

LEHRBUCH

Viktor Wesselak
Thomas Schabbach
Thomas Link
Joachim Fischer

Regenerative Energietechnik

2. Auflage

Regenerative Energietechnik

Viktor Wesselak • Thomas Schabbach
Thomas Link • Joachim Fischer

Regenerative Energietechnik

2., erweiterte und vollständig neu bearbeitete Auflage

 Springer Vieweg

DR.-ING. VIKTOR WESSELAK Professor für Regenerative Energiesysteme
DR.-ING. THOMAS SCHABBACH Professor für Thermische Energiesysteme
DR.-ING. THOMAS LINK Professor für Kraft- und Arbeitsmaschinen
DR.-ING. JOACHIM FISCHER Professor für Bioenergiesysteme

Institut für Regenerative Energietechnik (in.RET)
Fachhochschule Nordhausen
Weinberghof 4
99734 Nordhausen
in.RET@fh-nordhausen.de

ISBN 978-3-642-24164-2
DOI 10.1007/978-3-642-24165-9

ISBN 978-3-642-24165-9 (eBook)

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 2009, 2013

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.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.
www.springer-vieweg.de

Vorwort

Seit dem Erscheinen der ersten Auflage sind vier Jahre vergangen, in denen eine stürmische technologische und ökonomische Entwicklung der regenerativen Energien erfolgte. Dieser Prozess ist in Deutschland durch den beschleunigten Ausstieg aus der Kernenergie in Folge der Reaktorkatastrophen von Fukushima und einem starken Zuwachs der regenerativen Stromerzeugungskapazitäten gekennzeichnet. Regenerative Energien – und hier insbesondere Photovoltaik und onshore-Windkraft – decken derzeit bereits ein Viertel des jährlichen Strombedarfs ab. Die Frage der Markteinführung regenerativer Energietechniken ist hier längst der Frage nach einer Marktintegration wachsender PV- und Windstrommengen gewichen. Ganz anders sieht die Entwicklung im Wärme- und Mobilitätsbereich aus. Fehlende Anreizstrukturen und noch ausstehende technologische Richtungsentscheidungen führen zu einer Stagnation auf niedrigem Niveau. Gleichwohl kommt dem Wärmesektor die entscheidende Bedeutung für die Erreichung der Klimaziele zu.

Diesen Entwicklungen versuchen wir in der zweiten Auflage der „Regenerativen Energietechnik“ Rechnung zu tragen. Die technologieorientierten Kapitel wurden vollständig überarbeitet und erweitert sowie ein Kapitel zu Energiespeichern neu eingefügt. Auch das Kapitel zur Energieeffizienz wurde ausgebaut und hinsichtlich der Wirtschaftlichkeitsrechnung ergänzt.

Wir danken unseren Kolleginnen und Kollegen am Institut für Regenerative Energietechnik (in.RET) der Hochschule Nordhausen für ihre kontinuierliche Unterstützung dieses Projekts. Insbesondere Pia Manz, Jutta Carow, Christoph Schmidt sowie unser Kollege Wolfgang Eisenmann von der Hochschule Mannheim haben durch ihre stete Diskussionsbereitschaft und zahlreiche Anregungen zum Gelingen dieses Werks beigetragen. Tanja Schabbach und Pascal Leibbrandt haben freundlicherweise Originalbeiträge aus ihrem Arbeitsgebiet beigesteuert. Und schließlich bedanken wir uns bei unseren Familien und dem Springer-Verlag für ihre Geduld.

Nordhausen,
Mai 2013

*Viktor Wesselak, Thomas Schabbach
Thomas Link, Joachim Fischer*

Vorwort zur 1. Auflage

Die in den vergangenen Jahren erfolgte technische und ökonomische Entwicklung der Regenerativen Energien ist Bestandteil eines außerordentlichen Paradigmenwechsels in der Energietechnik. Angetrieben durch das sich abzeichnende Ende der fossilen Energieträger und in immer stärkerem Maß auch durch den Klimawandel sind Regenerative Energieträger heute der zentrale Baustein einer zukünftigen und nachhaltigen Energieversorgung. Diese Entwicklung war keineswegs selbstverständlich. Noch vor 20 Jahren setzten die Repräsentanten aus Politik und Energiewirtschaft überwiegend auf eine Forcierung des bestehenden Energiesystems durch den Ausbau von Kohle- und Kernkraft sowie die vage Hoffnung auf einen „neuen“ Energieträger in Form der Kernfusion. Die Diskussionen zum Erhalt des deutschen Steinkohlebergbaus und zum Ausbau der Kernenergie sind vielen noch präsent. Studiengänge oder Ausbildungsberufe im Bereich der Erneuerbaren Energien suchte man vergebens, die für die Forschung zur Verfügung gestellten Mittel machten nur einen Bruchteil der Mittel für Kernenergie aus und die Aktivitäten der Industrie erschöpften sich oft in risikolosen „Alibi“-Projekten.

In dieser Situation entstanden in den 80er Jahren eine Vielzahl kleiner Unternehmen, die – teilweise von der Öffentlichkeit belächelt – die Entwicklung neuer oder die Weiterentwicklung altbekannter regenerativer Energiewandler vorantrieben. Sie wurden häufig von Menschen gegründet, die ihr umwelt- und gesellschaftspolitisches Engagement mit konkretem Handeln in technischen Fragen verbinden wollten. Viele dieser Firmen scheiterten an den Marktbedingungen, aber eine große Anzahl besteht bis heute – sogar als Markt- und Technologieführer im Bereich der Windkraftanlagen, der Solarwechselrichter oder der thermischen Solaranlagen.

Diese kurzen Vorbemerkungen zeigen bereits, dass unsere Energieversorgung nicht aus dem gesellschaftlichen Kontext herausgelöst betrachtet werden kann. Die Krise des globalen Energiesystems hat Auswirkungen auf energie-, umwelt- und forschungspolitische Rahmenbedingungen, die eine wichtige Grundlage für die technologischen Entwicklungen im Bereich der Regenerativen Energietechnik darstellen. Im ersten Kapitel dieses Buches werden daher zentrale Fragen der nationalen und internationalen Umwelt- und Energiepolitik vorgestellt und diskutiert.

Ein überwiegend auf Regenerativen Energien aufbauendes Energiesystem kann sich nicht nur auf die Nutzung einzelner Energieträger beschränken. Vielmehr müssen alle energetischen Potentiale in den Sektoren Elektrizität, Wärme und Mobilität genutzt werden. Eine besondere Rolle kommt dabei den Maßnahmen zur Energieeffizienz zu, auf die anhand eines Anwendungsbeispiels im zweiten Kapitel ein-

gegangen wird. Einen Überblick über Potenzial und Verfügbarkeit der wichtigsten Regenerativen Energieträger gibt das dritte Kapitel.

Die Nutzung Regenerativer Energien erfolgt durch unterschiedliche Energiewandlungskonzepte: Photovoltaik, Solarthermie, Geothermie, Bioenergie, Wind- und Wasserkraft werden jeweils in eigenständigen Kapiteln behandelt, in denen ausgehend von den physikalischen Grundlagen die zentralen Komponenten, deren Verschaltung zu Systemen sowie konkrete Auslegungsbeispiele ausführlich dargestellt werden. Der Integration Regenerativer Energiewandler in die bestehenden Systeme für Elektrizität, Wärme und Mobilität ist jeweils ein eigenes Kapitel gewidmet, das insbesondere auch den rechtlichen Rahmen und die Förderinstrumente beleuchtet.

Alle Energiewandlungsprozesse unterliegen den Gesetzen der Thermodynamik, die die theoretische Grundlage für alle energietechnischen Verfahren bildet. Mit ihrer Hilfe ist es möglich, obere Grenzen für Umwandlungswirkungsgrade zu ermitteln und damit den erreichten Stand der Technik einzuordnen. In Kapitel 13 werden daher im Rahmen einer kurzen Einführung zunächst wichtige Begrifflichkeiten erklärt und schließlich die thermodynamischen Grenzen für unterschiedliche Energiewandler hergeleitet.

Uns ist bewusst, dass auch bei sorgfältigster Erstellung von mehr als 500 Seiten vermutlich viele Fehler unentdeckt geblieben sind. Auch mussten Teilaspekte der Regenerativen Energietechnik außen vor bleiben, da sie sowohl den zeitlichen als auch den inhaltlichen Rahmen dieses Buches zu sprengen drohten. An dieser Stelle gilt unser Dank Frau Hestermann-Beyerle vom Springer Verlag, für die kontinuierliche Unterstützung unseres Projektes in allen Entwicklungsphasen. Wir bedanken uns bei allen Rechteinhabern der verwendeten Abbildungen – auch bei den Wenigen, die wir nicht ermitteln konnten. Wenn Sie uns als Leser Hinweise zu Verbesserungen oder Fehlern geben möchten, senden Sie uns bitte direkt eine email (in.RET@fh-nordhausen.de) - Danke!

Viele haben uns bei der Erstellung dieses Buches geholfen. Die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Instituts für Regenerative Energietechnik, allen voran Jutta Carow und Sebastian Voswinckel, haben uns mit Material, Anregungen und Kritik versorgt. Frank-Michael Dittes brachte die Strenge des theoretischen Physikers ein, wenn eine gewisse ingenieurtechnische „Laxheit“ einzureißen drohte und Sandra Thomas wachte unerbittlich über die neue deutsche Rechtschreibung. Wir danken auch den Freunden und Kollegen, die Teile des Manuskripts kritisch gegenlasen und uns wertvolle Denkanstöße gaben.

