

Volker Quaschnig

# Regenerative Energiesysteme

Technologie – Berechnung – Klimaschutz



12., aktualisierte Auflage

HANSER



Quaschnig  
**Regenerative Energiesysteme**



**Bleiben 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](http://www.hanser-fachbuch.de/newsletter)**



Volker Quaschnig

# **Regenerative Energiesysteme**

Technologie – Berechnung – Klimaschutz

12., aktualisierte Auflage

**HANSER**

Über den Autor:

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



Print-ISBN: 978-3-446-47777-3

E-Book-ISBN: 978-3-446-47839-8

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 benützt 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.

© 2024 Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München

[www.hanser-fachbuch.de](http://www.hanser-fachbuch.de)

Lektorat: Dr. Philippa Söldenwagner-Koch

Herstellung: Melanie Zinsler

Covergestaltung: Calibar Services, Romania

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

Satz: Volker Quaschnig

Druck und Bindung: UAB BALTO print, Vilnius (Litauen)

Printed in Lithuania



## 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 daraufgelegt, 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 in Frage. 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 zwölften 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 endlich mutig vorangetrieben wird. Das Tempo und die beschlossenen Maßnahmen reichen derzeit aber immer noch nicht aus. Die in diesem Buch beschriebenen Technologien und Möglichkeiten liefern die Basis für eine nachhaltige, vollständig regenerative Versorgung.

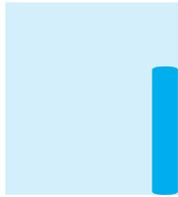
Vorherige Auflagen des Buches wurden bereits in mehrere Sprachen übersetzt. Diese zwölfte Auflage wurde vollständig aktualisiert und um wichtige neue Entwicklungen erweitert.

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 dem Carl Hanser Verlag und seinen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern für die perfekte Zusammenarbeit der letzten Jahre.

*Berlin, im Juni 2023*

*Prof. Dr. Volker Quaschnig*

Hochschule für Technik und Wirtschaft HTW Berlin  
[www.volker-quaschnig.de](http://www.volker-quaschnig.de)



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Energie und Klimaschutz .....</b>	<b>13</b>
1.1	Der Begriff Energie.....	13
1.2	Entwicklung des Energiebedarfs .....	18
1.2.1	Entwicklung des Weltenergiebedarfs.....	18
1.2.2	Entwicklung des Energiebedarfs in Deutschland.....	20
1.3	Reichweite konventioneller Energieträger .....	23
1.4	Der Treibhauseffekt .....	25
1.5	Kernenergie contra Treibhauseffekt .....	31
1.5.1	Kernspaltung .....	31
1.5.2	Kernfusion.....	35
1.6	Nutzung erneuerbarer Energien .....	35
1.6.1	Geothermische Energie.....	37
1.6.2	Planetenergie.....	37
1.6.3	Sonnenenergie .....	38
1.6.3.1	Nutzung der direkten Sonnenenergie .....	38
1.6.3.2	Nutzung der indirekten Sonnenenergie .....	41
1.7	Energiewende und Klimaschutz .....	46
1.7.1	Szenarien für den globalen Klimawandel.....	46
1.7.2	Energiewende und Klimaschutz in Deutschland .....	52
1.7.2.1	Entwicklung der Kohlendioxidemissionen in Deutschland .....	52
1.7.2.2	Regenerative Energieversorgung in Deutschland.....	54
1.7.2.3	Umbau der Energieversorgung .....	65
1.7.3	Internationaler Klimaschutz .....	68
<b>2</b>	<b>Sonnenstrahlung.....</b>	<b>72</b>
2.1	Einleitung .....	72
2.2	Der Fusionsreaktor Sonne.....	73
2.3	Sonnenstrahlung auf der Erde .....	77
2.4	Bestrahlungsstärke auf der Horizontalen .....	83
2.5	Sonnenposition und Einfallswinkel .....	86
2.6	Bestrahlungsstärke auf der geneigten Ebene .....	90
2.6.1	Direkte Strahlung auf der geneigten Ebene .....	90
2.6.2	Diffuse Strahlung auf der geneigten Ebene.....	91
2.6.3	Bodenreflexion.....	92
2.6.4	Strahlungsgewinn durch Neigung oder Nachführung .....	93
2.7	Berechnung von Abschattungsverlusten .....	96
2.7.1	Aufnahme der Umgebung.....	96
2.7.2	Bestimmung des direkten Abschattungsgrades .....	98
2.7.3	Bestimmung des diffusen Abschattungsgrades .....	99
2.7.4	Gesamtermittlung der Abschattungen.....	100
2.7.5	Optimaler Abstand bei aufgeständerten Solaranlagen .....	101

2.8	Solarstrahlungsmesstechnik und Sonnensimulatoren .....	105
2.8.1	Messung der globalen Bestrahlungsstärke .....	105
2.8.2	Messung der direkten und der diffusen Bestrahlungsstärke .....	107
2.8.3	Satellitenmessungen.....	107
2.8.4	Künstliche Sonnen.....	110
<b>3</b>	<b>Nicht konzentrierende Solarthermie.....</b>	<b>111</b>
3.1	Grundlagen .....	111
3.2	Solarthermische Systeme.....	114
3.2.1	Solare Schwimmbadbeheizung .....	114
3.2.2	Solare Trinkwassererwärmung.....	115
3.2.2.1	Schwerkraft- oder Thermosiphonanlagen.....	117
3.2.2.2	Anlagen mit Zwangsumlauf.....	118
3.2.3	Solare Heizungsunterstützung .....	121
3.2.4	Rein solare Heizung.....	122
3.2.5	Solare Nahwärmeversorgung.....	123
3.2.6	Solares Kühlen.....	124
3.3	Solkollektoren.....	125
3.3.1	Speicherkollektoren .....	126
3.3.2	Flachkollektoren.....	128
3.3.3	Vakuumröhrenkollektoren.....	131
3.4	Kollektorabsorber .....	132
3.5	Kollektorleistung und Kollektorwirkungsgrad .....	135
3.6	Rohrleitungen .....	140
3.6.1	Leitungsaufheizverluste .....	143
3.6.2	Zirkulationsverluste.....	143
3.7	Speicher .....	145
3.7.1	Trinkwasserspeicher .....	146
3.7.2	Schwimmbecken .....	149
3.8	Anlagenauslegung.....	152
3.8.1	Nutzwärmebedarf .....	152
3.8.2	Solarer Deckungsgrad und Nutzungsgrad .....	153
3.8.3	Solare Trinkwasseranlagen .....	155
3.8.4	Anlagen zur solaren Heizungsunterstützung.....	156
3.8.5	Rein solare Heizung.....	158
3.9	Aufwindkraftwerke .....	158
<b>4</b>	<b>Konzentrierende Solarthermie .....</b>	<b>161</b>
4.1	Einleitung .....	161
4.2	Konzentration von Solarstrahlung .....	161
4.3	Konzentrierende Kollektoren .....	164
4.3.1	Linienkollektoren .....	165
4.3.1.1	Kollektorarten und Kollektorgeometrie .....	165
4.3.1.2	Kollektornutzleistung und Kollektorwirkungsgrad .....	167
4.3.1.3	Längenausdehnung.....	171
4.3.1.4	Parabollinienkollektorfelder.....	171
4.3.2	Punktkonzentratoren.....	174
4.4	Wärmeerkraftmaschinen .....	175
4.4.1	Carnot-Prozess .....	175
4.4.2	Clausius-Rankine-Prozess.....	175
4.4.3	Joule-Prozess.....	178
4.4.4	Stirling-Prozess.....	179
4.5	Konzentrierende solarthermische Anlagen.....	179

