

Volker Quaschning

Regenerative Energiesysteme

Technologie – Berechnung – Klimaschutz



13., aktualisierte Auflage

HANSER

Quaschning Regenerative Energiesysteme



Blieben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Volker Quaschning

Regenerative Energiesysteme

Technologie – Berechnung – Klimaschutz

13., aktualisierte Auflage

HANSER

Über den Autor:

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Quaschnig, Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) Berlin



Print-ISBN: 978-3-446-48422-1

E-Book-ISBN: 978-3-446-48466-5

Die allgemein verwendeten Personenbezeichnungen gelten gleichermaßen für alle Geschlechter.

Alle in diesem Werk enthaltenen Informationen, Verfahren und Darstellungen wurden zum Zeitpunkt der Veröffentlichung nach bestem Wissen zusammengestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Werk enthaltenen Informationen für Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht. Ebenso wenig übernehmen Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt also 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.

Die endgültige Entscheidung über die Eignung der Informationen für die vorgesehene Verwendung in einer bestimmten Anwendung liegt in der alleinigen Verantwortung des Nutzers.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

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

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Werkes, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 UrhG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Wir behalten uns auch eine Nutzung des Werks für Zwecke des Text und Data Mining nach § 44b UrhG ausdrücklich vor.

© 2025 Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München
Vilshofener Straße 10 | 81679 München | info@hanser.de
www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Dr. Philippa Söldenwagner-Koch

Herstellung: Der Buchmacher – Arthur Lenner, Windach

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Covergestaltung: Thomas West

Titelmotiv: © stock.adobe.com/TeamDaf und VRD; © gettyimages.de/Julian Keiser und fotojog

Satz: Eberl & Koesel Studio, Kempten

Druck: Elanders Waiblingen GmbH, Waiblingen

Printed in Germany

Inhalt

Vorwort zur ersten Auflage	XIII
Vorwort zur dreizehnten Auflage	XV
1 Energie und Klimaschutz	1
1.1 Der Begriff Energie	1
1.2 Entwicklung des Energiebedarfs	7
1.2.1 Entwicklung des Weltenergiebedarfs	7
1.2.2 Entwicklung des Energiebedarfs in Deutschland	10
1.3 Reichweite konventioneller Energieträger	13
1.4 Der Treibhauseffekt	15
1.5 Kernenergie contra Treibhauseffekt	23
1.5.1 Kernspaltung	23
1.5.2 Kernfusion	27
1.6 Nutzung erneuerbarer Energien	28
1.6.1 Geothermische Energie	30
1.6.2 Planetenenergie	30
1.6.3 Sonnenenergie	31
1.7 Energiewende und Klimaschutz	40
1.7.1 Szenarien für den globalen Klimawandel	41
1.7.2 Energiewende und Klimaschutz in Deutschland	49
1.7.3 Internationaler Klimaschutz	66

2	Sonnenstrahlung	71
2.1	Einleitung	71
2.2	Der Fusionsreaktor Sonne	72
2.3	Sonnenstrahlung auf der Erde	77
2.4	Bestrahlungsstärke auf der Horizontalen	84
2.5	Sonnenposition und Einfallswinkel	88
2.6	Bestrahlungsstärke auf der geneigten Ebene	92
2.6.1	Direkte Strahlung auf der geneigten Ebene	92
2.6.2	Diffuse Strahlung auf der geneigten Ebene	93
2.6.3	Bodenreflexion	95
2.6.4	Strahlungsgewinn durch Neigung oder Nachführung	96
2.7	Berechnung von Abschattungsverlusten	99
2.7.1	Aufnahme der Umgebung	100
2.7.2	Bestimmung des direkten Abschattungsgrades	102
2.7.3	Bestimmung des diffusen Abschattungsgrades	103
2.7.4	Gesamtermittlung der Abschattungen	104
2.7.5	Optimaler Abstand bei aufgeständerten Solaranlagen	105
2.8	Solarstrahlungsmesstechnik und Sonnensimulatoren	111
2.8.1	Messung der globalen Bestrahlungsstärke	111
2.8.2	Messung der direkten und der diffusen Bestrahlungsstärke	112
2.8.3	Satellitenmessungen	113
2.8.4	Künstliche Sonnen	115
3	Nicht konzentrierende Solarthermie	117
3.1	Grundlagen	117
3.2	Solarthermische Systeme	121
3.2.1	Solare Schwimmbadbeheizung	121
3.2.2	Solare Trinkwassererwärmung	123
3.2.3	Solare Heizungsunterstützung	129
3.2.4	Rein solare Heizung	130
3.2.5	Solare Nahwärmeversorgung	132
3.2.6	Solares Kühlen	133
3.3	Solarkollektoren	135
3.3.1	Speicherkollektoren	136

3.3.2	Flachkollektoren	137
3.3.3	Vakuumröhrenkollektoren	142
3.4	Kollektorabsorber	143
3.5	Kollektorleistung und Kollektorwirkungsgrad	146
3.6	Rohrleitungen	152
3.6.1	Leitungsaufheizverluste	155
3.6.2	Zirkulationsverluste	156
3.7	Speicher	158
3.7.1	Trinkwasserspeicher	159
3.7.2	Schwimmbecken	163
3.8	Anlagenauslegung	166
3.8.1	Nutzwärmebedarf	166
3.8.2	Solarer Deckungsgrad und Nutzungsgrad	167
3.8.3	Solare Trinkwasseranlagen	169
3.8.4	Anlagen zur solaren Heizungsunterstützung	171
3.8.5	Rein solare Heizung	173
3.9	Aufwindkraftwerke	174
4	Konzentrierende Solarthermie	177
4.1	Einleitung	177
4.2	Konzentration von Solarstrahlung	178
4.3	Konzentrierende Kollektoren	181
4.3.1	Linienkollektoren	182
4.3.2	Punktkonzentratoren	191
4.4	Wärmekraftmaschinen	192
4.4.1	Carnot-Prozess	192
4.4.2	Clausius-Rankine-Prozess	193
4.4.3	Joule-Prozess	196
4.4.4	Stirling-Prozess	197
4.5	Konzentrierende solarthermische Anlagen	198
4.5.1	Parabolrinnenkraftwerke	198
4.5.2	Solarturmkraftwerke	204
4.5.3	Dish-Stirling-Anlagen	207
4.5.4	Sonnenöfen und Solarchemie	208
4.6	Stromimport	210

5	Photovoltaik	213
5.1	Einleitung	213
5.2	Funktionsweise von Solarzellen	215
5.2.1	Atommodell nach Bohr	215
5.2.2	Photoeffekt	217
5.2.3	Funktionsprinzip einer Solarzelle	219
5.3	Herstellung von Solarzellen und Solarmodulen	227
5.3.1	Solarzellen aus kristallinem Silizium	227
5.3.2	Solarzellen aus amorphem Silizium	234
5.3.3	Solarzellen aus anderen Materialien	235
5.3.4	Solarmodule mit kristallinen Zellen	239
5.3.5	Modultests und Qualitätskontrolle	241
5.4	Elektrische Beschreibung von Solarzellen	243
5.4.1	Einfaches Ersatzschaltbild	243
5.4.2	Erweitertes Ersatzschaltbild (Eindiodenmodell)	245
5.4.3	Zweidiodenmodell	247
5.4.4	Zweidiodenmodell mit Erweiterungsterm	248
5.4.5	Weitere elektrische Zellparameter	249
5.4.6	Temperaturabhängigkeit	252
5.4.7	Parameterbestimmung	256
5.5	Elektrische Beschreibung von Solarmodulen	257
5.5.1	Reihenschaltung von Solarzellen	257
5.5.2	Reihenschaltung unter inhomogenen Bedingungen	259
5.5.3	Parallelschaltung von Solarzellen	265
5.5.4	Parallel- und Reihenschaltung von Halbzellen	265
5.5.5	Technische Daten von Solarmodulen	266
5.6	Solargenerator und Last	268
5.6.1	Widerstandslast	268
5.6.2	Gleichspannungswandler	269
5.6.3	Tiefsetzsteller	270
5.6.4	Hochsetzsteller	273
5.6.5	Weitere Gleichspannungswandler	274
5.6.6	MPP-Tracker	275

