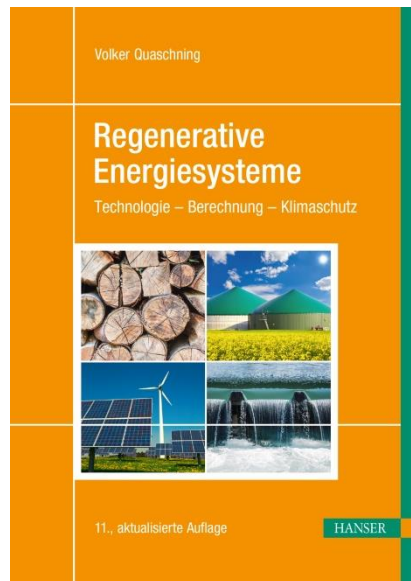


HANSER



Leseprobe

zu

Regenerative Energiesysteme

von Volker Quaschnig

Print-ISBN: 978-3-446-47163-4

E-Book-ISBN: 978-3-446-47206-8

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446471634>

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 darauf gelegt, die Aussagen stets mit aktuellem Zahlenmaterial objektiv zu untermauern. Ziel ist es, Aspekte und Fakten zu liefern, mit denen sich die Leserinnen und Leser ihr eigenes Urteil bilden können.

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

Besonders motiviert haben mich auch die zahlreichen Gespräche und Diskussionen während der Erstellung des Buches. Sie haben mir gezeigt, dass es sich gerade bei den über die technischen Probleme hinausgehenden Fragestellungen um wichtige Themen handelt, die oft ignoriert werden, denn sie stellen nicht selten unsere bisherige Handlungsweise 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 Quaschning

Vorwort zur elften 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 bei weitem 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 elfte 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 Juli 2021

Prof. Dr. Volker Quaschning

Hochschule für Technik und Wirtschaft HTW Berlin
www.volker-quaschning.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	Planetenenergie	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	Internationaler Klimaschutz	51
1.7.3	Energiewende und Klimaschutz in Deutschland.....	53
1.7.3.1	Entwicklung der Kohlendioxidemissionen in Deutschland	53
1.7.3.2	Regenerative Energieversorgung in Deutschland	55
1.7.3.3	Umbau der Energieversorgung	66
2	Sonnenstrahlung.....	70
2.1	Einleitung	70
2.2	Der Fusionsreaktor Sonne.....	71
2.3	Sonnenstrahlung auf der Erde	75
2.4	Bestrahlungsstärke auf der Horizontalen	81
2.5	Sonnenposition und Einfallswinkel	84
2.6	Bestrahlungsstärke auf der geneigten Ebene	88
2.6.1	Direkte Strahlung auf der geneigten Ebene	88
2.6.2	Diffuse Strahlung auf der geneigten Ebene.....	89
2.6.3	Bodenreflexion.....	90
2.6.4	Strahlungsgewinn durch Neigung oder Nachführung	91
2.7	Berechnung von Abschattungsverlusten	94
2.7.1	Aufnahme der Umgebung	94
2.7.2	Bestimmung des direkten Abschattungsgrades	96
2.7.3	Bestimmung des diffusen Abschattungsgrades	97
2.7.4	Gesamtermittlung der Abschattungen.....	98
2.7.5	Optimaler Abstand bei aufgeständerten Solaranlagen	99

2.8	Solarstrahlungsmesstechnik und Sonnensimulatoren	103
2.8.1	Messung der globalen Bestrahlungsstärke	103
2.8.2	Messung der direkten und der diffusen Bestrahlungsstärke	105
2.8.3	Satellitenmessungen	105
2.8.4	Künstliche Sonnen	108
3	Nicht konzentrierende Solarthermie	109
3.1	Grundlagen	109
3.2	Solarthermische Systeme	112
3.2.1	Solare Schwimmbadbeheizung	112
3.2.2	Solare Trinkwassererwärmung	113
3.2.2.1	Schwerkraft- oder Thermosiphonanlagen	115
3.2.2.2	Anlagen mit Zwangsumlauf	116
3.2.3	Solare Heizungsunterstützung	119
3.2.4	Rein solare Heizung	120
3.2.5	Solare Nahwärmeversorgung	121
3.2.6	Solares Kühlen	122
3.3	Solkollektoren	123
3.3.1	Speicherkollektoren	124
3.3.2	Flachkollektoren	126
3.3.3	Vakuumröhrenkollektoren	129
3.4	Kollektorabsorber	130
3.5	Kollektorleistung und Kollektorwirkungsgrad	133
3.6	Rohrleitungen	138
3.6.1	Leitungsaufheizverluste	141
3.6.2	Zirkulationsverluste	141
3.7	Speicher	143
3.7.1	Trinkwasserspeicher	144
3.7.2	Schwimmbecken	147
3.8	Anlagenauslegung	150
3.8.1	Nutzwärmebedarf	150
3.8.2	Solarer Deckungsgrad und Nutzungsgrad	151
3.8.3	Solare Trinkwasseranlagen	153
3.8.4	Anlagen zur solaren Heizungsunterstützung	154
3.8.5	Rein solare Heizung	156
3.9	Aufwindkraftwerke	156
4	Konzentrierende Solarthermie	159
4.1	Einleitung	159
4.2	Konzentration von Solarstrahlung	159
4.3	Konzentrierende Kollektoren	162
4.3.1	Linienkollektoren	163
4.3.1.1	Kollektorarten und Kollektorgeometrie	163
4.3.1.2	Kollektornutzleistung und Kollektorwirkungsgrad	165
4.3.1.3	Längenausdehnung	169
4.3.1.4	Parabolrinnenkollektorfelder	169
4.3.2	Punktkonzentratoren	172
4.4	Wärmekraftmaschinen	173
4.4.1	Carnot-Prozess	173
4.4.2	Clausius-Rankine-Prozess	173
4.4.3	Joule-Prozess	176
4.4.4	Stirling-Prozess	177

