

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](https://gettyimages.de/JulianKeiser) 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.

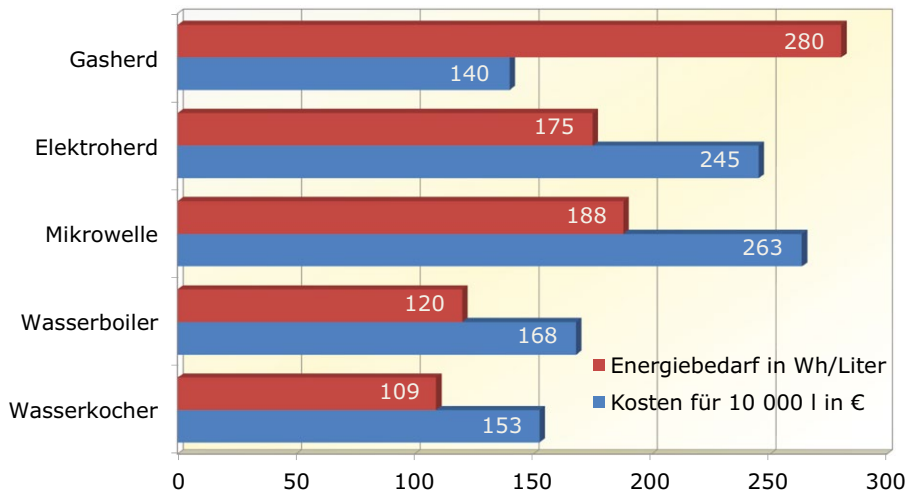


Bild 1.1 „So viel kostet kochendes Wasser“ aus dem Jahr 1994 [Sti94]

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.

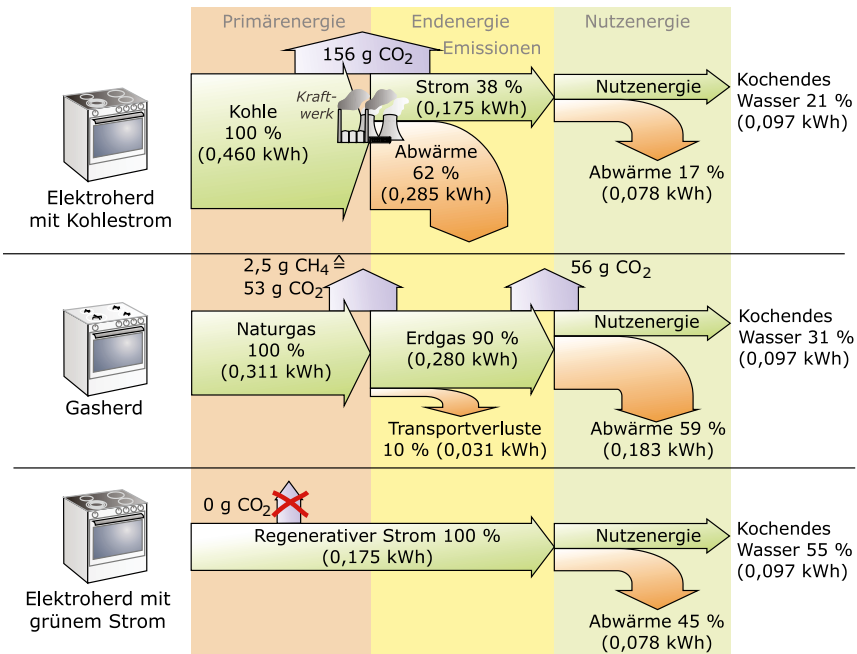


Bild 1.2 Energiewandlungskette, Verluste und Kohlendioxidemissionen beim Wasserkochen

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.

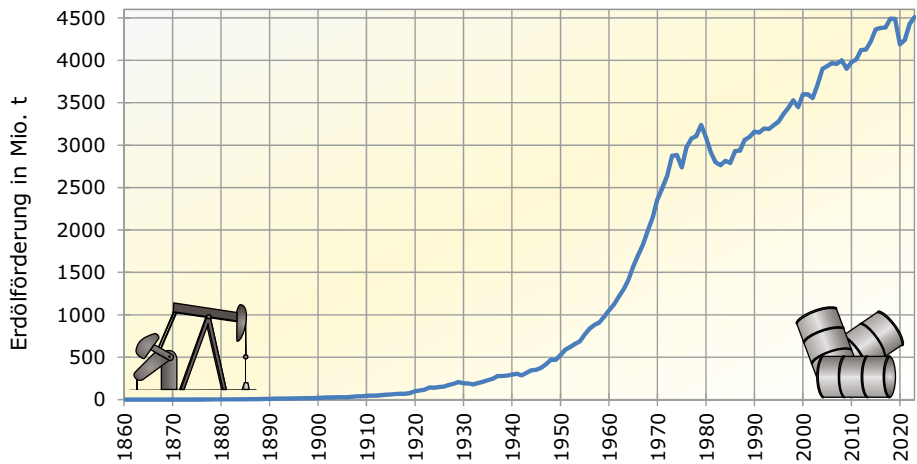


Bild 1.3 Entwicklung der jährlichen Welterdölförderung (Daten: [Hil95, EI24])

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	1 755	6 913
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.

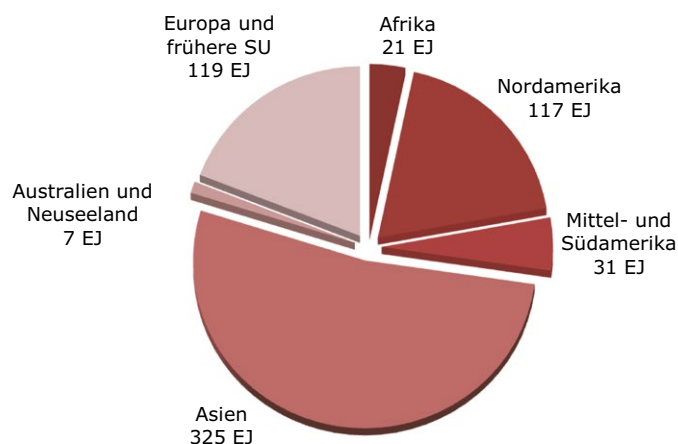


Bild 1.4
Primärenergiever-
brauch der Welt nach
Regionen im Jahr 2023
(Daten: [EI24])

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.

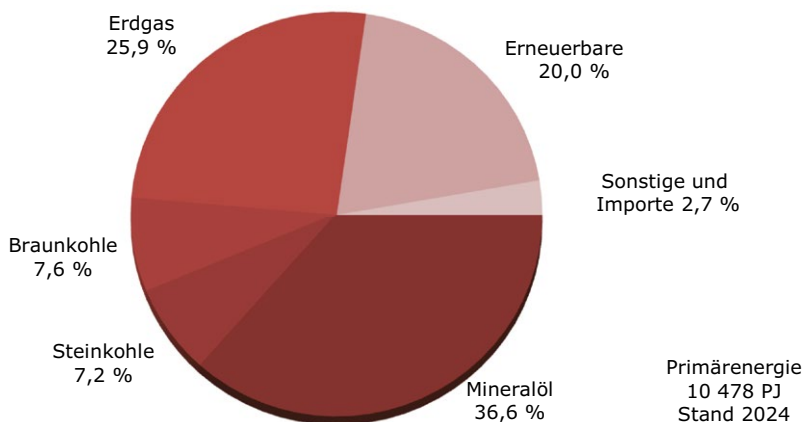


Bild 1.5 Anteile verschiedener Energieträger am Primärenergieverbrauch in Deutschland im Jahr 2024 (Daten: [AGEB24b])

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. Bisher 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).

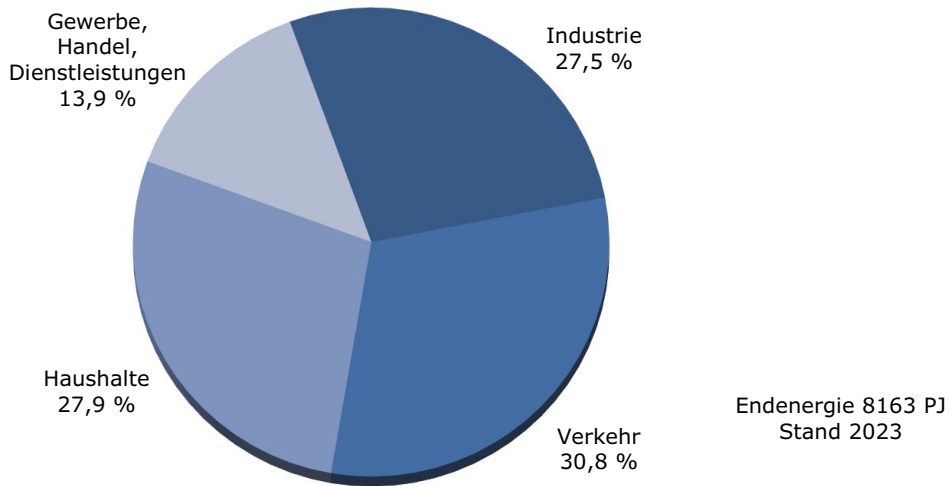


Bild 1.6 Anteile verschiedener Sektoren am Endenergieverbrauch in Deutschland im Jahr 2023 (Daten: [AGEB24a])

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.

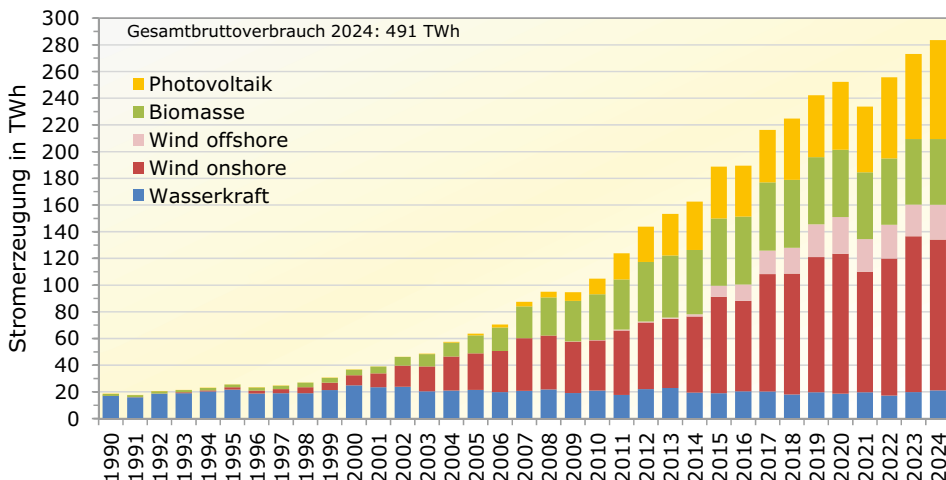


Bild 1.7 Nutzung erneuerbarer Energien durch die Elektrizitätswirtschaft in Deutschland [Qua25]

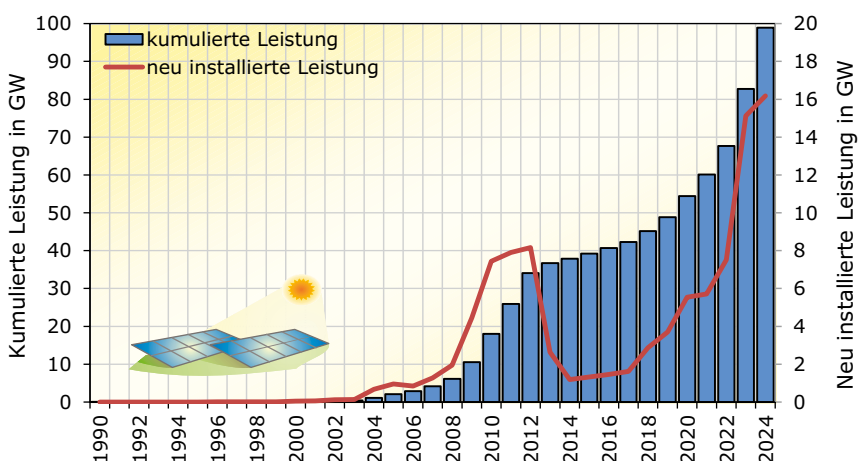


Bild 1.8 Jährlicher Zubau der Photovoltaik und insgesamt installierte Photovoltaikleistung in Deutschland [Qua25]

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 hundert Jahren verbraucht. Durch die zunehmende Ausbeutung fossiler Lagerstätten wird die Förderung in Zukunft immer schwieriger, technisch aufwendiger, riskanter 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.

