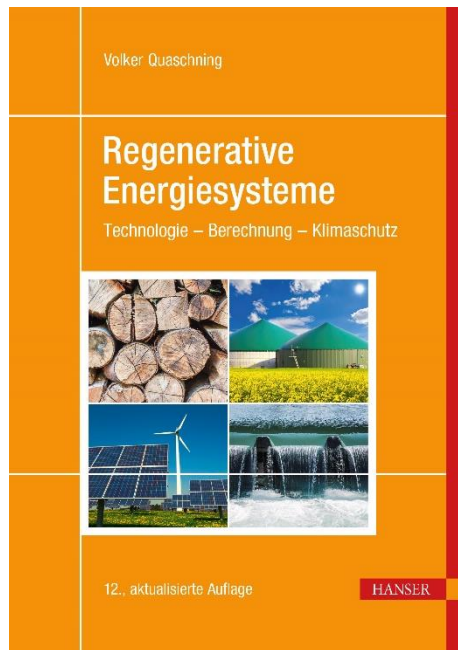


# HANSER



## Leseprobe

zu

## Regenerative Energiesysteme

von Volker Quaschnig

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

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

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446477773>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München



## Vorwort zur ersten Auflage

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

Dieses Fachbuch ist in erster Linie für Studierende, Personen im Forschungsbereich oder andere technisch Interessierte gedacht. Neben der Beschreibung der Technologie von wichtigen erneuerbaren Energiesystemen werden Berechnungs- und Simulationsmöglichkeiten dargestellt. Der Schwerpunkt liegt dabei auf Technologien mit einem großen Entwicklungspotenzial wie Solarthermie, Photovoltaik und Windenergie.

Beschäftigt man sich mit der Thematik der erneuerbaren Energien, ist es nahezu unmöglich, die Fragen der Technik von Problemen der heutigen Energieversorgung und von gesellschaftspolitischen Hintergründen zu trennen. Es muss somit an dieser Stelle immer ein Kompromiss für die Darstellung der Thematik gefunden werden. Für ein Fachbuch mit technischem Schwerpunkt besteht die Verpflichtung, sich sachlich neutral mit den Technologien zu beschäftigen. Der subjektive Einfluss des Autors lässt sich hierbei jedoch niemals vollständig vermeiden. Bereits durch die Themenwahl, die Präsentation von Daten oder gerade die nicht behandelten Themen werden Meinungen geprägt.

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

In Technikerkreisen wird oft die weit verbreitete Meinung geäußert, dass die Technik an sich eigentlich keine negativen Folgen verursachen kann. Nur der Einsatz spezieller Technologien führe zu negativen Effekten. Es ist jedoch der Menschheit gegenüber unverantwortlich, sich für technische Innovationen nur um der Technik Willen zu interessieren. Oftmals sind die Auswirkungen neuer oder auch schon lange bekannter Technologien nur schwer einzuschätzen. Gerade aus diesem Grund besteht für alle, die an der Entwicklung und Nutzung einer Technik beteiligt sind, die Verpflichtung, negative Folgen kritisch einzuschätzen und vor möglichen Schäden rechtzeitig zu warnen. Um dieser Verpflichtung gerecht zu werden, versucht dieses Buch neben einer sachlichen Darstellung der Fakten stets auch auf mögliche schädliche Konsequenzen hinzuweisen.

Nach meiner Erfahrung im Ausbildungsbereich beschäftigt sich ein Großteil der Personen, die ein Interesse für Technologien im Bereich der erneuerbaren Energien zeigen,

bewusst auch mit den Fragen der Folgen herkömmlicher Technologien. Eine Verknüpfung von technischen mit gesellschaftspolitischen Inhalten wird meist ausdrücklich gewünscht. Aus diesem Grund werden in diesem Buch nicht nur Fragen der Technologie, sondern in Kapitel 1 und 11 auch Probleme der Energiewirtschaft bewusst angesprochen. Hierbei wird Wert daraufgelegt, die Aussagen stets mit aktuellem Zahlenmaterial objektiv zu untermauern. Ziel ist es, Aspekte und Fakten zu liefern, mit denen sich die Leserinnen und Leser ihr eigenes Urteil bilden können.

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

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

*Berlin, im Januar 1998*

*Volker Quaschnig*

## Vorwort zur zwölften Auflage

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

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

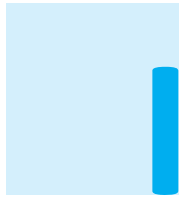
Vorherige Auflagen des Buches wurden bereits in mehrere Sprachen übersetzt. Diese zwölfte Auflage wurde vollständig aktualisiert und um wichtige neue Entwicklungen erweitert.

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

*Berlin, im Juni 2023*

*Prof. Dr. Volker Quaschnig*

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



# Inhaltsverzeichnis

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

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

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

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

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



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

# 1

## 1 Energie und Klimaschutz

### 1.1 Der Begriff Energie

---

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

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

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

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

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

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

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

### Die Leistung

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

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

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

**Tabelle 1.1** Umrechnungsfaktoren zwischen verschiedenen Energieeinheiten

	kJ	kcal	kWh	kg SKE	kg RÖE	m <sup>3</sup> Erdgas
1 Kilojoule (1 kJ = 1000 Ws)	1	0,2388	0,000278	0,000034	0,000024	0,000032
1 Kilocalorie (kcal)	4,1868	1	0,001163	0,000143	0,0001	0,00013
1 Kilowattstunde (kWh)	3 600	860	1	0,123	0,086	0,113
1 kg Steinkohleeinheit (SKE)	29 308	7 000	8,14	1	0,7	0,923
1 kg Rohöleeinheit (RÖE)	41 868	10 000	11,63	1,428	1	1,319
1 m <sup>3</sup> Erdgas	31 736	7 580	8,816	1,083	0,758	1

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

**Tabelle 1.2** Vorsätze und Vorsatzzeichen

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

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

Als Beispiel soll ein Zeitschriftenartikel aus den 1990er-Jahren über ein Solarhaus dienen. Er beschreibt eine Photovoltaikanlage mit einer Gesamtleistung von 2,2 kW. Später im Text beklagte der Autor, dass die damalige Vergütung pro kW bei der Einspeisung in das öffentliche Netz mit 0,087 € äußerst gering war. Den Einheiten nach zu urteilen, wurde die Anlage nach Leistung (Einheit der Leistung = kW) vergütet, das wären für die gesamte Anlage dann  $2,2 \text{ kW} \cdot 0,087 \text{ €/kW} = 0,19 \text{ €}$ . Sicher, Solarstrom wurde lange Zeit schlecht vergütet, doch mit knapp 20 Euro-Cents insgesamt musste sich wohl kein Anlagenbesitzer zufriedengeben. Der Autor hatte an dieser Stelle gemeint, dass die von der Solaranlage in das öffentliche Netz eingespeiste elektrische Energie pro Kilowattstunde (kWh) mit 0,087 € vergütet wurde. Speiste die Anlage in einem Jahr 1980 kWh in das Netz ein, so erhielt der Betreiber mit 172,26 € immerhin das 900fache. Ein Beispiel dafür, dass ein fehlendes kleines „h“ große Unterschiede zur Folge haben kann.

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

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

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

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

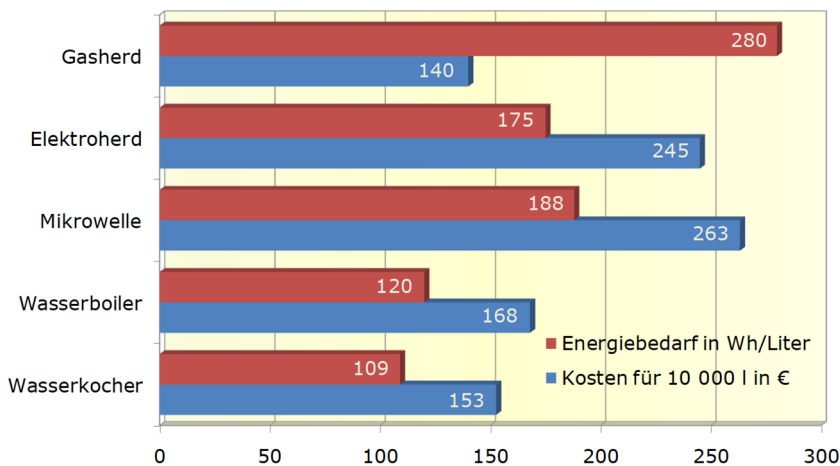
Bei der Umwandlung kann die Energie mit unterschiedlicher Effizienz genutzt werden. Dies soll im Folgenden am Beispiel des Wasserkochens verdeutlicht werden.

