
Regenerative Energiesysteme

Holger Watter

Regenerative Energiesysteme

Grundlagen, Systemtechnik und Analysen
ausgeführter Beispiele nachhaltiger
Energiesysteme

5. Auflage

 Springer Vieweg

Holger Watter
Tarp, Deutschland

Ergänzendes Material zu diesem Buch finden Sie auf <http://www.springer.com>.

ISBN 978-3-658-23487-4

ISBN 978-3-658-23488-1 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-658-23488-1>

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 Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2009, 2011, 2013, 2015, 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.

Verantwortlich im Verlag: Thomas Zipsner

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Vorwort

Die „erneuerbaren Energien“ und „nachhaltigen Energiesysteme“ stehen wegen der Klimadebatte im Mittelpunkt der gesellschaftlichen Diskussion. Politisch werden Rahmenbedingungen definiert; in der Wirtschaft und im Privaten sucht man nach Wegen zur Minimierung der Energiekosten. Im Internet und in den Medien werden Lösungsvorschläge diskutiert und propagiert. Der „einfache Verbraucher“ ist mit der Beurteilung überfordert und muss den „Heilsversprechungen der Alchimisten der Moderne“ mehr oder minder glauben. Ist die betriebswirtschaftliche Beurteilung auf der Grundlage von Erfahrungswerten vielleicht gerade noch möglich; bei der klimarelevanten CO₂-Bilanz wird das Projekt dann oft zur „Glaubensfrage“.

Ziel dieses Buches ist es,

- die wesentlichen Funktionsmechanismen darzustellen,
- Einflussparameter, Stell- und Störgrößen zu erläutern und
- Potentiale und Begrenzungen durch Überschlagsrechnungen aufzuzeichnen.

Es wendet sich an Studierende in den Bachelor- und Masterstudiengängen mit den Schwerpunkten *erneuerbare Energie, nachhaltige und regenerative Energiesysteme* an Universitäten, Technischen Hochschulen und Fachhochschulen sowie an Fachberater (in Banken, bei der Presse und in der Politik), die die o. g. Zusammenhänge ihrer Zielgruppe anschaulich erläutern wollen. Gleichzeitig gibt es einen aktuellen Überblick zum Stand der Technik und zu den möglichen Potentialen. Dabei liegt der Schwerpunkt auf kleineren, dezentralen Anlagen; großtechnische Anlagen werden nur der Vollständigkeit halber angesprochen.

Ausgehend von einer sehr persönlichen Perspektive (Was kann ich selber tun?) werden zunächst die Lösungsvorschläge für die Gebäudetechnik erörtert (Photovoltaik, Solarthermie, Erdwärme und Wärmepumpe). Anschließend werden industrielle Lösungsvorschläge aus dem Anlagenbau vorgestellt. Hier sind die finanziellen Möglichkeiten von Privatpersonen erschöpft und es müssen betriebswirtschaftliche und kostendeckende Geschäftsmodelle (im Regelfall finanziert durch Banken oder Investoren) gefunden sowie aufwendige Genehmigungsverfahren überstanden werden. Daher werden im Anhang die Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsrechnung kurz zusammengefasst.

Dabei wird versucht, Prognosemöglichkeiten anhand von handelsüblichen Anlagen exemplarisch zu bearbeiten. Es werden jeweils Beispielanlagen aus dem täglichen Alltag vorgestellt und im Rahmen von Übungen analysiert. Dabei ist ausdrücklich zu beachten, dass die Schlussfolgerungen wegen des exemplarischen Charakters grundsätzlich nicht verallgemeinert werden können. Es soll jedoch gezeigt werden, dass mit verhältnismäßig kleinem Aufwand recht gute Prognosewerkzeuge bereitgestellt werden können.

Der Verlag Springer Vieweg hält auf seinen Web-Seiten www.springer.com zu diesem Buch einen Großteil der Berechnungsprogramme und Datensätze zum Nachrechnen als Download zur Verfügung. Der Autor ist hier für Ergänzungen dankbar.