Es freut uns besonders, dass unsere neuberufenen Kollegen Thomas Link (Professor für Kraft- und Arbeitsmaschinen) und Joachim Fischer (Professor für Bioenergiesysteme) umfangreiche Beiträge aus ihren Fachgebieten beisteuerten, ohne dabei ihren Enthusiasmus zu verlieren. Und schließlich haben wir unseren Familien zu danken, die uns auch dann noch den Rücken frei hielten, als dieses Buchprojekt nicht mehr nur die Abendstunden, sondern auch noch sämtliche Wochenenden verinnahmte.

Inhaltsverzeichnis

1	Kontext	1
1.1	Energie	2
1.2	Grundprobleme des globalen Energiesystems	6
1.2.1	Begrenztheit der Ressourcen	7
1.2.2	Gerechtigkeit der Verteilung	8
1.2.3	Klimawandel	9
1.2.4	Lösungsansätze	11
1.3	Szenarien einer zukünftigen Entwicklung	15
1.3.1	Energiepotenziale	16
1.3.2	Szenarien und Prognosen	18
1.3.3	Beispiel: Leitszenario	21
1.4	Exkurse	25
1.4.1	Externe Kosten der Energieerzeugung	26
1.4.2	Kernenergie	28
1.4.3	Kernfusion	30
1.4.4	CO ₂ -Abtrennung	31
	Literaturverzeichnis	32
2	Energieeffizienz	35
2.1	Ansätze zur Energiebedarfsreduktion	36
2.1.1	Vermeidung	36
2.1.2	Verhaltensänderung	37
2.1.3	Energieeffizienzsteigerung	38
2.1.4	Ersatz fossiler Energieträger	40
2.1.5	Gesetzgeberische Maßnahmen zur Energieeffizienz	40
2.2	Energieeffizienz in Gebäuden	42
2.2.1	Gesetzgeberische Maßnahmen	43
2.2.2	Energetische Bewertung von Gebäuden	47
2.2.3	Berechnungsansätze	58
2.3	Energieeffizienz im Wärmebereich	63
2.3.1	Sanierungsmaßnahmen	63

2.3.2	Innovative Wärmebereitstellung	67
2.3.3	Wärmeerzeugung in Kraft-Wärmekopplung	79
2.4	Wirtschaftlichkeit von Energieeffizienzmaßnahmen	87
2.4.1	Grundlagen der Investitionsrechnung	88
2.4.2	Anwendungsbeispiele zur Wirtschaftlichkeit	95
2.5	Anwendungsbeispiel für eine Energieeffizienzanalyse	97
	Literaturverzeichnis	105
3	Regenerative Energiequellen	109
3.1	Strahlungsangebot der Sonne	110
3.1.1	Strahlung und Materie	110
3.1.2	Strahlungsquelle Sonne	112
3.1.3	Einfluss der Erdatmosphäre	118
3.1.4	Direktstrahlung auf eine beliebig orientierte Fläche	123
3.1.5	Global- und Diffusstrahlung auf eine beliebig orientierte Fläche	128
3.1.6	Jahressumme der Globalstrahlung auf eine beliebig orientierte Fläche	130
3.1.7	Auslegungshilfsmittel Sonnenstandsdiagramm	132
3.1.8	Auslegungshilfsmittel Strahlungsatlas	133
3.1.9	Messung der Einstrahlung	135
3.2	Erdwärme	137
3.2.1	Oberflächennahe Nutzung	142
3.2.2	Tiefe Erdwärme	157
3.3	Biomasse	160
3.3.1	Biomassebereitstellung	161
3.3.2	Biomasseproduktion	162
3.3.3	Physikalische und chemische Charakterisierung von Bioenergieträgern	163
3.3.4	Ökologie und Nachhaltigkeit	167
3.4	Windenergie	169
3.4.1	Windentstehung	170
3.4.2	Leistung des Windes	170
3.4.3	Grenzschicht	172
3.4.4	Häufigkeitsverteilung	175
3.4.5	Die Turbulenz der Windströmung	180
3.4.6	Windklassen	181
3.4.7	Messung der Windverhältnisse	182
3.5	Wasserkraft	184
3.5.1	Wasserkreislauf	184
3.5.2	Nutzbarer Niederschlagsanteil	184
3.5.3	Arbeitsvermögen des Wassers	185
3.5.4	Weltweites Nutzungspotenzial	186
	Literaturverzeichnis	187

4	Photovoltaik	191
4.1	Geschichte der Photovoltaik	193
4.2	Physikalische Grundlagen	195
4.2.1	Einführung in die Halbleitertheorie	195
4.2.2	Generations- und Rekombinationsprozesse	202
4.2.3	Die Solarzelle als p-n-Übergang	205
4.2.4	Modellbildung für eine reale Solarzelle	212
4.2.5	Amorphe Halbleitermaterialien	217
4.3	Komponenten und Technologien	220
4.3.1	Herstellungsverfahren für kristalline Si-Solarzellen	220
4.3.2	Herstellungsverfahren für Dünnschicht-Solarzellen	223
4.3.3	Solarzellen der dritten Generation	227
4.3.4	Solarmodule	231
4.3.5	Aufständigung	232
4.3.6	Stromrichter	236
4.4	Systemtechnik	243
4.4.1	Verschaltung von Solarzellen zu Solargeneratoren	243
4.4.2	Regelung von Solargeneratoren	245
4.4.3	Netzgekoppelte Photovoltaikanlagen	248
4.4.4	Photovoltaik-Insulanlagen	250
4.5	Auslegungsbeispiele	251
4.5.1	Inselnetz Flanitzhütte	251
4.5.2	PV-Kraftwerk Nentzelsrode	253
	Literaturverzeichnis	254
5	Solarthermie	257
5.1	Geschichte der solarthermischen Energienutzung	258
5.2	Physikalische Grundlagen	261
5.2.1	Strahlungsphysikalische Grundlagen	262
5.2.2	Strahlungstransmission	264
5.2.3	Absorption und Strahlungswandlung	272
5.2.4	Strahlungskonzentration	276
5.2.5	Wärmetransport im Kollektor	280
5.2.6	Kollektormodellierung	296
5.2.7	Kenn- und Leistungsdaten von Solarkollektoren	301
5.3	Komponenten	310
5.3.1	Kollektoren	310
5.3.2	Absorber	319
5.3.3	Transparente Abdeckungen	327
5.3.4	Kollektorkreis	331
5.3.5	Speicher	335
5.3.6	Weitere Komponenten	341
5.3.7	Zukünftige Entwicklungslinien	347
5.4	Systemtechnik	349
5.4.1	Betriebsarten	349

5.4.2	System-Kennwerte	352
5.4.3	Exkurs – Trinkwassererwärmung und Hygiene	359
5.4.4	Solare Trinkwassererwärmung im Ein- und Zweifamilienhaus	362
5.4.5	Große Solaranlagen zur Trinkwassererwärmung	363
5.4.6	Solare Heizungsunterstützung	367
5.4.7	Solare Prozesswärme	370
5.4.8	Solare Kraftwerke	375
5.5	Solarwirtschaft	377
5.5.1	Der Markt für Solarthermie	378
5.5.2	Gesetzliche Regelungen und Fördermaßnahmen	380
5.5.3	Wirtschaftlichkeit	383
	Literaturverzeichnis	391
6	Geothermie	397
6.1	Geschichte der geothermischen Energienutzung	401
6.2	Grundlagen	403
6.2.1	Modellierung von Erdwärmesonden	404
6.2.2	Thermodynamik der Wärmepumpen	411
6.2.3	Thermodynamik der geothermischen Stromerzeugung	425
6.3	Komponenten und Systemtechnik	439
6.3.1	Erdwärmesonden	440
6.3.2	Erdkollektoren	451
6.3.3	Grundwasserbrunnen	456
6.3.4	Wärmepumpen	458
6.4	Wirtschaftlichkeit von Wärmepumpenanlagen	460
6.5	Auslegungsbeispiele	463
6.5.1	Geothermische Beheizung eines Einfamilienhauses	463
6.5.2	Geothermisches Kraftwerk Ribeira Grande, Azoren	465
	Literaturverzeichnis	468
7	Biomasse	471
7.1	Geschichte der energetischen Biomassennutzung	472
7.2	Thermochemische Umwandlung	474
7.2.1	Verbrennung	474
7.2.2	Emissionen aus der Biomasseverbrennung	477
7.2.3	Anwendungsbereiche und Technologien zur Wärme- und Stromerzeugung	478
7.2.4	Besonderheiten bei der Verbrennung von Halmgut und Getreide	483
7.2.5	Technologien zur Verbrennung von Biomasse in Großfeuerungsanlagen	484
7.2.6	Kombinierte Erzeugung von Wärme und Strom aus Biomasse	487
7.2.7	Biomassevergasung: Grundlagen und Anwendung	490

