

Valentin Crastan
Michael Höckel

Elektrische Energieversorgung 2

Energiewirtschaft und Klimaschutz,
Elektrizitätswirtschaft und
Liberalisierung, Kraftwerktechnik
und alternative Stromversorgung,
chemische Energiespeicherung

5. Auflage



Springer Vieweg

Elektrische Energieversorgung 2

Valentin Crastan · Michael Höckel

Elektrische Energieversorgung 2

Energiewirtschaft und Klimaschutz,
Elektrizitätswirtschaft und
Liberalisierung, Kraftwerktechnik
und alternative Stromversorgung,
chemische Energiespeicherung

5., überarbeitete Auflage

Valentin Crastan
Evilard, Schweiz

Michael Höckel
Prof. für Energiesysteme
Berner Fachhochschule
Biel/Bienne, Bern, Schweiz

ISBN 978-3-662-65104-9 ISBN 978-3-662-65105-6 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-65105-6>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert an Springer-Verlag GmbH, DE, ein Teil von Springer Nature 2004, 2009, 2012, 2017, 2022

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, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

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.

Planung: Dr. Daniel Fröhlich

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Vorwort

Der Klimawandel ist in den letzten Jahren durch die kontinuierliche Zunahme der globalen Temperatur und durch das vermehrte Auftreten von regionalen Extremwetterereignisse sichtbar geworden. Die Politik scheint nun auch weltweit die Notwendigkeit von Maßnahmen zur Begrenzung des Klimawandels begriffen zu haben und der Umbau der Energieversorgung auf erneuerbare Energieflüsse schreitet in vielen Ländern voran. So wird in Deutschland zeitweise der gesamte Elektrizitätsbedarf mit Sonnen-, Wind- und Biomasseenergie gedeckt. Mit der Zunahme der stochastischen Einspeisung aus diesen Energiequellen nimmt nun auch die Nachfrage nach Technologien zur Energiespeicherung zu.

Die vorliegende 5. Auflage wurde neu gemeinsam von V. Crastan und M. Höckel herausgegeben. Dabei haben sie gemeinsam mit den Co-Autoren versucht, die Entwicklungen der letzten Jahre in allen Themen zu berücksichtigen.

Zum Thema Klimaschutz wurden Kap. 1 und die Anhänge C und D entsprechend den statistischen Daten der IEA und des IMF aktualisiert. Die Struktur der Kap. 2 und 3 wurde vollständig überarbeitet und dabei wurden einzelne Themen zwischen den Kapiteln verschoben. In Kap. 2 sind neu alle „Energiewirtschaftliche Grundlagen“ zusammengefasst. Abschnitte, die sich in Kap. 3 mit den Technologien zur Erzeugung von elektrischer Energie beschäftigen, wurden in die entsprechenden Kap. 4 und 5 verschoben. Zusätzlich wurden die Zusammenfassungen am Anfang der jeweiligen Kapitel ausgebaut. Sie ermöglichen dem Leser einen Überblick über die wichtigsten Informationen und Erkenntnisse aus den nachfolgenden Inhalten geben.

Als neuer Co-Autor unterstütze Dr. Andreas Beer die Überarbeitung der Informationen zum liberalisierten Strommarkts der Schweiz (Abschn. 3.3). Dabei stellte ihm die Elcom dankenswerterweise aktuelle Informationen zur Verfügung. Herr Prof. Dr.-Ing. Jochen Kreusel aktualisierte seine Übersicht zur Funktionsweise liberalisierter Elektrizitätsmärkte (Abschn. 3.4). Ebenfalls sei Cord Dustmann gedankt für die Aufwertung des Unterkapitels (10.2.3.) zur Natrium-Nickel Chlorid Batterie sowie Dr. Andrea Vezzini für die Aktualisierung seines Abschn. 10.3 über Lithiumionen-Akkumulatoren.

Die Autoren hoffen mit der vorliegenden 5. Auflage einen Band herauszugeben, in welchem die energiewirtschaftlichen Zusammenhänge und der aktuelle Stand der Technologien zur Nutzung von erneuerbaren Energien und zur Speicherung möglich umfassend und verständlich beschrieben werden.

Evilard
Spiez
im Februar 2022

V. Crastan
M. Höckel

Vorwort zur 1. Auflage

Der im Jahr 2000 erschienene Band 1 des nun vorliegenden zweibändigen Werkes „Elektrische Energieversorgung“ behandelt die elektrotechnischen Grundlagen, die Modellierung der Elemente des Drehstromnetzes, das stationäre und quasi-stationäre Verhalten symmetrischer Netze und von Netzen mit Unsymmetrien sowie die Grundlagen der Netzelement-Bemessung, der Schaltvorgänge und der Schutztechnik.

In Band 2 werden diese vor allem die Energieübertragung und -verteilung betreffenden Ausführungen durch die energie- und insbesondere die elektrizitätswirtschaftlichen Aspekte ergänzt, wozu auch die Kraftwerktechnik und alternative Arten der Stromerzeugung gehören. Breiten Raum finden ferner die Fragen der Dynamik und Stabilität des Energieversorgungsnetzes und die mit der Planung und Betriebsführung zusammenhängenden Probleme. Obwohl gut 60 % des Buches von mir stammen und dieses somit Monographie-Charakter hat, sind wesentliche Beiträge von den auf Seite XXV aufgeführten Ko-Autoren geleistet worden, denen ich meinen herzlichsten Dank ausspreche.

Der aus fünf Teilen und einem Anhang bestehende Band 2 gliedert sich wie folgt:

Teil I widmet sich den energiewirtschaftlichen Grundfragen unter Einbezug ökologischer Aspekte sowie den Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsrechnung. Einen breiten Raum nehmen dann die Fragen der Marktöffnung ein, die durch den Beitrag von Dr. J. Kreusel zur Funktionsweise liberalisierter Strommärkte wesentlich vertieft und mit den Ausführungen von Prof. M. Höckel zu den Themen Risikomanagement und Strompreisgestaltung abgerundet werden.

Teil II behandelt die konventionelle auf Wasserkraft sowie auf fossile und nukleare Brennstoffen basierende Kraftwerktechnik einschl. Modellierung und Dynamik. Die Ausführungen zu den für die Zukunft wichtigen Kombikraftwerken sind durch einen Beitrag von H. Kleinen ergänzt. Ein Abschnitt über die ökologisch wichtige Wärmepumpe rundet den Aspekt Energieumwandlung ab.

Teil III betrifft die alternativen Methoden der Stromproduktion, ihre Technik und Aussichten. Besonders erwähnt seien die Windkraft, die Photovoltaik, die Kernfusion und die Brennstoffzelle.

Teil IV setzt sich mit den Fragen der Regelung und Stabilität des Energieversorgungsnetzes auseinander. Die z.T. bereits in Band 1 behandelten Modellierungsprobleme werden ergänzt und vertieft und die heute vorhandenen

Werkzeuge zur Simulation komplexer Netze im Beitrag von Dr. M. Pöller beschrieben. Außerdem werden die Fragen der Netzregelung und die Probleme der Polradwinkel- und der Spannungsstabilität eingehend behandelt. Eine Analyse der Polradwinkelstabilität in ausgedehnten Netzen (UCTE-Netz) und der Ursachen entsprechender Polradwinkelpendelungen findet sich im Beitrag von Prof. Dr. H. Weber.

Teil V erörtert zuerst das Betriebsoptimierungsproblem für das vertikal integrierte Energieversorgungssystem und geht dann auf die durch die Marktöffnung und den Wettbewerb sich aufdrängenden Änderungen ein. Der Fall der Betriebsoptimierung bei ausgehandeltem Netzzugang wird im Beitrag von Dr. J. Kreusel vertieft. Eine wesentliche Innovation im Bereich der Steuerung und Optimierung des Energieversorgungsnetzes stellen die FACTS dar, deren Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten in dem von Dr. D. Westermann verfassten Kap. 15 eingehend behandelt werden. Da gerade wegen der Marktöffnung auch die Fragen der Leit- und Informationstechnik an Bedeutung zunehmen, befassen sich zwei Beiträge von Dr. R. Apel (Kap. 16) und O. Vollmeier (Kap. 17) aus verschiedenen Blickwinkeln mit diesem Fragenkomplex.

Im Anhang sind in erster Linie physikalisch-mathematische Grundlagen, die für das vertiefte Verständnis einiger Kapitel notwendig sind, wie thermodynamische und kernphysikalische Grundlagen oder Grundbegriffe der Dynamik, Regelungstechnik und Optimierungsrechnung, gegeben. Die Lösungen der Aufgaben und einige Tabellen und Grafiken finden sich ebenfalls im Anhang.