4.5	Konzentrierende solarthermische Anlagen.....	177
4.5.1	Parabolrinnenkraftwerke	177
4.5.2	Solarturmkraftwerke	182
4.5.2.1	Offener volumetrischer Receiver	183
4.5.2.2	Druck-Receiver.....	184
4.5.3	Dish-Stirling-Anlagen	185
4.5.4	Sonnenöfen und Solarchemie	186
4.6	Stromimport	187
5	Photovoltaik	190
5.1	Einleitung	190
5.2	Funktionsweise von Solarzellen	192
5.2.1	Atommodell nach Bohr	192
5.2.2	Photoeffekt	193
5.2.3	Funktionsprinzip einer Solarzelle	195
5.3	Herstellung von Solarzellen und Solarmodulen	202
5.3.1	Solarzellen aus kristallinem Silizium.....	202
5.3.2	Solarmodule mit kristallinen Zellen.....	207
5.3.3	Solarzellen aus amorphem Silizium.....	208
5.3.4	Solarzellen aus anderen Materialien	209
5.3.5	Modultests und Qualitätskontrolle	211
5.4	Elektrische Beschreibung von Solarzellen	213
5.4.1	Einfaches Ersatzschaltbild	213
5.4.2	Erweitertes Ersatzschaltbild (Eindiodenmodell).....	214
5.4.3	Zweidiodenmodell.....	217
5.4.4	Zweidiodenmodell mit Erweiterungsterm	217
5.4.5	Weitere elektrische Zellparameter	219
5.4.6	Temperaturabhängigkeit.....	221
5.4.7	Parameterbestimmung	224
5.5	Elektrische Beschreibung von Solarmodulen	225
5.5.1	Reihenschaltung von Solarzellen.....	225
5.5.2	Reihenschaltung unter inhomogenen Bedingungen	227
5.5.3	Parallelschaltung von Solarzellen	232
5.5.4	Technische Daten von Solarmodulen.....	232
5.6	Solargenerator und Last.....	233
5.6.1	Widerstandslast	233
5.6.2	Gleichspannungswandler	235
5.6.3	Tiefsetzsteller	236
5.6.4	Hochsetzsteller.....	238
5.6.5	Weitere Gleichspannungswandler	239
5.6.6	MPP-Tracker.....	240
5.7	Akkumulatoren	242
5.7.1	Akkumulatorarten	242
5.7.2	Bleiakkumulator	243
5.7.3	Lithium-Ionen-Akkumulator	247
5.7.4	Andere Akkumulatortypen	251
5.7.5	Akkumulatorsysteme	252
5.7.6	Andere Speichermöglichkeiten	255
5.8	Wechselrichter.....	256
5.8.1	Wechselrichtertechnologie	256

5.8.1.1	Rechteckwechselrichter.....	257
5.8.1.2	Moderne Wechselrichtertopologien	260
5.8.2	Wechselrichter in der Photovoltaik.....	261
5.8.2.1	Funktionen und Aufgaben des Wechselrichters	261
5.8.2.2	Wechselrichterwirkungsgrade	263
5.8.2.3	Anlagenkonzepte	266
5.9	Photovoltaische Eigenverbrauchssysteme.....	267
5.9.1	Photovoltaische Eigenverbrauchssysteme mit Speicher.....	267
5.9.2	Photovoltaische Eigenverbrauchssysteme mit Heizung.....	271
5.10	Planung und Auslegung.....	273
5.10.1	Inselnetzsysteme.....	273
5.10.2	Rein netzgekoppelte Systeme	276
5.10.3	Eigenverbrauchssysteme.....	279
5.10.3.1	Eigenverbrauchssysteme ohne Speicher	279
5.10.3.2	Eigenverbrauchssysteme mit Batteriespeicher	283
5.10.3.3	Thermische Nutzung und Netzzurückspeisung.....	290
6	Windkraft	292
6.1	Einleitung	292
6.2	Dargebot von Windenergie.....	293
6.2.1	Entstehung des Windes.....	293
6.2.2	Angabe der Windstärke.....	294
6.2.3	Windgeschwindigkeitsverteilungen	295
6.2.4	Einfluss der Umgebung und Höhe.....	297
6.3	Nutzung der Windenergie.....	300
6.3.1	Im Wind enthaltene Leistung	300
6.3.2	Widerstandsläufer.....	302
6.3.3	Auftriebsläufer	304
6.4	Bauformen von Windkraftanlagen.....	308
6.4.1	Windkraftanlagen mit vertikaler Drehachse	308
6.4.2	Windkraftanlagen mit horizontaler Drehachse	309
6.4.2.1	Anlagenaufbau.....	309
6.4.2.2	Rotorblätter	310
6.4.2.3	Windgeschwindigkeitsbereiche	312
6.4.2.4	Leistungsbegrenzung und Sturmabschaltung	313
6.4.2.5	Windnachführung.....	315
6.4.2.6	Turm, Fundament, Getriebe und Generator.....	316
6.4.2.7	Offshore-Windkraftanlagen.....	317
6.5	Elektrische Maschinen	318
6.5.1	Elektrische Wechselstromrechnung.....	319
6.5.2	Drehfeld	322
6.5.3	Synchronmaschine	326
6.5.3.1	Aufbau	326
6.5.3.2	Elektrische Beschreibung.....	327
6.5.3.3	Synchronisation	330
6.5.4	Asynchronmaschine	330
6.5.4.1	Aufbau und Betriebszustände.....	330
6.5.4.2	Ersatzschaltbilder und Stromortskurven	332
6.5.4.3	Leistungsbilanz.....	334
6.5.4.4	Drehzahl-Drehmoment-Kennlinien und typische Generatordaten.....	335