7.3	Biochemische Umwandlung	497
7.3.1	Grundlagen der Biogaserzeugung	497
7.3.2	Dimensionierung von Biogasanlagen	505
7.3.3	Technik zur Erzeugung von Biogas	509
7.3.4	Technik zur Nutzung von Biogas	512
7.4	Flüssige Bioenergieträger: Biokraftstoffe	517
7.4.1	Entwicklung des weltweiten Biokraftstoffmarkts	518
7.4.2	Biokraftstoffe der 1. Generation: Pflanzenöle	519
7.4.3	Biokraftstoffe der 1. Generation: Biodiesel	526
7.4.4	Biokraftstoffe der 2. Generation: Hydrierte Pflanzenöle	530
7.4.5	Erzeugung von Bioethanol	532
7.4.6	Biokraftstoffe der 2. Generation: synthetische Biokraftstoffe	543
7.4.7	Biokraftstoffe der 3. Generation	555
	Literaturverzeichnis	558
8	Windkraftanlagen	561
8.1	Geschichte der Windenergienutzung	564
8.2	Physikalische Grundlagen	566
8.2.1	Die Betzsche Theorie	566
8.2.2	Schwingungsverhalten von Windenergieanlagen	584
8.3	Komponenten	596
8.3.1	Rotorblätter	596
8.3.2	Getriebe	609
8.3.3	Antriebsstrang	619
8.3.4	Turm	625
8.3.5	Generator	630
8.4	Systemtechnik	633
8.4.1	Regelungskonzepte	633
8.4.2	Condition Monitoring Systeme	636
8.4.3	Genehmigungsverfahren (Tanja Schabbach)	638
8.4.4	Wirtschaftlichkeit von Windkraftanlagen	644
8.4.5	Auslegungsbeispiel	652
	Literaturverzeichnis	654
9	Wasserkraftanlagen	659
9.1	Einführung	659
9.2	Typisierung und Aufbau	660
9.3	Wasserturbinen	660
9.3.1	Die Pelton turbine	662
9.3.2	Die Francisturbine	664
9.3.3	Die Kaplan turbine	665
9.3.4	Die Eulersche Turbinen Hauptgleichung	666
	Literaturverzeichnis	668

10	Energiespeicher	669
10.1	Elektrische Speichertechnologien	670
10.1.1	Mechanische Energiespeicher	671
10.1.2	Elektrische Energiespeicher	675
10.1.3	Elektrochemische Energiespeicher	677
10.2	Thermische Speichertechnologien	681
10.2.1	Sensible Speicher	682
10.2.2	Latentwärmespeicher	687
10.2.3	Thermochemische Speicher	696
	Literaturverzeichnis	702
11	Elektrische Energiesysteme	705
11.1	Struktur des elektrischen Energieversorgungssystems	706
11.2	Integration von Photovoltaikanlagen	712
11.3	Integration von Windkraftanlagen	715
	Literaturverzeichnis	717
12	Thermische Energiesysteme	719
12.1	Struktur der thermischen Energieversorgung	720
12.2	Integration von Kraft-Wärme-Kopplung, Biomasse und Geothermie in Nahwärmenetze	722
12.3	Integration solarer Wärme in Nahwärmenetze	723
12.4	Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz	725
12.5	Anwendungsbeispiel Kommunale Fernwärme (Pascal Leibbrandt) ..	726
	Literaturverzeichnis	729
13	Mobilität	731
13.1	Kraftstoffe	733
13.1.1	Biokraftstoffe	733
13.1.2	Wasserstoff	737
13.2	Elektrofahrzeuge	737
13.2.1	Batteriegespeiste Elektrofahrzeuge	738
13.2.2	Brennstoffzellengespeiste Elektrofahrzeuge	739
	Literaturverzeichnis	740
14	Thermodynamische Bewertung Regenerativer Energiewandlungen ..	741
14.1	Geschichte der Energiewandlung	741
14.2	Die Energie	744
14.3	Die Entropie	752
14.4	Die Energie des Systems	759
14.5	Gewollte und ungewollte Energiewandlungen	765
14.5.1	Energiewandlung innerhalb des Systems	765
14.5.2	Energietransport über die Systemgrenze	768
14.5.3	Ungewollte Energieumwandlungen (Dissipation)	774
14.6	Energiebilanzen für geschlossene und offene Systeme	782
14.6.1	Geschlossene Systeme	782

14.6.2	Offene Systeme	784
14.6.3	Exergie, Anergie, Wirkungs- und Nutzungsgrad	787
14.7	Stoffeigenschaften	795
14.7.1	Zustandsgleichungen	795
14.7.2	Idealgas	799
14.7.3	Reale Gase	801
14.7.4	Ideale Flüssigkeiten und Feststoffe	803
14.7.5	Reale Flüssigkeiten und Feststoffe	804
14.7.6	Nassdampf	805
14.7.7	Ideale Gasgemische	807
14.7.8	Binäre Gemische	813
14.8	Thermodynamische Maschinen und Komponenten	815
14.8.1	Pumpen	816
14.8.2	Verdichter	818
14.8.3	Turbinen	820
14.8.4	Wärmeübertrager	821
14.8.5	Drossel	824
14.8.6	Düse und Diffusor	824
14.8.7	Wärmeerzeuger	826
14.9	Kreisprozesse	828
14.9.1	Bilanzierung des Kreisprozesses	828
14.9.2	Kreisprozess-Varianten	833
14.10	Thermodynamik der solaren Energiewandlung	836
14.10.1	Thermodynamik der Strahlung	836
14.10.2	Solarthermischer Umwandlungspfad	839
14.10.3	Photovoltaischer Umwandlungspfad	843
	Literaturverzeichnis	849
	Sachverzeichnis	851

Kapitel 1

Kontext

Energie ist eine zentrale Notwendigkeit menschlicher Existenz. Der Nutzen, den der Mensch aus Energie bezieht, lässt sich vordergründig in vier Bereiche einteilen: Nahrung, Wärme, Arbeit und Verkehr. Der erste Bereich stellt die unmittelbare Energienutzung dar: Dem menschlichen Stoffwechsel wird chemische Energie in Form von organischen Verbindungen zugeführt. Der Aufbau dieser Energie erfolgt durch die Umwandlung von Sonnenenergie mittels der Photosynthese der Pflanzen bzw. den Stoffwechsel der Tiere. Der zweite Bereich ist die Wärme; sie dient einerseits der Nahrungszubereitung und damit einem verbesserten energetischen Aufschluss. Andererseits ermöglicht sie eine Erwärmung von Wohnstätten und dadurch erst die Besiedlung eines Großteils der Landfläche. Und schließlich ist sie als Prozesswärme die Grundlage vieler industrieller Produktionsprozesse. Unter Arbeit wird die vielfältige Nutzung mechanischer Energien durch die Muskelkraft von Menschen und Tieren sowie Maschinen zusammengefasst. Verkehr (oder Mobilität) schließlich ermöglicht einen regionalen und überregionalen Austausch von Waren, Dienstleistungen sowie Informationen und gleicht damit beispielsweise gegebene oder entstandene Ungleichgewichte der ersten drei Bereiche aus.¹

Die Menschheit hat in den vergangenen Jahrtausenden unterschiedlichste Energiequellen zu nutzen gelernt. Viele haben über die Zeit ihre Bedeutung verändert oder sind von anderen Energiequellen abgelöst worden. Diese Prozesse stellten und stellen sich aber nicht nur als ein technologisches Problem dar. Vielmehr erfolgt die Nutzbarmachung und Nutzung von Energiequellen innerhalb eines gesellschaftlichen Kontexts, der neben den technischen auch wirtschaftliche, politische und philosophische Ebenen aufweist: Die Energienutzung erfolgt innerhalb von Energiesystemen, die zum einen die ökologischen Rahmenbedingungen und die technischen Voraussetzungen – wie den Zugang zu den Energiequellen, ihre Nutzung mittels geeigneter Energiewandler sowie deren Wirkungsgrade – und zum anderen die Strukturen der Bewirtschaftung dieser Quellen und Energiewandler durch die Gesellschaft umfasst. Ein Energiesystem hat vier Aufgaben zu erfüllen:

¹ Nahrung, Wärme, Arbeit und Verkehr beschreiben die direkte Energienutzung und sind gleichzeitig Synonyme für die dahinter stehenden Prozessketten, die die landwirtschaftliche Produktion, die Bereitstellung von Energieträgern oder den Austausch von Informationen beinhalten.

1. Es muss eine qualitative Übereinstimmung von Energienachfrage und Energieangebot herstellen. Jede Energieform hat für die Gesellschaft einen spezifischen Nutzen, beispielsweise als Nahrung, Wärme oder mechanische Arbeit. Dazu sind Energiewandler notwendig, die natürliche Ressourcen nutzbar machen oder Energieformen ineinander umwandeln.
2. Es muss den Energiebedarf vor Ort decken können. Je größer und ausdifferenzierter eine Gesellschaft ist, desto mehr Bedeutung kommt dem Energietransport und der dafür notwendigen Infrastruktur zu.
3. Es muss eine zeitliche Übereinstimmung von Energieangebot und Energienachfrage herstellen. So weisen beispielsweise unterschiedliche Jahreszeiten einen unterschiedlichen Wärmebedarf auf. Die zeitliche Übereinstimmung setzt also Lagerhaltungs- und Verteilsysteme voraus.
4. Es muss Konflikte zwischen den einzelnen Nutzungsarten regulieren. So konkurrierten beispielsweise im Mittelalter Wald- und Weideflächen und damit die Holz- und die Nahrungsmittelproduktion. Derzeit setzt eine Konkurrenz zwischen Nahrungs- und Energiepflanzen auf den landwirtschaftlichen Anbauflächen ein.