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.

Tabelle 1.5 Reserven fossiler Energieträger im Jahr 2022 (Daten: [BGR24])

	Erdöl	Erdgas	Steinkohle
Sicher gewinnbare Reserven	253,6 Mrd. t ¹⁾	210,8 Bill. m ³ ¹⁾	779,0 Mrd. t
Förderung im Jahr 2022	4,43 Mrd. t ¹⁾	4,14 Bill. m ³ ¹⁾	7,54 Mrd. t
Reichweite bei aktueller Förderung	57 Jahre	51 Jahre	103 Jahre
Zusätzlich gewinnbare Ressourcen	498,3 Mrd. t ¹⁾	658,1 Bill. m ³ ¹⁾	16 154 Mrd. t
Kumulierte Förderung	214,0 Mrd. t	141,1 Bill. m ³	k. A.
1) konventionelle und nicht konventionelle Vorkommen wie Ölsande oder Schiefergas			

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 2022 [BGR24]

	Vorräte zu Gewinnungskosten		Insgesamt
	bis 80 US\$/kg U	80...260 US\$/kg U	
Hinreichend sicher nachgewiesene Vorräte	1,211 Mt	3,486 Mt	4,697 Mt ± 2349 EJ
Vermutete Ressourcen	3,229 Mt		3,229 Mt ± 1615 EJ
Unentdeckte Vorkommen	5,525 Mt		5,525 Mt ± 2763 EJ
1 t U ± 5 · 10 ¹⁴ 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°C herrschen. Durch verschiedene natürliche Spurengase, wie Wasserdampf oder Kohlendioxid (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.

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 $+15^{\circ}\text{C}$ 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.

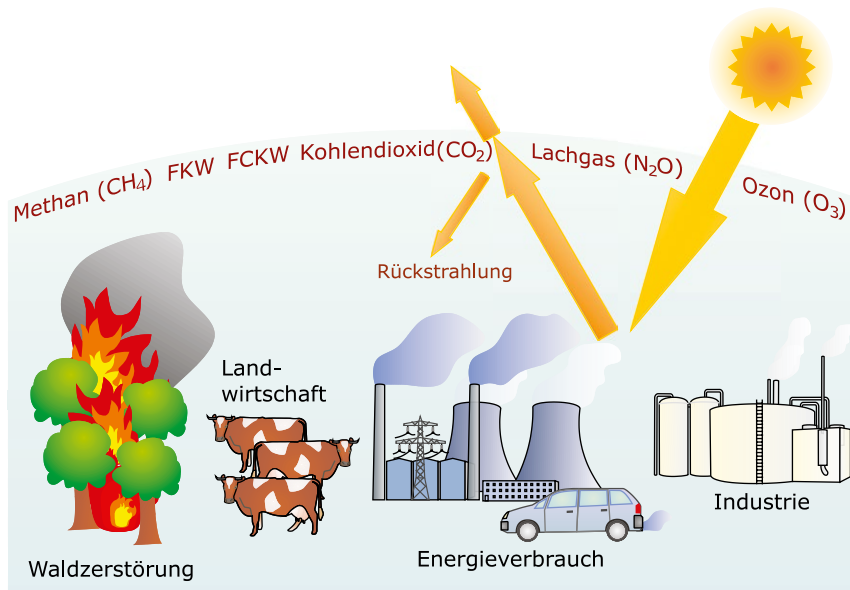


Bild 1.9 Entstehung des anthropogenen (vom Menschen verursachten) Treibhauseffekts

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_2), das bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe und der Biomassennutzung entsteht, mit Abstand das bedeutendste Treibhausgas. Biomasse, die nur in dem Maß genutzt wird, wie sie im glei-

chen Zeitraum wieder nachwachsen kann, verhält sich weitgehend CO_2 -neutral. Bei der Brandrodung tropischer Urwälder werden hingegen Unmengen an CO_2 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_2 -Emissionen verantwortlich.

Der Anteil der **Verbrennung** von fossilen Brennstoffen an den CO_2 -Emissionen beträgt derzeit etwa 85 %. Die Konzentration von CO_2 ist bereits von 280 ppmv (parts per million volumenbezogen) im Jahr 1850 auf 423 ppmv im Jahr 2024 angestiegen (Bild 1.10) und wird sich bei fortgesetztem Ausstoß in den nächsten Jahrzehnten mehr als verdoppeln. Der heutige CO_2 -Gehalt in der Atmosphäre ist nachweislich höher als zu irgendeinem Zeitpunkt der vergangenen 3 Mio. Jahre.

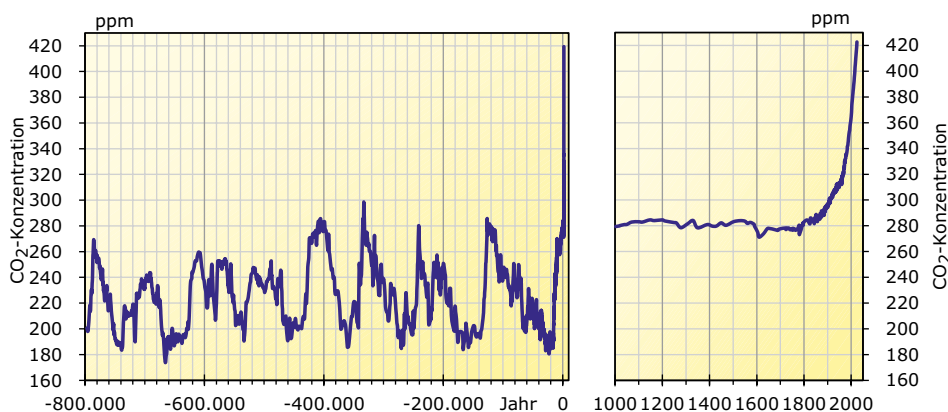


Bild 1.10 Entwicklung der Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre über die letzten 800 000 Jahre und in jüngerer Vergangenheit [NOAA15, NOAA25]

Anthropogenes **Methan** (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 CO_2 beträgt, hat das Methan dennoch eine sehr große Klimarelevanz. Mit anderen Worten: Das Treibhauspotenzial von Methan ist deutlich größer als das von CO_2 , sodass bei Methan bereits viel kleinere Mengen kritisch sind. 2024 betrug das mittlere troposphärische Mischungsverhältnis für Methan mit rund 1,93 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 schützende Ozonschicht in der 10 km bis 50 km hohen Stratosphäre in Verruf ge-

raten. Deshalb wurde eine schrittweise Reduzierung der FCKW-Produktion mit dem Ziel einer kompletten Einstellung beschlossen, sodass die Konzentration inzwischen 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 (N_2O) entsteht bei der Brandrodung tropischer Regenwälder und vor allem beim Einsatz von mineralischem Stickstoffdünger in der Landwirtschaft. Der Anteil von N_2O lag 2024 mit 0,34 ppmv zwar nur 20 % über dem vorindustriellen Wert, aber N_2O ist aufgrund seiner langen Verweilzeit in der Atmosphäre kritisch zu bewerten.

Tabelle 1.7 Charakteristika verteilter Treibhausgase in der Atmosphäre [IPC07, IPC22, NOAA25]

Treibhausgas	CO_2	CH_4	N_2O	R11	R12	R134a
Konzentration 2024 in ppmv	423	1,93	0,34	<0,0003	<0,0005	<0,0001
Vorindustrielle Konzentration in ppmv	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	10 900	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** (O_3) wird unter anderem durch Schadstoffe, zum Beispiel aus dem motorisierten Straßenverkehr, begünstigt, die wiederum aus der Verbrennung fossiler Energieträger stammen. Durch Menschen emittierter **stratosphärischer Wasserdampf** (H_2O) 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** (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 %

Hierbei fallen die Anteile regional stark unterschiedlich aus. Während in den Ländern des globalen Südens 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 CO₂-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 CO₂ erzeugt, in Nordamerika sogar das 15-Fache. Würden alle Menschen auf der Erde genauso viel CO₂ emittieren wie ein Nordamerikaner, würden sich die CO₂-Emissionen der Erde mehr als verdreifachen und der anthropogene Treibhauseffekt mehr als verdoppeln.

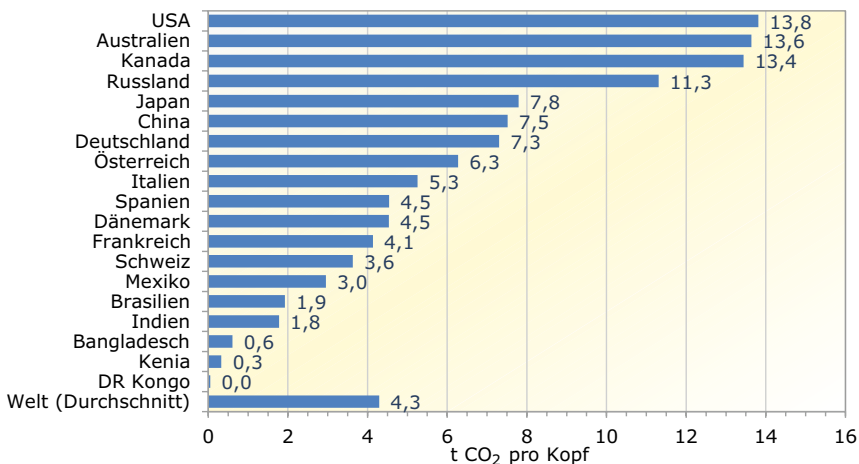


Bild 1.11 Energiebedingte Pro-Kopf-CO₂-Emissionen einzelner Länder im Jahr 2022 [IEA22b]

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 1,28 °C zwischen 1880 und 2024 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.

Zahlreiche Fakten belegen heute die drastischen Klimaveränderungen:

- Die zehn wärmsten Jahre seit Beginn der Temperaturmessungen im Jahr 1880 fielen alle auf den Zeitraum von 2015 bis 2024 [NAS25].
- Der Tag mit der höchsten globalen Durchschnittstemperatur bisher war der 22. Juli 2024. Der Jahresdurchschnitt von 2023 und 2024 lag dabei erstmals über der 1,5-Grad-Marke.
- Jedes der vergangenen vier Jahrzehnte war jeweils wärmer als alle Jahrzehnte davor seit 1850.
- Die weltweite Schneebedeckung hat um mehr als 10 % seit den späten 1960er-Jahren abgenommen.
- Die sommerliche arktische Meereisbedeckung ist von 7,5 Mio. km² im Jahr 1982 auf 3,5 Mio. km² im Jahr 2012 zurückgegangen. Die letzten achtzehn Jahre seit 2007 sind die mit den niedrigsten Werten seit Beginn der Satellitenmessungen vor sechsundvierzig Jahren [NSI24].
- Die Alpengletscher haben zwischen 1850 und 2009 bereits zwei Drittel ihres Volumens verloren. Zuletzt schmolzen 10 % in nur zwei Jahren dahin.
- Die Meeresspiegel sind zwischen 1901 und 1971 im Mittel um 1,3 mm pro Jahr und zwischen 2006 und 2018 bereits um 3,7 mm pro Jahr angestiegen. Der Anstieg beschleunigt sich weiter und lag 2023 bei etwa 4,5 mm pro Jahr [Ham24].
- In nördlichen Breiten haben im 20. Jahrhundert die Niederschläge um 0,5 bis 1 % pro Jahrzehnt zugenommen.
- Häufigkeit und Intensität von Dürreperioden in Afrika und Asien sind angestiegen.