5.7	Akkumulatoren	278
5.7.1	Akkumulatorarten	278
5.7.2	Bleiakkumulator	279
5.7.3	Lithium-Ionen-Akkumulator	283
5.7.4	Andere Akkumulatortypen	288
5.7.5	Akkumulatorsysteme	290
5.7.6	Andere Speichermöglichkeiten	294
5.8	Wechselrichter	295
5.8.1	Wechselrichtertechnologie	295
5.8.2	Wechselrichter in der Photovoltaik	301
5.9	Photovoltaische Eigenverbrauchssysteme	308
5.9.1	Photovoltaische Eigenverbrauchssysteme mit Speicher	308
5.9.2	Photovoltaische Eigenverbrauchssysteme mit Heizung	312
5.10	Planung und Auslegung	315
5.10.1	Inselnetzsysteme	315
5.10.2	Rein netzgekoppelte Systeme	318
5.10.3	Eigenverbrauchssysteme	321
6	Windkraft	337
6.1	Einleitung	337
6.2	Dargebot von Windenergie	338
6.2.1	Entstehung des Windes	338
6.2.2	Angabe der Windstärke	340
6.2.3	Windgeschwindigkeitsverteilungen	341
6.2.4	Einfluss der Umgebung und Höhe	344
6.3	Nutzung der Windenergie	347
6.3.1	Im Wind enthaltene Leistung	347
6.3.2	Widerstandsläufer	350
6.3.3	Auftriebsläufer	352
6.4	Bauformen von Windkraftanlagen	357
6.4.1	Windkraftanlagen mit vertikaler Drehachse	357
6.4.2	Windkraftanlagen mit horizontaler Drehachse	361
6.5	Elektrische Maschinen	370
6.5.1	Elektrische Wechselstromrechnung	371
6.5.2	Drehfeld	375

6.5.3	Synchronmaschine	379
6.5.4	Asynchronmaschine	385
6.6	Elektrische Anlagenkonzepte	392
6.6.1	Asynchrongenerator mit direkter Netzkopplung	392
6.6.2	Synchrongenerator mit direkter Netzkopplung	396
6.6.3	Synchrongenerator mit Umrichter und Zwischenkreis	397
6.6.4	Drehzahlregelbare Asynchrongeneratoren	399
6.6.5	Inselnetzanlagen	400
6.7	Netzbetrieb	401
6.7.1	Anlagenertrag	401
6.7.2	Netzanschluss	401
7	Wasserkraft	405
7.1	Einleitung	405
7.2	Dargebot der Wasserkraft	406
7.3	Wasserkraftwerke	410
7.3.1	Laufwasserkraftwerke	411
7.3.2	Speicherwasserkraftwerke	413
7.3.3	Pumpspeicherkraftwerke	414
7.3.4	Betonkugelspeicher und Lageenergiespeicher	418
7.4	Wasserturbinen	421
7.4.1	Turbinenarten	421
7.4.2	Turbinenwirkungsgrad	425
7.5	Weitere technische Anlagen zur Wasserkraftnutzung	427
7.5.1	Gezeitenkraftwerke	427
7.5.2	Meeresströmungskraftwerke	428
7.5.3	Wellenkraftwerke	429
8	Geothermie und Wärmepumpen	433
8.1	Geothermievorkommen	433
8.2	Geothermische Heizwerke	438
8.3	Geothermische Stromerzeugung	439
8.3.1	Kraftwerksprozesse	439
8.3.2	Geothermische Kraftwerke	441

8.4	Wärmepumpen	443
8.4.1	Kompressionswärmepumpen	443
8.4.2	Absorptionswärmepumpen	449
8.4.3	Adsorptionswärmepumpen	451
8.5	Auslegung von Wärmepumpen	451
8.5.1	Einsatzgebiete	451
8.5.2	Kennzahlen	452
8.5.3	Effizienter Einsatz	455
8.5.4	Auslegung eines Erdkollektors	457
9	Nutzung der Biomasse	459
9.1	Vorkommen an Biomasse	459
9.1.1	Feste Bioenergieträger	462
9.1.2	Flüssige Bioenergieträger	466
9.1.3	Gasförmige Bioenergieträger	471
9.1.4	Flächenerträge und Umweltbilanz	472
9.2	Biomasseanlagen	474
9.2.1	Biomasseheizungen	474
9.2.2	Biomassekraftwerke	477
10	Wasserstoffwirtschaft	479
10.1	Einleitung	479
10.2	Wasserstofferzeugung	480
10.3	Wasserstofftransport und Wasserstoffspeicherung	483
10.4	Wasserstoffbasierte Energieträger	487
10.4.1	Energieträger für den Transport	488
10.4.2	Methan als Speicher der Energiewende	489
10.4.3	E-Fuels	493
10.5	Brennstoffzellen	494
10.5.1	Einleitung	494
10.5.2	Brennstoffzellentypen	496
10.5.3	Wirkungsgrade und Betriebsverhalten	499
11	Wirtschaftlichkeitsberechnungen	503
11.1	Einleitung	503
11.2	Energiegestehungskosten	504

- 11.2.1 Berechnungen ohne Kapitalverzinsung 504
- 11.2.2 Berechnungen mit Kapitalverzinsung 515
- 11.2.3 Vergütung für regenerative Energieanlagen 520
- 11.2.4 Zukünftige Entwicklung der Kosten für regenerative Energien ... 521
- 11.2.5 Kosten für grünen Wasserstoff 524
- 11.2.6 Kosten konventioneller Energiesysteme 526
- 11.3 Externe Kosten des Energieverbrauchs 528
 - 11.3.1 Subventionen im Energiemarkt 528
 - 11.3.2 Ausgaben für Forschung und Entwicklung 531
 - 11.3.3 Kosten für Umwelt- und Gesundheitsschäden 533
 - 11.3.4 Sonstige externe Kosten 534
 - 11.3.5 Internalisierung der externen Kosten 534
- 11.4 Kritische Betrachtung der Wirtschaftlichkeitsberechnungen 536
 - 11.4.1 Unendliche Kapitalvermehrung 536
 - 11.4.2 Die Verantwortung des Kapitals 538
- 12 Simulation und Downloads zum Buch 541**
- 12.1 Allgemeines zur Simulation 541
- 12.2 Der Downloadbereich zum Buch 542
 - 12.2.1 Start und Überblick 542
 - 12.2.2 Abbildungen und Software-Links 544
 - 12.2.3 Vermischtes 545
- Literaturverzeichnis 547**
- Anhang 559**
- Wichtige Konstanten 559
- Wichtige englische und US-amerikanische Einheiten 560
- Index 561**

Vorwort zur ersten Auflage

Die zunehmende Umweltzerstörung wird in Umfragen stets unter den ersten in der Zukunft zu lösenden Problemen genannt. Zahlreiche Folgen wie der Treibhauseffekt oder das Waldsterben gelten neben anderen Erscheinungen als Auswirkungen der heutigen Energieversorgung. Verschiedene erneuerbare Energieträger ermöglichen dagegen, unseren Energiebedarf mit deutlich weniger Eingriffen in Natur und Umwelt zu decken.