Das Buch möge auch als Beitrag verstanden werden, nicht alle Heilsversprechungen aus dem Internet kritiklos zu übernehmen, sondern von Zeit zu Zeit auch auf das eigene Denkvermögen zu vertrauen!

Die überarbeitete und korrigierte 5. Auflage enthält aktualisierte

- *volkswirtschaftlichen Energie- und Leistungsdaten der verschiedenen Energiesektoren,*
- *neue Abbildungen zu Aufbau und Funktion von Wasserturbinen,*
- *eine Berechnungsmethode zur Abschätzung der adiabaten Temperatur für die thermochemische Umwandlung,*
- *Beschreibungen zu aktuellen Projektbeispielen für „Power-to-Gas“ und „Power-to-Liquid“ sowie*
- *eine Einführung in die Grundlagen des Projektmanagements im Energiesektor.*

Danksagung

Der Autor bedankt sich bei den Fachkollegen der *Hochschule für Angewandte Wissenschaften (HAW) Hamburg*, der *Hochschule Flensburg* und den Firmenvertretern für die fachliche Beratung und kollegiale Unterstützung dieses Projektes:

- *Prof. Dr. rer. nat. Bernd Baumann,*
- *Dr. Rolf Bayerbach (Pytec GmbH),*
- *Dr. Dietmar Bendix (Bioenergy Systems GmbH/FH Merseburg und Jena),*
- *Prof. Dr.-Ing. Christian Blome*
- *Prof. Dr. Jens Born*
- *Prof. Dr.-Ing. Jürgen Bosselmann (Hochschule 21, Buxtehude)*
- *Anders Fonager Christensen, PROkultur ProjektService*
- *Prof. Dr.-Ing. Heike Frischgesell,*
- *Prof. Dr. Victor Gheorghiu,*
- *Dr.-Ing. Jens-Uwe Jendrossek (DIN NSMT),*
- *Prof. Dr. Timon Kampschulte,*
- *Prof. Dr.-Ing. Jochen Koeppen,*
- *Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Moré,*
- *Dipl.-Ing. Siegfried Prust,*
- *Prof. Dr. Paul A. Scherer,*
- *Prof. Dr.-Ing. Bernd Sankol,*
- *Prof. Dr.-Ing. Ilja Tuschy*
- *Prof. Dr.-Ing. Thomas Veaser,*
- *Prof. Dr.-Ing. Franz Vinnemeier,*
- *Prof. Dr.-Ing. Dirk Volta, Hochschule Flensburg*
- *Prof. Dr. tech. Wolfgang Winkler,*
- *Prof. Dr. Thomas Willner.*
- *Dr.-Ing. Gerd Würsig (Germanischer Lloyd AG)*
- *„Last but not least“ bei den Studierenden für die Verbesserungs- und Korrekturvorschläge zur 3. Auflage.*

Bei dem Lektorat Maschinenbau von *Springer Vieweg*, namentlich

- Frau *Imke Zander* und
- Herrn *Dipl.-Ing. Thomas Zipsner*,

bedanke ich mich für die Initiative zu diesem Buch und die vertrauensvolle, gute Zusammenarbeit.