Unser derzeitiges Energiesystem befindet sich in einer Krise, da seine Grundlage – der stetig wachsende Verbrauch natürlicher Ressourcen – an eine objektive Grenze gestoßen ist. Die sich daraus ergebende Zukunftsaufgabe eines nachhaltigen Energiesystems bewegt sich innerhalb eines politischen und eines ingenieurwissenschaftlichen Kontextes: Die politische Ebene beinhaltet die Schaffung eines gesellschaftlichen Ziele- und Wegekonsenses in der Energiepolitik, der ökonomische und ökologische Aspekte sowie die Verteilungsgerechtigkeit zwischen Nord und Süd berücksichtigt. Aufgabe von Wissenschaft und Technik ist es, in den nächsten Jahrzehnten eine überwiegend auf regenerativen Energieträgern basierende Energieversorgung aufzubauen.

1.1 Energie

Energie ist eine physikalische Größe, die den Zustand eines Systems beschreibt. Sie ist eine Erhaltungsgröße und damit in abgeschlossenen Systemen konstant. Im mechanischen Sinne ist Energie die Fähigkeit eines Systems, Arbeit zu verrichten. Die Einheit der Energie ist *Joule*, mit

$$1 \text{ J} = 1 \text{ Ws} = 1 \text{ Nm} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2}.$$

Für bestimmte Anwendungsgebiete haben sich historisch auch andere Einheiten für die Energie entwickelt. So wird die elektrische Energie in Kilowattstunden oder der Brennwert von Lebensmitteln in Kalorien angegeben. Eine Kalorie (cal) bezeichnet die benötigte Energie, um ein Gramm Wasser um ein Kelvin zu erwärmen.² Große

² Umgangssprachlich wird der Begriff Kalorie sowohl für cal als auch für kcal = 1000 cal verwendet.

Energiemengen, beispielweise zur Beschreibung von Kraftwerkskapazitäten, werden häufig in Tonnen Steinkohleeinheiten (tSKE) bilanziert. Eine Tonne Steinkohleeinheiten beschreibt die Wärmeenergie, die bei der Verbrennung von einer Tonne Steinkohle freigesetzt wird. Tab. 1.1 gibt die Umrechnungsfaktoren zwischen diesen Energieeinheiten an.

Tabelle 1.1 Umrechnungsfaktoren für verschiedene Energieeinheiten

	J	kcal	kWh	tSKE
1 J =	1	$0,239 \cdot 10^{-3}$	$0,278 \cdot 10^{-6}$	$0,034 \cdot 10^{-9}$
1 kcal =	$4,187 \cdot 10^3$	1	$1,16 \cdot 10^{-3}$	$0,143 \cdot 10^{-6}$
1 kWh =	$3,6 \cdot 10^6$	$0,86 \cdot 10^3$	1	$0,123 \cdot 10^{-3}$
1 tSKE =	$29,3 \cdot 10^9$	$7,0 \cdot 10^6$	$8,14 \cdot 10^3$	1

Energie tritt in unterschiedlichen Erscheinungsformen auf. Man unterscheidet

- mechanische Energie in Form von potenzieller und kinetischer Energie,
- thermische Energie als Summe der ungeordneten Bewegungsenergie der Moleküle eines Stoffes,
- elektromagnetische Energie in Form von elektrischer oder magnetischer Feldenergie und elektromagnetischer Strahlungsenergie,
- Bindungsenergie in Form von chemischer und nuklearer Energie.

Die Energienutzung geht in der Regel mit einer Umwandlung von einer Energieform in eine andere einher. Energieformen lassen sich jedoch nicht beliebig ineinander überführen. Sie unterliegen dabei bestimmten Grenzen, die durch die Thermodynamik beschrieben werden. Der theoretische Hintergrund sowie die sich daraus ergebenden technischen Implikationen für Energiewandler sind Gegenstand von Kapitel 14 und sollen hier nicht weiter vertieft werden.

Der weltweite Energiebedarf wird heute überwiegend durch fossile Energieträger gedeckt. Sie stellen über einen langen erdgeschichtlichen Zeitraum in Form von chemischer Energie gespeicherte Strahlungsenergie der Sonne dar. Tab. 1.2 gibt den Energieinhalt einiger Energieträger in Form von Brennwerten wieder.

Tabelle 1.2 Typischer Brennwert einiger Energieträger

1 kg frisches Holz	9,4 MJ	1 kg Braunkohle	19,0 MJ
1 kg trockenes Holz	19,0 MJ	1 kg Steinkohle	31,0 MJ
1 m ³ Erdgas	40,0 MJ	1 l Heizöl	38,4 MJ
1 kg Erdgas	43,0 MJ	1 kg Heizöl	45,4 MJ

Die in den Energieträgern enthaltene Energie liegt i.a. nicht in der Form vor, in der sie genutzt werden soll. So werden Kohle und Rohöl, aber auch Wind und Sonnenstrahlung nicht direkt genutzt, sondern durch technische Prozesse beispielsweise in Elektrizität oder Kraftstoffe umgewandelt. Man unterscheidet daher zwischen Primärenergie, Endenergie und Nutzenergie.

→ Primärenergie, Endenergie und Nutzenergie

Primärenergie ist Energie in ihrem natürlichen, noch nicht technisch aufbereiteten Zustand, z.B. in Form von Kohle, Naturgas, Rohöl oder Wind. Endenergie bezeichnet die dem Verbraucher nach energiespezifischen Aufbereitungs- und Umwandlungsprozessen zugeführte Energie, beispielsweise in Form von Kohlebriketts, Erdgas, Benzin oder Elektrizität. Die Energienutzung durch den Verbraucher beinhaltet weitere Umwandlungsprozesse, die zur Nutzenergie in Form von Wärme, mechanischer Arbeit oder Licht führen.

Die Bedeutung dieser Begriffe soll an einem Beispiel illustriert werden. In Abb. 1.1 sind zwei Energieflussdiagramme dargestellt, die die Erwärmung von Wasser mittels eines Gas- und eines Elektroherds beschreiben. Die Nutzenergie besteht jeweils im Wärmeeintrag in das Wasser. Bei dem Gasherdd ist die Primärenergie Naturgas, das nach Aufbereitung und Transport als Erdgas den Verbraucher erreicht. Bei dem Elektroherd wurde als Primärenergie Braunkohle angenommen, die mit einem durchschnittlichen Kraftwerkswirkungsgrad von 38 Prozent verstromt wird. Trotz des deutlich höheren Wirkungsgrads des einen Endgeräts – bei einem Elektroherd gehen 50 bis 60 Prozent der Wärme in das Wasser über, bei einem Gasherdd nur 30 bis 40 Prozent – weist das andere die bessere Ausnutzung der Primärenergie auf.

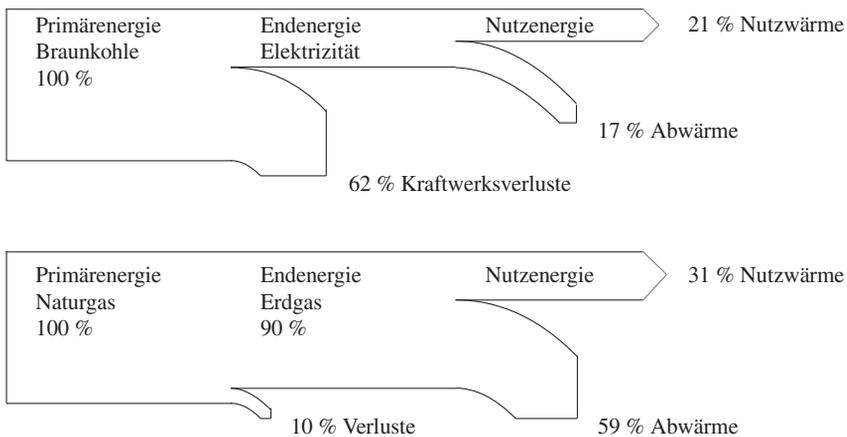
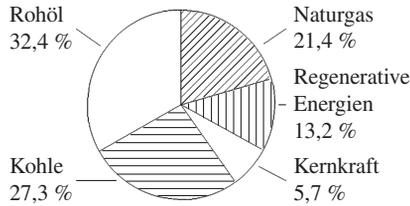


Abb. 1.1 Energieflussbild für einen Elektroherd (oben) und eine Gasherdd (unten)

Abb. 1.2 zeigt, dass der weltweite Primärenergieverbrauch zu gut einem Drittel durch Rohöl gedeckt wird, Braun- und Steinkohle tragen etwa ein Viertel, Naturgas ein Fünftel bei. Der Anteil regenerativer Energien liegt bei 13 Prozent. Davon entfällt der überwiegende Anteil auf die traditionelle Nutzung von Biomasse als Brennholz in Entwicklungsländern. Der absolute Unterschied zwischen Primär- und Endenergieverbrauch ist überwiegend auf die Umwandlungsverluste bei der Elektrizitätsproduktion zurückzuführen.