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

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

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

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



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

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

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

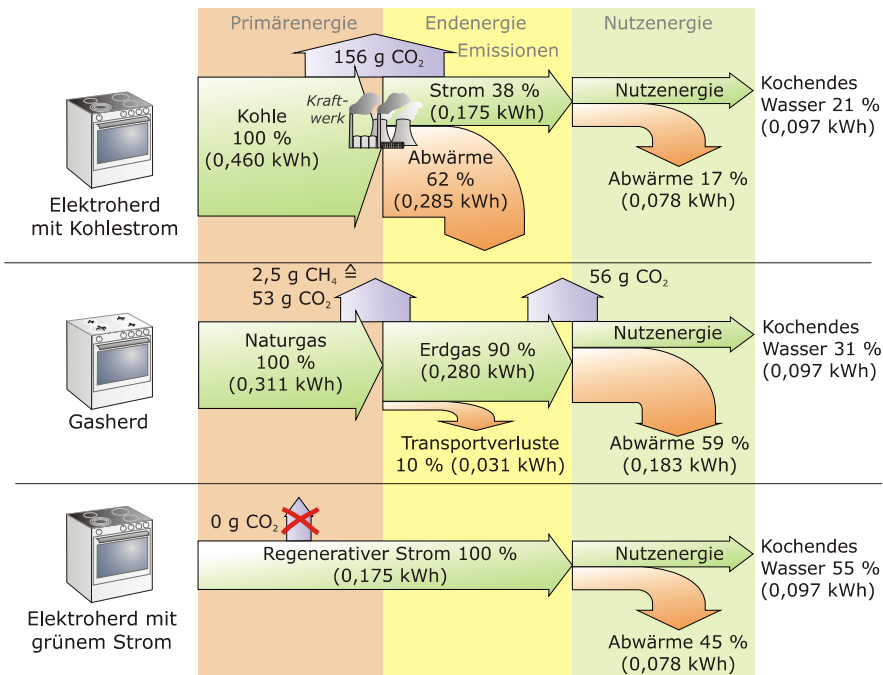
Bei einem durchschnittlichen elektrischen Dampfkraftwerk in Deutschland lag in den 1990er-Jahren der Wirkungsgrad bei ca. 34 % [Hof95]. Bei modernen Kraftwerken ist der Wirkungsgrad geringfügig höher. Rund 60 % der aufgewendeten Energie gehen dennoch als Abwärme verloren, nur rund 40 % stehen als elektrische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

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

**Tabelle 1.3** Die Begriffe Primärenergie, Endenergie und Nutzenergie

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

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



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

Bei der Elektrizität sind dies im Kraftwerk eingesetzte Energieträger wie Kohle. Auch das Erdgas zum Wassererwärmen ist eine Endenergie. Beim Transport des Erdgases zum Verbraucher fallen auch Verluste an, die jedoch im Vergleich zu denen im elektrischen Kraftwerk sehr gering sind. Dadurch liegt der Primärenergiebedarf des Elektroherdes mit

gut 460 Wh = 1656 kJ rund 50 % höher als der des Gasherdes, obwohl der Endenergieverbrauch um über 30 % geringer ist. Die Energiewandlungsketten am Beispiel der Wassererwärmung durch Elektro- und Gasherd sind nochmals in Bild 1.2 vergleichend gegenübergestellt.

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

## 1.2 Entwicklung des Energiebedarfs

### 1.2.1 Entwicklung des Weltenergiebedarfs

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

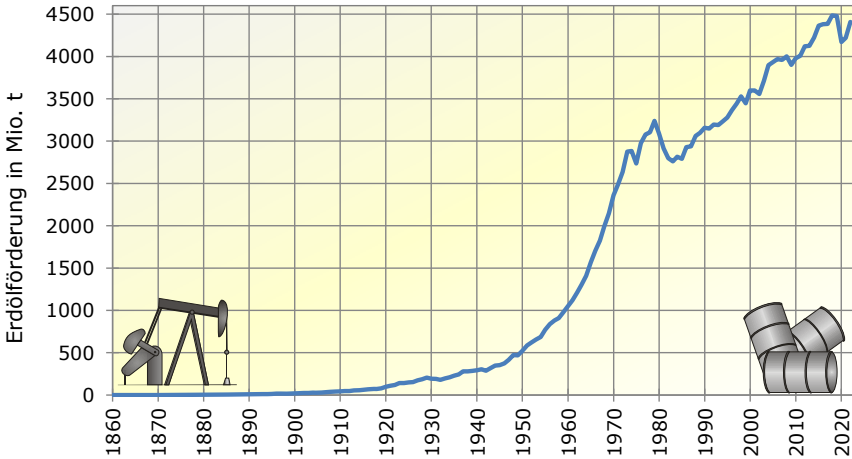
Als 1769 von James Watt eine brauchbare Dampfmaschine entwickelt wurde, war damit der Grundstein für die Industrialisierung gelegt. Die Dampfmaschine und später die Verbrennungsmotoren lösten Wind- und Wasserräder allmählich ab. Als wichtigste Energieträger konnten sich Kohle und Anfang des 20. Jahrhunderts,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

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

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

Tabelle 1.4 zeigt den **Weltprimärenergieverbrauch** nach unterschiedlichen Energieträgern für verschiedene Jahre. Hierbei ist zu beachten, dass bei Energiestatistiken für Primärelektrizität wie Wasserkraft und Kernenergie nicht selten andere Bewertungsmaßstäbe angelegt werden. Meist wird die elektrische Energie eines Kernkraftwerkes in den Statistiken mit einem Wirkungsgrad von 33 bis 38 % gewichtet. Dadurch soll in Analogie

zur Energiewandlung in fossilen Kraftwerken dem dortigen Wirkungsgrad Rechnung getragen werden. Wird bei einem Vergleich von Kernenergie und Wasserkraft dieser Faktor bei der Wasserkraft nicht berücksichtigt, entsteht der Eindruck, dass der Anteil der Kernenergie zur Deckung des weltweiten Strombedarfs deutlich größer als der Anteil der Wasserkraft ist, obwohl in Wahrheit der Anteil der Wasserkraft etwas höher ist.



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

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

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

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

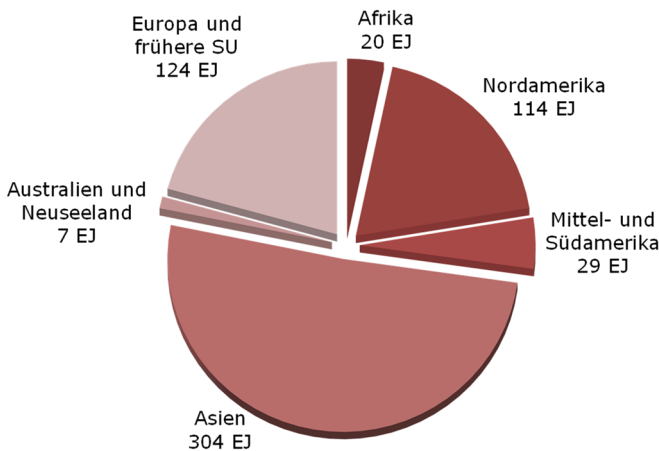
1) Braunkohle, Steinkohle u. a. 2) Erdölprodukte 3) mit Wirkungsgrad von 38 % gewichtet 4) nur Elektrizität

Der Energiebedarf der Welt wird in den nächsten Jahren weiterhin stark zunehmen. Während der Energieverbrauch der Industrieländer langsamer wächst, gibt es in vielen Schwellenländern mit hohem Wirtschaftswachstum einen großen Nachholbedarf. Außerdem wird die Weltbevölkerung in den nächsten Jahrzehnten stark ansteigen. Ein Anstieg



des Energiebedarfs bis Ende des Jahrhunderts um den Faktor 3 bis 5 ist daher durchaus realistisch. Hierdurch werden sich die Probleme der heutigen Energieversorgung sowie die Folgen des Treibhauseffekts um diesen Faktor verstärken, und die Vorräte an fossilen Brennstoffen werden noch schneller zur Neige gehen.