Dieses Fachbuch ist in erster Linie für Studierende, Personen im Forschungsbereich oder andere technisch Interessierte gedacht. Neben der Beschreibung der Technologie von wichtigen erneuerbaren Energiesystemen werden Berechnungs- und Simulationsmöglichkeiten dargestellt. Der Schwerpunkt liegt dabei auf Technologien mit einem großen Entwicklungspotenzial wie Solarthermie, Photovoltaik und Windenergie. Beschäftigt man sich mit der Thematik der erneuerbaren Energien, ist es nahezu unmöglich, die Fragen der Technik von Problemen der heutigen Energieversorgung und von gesellschaftspolitischen Hintergründen zu trennen. Es muss somit an dieser Stelle immer ein Kompromiss für die Darstellung der Thematik gefunden werden. Für ein Fachbuch mit technischem Schwerpunkt besteht die Verpflichtung, sich sachlich neutral mit den Technologien zu beschäftigen. Der subjektive Einfluss des Autors lässt sich hierbei jedoch niemals vollständig vermeiden. Bereits durch die Themenwahl, die Präsentation von Daten oder gerade die nicht behandelten Themen werden Meinungen geprägt.

Aus diesen Gründen wird bei diesem Buch bewusst darauf verzichtet, technologische Aspekte von auftretenden Problemen und dem gesellschaftspolitischen Hintergrund zu trennen. Vielmehr gehört es auch zu den Aufgaben der Ingenieurwissenschaften, sich mit den Folgen der Nutzung der entwickelten Technologie auseinanderzusetzen.

In Technikerkreisen wird oft die weit verbreitete Meinung geäußert, dass die Technik an sich eigentlich keine negativen Folgen verursachen kann. Nur der Einsatz spezieller Technologien führe zu negativen Effekten. Es ist jedoch der Menschheit gegenüber

unverantwortlich, sich für technische Innovationen nur um der Technik willen zu interessieren. Oftmals sind die Auswirkungen neuer oder auch schon lange bekannter Technologien nur schwer einzuschätzen. Gerade aus diesem Grund besteht für alle, die an der Entwicklung und Nutzung einer Technik beteiligt sind, die Verpflichtung, negative Folgen kritisch einzuschätzen und vor möglichen Schäden rechtzeitig zu warnen. Um dieser Verpflichtung gerecht zu werden, versucht dieses Buch, neben einer sachlichen Darstellung der Fakten stets auch auf mögliche schädliche Konsequenzen hinzuweisen.

Nach meiner Erfahrung im Ausbildungsbereich beschäftigt sich ein Großteil der Personen, die ein Interesse für Technologien im Bereich der erneuerbaren Energien zeigen, bewusst auch mit den Fragen der Folgen herkömmlicher Technologien. Eine Verknüpfung von technischen mit gesellschaftspolitischen Inhalten wird meist ausdrücklich gewünscht. Aus diesem Grund werden in diesem Buch nicht nur Fragen der Technologie, sondern in Kapitel 1 und 11 auch Probleme der Energiewirtschaft bewusst angesprochen. Hierbei wird Wert darauf gelegt, die Aussagen stets mit aktuellem Zahlenmaterial objektiv zu untermauern. Ziel ist es, Aspekte und Fakten zu liefern, mit denen sich die Leserinnen und Leser ihr eigenes Urteil bilden können.

An dieser Stelle danke ich allen, die mit inhaltlichen und gestalterischen Anregungen zum Entstehen dieses Buches beigetragen haben.

Besonders motiviert haben mich auch die zahlreichen Gespräche und Diskussionen während der Erstellung des Buches. Sie haben mir gezeigt, dass es sich gerade bei den über die technischen Probleme hinausgehenden Fragestellungen um wichtige Themen handelt, die oft ignoriert werden, denn sie stellen nicht selten unsere bisherige Handlungsweise infrage. Eine Lösung ist schwierig, kann aber dennoch gefunden werden. Hierzu sind konstruktive Diskussionen ein erster Schritt, und ich hoffe, dass dieses Buch einen Beitrag hierzu leisten wird.

Berlin, im Januar 1998

Volker Quaschnig

Vorwort zur dreizehnten Auflage

Das große Interesse für dieses zum Standardwerk gewordene Lehr- und Fachbuch und die positive Resonanz haben gezeigt, dass die gewählte Verknüpfung von technischen Erläuterungen, Berechnungen und kritischen Fragestellungen zur Energiewirtschaft und zum Klimaschutz bei den Leserinnen und Lesern auf breite Zustimmung stößt.

Die immer gravierenderen Klimaveränderungen ermahnen uns auf bedrückende Weise, dass dringend ein schneller Wandel unserer Energieversorgung erfolgen muss. Die deutsche Energiewende könnte hierbei ein Vorbild werden, wenn diese mutiger vorangetrieben wird. Das Tempo und die beschlossenen Maßnahmen reichen derzeit immer noch nicht aus. Die in diesem Buch beschriebenen Technologien und Möglichkeiten liefern die Basis für eine nachhaltige, vollständig regenerative Versorgung.

Vorherige Auflagen des Buches wurden bereits in mehrere Sprachen übersetzt. Diese dreizehnte Auflage wurde vollständig aktualisiert und um wichtige neue Entwicklungen erweitert.

Trotz sorgfältiger Prüfung lassen sich kleinere Fehler und Unstimmigkeiten in einem Buch nur selten völlig vermeiden. Ein besonderer Dank gilt deshalb allen, die mit einer entsprechenden Mitteilung dazu beigetragen haben, diese zu beseitigen. Nicht zuletzt möchte ich meiner Familie, Freunden und Kollegen für die Unterstützung bei der Erstellung des Buches danken. Ein besonderer Dank gilt Bernhard Siegel sowie den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Hanser Verlags für die perfekte Unterstützung bei der Aktualisierung des Buches.

Berlin, im Juni 2025

Prof. Dr. Volker Quaschning

Hochschule für Technik und Wirtschaft HTW Berlin

www.volker-quaschning.de

1

Energie und Klimaschutz

1.1 Der Begriff Energie

Der Begriff Energie ist uns sehr geläufig, ohne dass wir uns darüber noch Gedanken machen. Dabei wird er in den unterschiedlichsten Zusammenhängen verwendet. So spricht man von der Lebensenergie oder im Sinne von Tatkraft oder Temperament auch von einem Energiebündel.

In diesem Buch werden nur technisch nutzbare Energieformen und hiervon speziell regenerative Energien behandelt, zu deren Beschreibung physikalische Gesetze herangezogen werden. Fast untrennbar mit der Energie verbunden ist die Leistung. Da die Begriffe Energie und Leistung sehr oft verwechselt werden, soll am Anfang dieses Buches auf eine nähere Beschreibung dieser und damit zusammenhängender Größen eingegangen werden.