Für die Durchsicht des Abschnitts Kernfusion und einige nützliche Hinweise bin ich Dr. Kurt Appert, ETHL, zu Dank verpflichtet, ebenso danke ich Dr. Ulf Bossel für die Durchsicht des Abschnitts Brennstoffzellen. Den Ko-Autoren möchte ich nochmals für ihre wesentlichen Beiträge danken. Dem Springer-Verlag sei für die stets angenehme und insbesondere Frau G. Maas für Ihre engagierte Zusammenarbeit gedankt.

Biel
im Juni 2003

V. Crastan

Inhaltsverzeichnis

Teil I Energiewirtschaft, Elektrizitätswirtschaft

1	Energiewirtschaft und Klimaschutz	3
1.1	Grundbegriffe, geschichtlicher Rückblick	3
1.1.1	Energiesektor	3
1.1.2	Nutzprozesse	5
1.1.3	Geschichtlicher Rückblick	5
1.1.4	Perspektiven und Probleme	7
1.2	Verfügbarkeit der Primärenergie	7
1.2.1	Nicht erneuerbare Energien	8
1.2.2	Erneuerbare Energien	12
1.2.3	Potential und Nutzung der wichtigsten Solarenergiearten	14
1.2.4	Ökologische Probleme	20
1.3	Energiebedarf, CO ₂ -Emissionen, Indikatoren	22
1.3.1	Allgemeines	22
1.3.2	Endenergie und Verluste des Energiesektors	23
1.3.3	Weltweiter Bruttoenergiebedarf, Energiesektor	24
1.3.4	CO ₂ -Emissionen und Indikatoren	25
1.4	Energieverbrauch und CO ₂ -Emissionen in Europa	27
1.4.1	Bevölkerung und Bruttoinlandsprodukt	27
1.4.2	Energieverbrauch pro Kopf	28
1.4.3	Energieintensität und CO ₂ -Emissionen	30
1.4.4	Endenergie und Verluste des Energiesektors in der EU-15	30
1.4.5	Länder mit mehr als 30 Mio. Einwohner	30
1.5	Weltweiter Energiebedarf	35
1.5.1	Energieverbrauch in der Vergangenheit	35
1.5.2	Energiebedarf, Bevölkerung und BIP in 2017	37
1.5.3	Primär- und Endenergie und ihre Verteilung 2017	41
1.6	Zukünftige Entwicklung des Weltenergiebedarfs	53
1.6.1	Entwicklung der Weltbevölkerung	54
1.6.2	Zunahme des BIP (KKP) und Energienachfrage	56
1.7	CO ₂ -Emissionen und Klimaschutz	57

1.7.1	Klimaschutz, mittel- und langfristige Maßnahmen	57
1.7.2	Elektrizitätsverbrauch und Klimaschutz	61
1.7.3	Transportbereich	64
1.7.4	Wärmebereich	66
	Literatur.	66
2	Energiewirtschaftliche Grundlagen	69
2.1	Verbrauch elektrischer Energie	70
2.1.1	Struktur des Elektrizitätsverbrauchs	71
2.1.2	Schwankungen des Elektrizitätsbedarfs.	72
2.2	Deckung des Elektrizitätsbedarfs.	74
2.2.1	Kraftwerkarten	74
2.2.2	Kraftwerkeinsatz	75
2.2.3	Wasserspeicherung.	78
2.2.4	Energieaustausch	79
2.2.5	Leistungsbilanzen und Netzstabilität	80
2.3	Investitionsrechnung, Diskontierungsverfahren.	82
2.3.1	Kapitalwertmethode	82
2.3.2	Annuitätenmethode	84
2.4	Kosten der Energie.	85
2.4.1	Kosten der elektrischen Energie.	86
2.4.2	Spezifische Energiekosten an den Kraftwerksklemmen.	87
2.4.3	Spezifische Jahreskosten der Kraftwerke.	89
2.4.4	Kosten der elektrischen Energie am Verbraucher	89
2.4.5	Einfluss der stochastischen Einspeisung von Windenergie und Solarenergie.	91
2.5	Strompreisgestaltung	92
2.5.1	Verteilung der Selbstkosten	93
2.5.2	Stromtarife	102
	Literatur.	110
3	Elektrizitätswirtschaft, Liberalisierung	111
3.1	Wettbewerb im Elektrizitätssektor.	111
3.1.1	Einführung	111
3.2	Grundpfeiler des Wettbewerbs und Probleme	112
3.2.1	Konkurrenz zwischen Produzenten	112
3.2.2	Reorganisationsmodelle.	114
3.2.3	Trennung von Netz und Energie – Bilanzgruppen.	118
3.2.4	Privatisierung, Regulierung der Monopole	121
3.2.5	Konsequenzen der Marktöffnung.	122
3.3	Der liberalisierte Strommarkt in der Schweiz	123
3.3.1	Allgemeine Voraussetzung für einen funktionierenden Elektrizitätsmarkt.	123
3.3.2	Daten zur schweizerischen Elektrizitätsversorgung.	131
3.3.3	Entwicklung zum Strommarkt CH.	135
3.3.4	Kernthemen des Strommarkts CH	138

3.3.5	Transparenz durch Sunshine-Regulierung	154
3.3.6	2. Stufe der Marktöffnung/Anreizregulierung	155
3.4	Funktionsweise liberalisierter Elektrizitätsmärkte	156
3.4.1	Motivation für Privatisierung und Liberalisierung	156
3.4.2	Der Aufbau wettbewerblich organisierter Elektrizitätsmärkte	162
3.4.3	Dienstleistungsmarkt	172
3.4.4	Wettbewerbsmarkt	183
3.4.5	Besonderheiten internationaler Realisierungen liberalisierter Elektrizitätsmärkte	204
3.4.6	Erfahrungen in liberalisierten Märkten	210
3.4.7	Ausblick auf Anforderungen in Elektrizitätsversorgungssystemen mit sehr hohem Anteil erneuerbarer Energiequellen – Smart Grids in liberalisierten Märkten	220
3.5	Risikomanagement in der Elektrizitätswirtschaft	223
3.5.1	Enterprise Risk-Management (Theorie)	224
3.5.2	Enterprise Risk-Management (Praxis)	264
	Literatur	282

Teil II Kraftwerktechnik, Energieumwandlung

4	Wasserkraftwerke	287
4.1	Einführung	287
4.2	Hydrologische Planungsgrundlagen	290
4.3	Laufkraftwerke	292
4.3.1	Wasserbewirtschaftung	293
4.4	Speicherkraftwerke	296
4.4.1	Tages- und Wochenspeicherwerke	296
4.4.2	Jahresspeicherwerke (Saisonspeicherwerke)	298
4.4.3	Pumpspeicherung	302
4.5	Wasserturbinen	303
4.5.1	Pelton-Turbine	304
4.5.2	Reaktionsturbinen	309
4.5.3	Turbinenwahl	319
4.5.4	Kleinwasserkraftwerke	321
4.6	Dynamik	322
4.6.1	Druckstollen	323
4.6.2	Wasserschloss	324
4.6.3	Starre Druckleitung	325
4.6.4	Gesamtmodell des hydraulischen Systems	325
4.6.5	Elastischer Druckstoß	328
4.6.6	Gesamtmodell des hydraulischen Systems mit Elastizität	332
4.6.7	Wasserturbinen- und Wasserkraftwerk-Modell	332
	Literatur	338

5	Thermische Kraftwerke	341
5.1	Einführung	341
5.2	Dampfkraftprozess	346
5.2.1	Rankine- und Clausius-Rankine-Kreisprozess	346
5.2.2	Zwischenüberhitzung und Speisewasservorwärmung	348
5.3	Gasturbinenprozess	350
5.3.1	Einfacher offener Gasturbinenprozess (Joule-Prozess)	350
5.3.2	Rekuperation	353
5.3.3	Carnotisierung	355
5.4	Kombiprozesse	356
5.5	Wärme-Kraft-Kopplung	359
5.5.1	Entnahme-Kondensationsschaltung	359
5.5.2	Gegendruckanlage	361
5.5.3	Gasturbinen	362
5.5.4	Blockheizkraftwerke	363
5.5.5	Wärme-Kraft-Kopplung und CO ₂ -Produktion	364
5.6	Fossilgefeuerte Dampfkraftwerke	364
5.6.1	Luft-Brennstoff-Rauchgas/Asche-Kreislauf	364
5.6.2	Wasser-Dampf-Kreislauf, Verluste	364
5.6.3	Kühlwasserkreislauf	366
5.6.4	Blockregelung	367
5.6.5	Dynamik	372
5.7	Kernkraftwerke	375
5.7.1	Energiegewinnung durch Kernspaltung	375
5.7.2	Reaktorkonzepte	378
5.7.3	Dampfkreisprozess und Regelung	380
5.7.4	Reaktorsicherheit und Brennstoffkreislauf	380
5.7.5	Risiken der Kernkraft	383
5.7.6	Wirkung der Radioaktivität	389
5.8	Kraftwerke mit kombiniertem Gas- und Dampfprozess	392
5.8.1	GUD-Kraftwerke	392
5.8.2	GUD- Kraftwerke mit Zusatzfeuerung im Abhitzeessel	395
5.8.3	Verbundkraftwerke	395
5.8.4	Kombikraftwerk mit nachgeschaltetem atmosphärischem Dampferzeuger	396
5.8.5	Kraftwerke mit Kohleumwandlung unter Druck	397
5.8.6	Dynamisches Verhalten	397
5.9	Kraftwerksleittechnik	399
5.9.1	Entwicklung	399
5.9.2	Aufbau	400
5.9.3	Ausblick	402
	Literatur	402

