kraftwerks- und Netzregelung, Stabilitäts- und Kurzschlussberechnungen, optimale Erzeugung elektrischer Energie, Sicherheit, Zuverlässigkeit und Schutztechnik runden das Werk ab.

Hinsichtlich der Vielfalt ihrer Elemente, der Beziehungen dieser Elemente untereinander (*Varietät* und *Konnektivität*) und unter Berücksichtigung ihrer Nichtlinearität haben moderne Elektroenergiesysteme einen unübertroffenen Grad an Komplexität erreicht. Ihre Beherrschung zählt zu den anspruchsvollsten systemtechnischen Ingenieuraufgaben und verlangt nach komplexen Informationssystemen, so genannten *Energy-Management-Systemen*, auf die im Rahmen der Kraftwerks- und Netzleittechnik ausführlich eingegangen wird.

Aufgrund der Komplexität von Elektroenergiesystemen kann das Buch an keiner Stelle erschöpfend Auskunft geben, sondern lediglich den schnellen Zugang zur umfangreichen Spezialliteratur ermöglichen. Zu fast allen Begriffen wie *Elektrizitätswirtschaft*, *Netzleittechnik*, *Schaltanlagen*, *Leistungsflussrechnung*, *Kurzschlussstromberechnung* etc. existieren Spezialbücher, die in ihrem Vorwort immer noch entschuldigend erwähnen, nicht erschöpfend zu sein. Die Leserinnen und Leser dieses Buchs mögen hieraus erahnen, welch ungeheures Ausmaß die Komplexität von Elektroenergiesystemen tatsächlich besitzt.

Für ihre anfängliche Mitwirkung an der inhaltlichen Gestaltung dieses Buches danke ich meinen wissenschaftlichen Mitarbeitern Dr.-Ing. *Stefan Börninck*, Dr.-Ing. *Markus Hemmer*, Dr.-Ing. *Bernd Hoferer*, Dr.-Ing. *Yannick Julliard*, M. Sc., MBA, Dr.-Ing. *Radjiv Kumar*, Dr.-Ing. *Carsten Meinecke*, Dr.-Ing. *Michael Merkle* und Dr.-Ing. *Ricard Petranovic*. Für wertvolle Hinweise und Verbesserungsvorschläge danke ich den langjährigen Lehrbeauftragten meines Instituts, den Honorarprofessoren Dr.-Ing. *Kurt-Volker Boos*, Dr.-Ing. *Klaus Kasper* und Dr.-Ing. *Wolfgang Schröppel*, für sehr konstruktive Kritik zu den Kapiteln 17 und 21 den Herren Dipl.-Ing. *Rolf Neumaier* und Dipl.-Ing. *Markus Fürst*. Für das Schreiben und Zusammentragen des Manuskripts gebührt unbegrenzter Dank meinen langjährigen Sekretärinnen Frau *Sonja Ander* und später Frau *Monica Gappisch*. Ferner danke ich ihren Kolleginnen den Damen *Charlotte König*, *Elke Lesak* und *Gabriele Tielker*, für das Schreiben einzelner Textpassagen. Für das kreative Erstel-

len der farbigen Zeichnungen danke ich den Damen *Kathleen Hummel*, *Anna Schwabedal*, *Gerdi Ottmar*, *Silvia Probst* und *Petra Wöhr*. Herrn Dipl.-Ing. *Torsten Schmidt* danke ich für die Beschaffung eines Teils des Bildermaterials sowie für Korrekturlesen von Teilen des Buches, Herrn Dipl.-Ing. *Mischa Nagel* sowie den Studierenden *Matthias Roidl* und *Lennart Luckert* für das abschließende ganzheitliche Korrekturlesen des Gesamtwerks. Letztere hatten wohl den größten Anteil am Aufspüren allfälliger typografischer Fehler und herausfordernder Textpassagen. Für allzeit gewährte großzügige EDV-Unterstützung danke ich den Herren Dipl.-Wi.-Ing. *Dietmar Giselbrecht* und *Timo Wenzel*.

Der Universität Karlsruhe, der Karlsruher Universitätsgesellschaft und meinem Nachfolger, Herrn Prof. Leibfried, danke ich für die Möglichkeit der Erstellung des Manuskripts an meiner früheren Arbeitsstätte.

Frau Cuneus vom Springer-Verlag danke ich für die hochwertige Ausstattung des Buches und die schnelle Drucklegung.

Dieses Übersichtswerk wäre wegen seiner hohen Druckkosten in der vorliegenden Form nie erschienen, hätte nicht das innovative Energieversorgungsunternehmen EnBW AG großzügig einen erheblichen Teil der Druckkosten bezuschusst. Hier gebührt größter Dank des Autors und künftiger Leser den Herren Prof. Dr. *Utz Claassen*, Vorstandsvorsitzender der EnBW AG, Prof. Dr.-Ing. *Thomas Hartkopf*, Mitglied des Vorstands der EnBW AG sowie Herrn Dr. *Wolfram Münch*, Leiter des EnBW-Forschungsbereichs.

In der Hoffnung, dass dieses Buch auch technischen Laien einen überzeugenden Einblick in die ungeheure Komplexität von Elektroenergiesystemen und die Breite und Tiefe des Wissens der diese Systeme planenden und betreibenden Ingenieure vermitteln kann, übergebe ich dieses Buch meinen geschätzten Leserinnen und Lesern.

Zum Wohl der Leser einer zweiten Auflage bittet der Autor um Rückmeldung etwaiger Fehler sowie um Anregungen zur Verbesserung dieses Buches an [schwab@ieh.uni-karlsruhe.de](mailto:schwab@ieh.uni-karlsruhe.de) oder [a.schwab@ieee.org](mailto:a.schwab@ieee.org).