Primärenergie: 532 EJ



Endenergie: 363 EJ

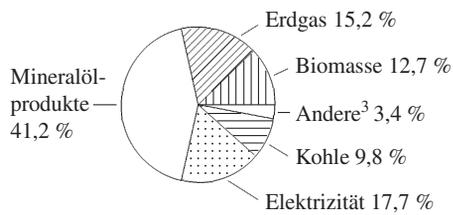
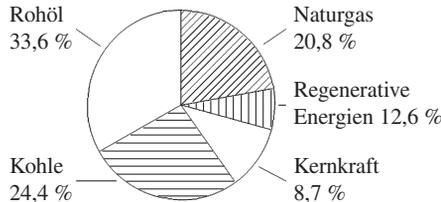


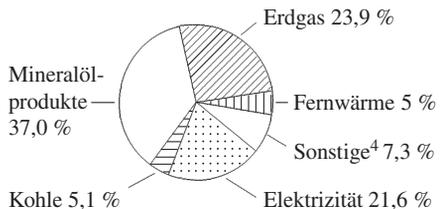
Abb. 1.2 Weltweiter Primär- und Endenergieverbrauch nach Energieträgern im Jahr 2010 [26]

Für Deutschland stellt sich ein vergleichbares Bild dar. In Abb. 1.3 ist neben der Aufteilung nach Energieträgern auch der Endenergieverbrauch nach Anwendungsnutzen aufgetragen. Schlüsselte man den Endenergieverbrauch in Deutschland nach Verbrauchergruppen auf, so erhält man eine grobe Viertelung des Verbrauchs in Verkehr (29 %), Industrie (30 %), private Haushalte (25 %) sowie Handel, Gewerbe und Dienstleistungen (16 %). Die Nutzung der Endenergie in den Verbrauchergruppen ist jedoch sehr heterogen: Während im Verkehrssektor die Endenergie fast ausschließlich in mechanische Energie zur Fortbewegung umgesetzt wird, dominiert in den privaten Haushalten die Beheizung von Wohnraum mit drei Viertel den Energieverbrauch.

Primärenergie: 13,5 EJ



Endenergie: 8,7 EJ



Endenergie: 8,7 EJ

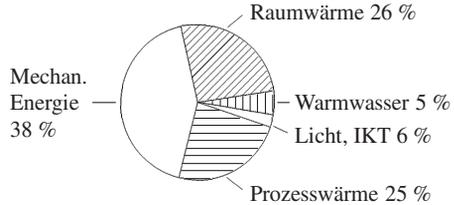


Abb. 1.3 Primär- und Endenergieverbrauch nach Energieträgern (links) und Endenergieverbrauch nach Anwendungsgebieten (rechts) für Deutschland im Jahr 2011, nach [11]

³ insbesondere Nah- und Fernwärme

⁴ Brennholz, Brenntorf, Klärschlamm und Müll

Da regenerative Energien beispielweise als solare Wärme oder photovoltaisch erzeugter Strom direkt als Endenergie anfallen, ist eine Angabe des dahinterstehenden Primärenergieaufwands nicht ohne Weiteres möglich. Zur Berechnung des Primärenergieäquivalents regenerativer Energien werden zwei Verfahren angewandt:

Bei der *Substitutionsmethode* wird davon ausgegangen, dass eine regenerativ erzeugte Energieeinheit eine konventionell erzeugte ersetzt. Als Primärenergieäquivalent wird daher die Primärenergie des substituierten Brennstoffs angesetzt.

Bei der *Wirkungsgradmethode* wird für die Erzeugung einer Energieeinheit aus einem Energieträger, dem ein Heizwert zugeordnet werden kann, die eingesetzte Menge des Energieträgers mit dem Heizwert bewertet und als Primärenergieäquivalent herangezogen. Dies betrifft insbesondere die Biomasse. Für Energieträger, denen kein Heizwert zugeordnet werden kann, wird aus der Endenergie unter der Annahme eines Wirkungsgrads von 100 Prozent auf die Primärenergie geschlossen. Einer durch Wind- oder Wasserkraft erzeugten Einheit elektrische Energie steht also die gleiche Energieeinheit auf der Primärenergieseite gegenüber. Eine Ausnahme stellt die Kernenergie dar, für die zur Berechnung des Primärenergieäquivalents ein pauschaler Wirkungsgrad von 33 Prozent angesetzt wird.

International hat sich die Wirkungsgradmethode weitgehend durchgesetzt. Sie ist auch die Grundlage der in den Abb. 1.2 und 1.3 angegebenen Werte. Die Annahme eines Wirkungsgrads von 100 Prozent für Wasser- und Windkraft sowie Photovoltaik führt jedoch zu einer tendenziellen Unterrepräsentation regenerativer Energien in den Primärenergiestatistiken.

→ Weiterlesen

Globale Energiestatistiken werden jährlich von der Internationalen Energie Agentur (IEA) herausgegeben [26]. Energiestatistiken für Deutschland werden regelmäßig durch das Bundeswirtschaftsministerium veröffentlicht [11]. Die Entwicklung des Einsatzes regenerativer Energien findet sich in der Veröffentlichung *Erneuerbare Energien in Zahlen* des Bundesumweltministeriums wieder [10]. Alle Informationen sind auch online verfügbar.

1.2 Grundprobleme des globalen Energiesystems

Die Probleme des globalen Energiesystems lassen sich in den drei Punkten

- Endlichkeit der fossilen und nuklearen Energieträger
- Verteilung von Ressourcenquellen und -senken
- Emission klimarelevanter Treibhausgase

zusammenfassen. Jeder einzelne Problembereich beschränkt die Elastizität des Energiesystems und damit die Handlungsmöglichkeiten zukünftiger Generationen. Die sich innerhalb dieser Rahmenbedingungen stellende Zukunftsaufgabe eines nach-

haltigen Energiesystems ist nur in einem globalen Kontext zu lösen. Bausteine dafür sind u.a. die Konferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung (UNCED) sowie das Kyoto-Protokoll.

1.2.1 *Begrenztheit der Ressourcen*

Die Diskussion um die Endlichkeit der Energieträger fokussiert sich schon seit vielen Jahren besonders stark auf das Erdöl. Jedoch weisen auch die anderen fossilen sowie die nuklearen Energieträger eingeschränkte Verfügbarkeiten auf. Setzt man für die Zukunft einen gleichbleibenden Verbrauch und die in Abb. 1.2 dargestellte prozentuale Aufteilung der einzelnen Energieträger voraus, so lassen sich anhand der derzeit nachgewiesenen Reserven⁵ die in Tab. 1.3 angegebenen globalen Reichweiten ableiten.

Tabelle 1.3 Reserven, Ressourcen und jährlicher Verbrauch fossiler und nuklearer Energieträger in EJ [7] sowie die daraus abgeleiteten Reichweiten (Stand 2011)

	Reserven	Ressourcen	Verbrauch	Reichweite
Erdöl	7.056	5.975	165	43 Jahre
Erdgas	7.173	11.858	124	58 Jahre
Stein- und Braunkohle	21.216	476.125	165	129 Jahre
Uran und Thorium	1.792	8.193	35	51 Jahre

Entscheidend für das weltweite Energiesystem ist jedoch nicht die theoretische Reichweite eines Energieträgers, sondern der Zeitpunkt, ab dem die Förderung beispielsweise von Erdöl die Nachfrage nicht mehr decken kann. Dieser Zeitpunkt hängt bei steigender Nachfrage stark von dem Erreichen des globalen Ölfördermaximums (peak-oil) ab. Es wird allgemein davon ausgegangen, dass das Ölfördermaximum wahrscheinlich innerhalb der nächsten 10 Jahre erreicht sein wird. Die meisten Förderländer haben ihr Ölfördermaximum bereits hinter sich: z.B. USA (1971), Großbritannien (1999), Norwegen (2001), Mexiko (2004). Ähnliche Untersuchungen lassen sich auch für Erdgas, Kohle und Kernbrennstoffe anstellen. Eine Verknappung und/oder Verteuerung der Energieträger wird also deutlich vor dem tatsächlichen Ende ihrer Reichweite auftreten, zuallererst beim Erdöl.

Die Zahlen aus Tab. 1.3 zeigen auch, dass – losgelöst von den Risiko- und Endlagerdiskussionen – die Kernenergie aufgrund ihrer Reichweite keine Alternative darstellt. Bei einem derzeitigen Anteil der Kernenergie am Weltenergiebedarf von knapp 6 Prozent beträgt die Reichweite der Kernbrennstoffe Uran und Thorium bei

⁵ Reserven bezeichnen die sicher nachgewiesenen und mit bekannter Technologie wirtschaftlich gewinnbaren Vorkommen. Darin nicht enthalten sind die als Ressourcen bezeichneten Vorkommen, die noch nicht wirtschaftlich zu fördern sind oder die aufgrund geologischer Indikatoren noch erwartet werden.

einem Einsatz in Leichtwasserreaktoren 51 Jahre. Wollte man den Anteil der Kernenergie verdoppeln, so würde sich die Reichweite entsprechend halbieren.

→ **Wie groß sind die Welterdölreserven?**

Die weltweiten Erdölreserven betragen $1,4 \cdot 10^{12}$ Barrel [34]. Um sich diese Zahl vorstellbar zu machen, soll eine Umrechnung pro Kopf der Weltbevölkerung erfolgen. Bei gut 7 Milliarden Menschen betragen die Welterdölreserven jedes lebenden Menschen (und aller seiner Nachfahren) 200 Barrel, was etwa 30.000 Litern entspricht.