Eine detaillierte Vorhersage über die Folgen des anthropogenen Treibhauseffekts ist nicht möglich. Man kann nur über verschiedene Klimamodelle versuchen, die Auswirkungen durch die Zunahme der Treibhausgase abzuschätzen. Für 26 der 29 untersuchten Extremwetterereignisse des Jahres 2024 konnte eine Verstärkung durch den Klimawandel festgestellt werden [WMO24]. Werden der anthropogene Treibhauseffekt und vor allem der Verbrauch fossiler Energieträger nicht gebremst, werden sich die CO₂-Konzentrationen in der Atmosphäre gegenüber den vorindustriellen Werten im nächsten Jahrhundert mehr als verdoppeln. Dies wird eine Steigerung der globalen Durchschnittstemperatur bis zum Ende des 21. Jahrhunderts um mehr als 2 °C ge-

genüber dem heutigen Wert zur Folge haben. Insgesamt schwanken die Vorhersagen je nach Entwicklung der Treibhausgasemissionen zwischen $+1,5^{\circ}\text{C}$ und rund $+6^{\circ}\text{C}$. Derartige Temperaturanstiege sind in der Größenordnung wie der Unterschied zwischen der Eiszeit vor 18 000 Jahren und der jetzigen Warmzeit von etwa 7°C . Diese Änderungen werden zudem in etwa hundert Jahren ablaufen, während der Übergang von der letzten Eiszeit zur heutigen Warmzeit rund 5000 Jahre dauerte, wobei die Meeresspiegel weltweit um mehr als 100 m angestiegen sind (Bild 1.12). Diese Fakten zeigen die zu erwartende Dramatik eines ungebremsen anthropogenen Treibhauseffekts.

Eine Temperaturerhöhung um insgesamt 2°C oder um mehr als $+0,1^{\circ}\text{C}$ pro Jahrzehnt gilt bereits als ein Wert, der voraussichtlich katastrophale Auswirkungen für die Menschheit, deren Ernährungssituation und die Ökosysteme haben wird. Der unvermindert fortschreitende Treibhauseffekt wird voraussichtlich verheerende Einflüsse auf die Waldbestände der Erde und die Landwirtschaft haben. Die Ernährungssituation der Menschheit wird sich durch abnehmende landwirtschaftliche Produktion deutlich verschlechtern. Die Folge sind Hungersnöte und zunehmende Völkerwanderungen mit ihren sozialen Problemen. Es kann weiterhin davon ausgegangen werden, dass durch die globale Erwärmung die Intensität und Stärke der Stürme sowohl in den mittleren Breitengraden als auch in den tropischen Regionen zunehmen und schwerste Verwüstungen verursachen werden. Die Meeresspiegel werden im Verlauf des Jahrhunderts um rund 1 m ansteigen. Bereits bei einer Temperaturerhöhung von 2°C geht man derzeit von einem Meeresspiegelanstieg von 2,7 m bis zum Jahr 2300 aus [Sch12]. Langfristig wird jedes Grad Temperaturerhöhung einen Meeresspiegelanstieg um 2,3 m verursachen [Lev13].

Damit ist im Extremfall sogar ein Anstieg von 30 m und mehr nicht ausgeschlossen. Alleine das Abtauen der Grönland-Eismassen würde zu einem Meeresspiegelanstieg von 7 m führen. Dies hätte auf die Küstenregionen der Erde katastrophale Auswirkungen, was unter anderem Flutkatastrophen der jüngsten Vergangenheit belegen. So starben allein in Bangladesch bei Überschwemmungen im Jahr 1991 schätzungsweise 139 000 Menschen. Es ist zu befürchten, dass zahlreiche tiefer gelegene Regionen und Inseln bereits in diesem Jahrhundert von der Landkarte verschwinden werden.

Der anthropogene Treibhauseffekt findet bereits auf breiter Front statt und ist nicht mehr vollständig aufzuhalten. Allerdings lassen sich derzeit noch extrem katastrophale Auswirkungen vermeiden und das Schadenspotenzial auf ein gerade noch vertretbares Maß reduzieren. Hierfür müsste allerdings die globale Erwärmung auf $1,5^{\circ}\text{C}$ begrenzt werden. Dies ist auch Gegenstand des **Pariser Klimaschutzabkommens** der Vereinten Nationen aus dem Jahr 2015. Danach soll die globale Erwärmung gegenüber vorindustriellen Werten deutlich unter 2°C und möglichst auf $1,5^{\circ}\text{C}$ begrenzt werden. Die Zielmarke bezieht sich auf einen zwanzigjährigen Mittelwert (Bild 1.12). Die Jahre 2023 und 2024 haben im Mittel bereits die $1,5$ -Grad-Grenze erreicht, eine Kehrtwende der Emissionen ist also rasch notwendig.

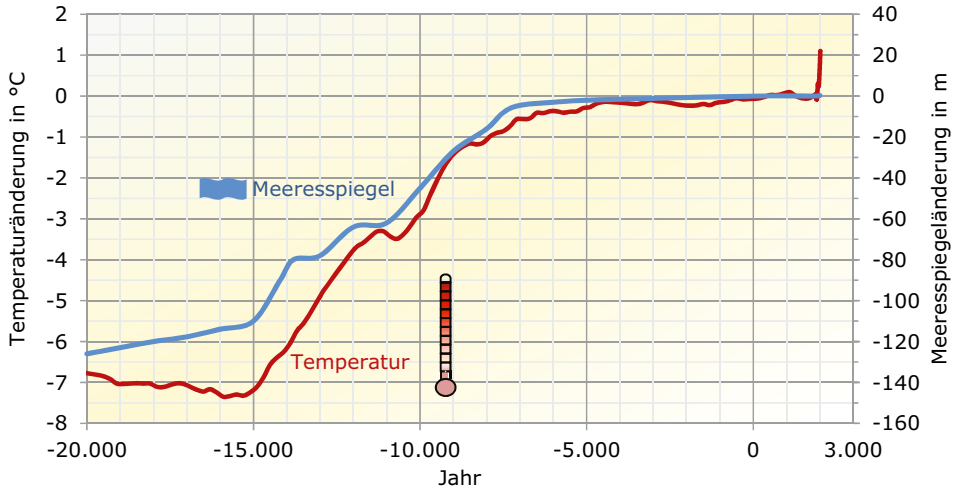


Bild 1.12 Meeresspiegeländerung und 20-Jahres-Mittelwert der Temperaturabweichung seit 20 000 v. Chr. bis 2024 (Daten: [Osm21, Mor21, Fle98], Zeitraum 1850 – 1900 entspricht null)

Um den Temperaturanstieg mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 % auf 1,5 °C zu begrenzen, dürfen ab 2023 nur noch 380 Gt CO₂ emittiert werden [IPC21, SRU24]. Der CO₂-Ausstoß von rund 40 Gt im Jahr 2022 müsste danach noch vor dem Jahr 2040 auf null reduziert werden. Bild 1.13 zeigt dies für die energiebedingten CO₂-Emissionen, die 2024 über 30 Gt betragen haben. Hier kann von einem Restbudget von rund 315 Gt ausgegangen werden.

Dies bedeutet faktisch einen vollständigen Ausstieg aus der Nutzung fossiler Brennstoffe und die Einführung einer ausschließlich auf erneuerbaren Energien basierenden Energieversorgung bereits deutlich vor Mitte dieses Jahrhunderts. Das ist technisch und ökonomisch problemlos zu erreichen. Das Tempo des Umbaus der Energiewirtschaft muss dazu aber noch deutlich erhöht werden.

Prinzipiell ist es gut möglich, die Klimaschutzvorgaben auch bei gleichem industriellem Wohlstand einzuhalten. Wichtig ist, dass allen Menschen unserer Gesellschaft die Notwendigkeit der Reduktionen und die eventuellen Folgen bei Nichteinhaltung bewusst gemacht werden. Bereits heute existieren genügend Möglichkeiten, unseren Energiebedarf auch ohne fossile Energieträger zu decken, wie dieses Buch zeigen wird. Da von der bisherigen Energieversorgung nicht wenige finanziell stark profitieren, ist der benötigte radikale Wandel nicht ohne Widerstände zu erreichen. Diese gilt es, zum Wohle der künftigen Generationen schnellstmöglich zu überwinden.

So lassen heute Vertreterinnen und Vertreter von Unternehmen der klassischen Energiewirtschaft keine Gelegenheit ungenutzt, die technische Machbarkeit einer vollständigen regenerativen Energieversorgung oder gar den Klimawandel an sich infrage zu stellen. Dabei sind diese Fragen heute bereits eindeutig beantwortet. Im

Grunde geht es nicht mehr darum, ob es sinnvoll ist, auch ohne fossile Energien auszukommen. Im Hinblick auf die Notwendigkeit der enormen CO₂-Reduktionen müssen wir lediglich entscheiden, ab wann letztendlich unsere Gesellschaft bereit ist, auf fossile Energien zu verzichten. Zum Einhalten der von der Klimaforschung dringend empfohlenen Begrenzung der globalen Erwärmung auf 1,5 °C und des völkerrechtlich bindenden Pariser Klimaschutzabkommens sollte das spätestens bis zum Jahr 2040 angestrebt werden.

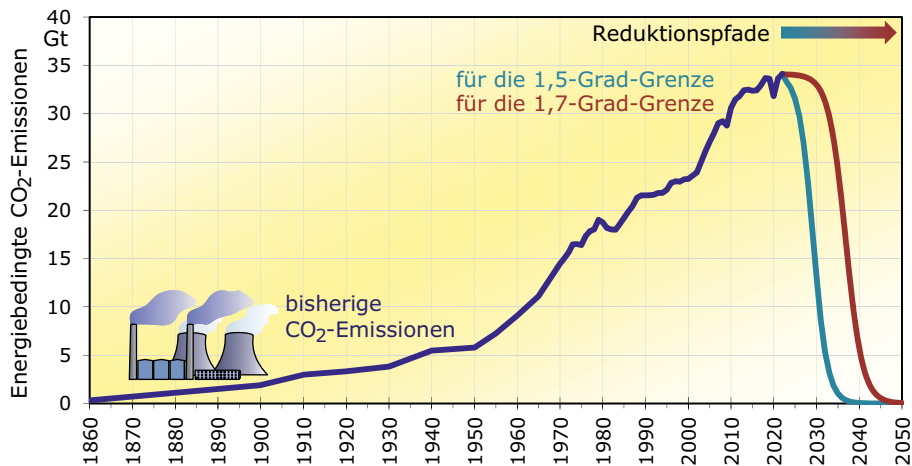


Bild 1.13 Reduktionspfade für die weltweiten energiebedingten Kohlendioxidemissionen zur Begrenzung der globalen Erwärmung auf 1,5 °C (50 % Wahrscheinlichkeit) und 1,7 °C (66 % Wahrscheinlichkeit) [SRU24]

1.5 Kernenergie contra Treibhauseffekt

1.5.1 Kernspaltung

Da die Nutzung der fossilen Energieträger zur Begrenzung des Treibhauseffekts in den nächsten Jahrzehnten deutlich verringert werden muss, sind zur Deckung des Energiebedarfs andere Energieträger notwendig. Eine Option stellt die Nutzung der Kernenergie dar, wobei zwischen Kernspaltung und Kernfusion unterschieden wird.