6	Die Wärmepumpe	405
6.1	Energiewirtschaftliche Bedeutung	405
6.1.1	Exergetischer Vergleich	406
6.1.2	Vergleich der Energie-Nutzungsgrade	407
6.2	Prinzip und Aufbau	411
6.2.1	Der idealisierte Kreisprozess	411
6.2.2	Der reale Kreisprozess	413
6.2.3	Leistungsziffer und Arbeitszahl	415
6.3	Einsatz	416
6.3.1	Verlauf der Außentemperatur	416
6.3.2	Art und Bemessung der Wärmeverteilungsanlage	417
	Literatur	419
 Teil III Alternative Stromerzeugung, chemische Energiespeicher		
7	Windkraftwerke	423
7.1	Einführung	423
7.2	Die kinetische Energie des Windes	427
7.2.1	Theoretische Windleistung	427
7.2.2	Windgeschwindigkeit	428
7.2.3	Energieangebot	429
7.2.4	Die Weibull-Verteilung	430
7.3	Windradtypen und ihre Leistung	433
7.4	Horizontalachsige Windrotoren	435
7.4.1	Theorie von Betz	435
7.4.2	Tragflügeltheorie	437
7.5	Moderne horizontalachsige Windturbinen	439
7.6	Andere Windradtypen	440
7.6.1	Der Darrieus-Rotor	440
7.6.2	Der Savoniusrotor	444
7.7	Betrieb und Regelung, Auslegung	447
7.7.1	Leistung und Betriebsarten	447
7.7.2	Leistungsregelung	448
7.7.3	Netzbetrieb	449
7.7.4	Inselbetrieb	450
	Literatur	451
8	Photovoltaik	453
8.1	Einführung	453
8.2	Physikalische Grundlagen, fotoelektrischer Effekt	462
8.2.1	Photoleitung	464
8.2.2	Der P-N-Übergang	465
8.3	Photovoltaischer Effekt, Photostrom	467
8.4	Solarzelle, Gesamtwirkungsgrad	474

8.4.1	Kennlinie und Ersatzschema	474
8.4.2	Leerlaufspannung.	477
8.4.3	Füllfaktor	478
8.4.4	Gesamtwirkungsgrad	480
8.4.5	Möglichkeiten zur Wirkungsgradverbesserung	480
8.4.6	Solarzellentypen.	482
8.5	Die Sonne als Energiequelle	484
8.5.1	Extraterrestrische Strahlungsintensität.	484
8.5.2	Scheinbare Sonnenbewegung relativ zur Erde.	485
8.5.3	Berechnung des Sonnenstands	488
8.5.4	Berechnung der Strahlungsintensität	489
8.5.5	Strahlungsenergie pro Tag	490
8.5.6	Wirkung der Atmosphäre	493
8.5.7	Strahlungsintensität mit Atmosphäre	494
8.6	Systemtechnik	497
8.6.1	Solarmodule und Solargeneratoren	497
8.6.2	Inselsysteme.	497
8.6.3	Netzgekoppelte PV-Anlagen	498
8.6.4	Wechselrichter	499
8.6.5	Modellierung der Solarmodule	501
	Literatur.	505
9	Wasserstoff und Brennstoffzellen	507
9.1	Nutzung von Wasserstoff als Endenergieträger	507
9.2	Aufbau und Typen	510
9.3	Prinzip und Modell	512
9.3.1	Elektrochemische Grundlagen	512
9.3.2	Lineares Modell	514
9.4	Brennstoffzellen für stationäre Anwendungen.	515
9.4.1	Phosphorsäure-Brennstoffzelle (PAFC).	515
9.4.2	Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle (MCFC).	516
9.4.3	Oxidkeramische-Brennstoffzelle (SOFC)	517
9.4.4	Systemtechnik	518
9.5	Brennstoffzellen für mobile Anwendungen.	519
9.5.1	Alkalische Brennstoffzellen (AFC)	519
9.5.2	PEM-Brennstoffzellen (PEFC)	522
9.5.3	PEM – Brennstoffzellensysteme	524
	Literatur.	533
10	Elektrochemische Energiespeicherung	535
10.1	Einführung	535
10.2	Funktionsweise eines elektrochemischen Energiewandlers.	538
10.3	Akkumulatortypen und ihre Einsatzbereiche.	543
10.3.1	Blei-Säure-Akkumulatoren	544
10.3.2	Nickelmetallhydrid-Akkumulatoren	545
10.3.3	Natrium-Nickelchlorid-Akkumulatoren.	546

10.4	Lithium-Ionen-Akkumulatoren	549
10.4.1	Einleitung	550
10.4.2	Grundlagen der Lithiumionen-Technologie	551
10.4.3	Kennwerte der Lithiumionen-Technologie	552
10.4.4	Lebensdauer	553
10.4.5	Betriebsparameter	555
10.4.6	Sicherheit	558
10.4.7	Recycling	560
11	Kernfusion	563
11.1	Grundlagen des Fusionsprozesses	563
11.1.1	Fusionsreaktionen	563
11.1.2	Energieverteilung	564
11.2	Der Fusionsreaktor	565
11.2.1	Prinzip des (d,t)-Fusionsreaktors	565
11.2.2	Energiebilanz des Plasmas	567
11.2.3	Das Einschlussproblem	572
11.3	Stand und Perspektiven der Kernfusion	575
11.3.1	Internationales Forschungsprogramm Kernfusion	575
11.3.2	Vorzüge der Fusion und technologische Probleme	575
	Literatur	577
	Anhang A: Thermodynamik	579
	Anhang B: Kernphysikalische Grundlagen	595
	Anhang C: Energiewirtschaft der Schweiz, vergangene Entwicklung, und Szenario bis 2050	605
	Anhang D: Energieverbrauch und CO₂-Emissionen der sechs größten Länder Europas	619
	Anhang E: Gamma-Funktion	627
	Anhang F: Lösung der Aufgaben	631
	Anhang G: Mollier-Diagramm, Kältemittel	635
	Literatur	641
	Stichwortverzeichnis	643

Teil I
Energiewirtschaft, Elektrizitätswirtschaft

1.1 Grundbegriffe, geschichtlicher Rückblick

Abb. 1.1 veranschaulicht die Struktur der Energiewirtschaft mit den heute verwendeten und den möglichen zukünftigen Energieträgern. Zu unterscheiden sind vier Energieumwandlungsstufen: *Primärenergie*, *Sekundärenergie*, *Endenergie* und *Nutzenergie*. Unternehmen, die sich mit der *Gewinnung*, der *Umwandlung* und dem *Transport* von Energieträgern befassen, bilden den *Energiesektor der Wirtschaft*. Sie haben die Aufgabe, dem *Verbraucher* die Energie in der gewünschten Energieträgerform zur Verfügung zu stellen (sog. Endenergie). Der Verbraucher wandelt die Endenergie mittels *Nutzprozessen* in Nutzenergie um.

1.1.1 Energiesektor

Primäre Energieträger sind Energiequellen, die in der Natur vorkommen. Größtenteils werden sie nicht am Ort ihres Vorkommens verwendet, sondern zuerst gewonnen (z. B. gefördert), dann transportiert und ggf. in eine andere zweckmäßigere Energieform (sekundäre Energieträger) umgewandelt. Kohle und Erdgas werden meistens lediglich gefördert und zum Ort ihrer Verwendung transportiert; Erdöl wird dagegen in Raffinerien zu Heizöl und Benzin umgewandelt; Natururan wird zu Kernbrennstoff verarbeitet.