4.5.1	Parabolrinnenkraftwerke .....	179
4.5.2	Solarturmkraftwerke .....	184
4.5.2.1	Offener volumetrischer Receiver .....	185
4.5.2.2	Druck-Receiver .....	186
4.5.3	Dish-Stirling-Anlagen .....	187
4.5.4	Sonnenöfen und Solarchemie .....	188
4.6	Stromimport .....	189
<b>5</b>	<b>Photovoltaik .....</b>	<b>192</b>
5.1	Einleitung .....	192
5.2	Funktionsweise von Solarzellen .....	194
5.2.1	Atommodell nach Bohr .....	194
5.2.2	Photoeffekt .....	195
5.2.3	Funktionsprinzip einer Solarzelle .....	197
5.3	Herstellung von Solarzellen und Solarmodulen .....	204
5.3.1	Solarzellen aus kristallinem Silizium .....	204
5.3.2	Solarmodule mit kristallinen Zellen .....	209
5.3.3	Solarzellen aus amorphem Silizium .....	210
5.3.4	Solarzellen aus anderen Materialien .....	211
5.3.5	Modultests und Qualitätskontrolle .....	213
5.4	Elektrische Beschreibung von Solarzellen .....	215
5.4.1	Einfaches Ersatzschaltbild .....	215
5.4.2	Erweitertes Ersatzschaltbild (Eindiodenmodell) .....	216
5.4.3	Zweidiodenmodell .....	219
5.4.4	Zweidiodenmodell mit Erweiterungsterm .....	219
5.4.5	Weitere elektrische Zellparameter .....	221
5.4.6	Temperaturabhängigkeit .....	223
5.4.7	Parameterbestimmung .....	226
5.5	Elektrische Beschreibung von Solarmodulen .....	227
5.5.1	Reihenschaltung von Solarzellen .....	227
5.5.2	Reihenschaltung unter inhomogenen Bedingungen .....	229
5.5.3	Parallelschaltung von Solarzellen .....	234
5.5.4	Technische Daten von Solarmodulen .....	234
5.6	Solargenerator und Last .....	235
5.6.1	Widerstandslast .....	235
5.6.2	Gleichspannungswandler .....	237
5.6.3	Tiefsetzsteller .....	238
5.6.4	Hochsetzsteller .....	240
5.6.5	Weitere Gleichspannungswandler .....	241
5.6.6	MPP-Tracker .....	242
5.7	Akkumulatoren .....	244
5.7.1	Akkumulatorarten .....	244
5.7.2	Bleiakkumulator .....	245
5.7.3	Lithium-Ionen-Akkumulator .....	249
5.7.4	Andere Akkumulatortypen .....	253
5.7.5	Akkumulatorsysteme .....	254
5.7.6	Andere Speichermöglichkeiten .....	257
5.8	Wechselrichter .....	258
5.8.1	Wechselrichtertechnologie .....	258
5.8.1.1	Rechteckwechselrichter .....	259
5.8.1.2	Moderne Wechselrichtertopologien .....	262
5.8.2	Wechselrichter in der Photovoltaik .....	263
5.8.2.1	Funktionen und Aufgaben des Wechselrichters .....	263
5.8.2.2	Wechselrichterwirkungsgrade .....	265

5.8.2.3	Anlagenkonzepte .....	268
5.9	Photovoltaische Eigenverbrauchssysteme.....	269
5.9.1	Photovoltaische Eigenverbrauchssysteme mit Speicher .....	269
5.9.2	Photovoltaische Eigenverbrauchssysteme mit Heizung.....	273
5.10	Planung und Auslegung.....	275
5.10.1	Inselnetzsysteme.....	275
5.10.2	Rein netzgekoppelte Systeme .....	278
5.10.3	Eigenverbrauchssysteme .....	281
5.10.3.1	Eigenverbrauchssysteme ohne Speicher .....	281
5.10.3.2	Eigenverbrauchssysteme mit Batteriespeicher .....	285
5.10.3.3	Thermische Nutzung und NetZRückspeisung .....	292
<b>6</b>	<b>Windkraft .....</b>	<b>294</b>
6.1	Einleitung .....	294
6.2	Dargebot von Windenergie.....	295
6.2.1	Entstehung des Windes.....	295
6.2.2	Angabe der Windstärke .....	296
6.2.3	Windgeschwindigkeitsverteilungen .....	297
6.2.4	Einfluss der Umgebung und Höhe.....	299
6.3	Nutzung der Windenergie.....	302
6.3.1	Im Wind enthaltene Leistung.....	302
6.3.2	Widerstandsläufer.....	304
6.3.3	Auftriebsläufer .....	306
6.4	Bauformen von Windkraftanlagen.....	310
6.4.1	Windkraftanlagen mit vertikaler Drehachse .....	310
6.4.2	Windkraftanlagen mit horizontaler Drehachse.....	311
6.4.2.1	Anlagenaufbau .....	311
6.4.2.2	Rotorblätter .....	312
6.4.2.3	Windgeschwindigkeitsbereiche.....	314
6.4.2.4	Leistungsbegrenzung und Sturmabschaltung.....	315
6.4.2.5	Windnachführung .....	317
6.4.2.6	Turm, Fundament, Getriebe und Generator .....	318
6.4.2.7	Offshore-Windkraftanlagen .....	319
6.5	Elektrische Maschinen .....	320
6.5.1	Elektrische Wechselstromrechnung.....	321
6.5.2	Drehfeld .....	324
6.5.3	Synchronmaschine .....	328
6.5.3.1	Aufbau.....	328
6.5.3.2	Elektrische Beschreibung .....	329
6.5.3.3	Synchronisation.....	332
6.5.4	Asynchronmaschine .....	332
6.5.4.1	Aufbau und Betriebszustände .....	332
6.5.4.2	Ersatzschaltbilder und Stromortskurven .....	334
6.5.4.3	Leistungsbilanz.....	336
6.5.4.4	Drehzahl-Drehmoment-Kennlinien und typische Generatordaten .....	337
6.6	Elektrische Anlagenkonzepte.....	339
6.6.1	Asynchrongenerator mit direkter Netzkopplung .....	339
6.6.2	Synchrongenerator mit direkter Netzkopplung .....	342
6.6.3	Synchrongenerator mit Umrichter und Zwischenkreis .....	343
6.6.4	Drehzahlregelbare Asynchrongeneratoren.....	345
6.6.5	Inselnetzanlagen .....	345
6.7	Netzbetrieb .....	346
6.7.1	Anlagenertrag .....	346
6.7.2	Netzanschluss .....	347