6.6	Elektrische Anlagenkonzepte	337
6.6.1	Asynchrongenerator mit direkter Netzkopplung	337
6.6.2	Synchrongenerator mit direkter Netzkopplung	340
6.6.3	Synchrongenerator mit Umrichter und Zwischenkreis.....	341
6.6.4	Drehzahlregelbare Asynchrongeneratoren	343
6.6.5	Inselnetzanlagen	343
6.7	Netzbetrieb	344
6.7.1	Anlagenertrag.....	344
6.7.2	Netzanschluss.....	345
7	Wasserkraft	347
7.1	Einleitung	347
7.2	Dargebot der Wasserkraft	348
7.3	Wasserkraftwerke.....	352
7.3.1	Laufwasserkraftwerke	352
7.3.2	Speicherwasserkraftwerke.....	354
7.3.3	Pumpspeicherkraftwerke	355
7.3.4	Betonkugelspeicher und Lageenergiespeicher.....	358
7.4	Wasserturbinen	360
7.4.1	Turbinenarten	360
7.4.1.1	Kaplan-Turbine und Rohr-Turbine	361
7.4.1.2	Ossberger-Turbine	363
7.4.1.3	Francis-Turbine	363
7.4.1.4	Pelton-Turbine	364
7.4.2	Turbinenwirkungsgrad	364
7.5	Weitere technische Anlagen zur Wasserkraftnutzung.....	366
7.5.1	Gezeitenkraftwerke.....	366
7.5.2	Meeresströmungskraftwerke	367
7.5.3	Wellenkraftwerke.....	368
8	Geothermie	370
8.1	Geothermievorkommen	370
8.2	Geothermische Heizwerke	374
8.3	Geothermische Stromerzeugung	375
8.3.1	Kraftwerksprozesse	375
8.3.2	Geothermische Kraftwerke	377
8.4	Wärmepumpen.....	379
8.4.1	Kompressions-Wärmepumpen	379
8.4.2	Absorptions-Wärmepumpen.....	381
8.4.3	Adsorptions-Wärmepumpen.....	382
8.4.4	Einsatzgebiete, Planung und Ertragsberechnung.....	383
9	Nutzung der Biomasse.....	388
9.1	Vorkommen an Biomasse	388
9.1.1	Feste Bioenergieträger	390
9.1.2	Flüssige Bioenergieträger	394
9.1.2.1	Pflanzenöl	394
9.1.2.2	Biodiesel	395
9.1.2.3	Bioalkohole	395
9.1.2.4	Biomass-to-Liquid (BtL)-Brennstoffe.....	396
9.1.3	Gasförmige Bioenergieträger	397
9.1.4	Flächenerträge und Umweltbilanz	399

9.2	Biomasseanlagen	400
9.2.1	Biomasseheizungen.....	400
9.2.2	Biomassekraftwerke.....	403
10	Wasserstofferzeugung, Brennstoffzellen und Methanisierung	404
10.1	Wasserstofferzeugung und -speicherung	404
10.2	Brennstoffzellen.....	408
10.2.1	Einleitung	408
10.2.2	Brennstoffzellentypen	409
10.2.3	Wirkungsgrade und Betriebsverhalten	412
10.3	Methanisierung und Untertagespeicherung.....	414
11	Wirtschaftlichkeitsberechnungen	419
11.1	Einleitung	419
11.2	Energiegestehungskosten	420
11.2.1	Berechnungen ohne Kapitalverzinsung	420
11.2.1.1	Solarthermische Anlagen zur Trinkwassererwärmung	421
11.2.1.2	Solarthermische Kraftwerke	422
11.2.1.3	Photovoltaikanlagen	423
11.2.1.4	Windkraftanlagen	425
11.2.1.5	Wasserkraftanlagen	426
11.2.1.6	Geothermieranlagen	426
11.2.1.7	Holzpelletsheizungen.....	428
11.2.2	Berechnungen mit Kapitalverzinsung.....	429
11.2.2.1	Solarthermische Anlagen zur Trinkwassererwärmung	432
11.2.2.2	Solarthermische Kraftwerke	432
11.2.2.3	Photovoltaikanlagen	432
11.2.2.4	Windkraftanlagen	433
11.2.3	Vergütung für regenerative Energieanlagen	433
11.2.4	Zukünftige Entwicklung der Kosten für regenerative Energien	434
11.2.5	Kosten konventioneller Energiesysteme	436
11.3	Externe Kosten des Energieverbrauchs.....	438
11.3.1	Subventionen im Energiemarkt.....	439
11.3.2	Ausgaben für Forschung und Entwicklung	441
11.3.3	Kosten für Umwelt- und Gesundheitsschäden.....	442
11.3.4	Sonstige externe Kosten.....	443
11.3.5	Internalisierung der externen Kosten.....	443
11.4	Kritische Betrachtung der Wirtschaftlichkeitsberechnungen	444
11.4.1	Unendliche Kapitalvermehrung.....	445
11.4.2	Die Verantwortung des Kapitals.....	446
12	Simulation und Downloads zum Buch.....	448
12.1	Allgemeines zur Simulation.....	448
12.2	Der Downloadbereich zum Buch	449
12.2.1	Start und Überblick	449
12.2.2	Abbildungen und Software-Links	450
12.2.3	Vermischtes.....	452
	Literaturverzeichnis	453
	Sachwortverzeichnis.....	462



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 zum Beispiel 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 einen Meter 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	m³ Erdgas
1 Kilojoule ($1 \text{ kJ} = 1000 \text{ Ws}$)	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 m³ 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} (Milliardenstel)
Tera	T	10^{12} (Billion)	Piko	p	10^{-12} (Billionstel)
Peta	P	10^{15} (Billiarde)	Femto	f	10^{-15} (Billiardenstel)
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 zufrieden geben. 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 $\vartheta_1 = 15^\circ\text{C}$ auf $\vartheta_2 = 98^\circ\text{C}$ zu erwärmen, berechnet sich mit der Wärmekapazität c von Wasser $c_{\text{H}_2\text{O}} = 4,187 \text{ kJ}/(\text{kg K})$ über

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

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

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

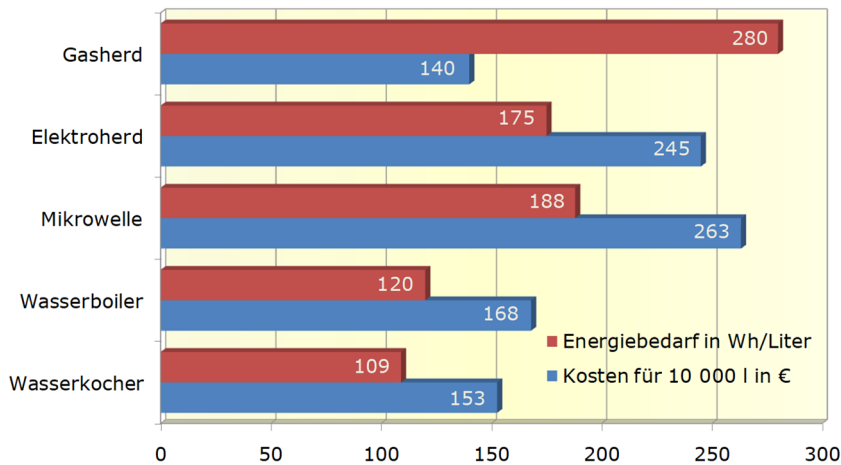


Bild 1.1 „So viel kostet kochendes Wasser“ aus dem Jahr 1994 [Sti94]

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

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

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

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

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.