1.2.2 *Gerechtigkeit der Verteilung*

Der weltweite Energieverbrauch und damit einhergehend auch die CO₂-Emissionen sind ungleichmäßig verteilt. Sie konzentrieren sich insbesondere auf Nordamerika und Europa. Tab. 1.4 gibt einen Überblick über den Primärenergieverbrauch unterschiedlicher Regionen und ihren Anteil an der Weltbevölkerung.

Tabelle 1.4 Bevölkerung, Primärenergieverbrauch und CO₂-Emissionen nach Regionen 2010 [26]

	Bevölkerung		Energieverbrauch		CO ₂ -Emission	
	in Mio.	anteilig	in EJ	anteilig	in Mt	anteilig
Welt	6.825	100 %	532	100 %	30.326	100 %
Afrika	1.022	15 %	29	5 %	930	3 %
Asien	3.828	56 %	201	38 %	12.752	35 %
- davon China	1.345	20 %	102	19 %	7.311	24 %
- davon Indien	1.171	17 %	29	5 %	1.626	5 %
Lateinamerika	580	9 %	33	6 %	1.551	5 %
Nordamerika	344	5 %	103	19 %	5.906	19 %
GUS	274	4 %	43	8 %	2.342	8 %
Europa, Japan, Ozeanien	778	11 %	108	20 %	5.750	19 %
- davon Deutschland	82	1 %	14	3 %	762	3 %

So sind beispielweise 5 Prozent der Weltbevölkerung in Nordamerika für 19 Prozent des Weltenergieverbrauchs und CO₂-Ausstoßes verantwortlich. Umgekehrt haben Schwellenländer wie Indien noch einen deutlich geringeren Anteil am Weltenergieverbrauch, als es ihrem Anteil an der Weltbevölkerung entspricht. Die ökonomische Entwicklung der Schwellenländer mit z.T. zweistelligen jährlichen Wachstumsraten geht mit einem steigenden Energiebedarf einher und verschärft die Ressourcenproblematik zusätzlich. Bereits jetzt zeichnen sich wachsende Konflikte um den Zugang zu energetischen Ressourcen beispielsweise zwischen China und den USA in Afrika ab [1][37].

1.2.3 Klimawandel

Die Emission klimarelevanter Treibhausgase - und hier insbesondere das CO_2 - haben in den letzten 150 Jahren zu einem Konzentrationsanstieg von etwa 40 Prozent in der Erdatmosphäre geführt. Abb. 1.4 zeigt die CO_2 -Konzentration in der Erdatmosphäre über den Zeitraum der letzten 1000 Jahre. Die seit dem Beginn der Industrialisierung im 19. Jahrhundert anwachsende Verbrennung fossiler Energieträger führt zu einer kurzfristigen Freisetzung von CO_2 , das über Jahrmillionen in Form von Kohle, Rohöl oder Naturgas in der Erdkruste eingeschlossen war. In Abb. 1.4

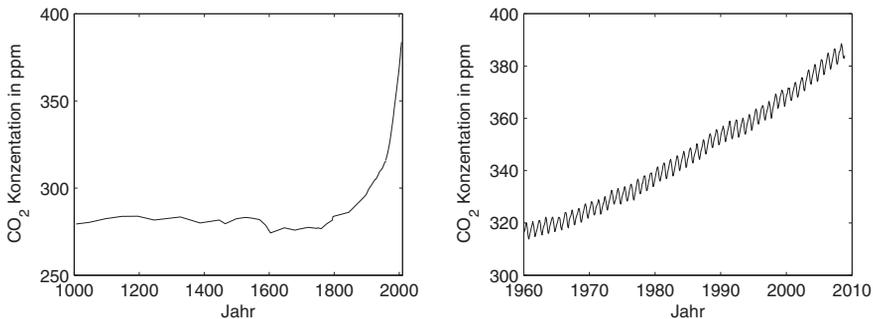


Abb. 1.4 CO_2 -Konzentration in der Erdatmosphäre. Die Werte vor 1960 wurden auf der Basis von Eisbohrkernen ermittelt [14]. Nach 1960 sind mittlere jährliche (links) bzw. mittlere monatliche Messwerte (rechts) der Station Mauna Loa auf Hawaii aufgetragen [40][41].

(rechts) sind die jahreszeitlichen Schwankungen der Kohlenstoffaufnahme durch die Pflanzen deutlich zu erkennen. Daran lässt sich die Größenordnung der CO_2 -Emissionen ermessen: Der anthropogene Anstieg der CO_2 -Konzentration weniger Jahre entspricht inzwischen der jahreszeitlichen Schwankungsbreite von Kohlenstoffassimilation und -respiration, d.h. dem Atmen der gesamten Biomasse.

Neben dem CO_2 gibt es weitere klimarelevante Treibhausgase, insbesondere Methan (CH_4) und Lachgas (N_2O). Während CO_2 , das für etwa 60 Prozent des anthropogenen Treibhauseffekts verantwortlich ist, überwiegend durch Prozesse im Energiesektor freigesetzt wird, werden Methan (ca. 20 Prozent des anthropogenen Treibhauseffekts) und Lachgas (ca. 5 Prozent des anthropogenen Treibhauseffekts) durch Landwirtschaft und Viehzucht verursacht. Diese weiteren Treibhausgase werden häufig entsprechend ihrer Klimawirksamkeit in CO_2 -Äquivalente umgerechnet und mit den CO_2 -Emissionen zusammengefasst.⁶ Der Energiesektor trägt insgesamt mit etwa 50 Prozent zur Emission klimarelevanter Treibhausgase bei.

Da die Erdatmosphäre die kurzwellige Sonnenstrahlung deutlich besser transmittiert als die langwellige Wärmestrahlung, führt eine Konzentrationserhöhung der Treibhausgase zu einer Verstärkung des Treibhauseffektes und damit zu einer Temperatur-

⁶ Der (100 Jahre)-Äquivalenzfaktor für Methan beträgt 25, der für Lachgas 298 [22], d.h. 1 kg Methan hat über einen Zeitraum von 100 Jahren eine Klimawirksamkeit wie 25 kg CO_2 .

erhöhung auf der Erde. Der anthropogene Treibhauseffekt wird sich bis zum Ende des 21. Jahrhunderts nur dann auf eine durchschnittliche Temperaturerhöhung von 2 bis 4 Kelvin begrenzen lassen, wenn die Treibhausgasemissionen drastisch eingeschränkt werden. Dies ist wissenschaftlich inzwischen unbestritten. Ein solcher Temperaturanstieg wird als an der Grenze des Beherrschbaren angesehen, wenngleich auch er einen starken Einfluss auf das Klima nach sich ziehen wird. Zu erwarten sind u.a. Veränderungen in der Niederschlagsverteilung, Verschiebung von Klima- und Vegetationszonen, Degradationserscheinungen von Böden und daraus folgend eine Verschlechterung der Welternährung [22]-[24].

Die steigende CO₂-Konzentration in der Erdatmosphäre führt auch zu einer verstärkten Lösung von CO₂ in den Ozeanen. Dies bremst einerseits den Anstieg, da die Ozeane als CO₂-Senken wirken. Andererseits wird dadurch der pH-Wert des Meerwassers hin zu saureren Werten verändert - mit bisher noch nicht abzusehenden Konsequenzen für die Ökosysteme der Ozeane.

→ Weiterlesen

1988 wurde das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) vom Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) und der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) ins Leben gerufen. Seine Aufgabe ist es, den wissenschaftlichen Kenntnisstand zum Klimawandel zusammenzutragen, Folgen abzuschätzen und Lösungsstrategien zu entwickeln. Die Ergebnisse dieser Arbeit werden in Sachstandsberichten zusammengefasst, die als Stand der Wissenschaft auf dem Gebiet des Klimawandels gelten können. Der 4. Sachstandsbericht erschien Ende 2007 [22]-[24]. Eine *Summary for Policymakers* fasst die wesentlichen Ergebnisse zusammen und ist auch auf Deutsch verfügbar [25]. Der 5. Sachstandsbericht wird derzeit zur Veröffentlichung vorbereitet und voraussichtlich 2014 erscheinen.

Ein kurze und gut lesbare Einführung in den Themenkomplex gibt das Buch *Der Klimawandel* von S. Rahmstorf und H.J. Schellnhuber, beides Wissenschaftler am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung [35].

Konkret bedeutet die Forderung nach einer drastischen Beschränkung der Treibhausgasemissionen, dass bis zum Jahr 2050 der weltweite CO₂-Ausstoß auf etwa 50 Prozent des Wertes von 1990 reduziert werden muss. Damit wäre eine Stabilisierung der CO₂-Konzentration in der Erdatmosphäre bei einem Wert von 450 ppm erreichbar, was nach derzeitigen Simulationen einer durchschnittlichen Temperaturerhöhung von 2 Kelvin bis zum Ende des Jahrhunderts entsprechen würde. Eine weitere wirtschaftliche Entwicklung der Schwellen- und Entwicklungsländer ist dabei nur möglich (vgl. Kapitel 1.2.2), wenn die Industriestaaten eine deutlich stärkere, in der Größenordnung von 80 Prozent liegende Reduktion ihres CO₂-Ausstoßes vornehmen.