Alle in Betrieb befindlichen Atomkraftwerke verwenden die Kernspaltung zur Bereitstellung elektrischer Energie. Daher sind die Begriffe Atomkraft und Kernkraft synonym. Es werden dabei Atome des Uran-Isotops ²³⁵U mit Neutronen beschossen, wobei es zu einer Spaltung des Urans kommt. Hierbei entstehen neben anderen Spaltprodukten zwei neue Atome wie Krypton ⁹⁰Kr und Barium ¹⁴³Ba. Außerdem werden freie

Neutronen ^1_0n erzeugt, die nun wiederum auf Urankerne treffen und diese spalten können. Die Masse der atomaren Bausteine nach der Kernspaltung ist hierbei geringer als zuvor. Durch diesen sogenannten Massendefekt wird Energie ΔE in Form von Wärme frei, die technisch genutzt werden kann. Der ganze Vorgang kann durch die Kernreaktionsgleichung



beschrieben werden. Das Uran für die atomare Nutzung kommt in der Natur nicht in der benötigten Form vor, sondern muss aus Uranerz gewonnen werden. Gesteine, deren Gehalt an Uranoxid mehr als 0,1 % beträgt, gelten heute als abbauwürdige Uranerze. Beim Uranabbau fallen große Mengen Abraum an, der keinesfalls nur ungefährliche Gesteinsreste enthält, sondern durch zahlreiche radioaktive Rückstände belastet ist, die unter anderem Krebs hervorrufen können. Das benötigte Uran-235 (^{235}U) ist in dem aus dem Uranerz gewonnenen Urandioxid nur zu einem Bruchteil von 0,7 % enthalten. Den größten Anteil bildet Uran-238 (^{238}U), das sich nicht direkt für die Kernspaltung eignet. Das Uran muss in aufwendigen Großanlagen in energieintensiven Prozessen angereichert werden, das heißt, der Anteil des spaltbaren Uran-235 sollte auf etwa 2 % bis 4 % erhöht werden.

Weltweit waren Mitte 2024 insgesamt 408 Kernkraftwerke mit einer elektrischen Nettoleistung von 367 GW in Betrieb. Die durchschnittliche Leistung eines Atomkraftwerkes liegt damit bei knapp 900 MW. Der Anteil der Kernenergie am weltweiten Strombedarf lag bei etwa 9 %. Der Anteil am gesamten Primärenergieaufkommen ist mit rund 2 % jedoch fast vernachlässigbar gering. Nach der Verlängerung infolge der Energiekrise ist der Ausstieg aus der Kernenergie in Deutschland nun abgeschlossen. Darauf folgt nun der Jahrzehnte dauernde Rückbau der Kraftwerke und die Suche und Erschließung eines Endlagers für die radioaktiven Abfallstoffe. In anderen Ländern spielt die Kernenergie eine sehr unterschiedliche Rolle bei der Stromerzeugung, wie aus Bild 1.14 hervorgeht.

Während in Frankreich die Kernenergie bei der Stromerzeugung vorherrscht, kommen andere Industrienationen wie Dänemark oder Österreich völlig ohne Kernenergie aus. Italien ist nach dem Reaktorunglück in Tschernobyl aus der Kernenergienutzung ausgestiegen. Dabei muss nicht zwangsweise mehr CO_2 durch fossile Energien entstehen. In Norwegen werden heute weit über 90 % des Elektrizitätsbedarfs klimaverträglich über Wasserkraft gedeckt, in Island durch Wasserkraft und Erdwärme (Geothermie). In Großbritannien könnte der gesamte Elektrizitätsbedarf über die Windenergie befriedigt werden.

Sollten alle derzeit genutzten fossilen Energieträger durch die Atomkraft ersetzt werden, müssten weltweit mindestens 10 000 neue Atomkraftwerke gebaut werden. Da die Lebenszeit eines Atomkraftwerkes etwa dreißig Jahre beträgt, müssten alle Kraftwerke auch in diesem Zeitraum erneuert werden, das heißt, täglich würde ein neuer Reaktor ans Netz gehen. Hierbei müssten Kernkraftwerke auch in politisch instabilen

Staaten errichtet werden. Das Risiko von atomaren Unfällen, hervorgerufen durch Sabotage, Kriegshandlungen, leichtsinnige Sorglosigkeit oder gar vom militärischen Einsatz der Atomenergie ist hier ungleich höher.

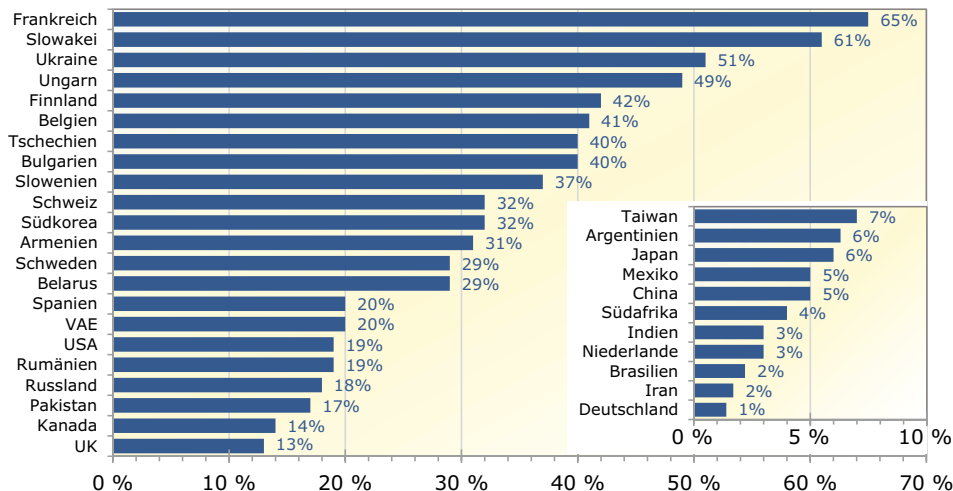


Bild 1.14 Anteil der Kernenergie an der Stromerzeugung im Jahr 2023 (Daten: [Sch24])

Die Uranvorkommen der Erde sind begrenzt, wie in Abschnitt 1.3 erläutert wurde. Sollte ein Großteil der fossilen Energieträger durch die Kernkraft abgelöst werden, wären auch diese Vorräte in kurzer Zeit erschöpft. Zwar könnte die Reichweite durch sogenannte schnelle Brüter gestreckt werden, doch an der Begrenztheit der Uranreserven kann auch diese Technologie nichts ändern. Die Kernspaltung bietet schon deshalb keine Alternative zu den fossilen Energieträgern.

Im Jahr 2022 betrug die Welturanerzeugung 48 800 t. Bei den geringen Konzentrationen im Uranerz und der noch notwendigen Anreicherung müssen enorm große Mengen an Erz bearbeitet werden. Schon bei diesem Abbau kommt es zu großen Umweltbelastungen, da die Abbaugelände radioaktiv verunreinigt werden. Das Uran wird meist weite Strecken transportiert, bei der Verarbeitung werden große Energiemengen verbraucht, und für die Kraftwerkserrichtung werden große Material- und Energiemengen benötigt. Zwar entsteht bei der Kernspaltung selbst kein CO₂, werden jedoch sämtliche Prozesse vom Kraftwerksbau über den Uranabbau bis zur Entsorgung betrachtet, entstehen indirekt nicht unerhebliche Mengen an CO₂, die zwar wesentlich geringer als bei dem Betrieb eines Kohlekraftwerkes sind, aber weit über den vergleichbaren indirekten CO₂-Emissionen von Windkraftanlagen liegen.

Ein ganz anderes Risiko bergen der Transport und die Lagerung radioaktiver Stoffe. Einerseits müssen Uran und Brennstäbe zu den verschiedenen Verarbeitungsbetrieben und Kraftwerken und andererseits abgebrannte Brennstoffe und radioaktiver Müll zur Weiterverarbeitung oder zu Zwischen- oder Endlagern transportiert wer-

den. Gefährliche, stark radioaktive Stoffe fallen beim ganz normalen Betrieb eines Kernkraftwerkes an, und auch die abgebrannten radioaktiven Brennstäbe bergen große Risiken. Außer zahlreichen anderen radioaktiven Stoffen enthalten diese knapp 1 % Plutonium, ein höchst riskanter Stoff. Ein Mikrogramm, also ein Millionstel Gramm Plutonium eingeatmet, führt beim Menschen mit ziemlicher Sicherheit zum Tod durch Lungenkrebs. Ein Gramm Plutonium kann also theoretisch eine komplette Großstadt ausrotten. Eine absolute Sicherheit, dass sich beim Transport kein Unglück ereignet, bei dem radioaktive Stoffe freigesetzt werden, kann nicht garantiert werden. Auch die Endlagerung ist problematisch, da die Reststoffe noch über Jahrtausende eine tödliche Gefahr darstellen.

Aber auch der störungsfreie Betrieb eines Atomkraftwerkes ist mit Risiken behaftet. So setzen Atomkraftwerke ständig geringe Mengen an Radioaktivität frei. In jüngster Zeit wurde in der Nähe von Atomkraftwerken eine Zunahme von Leukämiefällen bei Kindern beobachtet.

Die größte Gefährdung geht aber von einem GAU (Größter anzunehmender Unfall) in einem Kernkraftwerk aus. Sollte dieser in einem mitteleuropäischen Kraftwerk eintreten, so wären davon Millionen von Menschen betroffen. Durch freigesetzte Radioaktivität würden große Landstriche für lange Zeit unbewohnbar, und unzählige Menschen und Tiere müssten den Strahlentod sterben oder würden mittelfristig an Krebserkrankungen zugrunde gehen. Dass ein GAU nicht völlig auszuschließen ist, zeigen die Unfälle in Harrisburg, Tschernobyl und Fukushima und nicht zuletzt auch Horrorszenarien möglicher terroristischer Anschläge.

Am 28. März 1979 ereignete sich in **Harrisburg**, der Hauptstadt des US-Bundesstaats Pennsylvania, ein Reaktorunfall, bei dem große Mengen an Radioaktivität entwichen. Zahlreiche Tiere und Pflanzen wurden dadurch geschädigt und auch die Zahl der menschlichen Totgeburten in der Umgebung hatte nach dem Unglück stark zugenommen.

Am 26. April 1986 kam es in der 50 000 Einwohner zählenden Stadt Prypjat in der Ukraine im Kernkraftwerk **Tschernobyl** zu einem schweren Unfall. Die freigesetzte Radioaktivität führte auch in Deutschland zu dramatisch hohen Strahlenbelastungen. Zahlreiche Helferinnen und Helfer, die den Schaden vor Ort einzudämmen versuchten, bezahlten diesen Einsatz mit dem Leben. Verschiedene Untersuchungen belegen eine deutliche Zunahme von Fehlgeburten und Krebserkrankungen infolge der Strahlenbelastung.

Am 11. März 2011 wurde das japanische Kernkraftwerk **Fukushima** durch ein schweres Erdbeben und einen folgenden Tsunami beschädigt. Die Reaktoren wurden zwar noch kontrolliert heruntergefahren. Die nötige Kühlung zur Abfuhr der Nachzerfallswärme konnte jedoch nicht ausreichend sichergestellt werden. Es kam zu Überhitzungen der Brennstäbe, mehreren Explosionen und Bränden. Dadurch wurde die Reaktorhülle beschädigt, und große Mengen an Radioaktivität traten aus. Die enormen Mengen an kontaminiertem Wasser, welches unter anderem zur Kühlung der Kern-

schmelze verwendet wurde, werden noch etwa dreißig Jahre lang nach aufwendiger Filterung ins Meer abgelassen.

Kernenergieanlagen lassen sich nicht nur zivil, sondern auch militärisch nutzen. Aus diesem Grund wurde der Ausbau der zivilen Kernenergie in vielen Staaten von den Militärs vorangetrieben. Die Nutzung der Atomkraft in politisch unsicheren Staaten kann internationale Krisen hervorrufen. Beispiele hierfür waren in den letzten Jahren Iran, Irak und Nordkorea. Werden die Anstrengungen zur Nutzung der Atomkraft forciert, steigt auch die Wahrscheinlichkeit „atomarer Krisen“, und das Risiko, dass Terrorgruppen in den Besitz radioaktiven Materials gelangen, wird weiter zunehmen.

Dem Nutzen der zivilen Kernkraft stehen also viele in ihren Auswirkungen nur schwer abschätzbare Risiken gegenüber. Da neben der Kernenergie auch andere Technologien existieren, um die Energieversorgung klimaverträglich sicherzustellen, ist die Forderung nach dem Ausstieg aus der Nutzung der Kernenergie mehr als berechtigt.