Fossile Brennstoffe, Kernbrennstoffe, Wasserkraft, Windkraft, Solarstrahlung, Geothermie, Biomasse und Müll erzeugen in Kraftwerken und Wärmekraftkopplungsanlagen Elektrizität und Fernwärme. Einige wenige Energieträger, wie z. B. Solarstrahlung und Umgebungswärme aber auch geothermische Wärme und Wind, können direkt am Ort ihres Auftretens mit lokalen Anlagen als Wärme oder zur Erzeugung von Elektrizität genutzt werden.

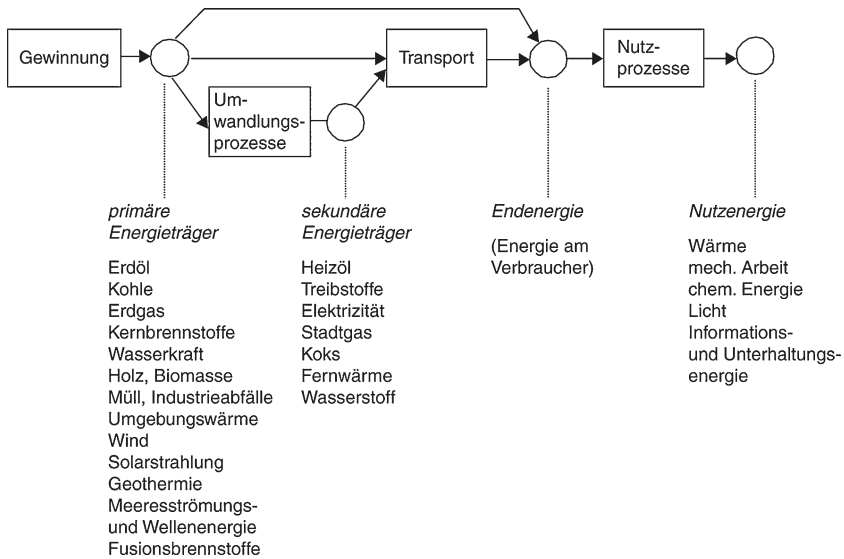


Abb. 1.1 Energieformen, Energieumwandlungsstufen

Neben den bereits erwähnten und wichtigsten *sekundären Energieträgern* wie Heizöl, Benzin, Elektrizität und Fernwärme, ist in Abb. 1.1 auch Wasserstoff als ein in Zukunft möglicherweise bedeutender sekundärer Energieträger aufgeführt (Näheres in Kap. 9).

Gewinnung, Umwandlung und Transport sind mit Kosten, Verlusten und Umweltbelastung verbunden.

Förderung und Transport belasten unter normalen Umständen und professioneller Handhabung die Umwelt nur wenig, können aber bei Kriegshandlungen und Unfällen mit fossilen und nuklearen Brennstoffen zu schwersten Umweltbelastungen führen. Als Beispiele seien erwähnt: Tankerunfälle, Sabotage und Brände von Förderanlagen sowie von Öl- und Erdgas-Pipelines, Unfälle beim Transport radioaktiver Brennelemente.

Bei der *Umwandlung* ist vor allem die ständige Umweltbelastung durch die *Verbrennung fossiler Brennstoffe* schwerwiegend (Verbrennungsprodukte, klimaschädigendes CO_2). Weitere punktuelle Quellen der Umweltbelastung können Unfälle in Kernkraftwerken, Öltankanlagen und Raffinerien sein.

Ferner ist die *Umwandlung* der Wärmeenergie fossiler und nuklearer Brennstoffe in mechanische bzw. elektrische Energie aus thermodynamischen Gründen mit hohen *Abwärmeverlusten* verbunden (Abschn. 5.2, 5.3 und 5.4). Mit entsprechenden Investitionen ist es möglich, diese Wärme teilweise zu nutzen (Wärme kraftkopplung, Abschn. 5.5).

Als *Endenergie* oder *Endverbrauch* bezeichnet man die dem Verbraucher zur Verfügung stehende Energie. *Nationale Energiestatistiken* beziehen sich in der Regel auf den Endverbrauch und/oder Primärenergie bzw. *Bruttoverbrauch*.

(jährlicher Verbrauch an einheimischen primären Energieträgern plus die Import-Export-Differenz an Primär- und Sekundärenergieträgern). Entsprechende Zahlen unterscheiden sich erheblich auf Grund der bei der Umwandlung und beim Transport entstehenden Verluste, zu denen auch der Eigenverbrauch des Energiesektors gerechnet wird. Die *Umwandlungsverluste* sind sehr hoch. *Transportverluste* ergeben sich in erster Linie bei der Übertragung und Verteilung der elektrischen Energie, in der Schweiz z. B. mit einem Gesamtwirkungsgrad von 93 %, wobei der größte Teil der Verluste im Verteilnetz entsteht.

1.1.2 Nutzprozesse

Die Endenergie wird von den Energieverbrauchern (Haushalten, Industrie, Dienstleistungsbetrieben, Gewerbe, Landwirtschaft, Verkehr) durch Nutzprozesse in *Nutzenergie* umgewandelt, hauptsächlich in *Wärme, mechanische Arbeit* und *Licht* (Abb. 1.1). Ein kleiner Teil wird in Endprodukten in Form *chemischer Energie* gespeichert (Stahl, Aluminium usw.). Mengenmäßig spielt diese, zumindest in der Schweiz, eine untergeordnete Rolle. Wenig jedoch zunehmendes Gewicht hat die *Informations- und Unterhaltungsenergie* (für Computer, Freizeitelektronik und Kommunikation).

Nutzprozesse haben sehr unterschiedliche Wirkungsgrade. Während z. B. in einem elektrischen Heizgerät Elektrizität zu 100 % in Wärme umgewandelt wird, können durchschnittlich nur ca. 20 % der Energie des Benzins in einem heutigen Auto als mechanische Arbeit verwertet werden, und eine normale Glühbirne wandelt gar nur ca. 5 % der elektrischen Energie in Licht um (wobei allerdings die Restenergie, zumindest im Winter, in Gebäuden als Heizenergie nicht verloren ist). Die Nutzprozesse sind also z. T. mit großen Energieverlusten verbunden; der mittlere Wirkungsgrad ist z. B. in der Schweiz 1997 auf 56 % geschätzt worden (Schweizerischer Energierat 1998). Die Verbrennung der fossilen Brenn- und Treibstoffe ist außerdem wegen der Gasemissionen *lokal* und *global* (Erzeugung von CO₂) in hohem Maße *umweltbelastend* (Abschn. 1.7).

1.1.3 Geschichtlicher Rückblick

Die *Verwendungszwecke* der Endenergie haben sich seit den Anfängen der Menschheitsgeschichte nur wenig und langsam verändert. Lediglich die Auswahl von Energieträgern ist viel größer, und die Techniken der Energieumwandlung und -nutzung sind vielfältiger, effizienter und bequemer geworden.

Mechanische Arbeit Heute wie früher wird *mechanische Arbeit* für die Beschaffung und Erzeugung von Gütern und das Erbringen von Dienstleistungen sowie den Transport von Gütern und Personen verwendet. Menschliche und tierische Muskelarbeit waren in fast allen frühen Gemeinschaften, bereits für die Jäger- und Sammlervölker und noch ausgeprägter für die Ackerbauern, die

Voraussetzung für das Überleben. Stadtzivilisationen konnten im Altertum nur dank der Sklavenarbeit bestehen und sich weiterentwickeln. Im Laufe der Zeit gelang es, durch zahlreiche mechanische Erfindungen wie Rad und Hebel später mechanische Maschinen aller Art, die Muskelkraft wirksamer einzusetzen und die Produktivität zu erhöhen, ebenso die Naturkräfte Wasser und Wind nutzbar zu machen (Wasser- und Windrad, Segelschiffahrt), d. h. neue Energiequellen zu erschließen. Viel später, erst im Laufe des 18. Jh., begann man Muskelarbeit durch leistungsfähigere Dampfmaschinen zu ersetzen. Ab Ende des 19. Jh. erlaubten Elektromotoren die Produktivität stark zu steigern und im 20. Jh. Verbrennungsmotoren die Mobilität sehr stark zu erhöhen.

Wärme und Licht Heute wie früher dienen *Wärme* und *Licht* dem Schutz vor Kälte, der Ernährung, der Erhöhung der Sicherheit, der Verbesserung der Arbeitsbedingungen, dem Wohlbefinden des Menschen und damit der Entfaltung kultureller Tätigkeiten. Energiequellen waren zunächst Holz, Pflanzenabfälle und getrockneter Dung. Heißwasserquellen wurden schon im Altertum genutzt. Kohle kam erst Ende des 17. Jh. und nur zögernd dazu, Erdöl, Erdgas und Elektrizität wurden erst im 20. Jh. in großem Umfang für die Wärmeerzeugung eingesetzt.