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



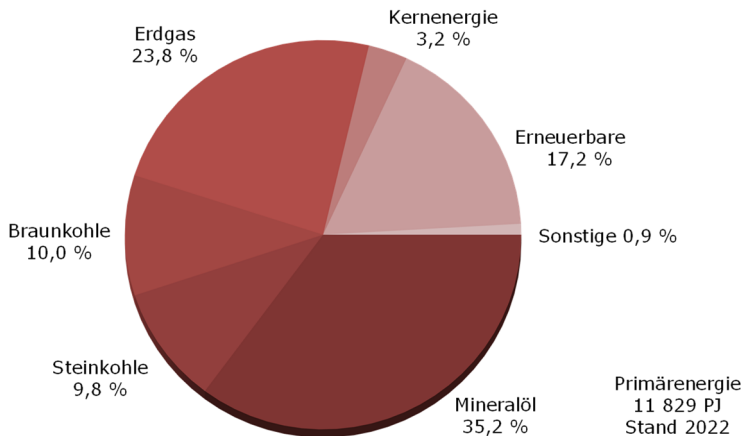
**Bild 1.4** Primärenergieverbrauch der Welt nach Regionen im Jahr 2021 (Daten: [BP22])

## 1.2.2 Entwicklung des Energiebedarfs in Deutschland

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

Seit Anfang der 1980er-Jahre haben sich jedoch einige Details grundlegend geändert. Der Energieverbrauch stagnierte trotz anhaltenden Wirtschaftswachstums auf hohem Niveau, und es setzte sich die Erkenntnis durch, dass Energieverbrauch und 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.

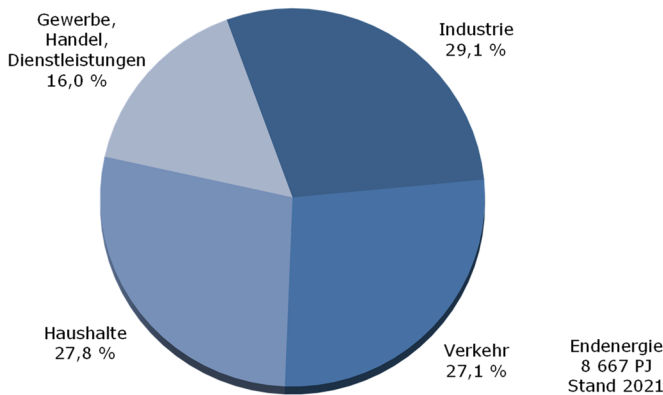


**Bild 1.5** Anteile verschiedener Energieträger am Primärenergieverbrauch in Deutschland im Jahr 2022 (Daten: [AGEB22])

Nach dem Fall der Mauer und durch die Wiedervereinigung wurden große Wirtschaftsbe-  
reiche in Ostdeutschland stillgelegt. Hierdurch kam es zu einem Sinken des Gesamtenergie-  
verbrauchs in Deutschland, der andernfalls weiter gestiegen wäre. Vor allem der Ab-  
bau von Braunkohle wurde stark reduziert, aber auch die Steinkohle geriet aufgrund der  
hohen Kosten stark unter Druck. Gewinner der Verlagerung des Energiebedarfs auf  
andere Energieträger waren Erdgas und erneuerbare Energieträger wie Wind- und Son-  
nenenergie sowie Biomasse. Der Trend zur verstärkten Verwendung von Erdgas wurde  
im Jahr 2021 allerdings durch die extrem gestiegenen Gaspreise wieder unterbrochen.

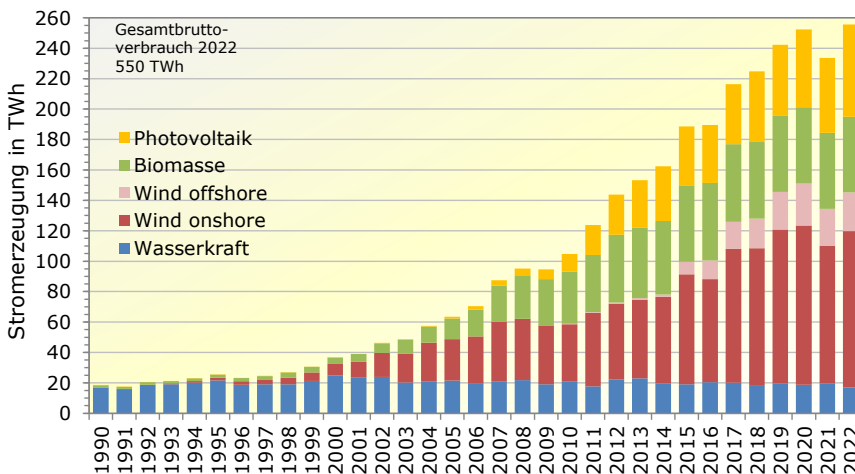
Derzeit ist die Energieversorgung in Deutschland noch sehr stark auf die Nutzung fossiler  
Energieträger ausgerichtet. Im Wärmebereich dominieren Erdgas und Heizöl, im Ver-  
kehrssektor Erdöl und bei der Stromerzeugung die Kohlekraft. Mit rund 79 % deckten  
fossile Energieträger im Jahr 2022 immer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

erobert. Doch mit 17 % war der Anteil erneuerbarer Energien im Jahr 2022 trotz der Bemühungen vieler Jahre für die Energiewende noch relativ gering. Soll für einen erfolgreichen Klimaschutz der Ausstoß an Klimagasen durch die Verbrennung fossiler Energieträger möglichst noch vor dem Jahr 2040 vollständig vermieden werden, muss das Tempo der Energiewende deutlich ansteigen. Bislang hat aber keine Regierung den Mut gefunden, die dafür nötigen Maßnahmen zu planen, geschweige denn einzuleiten.



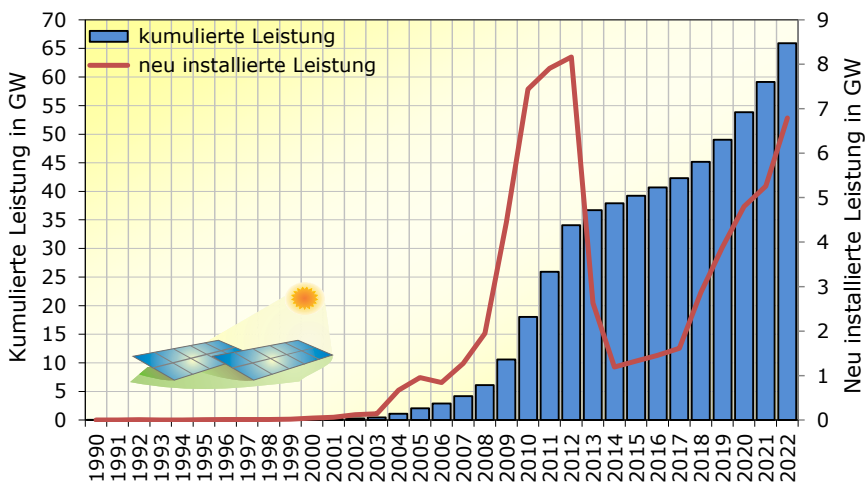
**Bild 1.6** Anteile verschiedener Sektoren am Endenergieverbrauch in Deutschland im Jahr 2021 (Daten: [AGEB22])