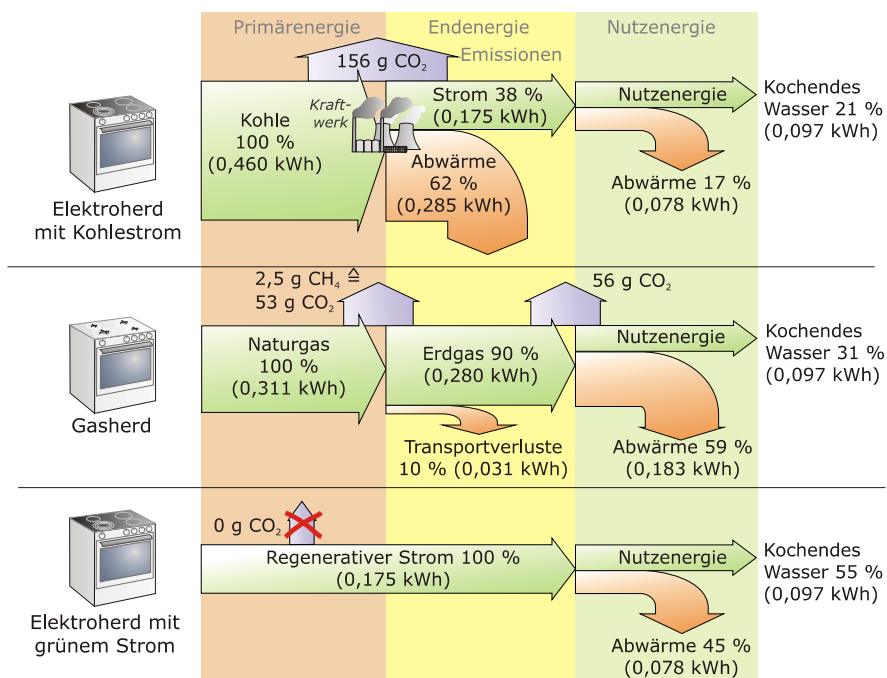


Bild 1.2 Energiewandlungskette, Verluste und Kohlendioxidemissionen beim Wasserkochen

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 $42 \text{ PJ} = 42 \cdot 10^{15} \text{ J}$ entsprechen. Nach dem Zweiten Weltkrieg sind die Fördermengen exponentiell angestiegen. Durch die beiden Ölpreiskrisen 1973 und 1979 sind die Fördermengen kurzfristig deutlich zurückgegangen. Hierdurch wurde das Trendwachstum der Wirtschaft und des Energieverbrauchs um etwa vier Jahre zurückgeworfen.

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 ge-



Sachwortverzeichnis

A

- Abfluss 353
- Abregelverluste 284
- Abschattung 94, 98, 227
- Abschattungsgrad
 - diffuser 97, 98
 - direkter 97
- Abschattungsverluste 100
- Abschattungswinkel 100
- Absorber 131, 161, 183
 - Beschichtung 131, 161
 - Fläche 113
 - Rohr 169
 - selektiver 132
 - Temperatur 161
- Absorption der Atmosphäre 75
- Absorptionsgrad 127, 166
- Absorptionskoeffizient 202
- Absorptions-Wärmepumpe 381
- Abzinsung 430
- Adsorptions-Wärmepumpe 382
- AFC (alkalische Brennstoffzelle) 410
- Ah-Wirkungsgrad 244
- Air Mass 76
- Akkumulator 242
 - am Solargenerator 253
 - Arten 242
 - Autarkiegrade 288
 - Blei 243
 - Daten 242
 - Eigenverbrauchsanteile 287
 - Kapazität 245
 - Lithium-Ionen 242, 247
 - NaNiCl 251
 - NaS 242, 251
 - NiCd 242
 - NiMH 242, 251
 - Systeme 252, 268, 269
- Akzeptor 198
- Albedo 91
- alkalische Brennstoffzelle 410
- alkalische Elektrolyse 406
- Alphateilchen 71
- Alterungszustand
 - Batterie 250
- AM (Air Mass) 76
- Andasol 182, 422
- Anlagenkonzepte für Windkraftanlagen 337
- Anlaufwindgeschwindigkeit 312
- Annuitätsfaktor 431
- Anströmgeschwindigkeit 305
- Anströmwinkel 305
- Antireflexionsschicht 205
- Arbeitsplätze 68
- Arbeitspunkt 234, 253
- Asynchrongenerator 337, 343
- Asynchronmaschine 330
- Atomkraft *siehe* Kernenergie
- aufgeständerte Solaranlagen 99
- Auftriebsbeiwert 304, 305
- Auftriebskraft 304
- Auftriebsläufer 304
- Aufwindkraftwerk 156
- Ausbauabfluss 353
- Ausbaufallhöhe 353
- Auslegungswindgeschwindigkeit 312
- äußerer Photoeffekt 193
- Ausstrahlung, spezifische 72
- Autarkie 271, 282
- Autarkiegrad 282, 287, 288
- Azimutantrieb 315

B

- B2-Brückenschaltung 257, 260
- B6-Brückenschaltung 260
- Bandabstand 194, 222
 - verschiedener Halbleiter 195
- Bändermodell 194
- Batterie *siehe* Akkumulator
- Batteriekapazität 275
- Batteriemanagementsystem 247
- Batteriespeichersysteme 270