Allgemein ist Energie die Fähigkeit eines Systems, äußere Wirkungen hervorzubringen, wie beispielsweise eine Kraft entlang einer Strecke. Durch Zufuhr oder Abgabe von Arbeit kann die Energie eines Körpers verändert werden. Die Energie kann hierbei in zahlreichen unterschiedlichen Formen vorkommen. Dazu zählen die

- mechanische Energie,
- Lageenergie oder potenzielle Energie,
- Bewegungsenergie oder kinetische Energie,
- Wärme oder thermische Energie,
- magnetische Energie,
- Ruhe- oder Massenenergie,
- elektrische Energie,

- Strahlungsenergie und
- chemische Energie.

Ein Liter Benzin ist nach obiger Definition eine Art von gespeicherter Energie, denn durch seine Verbrennung kann zum Beispiel ein Auto, welches eine gewisse Masse besitzt, durch die Motorkraft eine bestimmte Strecke bewegt werden. Das Bewegen des Autos ist also eine Form von Arbeit.

Auch Wärme ist eine Energieform. Dies kann zum Beispiel an einem Mobile beobachtet werden, bei dem sich durch die aufsteigende warme Luft einer brennenden Kerze ein Karussell dreht. Für die Drehung ist auch eine Kraft notwendig.

Im Wind ist ebenfalls Energie enthalten, die zum Beispiel in der Lage ist, die Flügel einer Windkraftanlage zu drehen. Durch die Sonnenstrahlung kann Wärme erzeugt werden. Auch Strahlung, speziell die Sonnenstrahlung, ist also eine Form von Energie.

Die **Leistung**

$$P = \frac{dW}{dt} = \dot{W} \quad (1.1)$$

ist durch die Ableitung der Arbeit W nach der Zeit t definiert. Sie gibt also an, in welcher Zeitspanne eine Arbeit verrichtet wird. Wenn zum Beispiel eine Person einen Sack Zement 1 m hochhebt, ist dies eine Arbeit. Durch die verrichtete Arbeit wird die Lageenergie des Sacks vergrößert. Wird der Sack doppelt so schnell hochgehoben, ist die benötigte Zeit geringer, die Leistung ist doppelt so groß, auch wenn die Arbeit die gleiche bleibt.

Die **Einheit der Energie** und der Arbeit ist, abgeleitet aus den geltenden SI-Einheiten, J (Joule), Ws (Wattsekunde) oder Nm (Newtonmeter). Die Leistung wird in W (Watt) gemessen. In Tabelle 1.1 sind Umrechnungsfaktoren für die wichtigsten heute gebräuchlichen Einheiten der Energietechnik zusammengefasst. Daneben existieren einige veraltete Energieeinheiten wie Kilopondmeter kpm ($1 \text{ kpm} = 2,72 \cdot 10^{-6} \text{ kWh}$), erg ($1 \text{ erg} = 2,78 \cdot 10^{-14} \text{ kWh}$), das in der Physik übliche Elektronvolt eV ($1 \text{ eV} = 4,45 \cdot 10^{-26} \text{ kWh}$) sowie die in den USA gebräuchliche Einheit Btu (British Thermal Unit, $1 \text{ Btu} = 1055,06 \text{ J} = 0,000293071 \text{ kWh}$).

Da viele physikalische Größen oftmals sehr kleine oder sehr große Werte aufweisen und die Exponentialschreibweise sehr unhandlich ist, wurden Vorsatzzeichen eingeführt, die in Tabelle 1.2 dargestellt sind.

Vielfach werden bei der Verwendung der Begriffe Energie und Leistung sowie deren Einheiten Fehler gemacht, und nicht selten werden Einheiten und Größen durcheinandergebracht. Oft wird durch falschen Gebrauch von Größen der Sinn von Äußerungen verändert, oder es kommt zumindest zu Missverständnissen.

Tabelle 1.1 Umrechnungsfaktoren zwischen verschiedenen Energieeinheiten

	kJ	kcal	kWh	kg SKE	kg RÖE	m³ Erdgas
1 Kilojoule (1 kJ = 1000 Ws)	1	0,2388	0,000278	0,000034	0,000024	0,000032
1 Kilocalorie (kcal)	4,1868	1	0,001163	0,000143	0,0001	0,00013
1 Kilowattstunde (kWh)	3600	860	1	0,123	0,086	0,113
1 kg Steinkohle- einheit (SKE)	29 308	7000	8,14	1	0,7	0,923
1 kg Rohöleinheit (RÖE)	41 868	10 000	11,63	1,428	1	1,319
1 m ³ Erdgas	31 736	7580	8,816	1,083	0,758	1

Tabelle 1.2 Vorsätze und Vorsatzzeichen

Vorsatz	Abkürzung	Wert	Vorsatz	Abkürzung	Wert
Kilo	k	10 ³ (Tausend)	Milli	m	10 ⁻³ (Tausendstel)
Mega	M	10 ⁶ (Million)	Mikro	μ	10 ⁻⁶ (Millionstel)
Giga	G	10 ⁹ (Milliarde)	Nano	n	10 ⁻⁹ (Milliardstel)
Tera	T	10 ¹² (Billion)	Piko	p	10 ⁻¹² (Billionstel)
Peta	P	10 ¹⁵ (Billiarde)	Femto	f	10 ⁻¹⁵ (Billiardstel)
Exa	E	10 ¹⁸ (Trillion)	Atto	a	10 ⁻¹⁸ (Trillionstel)
Zeta	Z	10 ²¹ (Trilliarde)	Zepto	z	10 ⁻²¹ (Trilliardstel)

Als Beispiel soll ein Zeitschriftenartikel aus den 1990er-Jahren über ein Solarhaus dienen. Er beschreibt eine Photovoltaikanlage mit einer Gesamtleistung von 2,2 kW. Später im Text beklagte der Autor, dass die damalige Vergütung pro kW bei der Einspeisung in das öffentliche Netz mit 0,087 € äußerst gering war. Den Einheiten nach zu urteilen, wurde die Anlage nach Leistung (Einheit der Leistung = kW) vergütet, das wären für die gesamte Anlage dann $2,2 \text{ kW} \cdot 0,087 \text{ €/kW} = 0,19 \text{ €}$. Sicher, Solarstrom wurde lange Zeit schlecht vergütet, doch mit knapp 20 Eurocents insgesamt musste sich wohl kein Anlagenbesitzer zufriedengeben. Der Autor hatte an dieser Stelle gemeint, dass die von der Solaranlage in das öffentliche Netz eingespeiste elektrische Energie pro Kilowattstunde (kWh) mit 0,087 € vergütet wurde. Speiste die Anlage in einem Jahr 1980 kWh in das Netz ein, so erhielt der Betreiber mit 172,26 € immerhin das Neunhundertfache. Ein Beispiel dafür, dass ein fehlendes kleines „h“ große Unterschiede zur Folge haben kann.

Energie kann im physikalischen Sinne weder erzeugt noch vernichtet werden oder gar verloren gehen. Dennoch spricht man oft von Energieverlusten oder der Energiegewinnung, obwohl in der Physik für die Energie der folgende **Energieerhaltungssatz** gilt:

In einem abgeschlossenen System bleibt der Energieinhalt konstant. Energie kann weder vernichtet werden noch aus nichts entstehen; sie kann sich in verschiedene Formen umwandeln oder zwischen verschiedenen Teilen des Systems ausgetauscht werden.