<b>7</b>	<b>Wasserkraft .....</b>	<b>349</b>
7.1	Einleitung .....	349
7.2	Dargebot der Wasserkraft .....	350
7.3	Wasserkraftwerke .....	354
7.3.1	Laufwasserkraftwerke .....	354
7.3.2	Speicherwasserkraftwerke .....	356
7.3.3	Pumpspeicherkraftwerke .....	357
7.3.4	Betonkugelspeicher und Lageenergiespeicher .....	361
7.4	Wasserturbinen .....	363
7.4.1	Turbinenarten .....	363
7.4.1.1	Kaplan-Turbine und Rohr-Turbine .....	364
7.4.1.2	Ossberger-Turbine .....	365
7.4.1.3	Francis-Turbine .....	365
7.4.1.4	Pelton-Turbine .....	365
7.4.2	Turbinenwirkungsgrad .....	367
7.5	Weitere technische Anlagen zur Wasserkraftnutzung .....	368
7.5.1	Gezeitenkraftwerke .....	368
7.5.2	Meeresströmungskraftwerke .....	369
7.5.3	Wellenkraftwerke .....	370
<b>8</b>	<b>Geothermie .....</b>	<b>372</b>
8.1	Geothermievorkommen .....	372
8.2	Geothermische Heizwerke .....	376
8.3	Geothermische Stromerzeugung .....	377
8.3.1	Kraftwerksprozesse .....	377
8.3.2	Geothermische Kraftwerke .....	379
8.4	Wärmepumpen .....	381
8.4.1	Kompressions-Wärmepumpen .....	381
8.4.2	Absorptions-Wärmepumpen .....	384
8.4.3	Adsorptions-Wärmepumpen .....	385
8.4.4	Einsatzgebiete, Planung und Ertragsberechnung .....	385
<b>9</b>	<b>Nutzung der Biomasse .....</b>	<b>392</b>
9.1	Vorkommen an Biomasse .....	392
9.1.1	Feste Bioenergieträger .....	394
9.1.2	Flüssige Bioenergieträger .....	398
9.1.2.1	Pflanzenöl .....	398
9.1.2.2	Biodiesel .....	399
9.1.2.3	Bioalkohole .....	399
9.1.2.4	Biomass-to-Liquid (BtL)-Brennstoffe .....	400
9.1.3	Gasförmige Bioenergieträger .....	401
9.1.4	Flächenerträge und Umweltbilanz .....	403
9.2	Biomasseanlagen .....	404
9.2.1	Biomasseheizungen .....	404
9.2.2	Biomassekraftwerke .....	407
<b>10</b>	<b>Wasserstoffwirtschaft .....</b>	<b>408</b>
10.1	Einleitung .....	408
10.2	Wasserstofferzeugung .....	409
10.3	Wasserstofftransport und Wasserstoffspeicherung .....	411
10.4	Wasserstoffbasierte Energieträger .....	414
10.4.1	Energieträger für den Transport .....	415
10.4.2	Methan als Speicher der Energiewende .....	416

10.4.3	E-Fuels.....	419
10.5	Brennstoffzellen.....	421
10.5.1	Einleitung.....	421
10.5.2	Brennstoffzellentypen.....	422
10.5.3	Wirkungsgrade und Betriebsverhalten .....	425
<b>11</b>	<b>Wirtschaftlichkeitsberechnungen .....</b>	<b>427</b>
11.1	Einleitung.....	427
11.2	Energiegestehungskosten .....	428
11.2.1	Berechnungen ohne Kapitalverzinsung.....	428
11.2.1.1	Solarthermische Anlagen zur Trinkwassererwärmung.....	429
11.2.1.2	Solarthermische Kraftwerke.....	430
11.2.1.3	Photovoltaikanlagen .....	431
11.2.1.4	Windkraftanlagen.....	433
11.2.1.5	Wasserkraftanlagen .....	434
11.2.1.6	Geothermieanlagen .....	434
11.2.1.7	Holzpelletsheizungen .....	436
11.2.2	Berechnungen mit Kapitalverzinsung.....	437
11.2.2.1	Solarthermische Anlagen zur Trinkwassererwärmung.....	440
11.2.2.2	Solarthermische Kraftwerke.....	440
11.2.2.3	Photovoltaikanlagen .....	440
11.2.2.4	Windkraftanlagen.....	441
11.2.3	Vergütung für regenerative Energieanlagen .....	441
11.2.4	Zukünftige Entwicklung der Kosten für regenerative Energien.....	442
11.2.5	Kosten konventioneller Energiesysteme .....	444
11.3	Externe Kosten des Energieverbrauchs.....	446
11.3.1	Subventionen im Energiemarkt.....	447
11.3.2	Ausgaben für Forschung und Entwicklung .....	449
11.3.3	Kosten für Umwelt- und Gesundheitsschäden.....	450
11.3.4	Sonstige externe Kosten .....	451
11.3.5	Internalisierung der externen Kosten .....	451
11.4	Kritische Betrachtung der Wirtschaftlichkeitsberechnungen .....	452
11.4.1	Unendliche Kapitalvermehrung .....	453
11.4.2	Die Verantwortung des Kapitals.....	454
<b>12</b>	<b>Simulation und Downloads zum Buch.....</b>	<b>456</b>
12.1	Allgemeines zur Simulation.....	456
12.2	Der Downloadbereich zum Buch .....	457
12.2.1	Start und Überblick .....	457
12.2.2	Abbildungen und Software-Links .....	458
12.2.3	Vermischtes .....	460
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>461</b>
	<b>Sachwortverzeichnis .....</b>	<b>470</b>



# 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,
- 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,  $1 \text{ Btu} = 1055,06 \text{ J} = 0,000293071 \text{ kWh}$ ).

**Tabelle 1.1** Umrechnungsfaktoren zwischen verschiedenen Energieeinheiten

	kJ	kcal	kWh	kg SKE	kg RÖE	m <sup>3</sup> 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)	3 600	860	1	0,123	0,086	0,113
1 kg Steinkohleeinheit (SKE)	29 308	7 000	8,14	1	0,7	0,923
1 kg Rohöleeinheit (RÖE)	41 868	10 000	11,63	1,428	1	1,319
1 m <sup>3</sup> Erdgas	31 736	7 580	8,816	1,083	0,758	1

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.

**Tabelle 1.2** Vorsätze und Vorsatzzeichen

Vorsatz	Abkürzung	Wert	Vorsatz	Abkürzung	Wert
Kilo	k	10 <sup>3</sup> (Tausend)	Milli	m	10 <sup>-3</sup> (Tausendstel)
Mega	M	10 <sup>6</sup> (Million)	Mikro	μ	10 <sup>-6</sup> (Millionstel)
Giga	G	10 <sup>9</sup> (Milliarde)	Nano	n	10 <sup>-9</sup> (Milliardstel)
Tera	T	10 <sup>12</sup> (Billion)	Piko	p	10 <sup>-12</sup> (Billionstel)
Peta	P	10 <sup>15</sup> (Billiarde)	Femto	f	10 <sup>-15</sup> (Billiardstel)
Exa	E	10 <sup>18</sup> (Trillion)	Atto	a	10 <sup>-18</sup> (Trillionstel)

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.

