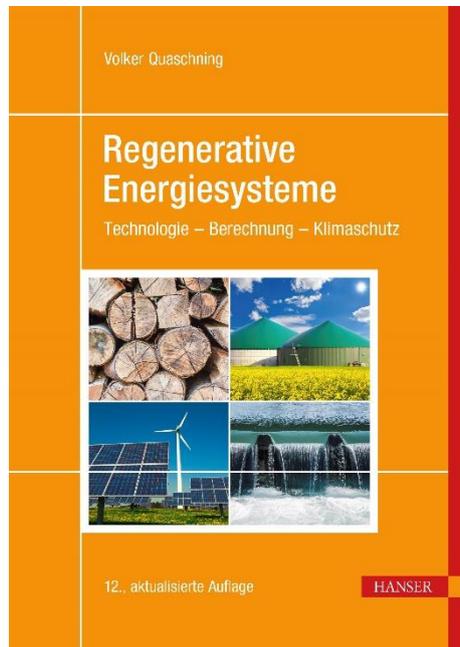


HANSER



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.

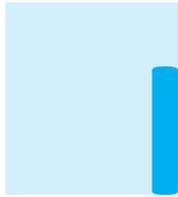
Vorherige Auflagen des Buches wurden bereits in mehrere Sprachen übersetzt. Diese zwölfte Auflage wurde vollständig aktualisiert und um wichtige neue Entwicklungen erweitert.

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



Inhaltsverzeichnis

1	Energie und Klimaschutz	13
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
2	Sonnenstrahlung.....	72
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
3	Nicht konzentrierende Solarthermie.....	111
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
4	Konzentrierende Solarthermie	161
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
5	Photovoltaik	192
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
6	Windkraft	294
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

7	Wasserkraft	349
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
8	Geothermie	372
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
9	Nutzung der Biomasse	392
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
10	Wasserstoffwirtschaft	408
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
11	Wirtschaftlichkeitsberechnungen	427
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
12	Simulation und Downloads zum Buch.....	456
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
	Literaturverzeichnis	461
	Sachwortverzeichnis	470

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 ³ 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 ³ 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 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)

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.

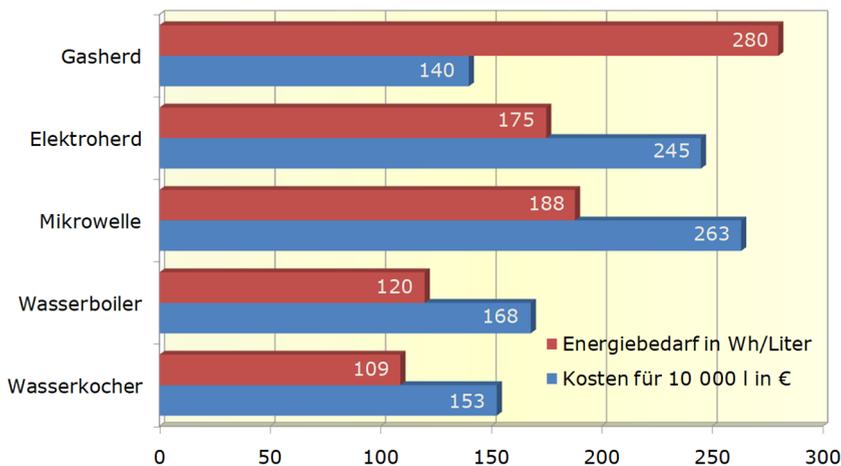


Bild 1.1 „So viel kostet kochendes Wasser“ aus dem Jahr 1994 [Sti94]

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** 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 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.