Es kann also nur Energie von einer Form in eine andere umgewandelt werden, wofür noch einmal das Benzin und das Auto als Beispiel dienen sollen. Benzin ist eine Art von gespeicherter chemischer Energie. Durch Verbrennung entsteht thermische Energie. Diese wird vom Motor in Bewegungsenergie umgesetzt und an das Auto weitergegeben. Ist das Benzin verbraucht, steht das Auto wieder. Die Energie ist dann jedoch nicht verschwunden, sondern wurde bei einem zurückgelegten Höhenunterschied in Lageenergie umgewandelt oder durch Abwärme des Motors sowie über die Reibung an den Reifen und mit der Luft als Wärme an die Umgebung abgegeben. Diese Umgebungswärme kann aber in der Regel von uns Menschen nicht weiter genutzt werden. Durch die Autofahrt wurde ein Großteil des nutzbaren Energiegehalts des Benzins in nicht mehr nutzbare Umgebungswärme überführt. Für uns ist diese Energie also verloren. Vernichtete oder verlorene Energie ist demnach Energie, die von einer höherwertigen Form in eine niederwertige, meist nicht mehr nutzbare Form umgewandelt wurde.

Anders sieht es bei einer Photovoltaikanlage aus. Sie wandelt Sonnenstrahlung direkt in elektrische Energie um. Es wird auch davon gesprochen, dass eine Solaranlage Energie erzeugt. Physikalisch ist auch dies nicht korrekt. Genau genommen überführt die Photovoltaikanlage eine für uns schlecht nutzbare Energieform (Solarstrahlung) in eine höherwertige Energieform (Elektrizität).

Bei der Umwandlung kann die Energie mit unterschiedlicher Effizienz genutzt werden. Dies soll im Folgenden am Beispiel des Wasserkochens verdeutlicht werden.

Die **Wärmeenergie** Q , die nötig ist, um einen Liter Wasser ($m = 1 \text{ kg}$) von der Temperatur $\vartheta_1 = 15^\circ\text{C}$ auf $\vartheta_2 = 98^\circ\text{C}$ zu erwärmen, berechnet sich mit der Wärmekapazität c von Wasser $c_{\text{H}_2\text{O}} = 4,187 \text{ kJ}/(\text{kg K})$ über

$$Q = c \cdot m \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1) \quad (1.2)$$

zu $Q = 348 \text{ kJ} = 97 \text{ Wh}$.

In einer Verbraucherzeitschrift wurden verschiedene Systeme zum Wasserkochen verglichen. Die Ergebnisse sind in Bild 1.1 dargestellt. Hierbei wurde neben verschiedenen elektrischen Geräten auch der Gasherd mit einbezogen. Aus der Grafik geht scheinbar hervor, dass der Gasherd, obwohl bei diesem die Energiekosten am geringsten sind, in puncto Energieverbrauch am schlechtesten abschneidet. Das lässt sich dadurch erklären, dass verschiedene Energiearten miteinander verglichen wurden.

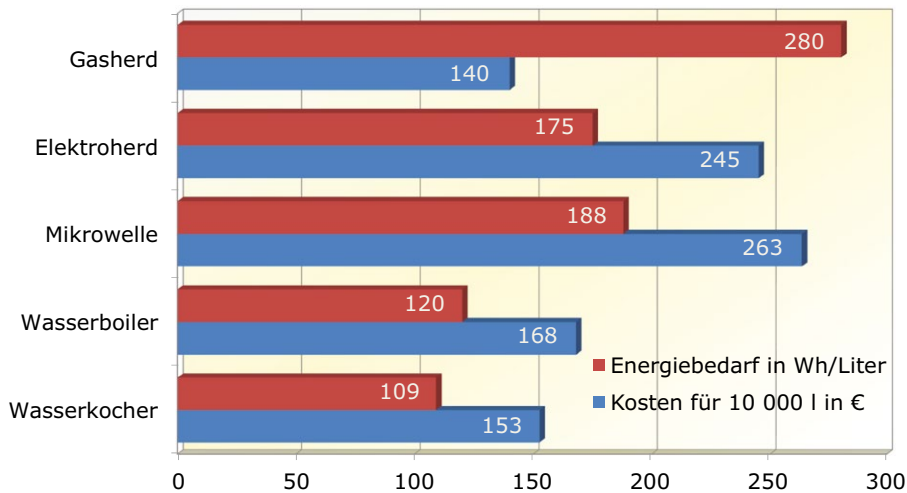


Bild 1.1 „So viel kostet kochendes Wasser“ aus dem Jahr 1994 [Sti94]

Zum Erwärmen des Wassers benötigt der Elektroherd elektrische Energie. Diese kommt in der Natur, außer zum Beispiel bei Gewittern oder beim Zitteraal, der seine Gegner durch Stromstöße betäubt, äußerst selten vor. Der elektrische Strom muss also vom Menschen aus einem Energieträger, wie zum Beispiel Kohle, technisch in einem Kraftwerk erzeugt werden. Hierbei fallen enorme Abwärmemengen an, die zum Großteil in die Umgebung abgegeben werden. Von dem Energieträger Kohle wird deshalb nur ein geringer Teil in elektrische Energie umgewandelt, der Rest geht als Abwärme verloren. Die Qualität der Umwandlung kann durch den **Wirkungsgrad** η beschrieben werden, der wie folgt definiert ist:

$$\text{Wirkungsgrad } \eta = \frac{\text{nutzbringend gewonnene Energie}}{\text{aufgewendete Energie}} \quad (1.3)$$

Bei einem durchschnittlichen elektrischen Dampfkraftwerk in Deutschland lag in den 1990er-Jahren der Wirkungsgrad bei ca. 34 % [Hof95]. Bei modernen Kraftwerken ist der Wirkungsgrad geringfügig höher. Rund 60 % der aufgewendeten Energie gehen dennoch als Abwärme verloren, nur rund 40 % stehen als elektrische Energie zur Verfügung.

Bei der technischen Nutzung der Energie gibt es also verschiedene **Stufen der Energiewandlung**, die nach Tabelle 1.3 mit Primärenergie, Endenergie und Nutzenergie bezeichnet werden.

Die zuvor berechnete Wärmemenge stellt also die Nutzenergie dar, und die Werte aus Bild 1.1 verkörpern die Endenergie. Der Vergleich der Energieausbeute von Gas und Elektrizität sollte sich jedoch auf die Primärenergie beziehen, da es sich bei ihnen um nur schwer vergleichbare Endenergieformen handelt.

Tabelle 1.3 Die Begriffe Primärenergie, Endenergie und Nutzenergie

Begriff	Definition	Energieformen bzw. Energieträger
Primärenergie	Energie in ursprünglicher, noch nicht technisch aufbereiteter Form	z. B. Rohöl, Kohle, Uran, Solarstrahlung, Wind
Endenergie	Energie in der Form, wie sie dem Endverbraucher zugeführt wird	z. B. Erdgas, Heizöl, Kraftstoffe, Elektrizität („Strom“), Fernwärme
Nutzenergie	Energie in der vom Endverbraucher genutzten Form	z. B. Licht zur Beleuchtung, Wärme zur Heizung, Antriebsenergie für Maschinen und Fahrzeuge

Bei der Elektrizität sind dies im Kraftwerk eingesetzte Energieträger wie Kohle. Auch das Erdgas zum Wassererwärmen ist eine Endenergie. Beim Transport des Erdgases zum Verbraucher fallen auch Verluste an, die jedoch im Vergleich zu denen im elektrischen Kraftwerk sehr gering sind. Dadurch liegt der Primärenergiebedarf des Elektroherdes mit gut 460 Wh = 1656 kJ rund 50 % höher als der des Gasherdes, obwohl der Endenergieverbrauch um über 30 % geringer ist. Die Energiewandlungsketten am Beispiel der Wassererwärmung durch Elektro- und Gasherd sind nochmals in Bild 1.2 vergleichend gegenübergestellt.

