
Analyse und Optimierung von Energieverbundsystemen

Wolfgang Schellong

Analyse und Optimierung von Energieverbundsystemen

Wolfgang Schellong
Technische Hochschule Köln
Köln
Deutschland

ISBN 978-3-662-48527-9 ISBN 978-3-662-49463-9 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-49463-9

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 Berlin Heidelberg 2016

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)

Vorwort

Der überwiegende Teil des erzeugten Stroms in Deutschland wird gegenwärtig zentral in Großkraftwerken bereitgestellt, während die Stromabgabe vorwiegend dezentral in kommunalen Versorgungssystemen erfolgt. Durch die verstärkte Nutzung regenerativer Energiequellen und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung wird sich die Struktur der künftigen Energieversorgung zugunsten einer dezentralen Stromerzeugung verschieben. Wenn zukünftig die erneuerbaren Energien die Grundlage der Energieversorgung bilden, so müssen sie durch hocheffiziente Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen und für eine Zeit des Übergangs durch konventionelle, aber schnell regelfähige Kraftwerke ergänzt werden. Um die fluktuierende Einspeisung erneuerbarer Energien optimal in die Stromversorgung zu integrieren, werden verschiedene dezentrale Erzeugungs- und Speichertechnologien sowie virtuelle Kraftwerke und Hybridkraftwerke zunehmend an Bedeutung gewinnen. Daraus folgt, dass der Anteil der kommunalen Unternehmen an der Energieversorgung künftig stark wachsen wird.

Vor dem Hintergrund eines steigenden Wettbewerbsdrucks müssen kommunale Energieversorger fossile Brennstoffe in ihren Anlagen möglichst effizient nutzen und regenerative Energien zunehmend in ihr Verbundsystem integrieren. Im Spannungsfeld zwischen Versorgungssicherheit, Klimaschutz und Wirtschaftlichkeit ist es notwendig, komplexe Energiesysteme umfassend zu analysieren, um einen optimalen Betrieb zu gewährleisten. Das interdisziplinär angelegte Buch verbindet die hierfür notwendigen Kenntnisse aus den Bereichen der Energiewirtschaft und -technik mit anwendungsorientierten mathematischen und informationstechnischen Methoden.

In einem Energieverbundsystem sind mehrere Energieerzeuger in einem System zusammengeschlossen. Verbundsysteme integrieren verschiedene Erzeugungstechnologien in einer dezentralen Struktur und verfügen im Allgemeinen über mehrere Versorgungsnetze. Ein Energiemanagementsystem umfasst die Hard- und Softwarekomponenten zur Analyse, Planung und Optimierung der im Verbund zusammengeschlossenen Anlagen. Das Energiecontrolling stellt ein Teilsystem des Energiemanagements dar. Das Controlling besitzt eine Schlüsselfunktion für eine kostengünstige Energiebeschaffung und für den effizienten Energieeinsatz. Es beschäftigt sich mit dem Erfassen aller energierelevanten Daten und der Aufbereitung der gewonnenen Informationen, sodass Entscheidungen getroffen werden können, deren Ziel letztlich die Senkung des Primärenergieverbrauchs

und der Energiekosten ist. Zur Verbesserung der Energieeffizienz von Systemen und Prozessen sind vielfältige Informationen über die Bereitstellung, den Einsatz und den Verbrauch verschiedener Energieformen erforderlich, aus denen messbare Indikatoren für die energetische Bewertung abzuleiten sind. Die notwendigen Informationen werden in einem Energieinformationssystem zusammengefasst, das alle Daten für die komplexen Aufgaben des Energiemanagements bereitstellt. Die Verarbeitung aller energierelevanten Daten erfolgt mithilfe eines Systems für das Energiedatenmanagement. Es hat die Aufgabe, die Messwerte zu erfassen und nach unterschiedlichen Kriterien zu prüfen, sodass die aufbereiteten Daten möglichst fehlerfrei in einer Datenbank gespeichert werden können.