1.5.2 Kernfusion

In eine ganz neue Technologie der Nutzung der Atomkraft werden derzeit große Hoffnungen gesetzt und Geldsummen investiert: in die Kernfusion. Als Vorbild hierfür dient die Sonne, bei der Energie durch Verschmelzung von Wasserstoffkernen freigesetzt wird. Dieser Vorgang soll auf der Erde nachvollzogen werden, indem Deuterium ${}^2\text{D}$ und Tritium ${}^3\text{T}$ zu Helium ${}^4\text{He}$ verschmolzen werden. Hierbei werden ein Neutron ${}^1\text{n}$ und Energie ΔE freigesetzt. Der Vorgang kann auch durch die Reaktionsgleichung



beschrieben werden. Damit diese Reaktion in Gang kommt, müssen die Teilchen jedoch auf Temperaturen von über 1 Mio. °C erhitzt werden. Da kein bekanntes Material diesen Temperaturen standhalten kann, werden andere Technologien, wie zum Beispiel der Einschluss der Reaktionsmaterialien durch starke Magnetfelder, erprobt.

Die für die Kernfusion benötigten Ausgangsstoffe sind auf der Erde in großer Menge zu gewinnen, sodass die begrenzte Reichweite der Ausgangsstoffe für die Kernfusion kein Problem darstellt. Ob diese Technologie jedoch jemals funktionieren wird, kann derzeit noch nicht mit Sicherheit beantwortet werden. Spötterinnen und Spötter meinen, das Einzige, was sich seit Jahren bei der Kernfusion mit Sicherheit voraussagen ließe, sei die stets gleich bleibende Zeitspanne von fünfzig Jahren, in der ein funktionierender Reaktor ans Netz gehen soll.

Doch selbst wenn diese Technologie einmal ausgereift sein sollte, sprechen verschiedene Gründe gegen den Ausbau der Kernfusion. Zum einen ist diese Technologie deutlich teurer als die heutige Kernspaltung. Schon aus wirtschaftlichen Gesichts-

punkten werden Alternativen wie regenerative Energien zu bevorzugen sein. Zum anderen entstehen auch beim Betrieb einer Fusionsanlage radioaktive Stoffe, von denen eine Gefährdung ausgehen kann. In die Erforschung der Kernfusion wurden bis heute bereits Unsummen an Kapital investiert, die an anderen Stellen dringend fehlen. Der letzte und entscheidende Grund ist die lange Dauer bis zum eventuellen Einsatz dieser Technologie. Für die Bekämpfung des Treibhauseffektes bedarf es bereits heute dringend funktionierender Alternativen. Auf einen in unbestimmter Zukunft funktionierenden Fusionsreaktor darf und kann im Sinne des Klimaschutzes nicht gewartet werden.

1.6 Nutzung erneuerbarer Energien

Wenn die Nutzung der fossilen Energien drastisch reduziert werden soll und die Kernenergie keine Alternative bietet, stellt sich die Frage, wie eine zukünftige Energieversorgung aussehen kann. Hierzu muss die Energieproduktivität, wie bereits in der Vergangenheit, deutlich gesteigert werden. Das heißt, derselbe Nutzenergiebedarf muss mit einem wesentlich geringeren Einsatz an Primärenergie gedeckt werden, wodurch der Primärenergiebedarf und die CO₂-Emissionen gesenkt werden können.

Als gegenläufige Entwicklung wird der Energiebedarf aufgrund der steigenden Weltbevölkerung und des Nachholbedarfs der Entwicklungsländer weiter zunehmen. Diese Problematik wird durch den „Faktor Vier“ von von Weizsäcker und Lovins treffend beschrieben. In den nächsten fünfzig Jahren gilt es, bei halbem Energie- bzw. Naturverbrauch den doppelten Wohlstand zu erreichen [Wei96]. Auf diesem Weg werden die erneuerbaren Energien eine entscheidende Rolle spielen, da nur sie den Energiebedarf der Erde klimaverträglich decken können.

Unter dem Begriff **erneuerbare oder regenerative Energien** versteht man die Energiequellen, die unter menschlichen Zeithorizonten unerschöpflich sind. Die erneuerbaren Energien können in die drei Bereiche Sonnenenergie, Planetenenergie und geothermische Energie eingeteilt werden (Bild 1.15). Das jeweilige jährliche Energieangebot auf der Erde beträgt bei der

- Sonnenenergie: 3 900 000 000 PJ/a,
- Planetenenergie (Gravitation): 94 000 PJ/a,
- geothermischen Energie: 996 000 PJ/a.

Durch natürliche Energiewandlungen entstehen Energieformen wie Wind oder Niederschlag. Diese lassen sich dann technisch nutzen, um Wärme, Elektrizität oder Brennstoffe bereitzustellen.

Das jährliche Energieangebot der erneuerbaren Energien ist um Größenordnungen höher als der weltweite Energiebedarf. Theoretisch können die erneuerbaren Ener-

gien problemlos den gesamten Weltenergiebedarf decken. Dies heißt nicht zwangsweise, dass ein Umstieg absolut reibungslos durchzuführen ist. Vielmehr ist bei der Nutzung der erneuerbaren Energien im großen Maßstab eine völlig andere Energiewirtschaft aufzubauen, als sie in den letzten Jahrzehnten entstanden ist.

Die herkömmliche Energiewirtschaft basiert zum überwiegenden Teil auf fossilen Energieträgern. Es gilt, diese möglichst preiswert zu fördern, zu transportieren und in zentralen Kraftwerken betriebswirtschaftlich optimiert in andere Energieformen umzuwandeln. Der Vorteil der fossilen Energien ist eine stetige Verfügbarkeit, die Energie kann also genau dann genutzt werden, wenn die Verbraucher es wünschen.

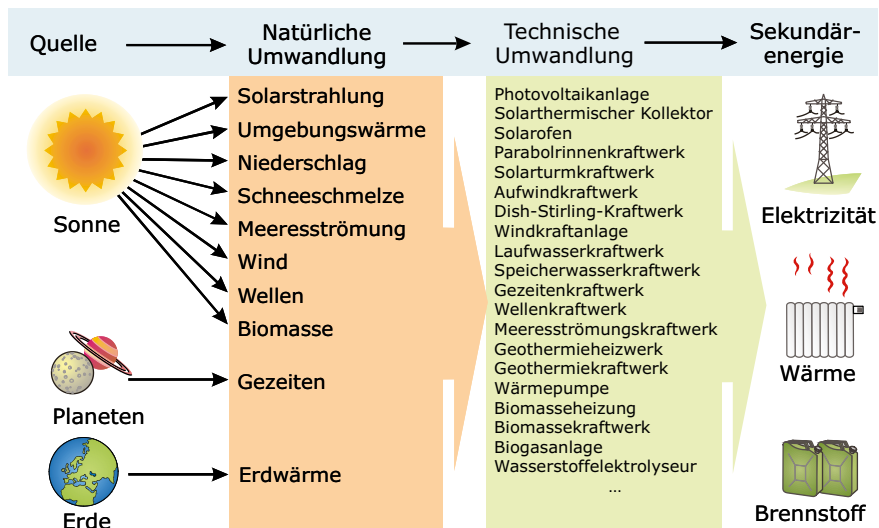


Bild 1.15 Quellen und Möglichkeiten zur Nutzung regenerativer Energien [Qua21]

Bei den erneuerbaren Energien, wie zum Beispiel bei der Windenergie, herrscht hingegen oftmals ein stark wechselndes Energieangebot. Eine rein auf erneuerbare Energien aufgebaute Energiewirtschaft muss neben der Energiewandlung in gewünschte Energieformen, wie zum Beispiel Strom, auch die Verfügbarkeit der Energie sicherstellen. Dies kann durch Energiespeicherung in großem Maßstab, durch weltweite Energietransporte oder durch Anpassung des Energiebedarfs an das Energieangebot erfolgen. Es ist also nicht mehr die Frage zu klären, ob die erneuerbaren Energien unsere Energieversorgung sicherstellen können, sondern welchen Anteil die unterschiedlichen erneuerbaren Energien erhalten werden und, im Hinblick auf den Treibhauseffekt, wie schnell diese zum Einsatz kommen. Der Umbau unserer Energiewirtschaft stellt somit eine der größten Herausforderungen des 21. Jahrhunderts dar. Die Vielfalt der hierzu nutzbaren erneuerbaren Energien wird im Folgenden kurz vorgestellt.

1.6.1 Geothermische Energie

Geothermie ist die Bezeichnung für die Wärme im Erdinneren. Im Erdkern herrschen Temperaturen von bis zu 6200 °C. Diese Temperaturen werden in der Hauptsache durch radioaktiven Zerfall und die dabei frei werdende Energie verursacht. 99 % der Erde sind heißer als 1000 °C. In der Erdkruste ist die Wärme relativ gering, nimmt aber mit größerer Tiefe schnell zu. Welche gewaltigen Energieprozesse im Erdinneren stattfinden, kann eindrucksvoll bei einem Vulkanausbruch beobachtet werden. Durch die großen Temperaturunterschiede von Erdinnerem und Kruste existiert ein ständiger Wärmestrom von innen nach außen. Der gesamte Energieinhalt dieses Wärmestroms liegt in der Größenordnung des Weltprimärenergiebedarfs. Für die großtechnische Nutzung der Geothermie sind jedoch hohe Temperaturen erforderlich. Diese lassen sich durch Tiefenbohrungen anzapfen. Wirtschaftlich interessant ist die Geothermie nur in Regionen mit geothermischen Anomalien. Dort sind bereits in geringen Tiefen technisch nutzbare Temperaturen vorhanden. Zu den begünstigten Ländern zählen unter anderem die Philippinen, Italien, Mexiko, Japan, Island, Neuseeland und die USA. Im Jahr 2023 waren weltweit 15 GW an geothermischer Kraftwerksleistung installiert, die über 90 TWh an elektrischer Energie lieferten. Hinzu kommen noch zahlreiche Anlagen zur rein thermischen Nutzung der Erdwärme.

Die Nutzung der Geothermie wird in Kapitel 8 detaillierter vorgestellt.

1.6.2 Planetenenergie

Die Planeten, insbesondere unser Mond und die Erde, üben eine wechselseitige Kraft aufeinander aus, die sich durch die Bewegung der Planeten an einem Punkt der Erdoberfläche ständig verändert. Dies lässt sich am besten an den Meeresküsten bei den Gezeiten beobachten. Für die Bewegung der gewaltigen Wassermassen der Ozeane, wie es bei Ebbe und Flut erfolgt, sind enorme Energiemengen notwendig.

Bei besonders großem Tidenhub lässt sich die Gezeitenenergie durch Gezeitenkraftwerke nutzen. Bei Flut fließt das Wasser durch Turbinen in ein Staubecken, und bei Ebbe wird das Wasser über Turbinen in das offene Meer zurückgeleitet. Hierbei wird elektrischer Strom erzeugt. Weltweit befinden sich derzeit nur wenige Gezeitenkraftwerke in Betrieb. Durch die notwendigen Stauwehre und Rückhaltebecken sind, wie bei großen Wasserkraftwerken, starke Eingriffe in die Natur notwendig. Der Anteil der Energie, der theoretisch durch Gezeitenkraftwerke bereitgestellt werden könnte, ist verhältnismäßig gering. Gezeitenkraftwerke werden in Kapitel 7 näher beschrieben.

1.6.3 Sonnenenergie

Die weitaus größte erneuerbare Energiequelle ist die Sonne. Von der Sonne erreicht im Jahr eine Energiemenge von $3,9 \cdot 10^{24} \text{ J} = 1,08 \cdot 10^{18} \text{ kWh}$ die Erdoberfläche. Dies entspricht dem Fünftausendfachen des Weltprimärenergiebedarfs und beträgt damit weit mehr als alle verfügbaren fossilen oder nuklearen Energiereserven. Wenn es uns nur gelingt, ein Fünftausendstel der auf der Erde eintreffenden Sonnenenergie zu nutzen, könnte der gesamte Energiebedarf der Menschheit durch die Sonne gedeckt werden. Diese Dimensionen werden optisch durch die Energiekugeln in Bild 1.16 verdeutlicht.