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 Euro-Cents 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 900fache. 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).

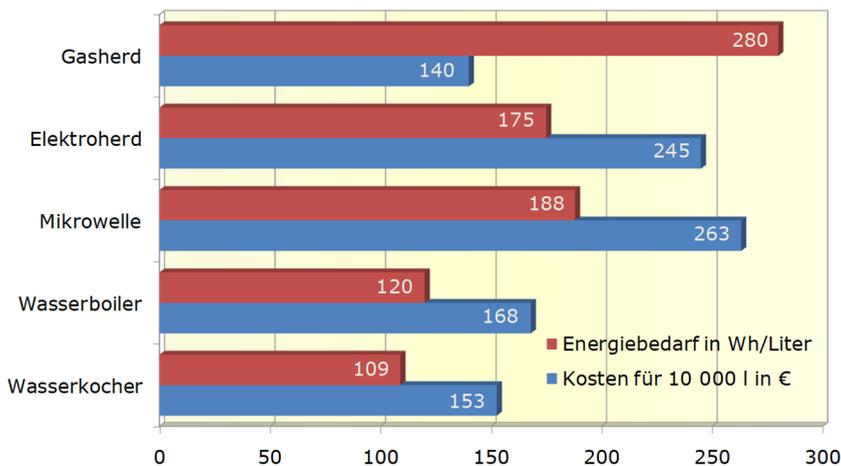
Bei der Umwandlung kann die Energie mit unterschiedlicher Effizienz genutzt werden. Dies soll im Folgenden am Beispiel des Wasserkochens verdeutlicht werden.

Die **Wärmeenergie**  $Q$ , die nötig ist, um einen Liter Wasser ( $m = 1 \text{ kg}$ ) von der Temperatur  $\vartheta_1 = 15 \text{ °C}$  auf  $\vartheta_2 = 98 \text{ °C}$  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**  $\eta$  beschrieben werden, der wie folgt definiert ist:

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

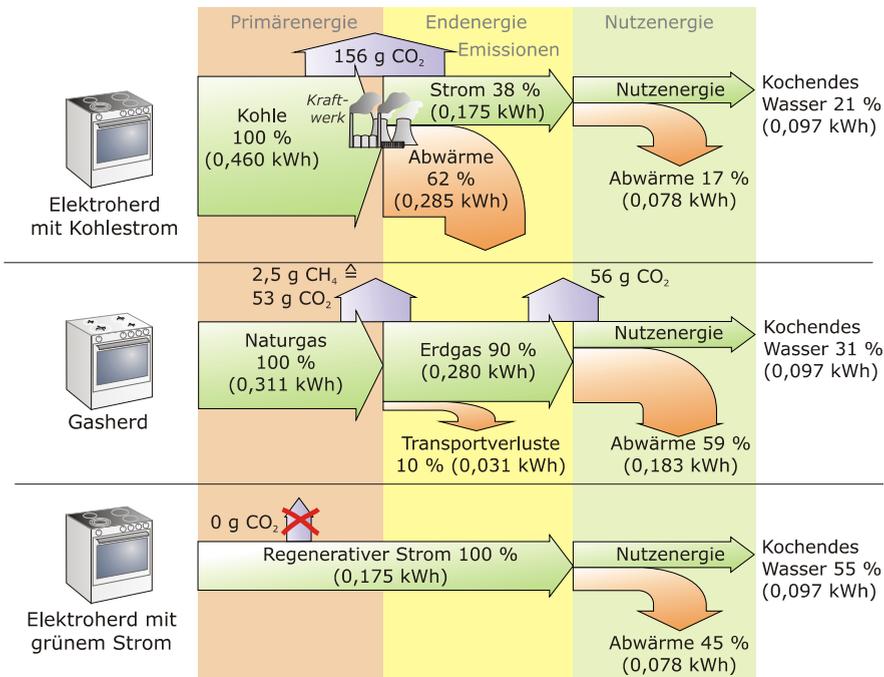
Bei einem durchschnittlichen elektrischen Dampfkraftwerk in Deutschland lag in den 1990er-Jahren der Wirkungsgrad bei ca. 34 % [Hof95]. Bei modernen Kraftwerken ist der Wirkungsgrad geringfügig höher. Rund 60 % der aufgewendeten Energie gehen dennoch als Abwärme verloren, nur rund 40 % stehen als elektrische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

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

**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

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.



**Bild 1.2** Energiewandlungskette, Verluste und Kohlendioxidemissionen beim Wasserkochen

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.

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 Atomkraft 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.

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.



**Bild 1.3** Entwicklung der jährlichen Welterdölförderung (Daten: [HI95, EI23])

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 am Primärenergieverbrauch hatten.

**Tabelle 1.4** Weltprimärenergieverbrauch ohne erneuerbare Wärme und Treibstoffe [Enq95, EI23]

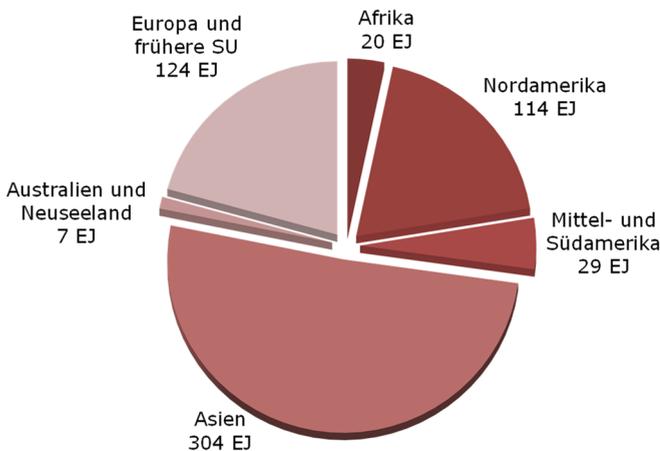
PJ	1925	1938	1950	1960	1980	2000	2022
Feste Brennstoffe <sup>1)</sup>	36 039	37 856	46 675	58 541	75 084	98 654	161 470
Flüssige Brennstoffe <sup>2)</sup>	5 772	11 017	21 155	43 921	127 823	154 939	190 690
Naturgas	1 406	2 930	7 384	17 961	51 258	86 472	141 890
Kernenergie <sup>3)</sup>	0	0	0	0	6 739	24 451	24 130
Wasserkraft <sup>3)</sup>	771	1 774	3 316	6 632	16 092	25 152	40 680
Windkraft <sup>3)</sup>	0	0	0	0	0	298	19 737
Solarenergie <sup>3)</sup>	0	0	0	0	0	11	12 530
Andere Erneuerbare <sup>3) 4)</sup>	0	0	0	100	468	1 755	12 913
<b>Gesamt</b>	<b>43 988</b>	<b>53 577</b>	<b>78 530</b>	<b>127 151</b>	<b>277 464</b>	<b>391 732</b>	<b>604 040</b>

1) Braunkohle, Steinkohle u. a. 2) Erdölprodukte 3) mit Wirkungsgrad von 38 % 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 stark 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.