Karlsruhe, im Frühjahr 2006

Prof. Dr.-Ing. A. J. Schwab

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Elektrische Energie und Lebensstandard</b> .....	1
<b>2. Elektroenergiesysteme, Verbundsysteme</b> .....	11
2.1 Evolution der öffentlichen Stromversorgung .....	11
2.1.1 Liberalisierung des Strommarkts .....	15
2.1.2 Energiewende .....	21
2.2 Elektroenergiesysteme .....	33
2.3 Verbundsysteme .....	41
<b>3. Energieressourcen – Energieverbrauch</b> .....	53
3.1 Erzeugung und Verbrauch elektrischer Energie .....	53
3.2 Primärenergieressourcen .....	59
3.2.1 Erschöpfliche Ressourcen und ihr Verbrauch ..	62
3.2.2 Unerschöpfliche Ressourcen .....	70
3.2.3 Energiefluss .....	75
3.3 Klimawandel .....	77
3.4 Energieeffizienz .....	80
<b>4. Stromerzeugung in Wärmekraftwerken</b> .....	83
4.1 Thermodynamische Grundbegriffe .....	86
4.1.1 Dampfgehalt .....	87
4.1.2 Entropie, T(S)-Diagramm .....	89
4.1.3 Carnot-Prozess und thermischer Wirkungsgrad	92
4.1.4 Arbeitsfluid Wasser/Dampf im T(s)-Diagramm	95
4.1.5 Enthalpie, h(s)-Diagramm .....	97
4.2 Dampfkraftwerksprozess .....	101
4.2.1 Wärmeschaltbild, T(s)-Diagramm und Wirkungs-	
grad .....	101
4.2.2 Maßnahmen zur Erhöhung des Wirkungsgrads	104
4.2.2.1 Zwischenüberhitzung .....	105

4.2.2.2	Regenerative Speisewasservorwärmung	106
4.2.2.3	Kühlmitteltemperatur	108
4.2.2.4	Gesamtwirkungsgrad eines Kraftwerks	108
4.2.3	Exergetischer Wirkungsgrad	113
4.3	Dampfkraftwerkkomponenten	114
4.3.1	Dampferzeuger	115
4.3.1.1	Dampferzeugerbauarten	115
4.3.1.2	Feuerungen	120
4.3.1.3	Leistungsregelung bei Dampferzeugern	122
4.3.1.4	Rauchgasreinigung	124
4.3.2	Dampfturbinen	129
4.3.2.1	Bauarten	129
4.3.2.2	Leistungsregelung von Dampfturbinen	135
4.3.3	Kondensator, Kühleinrichtungen	138
4.3.3.1	Kondensator	138
4.3.3.2	Kühlarten	140
4.3.3.3	Abwärmenutzung	142
4.4	Leistungsregelung in Dampfkraftwerken	144
4.4.1	Festdruckbetrieb	144
4.4.2	Gleitdruckbetrieb	145
4.4.3	Modifizierter Gleitdruckbetrieb	146
4.4.4	Vergleichende Betrachtung	147
4.5	Gasturbinenkraftwerke	148
4.6	Kombinierte Gas- und Dampfkraftwerke (GuD)	154
4.7	Kraft-Wärme-Kopplung	157
4.7.1	Kraft-Wärme-Kopplung in der Industrie	157
4.7.2	Kraft-Wärme-Kopplung in der öffentlichen Stromversorgung	159
<b>5.</b>	<b>Stromerzeugung in Kernkraftwerken</b>	<b>165</b>
5.1	Kernenergie	168
5.1.1	Kernfusion	169
5.1.2	Kernfission (Kernspaltung)	172
5.1.3	Nachzerfallswärme	183
5.1.4	Brennstoffkreislauf	187
5.2	Druckwasserreaktoren (DWR)	191
5.3	Siedewasserreaktoren (SWR)	194
5.4	Gasgekühlte Reaktoren	196
5.5	Brutreaktoren	198

5.6	Kernkraftwerke der Generation IV .....	201
5.7	Leistungsregelung von Kernreaktoren .....	202
5.7.1	Leistungsregelung von Druckwasserreaktoren..	205
5.7.2	Leistungsregelung von Siedewasserreaktoren ..	207
5.7.3	Leistungsregelung von gasgekühlten Reaktoren	208
5.7.4	Leistungsregelung von natriumgekühlten Reak- toren .....	208
5.7.5	Bereitstellung von Regelenergie durch Kernkraft- werke .....	209
5.7.6	Stilllegung und Rückbau von Kernkraftwerken	210
<b>6.</b>	<b>Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien.....</b>	<b>213</b>
6.1	Wasserkraftwerke .....	214
6.1.1	Laufwasserkraftwerke .....	215
6.1.2	Speicherkraftwerke .....	216
6.1.3	Pumpspeicherkraftwerke .....	218
6.1.4	Gezeitenkraftwerke .....	220
6.1.5	Turbinentypen .....	222
6.1.5.1	Kaplan-Turbine .....	223
6.1.5.2	Francis-Turbine.....	224
6.1.5.3	Pelton-Turbine .....	225
6.1.6	Leistungsregelung .....	226
6.2	Windkraftanlagen .....	228
6.2.1	Mechanische Leistung.....	229
6.2.2	Generatorkonzepte .....	230
6.2.3	Leistungsregelung von Windturbinen .....	232
6.2.4	Einbindung von Windkraftanlagen in die Netze der öffentlichen Stromversorgung .....	234
6.2.5	Stand der Technik und Ausblick.....	235
6.3	Solarenergieanlagen.....	240
6.3.1	Direkte Nutzung der Solarenergie .....	243
6.3.1.1	Photovoltaik-Anlagen .....	243
6.3.1.2	Solarthermische Anlagen.....	251
6.4	Biomasse - Kraftwerke .....	255
6.5	Geothermische Stromerzeugung .....	258
6.6	Brennstoffzellen .....	261
6.7	Virtuelle Kraftwerke .....	263
6.8	Speicher elektrischer Energie.....	264
6.8.1	Kurzzeitspeicher .....	266