Unter einem Querverbund in der Energiewirtschaft versteht man die spartenübergreifende Versorgung von Verbrauchern mit unterschiedlichen Energieformen. Charakteristisch für ein Querverbundsystem ist die gegenseitige Beeinflussung der verschiedenen Energiesparten. Dies wird besonders deutlich bei Anlagen der Kraft-Wärme-Kopplung, die eine dominierende Rolle bei der Energieversorgung in kommunalen Unternehmen spielt. Zur Gewährleistung des kostengünstigen und klimafreundlichen Betriebs eines kommunalen Energieversorgungssystems sind vielfältige Optimierungsaufgaben zu lösen. Dazu gehören die folgenden Handlungsfelder: Optimierung des Bezugs von Brenn- und Hilfsstoffen, Portfoliomanagement (Strom- und Gashandel), Optimierung der Verbundfahrweise unter wirtschaftlichen und ökologischen Gesichtspunkten.

Die Strategie für den Einsatz fossiler Kraftwerke, erneuerbarer Energien und Speicher im Verbund hat einen erheblichen Einfluss auf deren Wirtschaftlichkeit. Die Fahrweiseoptimierung führt nicht nur zu maximalen Erträgen, sondern wirkt sich darüber hinaus positiv auf die Stabilität des Energiesystems aus. Der Kraftwerkseinsatzplanung werden in der praktischen Anwendung unterschiedliche Optimierungsmodelle zugrunde gelegt. Aus den getroffenen Modellannahmen resultieren die Klassifizierungsmerkmale für die Lösungsansätze zur mathematischen Optimierung.

Die Struktur des Buches folgt dem typischen Projektablauf zur Entwicklung von Energiemanagementsystemen. In der Abb. 1 werden die Komponenten eines solchen Systems für einen Energieverbund und die zugehörigen Buchkapitel dargestellt.

Das Kap. 1 beschreibt die Herausforderungen für die künftige Energieversorgung, die sich aus der Energiewende ergeben. Die notwendigen energetischen Grundlagen für die Analyse und Optimierung von Energiesystemen werden im Kap. 2 zusammengefasst. Die Komponenten und Technologien von Verbundsystemen sind Gegenstand des Kap. 3. Das Kap. 4 beschreibt die mathematischen Methoden zur Modellierung und Analyse der im Verbund enthaltenen Energiesysteme. Neben dem technischen Erzeugungsmodell müssen für das Energiemanagement auch die energiewirtschaftlichen Verflechtungen (Portfoliomanagement, Energiehandel) berücksichtigt werden, die in den Kap. 1 und 9 behandelt werden. Das Kap. 5 analysiert den Aufbau und die Aufgaben eines Energieinformationssystems, das die Datengrundlagen für alle Komponenten des Energiemanagements bereitstellt. Im Kap. 6 werden die Aufgaben des Energiecontrollings beschrieben und am Beispiel eines kommunalen Verbundsystems erläutert. Zur Planung des Betriebs der Erzeugungsanlagen sind Kenntnisse über den Energiebedarf des Versorgungsgebiets not-