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 später noch einmal bei der Darstellung der Pro-Kopf-Kohlendioxid-Emission eingegangen, die eng mit dem Energieverbrauch verknüpft ist.



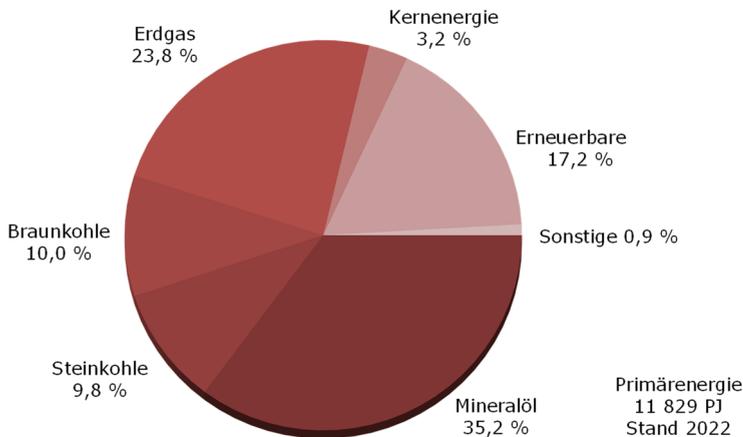
**Bild 1.4** Primärenergieverbrauch der Welt nach Regionen im Jahr 2021 (Daten: [BP22])

## 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 Ölkrise 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 Bruttonational-einkommen 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.

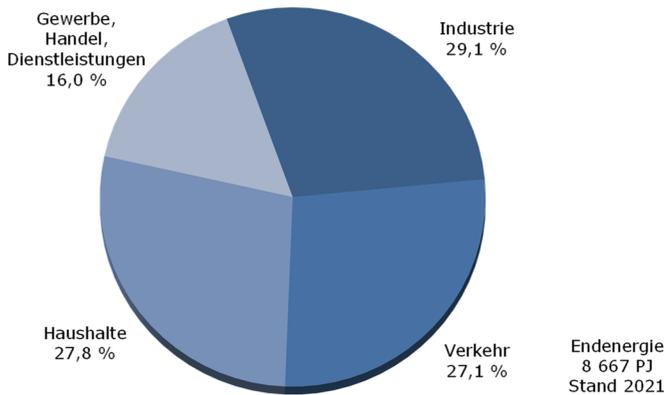


**Bild 1.5** Anteile verschiedener Energieträger am Primärenergieverbrauch in Deutschland im Jahr 2022 (Daten: [AGEB22])

Nach dem Fall der Mauer und durch die Wiedervereinigung wurden große Wirtschaftsbe-  
reiche in Ostdeutschland stillgelegt. Hierdurch kam es zu einem Sinken des Gesamtener-  
gieverbrauchs in Deutschland, der andernfalls weiter gestiegen wäre. Vor allem der Ab-  
bau 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 Son-  
nenenergie sowie Biomasse. Der Trend zur verstärkten Verwendung von Erdgas wurde  
im Jahr 2021 allerdings durch die extrem gestiegenen Gaspreise wieder unterbrochen.

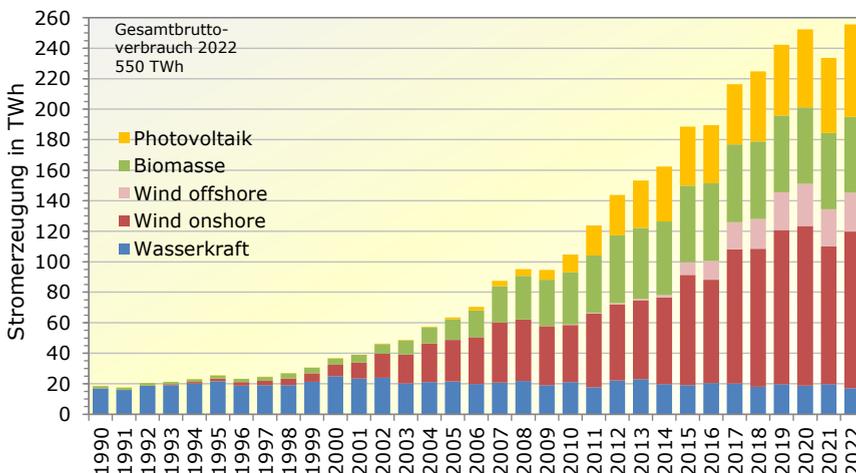
Derzeit ist die Energieversorgung in Deutschland noch sehr stark auf die Nutzung fossiler  
Energieträger ausgerichtet. Im Wärmebereich dominieren Erdgas und Heizöl, im Ver-  
kehrssektor Erdöl und bei der Stromerzeugung die Kohlekraft. Mit rund 79 % deckten  
fossile Energieträger im Jahr 2022 immer noch den größten Anteil des Primärenergie-  
bedarfs (Bild 1.5). Inzwischen haben erneuerbare Energien jedoch einen spürbaren Anteil

erobert. Doch mit 17 % war der Anteil erneuerbarer Energien im Jahr 2022 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.



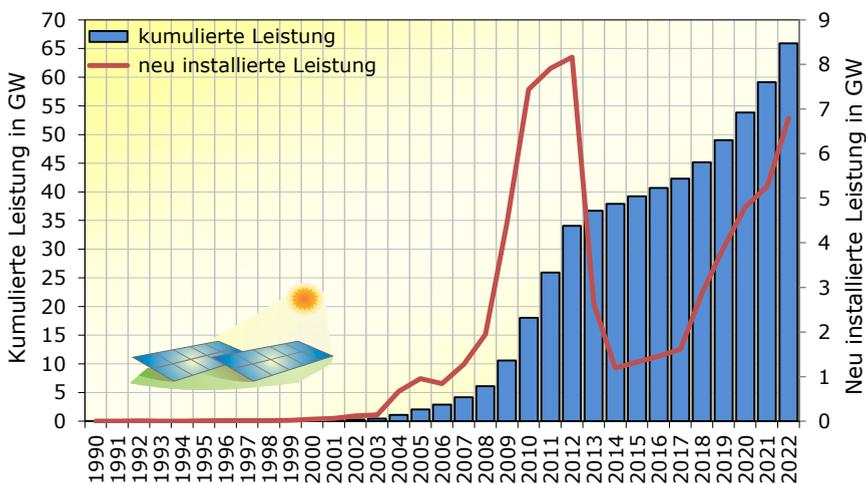
**Bild 1.6** Anteile verschiedener Sektoren am Endenergieverbrauch in Deutschland im Jahr 2021 (Daten: [AGEB22])

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 1.7** Nutzung erneuerbarer Energien durch die Elektrizitätswirtschaft in Deutschland [Qua23]

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 2022 bereits 47 % erreicht. 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 Photovoltaikzubau zwischen 2012 und 2015 auf ein Fünftel reduziert (Bild 1.8). Als Folge gingen rund 80 000 Arbeitsplätze in der deutschen Solarbranche verloren (Bild 1.35). Seit 2017 steigt der Solarenergiezubau 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.