6.8.1.1	Pumpspeicherkraftwerke . . . . .	266
6.8.1.2	Druckgasspeicher-Kraftwerke . . . . .	267
6.8.1.3	Wiederaufladbare Batterien . . . . .	268
6.8.1.4	Wasserstofftechnologie . . . . .	274
6.8.1.5	Wärmespeicher/Power to Heat (PtH, P2H) . . . . .	276
6.8.1.6	Schwungradspeicher . . . . .	277
6.8.1.7	Supraleitende magnetische Energiespei- cher . . . . .	277
6.8.1.8	Virtuelle Speicher . . . . .	278
6.8.2	Langzeitspeicher . . . . .	278
6.8.2.1	Power to Gas (PtG, P2G) . . . . .	278
6.8.2.2	Innereuropäische Kooperation . . . . .	279
6.8.3	Back-Up Versorgung . . . . .	279
<b>7.</b>	<b>Kraftwerkleittechnik . . . . .</b>	<b>283</b>
7.1	Leittechnik-Funktionen . . . . .	284
7.2	Verfahrens- und leittechnische Struktur eines Kraft- werkprozesses . . . . .	286
7.3	Prozessleitsysteme . . . . .	289
7.3.1	Verbindungsprogrammierte Prozessleitsysteme	289
7.3.2	Speicherprogrammierbare Prozessleitsysteme..	291
7.3.3	Prozessleitsysteme mit Feldbus . . . . .	300
7.3.4	Energiemanagementsysteme . . . . .	301
7.3.4.1	Prozessnahe Anwendungen . . . . .	302
7.3.4.2	Betriebliche Anwendungen . . . . .	304
7.3.4.3	Business Anwendungen . . . . .	304
7.3.4.4	Fernwartung . . . . .	304
7.4	Prozessvisualisierung . . . . .	305
7.5	Energiemanagementsysteme der Generation IV . . . . .	307
<b>8.</b>	<b>Umwandlung mechanischer Energie mittels Synchron- generatoren . . . . .</b>	<b>313</b>
8.1	Vollpol- und Schenkelpolgeneratoren . . . . .	314
8.2	Wirkungsweise von Synchrongeneratoren . . . . .	317
8.2.1	Der Synchrongenerator im Leerlauf . . . . .	317
8.2.2	Der Synchrongenerator bei Belastung . . . . .	323
8.2.3	Einfluss der Sättigung . . . . .	328
8.2.4	Dämpferwicklung . . . . .	330
8.3	Besonderheiten der Schenkelpolmaschine . . . . .	332

8.4	Leistungsgleichungen der Synchronmaschine . . . . .	335
8.5	Stationäre Betriebszustände . . . . .	337
8.6	Phasenschieberbetrieb . . . . .	338
8.7	Belastungsgrenzen des Synchrongenerators . . . . .	340
8.8	Sternpunktbehandlung bei Synchrongeneratoren . . . . .	344
8.9	Erregungsverfahren für Synchrongeneratoren . . . . .	347
8.9.1	Gleichstromerregemaschinen . . . . .	347
8.9.2	Drehstromerregemaschinen . . . . .	349
8.9.3	Statische Erregereinrichtungen . . . . .	350
8.9.4	Dynamisches Verhalten von Erregereinrichtungen . . . . .	351
8.10	Der Synchrongenerator im Kurzschluss . . . . .	352
8.10.1	Generatorferner Kurzschluss . . . . .	353
8.10.2	Generatornaher Kurzschluss . . . . .	360
8.11	Mathematische Modelle für Synchrongeneratoren . . . . .	365
8.11.1	Dreiphasiges Modell eines Synchrongenerators mit Vollpolläufer im stationären Betrieb . . . . .	365
8.11.2	Einphasiges Modell eines Synchrongenerators mit Vollpolläufer im stationären Betrieb . . . . .	369
8.11.3	Ermittlung der Mit-, Gegen- und Nullimpedanz eines Synchrongenerators . . . . .	378
8.11.4	Die $dq0$ -Transformation . . . . .	381
8.11.4.1	Mathematische Vorgehensweise . . . . .	384
8.11.4.2	Elektrische Leistung und Drehmoment . . . . .	395
8.11.4.3	Kopplung des Generatormodells mit dem Elektroenergiesystem . . . . .	397
8.12	Virtueller Synchrongenerator . . . . .	398
<b>9.</b>	<b>Bereitstellung elektrischer Energie auf verschiedenen Spannungsebenen . . . . .</b>	<b>401</b>
9.1	Wirkungsweise und Ersatzschaltbild von Transformatoren . . . . .	405
9.2	Kurzschlussersatzschaltbild . . . . .	415
9.2.1	Ersatzschaltbilder mit ungerechneten Größen . . . . .	415
9.2.2	Messung der Kurzschlussimpedanz . . . . .	418
9.2.3	Berechnung der Kurzschlussimpedanz . . . . .	420
9.2.4	Zeigerdiagramme des Kurzschlussersatzschaltbilds . . . . .	421