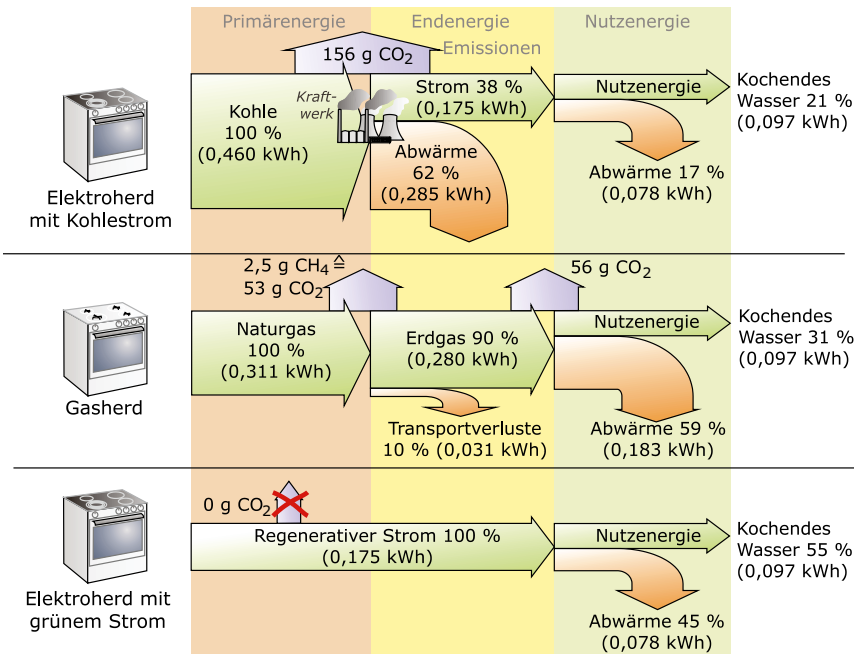


Bild 1.2 Energiewandlungskette, Verluste und Kohlendioxidemissionen beim Wasserkochen

Beim Primärenergieverbrauch, der für die Umweltbeeinträchtigung verschiedener Systeme entscheidend ist, schneidet also beim Vergleich konventioneller Energieträger der Gasherd beim Wassererwärmen am besten ab. Dieses Beispiel zeigt deutlich, dass klar zwischen Primärenergie, Endenergie und Nutzenergie unterschieden werden muss. Ansonsten kann es, wie beim Vergleich von Gasherd und Elektroherd in Bild 1.1, zu Fehlinterpretationen kommen.

1.2 Entwicklung des Energiebedarfs

1.2.1 Entwicklung des Weltenergiebedarfs

Gegen Ende des 18. Jahrhunderts haben Energieträger wie Erdöl oder Kohle kaum eine Rolle gespielt. Ein Großteil des Energiebedarfs in Form von Wärme wurde durch Brennholz gedeckt. In der Nutzung der Wasserkraft und der Windkraft war man bereits weit fortgeschritten. Sie wurden in Mühlen und Bewässerungsanlagen technisch genutzt.

Als 1769 von James Watt eine brauchbare Dampfmaschine entwickelt wurde, war damit der Grundstein für die Industrialisierung gelegt. Die Dampfmaschine und später die Verbrennungsmotoren lösten Wind- und Wasserräder allmählich ab. Als wichtigste Energieträger konnten sich Kohle und Anfang des 20. Jahrhunderts, vorangetrieben durch die Automobilisierung, das Erdöl mehr und mehr durchsetzen. Brennholz als Energieträger verlor in den Industrienationen immer mehr an Bedeutung. Die Wasserkraft wurde, im Gegensatz zu den landschaftsverträglichen Wassermühlen aus früheren Zeiten, in zunehmendem Maße in großen technischen Anlagen genutzt.

Nach der Weltwirtschaftskrise von 1929 stieg der Energieverbrauch sprunghaft an. Nach dem Zweiten Weltkrieg gewannen das Erdgas und seit den 1960er-Jahren die Kernenergie an Bedeutung, konnten aber die Vorreiterrolle von Erdöl und Kohle nicht ablösen. Der Anteil der Kernenergie zur Deckung des derzeitigen Primärenergiebedarfs ist auch heute noch verhältnismäßig unbedeutend. Die fossilen Energieträger wie Kohle, Erdöl oder Erdgas decken derzeit etwa 85 % des Weltprimärenergiebedarfs.

Die Dimensionen des Anstiegs des Weltenergieverbrauchs zeigt Bild 1.3, welches die jährliche Erdölförderung darstellt, wobei 1 Mio. t Rohöl etwa $42 \text{ PJ} = 42 \cdot 10^{15} \text{ J}$ entsprechen. Nach dem Zweiten Weltkrieg sind die Fördermengen exponentiell angestiegen. Durch die beiden Ölpreiskrisen 1973 und 1979 sind die Fördermengen kurzfristig deutlich zurückgegangen. Hierdurch wurde das Trendwachstum der Wirtschaft und des Energieverbrauchs um etwa vier Jahre zurückgeworfen. Auch die Coronakrise hat einen spürbaren Rückgang verursacht.

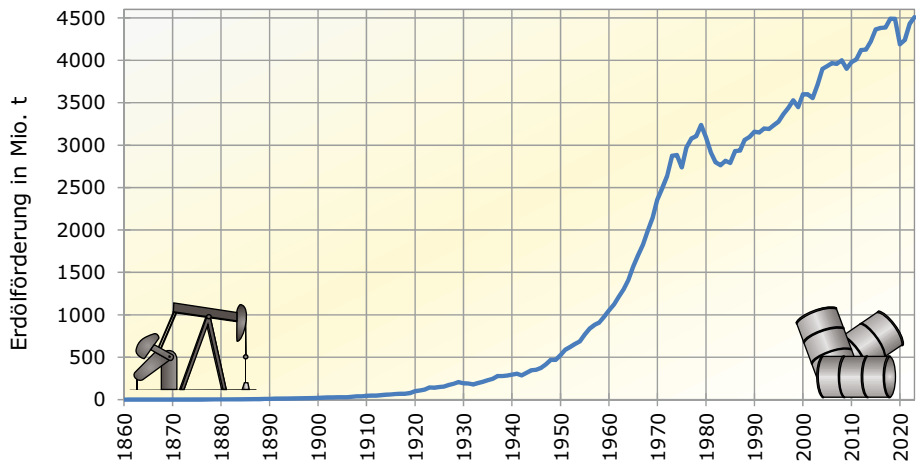


Bild 1.3 Entwicklung der jährlichen Welterdölförderung (Daten: [Hil95, EI24])

Tabelle 1.4 zeigt den **Weltprimärenergieverbrauch** nach unterschiedlichen Energieträgern für verschiedene Jahre. Hierbei ist zu beachten, dass bei Energiestatistiken für Primärelektrizität wie Wasserkraft und Kernenergie nicht selten andere Bewertungsmaßstäbe angelegt werden. Meist wird die elektrische Energie eines Kernkraftwerkes in den Statistiken mit einem Wirkungsgrad von 33 bis 38 % gewichtet. Dadurch soll in Analogie zur Energiewandlung in fossilen Kraftwerken dem dortigen Wirkungsgrad Rechnung getragen werden. Wird bei einem Vergleich von Kernenergie und Wasserkraft dieser Faktor bei der Wasserkraft nicht berücksichtigt, entsteht der Eindruck, dass der Anteil der Kernenergie zur Deckung des weltweiten Strombedarfs deutlich größer als der Anteil der Wasserkraft ist, obwohl in Wahrheit der Anteil der Wasserkraft etwas höher ist.