**Bild 1.8** Jährlicher Zubau der Photovoltaik und insgesamt installierte Photovoltaikleistung in Deutschland [Qua23]

### 1.3 Reichweite konventioneller Energieträger

Wie bereits in den vorangegangenen Abschnitten erläutert, basiert unsere heutige Energieversorgung noch zu einem großen Teil auf fossilen Energieträgern. Die fossilen Energieträger wie Erdgas, Erdöl, Stein- oder Braunkohle sind über einen Zeitraum von Jahrtausenden in der Vorgeschichte unserer Erde entstanden. Sie haben sich hauptsächlich aus pflanzlichen oder tierischen Substanzen gebildet, sind also die gespeicherte Biomasse aus früheren Zeiten. Ein großer Teil der so entstandenen fossilen Energieträger wurde in den letzten 100 Jahren verbraucht. Durch die zunehmende Ausbeutung fossiler Lagerstätten wird die Förderung in Zukunft immer schwieriger, technisch aufwendiger, riskan-

ter und dadurch mit höheren Kosten verbunden sein. Sollte der Umfang der fossilen Energienutzung weiter anhalten oder gar noch steigen, werden sämtliche ökonomisch erreichbaren Vorkommen von Erdöl und Erdgas bereits im 21. Jahrhundert aufgebraucht und lediglich die Kohlevorräte noch etwas darüber hinaus verfügbar sein (Tabelle 1.5). Somit werden wenige Generationen sämtliche fossilen Energievorräte der letzten Jahrmillionen vollständig ausgebeutet haben. Zukünftige Generationen können auf diese Energieträger nicht mehr zurückgreifen.

**Tabelle 1.5** Reserven fossiler Energieträger im Jahr 2020 (Daten: [BGR22, BMWi21])

	Erdöl	Erdgas	Steinkohle
Sicher gewinnbare Reserven	245,2 Mrd. t <sup>1)</sup>	206,1 Bill. m <sup>3</sup> <sup>1)</sup>	756,2 Mrd. t
Förderung im Jahr 2020	4,163 Mrd. t <sup>1)</sup>	3,937 Bill. m <sup>3</sup> <sup>1)</sup>	6,679 Mrd. t
Reichweite bei aktueller Förderung	59 Jahre	52 Jahre	113 Jahre
Zusätzlich gewinnbare Ressourcen	501,2 Mrd. t <sup>1)</sup>	630,0 Bill. m <sup>3</sup> <sup>1)</sup>	16 189 Mrd. t
Kumulierte Förderung	205,4 Mrd. t	132,7 Bill. m <sup>3</sup>	k. A.

<sup>1)</sup> konventionelle und nicht konventionelle Vorkommen wie Ölsande oder Schiefergas

Eine genaue Bestimmung der tatsächlich vorhandenen Reserven an fossilen Energieträgern ist nur schwer möglich, da nur der Umfang der bereits erkundeten Fördergebiete angegeben werden kann. Welche Vorratsmengen in Zukunft noch entdeckt werden, kann heute nur grob abgeschätzt werden. Doch selbst wenn neue große Lagerstätten von fossilen Energieträgern entdeckt werden sollten, ändert dies nichts an der Tatsache, dass fossile Energien begrenzt sind. Lediglich deren Reichweite kann um einige Jahre verlängert werden.

Bei den Angaben der Vorräte sind die sicher gewinnbaren Reserven, also die Vorräte, die durch Exploration, Bohrungen und Messungen nachgewiesen und technisch sowie wirtschaftlich erschließbar sind, von Bedeutung. Hinzu kommen zusätzlich gewinnbare Ressourcen, deren Vorkommen heute noch nicht sicher nachgewiesen und deren Umfang mit einer gewissen Unsicherheit behaftet ist. Dividiert man die sicher gewinnbaren Reserven eines Energieträgers durch den derzeitigen Jahresverbrauch, ergibt sich die statistische Reichweite. Diese kann bei zunehmendem Energieverbrauch niedriger, bei zusätzlich erschlossenen Ressourcen aber auch höher ausfallen.

Auch die Uranvorkommen der Erde zum Betrieb von Atomkraftwerken sind begrenzt. Die geschätzten weltweiten Vorräte betragen etwa 13,5 Mio. t, davon sind 5,4 Mio. t noch unentdeckt und rein spekulativ (Tabelle 1.6). Derzeit werden weltweit nur etwa 4 % des Primärenergiebedarfs durch die Kernenergie gedeckt.

**Tabelle 1.6** Uranvorräte im Jahr 2020 [BGR22]

	Vorräte zu Gewinnungskosten		Insgesamt
	bis 80 US\$/kg U	80 ... 260 US\$/kg U	
Hinreichend sicher			
Nachgewiesene Vorräte	1,244 Mt	3,491 Mt	4,735 Mt $\hat{=}$ 2 368 EJ
Vermutete Ressourcen		3,347 Mt	3,347 Mt $\hat{=}$ 1 674 EJ
Unentdeckte Vorkommen		5,422 Mt	5,422 Mt $\hat{=}$ 2 711 EJ

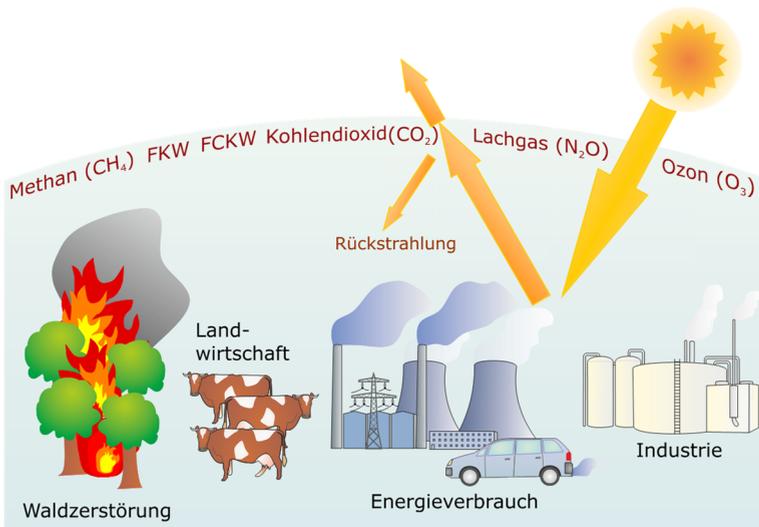
1 t U = 5 · 10<sup>14</sup> J

Sollte der gesamte Primärenergiebedarf der Erde durch die Kernenergie gedeckt werden, würden die hinreichend sicher nachgewiesenen, wirtschaftlich gewinnbaren Vorräte mit Kosten bis zu 80 US\$/kg U gerade einmal zwei Jahre reichen. Durch Brutreaktoren könnte die Reichweite zwar etwas gesteigert werden, dennoch stellt die Atomenergie auf Basis der Kernspaltung aufgrund der stark begrenzten Reserven keine Alternative zu den fossilen Brennstoffen dar.