Tarp, Oktober 2018

Holger Watter

Formelzeichen und Abkürzungen

a	Jahr („anno“); p.a. = pro anno = pro Jahr	
A	Fläche	[m ²]
c	Absolutgeschwindigkeit	[m/s]
c	Konzentration, Stoffmengenkonzentration	[mol/kg, mol/Ltr]
c_A	Auftriebsbeiwert	[-]
c_p	spez. Wärmekapazität	[kJ/kg K]
c_P	Leistungsbeiwert	[-]
c_W	Widerstandsbeiwert	[-]
C	Kohlenstoff	
d	Tag („day“); p. d. = per day = pro Tag	
E	Energie = Arbeitsvermögen W	[Ws ~ kWh]
F	Kraft	[N=kg · m/s ²]
F	Fluor	
FF	Füllfaktor	[-]
G	frei Enthalpie, GIBBSche Energie	[kJ/kg]
\dot{G}_G	Globalstrahlung	[W]
\dot{G}_{Dir}	Direktstrahlung	[W]
\dot{G}_{Diff}	Diffusstrahlung	[W]
h	spez. Enthalpie	[kJ/kg]
H	Enthalpie	[kJ]
H	Fall- oder Förderhöhe	[m]
H	Wasserstoff	
H_U	(unterer) Heizwert	[kJ/kg]
H_O	Brennwert (oberer Heizwert)	[kJ/kg]
I	Strom	[A]
I	Turbulenzintensität	[%]
K	Gleichgewichts-/Massenwirkungskonstante	[-]
k	Wärmedurchgangskoeffizient	[W/m ² K]
l_{min}	Mindestluftbedarf	[m ³ /kg]
m	Masse	[kg]
\dot{m}	Massenstrom	[kg/s]
M	Molare Masse	[kg/kmol]
M	Drehmoment	[Nm]
MPP	Maximum Power Point (Peak-Leistung)	[W]
Nu	NUSELT-Zahl	[-]
NN	Normal Null	[m]
n	stöchiometrische Umsatzzahl, Stoff-/Substanzmenge	[mol]
n	Drehzahl	[1/min]
n_q	spez. Drehzahl	[1/min]
o_{min}	Mindestsauerstoffbedarf	[m ³ /kg]
p	Druck	[bar]

P	Leistung	[W]
Pr	PRANDTL-Zahl	[-]
Q	Wärmemenge	[J = Ws ~ kWh]
\dot{Q}	Wärmestrom	[W]
r	Verdampfungsenthalpie ($r = h'' - h'$)	[kJ/kg]
R	Abkürzung für Kältemittel (Refrigerant)	
R	spez. Gaskonstante	[J/kg K]
\mathfrak{R}	allg. Gaskonstante	8,314 kJ/kmol K
Re	REYNOLDS-Zahl	[-]
S	Entropie	[kJ/K]
s	spez. Entropie	[kJ/kg K]
T	Temperatur	[K]
u	Umfangs- bzw. Drehgeschwindigkeit	[m/s]
u	spez. innere Energie	[kJ/kg]
U	innere Energie	[kJ]
U	Spannung	[V]
\dot{V}	Volumenstrom	[m ³ /s; Ltr/Min]
w	Relativgeschwindigkeit	[m/s]
W	Arbeit	[Ws ~ kWh]
Y	spez. Stutzenarbeit	[Nm/kg = W/(kg/s)]
y	Mol- bzw. Volumenanteil	[-]
α	Absorptionsgrad	[-]
β	Formparameter der WEIBULL-Verteilung	[-]
ε	Emissionsgrad	[-]
ε	Gleitzahl	[-]
ε	Leistungszahl, COP	[-]
η	Wirkungsgrad	[-]
φ	Durchflusszahl	[-]
Φ	Summenhäufigkeit der WEIBULL-Verteilung	[-]
κ	Isentropenexponent	[-]
λ	Verbrennungsluftverhältnis	[-]
λ	Wärmeleitfähigkeit	[W/m K]
λ	Laufzahl	[-]
ν	Mittelwert	
ρ	Reflexionsgrad	[-]
ρ	Dichte	[kg/m ³]
σ	Schnellläufigkeit / Laufzahl	[-]
σ	Standardabweichung	[%]
τ	Zeit	[s]
τ	Transmissionsgrad	[-]
ω	Winkelgeschwindigkeit	[1/s]
ψ	Druckzahl	[-]
ψ	Molverhältnis (Volumenanteil, Partialdruckverhältnis)	[-]
∞	unendlich	
ξ	Massenanteil	[-]