Wärme meist hoher Temperatur wurde ferner für die Produktion von Gütern eingesetzt (Metalle, Tonwaren, Schmuck- und Kunstgegenstände). In diesem Zusammenhang spricht man heute von industrieller und gewerblicher *Prozesswärme* (im Gegensatz zur *Koch- und Komfortwärme*).

Zusammenfassung Die *Struktur der Energiebereitstellung und -nutzung* änderte sich während Jahrtausenden nur wenig, bis die Erkenntnisse der Naturwissenschaft ab Ende des 18. Jh. das *technische Zeitalter* einleiteten. Ansätze dazu gab es bereits in der Antike und im Mittelalter. Aber erst in neuerer Zeit wurden revolutionäre technische Hilfsmittel für die mechanische Nutzung der Brennstoffwärme erfunden (Dampfmaschine, später Verbrennungsmotoren). Es gelang, neue (sekundäre) Energieträger wie Stadtgas und Elektrizität zu erzeugen und kapillar zu verteilen. Besonders die *Elektrizität* vereinfachte und förderte die Energienutzung in einem bis dahin kaum gekannten Ausmaße und ermöglichte zusammen mit der *Kohle* die industrielle Revolution. Zur Erzeugung von Elektrizität errang die *Wasserkraft* in vielen Ländern große Bedeutung. Die Kohle, zunächst wichtigster primärer Energieträger, wurde nach dem Zweiten Weltkrieg, also in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts, mehr und mehr durch das *Erdöl* ersetzt, behält aber in vielen Ländern eine vorrangige Stellung für die Elektrizitätsproduktion. Schließlich gelang es, neue primäre Energiequellen wie *Erdgas* und *Kernspaltung* zu erschließen und zu nutzen.

Die Struktur der Energiewirtschaft wandelte sich im Laufe eines Jahrhunderts grundlegend. Muskelkraft von Mensch und Tier werden auch heute noch eingesetzt (Beispiel: das Fahrrad als Transportmittel), doch werden sie als nicht-kommerzielle Energie von den energiewirtschaftlichen Statistiken nicht erfasst. Wind- und Wasserkraft werden nur soweit berücksichtigt, als sie zur Produktion von Elektrizität beitragen.

1.1.4 Perspektiven und Probleme

Der zivilisatorische Prozess des 20. Jh. wäre ohne billige Energie wesentlich langsamer vor sich gegangen. Der *Energieeinsatz* der Industriegesellschaften stieg im Laufe dieses Jahrhunderts auf mehr als das Zehnfache. Er befreite den Menschen von der Last schwerer körperlicher Arbeit und trug entscheidend zu einem bis dahin unvorstellbaren Massenwohlstand bei. Obwohl dieser Prozess vorerst nur einen Teil der Welt erfasst, wurden damit die Grundlagen für eine weltumfassende Verbesserung der materiellen Lebensbedingungen gelegt.

Wesentliches Element dieses *Fortschritts* war zunächst die Mechanisierung der körperlichen Arbeit, später deren Ersatz durch die Automatisierung. Damit verbunden sind eine rasche Änderung der sozialen Strukturen und eine fortschreitende Intellektualisierung der Arbeit im Allgemeinen. Die dadurch entstehenden sozialen Probleme stellen eine Herausforderung für die sozioökonomische Ordnung auch der entwickelten Welt dar und lassen sich nicht allein durch eine oft unbedachte Globalisierung lösen. Weitere *Schattenseiten* dieser Entwicklung traten in den letzten Jahrzehnten durch die *Überbeanspruchung und Vergiftung der Biosphäre* und durch die *Bedrohung der Klimastabilität* zu Tage.

Im Rahmen der politischen Forderung nach *sozialer und ökologischer Nachhaltigkeit* wird versucht, dies zu korrigieren. Der Beitrag der Energiewirtschaft besteht in der Verwirklichung einer *Umwelt so wenig als möglich belastenden* Energiebereitstellung und *einer umweltverträglichen* Energienutzung (Abschn. 1.6 und 1.7). Von großer Bedeutung ist in diesem Zusammenhang die *rationelle Nutzung* der Energie, d. h. die Verbesserung der Wirkungsgrade aller Prozesse.

1.2 Verfügbarkeit der Primärenergie

Alle in Abb. 1.1 aufgeführten primären Energieträger können letztlich auf die zwei im Universum auftretenden Hauptformen, *Gravitations-* und *Kernenergie*, zurückgeführt werden, wie in Abb. 1.2 dargestellt, wobei die zweite die viel wichtigere ist.

Die primären Energieträger lassen sich in zwei große Klassen einteilen, die im Folgenden besprochen werden:

- *nicht erneuerbare Energien*: fossile und nukleare Energieträger,
- *erneuerbare Energien*: Gezeitenenergie, geothermische Energie und vor allem direkte und indirekte Solarenergie.

Tab. 1.1 zeigt die *Energieinhalte* wichtiger Energieträger. Da in der Literatur verschiedene Einheiten verwendet werden, sind Umrechnungsfaktoren angegeben.

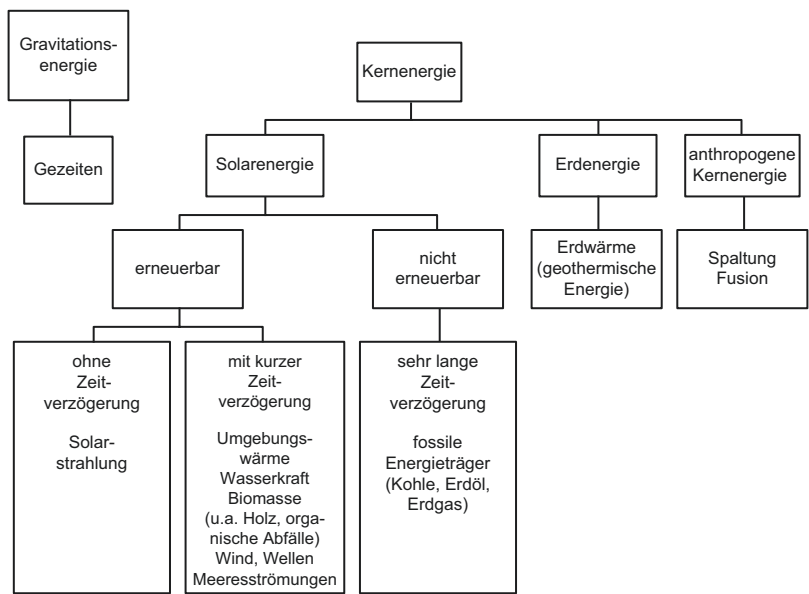


Abb. 1.2 Ursprung der verfügbaren Primärenergiearten

Tab. 1.1 Energieinhalte von Energieträgern (mittlere Werte Bundesamt für Energie 2014) und Umrechnungsfaktoren

Erdöl	10.000 kcal/kg	Umrechnungsfaktoren:
Steinkohle	6100 kcal/kg	860 kcal/kWh
Braunkohle	5600 kcal/kg	4,19 kJ/kcal
Holz	3600 kcal/kg	3,6 MJ/kWh
Kehricht	2840 kcal/kg	31,54 GJ/kWa
Erdgas	8660 kcal/m³	0,753 toe/kWa
Gas aus Kohle und Erdöl (Stadtgas)	4200 kcal/m³	1,12 tce/kWa
Uran 235	20 Tcal/kg	1 kWa = 8760 kWh

1.2.1 Nicht erneuerbare Energien

1.2.1.1 Zukünftige Nachfrage

Kohle, Erdöl, Erdgas und Spaltstoffe (Uran, Thorium) sind nicht erneuerbare Energien. Der Fusionsprozess kann noch nicht realisiert werden (Kap. 11). Im Jahre 2013 stammten rund 86 % des energetischen Primärenergiebedarfs aus nicht erneuerbaren Energien (IEA 2019) Entsprechend den älteren IEA-Szenarien (IEA=Internationale Energie Agentur) wird dieser Anteil bis 2030 nur wenig zurückgehen: auf 86 % gemäß Referenz-Szenario von 2004 und auf 83 % gemäß Alternativ-Szenario von 2004; etwas mehr, nämlich auf etwa 75 %,