Beaufort-Skala 295
 Beihilfen 439
 Beschichtung, selektive 131
 Bestrahlung 70
 Bestrahlungsstärke 70, 73
 diffuse 82, 89
 direkte 82, 89
 geneigte Ebene 88
 horizontale 81
 Messung 103, 105
 Tagesgänge 78
 Betonkugelspeicher 358
 Betriebskosten 420
 Betz'scher Leistungsbeiwert 301
 Beweglichkeit 196
 Bioalkohole 395
 Biodiesel 395
 Bioenergieträger
 feste 390
 flüssige 394
 gasförmige 397
 Bioethanol 395
 Biogas 398, 414
 Biokraftstoffserträge 400
 Biomasse 388
 Heizungen 400
 Kraftwerke 403
 Potenziale 389
 Produktion 44
 Vorkommen 388
 Biomass-to-Liquid 396
 blauer Wasserstoff 405
 Bleiakkumulator 243
 Betriebszustände 246
 Ladezustand 245
 Blindleistung 321, 325
 Blindleistungskompensation 339
 Blindwiderstand 321
 Blockingdiode 252, 254
 BMS (Batteriemanagementsystem) 247
 Bodenreflexion 90
 Bohr'sches Atommodell 192
 Bohrturm 373
 Boltzmann-Konstante 196
 Bor 198
 Braunkohle 68
 Brennstoffzelle 45, 408
 Brückenschaltung 257
 Bruttostromerzeugung 61
 Bruttostromverbrauch 55
 BtL-Brennstoffe 396
 Bulb-Turbine 362
 Bypassdioden 228

C

C4-Pflanzen 389
 Cadmiumtellurid 195, 210

CAPEX 420
 Carnot-Prozess 173
 CCS (Carbon Dioxide Capture and Storage) 49
 CEC-Wirkungsgrad 264
 Cermet 132
 CIS-Solarzelle 210
 Clausius-Rankine-Prozess 173
 COP (Coefficient of Performance) 384
 Coulomb-Kraft 192
 C-Rate 248
 CVD (Chemical Vapor Deposition) 203

D

dachintegrierte Photovoltaikanlage 191
 Dampfkraftwerke 173
 Dampfreformierung 405
 dänisches Konzept 337
 Darrieus-Rotor 309
 Deckungsgrad, solarer 151
 Defektelektronen 196
 Deklination 85
 DHÜ 188
 Dichte der Luft 300
 Dielektrizitätskonstante 192
 Differenzierung der Globalstrahlung 83
 diffuser Abschattungsgrad 98
 diffuser Strahlungsanteil 84
 Diffusionsspannung 198
 Diffusstrahlung 82, 89
 Diode 213
 Diodendurchbruch 217
 Diodenfaktor 213, 225
 Diodensättigungsstrom 225
 direkter Abschattungsgrad 97
 Direktmethanol-Brennstoffzelle 410
 Direktstrahlung 82, 88
 Dish-Stirling-Anlagen 185
 Distickstoffoxid 27
 Divergenz 160
 DMFC (Direktmethanol-Brennstoffzelle) 410
 DOD (Depth of Discharge) 248
 Donator 197
 doppelte Abdeckung 128
 dreckiges Silizium 203
 Drehfeld 322, 323
 Drehmoment 306
 Asynchronmaschine 335
 Synchronmaschine 329
 Drehstrommaschinen 319
 Drehstromwicklung 323
 Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie 335
 Dreieckschaltung 324
 Druck-Receiver 184
 Dünnschichtzellen 208
 Durchström-Turbine 363

E

EEG (Erneuerbare-Energien-Gesetz) 292, 433, 440
 Effektivwert 320
 EFG-Verfahren 204
 Eigenleitung 196
 Eigenverbrauchsanteil 280, 286, 288
 Eigenverbrauchssysteme 267, 279
 Einbauwinkel 305
 Einblatttrotoren 310
 Eindiodenmodell 214
 Einfallswinkel 87, 165
 Einfallswinkelkorrekturfaktor 137, 166
 Einkreisssystem 116
 Eintakt-Sperrwandler 239
 elektrische Feldkonstante 192
 elektrische Leitfähigkeit 197
 elektrische Maschinen 318
 elektrische Wechselstromrechnung 319
 elektrischer Widerstand 234
 Elektrizitätsversorgung 60
 Elektroherd 16
 Elektrolumineszenz 212
 Elektrolyse 65, 406
 Elektrolyt 243, 246, 412
 Elektromobilität 59
 Elektronendichte 196, 197
 Elektronenmasse 192
 elektrotechnische Größen 191
 Elementarladung 192
 Elevation 84
 Emissionsgrad 127, 148
 empfehlenswerte Rohrdurchmesser 140
 Empfindlichkeit, spektrale 201
 Endenergie 17
 Endenergieverbrauch 22, 56
 Endverluste 165
 Energie
 Betonkugelspeicher 359
 Einheiten 14
 Elektron 193
 Energieerhaltungssatz 15
 Gestehungskosten 421, 431
 Importe 438
 kinetische 300
 Lageenergiespeicher 360
 Photon 193
 Preise 437
 Pumpspeicherkraftwerke 355
 Wind 300
 Energiebänder 193
 Energiebedarf
 Deutschland 20
 Entwicklung 18
 Entwicklung weltweit 46
 Welt 18
 zukünftiger 46

Energiewende 53
 Energiezustände 194
 ENS 263
 enthalpische Zellspannung 412
 Entladerate 248
 Entladestrom 246
 Entladetiefe 245, 248
 Entropie 175
 Erde
 Bestrahlungsstärke 73
 Daten 71
 Primärenergieverbrauch 19
 Erdgas 62, 414, 428
 Erdgasspeicher 66, 416
 Erdkern 370
 Erdkollektor 386
 Erdöl 19, 428, 437
 Erdsonden 386
 Erdwärmekollektor 386
 Erfahrungskurve 434
 Erfahrungswert 435
 Erneuerbare-Energien-Gesetz 292, 433, 440
 Erregerstrom 327
 Erregerwicklung 326
 Ersatzschaltbild
 Asynchronmaschine 333
 Asynchronmaschine, vereinfachtes 334
 Solarzelle, vereinfachtes 214
 Solarzelle, Zweidiodenmodell 217
 Synchronmaschine 328
 Ethanol 395
 Euro-Wirkungsgrad 263
 EVA (Ethylen-Vinyl-Acetat) 208
 EVA-Vernetzungsanalyse 212
 externe Kosten 438, 443
 externer Quantenwirkungsgrad 200

F

FAME (Fettsäuremethylester) 395
 Farbstoffzellen 210
 Farbtöne 74
 Feldeffekttransistor 254, 256
 Feldstärke, magnetische 322
 feste Bioenergieträger 390
 Festkörperakkumulator 250
 Festmeter 392
 Feststoffbatterie 250
 Fettsäuremethylester 395
 Fischer-Tropsch-Synthese 397
 Flächennutzungsgrad 99
 Flachkollektor 126
 Absorber 131
 Frontscheibe 127
 Kollektorgehäuse 128
 Flasher 108
 Flicker 345
 Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) 27