BJT	Bipolar Junction Transistor (Bipolartransistor)
CAES	Compressed Air Energy Storage
CCS	Carbon Dioxide Capture and Storage
COP	Coefficient of Performance (Leistungszahl)
CPOX	Catalytic Partial Oxidation
DISS	Direct Solar Steam
DME	Dimethylether
DMFC	Direktmethanolbrennstoffzelle (Direct Methanol Fuel Cell)
DoS	Markenverfahren zur Direktverflüssigung von Biomasse
EC	Electronically Commutated (Elektromotor)
EnEV	Energieeinsparverordnung
FAME	Fettsäuremethylester
FCKW	Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe (Kältemittel)
FET	Feldeffekttransistor
FOS	flüchtige organische Säuren
GuD	kombinierte Gas- und Dampfturbinenkraftwerke
GWP	Global Warming Potential (Treibhauspotential)
HDR	Hot-Dry-Rock-Verfahren (petrothermale Geothermie)
HFC	chlorfreie Kohlenwasserstoffe
HFR	Hot Fracture Rock
ISCCS	Integrated Solar and Combined Cycle System (Solarkraftwerk)
IGCC	Integrated Gasification Combined Cycle
IGBT	Insulated-Gate Bipolar Transistor
IT-SOFC	Intermediate Temperature SOFC
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell (Schmelzkarbonatbrennstoffzelle)
MOSFET	Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransformator (FET)
MTBE	Methyltertiärbutylether
MTG	Methanol to Gasoline
MZ	Methanzahl (Zündeigenschaften)
NDDV	Katalytischer Niederdruck-Direktverflüssigung
NP	Netzplan
ODP	Ozone Depletion Potential (Ozon-Abbau-Potential)
ORC	Organic-Rankine-Cycle
OTEC	Ocean Thermal Energy Conversion
OZ	Ortszeit
oTS	organische Trockensubstanz
OWC	oscillating water column (Wellenkraftwerk)
PAFC	Phosphorsäurebrennstoffzelle (Phosphoric Acid Fuel Cell)
PAK	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
PEFC	Polymer Electrolyte Fuel Cell = PEM
PEM	Proton Exchange Membrane Fuel Cell = PEFC

PROX	Katalytische, präferenzielle Oxidation
PSA	Druckwechsel-Adsorption (Pressure Swing Adsorption)
PSP	Projekt-Struktur-Plan
PtG	Power to Gas
PtL	Power to Liquid
PWM	Pulseweitenmodulation
REFOS	Solar-hybrid volumetric pressurized receiver for solar assisted fossil-fired gas turbine and combined cycle power system (Solarkraftwerk)
RME	Rapsmethylester
SEGS	Solar Electricity Generation System
SMART	Spezifisch, messbar, aktionsorientiert, relevant, terminiert
SNG	Synthetic Natural Gas
SOFC	Solix Oxide Fuel Cell (Festbrennstoffzelle)
SOFC-GT	Hochtemperaturbrennstoffzelle in Kombination mit Gasturbine
TAC	totales anorganisches Carbonat (Pufferkapazität)
TEG	thermoelektrischer Generator
TEWI	Total Equivalent Warming Impact (Gesamttreibhauseffekt)
TOC	Total Organic Carbon (Pufferkapazität)
TPOX	Thermische Partielle Oxidation
TS	Trockensubstanz
USV	unterbrechungsfreie Stromversorgung
WOZ	Wahre Ortszeit

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
	Literatur	6
2	Photovoltaik	7
2.1	Grundlagen	10
2.2	Funktionsprinzip	15
2.3	Beispielanlagen	26
2.4	Übungen	31
	Literatur	32
3	Solarthermie	33
3.1	Grundlagen	33
3.2	Funktionsprinzip	36
3.3	Beispielanlage	45
3.4	Übungen	52
	Literatur	53
4	Windenergie	55
4.1	Auswertung von Standortmessungen	58
4.2	Grundlagen	59
4.3	Funktionsprinzip	65
4.3.1	Leistungsregelung	75
4.3.2	Gitterteilung/Flügelzahl	76
4.3.3	Turbulenzen und dynamische Belastungen	78
4.3.4	Standicherheit und Turbulenzgutachten	84
4.3.5	Normen und Richtlinien	84
4.4	Beispielanlagen	85
4.4.1	Vertikalachsenrotor (DARRIEUS-Rotor)	85
4.4.2	Widerstandsläufer (SAVONIUS-Rotor)	86
4.4.3	Kleinstwindkraftanlage	88
4.4.4	Großanlage	89