Aufgrund der begrenzten Vorkommen konventioneller Energieträger werden nur wenige der heutigen Technologien das 21. Jahrhundert überdauern. Schon deshalb sollte bereits jetzt begonnen werden, die Energiewirtschaft hierauf einzustellen. Viele Gründe sprechen dafür, damit bereits vor der nahenden Erschöpfung konventioneller Energievorräte zu beginnen. Auf zwei dieser Gründe, nämlich den Treibhauseffekt und die Risiken der Atomkraft, wird in Abschnitt 1.4 und Abschnitt 1.5 näher eingegangen.

## 1.4 Der Treibhauseffekt

Ohne den schützenden Einfluss der Atmosphäre würden auf der Erde Temperaturen von etwa  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  herrschen. Durch verschiedene natürliche Spurengase, wie Wasserdampf oder Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ), in der Atmosphäre wird das eintreffende Sonnenlicht wie in einem Treibhaus zurückgehalten. Hierbei kann man zwischen einem natürlichen und einem anthropogenen Treibhauseffekt, das heißt einem vom Menschen verursachten Treibhauseffekt, unterscheiden, der in Bild 1.9 veranschaulicht wird.



**Bild 1.9** Entstehung des anthropogenen (vom Menschen verursachten) Treibhauseffekts

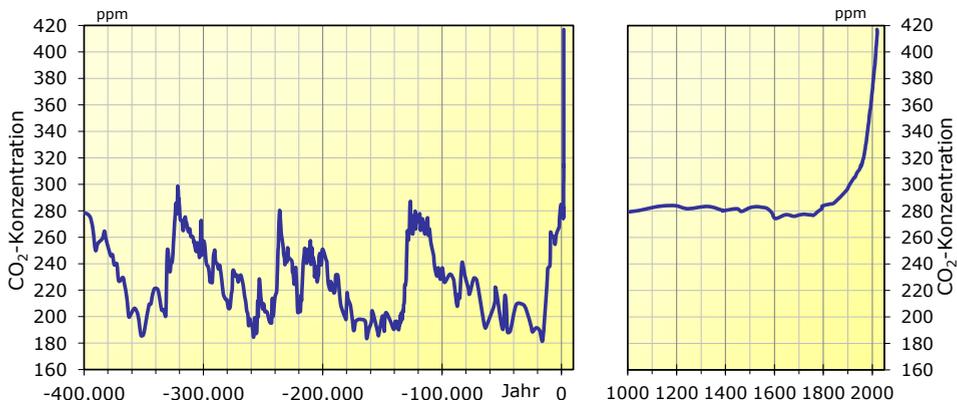
Der vorhandene **natürliche Treibhauseffekt** ermöglicht erst ein Leben auf unserer Erde. Die von der Sonne eintreffende Strahlung erwärmt die Erdoberfläche. Dadurch hat sich auf der Erde eine mittlere Temperatur von etwa  $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$  eingestellt. Ohne den natürlichen Treibhauseffekt würde ein Großteil der Wärmestrahlung von der Erdoberfläche in den Weltraum abgestrahlt, und die mittlere Temperatur auf der Erdoberfläche wäre um

ca. 33 °C niedriger. Bei den Spurengasen in der Atmosphäre hat sich in den letzten Jahrtausenden ein Gleichgewicht ausgebildet, welches das Leben in der Form, wie wir es heute kennen, ermöglicht hat. Gewiss gab es aufgrund verschiedener Ursachen über die Jahrtausende immer wieder Temperaturschwankungen, wie nicht nur die verschiedenen Eiszeiten belegen. Dennoch haben sich diese Temperaturänderungen der letzten Jahrtausende meist über längere Zeiträume vollzogen, sodass die Natur die Möglichkeit hatte, sich den geänderten Verhältnissen anzupassen. Noch nie waren Lebewesen für einen extremen Temperaturanstieg verantwortlich.

Durch den zunehmenden Energieverbrauch, aber auch durch andere Einflüsse auf die Umwelt werden große Mengen an Spurengasen in die Atmosphäre emittiert, die den **anthropogenen Treibhauseffekt** verursachen. Daten wichtiger Treibhausgase sind in Tabelle 1.7 zusammengefasst. Hierbei haben die verschiedenen anthropogenen Treibhausgase sehr unterschiedliche Verursacher.

Mit 75 % Anteil am Treibhauseffekt ist **Kohlendioxid** (CO<sub>2</sub>), das bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe und der Biomassenutzung entsteht, mit Abstand das bedeutendste Treibhausgas. Biomasse, die nur in dem Maß genutzt wird, wie sie im gleichen Zeitraum wieder nachwachsen kann, verhält sich weitgehend CO<sub>2</sub>-neutral. Bei der Brandrodung tropischer Urwälder werden hingegen Unmengen an CO<sub>2</sub> freigesetzt, das in den letzten Jahrzehnten oder gar Jahrhunderten von den Pflanzen gebunden wurde. Die Verbrennung fossiler Brennstoffe ist aber für den größten Teil der anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich.

Der Anteil der **Verbrennung** von fossilen Brennstoffen an den CO<sub>2</sub>-Emissionen beträgt derzeit etwa 85 %. Die Konzentration von CO<sub>2</sub> ist bereits von 280 ppmv (parts per million volumenbezogen) im Jahr 1850 auf 417 ppmv im Jahr 2022 angestiegen (Bild 1.10) und wird sich bei fortgesetztem Ausstoß in den nächsten Jahrzehnten mehr als verdoppeln. Der heutige CO<sub>2</sub>-Gehalt in der Atmosphäre ist nachweislich höher als zu irgendeinem Zeitpunkt der vergangenen 3 Mio. Jahre.



**Bild 1.10** Entwicklung der Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre über die letzten 400 000 Jahre und in jüngerer Vergangenheit (Daten: CDIAC und [www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi](http://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi))

Anthropogenes **Methan** ( $\text{CH}_4$ ) wird als Grubengas beim Kohlebergbau, bei der Gewinnung von Erdgas, bei Mülldeponien sowie in der Landwirtschaft beim Reisanbau und bei der Rinderzucht freigesetzt. Ein Großteil der Methanemissionen ist ebenfalls auf die Nutzung fossiler Brennstoffe zurückzuführen. Auch wenn der Anteil von Methan in der Atmosphäre weniger als 1 % des Anteils von  $\text{CO}_2$  beträgt, hat das Methan dennoch eine sehr große Klimarelevanz. Mit anderen Worten: Das Treibhauspotenzial von Methan ist deutlich größer als das von  $\text{CO}_2$ , sodass bei Methan bereits viel kleinere Mengen kritisch sind. 2022 betrug das mittlere troposphärische Mischungsverhältnis für Methan mit rund 1,89 ppmv mehr als das Zweieinhalbfache des vorindustriellen Wertes von 0,7 ppmv.