Flussdichte, magnetische 322
flüssige Bioenergieträger 394
Forschung und Entwicklung 441
Fotovoltaik *siehe* Photovoltaik
Fourier-Analyse 257
Francis-Turbine 363
Freileitungen 187
Fresnelkollektor 162
Frischwasserstation 118
Frontscheibe 127
Fukushima 34
Füllfaktor 220
Füllgrad 248

G

Gallium-Arsenit 195
gasförmige Bioenergieträger 397
Gasherd 16
Gaskraftwerke 62
Gasturbine 176
Gasungsspannung 246
Generator 318
geostrophischer Wind 299
Geothermie 37, 370
 Kosten 426
geothermische Heizwerke 374
geothermische Kraftwerke 375
Gesamtkosten 420
Geschichte der Photovoltaik 190
Geschichte der Windkraft 292
gespeicherte Wärme 142
Getriebe 316
getriebelose Windkraftanlage 342
Gezeitenkraftwerke 37, 366
Gibbs'sches Potenzial 412
Giermotor 315
Gierwinkel 315
Gleichdruckturbine 361
Gleichspannungswandler 235
Gleitzahl 305
globale Bestrahlung 79
globale Zirkulation 294
Gondel 316
grauer Wasserstoff 405
Grenzschichtprofil 298, 299
Gridparity 279, 435
grüner Wasserstoff 406
Gütegrad 384

H

H5-Schaltung 261
Hadley-Zelle 293
Halbleiter 194
 direkt 202
 indirekt 202
 n-leitend 198
 p-leitend 198

Halbleitersensor 104
harmonische Analyse 257
Harrisburg 34
Häufigkeitsverteilung 295
H-Brückenschaltung 257
Heat Pipe 129
Heizwert
 Biomasse 389
 Holz 391, 392
Heliostatenfelder 172
Hellmann, Potenzansatz 299
HERIC-Schaltung 261
Heterojunction 207
Heteroübergang 207
HGÜ 188
High-Flow-Prinzip 117
Himmelsklarheit 90
Himmelstemperatur 148
HIT-Zelle 207, 221, 223, 232
Hochsetzsteller 238, 262
Höchstspannungs-Gleichstrom-Übertragung 188
Holzbriketts 391
Holzfeuchte 391
Holzhackschnitzel 393
Holzpellets 391, 393
 Preise 428
Horizonthelligkeitsindex 90
Hot-Dry-Rock-Verfahren 373
Hot-Spots 228
H-Rotor 309

I

IAM *siehe* Einfallswinkelkorrekturfaktor
Importe fossiler Energieträger 438
innerer Photoeffekt 195
Inselnetzwechselrichter 262
Intergovernmental Panel on Climate Change 46
internationaler Klimaschutz 51
interner Quantenwirkungsgrad 200
intrinsische Trägerdichte 196
invertierender Wandler 239
Investitionskosten 420
Ionisationsenergie 193, 197
IPCC 46
ISCCS-Kraftwerk 181
Isolator 194
Itaipu-Kraftwerk 354, 426

J

Jahresarbeitszahl 59, 384
Jahresdauerlinie 350
Joule-Prozess 176

K

Käfigläufer 331
Kalina-Prozess 376
Kapazität (Akkumulator) 245

- Kapitalvermehrung 445
 - Kapitalwert 430
 - Kaplan-Turbine 361
 - Karbonatschmelzen-Brennstoffzelle 411
 - Kavernenspeicher 416
 - Kernenergie 31, 62
 - Anteil am Endenergieverbrauch 63
 - Anteil an der Stromerzeugung 33
 - Entwicklungskosten 441
 - Kernfusion 35
 - Kernspaltung 31
 - Unfälle 34, 442
 - Uranvorkommen 24, 33
 - Kernfusion 35, 71
 - kinetische Energie 300
 - Kippmoment 330, 336
 - Kippschlupf 336
 - Klimaschutzabkommen von Paris 30
 - Klimaschutzvorgaben 31
 - Klimaveränderungen 29
 - Klirrfaktor 259
 - Kloss'sche Formel 336
 - Klucher-Modell 89
 - Kobalt 248
 - Kohleausstieg 61
 - Kohlekommission 61
 - Kohlendioxid 26, 405
 - Abscheidung 49
 - Emissionen 47, 54
 - Konzentration 26, 49
 - spezifische Emissionsfaktoren 51
 - Wärmepumpe 386
 - Kohlepennig 439
 - Kollektor 123, 163
 - Austrittstemperatur 139
 - Durchfluss 138
 - Durchsatz 138
 - Endverluste 165
 - Fläche, pro-Kopf 39
 - Nutzleistung 133, 165
 - Stillstandstemperatur 135, 161
 - Wirkungsgrad 133, 134, 168
 - Kollektorkreisnutzungsgrad 152
 - Kollektorwirkungsgradfaktor 134
 - komplexe Wechselstromrechnung 320
 - Kompressions-Wärmepumpe 379
 - Konvektion 127, 129, 133, 148
 - Konversionsfaktor 134
 - Konzentrationsfaktor 160
 - Konzentratormodul 211
 - konzentrierende Kollektoren 162
 - konzentrierende Solarthermie 159
 - konzentrierende solarthermische Anlagen 177
 - Kosten
 - externe 438, 443
 - Forschung und Entwicklung 441
 - Geothermie 426
 - Holzpelletsheizung 428
 - konventionelle Energiesysteme 436
 - Photovoltaik 423, 432
 - solarthermische Kraftwerke 422, 432
 - solarthermische Wassererwärmung 421, 432
 - Wärmepumpe 427
 - Wasserkraft 426
 - Windkraft 425, 433
 - Kostensenkungen 434
 - Kreisfrequenz 319
 - Kreisfrequenz, Elektron 192
 - Kristallgitter 196
 - künstliche Sonne 108
 - Kupfer-Indium-Diselenid 210
 - Kupferrohre 140
 - Kurzschlussstrom 219
 - Kværner-Verfahren 406
- L**
- Laderegler 253
 - Ladewirkungsgrad 244
 - Ladezustandsbilanzierung 276
 - Lageenergiespeicher 359
 - Lagerraumvolumen 402
 - Laminieren 208
 - Längenausdehnung 169
 - Längsregler 254
 - Laser Grooved Buried Contact 206
 - Latentwärmespeicherung 144
 - Läufer 326, 331
 - Laufwasserkraftwerke 352
 - Lee 298
 - Leeläufer 315
 - Leerlaufspannung 219, 223, 233, 413
 - Legionellen 118
 - Leistung 14, 300, 321, 344
 - Pumpspeicherkraftwerk 356
 - Turbine 365
 - Wasser 352
 - Wasserkraftwerk 353
 - Wind 300
 - Leistungsbeiwert 301, 307
 - Approximation 307
 - nach Betz 301
 - Schalenkreuzanemometer 303
 - Widerstandsläufer 304
 - Leistungsdichte des Windes 292
 - Leistungsfaktor 322
 - Leistungstransistoren 256
 - Leistungszahl 384
 - Leiter 194
 - Leitfähigkeit 194, 197
 - Leitungen 138, 252
 - Leitungsaufheizverluste 141
 - Leitungsband 194
 - Leitungsverluste 252
 - Leuchtdichte 70
 - LGBC (Laser Grooved Buried Contact) 206