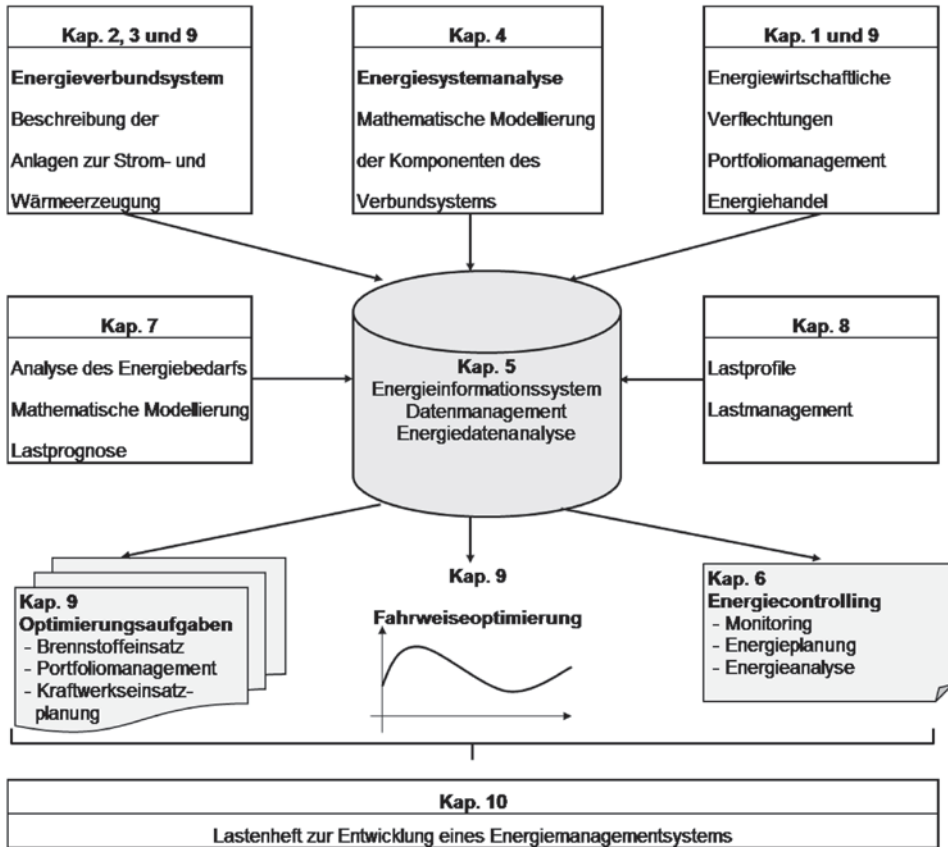


Abb. 1 Struktur und Gliederung des Buches

wendig. Das Kap. 7 gibt einen Überblick über mathematische Methoden zur Analyse und Prognose des Energiebedarfs. Es wird gezeigt, wie diese Methoden zur Prognose der Stromlast und des Wärmebedarfs von Fernwärmesystemen genutzt werden. Das Kap. 8 stellt Strategien des Lastmanagements auf der Basis von Lastprofilen vor. Aufbauend auf den Erkenntnissen der Energieanalyse werden im Kap. 9 Optimierungsaufgaben für Verbundsysteme abgeleitet und Lösungsansätze für die mathematische Optimierung dargestellt. Das Buch wird mit dem Kap. 10 durch eine zusammenfassende Beschreibung der Anforderungen für die Softwareentwicklung eines Energiemanagementsystems abgerundet. Einige im Buch vorkommende Redundanzen sind beabsichtigt und dienen dem besseren Verständnis des jeweiligen Kapitels.

Die Idee für dieses Buch resultiert aus verschiedenen Lehrveranstaltungen, die ich zum Thema Energiemanagement für Studierende der Fachrichtung Elektrotechnik an der Technischen Hochschule Köln konzipiert habe. Dabei sind Erfahrungen eingeflossen, die ich in der Praxis bei der Entwicklung von Informationssystemen zum Energiemanagement für kommunale Energieversorger sammeln konnte. Das Buch trägt dem interdisziplinären

Charakter dieser Ingenieuraufgabe Rechnung. Es vermittelt Studierenden und Praktikern in der Energiewirtschaft eine umfassende und systematische Darstellung der notwendigen Schritte für die Analyse und Optimierung von Energieverbundsystemen.

Ich danke Frau Eva Hestermann-Beyerle und Frau Birgit Kollmar-Thoni vom Springer-Verlag für die professionelle Begleitung dieses Buchprojekts. Bei der technischen Gestaltung der Abbildungen haben mir Herr Tristan Heiden und Herr Peter Gurka sehr geholfen. Mein besonderer Dank gilt meiner Frau Sigrid, die mich tatkräftig beim Schreiben dieses Buches unterstützt hat.