**Fluorchlorkohlenwasserstoffe** (FCKW) wurden zum Beispiel als Kältemittel bei Kühlschränken oder als Treibmittel in Spraydosen in großen Mengen eingesetzt. FCKW wie R11 oder R12 sind hauptsächlich durch ihren zerstörerischen Einfluss auf die Ozonschicht in der 10 km bis 50 km hohen Stratosphäre in Verruf geraten. Deshalb wurde eine schrittweise Reduzierung der FCKW-Produktion beschlossen, sodass der Konzentrationsanstieg rückläufig ist. Das Treibhauspotenzial der FCKW spielte bei dieser Diskussion nur eine untergeordnete Rolle. Viele Ersatzstoffe für FCKW wie HFKW-23 oder R134a beeinträchtigen zwar die Ozonschicht nicht mehr, besitzen aber ebenfalls ein großes Treibhauspotenzial.

**Distickstoffoxid** ( $\text{N}_2\text{O}$ ) entsteht bei der Brandrodung tropischer Regenwälder und vor allem beim Einsatz von mineralischem Stickstoffdünger in der Landwirtschaft. Der Anteil von  $\text{N}_2\text{O}$  lag 2022 mit 0,33 ppmv zwar nur 20 % über dem vorindustriellen Wert, aber  $\text{N}_2\text{O}$  ist aufgrund seiner langen Verweilzeit in der Atmosphäre kritisch zu bewerten.

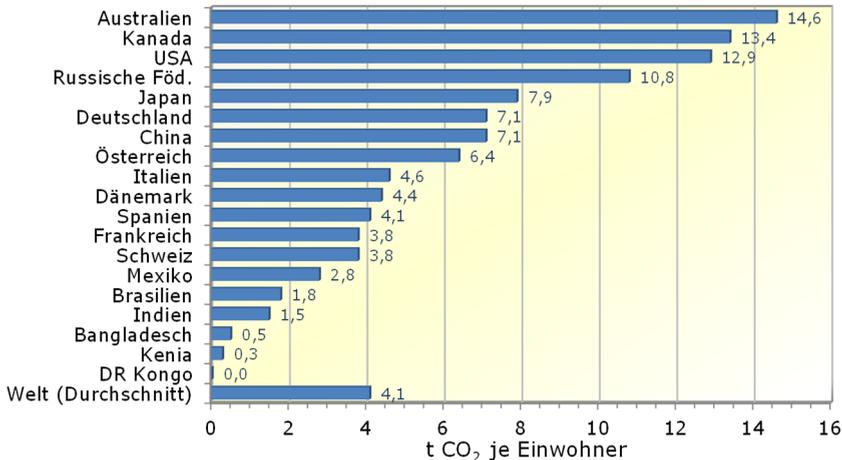
**Tabelle 1.7** Charakteristika verteilter Treibhausgase in der Atmosphäre [IPC07, IPC22, NOAA23]

Treibhausgas	$\text{CO}_2$	$\text{CH}_4$	$\text{N}_2\text{O}$	R11	R12	R134a
Konzentration 2022 in ppm	417	1,89	0,33	< 0,0003	< 0,0005	< 0,0001
Vorindustrielle Konzentration in ppm	278	0,7	0,27	0	0	0
Verweilzeit in der Atmosphäre und Biosphäre in Jahren	5 ... 200	12	114	45	100	14
Konzentrationsanstieg in %/Jahr	0,5	0,6	0,3	-0,9	-0,3	8
Spezifisches Treibhauspotenzial	1	28	265	4750	10900	1300
Anteil am Treibhauseffekt in %	75	18	4		2 (alle CFC)	

Daneben gibt es auch noch weitere Treibhausgase, die aber von nachrangiger Bedeutung sind oder nur indirekte Effekte haben. Die Bildung von bodennahem **Ozon** ( $\text{O}_3$ ) wird beispielsweise durch Schadstoffe, zum Beispiel aus dem motorisierten Straßenverkehr, begünstigt, die wiederum aus der Verbrennung fossiler Energieträger stammen. Durch Menschen emittierter **stratosphärischer Wasserdampf** ( $\text{H}_2\text{O}$ ) hat auch einen Anteil am Treibhauseffekt. Durch die globale Erwärmung kann Luft zudem mehr Wasserdampf aufnehmen, sodass sich der fortschreitende Treibhauseffekt hierdurch selbst verstärkt. **Schwefelhexafluorid** ( $\text{SF}_6$ ) ist ein extrem starkes Treibhausgas, das in der Industrie verwendet wird. Da nur vergleichsweise kleine Mengen zum Einsatz kommen, ist der Gesamteffekt jedoch relativ gering.

Die verschiedenen anthropogenen Treibhausgase können unterschiedlichen Verursachergruppen wie folgt zugeordnet werden [IPC22]:

- Kohlendioxid aus der Nutzung fossiler Energieträger 64 %,
- Kohlendioxid aus Landnutzungsänderung (z. B. Waldrodung) 11 %,
- Methan aus der Viehwirtschaft 7 %,
- Methan aus anderen Quellen (z. B. Erdgasförderung, Müll, Reisanbau) 11 %,
- Lachgas vor allem aus der Landwirtschaft 4 %,
- Fluorkohlenwasserstoffe aus der Industrie 2 %.



**Bild 1.11** Energiebedingte Pro-Kopf-CO<sub>2</sub>-Emissionen einzelner Länder im Jahr 2020 [IEA22b]

Hierbei fallen die Anteile regional stark unterschiedlich aus. Während in den Entwicklungsländern vor allem die Verbrennung der tropischen Regenwälder und die Landwirtschaft zum Treibhauseffekt beitragen, spielt in den Industrienationen die Verbrennung fossiler Energieträger die Hauptrolle. Der Energieverbrauch und damit auch die CO<sub>2</sub>-Emissionen sind regional auf der Erde stark unterschiedlich verteilt, wie aus Bild 1.11 hervorgeht.

In Deutschland wird im Vergleich zu Afrika pro Kopf fast das Neunfache an CO<sub>2</sub> erzeugt, in Nordamerika sogar das 15fache. Würden alle Menschen auf der Erde genauso viel CO<sub>2</sub> emittieren wie ein Nordamerikaner, würden sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Erde mehr als verdreifachen und der anthropogene Treibhauseffekt mehr als verdoppeln.

Die Ursachen für die Klimaveränderungen waren lange Zeit sehr umstritten. Auch heute tauchen immer wieder Studien auf, welche den anthropogenen Treibhauseffekt insgesamt infrage stellen. So wird zum Beispiel der Anstieg der bodennahen Durchschnittstemperaturen um rund 1,2 °C zwischen 1880 und 2022 als natürliche Schwankung verharmlost. Die Verfasser solcher Studien sind meist in Kreisen zu finden, die deutliche Nachteile durch Veränderungen in der Energiewirtschaft zu erwarten hätten.