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



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

Der Ausbau regenerativer Energien zur Stromerzeugung der letzten Jahre führt uns vor Augen, welche Widerstände für eine erfolgreiche Energiewende noch zu überwinden sind. Bild 1.7 zeigt, dass es bei den erneuerbaren Energien ein beachtliches Wachstum gegeben hat. Während im Jahr 1990 mit Ausnahme der Wasserkraft erneuerbare Energien bei der Stromerzeugung in Deutschland keine Rolle spielten, hat der Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch im Jahr 2022 bereits 47 % erreicht. Dies hat zu einem massiven Verdrängungswettbewerb mit den fossilen Kraftwerken geführt. Darum haben die großen Stromversorger und andere Interessengruppen großen Druck auf die Politik ausgeübt, den Ausbau erneuerbarer Energien stark zu verlangsamen. In der Folge wurde der Photovoltaikzubau zwischen 2012 und 2015 auf ein Fünftel reduziert (Bild 1.8). Als Folge gingen rund 80 000 Arbeitsplätze in der deutschen Solarbranche verloren (Bild 1.35). Seit 2017 steigt der Solarenergiezubau infolge der stark gesunkenen Solarmodulpreise wieder spürbar an. Auch in der Windbranche kam es im Jahr 2018 durch Eingriffe der Politik zu einem massiven Rückgang bei den Zubauzahlen. Es ist dringend nötig und durch den öffentlichen Druck der Klimaschutzbewegung inzwischen auch zu erwarten, dass der Ausbau erneuerbarer Energien kurz und mittelfristig erheblich gesteigert wird, damit Deutschland seine Klimaschutzziele erreichen kann.



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

### 1.3 Reichweite konventioneller Energieträger

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

1 t U = 5 · 10<sup>14</sup> J



## Sachwortverzeichnis

### A

- Abfluss 355
- Abregelverluste 286
- Abschattung 96, 100, 229
- Abschattungsgrad
  - diffuser 99, 100
  - direkter 99
- Abschattungsverluste 102
- Abschattungswinkel 102
- Absorber 133, 163, 185
  - Beschichtung 133, 163
  - Fläche 115
  - Rohr 171
  - selektiver 134
  - Temperatur 163
- Absorption der Atmosphäre 77
- Absorptionsgrad 129, 168
- Absorptionskoeffizient 204
- Absorptions-Wärmepumpe 384
- Abzinsung 438
- Adsorptions-Wärmepumpe 385
- AFC (alkalische Brennstoffzelle) 423
- Ah-Wirkungsgrad 246
- Air Mass 78
- Akkumulator 244
  - am Solargenerator 255
  - Arten 244
  - Autarkiegrade 290
  - Blei 245
  - Daten 244
  - Eigenverbrauchsanteile 289
  - Kapazität 247
  - Lithium-Ionen 244, 249
  - NaNiCl 253
  - NaS 244, 253
  - Natrium-Ionen 244
  - NiMH 244, 253
  - Systeme 254, 270, 271
- Akzeptor 200
- Albedo 93
- alkalische Brennstoffzelle 423
- alkalische Elektrolyse 410
- Alphateilchen 73
- Alterungszustand
  - Batterie 252
- AM (Air Mass) 78
- Ammoniak 415
- Andasol 184, 430
- Anlagenkonzepte für Windkraftanlagen 339
- Anlaufwindgeschwindigkeit 314
- Annuitätsfaktor 439
- Anströmgeschwindigkeit 307
- Anströmwinkel 307
- Antireflexionsschicht 207
- Arbeitsplätze 67
- Arbeitspunkt 236, 255
- Asynchrongenerator 339, 345
- Asynchronmaschine 332
- Atomkraft *siehe* Kernenergie
- aufgeständerte Solaranlagen 101
- Auftriebsbeiwert 306, 307
- Auftriebskraft 306
- Auftriebsläufer 306
- Aufwindkraftwerk 158
- Ausbauabfluss 355
- Ausbaufallhöhe 355
- Auslegungswindgeschwindigkeit 314
- äußerer Photoeffekt 195
- Ausstrahlung, spezifische 74
- Autarkie 273, 284
- Autarkiegrad 284, 289, 290
- Azimutantrieb 317

### B

- B2-Brückenschaltung 259, 262
- B6-Brückenschaltung 262
- Bandabstand 196, 224
  - verschiedener Halbleiter 197
- Bändermodell 196
- Batterie *siehe* Akkumulator
- Batteriekapazität 277
- Batteriemanagementsystem 249

Batteriespeichersysteme 272  
Beaufort-Skala 297  
Beihilfen 447  
Beschichtung, selektive 133  
Bestrahlung 72  
Bestrahlungsstärke 72, 75  
    diffuse 84, 91  
    direkte 84, 91  
    geneigte Ebene 90  
    horizontale 83  
    Messung 105, 107  
    Tagesgänge 80  
Betonkugelspeicher 361  
Betriebskosten 428  
Betz'scher Leistungsbeiwert 303  
Beweglichkeit 198  
Bioalkohole 399  
Biodiesel 399  
Bioenergieträger  
    feste 394  
    flüssige 398  
    gasförmige 401  
Bioethanol 399  
Biogas 402, 414  
Biokraftstoffträge 404  
Biomasse 392  
    Heizungen 404  
    Kraftwerke 407  
    Potenziale 393  
    Produktion 44  
    Vorkommen 392  
Biomass-to-Liquid 400  
blauer Wasserstoff 410  
Bleiakkumulator 245  
    Betriebszustände 248  
    Ladezustand 247  
Blindleistung 323, 327  
Blindleistungskompensation 341  
Blindwiderstand 323  
Blockingdiode 254, 256  
BMS (Batteriemanagementsystem) 249  
Bodenreflexion 92  
Bohr'sches Atommodell 194  
Bohrturm 375  
Boltzmann-Konstante 198  
Bor 200  
Braunkohle 67  
Brennstoffzelle 45, 421  
Brückenschaltung 259  
Bruttostromerzeugung 60  
Bruttostromverbrauch 54  
BtL-Brennstoffe 400  
Bulb-Turbine 365  
Bypassdioden 230

**C**

C4-Pflanzen 393  
Cadmiumtellurid 197, 212  
CAPEX 428  
Carnot-Prozess 175  
CCS (Carbon Dioxide Capture and Storage) 49  
CCS (Direct Air Capture) 49  
CEC-Wirkungsgrad 266  
Cermet 134  
CIS-Solarzelle 212  
Clausius-Rankine-Prozess 175  
COP (Coefficient of Performance) 386  
Coulomb-Kraft 194  
C-Rate 250  
CVD (Chemical Vapor Deposition) 205

**D**

dachintegrierte Photovoltaikanlage 193  
Dampfkraftwerke 175  
Dampfpreformierung 410  
dänisches Konzept 339  
Darrieus-Rotor 311  
Deckungsgrad, solarer 153  
Defektelektroden 198  
Deklination 87  
DHÜ 190  
Dichte der Luft 302  
Dielektrizitätskonstante 194  
Differenzierung der Globalstrahlung 85  
diffuser Abschattungsgrad 100  
diffuser Strahlungsanteil 86  
Diffusionsspannung 200  
Diffusstrahlung 84, 91  
Diode 215  
Diodendurchbruch 219  
Diodenfaktor 215, 227  
Diodensättigungsstrom 227  
direkter Abschattungsgrad 99  
Direktmethanol-Brennstoffzelle 424  
Direktstrahlung 84, 90  
Dish-Stirling-Anlagen 187  
Distickstoffoxid 27  
Divergenz 162  
DMFC (Direktmethanol-Brennstoffzelle) 424  
DOD (Depth of Discharge) 250  
Donator 199  
doppelte Abdeckung 130  
dreieckiges Silizium 205  
Drehfeld 324, 325  
Drehmoment 308  
    Asynchronmaschine 337  
    Synchronmaschine 331  
Drehstrommaschinen 320  
Drehstromwicklung 325

Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie 337  
 Dreieckschaltung 326  
 Druck-Receiver 186  
 Dünnschichtzellen 210  
 Durchström-Turbine 365