9.2.5	Kurzschlussersatzschaltbild für Dreiwicklungs- transformatoren . . . . .	422
9.3	Kaskadierte und parallel geschaltete Transformatoren .	423
9.3.1	Kaskadierte Transformatoren . . . . .	423
9.3.2	Parallelbetrieb von Transformatoren . . . . .	426
9.4	Spartransformatoren . . . . .	427
9.5	Drehstromtransformatoren . . . . .	428
9.5.1	Kernbauformen . . . . .	428
9.5.2	Schaltgruppen . . . . .	430
9.5.2.1	Schaltgruppe Yy0 . . . . .	435
9.5.2.2	Schaltgruppe Dy5 . . . . .	439
9.5.2.3	Schaltgruppe Yd5 . . . . .	440
9.5.2.4	Schaltgruppe Yz5 . . . . .	441
9.5.3	Mit-, Gegen- und Nullimpedanz von Drehstrom- transformatoren . . . . .	442
9.5.3.1	Mitimpedanz von Drehstromtransfor- matoren . . . . .	442
9.5.3.2	Nullimpedanz von Drehstromtransfor- matoren . . . . .	443
9.6	Regeltransformatoren . . . . .	450
9.6.1	Längsregler . . . . .	451
9.6.1.1	Unter Last schaltbare Transformatoren	451
9.6.1.2	Längsregler mit Zusatztransformatoren	453
9.6.2	Querregler . . . . .	455
9.6.3	Schrägregler . . . . .	456
9.7	Zeitlicher Verlauf des Magnetisierungsstroms . . . . .	456
9.8	Einschaltstoßstrom leerlaufender Transformatoren . . . .	459
<b>10.</b>	<b>Transport und Übertragung elektrischer Energie . . .</b>	<b>465</b>
10.1	Hochspannungs-Drehstrom-Übertragung, HDÜ . . . . .	465
10.1.1	Transportnetze . . . . .	466
10.1.2	Hochspannungsnetze . . . . .	469
10.1.3	Höhe der Netzspannung . . . . .	469
10.1.3.1	Übertragungsverluste . . . . .	469
10.1.3.2	Übertragungskapazität . . . . .	470
10.2	Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung, HGÜ . . . . .	473
10.2.1	Netzgeführte HGÜ mit Thyristoren . . . . .	474
10.2.2	Selbstgeführte HGÜ mit IGBT-Leistungshalb- leitern . . . . .	477

10.2.3	HGÜ-Leistungsschalter .....	479
10.3	Betriebsverhalten von Leitungen .....	481
10.3.1	Elektrisch lange und kurze Leitungen .....	481
10.3.2	Mathematisches Modell elektrisch langer Leitungen .....	484
10.3.3	Verlustlose Leitung .....	489
10.3.3.1	Ausgewählte betriebliche Spezialfälle	489
10.3.3.2	Leerlauf am Leitungsende .....	490
10.3.3.3	Kurzschluss am Leitungsende .....	492
10.3.3.4	Belastung mit dem Wellenwiderstand	494
10.3.4	Ersatzschaltbild und Zeigerdiagramm einer elektrisch langen Leitung .....	498
10.3.5	Betriebsverhalten elektrisch kurzer Leitungen .	502
10.3.5.1	Ersatzschaltbild und Zeigerdiagramm	502
10.3.5.2	Längs- und Querspannungsabfall . . . .	504
10.4	Blindleistungskompensation in Hochspannungsnetzen .	506
10.4.1	Kompensation induktiver Blindleistung .....	507
10.4.1.1	Parallel-Kompensation .....	507
10.4.1.2	Reihen-Kompensation .....	508
10.4.2	Kompensation kapazitiver Blindleistung .....	511
10.5	FACTS (Flexible AC-Transmission Systems) .....	512
10.5.1	Klassifizierung von FACTS-Betriebsmitteln ...	514
10.5.2	Parallel geschaltete FACTS-Regler .....	515
10.5.2.1	Thyristor-Controlled Reactor, TCR .	516
10.5.2.2	Thyristor-Switched Capacitor, TSC .	517
10.5.2.3	Static VA <sub>r</sub> Compensator, SVC .....	518
10.5.2.4	STATCOM .....	519
10.5.3	Serienschaltete FACTS-Betriebsmittel .....	521
10.5.3.1	Thyristor-Controlled Series Capacitor, TCSC .....	521
10.5.3.2	Static Synchronous Series Compensator, SSSC .....	523
10.5.4	Kombinierte FACTS-Regler .....	524
10.5.4.1	Unified Power Flow Controller, UPFC	524
10.5.4.2	Dynamic Power Flow Controller, DFC	525
10.5.4.3	FACTS HGÜ-Kupplungen .....	526
10.5.5	FACTS-Regelung .....	527
10.6	Betriebsimpedanzen von Mehrleitersystemen .....	529

10.6.1	Berechnung von Betriebsimpedanzen in Längsrichtung .....	529
10.6.1.1	Carson-Formel .....	533
10.6.1.2	Tabellenbücher .....	534
10.6.1.3	Messung der Impedanzen .....	534
10.6.2	Berechnung der Betriebskapazitäten .....	537
<b>11.</b>	<b>Verteilung elektrischer Energie .....</b>	<b>545</b>
11.1	Netztopologien .....	546
11.1.1	Strahlennetze .....	547
11.1.2	Ringnetze .....	548
11.1.3	Maschennetze .....	549
11.2	110 kV-Verteilnetze .....	550
11.3	Mittelspannungsnetze .....	553
11.3.1	Mittelspannungs-Ortsnetze .....	554
11.3.2	Mittelspannungs-Industrienetze .....	557
11.3.3	Mittelspannungsnetze in Großgebäuden bzw. Gebäudekomplexen .....	561
11.3.4	Eigenbedarfsnetze .....	562
11.4	Niederspannungsnetze .....	565
11.4.1	Niederspannungs-Ortsnetze .....	565
11.4.2	Niederspannungs-Industrienetze .....	567
11.4.3	Großgebäudenetze .....	571
11.5	Smart Grids .....	572
11.5.1	Smart Metering .....	576
11.5.2	Smart Homes .....	578
11.5.3	Smart Cities .....	579
11.5.4	Kommunikationswege für Smart Grids .....	580
11.6	Blindstromkompensation in Mittel- und Niederspannungsnetzen .....	582
11.6.1	Netze mit geringem Stromrichteranteil .....	584
11.6.2	Netze mit hohem Stromrichteranteil .....	586
<b>12.</b>	<b>Sternpunktbehandlung .....</b>	<b>589</b>
12.1	Netze mit isolierten Sternpunkten .....	590
12.2	Über Kompensationsreaktanzen geerdete Netze .....	595
12.3	Netze mit geerdeten Sternpunkten .....	597
12.4	Sternpunktbehandlung mit symmetrischen Komponenten .....	599
12.5	Sternpunktbehandlung in Niederspannungsnetzen .....	601