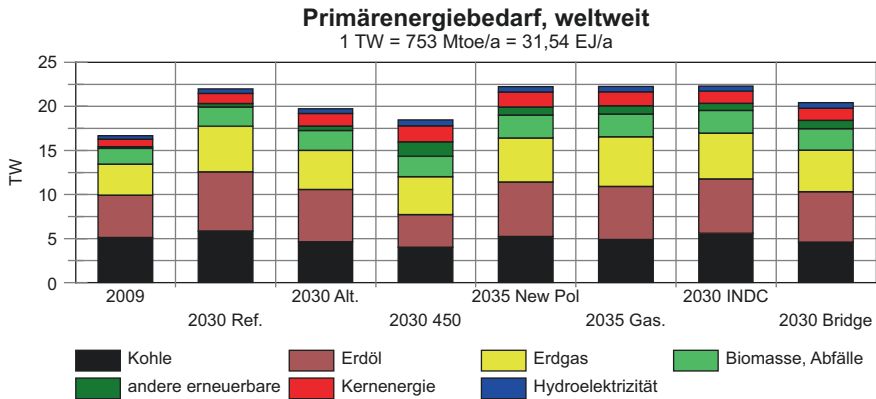


Abb. 1.3 IEA: Weltenergiebedarf 2009 und Szenarien für 2030 (bzw. 2035), (IEA 2017, 2006, 2015, 2009)

mit dem neueren 450-Szenario der IEA von 2009 (IEA 2009, Abb. 1.3, mehr Details in Abschn. 1.6.). Weniger optimistisch sind die Szenarien New Policies und Gas Szenario von 2011, die mehr auf CCS (Carbon Capture and Storage) setzen. Das INDC Szenario von 2015 entspricht den deklarierten Beiträgen der Länder (weltweit), das Bridge-Szenario von 2015 (IEA 2015) versucht sich mehr dem 450-Szenario zu nähern, allerdings mit geringerem Anteil an erneuerbaren Energien (etwa 15 %). Nach den IEA-Daten von 2017 ist der Anteil der nicht erneuerbaren Bruttoenergie 84 % (IEA 2017). Gemäß den letzten Daten von 2019 beträgt dieser Anteil immer noch etwa 80 %.

Nimmt man beispielsweise an, der mittlere Energiebedarf von etwa 17 TW im Jahre 2014 nähme bis 2030 linear auf 20 TW (ca. 15 Gtoe/a) zu, um sich dann bis 2050 zu stabilisieren, ergäbe sich während dieser Zeitspanne ein kumulierter Energiebedarf von rund 710 TWa. Entsprechend den letzten Daten entspricht der mittlere Energiebedarf von 17.4 TW in 2017 weiterhin knapp diesem Trend. Es stellt sich die Frage nach den *Reserven* und *Ressourcen* an erschöpflichen Energieträgern, ob und wie diese in der Lage sind, etwa 80 % dieses Bedarfs, also rund 570 TWa zu decken. Diese Menge würde sich z. B. gemäß Bridge-Szenario der IEA (Abb. 1.3) etwa folgendermaßen verteilen: Kohle: 160 TWa, Erdöl: 200 TWa, Erdgas: 160 TWa, Uran: 50 TWa.

1.2.1.2 Reserven und Ressourcen

Als *Reserven* werden nachweisbare Vorkommen bezeichnet, die mittels heutiger Technologien zu heutigen Marktpreisen genutzt werden können. *Ressourcen* sind Vorkommen, die nachgewiesen, aber derzeit nicht wirtschaftlich gewinnbar sind, oder solche, die vermutet und „wahrscheinlich in Zukunft entdeckt und/oder mit künftig entwickelten Technologien genutzt und zu Preisen, die dann üblich sind, verkauft werden“ (Spreng 1995). Die Größe der Reserven und Ressourcen wird oft nach oben revidiert, wobei je nach Zeitpunkt und Statistikverfasser Unterschiede in der Beurteilung festzustellen sind (Tab. 1.2). Ressourcen nehmen zu durch Forschung und Prospektion, die zu einer besseren Kenntnis unseres Planeten

Tab. 1.2 Reserven und Ressourcen fossiler und nuklearer Energieträger. Die Dauer der Reserven basiert auf die konventionellen Reserven 2006 [BP, BGR] und auf dem mittleren Verbrauch der Periode 2004–2030 (mittlere Vorhersage IEA)

	Reserven 1980 ^a [TWa]	Reserven 1990 ^a [TWa]	Reserven 1998 ^a 1997 ^b 1996 ^c [TWa]	Reserven 2006 ^d [TWa]	Ressourcen 2006 ^d [TWa]	Reich- weite in Jahre der konv Reserven
Erdöl konv	118	181	185 ^a /203 ^b	216	109	36
Erdöl unkonv	19	68	180 ^b	88	332	
Erdgas konv	89	142	170 ^a /161 ^b	219	250	48
Erdgas unkonv			4 ^b		1852	
Kohle	647	1005	878 ^c	842 ^b /676	8101	135
Uran	39	61	63 ^c	85 ^e	98	65

^a (BP-Amoco-Statistical 1999) und (Erdmann 1992), ^b (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover 1999), ^c (WEC 1996), ^d (www.bgr.bund.de 2006), ^e [OECD/IAEA]

führen. Ressourcen werden zu Reserven, wenn neue wirtschaftlich abbaubare Lagerstätten entdeckt werden, jedoch auch durch Technologiefortschritte oder höhere Marktpreise.

Der Stand der Reserven bzw. Ressourcen Ende 2014, gemäß Bericht der BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 2015), (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover 2015), ist in Abb. 1.4 wiedergegeben.

Die Zahlen der Tab. 1.2 und der Abb. 1.4 zeigen, dass mittelfristig dank der Kohle keine globale Knappheit droht. Der kritischste Energieträger ist das Erdöl. Der sogenannte „mid depletion point“ (der dem Fördermaximum folgt und ab welchem eine Produktionserhöhung nicht mehr möglich ist) ist das Datum, an welchem die Hälfte der Reserven bereits verbraucht ist; was nach obiger Rechnung bei Einhaltung des Bridge-Szenarium für etwa 2040 zu erwarten ist. Ab diesem Datum ist mit einem starken Anstieg des Preises zu rechnen. Beim Erdgas ist die Lage ähnlich und der kritische Punkt dürfte nur leicht später erreicht sein. Bleibt die Möglichkeit, Kohle in flüssige und gasförmige Brennstoffe umzuwandeln und der Technologie zur Trennung und Speicherung (Sequestration) des entstehenden CO₂. Die entsprechenden industriellen Verfahren befinden sich aber noch in der Entwicklungs- und Testphase. Die technischen, ökonomischen und ökologischen Perspektiven sind deshalb noch ungewiss. Alles in allem scheint es sinnvoll und nachhaltig zu sein, auch aus der Sicht der Reserven, den weltweiten Verbrauch fossiler Energien schneller zu reduzieren als es die IEA-Studien von 2011 für 2035 vorsehen. Diesem Umstand entspricht recht gut das IEA-450-Szenario von 2009 sowie das Bridge Szenario von 2015 (Abb. 1.3, s. dazu auch Abschn. 1.6 und 1.7).

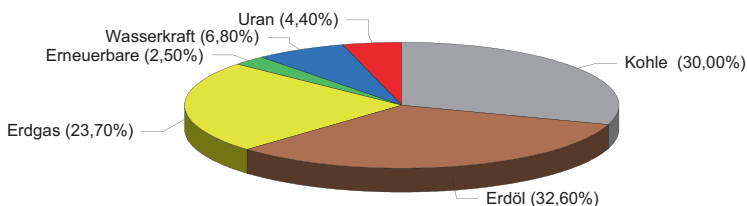
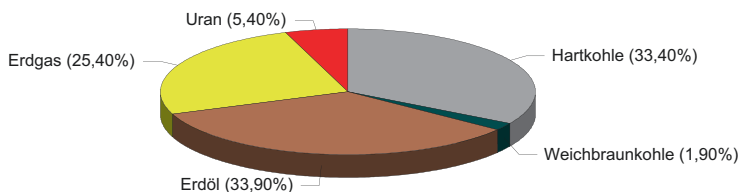
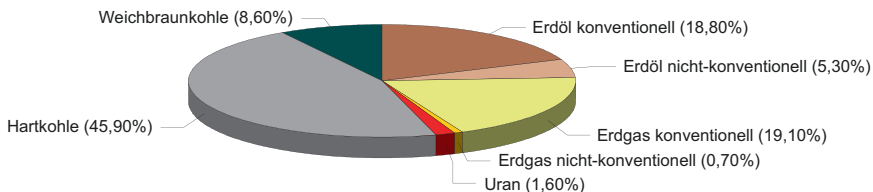
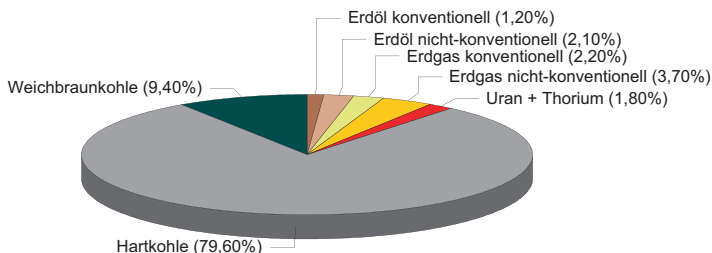
Energieverbrauch weltweit 2014**540 EJ = 17,1 TWa = 12'890 Mtoe**
**Weltweite Produktion 2014
an nichterneuerbare Energieträger**
522 EJ = 16,5 TWa = 12460 Mtoe
**Weltweite Reserven Ende 2014
an nichterneuerbare Energieträger**
37'934 EJ = 1202 TWa
**Weltweite Ressourcen Ende 2014
an nichterneuerbare Energieträger**
551'813 EJ = 17'490 TWa