lichttechnische Größen 70
Light-Trapping 202, 206
Linienkollektoren 163
Linienkonzentratoren 162
Lithiumeisenphosphat 247
Lithium-Ionen-Akkumulator 242, 247
Löcherdichte 196, 198
logarithmisches Grenzschichtprofil 298
Low-Flow-Prinzip 117
Luftmassenstrom 300
Luftspaltleistung 335
Luftverschmutzung 442
Luv 298
Luvläufer 315

M

magnetische Feldkonstante 322
magnetische Feldstärke 322
magnetische Induktion 322
Maschinen, elektrische 318
Massendefekt 32
Massenstrom 139, 300
Master-Slave-Wechselrichter 266
maximale Konzentration 160
maximaler Solarzellenwirkungsgrad 199, 210
Maximum Power Point 219
MCFC (Karbonatschmelzen-Brennstoffzelle) 411
Meeresspiegel, Anstieg 29
Meeresspiegelanstieg 48
Meeresströmungskraftwerke 367
Mehrspeichersysteme 119
Membran-Brennstoffzelle 410
Methan 27, 414
Methanisierung 66, 414
Methanpyrolyse 406
Mie-Streuung 75
mikrokristalline Solarzelle 210
mikromorphe Solarzelle 210
mittlere Ortszeit 85
Modultests 211
Modulwechselrichter 267
Momentanleistung 321
Momentenbeiwert 306
MOSFET 254, 256
MPP (Maximum Power Point) 219
 Regelung 240
 Tracker 240, 253
MPP-Anpassungswirkungsgrad 261

N

Nachführung 91
Nachführungswinkel 169
NaNiCl-Akkumulator 251
NA-Schutz 263
Natrium-Schwefel-Akkumulator 242, 251
n-Dotierung 198
Neigung 91, 92, 165

Neigungsgewinne 93
Nennwindgeschwindigkeit 312
Netzanschluss 345
Netzbetrieb 344
Netzfrequenz 324
Netzparität 435
Nevada Solar One 182, 422
Newton-Verfahren 216
Nickel-Cadmium-Akkumulator 242, 251
Nickel-Metall-Hydrid-Akkumulator 242, 251
Niederspannungsrichtlinie 262
Niedertemperaturspeicher 144
Niedertemperaturwärme 44
Nuklidmassen 72
Nutzenergie 17

O

Oberfläche, Kugelkappe 146
Oberflächenpassivierung 206
Oberflächentexturierung 206
Oberschwingungen 258
offene Gasturbine 176
offener Receiver 183
Öffnungswinkel der Sonne 160
Oil Parity 436
Ölkrise 18
Ölparität 436
Ölpreise 428, 437
OPEX 420
optischer Wirkungsgrad 134, 166
ORC-Prozess 377
Ortszeit 85
Ossannakreis 334
Ossberger-Turbine 363
Ost-West-Ausrichtung 103
oxidkeramische Brennstoffzelle 411
Ozon 27

P

PAFC (Phosphorsäure-Brennstoffzelle) 411
Parabolrinnenkraftwerke 177
Parabolschüssel 172
Parallelregler 254
Parallelschaltung von Solarzellen 232
Parallelwiderstand 214, 225
Pariser Klimaschutzabkommen 30
partielle Oxidation 405
Passatwind 293
Passivierung 206
p-Dotierung 198
Pellets 393
Pelletslagerraum 402
Pelton-Turbine 364
PEM (Membran-Brennstoffzelle) 410
PERC-Solarzelle 206
Perez-Modell 89
Performance Ratio 278

Permanentmagnete 342
 Perowskit-Solarzelle 211
 petrothermale Geothermie 378
 Pfaffenhofen, Heizkraftwerk 403
 Pflanzenöl 394
 Phasenwinkel 319
 Phosphor 197
 Phosphorsäure-Brennstoffzelle 411
 Photoeffekt 193
 äußerer 193
 innerer 195
 Photostrom 201, 213, 222
 Photovoltaik 40, 190
 Energiewende 64
 Kosten 423, 432
 Photovoltaiksystem
 AC-gekoppeltes Batteriesystem 268
 Batteriespeicher und Wärmepumpe 272
 DC-gekoppeltes Batteriesystem 269
 Generator-gekoppeltes Batteriesystem 269
 Inselnetzsystem mit Batteriespeicher 254
 thermische Nutzung 272
 Photovoltaiksystem
 Wasserstoffspeicherung 271
 PID (Potenzialinduzierte Degradation) 262
 Pitch-Regelung 305, 314
 Pitchwinkel 305
 Planck'sches Spektrum 75
 Planck'sches Wirkungsquantum 192
 Planetenenergie 37
 Plutonium 33
 pn-Übergang 198
 Polpaarzahl 324
 Polradspannung 327
 Polradwinkel 327
 Polteilung 324
 polumschaltbare Generatoren 339
 Porenspeicher 416
 Potenzansatz nach Hellmann 299
 Potenziale
 Photovoltaik 40
 solarthermische Kraftwerke 39
 Windkraft 43
 Power-to-Gas 58, 65, 415
 Preisindex 420
 Preisstiegsrate 420
 Primärenergie 17
 Primärenergieverbrauch 19
 Deutschland 21
 Progress Ratio 434
 Pulsweitenmodulation 260
 Pumparbeit 357
 Pumpe 113, 116
 Pumpspeicherkraftwerke 355
 Punkt maximaler Leistung 219
 Punktkonzentratoren 163, 172
 PVC 131
 p-V-Diagramm 174