Bei der Nutzung der Sonnenenergie wird zwischen direkter und indirekter Sonnenenergie unterschieden. Bei der Nutzung der direkten Sonnenenergie wird die eintreffende Solarstrahlung durch technische Anlagen direkt genutzt. Bei der indirekten Sonnenenergie wird die Sonnenwärme durch natürliche Energiewandlung in andere Energieformen wie Wind, Wasser der Flüsse oder Pflanzenwachstum umgewandelt. Diese indirekten Sonnenenergieformen können dann wiederum mittels technischer Anlagen genutzt werden.

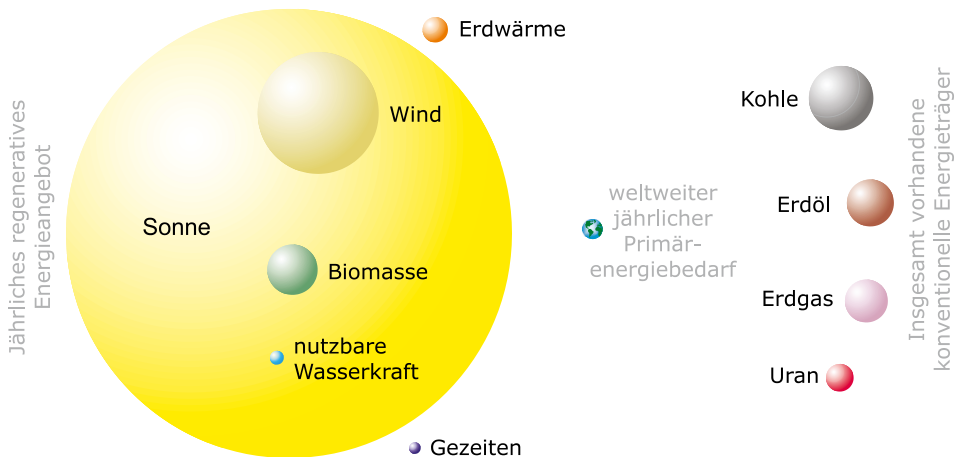


Bild 1.16 Energiekugeln: Die jährliche Sonneneinstrahlung übertrifft den Energieverbrauch und sämtliche Energiereserven um ein Vielfaches [Qua21].

Da die Sonnenenergie die wichtigste erneuerbare Energiequelle darstellt und die Theorie der Sonnenstrahlung für alle Anlagen zur Nutzung der direkten Sonnenenergie von Bedeutung ist, wird dieser Themenkomplex ausführlich in Kapitel 2 behandelt. Verschiedene Techniken zur Nutzung der direkten und indirekten Sonnenenergie werden im Folgenden kurz vorgestellt. Auf sie wird in nachfolgenden Kapiteln tiefer eingegangen.

1.6.3.1 Nutzung der direkten Sonnenenergie

Zur Nutzung der direkten Sonnenenergie können unter anderem die folgenden Techniken eingesetzt werden:

- solarthermische Kraftwerke
- Solarkollektoren zur Wärmeerzeugung
- Photovoltaik, Solarzellen zur Stromerzeugung
- Photolyseeinrichtungen zur Brennstoffherzeugung

Solarthermische Kraftwerke

Solarthermische Kraftwerke wandeln Sonnenwärme in elektrische Energie um. Hierbei unterscheidet man zwischen:

- Parabolrinnen-Kraftwerken
- Solarturm-Kraftwerken
- Dish-Stirling-Anlagen
- Aufwind-Kraftwerken

Das weltweite Potenzial für solarthermische Kraftwerke ist enorm. Sie könnten theoretisch allein den gesamten Energiebedarf der Menschheit problemlos decken. Mittelfristig können diese Kraftwerke auch zu konventionellen fossilen oder atomaren Kraftwerken vollständig wirtschaftlich konkurrenzfähig werden. Aus ökonomischen Gründen eignen sich solarthermische Kraftwerke aber nur für Gebiete mit hoher Direktbestrahlung. Mit Ausnahme der Aufwindkraftwerke verwenden solarthermische Kraftwerke konzentrierte Solarstrahlung.

Aktuell sind weltweit solarthermische Kraftwerke mit einer elektrischen Leistung von 6,4 GW in Betrieb. Sie produzieren jährlich etwa 17,6 TWh an elektrischer Energie. Die Mehrheit davon befindet sich in Spanien und in den USA. Derzeit sind weltweit Kraftwerke mit einer Leistung von knapp 2 GW im Bau, die meisten davon in China. Die konzentrierende Solarthermie wird ausführlich in Kapitel 4, Aufwindkraftwerke werden in Kapitel 3 näher beschrieben.

Solarkollektoren zur Wärmeerzeugung

Solarthermische Anlagen können nicht nur für die Erzeugung von Hochtemperaturwärme oder elektrischem Strom eingesetzt werden, sondern auch zur Deckung des Bedarfs an Niedertemperaturwärme zur Raumheizung oder Brauchwassererwärmung. Während Kollektoranlagen zur Raumheizung noch nicht so häufig verwendet werden, haben Kollektoren zur Trinkwassererwärmung weltweit bereits eine starke Verbreitung erlangt. Im Jahr 2024 wurden in Deutschland noch 220 000 m² Kollektorfläche installiert. 2024 besaßen 1000 Einwohnerinnen und Einwohner in Deutschland

statistisch jedoch nur 261 m² Kollektorfläche. In Österreich lag die Zahl bei rund 500 m² je 1000 Einwohnerinnen und Einwohner, im sonnenreichen Zypern entfielen sogar über 700 m² auf 1000 Einwohnerinnen und Einwohner. Der mit Abstand mengenmäßig größte Kollektormarkt befindet sich derzeit in China (Tabelle 1.8). Auch das jährliche Wachstum der Solarthermie wird im Wesentlichen von China beeinflusst.

Soll die Kollektorfläche in eine thermische Nennleistung umgerechnet werden, wird sie mit 700 W/m² multipliziert. Diese Leistung ist bei einer Bestrahlungsstärke von 1000 W/m² und einem Kollektorwirkungsgrad von 70 % erreichbar. 2022 waren weltweit verglaste Kollektoren mit einer Fläche von 728 km² im Einsatz, was einer thermischen Leistung von 510 GW entspricht. Die installierte thermische Leistung der Solarthermie übertraf wegen des höheren Nennwirkungsgrades noch im Jahr 2016 sogar die elektrische Leistung der Photovoltaik, obwohl die insgesamt installierte Photovoltaikfläche größer als die Fläche der Solarthermie war. Auf nicht konzentrierende solarthermische Kollektoren wird in Kapitel 3 näher eingegangen.

Tabelle 1.8 Neu installierte, verglaste solarthermische Kollektorfläche von 1990 bis 2022 (Daten: [EST03; EST14; IEA24a])

	Im jeweiligen Jahr installierte Kollektorfläche in 1000 m ²								
Jahr	1990	2000	2010	2012	2014	2016	2018	2020	2022
China	720	5563	49 000	63 900	52 407	39 520	35 431	25 050	21 460
Türkei	300	675	1658	1624	1903	1851	1880	1927	1846
Indien	53	70	889	1458	1181	1202	1789	1659	1517
Brasilien	k. A.	k. A.	473	626	797	757	623	706	859
Deutschland	35	620	1150	1150	900	744	574	643	709
Griechenland	204	181	214	243	271	191	329	305	419
Israel	250	390	316	330	390	420	415	350	350
Mexiko	k. A.	k. A.	183	191	203	258	286	271	595
Polen	k. A.	k. A.	146	302	260	115	310	161	210
Spanien	9	40	337	226	251	210	202	185	144
Dänemark	k. A.	30	62	113	179	478	72	15	3
Australien	k. A.	71	398	270	193	166	184	162	138

Tabelle 1.8 Neu installierte, verglaste solarthermische Kollektorfläche von 1990 bis 2022 (Daten: [EST03; EST14; IEA24a]) (Fortsetzung)

	Im jeweiligen Jahr installierte Kollektorfläche in 1000 m²								
Jahr	1990	2000	2010	2012	2014	2016	2018	2020	2022
USA	235	37	225	256	197	182	164	45	46
Italien	13	45	490	330	269	209	179	123	245
Öster-reich	40	153	280	206	154	111	99	74	58
Japan	543	339	162	170	134	79	79	52	61
Frank-reich	15	24	256	250	151	67	59	46	67
andere	k. A.	688	1412	3249	4443	3459	3077	1405	1307
Welt	k. A.	8926	57 651	74 894	64 283	50 019	45 752	33 179	30 033

Neben Kollektoranlagen, die die Sonnenenergie aktiv nutzen, ist auch eine sogenannte passive Nutzung der Sonnenenergie möglich. Dies geschieht durch optimal ausgerichtete Gebäude, gut geplante Glasfassaden oder transparente Wärmedämmung. Durch Kombination der passiven und aktiven Nutzung der Sonnenenergie ist es möglich, Nullenergiehäuser zu bauen, also Gebäude, die ihren Energiebedarf zur Raum- und Wassererwärmung ausschließlich von der Sonne beziehen. Mittlerweile erzeugen in Deutschland etliche Plusenergiehäuser sogar mehr Energie, als sie selbst für den Betrieb benötigen.

Photovoltaik

Eine vielversprechende Technik zur Nutzung der Sonnenenergie zur Stromerzeugung ist die Photovoltaik. Solarzellen gewinnen dabei aus dem Sonnenlicht direkt elektrische Energie. Allein in Deutschland könnten damit auf Dach- und Fassadenflächen Anlagen mit einer Leistung von über 200 GW und auf brachliegenden Acker- und Freiflächen von mehr als 1000 GW errichtet werden [Qua00]. Insgesamt ließen sich deutlich mehr als 1000 TWh/a an elektrischer Energie bereitstellen. Diese Summe übersteigt den gesamten derzeitigen Inlandsverbrauch an elektrischer Energie. Eine vollständige Nutzung der Potenziale ist jedoch nicht sinnvoll, auch wenn der Strombedarf deutlich ansteigen wird, denn dadurch würden hohe Überschüsse im Sommer produziert, und es wären große und teure Speicher notwendig. Sinnvoller ist die Kombination der Photovoltaik mit anderen regenerativen Energien wie Windkraft, Wasserkraft oder Biomasse, da sie sich sehr gut ergänzen.

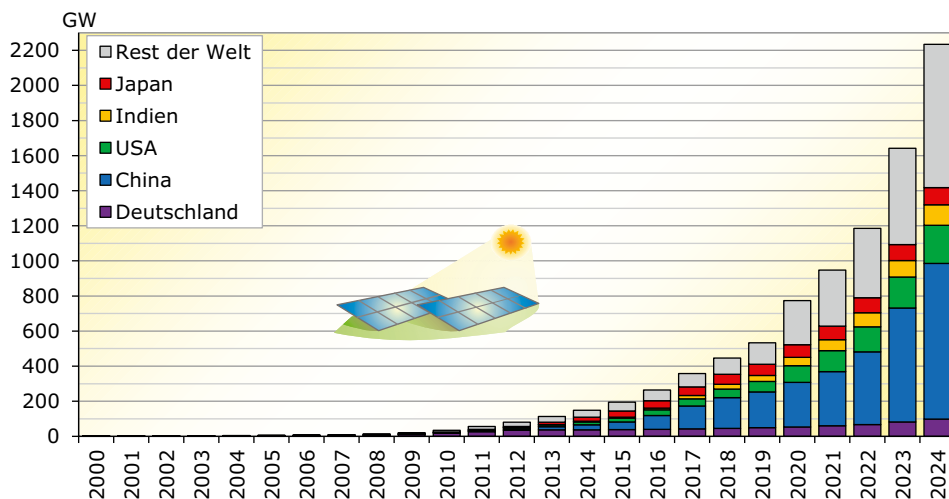


Bild 1.17 Entwicklung der weltweiten und in den Top 5 installierten Photovoltaikleistung seit 2000. Werte für 2024 vorläufig [Qua25].