1.2.4 Lösungsansätze

Die Lösung der drei in den vorangegangenen Kapiteln genannten Problemkomplexe ist nur in einem globalen Kontext möglich. Die dafür notwendigen politischen Entscheidungsprozesse verlaufen nicht immer linear und entlang der wissenschaftlichen Erkenntnisse. Häufig sind Kompromisse zu schließen oder Partikularinteressen dominieren bzw. blockieren den Entscheidungsprozess. Im Folgenden werden drei wichtige Schritte auf dem Weg zu einem nachhaltigen Energiesystem vorgestellt und diskutiert: Auf internationaler Ebene die UNCED-Konferenz und das Kyoto-Protokoll sowie auf bundesdeutscher Ebene das Erneuerbare-Energien-Gesetz.

UNCED-Konferenz und Nachhaltigkeitsdiskurs

1992 fand in Rio de Janeiro die Konferenz der Vereinten Nationen über Umwelt und Entwicklung (United Nations Conference on Environment and Development) statt. Die Konferenz formulierte im Rahmen ihrer Abschlusserklärung [30] das Ziel einer nachhaltigen Entwicklung⁷ der Erde. Dabei bezeichnet *Nachhaltigkeit* eine Entwicklung, die

- im Rahmen des von der Umwelt Verkraftbaren verbleibt,
- die Lebenschancen zukünftiger Generationen nicht schmälert sowie
- einen Ausgleich zwischen Nord und Süd herbeiführt.

Gleichzeitig wurden Versuche zur politischen Umsetzung unternommen, die über die bisher praktizierte staatliche Umwelt- und Entwicklungspolitik hinausgehen. Neben der Verabschiedung der Klimarahmenkonvention, die u.a. zum Kyoto-Abkommen führte, wurde mit der *Agenda 21* ein Aktionsprogramm für das 21. Jahrhundert verabschiedet, zu dessen Umsetzung sich über 170 Regierungen verpflichteten [31]. Diese hohe Zustimmung wurde jedoch durch rechtlich unverbindliche Formulierungen ermöglicht, so dass sich die Agenda 21 besser als ein Orientierungsrahmen gesellschaftlicher Entwicklung charakterisieren lässt. Als wichtigste Handlungsfelder werden u.a. die Armutsbekämpfung, der Schutz der Erdatmosphäre, der Erhalt und die Bewirtschaftung von Ressourcen wie Wasser, Fläche und Boden sowie der Erhalt der biologischen Vielfalt benannt. Die Agenda 21 weist insbesondere den Kommunen eine entscheidende Rolle bei der Umsetzung der Ziele zu und fordert eine umfassende Beteiligung der Öffentlichkeit sowie von Nichtregierungsorganisationen ein.

Die Berücksichtigung von Aspekten der Nachhaltigkeit beinhaltet einen Perspektivwechsel von Politik, da politische Entscheidungen nicht aus der Perspektive der jetzigen, sondern aus der Perspektive zukünftiger Generationen getroffen werden müs-

⁷ Der Begriff der Nachhaltigkeit stammt ursprünglich aus der Forstwirtschaft und bezeichnet eine Waldbewirtschaftung, die lediglich den jährlichen Holzzuwachs nutzt. Seit den 70er Jahren des letzten Jahrhunderts wird der Begriff auch auf den Bereich der Umwelt- und Entwicklungspolitik übertragen und ist heute zum zentralen Schlagwort der Zukunftsdiskussion geworden. Die Begriffe *nachhaltig* und *zukunftsfähig* werden daher oft synonym verwendet.

sen. Die Entwicklung von lokalen oder staatlichen Nachhaltigkeitsstrategien setzt messbare Ziele voraus, die häufig in Form von Nachhaltigkeitsindikatoren abgebildet werden. Für den kommunalen Bereich wurden beispielsweise in den *Aalborg Commitments* wesentliche Indikatoren herausgearbeitet, die von den Kommunen nun quantitativ untersetzt werden müssen [15]. Auf Bundesebene hat die im Jahr 2002 verabschiedete Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung 21 Indikatoren festgelegt und mit Zielwerten hinterlegt [12]. Der Energiebereich wird durch die in Tab. 1.5 aufgeführten Indikatoren wiedergegeben.

Tabelle 1.5 Energiebezogene Nachhaltigkeitsindikatoren und ihre Zielwerte gemäß der Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung sowie der aktuelle Stand [39]

Indikator	Zielwert	Istwert
Energieproduktivität	+100 % bis 2020	+37,4 % (2011)
	Basisjahr 1990	Basisjahr 1990
Verminderung der Treibhausgasemissionen	-40 % bis 2020	-25,3 % (2009)
	Basisjahr 1990	Basisjahr 1990
Anteil erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch	18 % bis 2020	10,9 % (2010)
	60 % bis 2050	
Anteil erneuerbarer Energien am Stromverbrauch	35 % bis 2020	17,0 % (2010)
	80 % bis 2050	

Nachhaltigkeit als globaler Orientierungsrahmen gesellschaftlicher Entwicklung ist jedoch nicht unumstritten. Kritiker sehen in dem Nachhaltigkeitsdiskurs lediglich eine Ablösung des Entwicklungsdiskurses: Der Entwicklungsdiskurs mit seinem Versprechen einer weltweiten Entwicklung nach dem Vorbild der industrialisierten Länder habe sich an den „Grenzen des Wachstums“ totgelaufen. Insofern wird der Nachhaltigkeitsdiskurs als Strategie angesehen, die ökologischen und sozialen Kosten der Globalisierung bezahlbar und moralisch durchsetzbar zu machen, ohne dass die tatsächlichen Machtverhältnisse dabei thematisiert werden [13][38].

Kyoto-Protokoll

Die 3. Vertragsstaatenkonferenz der Klimarahmenkonvention verabschiedete 1997 das Kyoto-Protokoll. Darin wurden erstmals konkrete Reduktionsziele für die wichtigsten klimarelevanten Treibhausgase und für unterschiedliche Staatengruppen festgeschrieben sowie Instrumente für einen Handel mit Emissionen vorgesehen. Insgesamt hatten sich die Industriestaaten vertraglich verpflichtet, ihre Emissionen klimarelevanter Treibhausgase bis 2012 um mindestens 5,2 Prozent unter das Niveau von 1990 zu senken. Dabei wurden je nach Ausgangslage unterschiedliche Reduktionsziele für die einzelnen Staaten festgelegt (vgl. Tab. 1.6). Insbesondere der Transformationsprozess der osteuropäischen Industrien hatte im Jahr der Verabschiedung in den betroffenen Staaten bereits zu einem deutlichen Rückgang der Emissionen im Vergleich zu 1990 geführt – so auch in Deutschland.

Neben den Reduktionszielen wurden drei Mechanismen definiert, über die Staaten ihre Reduktionsverpflichtungen in anderen Staaten erbringen können:

- Emissionshandel zwischen Industrieländern,
- Klimaschutzprojekte zwischen Industrieländern und
- Klimaschutzprojekte zwischen Industrie- und Entwicklungsländern.

Dahinter stand einerseits das Ziel, Emissionen handelbar zu machen und damit als Kosten zu internalisieren. Andererseits sollten dadurch Klimaschutzprojekte dort gefördert werden, wo sie – bezogen auf die Investitionssumme – den größten Effekt erzielen. Ein weiterer Mechanismus erlaubte bis zu einer bestimmten Obergrenze die Anrechnung von CO₂-Senken auf die eigenen Reduktionsverpflichtungen. Dabei handelt es sich beispielsweise um Projekte zur Wiederaufforstung, mit denen atmosphärisches CO₂ in Biomasse eingebunden wird.

Tabelle 1.6 Emissionen im Basisjahr 1990, Emissionsänderungen gemäß Kyoto-Protokoll und derzeit tatsächlich erreichte Emissionsänderungen ohne Anrechnung von Senken [42]

	Emissionen (1990) Mio t CO ₂ -Äquivalente	Emissionsänderung Kyoto-Ziel	Emissionsänderung Ist 2010
USA	6.161	-7,0 %	+10,4 %
EU	4.249	-8,0 %	-10,6 %
Rußland	3.350	±0,0 %	-34,1 %
Japan	1.266	-6,0 %	-0,7 %
Deutschland	1.246	-21,0 %	-24,8 %
Ukraine	929	±0,0 %	-58,8 %
Großbritannien	772	-12,5 %	-22,4 %
Kanada	589	-6,0 %	+17,4 %

Die Vertragsstaatenkonferenz hatte sich für das Inkrafttreten des Kyoto-Protokolls auf eine Ratifizierung durch mindestens 55 Staaten, die für mindestens 55 Prozent der CO₂-Emissionen der Industrieländer verantwortlich sind, festgelegt. Durch die Weigerung der USA, das Kyoto-Protokoll zu ratifizieren, konnte es erst mit der Ratifizierung durch Russland Anfang 2005 in Kraft treten.

Das Kyoto-Protokoll kann nur als ein erster Schritt zur Reduzierung der Emission klimarelevanter Treibhausgase angesehen werden. Auf der einen Seite war das Inkrafttreten des Protokolls ein Beleg für die (damalige) Handlungsfähigkeit der internationalen Staatengemeinschaft angesichts des Klimawandels und für den Stellenwert, den dieser einnimmt. Auf der anderen Seite waren die vereinbarten Reduktionsziele von 5,2 Prozent bis 2012 für die Industriestaaten niedrig und wurden durch eine Steigerung der Emissionen in den Entwicklungs- und Schwellenländern kompensiert. Darüber hinaus beruhte der Rückgang der Emissionen in den Industrieländern überwiegend auf Sondereffekten wie dem ökonomischen Niedergang des Ostblocks und weniger auf eigenen Klimaschutzbemühungen (vgl. Tab. 1.6).