Abb. 1.4 Weltweite Anteile aller Energieträger am Verbrauch sowie der nichterneuerbaren Energierohstoffe an Produktion, Reserven und Ressourcen für Ende 2014. (Quelle: BGR [M])

Die Uranreserven sind in Tab. 1.2 für einen Grenzpreis von 130 \$/kg berechnet worden. Die Grenze ist aber ziemlich elastisch, da die Urankosten den Preis der vom Kernkraftwerk gelieferten elektrischen Energie nur wenig beeinflussen. Der kritische Punkt dürfte, wenn die von der IEA vorgesehene bescheidene globale Zunahme der Kernkraftwerkleistung eintrifft, relativ spät gegen Ende des Jahrhunderts erreicht sein. Der Spielraum für eine erhebliche Substitution fossiler Brennstoffe ist aber trotzdem nicht vorhanden, es sei denn, man führt alternative Konzepte ein (4. Generation: Brutertechnologie, Hochtemperaturreaktoren und Thorium, s. Abschn. 5.7). Die Kernfusion dürfte erst ab 2050 eine Rolle spielen.

1.2.1.3 Ethische Aspekte und Umweltschutz

Die Frage nach der Geschwindigkeit, mit der diese Reserven abgebaut werden dürfen, lässt sich aus rein ökonomischer Sicht gut beantworten (Hotelling-Regel und weitere Aspekte, s. z. B. Erdmann 1992). Dazu kommen ethische Erwägungen und Umweltaspekte:

- Aus ethischer Sicht muss gefragt werden, ob es zulässig ist, diesen Energievorrat der Menschheit, auf den spätere Generationen angewiesen sein könnten (Notvorrat, Rohstoffe) innerhalb von zwei oder drei Jahrhunderten radikal abzubauen. Dieser Aspekt kann insofern relativiert werden, als wir heute nicht wissen, ob überhaupt spätere Generationen auf diese Energie angewiesen sein werden oder nicht. Ist aber eine solche Relativierung wirklich verantwortungsvoll?
- Die schädlichen Auswirkungen der CO_2 -Emissionen auf das Klima, durch zahlreiche wissenschaftliche Studien (z. B. IPCC) erhärtet, rechtfertigen eine politische Intervention auf globaler Ebene, um den CO_2 -Ausstoß drastisch zu reduzieren (Abschn. 1.7).

Aus heutiger Sicht ist es vor allem der zweite Aspekt, der dringend nahelegt, die ökonomische Betrachtungsweise durch Internalisierung der externen Kosten auch zukünftiger Klimaschäden zu korrigieren.

1.2.2 Erneuerbare Energien

Erneuerbare Energien (Abb. 1.2) sind *natürliche* Energieströme bestimmter Größe, die mit Einsatz technischer Mittel und mit einem bestimmten ökonomischen Aufwand angezapft werden können. Die meisten Energien sind nicht überall, sondern nur an günstigen Orten verfügbar bzw. wirtschaftlich ausbeutbar. Die einzelnen Energien werden bzgl. ihrer Verfügbarkeit im Folgenden besprochen.

1.2.2.1 Gezeitenenergie

Die Gravitationsenergie steht uns in Form von *Gezeitenenergie* zur Verfügung. Die Gezeitenreibung beträgt ca. 2,5 TW (d. h. die Rotationsenergie der Erde wird jedes Jahr um 2,5 TWh reduziert). Davon werden aber nur 9 % als wirtschaftlich nutzbar

eingeschätzt (WEC 2000). Für eine wirtschaftliche Nutzung muss der Tidenhub mindestens 6 m betragen. Demzufolge spielt die Gezeitenenergie im Zusammenhang mit dem künftigen Weltenergiebedarf (>25 TWa) kaum eine Rolle. Näheres z. B. in (Kleemann und Meliss 1988; Kugeler und Phlippen 1993; WEC 1996).

1.2.2.2 Geothermische Energie

Der mittlere natürliche Wärmefluss ist sehr klein (ca. $0,06 \text{ W/m}^2$). Er stammt zu 30 % aus der Restwärme des Erdkerns und zu 70 % aus dem Zerfall radioaktiver Isotope in der Erdkruste. Der thermische Gradient ist im Mittel 1°C alle 30 m. Es sind also vor allem die geothermischen Anomalien (Vulkanismus, Geyser), die wirtschaftlich genutzt werden können. Im Jahr 2005 war weltweit eine Leistung von ca. 28 GW installiert, wovon 17 GW *thermisch* (wichtigste Länder: China, USA, Schweden, Island) und 9 GW *elektrisch* (wichtigste Länder: USA, Philippinen, Indonesien, Mexico, Italien), mit einer Jahresproduktion (mittlere Leistung) von 6,6 bzw. 6,5 GW. Es handelt sich fast ausschließlich um *hydrothermale* Nutzung (heiße Quellen). In Zukunft könnte auch das *Hot-Dry-Rock*-Verfahren (de.wikipedia.org/wiki/geothermie; Kaltschmitt et al. 2020; Wokaun 1999) an Bedeutung gewinnen.

Bei der geothermischen Energie handelt es sich um eine erneuerbare Energie, allerdings über relativ lange Zeiträume (Jahrzehnte bis Jahrhunderte), so dass auch kurz- bis mittelfristig nutzbare *Ressourcen* angegeben werden. Die hydrothermalen *Ressourcen* an Hochenthalpie-Vorkommen, $>150^\circ\text{C}$, die zur Stromproduktion genutzt werden können, betragen ca. 30 TWa, und die Niederenthalpie-Vorkommen für die Wärmenutzung etwa 3200 TWa. Was davon als Reserven bezeichnet werden kann, lässt sich aus heutiger Sicht nicht quantifizieren (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover 1999). Vermutlich kann die installierte Leistung weltweit total bis auf 2 TW installierte Leistung gesteigert werden (ca. das 100fache des heutigen Wertes), was etwa 5–10 % der in Zukunft weltweit benötigten Energie decken würde. Dieser Anteil könnte aber dank der Wärmepumpe bedeutend größer sein. In einigen Ländern ist der Beitrag der geothermischen Energie sehr wichtig.

1.2.2.3 Solarenergie

Die Solarenergie ist die einzige erneuerbare Energie, die indirekt bereits heute in Form von Wasserkraft und Biomasse einen wesentlichen Beitrag zur Deckung des Weltenergiebedarfs leistet (im Jahr 2013 sind es rund 2 TWa).

Das Angebot an Solarstrahlung übersteigt um mehr als das 10.000fache den heutigen Weltenergiebedarf und ist als einziges in der Lage, in der postfossilen Ära evtl. zusammen mit der Kernfusion die Energiebedürfnisse der Menschheit zu decken. Die Probleme bei der direkten Nutzung der Solarstrahlung sind wirtschaftlicher Natur und auf ihre geringe Dichte zurückzuführen.

Wie in Abb. 1.5 veranschaulicht, beträgt der Fluss an Solarstrahlung rund 173.000 TW. Von dieser Energie werden 52.000 TW direkt ins Weltall als kurzwellige Strahlung zurück reflektiert, während 121.000 TW von der Erde absorbiert, umgewandelt und, da sich die Erde im thermischen Gleichgewicht befindet, schließlich in Form langwelliger Wärmestrahlung an das Weltall wieder abgegeben.