Lange Zeit wurde die weltweite Weiterentwicklung der Photovoltaik nur durch wenige Staaten getragen. Über 70 % der weltweit installierten Photovoltaikleistung entfielen im Jahr 2012 lediglich auf fünf Länder (Bild 1.17). Durch die dramatisch gesunkenen Kosten der Photovoltaik hat der Boom inzwischen auch viele andere Länder erfasst. Deutschland war noch bis 2012 der weltweit dominierende Photovoltaikmarkt. Bis dahin war Deutschland dadurch auch das führende Land bei der Produktion von Solarmodulen. Die starke Konkurrenz aus Asien und der enorme Gegenwind der deutschen Politik, der für ein Zusammenbrechen des deutschen Heimatmarktes sorgte (Bild 1.8), führte zu einer weitgehenden Zerstörung der deutschen Photovoltaikindustrie. Inzwischen hat China im Bereich der Photovoltaik eine dominierende Position eingenommen.

Die Photovoltaik wird ausführlich in Kapitel 5 behandelt.

1.6.3.2 Nutzung der indirekten Sonnenenergie

Von indirekter Sonnenenergie spricht man, wenn durch natürliche Umwandlungsprozesse eine andere Energieform als Solarstrahlung entstanden ist, die dann wiederum durch technische Energiewandler genutzt werden kann. Ein Beispiel für eine Form von indirekter Sonnenenergie ist die Wasserkraft. Durch die Sonneneinstrahlung verdunstet das Wasser der Meere. Es kommt an höher gelegenen Stellen zu Niederschlägen, das Wasser sammelt sich in Bächen und Flüssen, um wieder zum Meer zurückzugelangen. Auf dem Weg dorthin kann die Bewegungs- und Lageenergie des Wassers durch Kraftwerke genutzt werden. Zu den indirekten Formen der Sonnenenergie zählen:

- Verdunstung, Niederschlag, Wasserströme
- Schmelzen von Schnee
- Wellenbewegung
- Meeresströmung
- Biomasseproduktion
- Erwärmung der Erdoberfläche und der Atmosphäre
- Wind

Wasserkraft

Die Wasserkraft umfasst eine Vielzahl der genannten indirekten Formen der Sonnenenergie. Bei der weltweiten regenerativen Elektrizitätserzeugung befindet sich die Wasserkraft noch auf Platz eins.

Tabelle 1.9 Weltweit installierte Wasserkraftleistung in GW (Daten: [EIA25])

Jahr	1980	1990	2000	2010	2014	2016	2018	2020	2021	2023
China	20	36	79	200	283	305	322	339	355	371
Brasilien	28	57	61	81	89	97	104	109	109	110
Kanada	48	59	67	75	75	80	81	81	82	83
USA	82	74	79	79	80	80	80	80	80	80
Russland	¹⁾	¹⁾	44	47	50	50	47	49	54	51
Indien	12	19	25	36	40	43	46	46	47	47
Norwegen	19	26	27	28	30	30	31	32	32	33
andere	253 ²⁾	295 ²⁾	297	338	373	397	410	424	427	441
Welt	462	566	679	884	1020	1082	1121	1160	1186	1215

1) in „Andere“ enthalten; 2) inklusive Russland

Da die Nutzung der Wasserkraft bereits seit vielen Jahrzehnten kontinuierlich ausgebaut wurde und nicht erst wie die Windkraft oder die Photovoltaik seit den 1990er-Jahren vorangetrieben wird, existierte im Jahr 2023 eine Wasserkraftleistung von 1215 GW mit einer Nettoerzeugung von rund 4236 TWh. Damit lag der Anteil der Wasserkraft an der weltweiten Stromerzeugung bei 14,6 %.

Der Ausbau der Wasserkraft stößt in einigen Gebieten der Erde aber bereits auf Grenzen. Vor allem der Neubau von Großkraftwerken verursacht meist große Eingriffe in die Natur und ist deshalb nicht unumstritten. Dennoch erscheint eine Verdopplung der weltweit installierten Leistung noch möglich. Da die Potenziale der Windkraft

oder der Solarenergie jedoch erheblich größer sind, ist zu erwarten, dass die Wasserkraft als Nummer eins der regenerativen Elektrizitätsversorgung in den nächsten Jahren abgelöst wird. Tabelle 1.9 zeigt die Länder mit der höchsten installierten Kraftwerksleistung. In Europa haben außer Norwegen vor allem die Alpenländer sowie Spanien und Schweden große Kraftwerkskapazitäten. Deutschland verfügt über vergleichsweise geringe Potenziale. Im Jahr 2024 war hier inklusive Pumpspeicherkraftwerken lediglich eine Leistung von rund 16 GW installiert.

Die Nutzung der Wasserkraft wird ausführlich in Kapitel 7 beschrieben.

Windkraft

Vor über hundert Jahren hatte die Windkraft bereits eine wichtige Rolle gespielt. Zahlreiche technisch hoch entwickelte Windmühlen wurden zum Getreidemahlen oder zum Wasserpumpen genutzt, und in Nordamerika dienten Tausende von „Western Mills“ der Wasserförderung. Bei sämtlichen Windkraftanlagen handelte es sich jedoch um rein mechanische Anlagen. Windkraftanlagen zur Gewinnung elektrischer Energie haben erst in den letzten Jahrzehnten deutlich an Bedeutung gewonnen. Die Windenergiebranche erzielte in Deutschland bereits im Jahr 2020 einen Umsatz von über 20 Mrd. € und schuf damit über 100 000 Arbeitsplätze. Ende 2024 waren in Deutschland 28 717 Windkraftanlagen an Land mit einer Gesamtleistung von 63 551 MW und offshore 1639 Windkraftanlagen mit einer Gesamtleistung von 9222 MW in Betrieb [Deu25]. Obwohl die Windkraft auch in Deutschland die wichtigste Säule bei der künftigen Stromversorgung bilden wird, unterstützt die deutsche Politik den Ausbau nicht in dem Maße, wie es für einen wirksamen Klimaschutz erforderlich wäre. China hat Deutschland bei den Zubauzahlen inzwischen weit überholt.

Das Potenzial der Windkraft in Deutschland ist beachtlich. Auch unter Berücksichtigung strenger Randbedingungen der Flächennutzbarkeit lassen sich an Land insgesamt rund 200 GW installieren, die rund ein Viertel des Gesamtenergiebedarfs decken könnten [BWE11, Qua16, Qua21b]. Hinzu kommt noch ein großes Potenzial an Offshore-Gebieten, also von Gebieten vor der Küste. Die Windkraft kann damit in Deutschland den größten Anteil zur Verringerung der Treibhausgase liefern. Das kann allerdings nur gelingen, wenn die Windkraft in Deutschland flächendeckend zum Einsatz kommt. Einzelne Bundesländer erschweren oder verhindern sogar weitgehend die Nutzung der Windkraft.

Das Potenzial der Windkraft in anderen Ländern ist stark unterschiedlich. Es ist zum Teil deutlich größer als in Deutschland, wie zum Beispiel im windreichen Großbritannien. Hier könnten 1760 TWh/a an elektrischer Energie mit Windkraft gewonnen werden [Sel90]. Dies übersteigt den Elektrizitätsbedarf Großbritanniens um ein Mehrfaches. Neben Deutschland zählen China, die USA und Indien zu den wichtigsten Märkten der Welt (Bild 1.18). Aber auch in vielen anderen Ländern wurde inzwischen eine beachtliche Leistung installiert.

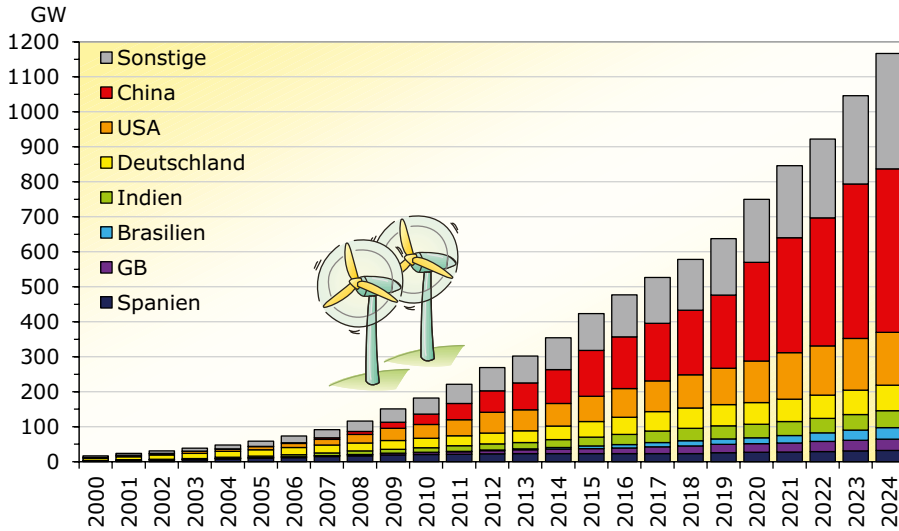


Bild 1.18 Weltweit installierte Windkraftleistung in GW (Daten: [Qua25])

Auf den Einsatz der Windenergie zur Stromerzeugung wird in Kapitel 6 näher eingegangen.

Biomasseproduktion

Biomasse stellt bei der Deckung des weltweiten Primärenergiebedarfs die mit Abstand wichtigste regenerative Energiequelle dar. Unter Biomasse versteht man Stoffe organischer Herkunft, in der Natur lebende und wachsende Materie sowie Abfallstoffe von lebenden und toten Lebewesen. Der jährliche Zuwachs an Biomasse auf der Erde beträgt etwa $1,55 \cdot 10^{11}$ t/a. Dies entspricht einem Energiegehalt von rund $3 \cdot 10^{21}$ J. Etwa 1 % davon wird thermisch genutzt und deckt rund 11 % des weltweiten Primärenergiebedarfs. Vor allem in Entwicklungsländern ist der Anteil der Biomasse an der Energieversorgung sehr hoch und liegt in Ländern wie Äthiopien, Mosambik oder Nepal über 80 %. Die Nutzung der Biomasse erfolgt dabei nicht immer nachhaltig. Nur wenn so viel Biomasse genutzt wird, wie auch wieder nachwachsen kann, ist die Nutzung regenerativ und damit klimaneutral. Zu intensive Nutzung fördert letztendlich die Wüstenbildung und auch den Treibhauseffekt.

Zur technischen Nutzung der Biomasse gibt es zahlreiche Möglichkeiten. Neben der Verbrennung zur Bereitstellung von Wärme und elektrischer Energie kann Biomasse in verschiedenen Umwandlungsprozessen verflüssigt, vergast oder zu Alkohol vergoren werden. Der größte Vorteil der Biomasse ist die gespeicherte Energie, die im Gegensatz zum stark schwankenden Angebot an direkter Sonnenenergie oder Windkraft bedarfsorientiert genutzt werden kann. Aus diesem Grund wird der Biomasse bei einer Energiewirtschaft, die überwiegend auf erneuerbaren Energien aufbaut, die Rolle zukommen, für ein gleichmäßiges Energieangebot zu sorgen.

In Deutschland waren im Jahr 2024 Biomassekraftwerke mit einer Leistung von rund 9 GW mit einer Stromerzeugung von 37,0 TWh im Einsatz. Dies entspricht einem Anteil von rund 8 % am Bruttostromverbrauch. Bei der Wärmeerzeugung lag der Beitrag im Jahr 2023 mit rund 156 TWh und einem Anteil von 16 % am Endenergieverbrauch für Wärme und Kälte noch höher. Im gleichen Jahr wurden biogene Kraftstoffe mit einem Energiegehalt von 36,3 TWh umgesetzt, was etwa 6 % des Endenergiebedarfs des Verkehrs in Deutschland entspricht [Qua23, AGEE24].

Auf die Nutzung von Biomasse wird in Kapitel 9 näher eingegangen.