## E

EEG (Erneuerbare-Energien-Gesetz) 294, 441, 448  
 Effektivwert 321  
 EFG-Verfahren 206  
 E-Fuels 419  
 Eigenleitung 198  
 Eigenverbrauchsanteil 282, 288, 290  
 Eigenverbrauchssysteme 269, 281  
 Einbauwinkel 307  
 Einblattrotoren 312  
 Eindiodenmodell 216  
 Einfallswinkel 89, 167  
 Einfallswinkelkorrekturfaktor 139, 168  
 Einkreissystem 118  
 Eintakt-Sperrwandler 241  
 elektrische Feldkonstante 194  
 elektrische Leitfähigkeit 199  
 elektrische Maschinen 320  
 elektrische Wechselstromrechnung 321  
 elektrischer Widerstand 236  
 Elektrizitätsversorgung 60  
 Elektroherd 16  
 Elektrolumineszenz 214  
 Elektrolyse 65, 410  
 Elektrolyt 245, 248, 423  
 Elektromobilität 58  
 Elektronendichte 198, 199  
 Elektronenmasse 194  
 elektrotechnische Größen 193  
 Elementarladung 194  
 Elevation 86  
 Emissionsgrad 129, 150  
 empfehlenswerte Rohrdurchmesser 142  
 Empfindlichkeit, spektrale 203  
 Endenergie 17  
 Endenergieverbrauch 22, 55  
 Endverluste 167  
 Energie
 

- Betonkugelspeicher 362
- Einheiten 14
- Elektron 195
- Energieerhaltungssatz 15
- Gestehungskosten 429, 439
- Importe 446
- kinetische 302
- Lageenergiespeicher 362
- Photon 195
- Preise 445
- Pumpspeicherkraftwerke 357
- Wind 302

Energiebänder 195  
 Energiebedarf
 

- Deutschland 20
- Entwicklung 18
- Entwicklung weltweit 46
- Welt 18
- zukünftiger 46

 Energiewende 52  
 Energiezustände 196  
 ENS 265  
 enthalpische Zellspannung 425  
 Entladerate 250  
 Entladestrom 248  
 Entladetiefe 247, 250  
 Entropie 177  
 Erde
 

- Bestrahlungsstärke 75
- Daten 73
- Primärenergieverbrauch 19

 Erdgas 61, 414, 415, 436  
 Erdgasspeicher 65, 417  
 Erdkern 372  
 Erdkollektor 391  
 Erdöl 19, 436, 445  
 Erdsonden 390  
 Erdwärmekollektor 391  
 Erfahrungskurve 442  
 Erfahrungswert 443  
 Erneuerbare-Energien-Gesetz 294, 441, 448  
 Erregerstrom 329  
 Erregerwicklung 328  
 Ersatzschaltbild
 

- Asynchronmaschine 335
- Asynchronmaschine, vereinfachtes 336
- Solarzelle, vereinfachtes 216
- Solarzelle, Zweiodenmodell 219
- Synchronmaschine 330

 Ethanol 399  
 Euro-Wirkungsgrad 265  
 EVA (Ethylen-Vinyl-Acetat) 210  
 EVA-Vernetzungsanalyse 214  
 externe Kosten 446, 451  
 externer Quantenwirkungsgrad 202

## F

FAME (Fettsäuremethylester) 399  
 Farbstoffzellen 212  
 Farbtöne 76  
 Feldeffekttransistor 256, 258  
 Feldstärke, magnetische 324  
 feste Bioenergieträger 394  
 Festkörperakkumulator 252  
 Festmeter 396  
 Feststoffbatterie 252  
 Fettsäuremethylester 399  
 Fischer-Tropsch-Synthese 401  
 Flächennutzungsgrad 101



Flachkollektor 128  
  Absorber 133  
  Frontscheibe 129  
  Kollektorgehäuse 130  
Flasher 110  
Flicker 347  
Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) 27  
Flusssdichte, magnetische 324  
flüssige Bioenergieträger 398  
Flüssigerdgas 412  
Flüssigerdgasterminals 412  
Flüssigwasserstoff 412  
Forschung und Entwicklung 449  
Fotovoltaik *siehe* Photovoltaik  
Fourier-Analyse 259  
Francis-Turbine 365  
Freileitungen 189  
Fresnelkollektor 164  
Frischwasserstation 120  
Frontscheibe 129  
Fukushima 34  
Füllfaktor 222  
Füllgrad 250

## G

Gallium-Arsenit 197  
gasförmige Bioenergieträger 401  
Gasherd 16  
Gaskraftwerke 61  
Gasturbine 178  
Gasungsspannung 248  
Generator 320  
geostrophischer Wind 301  
Geothermie 37, 372  
  Kosten 434  
geothermische Heizwerke 376  
geothermische Kraftwerke 377  
Gesamtkosten 428  
Geschichte der Photovoltaik 192  
Geschichte der Windkraft 294  
gespeicherte Wärme 144  
Getriebe 318  
getriebelose Windkraftanlage 344  
Gezeitenkraftwerke 37, 368  
Gibbs'sches Potenzial 425  
Giermotor 317  
Gierwinkel 317  
Gleichdruckturbine 363  
Gleichspannungswandler 237  
Gleitzahl 307  
globale Bestrahlung 81  
globale Zirkulation 296  
Gondel 318  
grauer Wasserstoff 410  
Grenzschichtprofil 300, 301  
Gridparity 281, 443  
grüner Wasserstoff 410

Gütegrad 386

## H

H5-Schaltung 263  
Hadley-Zelle 295  
Halbleiter 196  
  direkt 204  
  indirekt 204  
  n-leitend 200  
  p-leitend 200  
Halbleitersensor 106  
harmonische Analyse 259  
Harrisburg 34  
Häufigkeitsverteilung 297  
H-Brückenschaltung 259  
Heat Pipe 131  
Heizwert  
  Biomasse 393  
  Holz 395, 396  
Heliostatenfelder 174  
Hellmann, Potenzansatz 301  
HERIC-Schaltung 263  
Heterojunction 209  
Heteroübergang 209  
HGÜ 190  
High-Flow-Prinzip 119  
Himmelsklarheit 92  
Himmelstemperatur 150  
HIT-Zelle 209, 223, 225, 234  
Hochsetzsteller 240, 264  
Höchstspannungs-Gleichstrom-Übertragung 190  
Holzbriketts 395  
Holzfeuchte 395  
Holzhackschnitzel 397  
Holzpellets 395, 397  
  Preise 436  
Horizonthelligkeitsindex 92  
Hot-Dry-Rock-Verfahren 375  
Hot-Spots 230  
H-Rotor 311

## I

IAM *siehe* Einfallswinkelkorrekturfaktor  
Importe fossiler Energieträger 446  
innerer Photoeffekt 197  
Inselnetzwechselrichter 264  
Intergovernmental Panel on Climate Change 46  
internationaler Klimaschutz 68  
interner Quantenwirkungsgrad 202  
intrinsische Trägerdichte 198  
invertierender Wandler 241  
Investitionskosten 428  
Ionisationsenergie 195, 199  
IPCC 46  
ISCCS-Kraftwerk 183  
Isolator 196  
Itaipu-Kraftwerk 356, 434

**J**

Jahresarbeitszahl 57, 386  
 Jahresdauerlinie 352  
 JAZ (Jahresarbeitszahl) 386  
 Joule-Prozess 178

**K**

Käfigläufer 333  
 Kalina-Prozess 378  
 Kapazität (Akkumulator) 247  
 Kapitalvermehrung 453  
 Kapitalwert 438  
 Kaplan-Turbine 364  
 Karbonatschmelzen-Brennstoffzelle 424  
 Kavernenspeicher 418  
 Kernenergie 31, 62
 

- Anteil am Endenergieverbrauch 62
- Anteil an der Stromerzeugung 33
- Entwicklungskosten 449
- Kernfusion 35
- Kernspaltung 31
- Unfälle 34, 450
- Uranvorkommen 24, 33

 Kernfusion 35, 73  
 kinetische Energie 302  
 Kippmoment 332, 338  
 Kippschlupf 338  
 Kissengas 418  
 Klimaschutzabkommen von Paris 30  
 Klimaschutzvorgaben 31  
 Klimaveränderungen 29  
 Klirrfaktor 261  
 Kloss'sche Formel 338  
 Klucher-Modell 91  
 Kobalt 250  
 Kohleausstieg 61  
 Kohlekommission 61  
 Kohlendioxid 26, 410
 

