



Adolf J. Schwab

Elektro- energiesysteme

Erzeugung, Übertragung
und Verteilung elektrischer Energie
4., neu bearbeitete und erweiterte Auflage



 Springer Vieweg

Elektroenergiesysteme

Adolf J. Schwab

Elektroenergiesysteme

Erzeugung, Übertragung und Verteilung
elektrischer Energie

4., neu bearbeitete und erweiterte Auflage

Eine Einführung

Unter anfänglicher Mitwirkung von:

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

Adolf J. Schwab
Karlsruhe, Deutschland

ISBN 978-3-662-46855-5 ISBN 978-3-662-46856-2 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-46856-2

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-Berlin Verlag Heidelberg 2006, 2009, 2012, 2015

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften. Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Berlin Heidelberg ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media
(www.springer.com)

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 4. Auflage

Die große Nachfrage einer breiten Leserschaft sowie die rapide wachsende Nutzung Erneuerbarer Energien im Rahmen des Generationenprojekts *Energiewende* machten bereits nach kurzer Zeit wieder 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*. Die 4. Auflage hat damit eine gewisse Reife erreicht:

Die Stromerzeugung überwiegend aus Erneuerbaren Energien wird kommen, Dampf- und Gaskraftwerke werden mit rückläufiger Stromproduktion die Energiewende noch lange begleiten. 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 sich vermutlich als weniger robust erweisen als klassische Verteilnetze, die Strompreise werden 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 4. 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*, 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*, Dipl.-Ing. *Kathleen Hummel*, Dipl.-Ing. *Horst Janisch*, Dr.-Ing. *Klaus Kasper*, Dipl.-Ing. *Helge Lorenzen*, *Lennart Luckert*, Dipl.-Ing. *Ute Messmer*, Dipl.-Ing. *Mischa Nagel*, Dipl.-Ing. *Hendrick Neef*, Dipl.-Ing. *Rolf Neumaier*, Dr. *Thomas Niedrig*, Dipl.-Ing. *Sven Nossek*, R. *Pischinger*, M. Sc. *Robert Prophet*, Dipl.-Ing. *Yannick Rink*, Dipl.-Ing. *Matthias Roidl*, Dipl.-Ing. *Torsten Schmidt*, Dipl.-Ing. *Andreas Schoknecht*, Dipl.-Ing. *Christian Schorn*, Prof. Dr.-Ing. *Wolfgang Schröppel*, B. Sc. *Anna Schwabedal*, *Volker Siedentopp*, *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 das sorgfältige Korrekturlesen danke ich Herrn *Simon Brombacher*, für allzeit gewährte großzügige IT-Unterstützung den Herren Dipl.-Ing. *Geissler* und Dipl.-Ing. *Kahl*. Schließlich danke ich einmal mehr dem *Karlsruher Institut für Technologie*, KIT, dem Vizepräsidenten für Forschung und Information Prof. Dr.-Ing. *Detlef Löhe* 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. Frau *Ulrike Butz* vom Springer-Verlag gebührt mein Dank für die schnelle Drucklegung der Hard-Cover Version als auch für die Herausgabe der e-book Version (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 *ABB - Asea Brown Boveri AG* einen Teil der Druckkosten bezuschusst. Ihr gebührt großer Dank des Autors und künftiger Leserinnen und Leser.

Zum Wohl der Leser und Leserinnen einer 5. Auflage bittet der Verfasser um Rückmeldung etwaiger Fehler sowie um Anregungen zur Verbesserung dieses Buches an *a.schwab@kit.edu* oder *a.schwab@ieee.org*.

Karlsruhe, im Mai 2015

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 oder a.schwab@ieee.org.

Karlsruhe, im Frühjahr 2006

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

Inhaltsverzeichnis

1. Elektrische Energie und Lebensstandard	1
2. Elektroenergiesysteme, Verbundsysteme	11
2.1 Evolution der öffentlichen Stromversorgung	11
2.1.1 Liberalisierung des Strommarkts	15
2.1.2 Energiewende	21
2.2 Elektroenergiesysteme	30
2.3 Verbundsysteme	37
3. Energieressourcen – Energieverbrauch	49
3.1 Erzeugung und Verbrauch elektrischer Energie	49
3.2 Primärenergieressourcen	55
3.2.1 Erschöpfliche Ressourcen und ihr Verbrauch ..	58
3.2.2 Unerschöpfliche Ressourcen	66
3.2.3 Energiefluss	71
3.3 Klimawandel	73
3.4 Energieeffizienz	76
4. Stromerzeugung in Wärmekraftwerken	79
4.1 Thermodynamische Grundbegriffe	82
4.1.1 Dampfgehalt	83
4.1.2 Entropie, T(S)-Diagramm	85
4.1.3 Carnot-Prozess und thermischer Wirkungsgrad	88
4.1.4 Arbeitsfluid Wasser/Dampf im T(s)-Diagramm	91
4.1.5 Enthalpie, h(s)-Diagramm	93
4.2 Dampfkraftwerksprozess	97
4.2.1 Wärmeschaltbild, T(s)-Diagramm und Wirkungs-	97
grad	
4.2.2 Maßnahmen zur Erhöhung des Wirkungsgrads	100
4.2.2.1 Zwischenüberhitzung	101