In Tabelle 1.4 sind erneuerbare Energieträger zur Wärme- und Treibstoffversorgung wie Biomasse (Brennholz, pflanzliche Reststoffe, Biotreibstoffe) sowie Solarthermie und Geothermie zur Wärmeerzeugung nicht enthalten, die im Jahr 2007 zusammen einen Anteil von rund 50 000 PJ (Petajoule) am Primärenergieverbrauch hatten.

Tabelle 1.4 Weltprimärenergieverbrauch ohne erneuerbare Wärme und Treibstoffe [Enq95, EI24]

PJ	1925	1938	1950	1960	1980	2000	2023
Feste Brennstoffe ¹⁾	36 039	37 856	46 675	58 541	75 084	98 654	164 040
Flüssige Brennstoffe ²⁾	5772	11 017	21 155	43 921	127 823	154 939	196 430
Erdgas	1406	2930	7384	17 961	51 258	86 472	144 370
Kernenergie ³⁾	0	0	0	0	6739	24 451	24 570

PJ	1925	1938	1950	1960	1980	2000	2023
Wasserkraft ³⁾	771	1774	3316	6632	16 092	25 152	37 504
Windkraft ³⁾	0	0	0	0	0	298	20 568
Solarenergie ³⁾	0	0	0	0	0	11	14 520
Andere Erneuerbare ^{3) 4)}	0	0	0	100	468	1755	6913
Gesamt	43 988	53 577	78 530	127 151	277 464	391 732	608 914

1) Braunkohle, Steinkohle u. a.; 2) Erdölprodukte; 3) mit Wirkungsgrad von 40,7 % (2023) bzw. 38 % (2000) gewichtet; 4) nur Elektrizität

Der Energiebedarf der Welt wird in den nächsten Jahren weiterhin stark zunehmen. Während der Energieverbrauch der Industrieländer langsamer wächst, gibt es in vielen Schwellenländern mit hohem Wirtschaftswachstum einen großen Nachholbedarf. Außerdem wird die Weltbevölkerung in den nächsten Jahrzehnten ansteigen. Ein Anstieg des Energiebedarfs bis Ende des Jahrhunderts um den Faktor 3 bis 5 ist daher durchaus realistisch. Hierdurch werden sich die Probleme der heutigen Energieversorgung sowie die Folgen des Treibhauseffekts um diesen Faktor verstärken, und die Vorräte an fossilen Brennstoffen werden noch schneller zur Neige gehen.

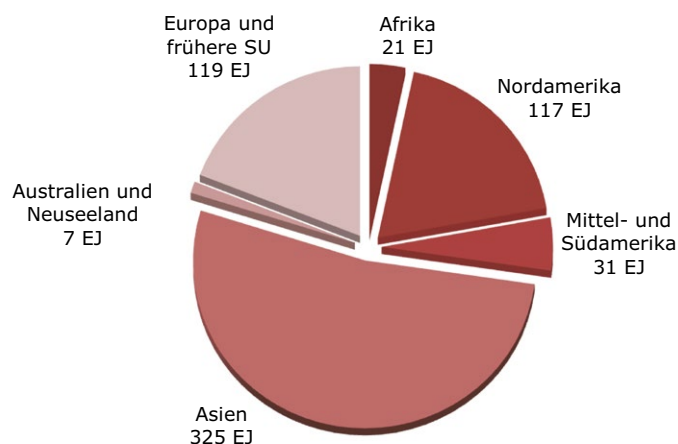


Bild 1.4
Primärenergiever-
brauch der Welt nach
Regionen im Jahr 2023
(Daten: [EI24])

Der Energiebedarf auf der Erde ist sehr ungleichmäßig verteilt, wie aus Bild 1.4 hervorgeht. Zwar hat der Primärenergiebedarf in Europa, in Asien und in Nordamerika jeweils einen sehr hohen Anteil, jedoch ist die Bevölkerung Asiens sechsmal größer als in Europa und sogar um mehr als das Zehnfache größer als in Nordamerika. Bevölkerungsreiche, aber wirtschaftlich schwach entwickelte Kontinente wie Südamerika oder Afrika spielen bei der Struktur des Weltprimärenergieverbrauchs heute noch eine Nebenrolle. Auf die ungleiche Verteilung des Energieverbrauchs wird spä-

ter noch einmal bei der Darstellung der Pro-Kopf-Kohlendioxidemission eingegangen, die eng mit dem Energieverbrauch verknüpft ist.

1.2.2 Entwicklung des Energiebedarfs in Deutschland

Bis Ende der 1970er-Jahre hat der Energiebedarf in Deutschland stetig zugenommen, geprägt von der Annahme, dass Wirtschaftswachstum und Energieverbrauch eng miteinander gekoppelt sind. Erst die Ölkrisen der 1970er- und 1980er-Jahre führten zu anderen Erkenntnissen und Verhaltensweisen. Jetzt war Energiesparen angesagt, und leere Autobahnen an autofreien Sonntagen offenbarten die starke Abhängigkeit von den fossilen Energieträgern. Man begann wieder ernsthaft über den Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energieträger nachzudenken. Doch nach der Entspannung auf dem Energiemarkt durch sinkende Ölpreise wurden diese neuen Ansätze wieder zurückgedrängt, und der gewohnt verschwenderische Umgang mit den Energieressourcen hielt erneut Einzug. Die explodierenden Energiepreise während der Energiekrise in der Folge des russischen Angriffskrieges auf die Ukraine und verstärkte Klimaschutzambitionen haben den Umbau der Energieversorgung erneut beschleunigt.

Seit Anfang der 1980er-Jahre haben sich jedoch einige Details grundlegend geändert. Der Energieverbrauch stagnierte trotz anhaltenden Wirtschaftswachstums auf hohem Niveau, und es setzte sich die Erkenntnis durch, dass Energieverbrauch und Bruttonationaleinkommen nicht zwangsläufig miteinander gekoppelt sind, also steigender Wohlstand auch bei stagnierendem oder sinkendem Energieverbrauch möglich ist.

Auf den Energieverbrauch der 1980er- und 1990er-Jahre hatten weitere Ereignisse entscheidenden Einfluss. Durch den nicht unumstrittenen Ausbau der Kernenergie und einen Stromverbrauch, der deutlich unter den Erwartungen lag, gab es eine Überkapazität an Kraftwerken zur Stromerzeugung, die zulasten des Kohleverbrauchs ging. Das Unglück im ukrainischen Kernkraftwerk Tschernobyl im Jahr 1986 entzog der Kernenergie endgültig die gesellschaftliche Unterstützung. Ein weiterer Ausbau der Kernenergienutzung war nicht durchzusetzen, und der Anteil der Kernenergie an der Deckung des Primärenergiebedarfs blieb in Deutschland lange Zeit mit rund 10 % konstant. Nach dem Atomunfall in Fukushima wurde der Atomausstieg in Deutschland endgültig für das Jahr 2022 beschlossen und in der Energiekrise noch einmal um wenige Monate verschoben. Doch auch nach der Abschaltung der letzten Meiler flammt die Diskussion um die Nutzung der Atomkraft immer wieder auf. Die Argumente ähneln dabei denen, die eine starke Nutzung des Energieträgers Erdgas in den vergangenen Jahrzehnten dominierten.