4.5	Generatorbauweise und -betriebskennlinie	93
4.6	Übungen	101
	Literatur	102
5	Wasserkraft	103
5.1	Grundlagen	103
5.1.1	Wasserrad	106
5.1.2	Wasserturbine	108
5.2	Funktionsprinzip	116
5.2.1	Laufwasserkraftwerk	117
5.2.2	Speicherkraftwerk	118
5.2.3	Gezeitenkraftwerk	119
5.2.4	Wellenkraftwerk	122
5.2.5	Meereswärmekraftwerk	127
5.2.6	Osmosekraftwerk	129
5.3	Beispielanlagen	131
5.3.1	Pelton-Turbine	131
5.3.2	Francis-Turbine	132
5.3.3	Beispiele für Laufkraftwerke	133
5.3.4	Gezeitenkraftwerk	134
5.3.5	Pumpspeicherkraftwerk	135
5.4	Übungen	136
	Literatur	137
6	Erdwärme und Wärmepumpe	139
6.1	Grundlagen	139
6.1.1	Carnot-Prozess	140
6.1.2	Kältemittel	146
6.2	Funktionsprinzip	155
6.2.1	Erdkollektor und Rückwirkungen auf das Erdreich	157
6.2.2	Wärmeträgermedium	161
6.2.3	Anfahren der Anlage/Instationäre Betriebszustände/ Leistungsregelung	162
6.2.4	Nachhaltigkeit und Effizienz	163
6.2.5	Absorptionskälteanlage	165
6.3	Beispielanlagen	168
6.3.1	Messdaten einer Beispielanlage im Taunus	168
6.3.2	Messdaten einer Beispielanlage in Nordfriesland	169
6.3.3	Daten aus einer Herstelleranimation	170
6.3.4	Daten eines Kompressorherstellers	173
6.4	Übungen	174
	Literatur	175

7	Biomasse	177
7.1	Grundlagen	177
7.1.1	Biochemische Grundlagen	177
7.1.2	Verbrennung von Biomasse	185
7.1.3	Thermochemische Umwandlung	191
7.1.4	Adiabate Verbrennungstemperatur	200
7.2	Funktionsprinzipien	203
7.2.1	Holzvergasersysteme	203
7.2.2	Verkokung	209
7.2.3	Hausfeuerungsanlagen	209
7.3	Anwendungsbeispiele	215
7.4	Übungen	225
	Literatur	228
8	Biogas	231
8.1	Anlagenbeschreibung	231
8.2	Fermentation	232
8.3	Gaszusammensetzung und Aufbereitung	237
8.4	Kraft-Wärme-Kopplung	243
8.5	Betriebliche Aspekte	245
8.6	Gasprognose	251
8.7	Anlagenbeispiel	254
8.8	Betriebsdatenüberwachung	256
8.9	Übungen	259
	Literatur	260
9	Biokraftstoffe	261
9.1	Biokraftstoffe der 1. Generation	262
9.1.1	Biodiesel (Rapsölmethylester, RME)	262
9.1.2	Bioethanol	264
9.1.3	Pflanzenöl	267
9.1.4	Dimethylether (DME)	268
9.1.5	Biogas	268
9.2	Biokraftstoffe der 2. Generation	269
9.2.1	Biomass-to-Liquid (BtL)-Kraftstoffe	269
9.2.2	Bioethanol der 2. Generation	278
9.3	Projektbeispiele	279
9.3.1	Power-to-Gas	279
9.3.2	Power-to-Liquid	282
9.4	Übungen	285
	Literatur	286