12.5.1	TN-Netze .....	603
12.5.2	TT-Netze .....	604
12.5.3	I-Netze .....	605
<b>13.</b>	<b>Schaltanlagen .....</b>	<b>609</b>
13.1	Schaltgeräte .....	611
13.1.1	Sicherungen .....	613
13.1.2	Lastschalter .....	619
13.1.3	Leistungsschalter .....	621
13.1.4	Trennschalter .....	626
13.1.5	Kurzschlussstrombegrenzer .....	628
13.1.6	Schaltgeräteübersicht .....	631
13.2	Niederspannungsschaltanlagen .....	632
13.2.1	Niederspannungsschaltanlagen im Wohn-Installationsbereich .....	633
13.2.2	Niederspannungsschaltanlagen bis 630 A .....	635
13.2.3	Niederspannungsschaltanlagen über 630 A .....	636
13.3	Mittelspannungsschaltanlagen .....	639
13.3.1	Mittelspannungsschaltanlagen der Primärverteilung .....	643
13.3.2	Mittelspannungsschaltanlagen der Sekundärverteilung .....	647
13.4	Hochspannungsschaltanlagen .....	648
13.4.1	Freiluftschaltanlagen .....	649
13.4.2	Gekapselte Hochspannungsschaltanlagen für Innenraumaufstellung .....	651
13.4.3	Topologie von Hochspannungsschaltanlagen .....	654
13.5	Umspannstationen .....	660
13.6	Anforderungen an Schaltanlagen .....	663
<b>14.</b>	<b>Netzschutz .....</b>	<b>667</b>
14.1	Schutztechnik-Grundlagen .....	668
14.2	Schutzgerätetechnik .....	673
14.3	Schutzprinzipien und -kriterien .....	676
14.3.1	Überstromschutz .....	676
14.3.1.1	Abhängiges Maximalstrom-Zeitrelais (AMZ-Relais) .....	677
14.3.1.2	Unabhängiges Maximalstrom-Zeitrelais (UMZ-Relais) .....	678
14.3.1.3	UMZ-Schutz mit Richtungskriterium .....	680

14.3.2	Distanzschutz . . . . .	681
14.3.3	Vergleichsschutz . . . . .	686
14.3.3.1	Messgrößenvergleichsschutz . . . . .	686
14.3.3.2	Phasenvergleichsschutz . . . . .	688
14.3.3.3	Signalvergleichsschutz . . . . .	688
14.3.4	Erdschlussmeldung . . . . .	689
14.4	Schutztechnik aus Sicht einzelner Betriebsmittel . . . . .	690
14.4.1	Leitungsschutz . . . . .	690
14.4.1.1	Strahlennetze . . . . .	691
14.4.1.2	Ringleitungen und Maschennetze . . . . .	691
14.4.2	Transformatorschutz . . . . .	692
14.4.2.1	Transformatordifferenzialschutz . . . . .	692
14.4.2.2	Buchholzrelais . . . . .	693
14.4.3	Generatorschutz . . . . .	694
14.4.4	Blockschutz . . . . .	695
14.4.5	Sammelschienenschutz . . . . .	698
14.4.6	Schaltanlagenenschutz . . . . .	699
14.5	Schutzkoordination . . . . .	700
14.5.1	Stromstaffelung im Strahlennetz . . . . .	701
14.5.2	Zeitstaffelung im Strahlennetz . . . . .	702
14.5.3	Schutzkoordination in Ring- und Maschennetzen mit UMZ-Schutz . . . . .	704
14.5.4	Zeitstaffelung mit Distanzrelais . . . . .	705
14.6	ANSI Schutz Codes . . . . .	707
14.7	Schutz in Niederspannungsnetzen . . . . .	708
14.7.1	Nullung (TN-Netze) . . . . .	711
14.7.2	Schutzerdung (TT-Netze) . . . . .	714
14.7.3	Schutzleitungssystem (IT-Netze) . . . . .	715
14.7.4	Fehlerstrom-(FI)-Schutzschaltung . . . . .	716
14.7.5	Fehlerspannungs-(FU)-Schutzschaltung . . . . .	717
14.7.6	Schutztrennung . . . . .	718
14.7.7	Schutzisolierung . . . . .	719
14.8	Wide Area Monitoring Systeme . . . . .	720
<b>15.</b>	<b>Frequenz- und Spannungsregelung . . . . .</b>	<b>725</b>
15.1	Frequenzregelung . . . . .	730
15.1.1	Alleinbetrieb . . . . .	730
15.1.2	Parallelbetrieb . . . . .	733
15.1.3	Netzfrequenzregler . . . . .	737