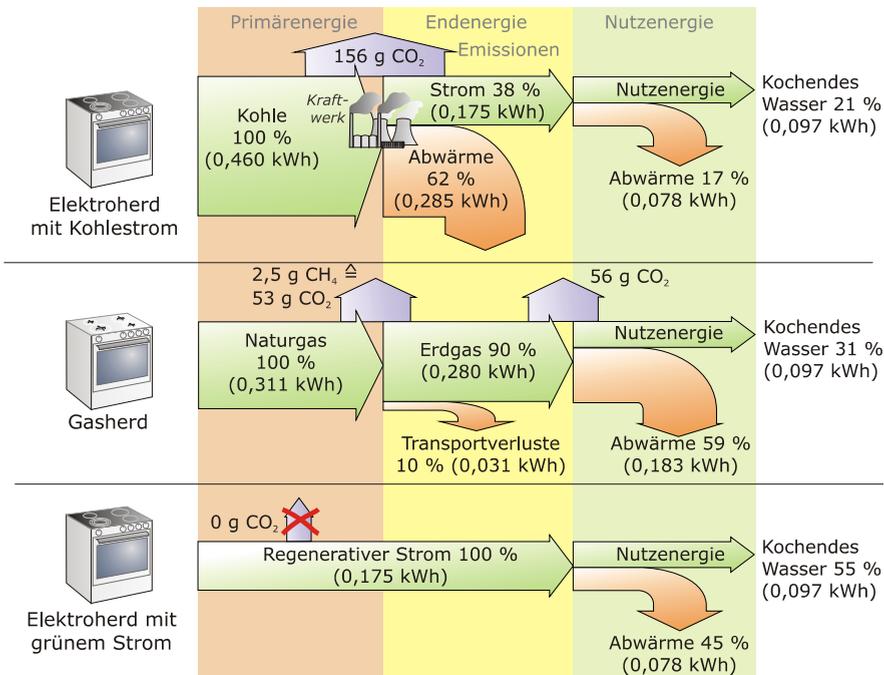


Bild 1.2 Energiewandlungskette, Verluste und Kohlendioxidemissionen beim Wasserkochen

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 Wasssererwärmung 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 Wasssererwärmen 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 ¹⁾	36 039	37 856	46 675	58 541	75 084	98 654	161 470
Flüssige Brennstoffe ²⁾	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 ³⁾	0	0	0	0	6 739	24 451	24 130
Wasserkraft ³⁾	771	1 774	3 316	6 632	16 092	25 152	40 680
Windkraft ³⁾	0	0	0	0	0	298	19 737
Solarenergie ³⁾	0	0	0	0	0	11	12 530
Andere Erneuerbare ^{3) 4)}	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.

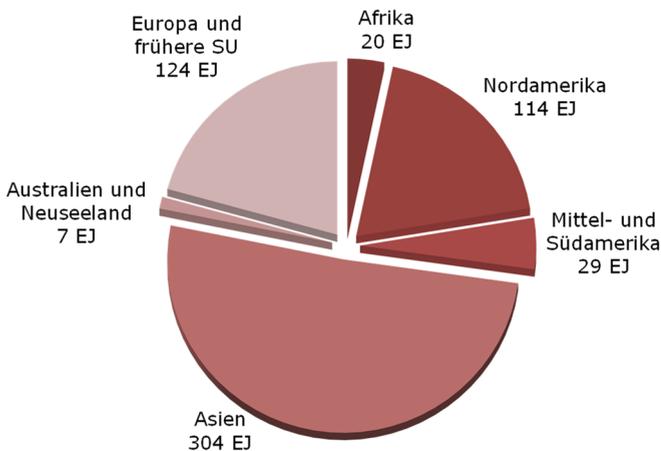


Bild 1.4 Primärenergieverbrauch der Welt nach Regionen im Jahr 2021 (Daten: [BP22])

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 Bruttonational-einkommen nicht zwangsläufig miteinander gekoppelt sind, also steigender Wohlstand auch bei stagnierendem oder sinkendem Energieverbrauch möglich ist.

Auf den Energieverbrauch der 1980er- und 1990er-Jahre hatten weitere Ereignisse entscheidenden Einfluss. Durch den nicht unumstrittenen Ausbau der Kernenergie und einen Stromverbrauch, der deutlich unter den Erwartungen lag, gab es eine Überkapazität an Kraftwerken zur Stromerzeugung, die zulasten des Kohleverbrauchs ging. Das Unglück im ukrainischen Kernkraftwerk Tschernobyl im Jahr 1986 entzog der Kernenergie endgültig die gesellschaftliche Unterstützung. Ein weiterer Ausbau der Kernenergienutzung war nicht durchzusetzen, und der Anteil der Kernenergie an der Deckung des Primärenergiebedarfs blieb in Deutschland lange Zeit mit rund 10 % konstant. Nach dem Atomunfall in Fukushima wurde der Atomausstieg in Deutschland endgültig für das Jahr 2022 beschlossen und in der Energiekrise noch einmal um wenige Monate verschoben.

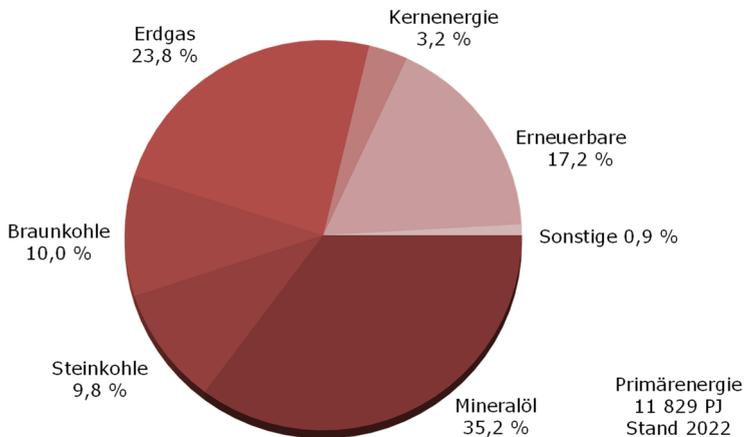


Bild 1.5 Anteile verschiedener Energieträger am Primärenergieverbrauch in Deutschland im Jahr 2022 (Daten: [AGEB22])