10	Geothermische Stromerzeugung	287
10.1	Grundlagen	287
10.1.1	Hochenthalpie-Lagerstätten	289
10.1.2	Niederenthalpie-Lagerstätten	291
10.2	Funktionsbeschreibung	296
10.2.1	Entspannungsverdampfung (Flash-Evaporation)	296
10.2.2	ORC- und KALINA-Prozess	298
10.3	Beispielanlage	300
10.4	Übungen	301
	Literatur	302
11	Solare Kraftwerke	303
11.1	Parabolrinnenkraftwerk	305
11.2	Solarturmkraftwerk/Zentralreceiverkraftwerke	308
11.3	Dish-Stirling-Anlage	309
11.4	Nicht konzentrierende Kraftwerkskonzepte	310
11.4.1	Solarteichkraftwerke	310
11.4.2	Aufwindkraftwerk/Thermikkraftwerke	312
11.4.3	Fallwindkraftwerk	314
11.5	Beispielanlage	314
11.6	Übungen	319
	Literatur	322
12	Kraft-Wärme-Kopplung	323
12.1	Verbrennungsmotoren	324
12.1.1	Pflanzenölmotor	324
12.1.2	Gasmotor	324
12.1.3	Kenngrößen zur Beurteilung von Motoren	325
12.2	Dampfturbinenkraftwerk	329
12.3	Gasturbinenprozess	331
12.4	Kombinierter Gas-Dampfturbinenprozess	332
12.5	STIRLING-Motor	334
12.5.1	Kinematik	334
12.5.2	Thermodynamik	337
12.6	ORC-Prozess	341
12.7	KALINA-Prozess	343
12.8	Brennstoffzellen	345
12.9	Thermoelektrischer Generator	360
12.10	Übungen	363
	Literatur	365

13	Wasserstoff als Energieträger	367
	13.1 Thermochemische Umwandlung	367
	13.2 Elektrolyse	370
	13.3 Thermochemische Dissoziation	375
	13.4 Photochemische Herstellung	375
	13.5 Biowasserstoff	376
	13.6 Übungen	377
	Literatur	377
14	Speichertechnologien	379
	14.1 Thermische Speicher	380
	14.2 Mechanische Speicher	382
	14.2.1 Druckluftspeicher	382
	14.2.2 Schwungradspeicher	387
	14.3 Elektrische Energiespeicher	389
	14.4 Chemische Speicher	391
	14.5 Übungen	393
	Literatur	393
15	Anhang	395
	15.1 Beispieldaten Wärmeverbrauch eines Einfamilienhaus	395
	15.2 Beispieldaten elektr. Verbrauch eines Einfamilienhaushalts	396
	15.3 Verbrauchsdaten exemplarischer Haushaltsgeräte	397
	15.4 Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsrechnung	398
	15.4.1 Bilanz	398
	15.4.2 Gewinn- und Verlustrechnung	402
	15.4.3 Finanzplanung und Finanzkontrolle	404
	15.4.4 Darlehens- und Tilgungsrechnung	406
	15.5 Einführung in das Projektmanagement	407
	15.5.1 Grundlagen	407
	15.5.2 Projektphasen	409
	15.5.3 Auftragsklärung	411
	15.5.4 Planungswerkzeuge	413
	15.5.5 Kostenermittlung	418
	15.5.6 Risiko	420
	15.5.7 Projektorganisation	422
	15.5.8 Projektcontrolling	424
	15.5.9 Projektkommunikation	427
	15.6 Periodensystem der Elemente	430

15.7	Lösungen zu den Übungen	431
15.7.1	Lösungen zu Kap. 2	431
15.7.2	Lösungen zu Kap. 3	433
15.7.3	Lösungen zu Kap. 4	436
15.7.4	Lösungen zu Kap. 5	441
15.7.5	Lösungen zu Kap. 6	449
15.7.6	Lösungen zu Kap. 7	453
15.7.7	Lösungen zu Kap. 8	464
15.7.8	Lösungen zu Kap. 10	468
15.7.9	Lösungen zu Kap. 11	469
15.7.10	Lösungen zu Kap. 12	472
15.7.11	Lösungen zu Kap. 13	474
15.7.12	Lösungen zu Kap. 14	475
	Literatur	476
	Sachverzeichnis	477