15.1.4	Verbundbetrieb .....	739
15.1.5	Dynamisches Verhalten der Frequenzregelung ..	743
15.1.6	Netzregelverbund (NRV) .....	750
15.2	Spannungsregelung .....	751
15.2.1	Spannungsqualität .....	751
15.2.2	Spannungsregelung in Übertragungs- und Trans- portnetzen .....	751
15.2.3	Stellglieder der Spannungs-/Blindleistungsrege- lung .....	753
15.2.4	Spannungs-/Blindleistungsoptimierung .....	754
15.3	Begrenzungsregelungen .....	755
<b>16.</b>	<b>Netzleittechnik</b> .....	<b>759</b>
16.1	Netzleitstellen .....	763
16.1.1	SCADA-Funktionen .....	763
16.1.2	Höherwertige Entscheidungs- und Optimierungs- funktionen HEO .....	767
16.1.3	Rechnerstruktur und Datenbanksystem .....	768
16.1.4	Schnittstellen zu anderen Systemen .....	770
16.2	Stationsleittechnik .....	771
16.3	Feldleittechnik .....	774
16.4	Fernwirktechnik .....	775
16.5	Tonfrequenz- und Funkrundsteuerung .....	777
16.5.1	Tonfrequenzrundsteuerung .....	777
16.5.2	Funkrundsteuerung .....	779
<b>17.</b>	<b>Netzbetrieb</b> .....	<b>781</b>
17.1	Netzführung in Transportnetzen .....	782
17.1.1	Transportnetzführung in der klassischen Strom- versorgung, so genannte Lastverteilung .....	785
17.1.1.1	Lastprognose .....	786
17.1.1.2	Lastverteilung .....	792
17.1.1.3	Kraftwerksauswahl, Order of Merit ..	795
17.1.1.4	Netzführung in der Schaltwarte .....	797
17.1.2	Transportnetzführung im liberalisierten Strom- markt, so genannte Systemführung .....	800
17.1.3	Netzreserve, Kapazitätsreserve und Sicherheits- bereitschaft .....	806
17.1.4	EMS-Funktionen .....	808
17.2	Netzführung in Verteilnetzen .....	812

17.3 Netzbereitstellung .....	817
<b>18. Berechnung von Netzen und Leitungen im stationären Betrieb .....</b>	<b>823</b>
18.1 Leistungsflussrechnung .....	824
18.1.1 Mathematisches Netzmodell mit Admittanzmatrix.....	825
18.1.1.1 Vierleiternetze (Netze mit Sternpunkt-leiter) .....	828
18.1.1.2 Dreileiter-Drehstromnetze.....	831
18.1.2 Hybridmatrix $\underline{H}$ .....	833
18.1.3 Impedanzmatrix .....	836
18.1.4 Berechnung der Knotenspannungen und Leitungsströme bei vorgegebenen Lastströmen ...	837
18.1.5 Berechnung der Knotenspannungen bei vorgegebenen Knotenleistungen .....	838
18.1.6 Behandlung unterschiedlicher Netzknöten ...	841
18.2 Varianten der Leistungsflussrechnung .....	843
18.2.1 Schnelle Leistungsflussrechnung .....	843
18.2.2 Optimale Leistungsflussrechnung .....	844
18.2.3 Probabilistische Leistungsflussrechnung .....	844
18.3 Manuelle Berechnung von Leitungsströmen in kleinen Netzen.....	845
18.3.1 Die an einem Ende belastete Leitung .....	846
18.3.2 Die mehrfach belastete Leitung .....	849
18.3.3 Die beidseitig gespeiste Leitung, gleiche Versorgungsspannung .....	852
18.3.4 Die beidseitig gespeiste Leitung bei unterschiedlichen Versorgungsspannungen .....	853
18.3.5 Vereinfachungen in der Berechnung .....	854
18.3.6 Berechnung der Stromverteilung in Netzen ...	855
18.3.6.1 Strahlennetze .....	855
18.3.6.2 Ringnetze.....	856
18.3.6.3 Maschennetze .....	857
<b>19. Kurzschlussstromberechnung .....</b>	<b>865</b>
19.1 Begriffswelt und Methodik der Kurzschlussstromberechnung .....	867
19.1.1 Berechnung des Anfangs-Kurzschlusswechselstroms $I''_k$ .....	868

19.1.2	Berechnung aus $I_k''$ abgeleiteter Kurzschlussstromgrößen .....	869
19.1.2.1	Stoßkurzschlussstrom $i_p$ .....	869
19.1.2.2	Ausschaltwechselstrom $I_b$ .....	870
19.1.2.3	Dauerkurzschlussstrom $I_k$ .....	870
19.1.2.4	Thermisch wirksamer Kurzschlussstrom $I_{th}$ .....	871
19.2	Der symmetrische Kurzschluss .....	871
19.2.1	Berechnung von $I_k''$ bei einfacher Generatorspeisung .....	872
19.2.2	Berechnung von $I_k''$ bei Netzeinspeisung .....	878
19.2.3	Berechnung von $I_k''$ bei mehrfacher Einspeisung .....	882
19.2.3.1	Das Verfahren der Ersatzspannungsquelle .....	882
19.2.3.2	Rechenbeispiel zum Verfahren der Ersatzspannungsquelle .....	884
19.3	Unsymmetrische Fehler .....	890
19.3.1	Berechnungsformeln für unsymmetrische Fehler .....	893
19.3.2	Berechnungsbeispiel „Unsymmetrische Kurzschlussströme“ .....	894
19.3.2.1	Aufstellen der Ersatzschaltbilder des Mit-, Gegen- und Nullsystems .....	895
19.3.3	Berechnung der Mit- und Gegenimpedanzen ..	896
19.3.4	Berechnung der Nullimpedanzen .....	896
19.3.5	Berechnung der finalen Impedanzen $Z_+$ , $Z_-$ und $Z_0$ .....	896
19.3.5.1	Einpoliger Kurzschluss .....	897
19.3.5.2	Zweipoliger Kurzschluss ohne Erdberührung .....	897
19.3.5.3	Zweipoliger Kurzschluss mit Erdberührung .....	898
19.4	Kurzschlussimpedanzen elektrischer Betriebsmittel ...	899
19.4.1	Generatoren .....	900
19.4.2	Netzeinspeisung .....	901
19.4.3	Transformatoren .....	902
19.4.4	Kraftwerksblöcke .....	903
19.4.5	Freileitungen und Kabel .....	904
19.4.6	Motoren .....	904
19.4.7	Sonstige Betriebsmittel .....	905