Nach dem Fall der Mauer und durch die Wiedervereinigung wurden große Wirtschaftsbereiche in Ostdeutschland stillgelegt. Hierdurch kam es zu einem Sinken des Gesamtenergieverbrauchs in Deutschland, der anderenfalls weiter gestiegen wäre.

Vor allem der Abbau von Braunkohle wurde stark reduziert, aber auch die Steinkohle geriet aufgrund der hohen Kosten stark unter Druck. Gewinner der Verlagerung des Energiebedarfs auf andere Energieträger waren Erdgas und erneuerbare Energieträger wie Wind- und Sonnenenergie sowie Biomasse. Der Trend zur verstärkten Verwendung von Erdgas wurde im Jahr 2021 allerdings durch die extrem gestiegenen Gaspreise wieder unterbrochen.

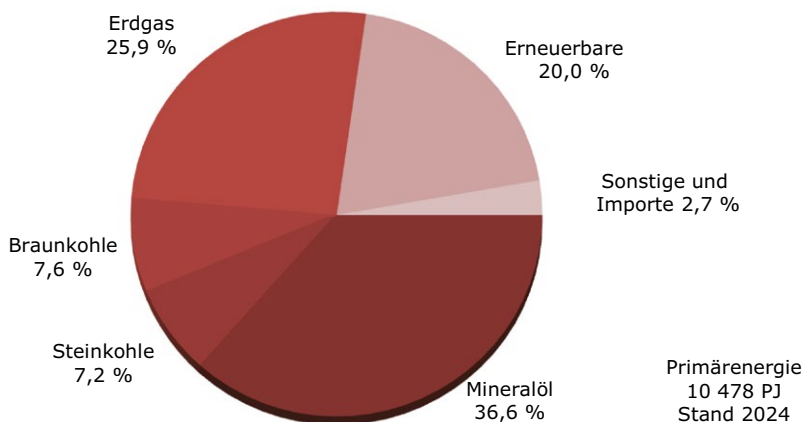


Bild 1.5 Anteile verschiedener Energieträger am Primärenergieverbrauch in Deutschland im Jahr 2024 (Daten: [AGEB24b])

Derzeit ist die Energieversorgung in Deutschland noch sehr stark auf die Nutzung fossiler Energieträger ausgerichtet. Im Wärmebereich dominieren Erdgas und Heizöl, im Verkehrssektor Erdöl und bei der Stromerzeugung die Kohlekraft. Mit rund 80 % deckten fossile Energieträger und Importe im Jahr 2024 immer noch den größten Anteil des Primärenergiebedarfs (Bild 1.5). Inzwischen haben erneuerbare Energien jedoch einen spürbaren Anteil erobert. Doch mit 20 % war der Anteil erneuerbarer Energien im Jahr 2024 trotz der Bemühungen vieler Jahre für die Energiewende noch relativ gering. Soll für einen erfolgreichen Klimaschutz der Ausstoß an Klimagasen durch die Verbrennung fossiler Energieträger möglichst noch vor dem Jahr 2040 vollständig vermieden werden, muss das Tempo der Energiewende deutlich ansteigen. Bislang hat aber keine Regierung den Mut gefunden, die dafür nötigen Maßnahmen zu planen, geschweige denn einzuleiten oder zu finanzieren.

Bei der **Struktur des Energieverbrauchs** in Deutschland haben sich in der Vergangenheit nur leichte Verlagerungen ergeben. Der Verbrauch der Sektoren Industrie, Haushalte und Verkehr bewegt sich dabei jeweils in der gleichen Größenordnung (Bild 1.6).

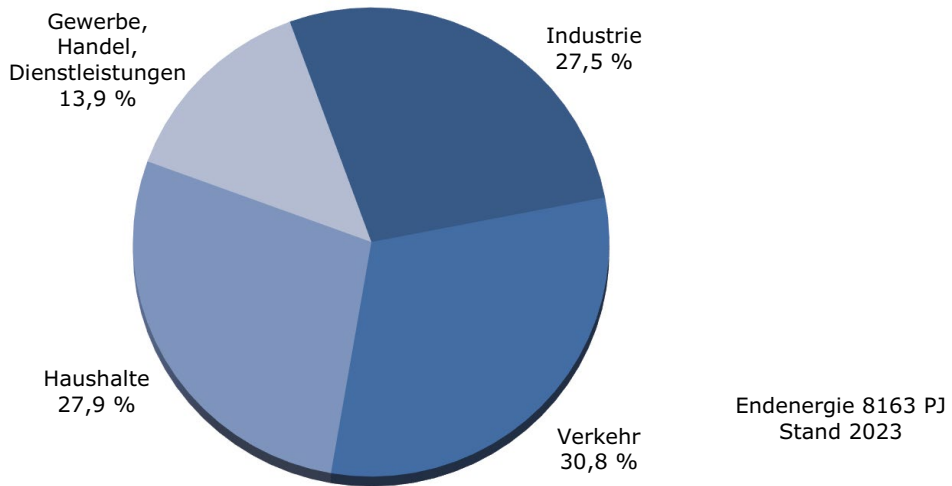


Bild 1.6 Anteile verschiedener Sektoren am Endenergieverbrauch in Deutschland im Jahr 2023 (Daten: [AGEB24a])

Der Ausbau regenerativer Energien zur Stromerzeugung der letzten Jahre führt uns vor Augen, welche Widerstände für eine erfolgreiche Energiewende noch zu überwinden sind. Bild 1.7 zeigt, dass es bei den erneuerbaren Energien ein beachtliches Wachstum gegeben hat. Während im Jahr 1990 mit Ausnahme der Wasserkraft erneuerbare Energien bei der Stromerzeugung in Deutschland keine Rolle spielten, hat der Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch im Jahr 2010 bereits 10 % und im Jahr 2020 fast 30 % betragen. Dies hat zu einem massiven Verdrängungswettbewerb mit den fossilen Kraftwerken geführt. Darum haben die großen Stromversorger und andere Interessengruppen großen Druck auf die Politik ausgeübt, den Ausbau erneuerbarer Energien stark zu verlangsamen. In der Folge wurde der Photovoltaikzubauf zwischen 2012 und 2015 auf ein Fünftel reduziert (Bild 1.8). Daraufhin gingen rund 80 000 Arbeitsplätze in der deutschen Solarbranche verloren (Bild 1.37). Seit 2017 steigt der Solarenergiezubauf infolge der stark gesunkenen Solarmodulpreise wieder spürbar an. Auch in der Windbranche kam es im Jahr 2018 durch Eingriffe der Politik zu einem massiven Rückgang bei den Zubauzahlen. Es ist dringend nötig und durch den öffentlichen Druck der Klimaschutzbewegung inzwischen auch zu erwarten, dass der Ausbau erneuerbarer Energien kurz und mittelfristig erheblich gesteigert wird, damit Deutschland seine Klimaschutzziele erreichen kann.