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

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

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

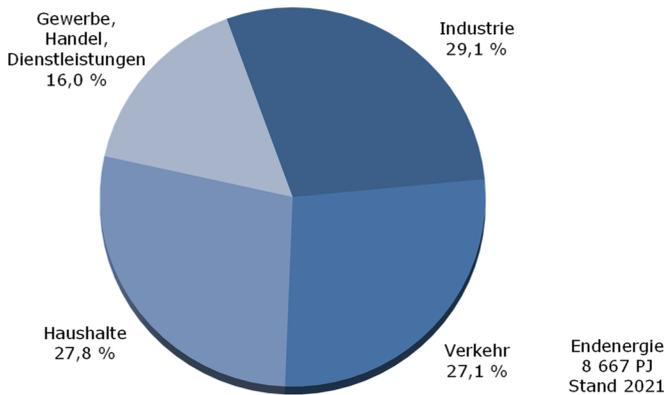


Bild 1.6 Anteile verschiedener Sektoren am Endenergieverbrauch in Deutschland im Jahr 2021 (Daten: [AGEB22])

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

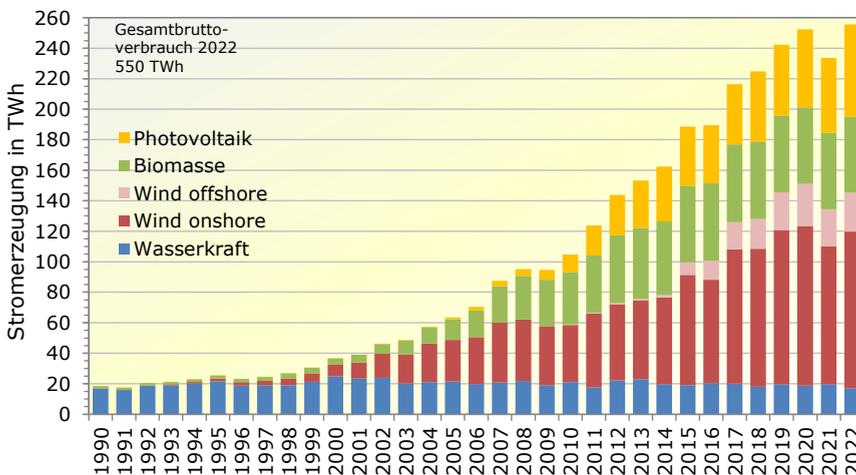


Bild 1.7 Nutzung erneuerbarer Energien durch die Elektrizitätswirtschaft in Deutschland [Qua23]

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

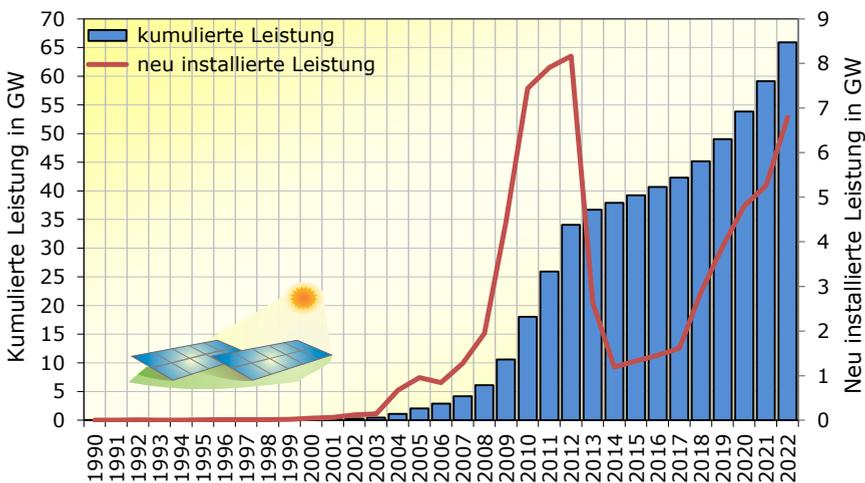


Bild 1.8 Jährlicher Zubau der Photovoltaik und insgesamt installierte Photovoltaikleistung in Deutschland [Qua23]

1.3 Reichweite konventioneller Energieträger

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

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

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

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

¹⁾ 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 · 10¹⁴ 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
 Hochsetzteller 240, 264
 Höchstspannungs-Gleichstrom-Übertragung 190
 Holzbriketts 395
 Holzfeuchte 395
 Holzhackschnitzel 397
 Holzpellets 395, 397
 Preise 436
 Horizontelligkeitsindex 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-CO₂-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
Wärme kraftmaschinen 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