19.4.8	Übersicht der Betriebsmittelimpedanzen . . . . .	906
19.5	Kurzschlussstromberechnung mit bezogenen Größen ..	906
19.5.1	Das per-unit-Verfahren . . . . .	907
19.5.2	Das %/MVA-Verfahren . . . . .	908
19.6	Digitale Kurzschlussstromberechnung . . . . .	910
19.6.1	Berechnung des Anfangs-Kurzschlusswechselstroms $I_k''$ aus der Knotenadmittanzmatrix ...	910
<b>20.</b>	<b>Stabilität von Elektroenergiesystemen . . . . .</b>	<b>913</b>
20.1	Polradwinkelstabilität . . . . .	915
20.1.1	Leistungs-/Polradwinkelkurve . . . . .	916
20.1.2	Bewegungsgleichung eines Synchrongenerators	918
20.1.3	Kleinsignalstabilität . . . . .	922
20.1.3.1	Grafische Untersuchung der Kleinsignalstabilität . . . . .	923
20.1.3.2	Untersuchung der Kleinsignalstabilität mit Übertragungsfunktionen . . . . .	926
20.1.3.3	Methode der Zustandsvariablen . . . . .	928
20.1.4	Großsignalstabilität . . . . .	929
20.1.4.1	Numerische Integration des Bewegungsdifferenzialgleichungssystems . . . . .	930
20.1.4.2	Großsignalstabilität mit der Methode der Zustandsvariablen . . . . .	932
20.1.4.3	Ljapunov-Verfahren . . . . .	933
20.2	Spannungsstabilität . . . . .	942
20.3	Netzzusammenbrüche . . . . .	946
<b>21.</b>	<b>Wirtschaftliche Aspekte in Elektroenergiesystemen . . . . .</b>	<b>955</b>
21.1	Versorgungsqualität . . . . .	955
21.2	Strommarktliberalisierung . . . . .	959
21.3	Netzzugang im deutschen Strommarkt . . . . .	962
21.4	Stromhandel . . . . .	964
21.4.1	Großhandelsmärkte . . . . .	967
21.4.2	Regelleistungsmärkte . . . . .	967
21.4.3	Strommarkt 2.0 . . . . .	968
21.4.4	CO <sub>2</sub> -Emissionshandel . . . . .	970
21.4.5	Energy Trading . . . . .	971
21.5	Bilanzkreise und Bilanzierungsgebiete . . . . .	973
21.6	Stromkosten und Strompreise . . . . .	978
21.6.1	Kalkulation der Stromkosten . . . . .	979

21.6.1.1	Stromerzeugungskosten .....	980
21.6.1.2	Ermittlung von Netznutzungsentgelten	983
21.6.2	Kalkulation der Strompreise .....	985
21.6.3	Stromausfallkosten .....	988
21.7	Methoden zur Investitionsrechnung .....	990
21.8	Asset Management .....	993

## Anhang

<b>A.</b>	<b>Rechnen mit komplexen Größen</b> .....	1001
A.1	Komplexe Zeigerdarstellung .....	1001
A.1.1	Komplexe Darstellung von Zweipolen .....	1003
A.1.2	Zählpfeilsysteme .....	1004
A.1.3	Zeigerdiagramme .....	1006
A.1.4	Wechselstromleistung .....	1010
<b>B.</b>	<b>Rechnen in Drehstromsystemen</b> .....	1013
B.1	Begriffe und Größen in Drehstromsystemen .....	1013
B.1.1	Spannungen und Ströme in Drehstromnetzen .	1013
B.1.2	Spannungen und Ströme von Drehstromerzeugern und -verbrauchern .....	1015
B.2	Drehstromleistung elektrischer Betriebsmittel .....	1017
B.2.1	Drehstromverbraucher am Drehstromnetz ....	1019
B.2.2	Stern-Dreieck-Anlaufschaltung .....	1021
<b>C.</b>	<b>Rechnen mit bezogenen Größen</b> .....	1023
C.1	Referenzgrößen .....	1024
C.1.1	Bezogene Spannungen .....	1025
C.1.2	Bezogene Leistungen .....	1026
C.1.3	Bezogene Ströme .....	1026
C.1.4	Bezogene Impedanzen .....	1027
C.2	Rechnen mit pu-Größen .....	1029
<b>D.</b>	<b>Grundbegriffe magnetischer Wechselfelder</b> .....	1035
D.1	Induktionsgesetz, induzierte und selbstinduzierte Spannung .....	1035
D.1.1	Induzierte Spannung .....	1035
D.1.2	Selbstinduzierte Spannung .....	1038
D.2	Windungsfluss, Spulenfluss und Flussverkettung einer Wicklung .....	1038

D.3	Magnetische Streuung ( $X = X_h + X_\sigma$ ) .....	1041
<b>E.</b>	<b>Unsymmetrische Kurzschlussströme</b> .....	1043
E.1	Die Methode der symmetrischen Komponenten .....	1043
E.2	Berechnungsformeln für unsymmetrische Kurzschlussströme .....	1047
E.2.1	Berechnungsformel für einpolige Kurzschlussströme .....	1048
E.2.2	Berechnungsformel für zweipolige Kurzschlüsse ohne Erdberührung .....	1049
E.3	Berechnungsformel für zweipolige Kurzschlüsse mit Erdberührung .....	1052
<b>F.</b>	<b>Geräte Funktions-Codes nach ANSI C 37.2 (Auszug)</b> .....	1057
<b>G.</b>	<b>Lösung linearer und nichtlinearer Gleichungssysteme</b>	1059
G.1	Direkte Verfahren .....	1059
G.1.1	Gauß'sches Eliminationsverfahren .....	1060
G.1.2	Gauß-Jordan-Algorithmus .....	1064
G.1.3	Dreiecksfaktorisierung .....	1064
G.1.4	Optimal geordnete Dreiecksfaktorisierung ....	1068
G.2	Iterationsverfahren .....	1069
G.2.1	Stromiterationsverfahren .....	1069
G.2.1.1	Jacobi-Verfahren (Gesamtschrittverfahren) .....	1069
G.2.1.2	Gauß-Seidel-Verfahren (Einzelschrittverfahren) .....	1070
G.2.1.3	Newton-Raphson-Verfahren .....	1071
<b>H.</b>	<b>Methode der Zustandsvariablen</b> .....	1075
<b>I.</b>	<b>IEEE Code of Ethics</b> .....	1081
<b>Erratum</b>	.....	E1
<b>Erratum zu: Energieressourcen – Energieverbrauch</b>	...	E3
<b>Index</b>	.....	1085