- Emissionen 47, 53
- Konzentration 26, 49
- spezifische Emissionsfaktoren 51

 Kohlepfeffig 447  
 Kollektor 125, 165
 

- Austrittstemperatur 141
- Durchfluss 140
- Durchsatz 140
- Endverluste 167
- Fläche, pro-Kopf 39
- Nutzleistung 135, 167
- Stillstandstemperatur 137, 163
- Wirkungsgrad 135, 136, 170

 Kollektorkreisnutzungsgrad 154  
 Kollektorwirkungsgradfaktor 136  
 komplexe Wechselstromrechnung 322  
 Kompressions-Wärmepumpe 381  
 Konvektion 129, 131, 135, 150  
 Konversionsfaktor 136

Konzentrationsfaktor 162  
 Konzentratormodul 213  
 konzentrierende Kollektoren 164  
 konzentrierende Solarthermie 161  
 konzentrierende solarthermische Anlagen 179  
 Kosten
 

- externe 446, 451
- Forschung und Entwicklung 449
- Geothermie 434
- Holzpelletsheizung 436
- konventionelle Energiesysteme 444
- Photovoltaik 431, 440
- solarthermische Kraftwerke 430, 440
- solarthermische Wassererwärmung 429, 440
- Wärmepumpe 435
- Wasserkraft 434
- Windkraft 433, 441

 Kostensenkungen 442  
 Kreisfrequenz 321  
 Kreisfrequenz, Elektron 194  
 Kristallgitter 198  
 künstliche Sonne 110  
 Kupfer-Indium-Diselenid 212  
 Kupferrohre 142  
 Kurzschlussstrom 221  
 Kværner-Verfahren 410

**L**

Laderegler 255  
 Ladewirkungsgrad 246  
 Ladezustandsbilanzierung 278  
 Lageenergiespeicher 362  
 Lagerraumvolumen 406  
 Laminieren 210  
 Längenausdehnung 171  
 Längsregler 256  
 Laser Grooved Buried Contact 208  
 Latentwärmespeicherung 146  
 Läufer 328, 333  
 Laufwasserkraftwerke 354  
 Lee 300  
 Leeläufer 317  
 Leerlaufspannung 221, 225, 235, 426  
 Legionellen 120  
 Leistung 14, 302, 323, 346
 

- Pumpspeicherkraftwerk 358
- Turbine 368
- Wasser 354
- Wasserkraftwerk 355
- Wind 302

 Leistungsbeiwert 303, 309
 

- Approximation 309
- nach Betz 303
- Schalenkreuzanemometer 305
- Widerstandsläufer 306

 Leistungsdichte des Windes 294  
 Leistungsfaktor 323

Leistungstransistoren 258  
Leistungszahl 386  
Leiter 196  
Leitfähigkeit 196, 199  
Leitungen 140, 254  
Leitungsaufheizverluste 143  
Leitungsband 196  
Leitungsverluste 254  
Leuchtdichte 72  
LGBC (Laser Grooved Buried Contact) 208  
LH2 412  
lichttechnische Größen 72  
Light-Trapping 204, 208  
Linienkollektoren 165  
Linienkonzentratoren 164  
Lithiumeisenphosphat 249  
Lithium-Ionen-Akkumulator 244, 249  
LNG 412  
Löcherdichte 198, 200  
logarithmisches Grenzschichtprofil 300  
LOHC 416  
Low-Flow-Prinzip 119  
Luftmassenstrom 302  
Luftspaltleistung 337  
Luftverschmutzung 450  
Luv 300  
Luvläufer 317

## M

magnetische Feldkonstante 324  
magnetische Feldstärke 324  
magnetische Induktion 324  
Maschinen, elektrische 320  
Massendefekt 32  
Massenstrom 141, 302  
Master-Slave-Wechselrichter 268  
maximale Konzentration 162  
maximaler Solarzellenwirkungsgrad 201, 212  
Maximum Power Point 221  
MCFC (Karbonatschmelzen-Brennstoffzelle) 424  
Meeresspiegelanstieg 29, 48  
Meeresströmungskraftwerke 369  
Mehrspeichersysteme 121  
Membran-Brennstoffzelle 424  
Methan 27, 414, 415  
Methanisierung 65  
Methanol 415  
Methanpyrolyse 410  
Mie-Streuung 77  
mikrokristalline Solarzelle 212  
mikromorphe Solarzelle 212  
mittlere Ortszeit 87  
Modultests 213  
Modulwechselrichter 269  
Momentanleistung 323  
Momentenbeiwert 308  
MOSFET 256, 258

MPP (Maximum Power Point) 221  
  Regelung 242  
  Tracker 242, 255  
MPP-Anpassungswirkungsgrad 263

## N

Nachführung 93  
Nachführungswinkel 171  
NaNiCl-Akkumulator 253  
NA-Schutz 265  
Natrium-Ionen-Akkumulator 244  
Natrium-Schwefel-Akkumulator 244, 253  
n-Dotierung 200  
Neigung 93, 94, 167  
Neigungsgewinne 95  
Nennwindgeschwindigkeit 314  
Netzanschluss 347  
Netzbetrieb 346  
Netzfrequenz 326  
Netzparität 443  
Nevada Solar One 184, 430  
Newton-Verfahren 218  
Nickel-Cadmium-Akkumulator 253  
Nickel-Metall-Hydrid-Akkumulator 244, 253  
Niederspannungsrichtlinie 264  
Niedertemperaturspeicher 146  
Niedertemperaturwärme 44  
Nuklidmassen 74  
Nutzenergie 17

## O

Oberfläche, Kugelkappe 148  
Oberflächenpassivierung 208  
Oberflächentexturierung 208  
Oberschwingungen 260  
offene Gasturbine 178  
offener Receiver 185  
Öffnungswinkel der Sonne 162  
Oil Parity 444  
Ölkrise 18  
Ölparität 444  
Ölpreise 436, 445  
OPEX 428  
optischer Wirkungsgrad 136, 168  
ORC-Prozess 379  
Ortszeit 87  
Ossannakreis 336  
Ossberger-Turbine 365  
Ost-West-Ausrichtung 105  
oxidkeramische Brennstoffzelle 424  
Ozon 27

## P

PAFC (Phosphorsäure-Brennstoffzelle) 424  
Parabolrinnenkraftwerke 179  
Parabolschüssel 174  
Parallelregler 256