Köln, Oktober 2015

Wolfgang Schellong

Inhaltsverzeichnis

1 Herausforderungen der künftigen Energieversorgung	1
1.1 Ressourcen und Klimawandel	1
1.2 Indikatoren der Energieeffizienz	5
1.3 Ziele und Handlungsfelder der Energiewende	8
1.3.1 Ziele der Energiewende in Deutschland	8
1.3.2 Handlungsfelder der Energiewende	11
1.4 Strukturwandel in der Energieversorgung	17
1.4.1 Energiemarkt	17
1.4.2 Rechtliche Rahmenbedingungen	22
1.4.3 Kommunale Energieversorgungssysteme	28
1.5 Zusammenfassung	30
Literatur	31
2 Energetische Grundlagen	33
2.1 Energiewandlung	33
2.1.1 Energiebegriff	33
2.1.2 Energieumwandlung	36
2.2 Thermische Energie	43
2.2.1 Zustandsgrößen	43
2.2.2 Wärmeübertragung	47
2.2.3 Wasserdampf	50
2.3 Elektrische Energie	52
2.4 Energetische Kennwerte	57
2.5 Zusammenfassung	63
Literatur	65
3 Energieverbundsysteme	67
3.1 Energie im Querverbund	67
3.2 Konventionelle Energiesysteme	73
3.2.1 Klassifizierung	73
3.2.2 Dampfkraftwerke	75
3.2.3 Gasturbinenkraftwerke	86

3.3	Kraft-Wärme-Kopplung	87
3.3.1	Technologien der Kraft-Wärme-Kopplung	87
3.3.2	Energetische Kennzahlen der Kraft-Wärme-Kopplung	90
3.3.3	Kraft-Wärme-Kopplung in Dampfkraftwerken	93
3.3.4	Kombinationskraftwerke	98
3.3.5	Blockheizkraftwerke	101
3.3.6	Brennstoffzellen	109
3.3.7	Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung	112
3.4	Ausgewählte regenerative Energiesysteme	116
3.4.1	Fotovoltaik	116
3.4.2	Solarthermie	118
3.4.3	Wärmepumpen	121
3.4.4	Nutzung von Biomasse	124
3.5	Energiespeicher	125
3.5.1	Klassifizierung	125
3.5.2	Wärmespeicher	127
3.5.3	Auslegung und Kennwerte von Energiespeichern	130
3.6	Virtuelle Kraftwerke	133
3.6.1	Aufbau und Funktionen	133
3.6.2	Energiemanagement	137
3.7	Zusammenfassung	140
	Literatur	143
4	Energiesystemanalyse	145
4.1	Systemanalyse	145
4.1.1	Ziele und Aufgaben	145
4.1.2	Simulationsaufgaben für ausgewählte Energiesysteme	147
4.2	Mathematische Modellierung	156
4.2.1	Modellbildung	156
4.2.2	Problemanalyse und Systementwicklung	165
4.2.3	Modellvalidierung	171
4.3	Regressionsanalyse	173
4.3.1	Regressionsmodelle	173
4.3.2	Parameterschätzung	178
4.3.3	Statistische Analyse	185
4.3.4	Regressionsanalyse von Energiesystemen	192
4.4	Künstliche neuronale Netze	196
4.4.1	Konstruktion eines neuronalen Netzes	196
4.4.2	Lernverfahren	201
4.4.3	Simulation auf der Basis neuronaler Netze	203
4.5	Zusammenfassung	205
	Literatur	208

5	Energiedatenmanagement	209
5.1	Energieinformationssysteme	209
5.1.1	Aufbau und Funktionen	209
5.1.2	Hard- und Softwarevoraussetzungen	215
5.2	Datenmanagement	219
5.2.1	Messkonzept	219
5.2.2	Datenverarbeitung	223
5.2.3	Datenprüfung	225
5.2.4	Analyse von Messfehlern	227
5.3	Energiedatenanalyse	231
5.4	Smart Metering	234
5.4.1	Smart Meter	234
5.4.2	Management von Zählerdaten	239
5.4.3	Virtueller Energiemarktplatz	241
5.5	Zusammenfassung	243
	Literatur	245
6	Energiecontrolling	247
6.1	Energiecontrollingsysteme	247
6.2	Funktionen des Energiecontrollings	251
6.2.1	Energieplanung	251
6.2.2	Monitoring	255
6.2.3	Energieanalyse	258
6.3	Wirtschaftlichkeitsrechnung	268
6.3.1	Grundlagen	268
6.3.2	Annuitätenmethode	271
6.3.3	Wirtschaftlichkeitsrechnung zur BHKW-Planung	278
6.4	Kostenaufteilung der Kraft-Wärme-Kopplung	288
6.4.1	Thermodynamische Kennzahlen	288
6.4.2	Verfahren zur Kostenaufteilung der Kraft-Wärme-Kopplung	291
6.5	Energiecontrollingsystem für einen kommunalen Kraftwerksverbund	293
6.5.1	Verbundsystem	293
6.5.2	Kraftwerksbericht	299
6.5.3	Analyse des Kraftwerksbetriebs	303
6.6	Zusammenfassung	312
	Literatur	315
7	Analyse und Modellierung des Energiebedarfs	317
7.1	Analyse der Einflussfaktoren auf den Energiebedarf	317
7.1.1	Motivation	317
7.1.2	Einflussfaktoren	322
7.2	Mathematische Modellierung	327