Die im Rahmen der UN-Weltklimakonferenz stattfindenden internationalen Verhandlungen über ein Nachfolgeabkommen sind bisher gescheitert. Insbesondere auf der 15. Weltklimakonferenz 2009 in Kopenhagen traten die unterschiedlichen Vor-

stellungen deutlich zu Tage: Schwellenländer wie China und Indien lehnten eine Begrenzung der CO₂-Emissionen zwar nicht grundsätzlich ab, forderten aber von den Industrieländern einen deutlich größeren Beitrag ein, als diese zu leisten bereit waren. Auf der 18. Weltklimakonferenz 2012 in Doha wurde als Minimalkonsens eine weitgehend unverbindliche Verlängerung des Kyoto-Protokolls bis 2020 beschlossen.

Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)

Die internationalen Vereinbarungen spiegeln sich auf nationaler Ebene wider. Die aktuellen Klimaschutzziele der deutschen Bundesregierung gehen über das Kyoto-Protokoll hinaus und beinhalten eine Reduktion des CO₂-Ausstoßes um 40 Prozent bis zum Jahr 2020 im Vergleich zu 1990. Dies soll vor allem durch einen starken Ausbau der regenerativen Energien erreicht werden. Ziel ist für das Jahr 2020 ein Anteil regenerativer Energien am Strombedarf von 35 Prozent (2011: 20,3 Prozent) und am Endenergiebedarf für Wärme von 14 Prozent (2010: 11 Prozent)⁸ [10]. Die Umsetzung der Ausbauziele soll durch ein Markteinführungsprogramm für regenerative Energien erreicht werden. Kernpunkt ist das im Jahr 2000 verabschiedete und zuletzt 2012 novellierte Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), das aus dem bereits 1991 verabschiedeten Stromeinspeisegesetz hervorgegangen ist. Es beinhaltet vier wesentliche Maßnahmen:

- Vorrang für regenerative Energien: Anlagen zur Erzeugung regenerativer Energien sind bevorzugt an das Netz anzuschließen und die elektrische Energie ist vorrangig abzunehmen und zu vergüten. Bei Überkapazitäten ist die Energieerzeugung konventioneller Kraftwerke zu verringern.
- Kostendeckende Einspeisevergütung: Über einen Zeitraum von 20 Jahren wird eine feste Einspeisevergütung gewährt, deren Höhe kostendeckend ist und von der Art der eingesetzten Technologie abhängt.
- Umlagefinanzierung: Die durch die kostendeckende Einspeisevergütung entstehenden Mehrkosten werden auf alle Stromabnehmer umgelegt.
- Degression der Einspeisevergütung: Die gezahlte Einspeisevergütung verringert sich mit jedem Jahr, das die Anlage später in Betrieb genommen wird. Die Höhe der Degression orientiert sich am technischen Fortschritt und wird regelmäßig vom Gesetzgeber angepasst.

Mit diesen Maßnahmen konnte in den vergangenen Jahren der Anteil regenerativer Energien in Deutschland kontinuierlich gesteigert werden (vgl. Abb. 11.1). Das wachsende Marktvolumen hatte eine stürmische Weiterentwicklung sowohl der eingesetzten Technologien als auch der Produktionsverfahren zur Folge. Das damit einhergehende Sinken der Produktionskosten wird durch die Degression der Einspeisevergütung abgeschöpft und gleichzeitig stimuliert. Dadurch nähert sich die

⁸ Zur Erreichung der Ziele im Wärmemarkt hat die Bundesregierung Ende 2008 das Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz und die Novelle des Kraft-Wärme-Kopplungsgesetzes verabschiedet.

Einspeisevergütung dem Marktpreisniveau, das selbst bei der Photovoltaik inzwischen für Privathaushalte erreicht ist.

Der Erfolg des deutschen Markteinführungsprogramms führte in vielen europäischen Staaten zu ähnlichen, auf Einspeisegesetzen basierenden Regelungen, so z.B. in den Niederlanden, Dänemark, Frankreich, Spanien oder Portugal.

Derzeit stößt das EEG erstmals an seine Grenzen: Ein Vorrang für regenerative Energien und eine kostendeckende Einspeisevergütung setzen voraus, dass die erzeugte Energie auch vollständig vom Netz aufgenommen werden kann. Dies ist sowohl im Bereich der Windenergie als auch der Photovoltaik nicht mehr der Fall (vgl. Kap. 11), d.h. ein Abregeln regenerativer Erzeugungsanlagen ist immer öfter aus Gründen der Netzstabilität notwendig. Daher wird für das Jahr 2014 eine grundlegende Änderung des Markteinführungsprogrammes für regenerative Energien im Strombereich erwartet.

1.3 Szenarien einer zukünftigen Entwicklung

Die Diskussion über die zukünftige Entwicklung der Menschheit – und hier insbesondere die Aspekte der Umwelt und der Ressourcen – wurde in den vergangenen Jahrzehnten durch zwei wissenschaftliche Studien geprägt. Den Auftakt machte 1972 die Veröffentlichung *Die Grenzen des Wachstums* durch den Club of Rome, einer internationalen Denkfabrik zu Zukunftsfragen [33]. Die Studie untersuchte die Wechselwirkung von Industrialisierung, Bevölkerungswachstum, Welternährung sowie Umwelt- und Ressourcenverbrauch für eine Reihe unterschiedlicher Grundannahmen. Die Schlussfolgerung der Autoren

If the present growth trends in world population, industrialization, pollution, food production, and resource depletion continue unchanged, the limits to growth on this planet will be reached sometime within the next one hundred years. The most probable result will be a rather sudden and uncontrollable decline in both population and industrial capacity.

sorgte für Aufsehen, da sie die Tragfähigkeit des westlichen Entwicklungsmodells grundsätzlich in Frage stellte. Auf einer wesentlich breiteren Datenbasis erschien 1980 die von US-Präsident Carter in Auftrag gegebene Studie *Global 2000*, die Szenarien bis zur Jahrtausendwende entwickelte [2]. Ihre Einschätzung der zukünftigen Entwicklung fassen die Autoren wie folgt zusammen:

If present trends continue, the world in 2000 will be more crowded, and more vulnerable to disruption than the world we live in now. Serious stresses involving population, resources, and environment are clearly visible ahead. Despite greater material output, the world's people will be poorer in many ways than they are today.

Wenngleich der Großteil der aufgezeigten Szenarien auf Grund der z.T. extremen Grundannahmen nicht eingetreten ist, haben beide Studien die zentralen globalen Problemfelder herausgearbeitet und Handlungsmöglichkeiten aufgezeigt.

1.3.1 Energiepotenziale

Um den möglichen Beitrag eines Primärenergieträgers zur Energieversorgung abschätzen zu können, unterscheidet man unterschiedliche Potenzialbegriffe:

Das *theoretische Potenzial* bezeichnet die physikalisch maximal aufschließbare Energiemenge eines Energieträgers oder einer Energiequelle. Dabei können theoretisch maximale Umwandlungswirkungsgrade sowie Technologien vorausgesetzt werden, die zwar noch nicht konkret vorliegen, aber mit den derzeitigen natur- und ingenieurwissenschaftlichen Grundlagen begründet werden können. Das *technische Potenzial* schränkt das theoretische Potenzial hinsichtlich des Stands der Technik, derzeit erreichbarer Wirkungsgrade sowie Standortverfügbarkeiten und produktionstechnischer Beschränkungen ein. Das *wirtschaftliche Potenzial* begrenzt das technische Potenzial hinsichtlich ökonomischer Randbedingungen. Das *Erwartungspotenzial* schließlich bezieht sich immer auf einen bestimmten Zeitraum und ergibt sich aus dem wirtschaftlichen Potenzial unter der Berücksichtigung von Markteinführungsgeschwindigkeiten und anderer Hemmnisse wie z.B. Informationsdefiziten.

→ Technisches Potenzial der regenerativen Energien in Deutschland

Die folgende Tabelle gibt das technische Potenzial verschiedener regenerativer Energieträger in Deutschland an (nach [10]).

Energieträger	Ertrag in TWh/a	Leistung in MW
<i>Stromerzeugung</i>		
Photovoltaik	150 (25 %)	165.000
Windenergie (Onshore)	175 (29 %)	70.000
Windenergie (Offshore)	280 (46 %)	70.000
Wasserkraft	25 (4 %)	5.200
Geothermie	90 (15 %)	15.000
Biomasse	60 (10 %)	10.000
<i>Wärmeerzeugung</i>		
Solarthermie	400 (31 %)	
Geothermie	300 (23 %)	
Biomasse	170 (13 %)	
<i>Kraftstoffe</i>		
Biomasse	90 (15 %)	

Die Prozentangabe hinter den Ertragswerten gibt das Verhältnis des technischen Potenzials zu dem Energieverbrauch des Jahres 2011 in dem betreffenden Sektor wieder. Bei den Werten für Photovoltaik und Solarthermie wurden nur geeignete Dach-, Fassaden- und Siedlungsflächen berücksichtigt. Die Nutzung der Biomasse zur Stromerzeugung erfolgt teilweise in Kraft-Wärme-Kopplung.

Die einzelnen Potenzialbegriffe sollen zunächst am Beispiel der Wasserkraft verdeutlicht werden. Das theoretische Potenzial der Wasserkraft bezeichnet die potenti-