- Parallelschaltung von Solarzellen 234  
 Parallelwiderstand 216, 227  
 Pariser Klimaschutzabkommen 30  
 partielle Oxidation 410  
 Passatwind 295  
 Passivierung 208  
 p-Dotierung 200  
 Pellets 397  
 Pelletslagerraum 406  
 Pelton-Turbine 365  
 PEM (Membran-Brennstoffzelle) 424  
 PERC-Solarzelle 208  
 Perez-Modell 91  
 Performance Ratio 280  
 Permanentmagnete 344  
 Perowskit-Solarzelle 213  
 petrothermale Geothermie 380  
 Pfaffenhofen, Heizkraftwerk 407  
 Pflanzenöl 398  
 Phasenwinkel 321  
 Phosphor 199  
 Phosphorsäure-Brennstoffzelle 424  
 Photoeffekt 195  
   äußerer 195  
   innerer 197  
 Photostrom 203, 215, 224  
 Photovoltaik 40, 192  
   Energiewende 63  
   Kosten 431, 440  
 Photovoltaiksystem  
   AC-gekoppeltes Batteriesystem 270  
   Batteriespeicher und Wärmepumpe 274  
   DC-gekoppeltes Batteriesystem 271  
   Generator-gekoppeltes Batteriesystem 271  
   Inselnetzsystem mit Batteriespeicher 256  
   thermische Nutzung 274  
 Photovoltaiksystem  
   Wasserstoffspeicherung 273  
 PID (Potenzialinduzierte Degradation) 264  
 Pitch-Regelung 307, 316  
 Pitchwinkel 307  
 Planck'sches Spektrum 77  
 Planck'sches Wirkungsquantum 194  
 Planetenenergie 37  
 Plutonium 33  
 pn-Übergang 200  
 Polpaarzahl 326  
 Polradspannung 329  
 Polradwinkel 329  
 Polteilung 326  
 polumschaltbare Generatoren 341  
 Porenspeicher 418  
 Potenzansatz nach Hellmann 301  
 Potenziale  
   Photovoltaik 40  
   solarthermische Kraftwerke 39  
   Windkraft 43  
 Power-to-Gas 57, 64, 410, 417  
 Preisindex 428  
 Preissteigerungsrate 428  
 Primärenergie 17  
 Primärenergieverbrauch 19  
   Deutschland 21  
 Progress Ratio 442  
 Pulsweitenmodulation 262  
 Pumparbeit 359, 360  
 Pumpe 115, 118  
 Pumpspeicherkraftwerke 357  
 Punkt maximaler Leistung 221  
 Punktkonzentratoren 165, 174  
 PVC 133  
 p-V-Diagramm 176  
 PWM (Pulsweitenmodulation) 262  
 Pyranometer 105  
 Pyrheliometer 107
- Q**
- Quantenwirkungsgrad 202
- R**
- Rankine-Prozess 175  
 Rapsölmethylester 399  
 Rauigkeitslänge 301  
 Raumladungszone 200, 201  
 Raummeter 396  
 Rayleigh-Streuung 77  
 Rayleigh-Verteilung 299  
 Receiver 161, 185  
 Rechteckwechsellrichter 259  
 Reflexionsgrad 129, 168  
 Regelung  
   MPP (Maximum Power Point) 242  
   Pitch 307, 316  
   Stall 315  
 Reichweite  
   Erdgas 24  
   Erdöl 24  
   fossile Energieträger 24  
   Kohle 24  
   Uran 24  
 Reihenabstand, optimaler 101  
 Reihenschaltung von Solarzellen 227  
 Reihenverschattungen 172  
 relative Luftfeuchte 151  
 relative spektrale Empfindlichkeit 203  
 Reserven fossiler Energieträger 24  
 Resonanzwechsellrichter 259  
 reversible Zellspannung 425  
 Rheinfelden 352, 434  
 RME (Rapsölmethylester) 399  
 Rohöleinheit 14  
 Rohölpreise 445  
 Rohrdurchmesser 141  
 Rohrleitungen 140  
 Rohr-Turbine 364

Rotorblattzahl 312  
Rückflussdiode 254  
Rückseitenkontaktzellen 208  
rückseitige Wärmedämmung 130  
Rundholz 395

## S

Sabatier-Prozess 416  
Sahara 82  
saisonaler Speicher 122  
Salzkavernen 414  
Sanftanlaufschaltung 339  
Sättigungsdampfdruck 150  
Sättigungsstrom 215, 224  
Säuredichte 247  
Savonius-Rotor 310  
Schalenkreuzanemometer 305  
Schattenball 107  
schattentolerante Module 230  
Scheinleistung 323, 327  
Scheitholz 395  
Scheitholzkessel 405  
Schenkelpolläufer 328  
Schichtenspeicher 120, 122  
Schleifringläufer 333  
Schlupf 333, 340  
schmutziges Silizium 205  
Schnelllaufzahl 305, 307, 314  
Schüttraummeter 396  
Schwarzchrom 134  
Schwefelhexafluorid 27  
Schwerkraftsystem 117  
Schwimmbadabdeckung 151  
Schwimmbadabsorber 133  
Schwimmbadbeheizung 114  
Schwimmbecken 149  
Sechspuls-Brückenschaltung 262  
SEGS-Parabolrinnenkraftwerke 180  
Sektorkopplung 61  
Selbstentladung 246  
selektive Beschichtung 133, 163  
Serienregler 256  
Serienwiderstand 216, 227  
Shottkydiode 254  
Shuntregler 256  
Siemens-Verfahren 205  
Silan-Prozess 205  
Silizium 197, 204  
    Abkürzungen 205  
    amorphes 211  
    metallurgisches 204  
    mikrokristallines 212  
    monokristallines 206  
    multikristallines 205  
    polykristallines 205  
Simulationsprogramme 456  
SOC (State of Charge) 250  
SOFC (oxidkeramische Brennstoffzelle) 424  
Software 456  
SOH (State of Health) 252  
Solarchemie 188  
solare Deckungsrate 155, 157  
solare Heizung 122, 158  
solare Nahwärme 123  
solare Schwimmbadbeheizung 114  
solare Trinkwassererwärmung 115, 155  
solarer Deckungsgrad 153  
solares Kühlen 124  
Solargenerator 234, 235  
Solarkollektoren 39, 125, 164  
Solarkonstante 75  
Solarmodul 209, 227  
    Abschattungen 229  
    Aufbau 209  
    technische Daten 235  
Solarthermie 111  
solarthermische Kraftwerke 39  
    Kosten 430, 440  
solarthermische Systeme 114  
solarthermische Wassererwärmung 111  
    Kosten 429, 440  
Solarturmkraftwerke 184  
Solarzelle 194  
    Dünnschicht 210  
    Eindiodenmodell 216  
    elektrische Beschreibung 215  
    Ersatzschaltbilder 215  
    Funktionsprinzip 197  
    Funktionsweise 194  
    Herstellung 204  
    I-U-Kennlinie 216  
    Kennlinie 222  
    Parameterbestimmung 226  
    Prinzip 201  
    Temperaturabhängigkeit 223  
    Vorgänge in 202  
    Zellparameter 221  
    Zweidiodenmodell 219  
Sonne  
    Daten 73  
    Oberflächentemperatur 75  
    Position 86  
    spezifische Ausstrahlung 74  
    Strahlungsleistung 74  
Sonnenazimut 86  
Sonnenbahndiagramm 88, 98  
Sonneneinfallswinkel 89, 167  
Sonnenergie 38  
    direkte 38  
    Energienmenge 38  
    indirekte 41  
Sonnenhöhe 86, 102  
Sonnenofen 188  
Sonnensimulator 110  
Sonnenstand 79, 86

- Sonnenstrahlung 72
  - Sparkassenformel 437
  - Speicher 145
    - Batterien 244
    - Betonkugelspeicher 361
    - Erdgas 65
    - Kollektor 126
    - Konzept 65
    - Lageenergiespeicher 362
    - Medien 145
    - Möglichkeiten 257
    - Parabolrinnenkraftwerk 182
    - Pumpspeicher 357
      - saisonal 122
    - Schichten 120, 122
    - Temperatur 148
    - Verluste 147, 148
    - Wasserkraftwerke 356
    - Zeitkonstante 148
  - speicherbare Wärmemenge 146
  - Speicherung sensibler Wärme 146
  - spektrale Empfindlichkeit 106, 203
  - Spektrum 78, 134
  - Spektrum AM0 77
  - Spektrum AM1,5g 78
  - spezifische Ausstrahlung 72, 74
  - Stadtgas 414
  - Stall-Regelung 315
  - Standardlastprofile 285
  - Standardtestbedingungen 222
  - Ständer 324, 328
  - Stapelzellen 212
  - STC (Standardtestbedingungen) 222
  - Stefan-Boltzmann-Gesetz 75
  - Steinkohleeinheit 14
  - Sternschaltung 326
  - Stirling-Prozess 179
  - Störstellenleitung 199
  - Strahldichte 72, 76, 77
  - Strahlungsgewinne 151
  - Strahlungsleistung 72, 74
  - strahlungsphysikalische Größen 72
  - Strangdiode 234, 268
  - Strangwechselrichter 269
  - String-Ribbon-Verfahren 206
  - Stromeinspeisegesetz 294
  - Stromerzeugung 60
  - Stromimport 189
  - Stromortskurve 335
  - Stromrichtererkaskade 345
  - Strömungsverlauf 303
  - Stromverbrauch 54
  - Stundenwinkel 88
  - Subventionen 447
  - Synchrondrehzahl 326
  - Synchrongenerator 342
  - Synchronisation 332
  - Synchronisierbedingungen 332
  - Synchronmaschine 328
  - Synthesegas 401
  - System Performance Index 291
- T**
- Tandemzellen 212
  - TapChan-Anlagen 371
  - Tastverhältnis 238, 242
  - Taupunkttemperatur 150
  - Tausend-Dächer-Programm 192
  - TCO 209, 211, 264
  - Technische Daten
    - Asynchrongenerator 339
    - Batteriespeichersysteme 272
    - Dish-Stirling-Anlage 188
    - Itaipu-Kraftwerk 356
    - Parabolrinnenkollektoren 166
    - Parabolrinnenkraftwerke 181, 184
    - Solarkollektor 137
    - Solarmodule 235
    - Solarturmkraftwerke 185
    - Wechselrichter 267
  - tektonische Platten 373
  - Temperaturabhängigkeit bei Solarzellen 223
  - Temperaturanstieg 29, 47
  - Temperaturen, Geothermie 374
  - Temperaturschichtung 149
  - Temperatursensor 118
  - Temperaturspannung 215, 223
  - Texturätzen 208
  - thermische Verluste 136
  - thermischer Sensor 106
  - thermodynamische Größen 112
  - thermodynamischer Wirkungsgrad 425
  - Thermografie 214
  - Thermosiphonanlage 117
  - Tiefentladung 248
  - Tiefsetzsteller 238
  - Tiegelziehverfahren 206
  - Tinox 134
  - Totalverlust der Kapitalanlage 453
  - Transformator 264, 334
  - Transmissionsgrad 129, 168
  - Transmissionsverluste 149
  - transparente Wärmedämmung 126
  - Transport 58
  - Treibhauseffekt 25
    - anthropogener 25
    - Indizien 29
    - natürlicher 25
    - Temperaturanstieg 29
    - Verursachergruppen 28
    - zukünftige Schäden 451
  - Treibhausgas
    - Distickstoffoxid 27
    - Emissionen 69
    - FCKW 27