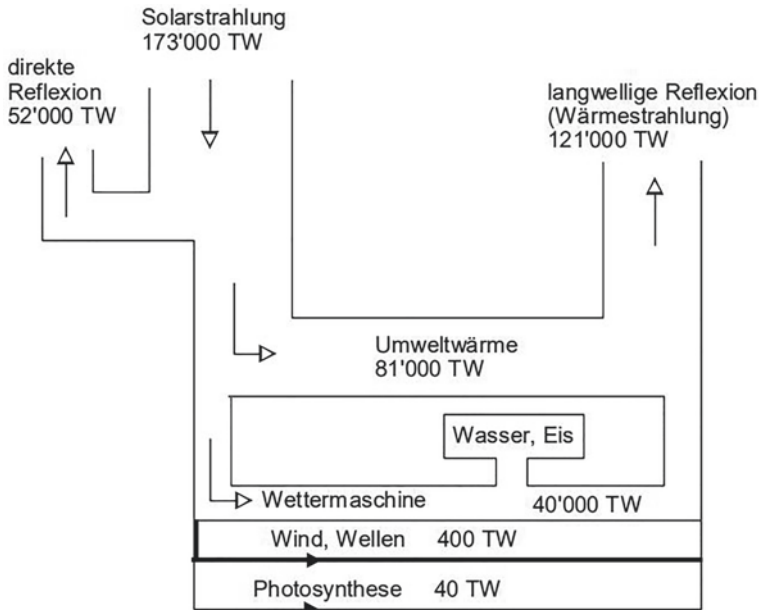


Abb. 1.5 Solarenergiebilanz der Erde

Die absorbierte Strahlung wird zu etwa zwei Drittel als *Niedertemperaturwärme* in Luft, Wasser und Erde gespeichert und kann als solche z. B. mit Wärmepumpen genutzt werden.

Das restliche Drittel hält die Wettermaschine durch die Wasserverdunstung sowie Druck- und Temperaturunterschiede in Gang; die Energie tritt auf als *potentielle Energie* (Wassergehalt der Wolken, Fließgewässer und Gletscher) und als *kinetische Energie* (Winde, Meeresströmungen, Wellen).

Nur ein Bruchteil von ca. 40 TW wird durch die Photosynthese absorbiert, welche *Biomasse* erzeugt und das Leben auf der Erde ermöglicht.

Auf Grund ihrer Bedeutung sei das Potential und die Nutzung der Solarenergie näher besprochen.

1.2.3 Potential und Nutzung der wichtigsten Solarenergiearten

Es wird unterschieden zwischen:
der indirekten (verzögerten) Nutzung von

- Umgebungswärme (vor allem mit der Wärmepumpe)
- Wasserkraft (mit Wasserkraftwerken)
- Wind-, Wellenkraft und Meeresströmungen (vor allem mit Windkraftwerken)
- Biomasse (Holz, Pflanzen, organische Abfälle)

und der direkten (unverzögerten) Nutzung von

- Solarstrahlung (Solararchitektur, Kollektoren, Photovoltaik, thermische Solar-kraftwerke).

1.2.3.1 Wärmepumpe

Die Wärmepumpentechnik ist eine ausgereifte Technik zur Nutzung der Nieder-temperaturwärme. Sie erlaubt die Anhebung der Temperatur auf Werte, die für Heizungs- und Warmwasserbereitungszwecke genügen. Als Wärmequellen kommen Luft, Grundwasser, Oberflächenwasser und das Erdreich in Frage. Die Wärmepumpe ermöglicht die Nutzung der Umgebungswärme, der Abfallwärme und auch der geothermischen Wärme, wenn die Wärmefassung mindestens 100–150 m tief ist.

Sie ist die reifste Technik für Niedertemperaturanwendungen zur Substitution fossiler Brennstoffe durch Solarwärme und geothermische Wärme. Das Potential an Umweltwärme ist enorm, wie in Abb. 1.5 gezeigt. Die Verbreitung der Wärmepumpe wird vor allem durch billige fossile Brennstoffe behindert. Auch die Tatsache, dass ca. ein Drittel der produzierten Wärme aus hochwertigen Energieträgern (Elektrizität oder Gas) gewonnen werden muss, wirkt in Ländern mit hohem Anteil an Elektrizitätsproduktion aus fossilen Brennstoffen bremsend. Für Näheres über Wärmepumpen s. Kap. 6.

1.2.3.2 Wasserkraft

Das Potential aller Fließgewässer der Welt wird auf ca. 6 TWa geschätzt (mittlere Leistung), wovon ca. 1–1,5 TWa einer wirtschaftlichen Nutzung zugänglich sind. (WEC 1996). Effektiv genutzt werden (2017) weltweit 0,48 TWa (Hydroelektrizität). Das Entwicklungspotential liegt vor allem in den Entwicklungsländern, aber auch im Norden (Grönland, Kanada). Der Beitrag der Wasserkraft zur *Deckung des Elektrizitätsbedarfs* war 2017 weltweit 16,3 %, in den OECD-Ländern 13,3 %, in Südamerika 60 %, in China 18 %, in Indien 9 %, in den USA 8 %, in der EU-28 10 %, in Deutschland 4 %, in Österreich 59 %, in der Schweiz 59 % und in Norwegen 96 % (näheres in Kap. 4, wo die Nutzung der Wasserkraft ausführlich behandelt wird).

1.2.3.3 Wind- und Meereskraft

Die Nutzung der Windkraft ist in einigen Ländern mit günstigen Windverhältnissen sehr fortgeschritten (Deutschland, Spanien, USA, Dänemark) und die entsprechende Technik ausgereift. Die Wirtschaftlichkeit hängt von der Intensität und Regelmäßigkeit des Windangebots ab. Mittlere Windgeschwindigkeiten von mind. 5–6 m/s sind dazu notwendig. Diese sind vor allem in Küstenregionen und einigen Bergregionen anzutreffen. Nimmt man an, dass weltweit 2–5 % der Wind- und Wellenenergie (400 TWa nach Abb. 1.4.) wirtschaftlich genutzt werden kann, erhält man 1–2 TWa; wahrscheinlich kann man mehr nutzen. 1996 betrug die

installierte Windkraftwerks-Leistung weltweit 6 GW (Schweizerischer Energierat 1997), konnte aber bis 2001 auf 20 GW gesteigert werden und erreichte Ende 2005 59 GW (was einer Zuwachsrate von 30 %/a entspricht). In 2006 hat man bereits eine Leistung von 75 GW erreicht (wovon 20 GW in Deutschland), was einer Energie von etwa 12 GWa entspricht (Nutzungsfaktor 0,16). Die „Offshore“-Installationen (Windenergienutzung im Meer) haben einen deutlich besseren Nutzungsfaktor. Ende 2017 erreichte man weltweit bereits mehr als 2000 GW installierte Leistung und 480 GWa erzeugte Energie. In Deutschland wurden 2017 etwa 12 GWa oder 16 % der elektrischen Energie mit Windkraft erzeugt. In Dänemark wurde 2017 mit 1,7 GWa nahezu die Hälfte der elektrischen Energie mit Wind erzeugt und es ist vorgesehen, bis 2030 den Anteil weiter zu steigern, vor allem mit Offshore. In Frankreich rechnet man mit 23 GWa Windenergie in 2040.

Bei starkem Anstieg der mit Wind erzeugten Energie muss aber, als Folge der starken Variabilität dieser Energieform, auch das Speicherungsproblem gelöst werden (analog zur allerdings etwas mildereren Variabilität der Wasserkraft). Die entsprechenden Kosten sind bei der Bewertung der Windenergie zu berücksichtigen.

Über die Technik der Windenergienutzung zur Erzeugung elektrischer Energie steht Näheres in Kap. 7.

Über mögliche Nutzung der Wellen und Meeresströmungen s. (de.wikipedia.org/wiki/meeresströmungskraftwerk; de.wikipedia.org/wiki/wellenenergie).

1.2.3.4 Biomasse

Definition Unter Biomasse werden Stoffe organischer Herkunft verstanden, also die Masse von Lebewesen und organischen Abfallstoffen (unter Ausschluss fossiler Brennstoffe).

Potential Die gesamte Biomasse auf der Erde wird auf rund 450 TWa geschätzt (de.wikipedia.org/wiki/biomassepotential; Wokaun 1999) (1 TWa = 31,5 EJ), bei einem mittleren Heizwert von rund 3600 kcal/kg (bezogen auf absolut trockene Biomasse). Wichtig ist vor allem der Zuwachs von rund 60 TWa/a. Der Umwandlungswirkungsgrad der Solarstrahlung liegt durchschnittlich bei 0,14 %, ist aber für Wälder und Süßwasser höher (ca. 0,5 %) und am höchsten für tropische Wälder (bis 0,8 %). Chemisch gesehen besteht die Biomasse zu 82 % aus Polysacchariden (Zellulose und Hemizellulose) und zu 17 % aus Lignin (Holzstoff) (Kleemann und Meliss 1988).

Nutzung Das für die energetische Nutzung technisch verwertbare Potential an Biomasse in Form von Brenn- und Treibstoffen wird auf rund 6 TW geschätzt. Davon wären bei einer Weltbevölkerung von 10 Mrd. Menschen rund 2 TW aus Abfällen zu gewinnen. Biomasse stellt also eine der wichtigen Energiereserven der Menschheit dar, die etwa 25 % des künftigen Bedarfs decken könnte. Die gegen-