Niedertemperaturwärme

Durch die Sonneneinstrahlung erwärmt sich sowohl die Erdoberfläche als auch die Atmosphäre. Durch die unterschiedliche Erwärmung der Luftmassen und der Oberflächen kommt es zu Ausgleichsströmungen, die durch die Windkraft technisch genutzt werden können. Im Erdboden wird die Sonnenwärme über Stunden, Tage oder gar Monate gespeichert. Die Niedertemperaturwärme von Boden, Grundwasser und Luft kann über Wärmepumpen genutzt werden. Eine genaue Trennung der Niedertemperaturwärme des Bodens in Anteile der Sonnenenergie und der Geothermie ist nur schwer möglich.

Wird die Antriebsenergie aus erneuerbaren Energiequellen zur Verfügung gestellt, lässt sich mit der Technik einer Wärmepumpe Nutzwärme klimaneutral erzeugen. Da die Potenziale anderer Technologien zur klimaneutralen Wärmeerzeugung in Deutschland begrenzt sind, wird die Wärmepumpe eine tragende Funktion bei der Ablösung klimaschädlicher Öl- und Gasheizungen einnehmen.

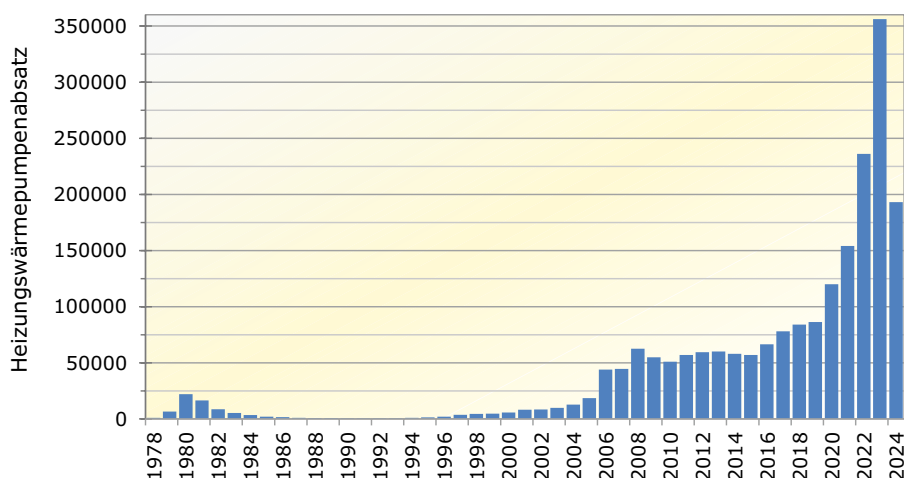


Bild 1.19 Absatzzahlen von Heizungswärmepumpen in Deutschland

Während Wärmepumpen Anfang der 1980er-Jahre in Deutschland bereits eine erste Boomphase erlebten, ist der Markt in den 1990er-Jahren nahezu komplett zusammengebrochen. Erst Mitte der 2000er-Jahre fand wieder eine Erholung statt. Seit der Energiekrise im Jahr 2021 weist der Wärmepumpenabsatz sehr starke Steigerungsraten auf (Bild 1.19). Die Diskussionen um das „Heizungsgesetz“ führten dann aber wieder zu einem Einbruch der Absatzmengen. Um die Öl- und Gasheizung für das Einhalten der Klimaschutzziele rechtzeitig verdrängen zu können, müssten in Deutschland allerdings langfristig bis zu 1 Mio. Wärmepumpen pro Jahr installiert werden. Davon ist der Wärmepumpenmarkt immer noch recht weit entfernt. Wärmepumpen werden in Kapitel 8 näher beschrieben.

Brennstoffzellen und Wasserstoffherzeugung

Brennstoffzellen und Wasserstoff werden oftmals direkt mit erneuerbaren Energien gleichgestellt. Dies ist jedoch nur bedingt korrekt. Wasserstoff an sich ist keine regenerative Energieform, sondern lediglich ein Energieträger, der erst einmal technisch hergestellt werden muss. Für die Herstellung wird Energie benötigt. Diese kann aus regenerativen Energien stammen. Derzeit wird Wasserstoff jedoch nur in kleinen Mengen für die chemische Industrie erzeugt. Dabei kommen weitgehend fossile Energieträger zum Einsatz. Solange der Wasserstoff aber aus fossilen Energieträgern hergestellt wird, ist es wirtschaftlich und ökologisch sinnvoller, diese direkt zu nutzen.

Brennstoffzellen können Wasserstoff und verwandte Energieträger wie Erdgas oder Methanol direkt in Elektrizität umwandeln. Werden Brennstoffzellen mit Erdgas betrieben, ist die Umweltbilanz jedoch sehr ernüchternd. Dennoch werden in die Brennstoffzelle, die langfristig mit Wasserstoff betrieben werden soll, große Hoffnungen gesetzt.

Auf Brennstoffzellen und Wasserstoffherzeugung wird in Kapitel 10 näher eingegangen.

1.7 Energiewende und Klimaschutz

Die Zunahme des Verbrauchs an fossilen Energieträgern war bisher die Hauptursache für den anthropogenen Treibhauseffekt. Um die negativen Folgen durch die Klimaerwärmung in Grenzen zu halten, ist eine umfangreiche Reduktion der Nutzung der fossilen Energieträger notwendig, wie zuvor erläutert.

Tatsächlich zeichnet sich derzeit jedoch eine andere Entwicklung ab. Ohne einschneidende Änderungen in der Energiepolitik werden die Nutzung fossiler Energieträger und damit auch die CO₂-Emissionen vorerst weiter zunehmen. Dabei ist die viel zitierte Energiewende durchaus möglich. Bis zum Jahr 2040 wäre in Deutschland eine kohlendioxidfreie Energieversorgung noch umsetzbar.

1.7.1 Szenarien für den globalen Klimawandel

Das **Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)** ist eine im Jahr 1988 von der World Meteorological Organisation (WMO) und dem United Nations Environmental Programme (UNEP) ins Leben gerufene wissenschaftliche Institution. Das IPCC genießt international hohes Ansehen und verfasst Berichte, die als Grundlage für politische Beratungen und Entscheidungen dienen. Im Jahr 2007 wurde das IPCC für seine Arbeit mit dem Friedensnobelpreis ausgezeichnet. Das IPCC hat zahlreiche Szenarien für mögliche Entwicklungen in diesem Jahrhundert aufgestellt. Ziel dieser Untersuchungen ist es, den Einfluss auf das Klima und mögliche Folgen aufzuzeigen.

Im Folgenden sind Ergebnisse für fünf Szenarien mit den Bezeichnungen SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 und SSP5-8.5 dargestellt [IPC21]. Bei den Szenarien wurden stark unterschiedliche Entwicklungen bei den Treibhausgasemissionen unterstellt.

- Die **Szenarien SSP5-8.5 und SSP3-7.0** sind **Business-as-usual-Szenarien**. Sie gehen davon aus, dass der Bedarf an fossilen Energieträgern ähnlich stark wie in den letzten Jahrzehnten weiter steigt. Die Kohlendioxidemissionen erhöhen sich darum in diesen Szenarien bis zum Jahr 2100 um den Faktor zwei bis drei (Bild 1.20). Die Emissionen anderer Treibhausgase wie Methan oder Lachgas steigen ebenfalls an.
- Die **Szenarien SSP1-1.9 und SSP1-2.6** sind hingegen **Klimaschutzszenarien** und zielen auf eine Begrenzung der globalen Erwärmung auf weniger als 2 °C. Während beim Szenario SSP1-1.9 sicher die Begrenzung unter 2 °C und wahrscheinlich auch unter 1,5 °C erreicht werden kann, nähert sich das Szenario SSP1-2.6 stark der Zwei-Grad-Marke an. In beiden Szenarien sinken die Treibhausgasemissionen schnell und erreichen in den 2050er- bzw. 2070er-Jahren die Klimaneutralität. Danach wird eine konsequente Einführung der CCS-Technologie unterstellt, also die Abtrennung und sichere Lagerung von Kohlendioxid aus der Atmosphäre, was in Bild 1.23 später noch näher erläutert wird.
- Das Szenario **SSP2-4.5** ist ein mittleres Szenario mit einem Maximum der Kohlendioxidemissionen um das Jahr 2040. Die Klimaneutralität wird in diesem Szenario erst nach dem Jahr 2100 erreicht. Das hat sehr wahrscheinlich einen Anstieg der globalen Erwärmung auf Werte deutlich oberhalb der kritischen Marke von 2 °C zur Folge.

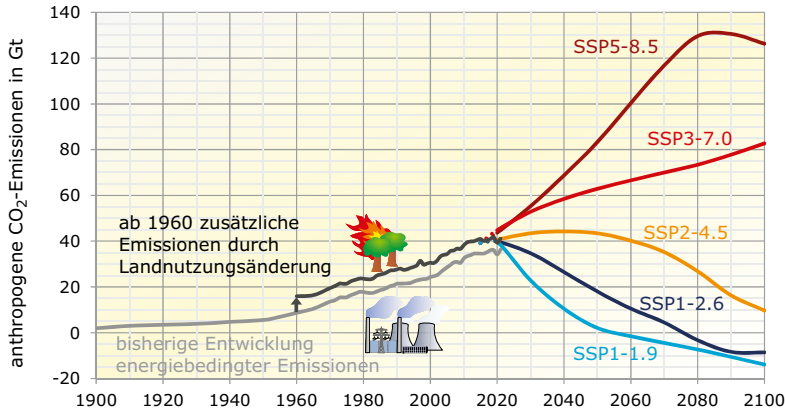


Bild 1.20 Entwicklung der Kohlendioxidemissionen durch Verbrennung fossiler Energieträger und andere Industrieprozesse für verschiedene SSP-Szenarien (Daten: [IPC21])

Die Auswirkungen der Szenarien auf das Klima sind sehr unterschiedlich. Während sich bei den Klimaschutzszenarien SSP1-1.9 und SSP1-2.6 der **Temperaturanstieg** bis 2100 mit hoher Wahrscheinlichkeit auf unter 1,5 °C beziehungsweise 2 °C begrenzen lässt und die Temperatur auch nach 2100 stabil bleibt, steigt diese beim Business-as-usual-Szenario SSP5-8.5 bis 2100 wahrscheinlich um deutlich mehr als 4,5 °C. Der Bereich der Unsicherheit liegt dabei bei über 1 °C. Es wäre demnach sogar ein Temperaturanstieg um 6 °C möglich, wie Bild 1.21 zeigt. Auch nach dem Jahr 2100 klettert die globale Temperatur bei diesem Szenario noch weiter. Bis zum Jahr 2300 sind dann Werte von mehr als 10 °C möglich.

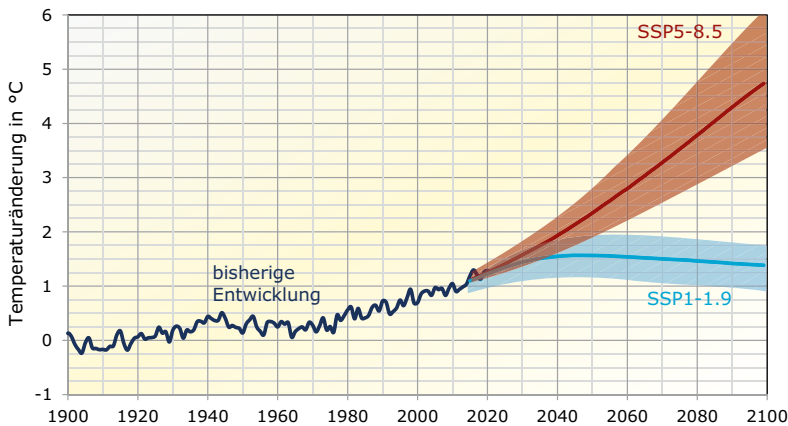


Bild 1.21 Entwicklung der mittleren globalen Oberflächentemperatur im Vergleich zum Mittelwert der Jahre 1850 bis 1900 für die Szenarien SSP1-1.9 und SSP5-8.5 (Daten: [UBA22a, IPC21])