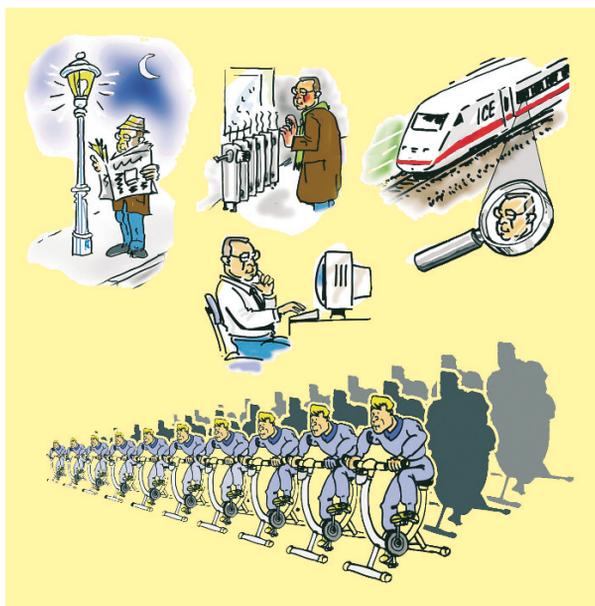
# 1. Elektrische Energie und Lebensstandard

Der Wohlstand einer Nation besitzt zwei Quellen. Man holt ihn entweder aus dem *Boden* oder man *produziert*. Beispiele für ersteres sind die erdöl-, erdgas-, diamanten-, gold- oder kohleexportierenden Länder, Beispiele für letzteres die so genannten Industrienationen. Ihre Industrien und Gewerbebetriebe erbringen sowohl mit klassischen als auch zunehmend mehr *wissensbasierten* Produkten und Dienstleistungen eine *Wertschöpfung*. Beispielsweise werden in Produktionsbetrieben Rohmaterialien ver- und bearbeitet, zu Produkten veredelt und für einen höheren Preis wieder verkauft. Der so geschaffene *Mehrwert* finanziert über die Unternehmensteuern, die Ausgaben des Beschaffungswesens sowie durch die Steuern und Ausgaben der Eigentümer, Lohn- und Gehaltsempfänger für ihren Lebensunterhalt alle anderen privaten und staatlichen Einrichtungen bzw. Dienstleister.

Grundlegende Voraussetzung für die *Produktion* und damit für den Lebensstandard einer Gesellschaft ist die ubiquitäre, hochzuverlässige Verfügbarkeit elektrischer Energie, insbesondere auch für die Versorgung ihrer Informationssysteme. Der Bedarf an elektrischer Energie wird im *Informationszeitalter* keineswegs dramatisch abnehmen. Energietechnische Prozesse werden durch informationstechnische Prozesse nicht ersetzt, sondern lediglich unterstützt. Der Stromverbrauch wird daher, bereinigt um Wirtschaftskrisen etc., langfristig weiter wachsen, wenn auch nicht mehr so schnell wie in früheren Jahrzehnten. Verursacher werden zusätzliche Privathaushalte, neue Einkaufszentren, neue Industrie- und Gewerbegebiete, Wärmepumpen, Klimaanlage, die Innovation des Elektroautos etc. sein.

Den meisten Endabnehmern bleibt die ungeheure Komplexität hinter der Steckdose verborgen. Es sind sich auch die wenigsten bewusst, in welchem Ausmaß die heutige Lebensqualität von der Verfügbarkeit

preiswerter elektrischer Energie abhängt. Der folgende Vergleich möge dies veranschaulichen: Ein athletischer Mensch könnte über einen Tag hinweg aus eigener Kraft eine Dauerleistung von etwa 30 Watt erbringen. Die derzeit installierte Leistung in Form konventioneller Kraftwerke und von Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien der Bundesrepublik beträgt ca. 250 GW. Pro Kopf der Bevölkerung werden damit ca. 3.000 Watt zusätzlich bereitgestellt. Das heißt, alle Einwohner der Bundesrepublik verfügen pro Kopf über 100 „Elektroenergiesklaven“, die ihnen das Leben so angenehm gestalten, wie wir es bei unserem heutigen Lebensstandard gewohnt sind, Bild 1.1.



**Bild 1.1.** Der Mensch und seine Elektroenergiesklaven (Hennies, Schnitzer, Schwab).

Diese Energiesklaven kümmern sich um die elektrische Beleuchtung in Wohnungen, Büros, Fabriken und auf öffentlichen Straßen. Sie ermöglichen den umfangreichen Bahnverkehr, halten Produktionsprozesse am Laufen, erwärmen elektrisch beheizte Wohneinheiten, betreiben Fernsehgeräte, Herde, Waschmaschinen, Klimaanlage und versorgen alle Informations- und Kommunikationssysteme mit Strom. Ohne sie wäre unsere heutige Lebensweise nicht denkbar. Stellte man obige Überle-