4.2.2.2	Regenerative Speisewasservorwärmung	102
4.2.2.3	Kühlmitteltemperatur	104
4.2.2.4	Gesamtwirkungsgrad eines Kraftwerks	104
4.2.3	Exergetischer Wirkungsgrad	109
4.3	Dampfkraftwerkkomponenten	110
4.3.1	Dampferzeuger	111
4.3.1.1	Dampferzeugerbauarten	111
4.3.1.2	Feuerungen	116
4.3.1.3	Leistungsregelung bei Dampferzeugern	118
4.3.1.4	Rauchgasreinigung	120
4.3.2	Dampfturbinen	125
4.3.2.1	Bauarten	125
4.3.2.2	Leistungsregelung von Dampfturbinen	131
4.3.3	Kondensator, Kühleinrichtungen	134
4.3.3.1	Kondensator	134
4.3.3.2	Kühlarten	136
4.3.3.3	Abwärmenutzung	138
4.4	Leistungsregelung in Dampfkraftwerken	140
4.4.1	Festdruckbetrieb	140
4.4.2	Gleitdruckbetrieb	141
4.4.3	Modifizierter Gleitdruckbetrieb	142
4.4.4	Vergleichende Betrachtung	143
4.5	Gasturbinenkraftwerke	144
4.6	Kombinierte Gas- und Dampfkraftwerke (GuD)	150
4.7	Kraft-Wärme-Kopplung	153
4.7.1	Kraft-Wärme-Kopplung in der Industrie	153
4.7.2	Kraft-Wärme-Kopplung in der öffentlichen Stromversorgung	155
5.	Stromerzeugung in Kernkraftwerken	159
5.1	Kernenergie	162
5.1.1	Kernfusion	163
5.1.2	Kernfission (Kernspaltung)	166
5.1.3	Nachzerfallswärme	177
5.1.4	Brennstoffkreislauf	181
5.2	Druckwasserreaktoren (DWR)	185
5.3	Siedewasserreaktoren (SWR)	188
5.4	Gasgekühlte Reaktoren	190
5.5	Brutreaktoren	192

5.6	Kernkraftwerke der Generation IV	195
5.7	Leistungsregelung von Kernreaktoren	196
5.7.1	Leistungsregelung von Druckwasserreaktoren..	199
5.7.2	Leistungsregelung von Siedewasserreaktoren ..	201
5.7.3	Leistungsregelung von gasgekühlten Reaktoren	202
5.7.4	Leistungsregelung von natriumgekühlten Reak- toren	202
5.7.5	Bereitstellung von Regelenergie durch Kernkraft- werke	203
6.	Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien.....	207
6.1	Wasserkraftwerke	208
6.1.1	Laufwasserkraftwerke	209
6.1.2	Speicherkraftwerke	210
6.1.3	Pumpspeicherkraftwerke	212
6.1.4	Gezeitenkraftwerke	214
6.1.5	Turbinentypen	216
6.1.5.1	Kaplan-Turbine	217
6.1.5.2	Francis-Turbine.....	218
6.1.5.3	Pelton-Turbine	219
6.1.6	Leistungsregelung	220
6.2	Windkraftanlagen	222
6.2.1	Mechanische Leistung.....	223
6.2.2	Generatorkonzepte	224
6.2.3	Leistungsregelung von Windturbinen	226
6.2.4	Einbindung von Windkraftanlagen in die Netze der öffentlichen Stromversorgung	228
6.2.5	Stand der Technik und Ausblick.....	229
6.3	Solarenergieanlagen.....	234
6.3.1	Direkte Nutzung der Solarenergie	237
6.3.1.1	Photovoltaik-Anlagen	237
6.3.1.2	Solarthermische Anlagen.....	244
6.4	Biomasse - Kraftwerke	248
6.5	Geothermische Stromerzeugung	251
6.6	Brennstoffzellen	254
6.7	Virtuelle Kraftwerke	256
6.8	Speicher elektrischer Energie.....	257
6.8.1	Kurzzeitspeicher	259
6.8.1.1	Pumpspeicherkraftwerke	259