Kohlendioxid 26  
 Methan 27  
 Ozon 27  
 Pro-Kopf-CO<sub>2</sub>-Emissionen 28  
 Schwefelhexafluorid 27  
 Trinkwasserspeicher 146  
 Triplezellen 212  
 Tschernobyl 21, 32, 34  
 T-S-Diagramm 177  
 Turbine  
   Dampfturbine 176  
   Francis 365  
   Gasturbine 178  
   Kaplan 364  
   ORC 378  
   Ossberger 365  
   Pelton 365  
   Pump 365  
   Rohr 364  
   Wind 302  
 Turbinenarten 363  
 Turboläufer 328  
 türkiser Wasserstoff 410  
 Turm 159, 184, 318  
 Turmwirkungsgrad 159  
 TWD (transparente Wärmedämmung) 126

## U

Überdruckturbinen 364  
 Übererregung 331  
 Überlebenswindgeschwindigkeit 188, 314  
 Übersetzungsverhältnis 241  
 übersynchrone Stromrichteraskade 345  
 Umfangsgeschwindigkeit 305, 307  
 Umgebung, Beschreibung 96  
 Umrechnungsfaktoren für Energieeinheiten 14  
 Umrichter 237  
 Untererregung 331  
 Untertage-Erdgasspeicher 418  
 Uranabbau 32  
 Uranvorräte 24

## V

Vakuumflachkollektor 131  
 Vakuumröhrenkollektor 131  
 Valenzband 196  
 variabler Schlupf 340  
 verbotene Zone 196  
 Verbraucherpreisindex 428  
 Verdunstungsverluste 151  
 Verluste, Wasserstoffspeicherung 414  
 Verlustfaktor 355  
 Verschattungen 172  
 Verschmutzungen, Verluste 101  
 Verzerrungsfaktor 261  
 Vierquadrantenbetrieb 330  
 Vollpolläufer 328

Volumenstrom 141, 302  
 Vorsätze 14  
 Vorsatzzeichen 14

## W

Wafer 207  
 wahre Ortszeit 87  
 Wärme 111  
 Wärmeänderung 111  
 Wärmebedarf bei Freibädern 115  
 Wärmedurchgang 113  
 Wärmedurchgangskoeffizient 112, 113, 147  
 Wärmedurchgangszahl 112, 143, 147  
 Wärmeenergie 16  
 Wärmefluss 111, 112  
 Wärmegestehungskosten 430, 440  
 Wärmekapazität 16, 112  
 Wärmekraftmaschinen 175  
 Wärmeleitfähigkeit 112, 113  
 Wärmepumpe 45, 57, 274, 381, 386  
   Kosten 435  
 Wärmerohr 131  
 Wärmespeicher 117  
 Wärmestrahlung 129, 133, 135, 150  
 Wärmestrom 112, 113  
 Wärmetauscher 131, 146, 180, 182  
 Wärmeträgerdurchsatz 120  
 Wärmeübergangskoeffizient 112, 113, 150, 169  
 Wärmeübergangszahl 143, 147  
 Wärmeverluste 146  
 Wärmeversorgung 56  
 Warmwasserbedarf 152  
 Wassergehalt 395  
 Wasserkochen 15  
 Wasserkraft 42, 349  
   Kosten 434  
 Wasserkraftanlagen 354  
 Wasserstoff 409  
   blauer 410  
   Einsatzgebiete 408  
   energetische Daten 409  
   Erzeugung 45  
   grauer 410  
   grüner 410  
   Photovoltaik-Speichersystem 273  
   Speichertypen 413  
   Transport 59  
   türkiser 410  
   Wasserbedarf 412  
 Wasserturbinen 363  
 Watt-peak (Wp) 222  
 Wechselrichter 258  
   Daten 267  
   Master-Slave 268  
   Photovoltaik 263  
   Wirkungsgrad 265  
 Wechselspannung 321

- Wechselstromrechnung 321
  - Weibull-Verteilung 298
  - Wellenkraftwerke 370
  - Wellenlängen 76
  - Weltenergieverbrauch 18
  - Western Mill 42
  - Wh-Wirkungsgrad 246
  - Widerstandsbeiwert 304
  - Widerstandskraft 304, 306
  - Widerstandslast 235
  - Widerstandsläufer 304
  - Wind
    - Dargebot 295
    - Entstehung 295
    - geostrophischer 301
    - Geschwindigkeit 297
    - Geschwindigkeitsverteilungen 297
    - Leistung 302
    - Nachführung 317
    - Richtung 300
    - Stärke 296
  - Windkraft 42, 294
    - Energiewende 63
  - Windkraftanlagen 310
    - Anlagenaufbau 318
    - Ertrag 346
    - getriebelose 344
    - horizontale Drehachse 311
    - in Deutschland 43
    - Komponenten 312
    - Kosten 433, 441
    - vertikale Drehachse 310
  - Wirkleistung 323, 327
  - Wirkungsgrad 16
    - Aufwindkraftwerk 159
    - Batterieladung 246
    - Betonkugelspeicher 361
    - Biomasseproduktion 392
    - Brennstoffzelle 425
    - CEC (California Energy Commission) 266
    - Euro 265
    - Generator 368
    - Gleichspannungswandler 237
    - Kollektorkreis 154
    - konzentrierender Kollektor 170
    - Kraftwerke in Deutschland 16
    - Lageenergiespeicher 362
    - Methanisierung 417
    - optischer 136, 168
    - Pumpspeicherkraftwerk 359
    - Solkollektor 136
    - Solarzelle 201, 211, 212, 223
    - Turbine 367
    - Wasserkraftwerk 355
    - Wasserstoffzeugung 417
    - Wechselrichter 265
    - Windkraftanlage 304
      - zusammengeschaltete Turbinen 368
  - Wirtschaftlichkeitsberechnung 427
    - Kritik 452
    - mit Kapitalverzinsung 437
    - ohne Kapitalverzinsung 428
- Z**
- ZEBRA-Batterie 253
  - Zeigerdiagramm 330
  - Zeitkonstante des Speichers 148
  - Zellspannung 227, 244, 425
  - Zenitwinkel 89
  - Zentrifugalkraft 194
  - Zirkulationsverluste 143
  - Zonenziehverfahren 206
  - zweiachsige Nachführung 94
  - Zweidiodenmodell 219
  - Zweikreisssystem 118, 119
  - Zweispichersysteme 121