7.2.1	Lastprognoseverfahren	327
7.2.2	Datenanalyse	333
7.2.3	Statistische Analyse	337
7.3	Regressionsanalyse des Energiebedarfs	339
7.3.1	Regressionsmodelle für den Energiebedarf	339
7.3.2	Modelle für den Wärmebedarf	342
7.3.3	Modelle für den Strombedarf	349
7.4	Lastprognose mit neuronalen Netzen	352
7.4.1	Prognosemodell	352
7.4.2	Stromlastprognose	355
7.4.3	Wärmelastprognose	358
7.5	Wärmebedarfsprognose für ein Fernwärmesystem	360
7.5.1	Modellentwurf	360
7.5.2	Regressionsmodell für den Wärmebedarf	365
7.6	Gasbedarfsprognose	368
7.7	Zusammenfassung	371
	Literatur	373
8	Lastprofile und Lastmanagement	375
8.1	Lastprofile in der Energieversorgung	375
8.2	Standardlastprofile	379
8.2.1	Strombedarfsprofile	379
8.2.2	Wärmebedarfsprofile	387
8.3	Synthetische Lastprofile	392
8.3.1	Lastprofilverfahren	392
8.3.2	Synthetisches Stromlastprofil	396
8.3.3	Simulation des Energiebedarfs mithilfe von Lastprofilen	398
8.4	Lastmanagement	401
8.4.1	Strategien	401
8.4.2	Demand-Side-Management	404
8.4.3	Demand Response Management	412
8.5	Zusammenfassung	414
	Literatur	416
9	Optimierung von Verbundsystemen	419
9.1	Mathematische Optimierungsmethoden	419
9.1.1	Optimierungsaufgaben in der Energiewirtschaft	419
9.1.2	Allgemeines Optimierungsmodell	422
9.1.3	Mathematische Optimierungsverfahren	427
9.1.4	Optimierungstools	438
9.2	Lineare Optimierung	439
9.2.1	Lineares Optimierungsmodell	439

9.2.2	Geometrische Interpretation	446
9.2.3	Simplex-Verfahren	448
9.3	Querverbundoptimierung	454
9.3.1	Querverbundunternehmen	454
9.3.2	Planungsaufgaben	457
9.4	Kraftwerkseinsatzplanung	471
9.4.1	Kraftwerkseinsatz nach dem Merit-Order-Prinzip	471
9.4.2	Kraftwerkseinsatz in Querverbundunternehmen	476
9.4.3	Mathematische Modellierung	481
9.4.4	Lösungsansätze für die mathematische Optimierung	486
9.5	Zusammenfassung	490
	Literatur	493
10	Energiemanagementsysteme	495
10.1	Aufbau und Funktionen	495
10.1.1	Die internationale Norm DIN EN 50001	495
10.1.2	Funktionen von Energiemanagementsystemen	505
10.2	Lastenheft für die Entwicklung von Energiemanagementsystemen	508
10.2.1	Anforderungen an die Softwareentwicklung	508
10.2.2	Hardwarevoraussetzungen	513
10.3	Zusammenfassung	516
	Literatur	517
11	Lösungen zu den Übungsaufgaben	519
	Sachverzeichnis	543