PWM (Pulsweitenmodulation) 260
 Pyranometer 103
 Pyrheliometer 105

Q

Quantenwirkungsgrad 200

R

Rankine-Prozess 173
 Rapsölmethylester 395
 Rauigkeitslänge 299
 Raumladungszone 198, 199
 Raummeter 392
 Rayleigh-Streuung 75
 Rayleigh-Verteilung 297
 Receiver 159, 183
 Rechteckwechselrichter 257
 Reflexionsgrad 127, 166
 Regelung
 MPP (Maximum Power Point) 240
 Pitch 305, 314
 Stall 313
 Reichweite
 Erdgas 24
 Erdöl 24
 fossile Energieträger 24
 Kohle 24
 Uran 24
 Reihenabstand, optimaler 99
 Reihenschaltung von Solarzellen 225
 Reihenverschattungen 170
 relative Luftfeuchte 149
 relative spektrale Empfindlichkeit 201
 Reserven fossiler Energieträger 24
 Resonanzwechselrichter 257
 reversible Zellspannung 412
 Rheinfelden 350, 426
 RME (Rapsölmethylester) 395
 Rohöleinheit 14
 Rohölpreise 437
 Rohrdurchmesser 139
 Rohrleitungen 138
 Rohr-Turbine 361
 Rotorblattzahl 310
 Rückflussdiode 252
 Rückseitenkontaktzellen 206
 rückseitige Wärmedämmung 128
 Rundholz 391

S

Sabatier-Prozess 415
 Sahara 80
 saisonaler Speicher 120
 Salzkavernen 408
 Sanftanlaufschaltung 337
 Sättigungsdampfdruck 148
 Sättigungsstrom 213, 222

- Säuredichte 245
- Savonius-Rotor 308
- Schalenkreuzanemometer 303
- Schattenball 105
- schattentolerante Module 228
- Scheinleistung 321, 325
- Scheitholz 391
- Scheitholzkessel 401
- Schenkelpolläufer 326
- Schichtenspeicher 118, 120
- Schleifringläufer 331
- Schlupf 331, 338
- schmutziges Silizium 203
- Schnelllaufzahl 303, 305, 312
- Schüttraummeter 392
- Schwarzchrom 132
- Schwefelhexafluorid 27
- Schwerkraftsystem 115
- Schwimmbadabdeckung 149
- Schwimmbadabsorber 131
- Schwimmbadbeheizung 112
- Schwimmbecken 147
- Sechspuls-Brückenschaltung 260
- SEGS-Parabolrinnenkraftwerke 178
- Sektorkopplung 62
- Selbstentladung 244
- selektive Beschichtung 131, 161
- Serienregler 254
- Serienwiderstand 214, 225
- Shottkydiode 252
- Shuntregler 254
- Siemens-Verfahren 203
- Silan-Prozess 203
- Silizium 195, 202
 - Abkürzungen 203
 - amorphes 209
 - metallurgisches 202
 - mikrokristallines 210
 - monokristallines 204
 - polykristallines 203
- Simulationsprogramme 448
- SOC (State of Charge) 248
- SOFC (oxidkeramische Brennstoffzelle) 411
- Software 448
- SOH (State of Health) 250
- Solarchemie 186
- solare Deckungsrate 153, 155
- solare Heizung 120, 156
- solare Nahwärme 121
- solare Schwimmbadbeheizung 112
- solare Trinkwassererwärmung 113, 153
- solarer Deckungsgrad 151
- solares Kühlen 122
- Solargenerator 232, 233
- Solarkollektoren 39, 123, 162
- Solarkonstante 73
- Solarmodul 207, 225
 - Abschattungen 227
 - Aufbau 207
 - technische Daten 233
- Solarthermie 109
- solarthermische Kraftwerke 39
 - Kosten 422, 432
- solarthermische Systeme 112
- solarthermische Wassererwärmung 109
 - Kosten 421, 432
- Solarturmkraftwerke 182
- Solarzelle 192
 - Dünnschicht 208
 - Eindiodenmodell 214
 - elektrische Beschreibung 213
 - Ersatzschaltbilder 213
 - Funktionsprinzip 195
 - Funktionsweise 192
 - Herstellung 202
 - I-U-Kennlinie 214
 - Kennlinie 220
 - Parameterbestimmung 224
 - Prinzip 199
 - Temperaturabhängigkeit 221
 - Vorgänge in 200
 - Zellparameter 219
 - Zweidiodenmodell 217
- Sonne
 - Daten 71
 - Oberflächentemperatur 73
 - Position 84
 - spezifische Ausstrahlung 72
 - Strahlungsleistung 72
- Sonnenazimut 84
- Sonnenbahndiagramm 86, 96
- Sonneneinfallswinkel 87, 165
- Sonnenenergie 38
 - direkte 38
 - Energiemenge 38
 - indirekte 41
- Sonnenhöhe 84, 100
- Sonnenofen 186
- Sonnensimulator 108
- Sonnenstand 77, 84
- Sonnenstrahlung 70
- Sparkassenformel 429
- Speicher 143
 - Batterien 242
 - Betonkugelspeicher 358
 - Erdgas 66
 - Kollektor 124
 - Konzept 66
 - Lageenergiespeicher 359
 - Medien 143
 - Möglichkeiten 255
 - Parabolrinnenkraftwerk 180
 - Pumpspeicher 355
 - saisonal 120
 - Schichten 118, 120
 - Temperatur 146

Verluste 145, 146
 Wasserkraftwerke 354
 Zeitkonstante 146
 speicherbare Wärmemenge 144
 Speicherung sensibler Wärme 144
 spektrale Empfindlichkeit 104, 201
 Spektrum 76, 132
 Spektrum AM0 75
 Spektrum AM1,5g 76
 spezifische Ausstrahlung 70, 72
 Stadtgas 414
 Stall-Regelung 313
 Standardlastprofile 283
 Standardtestbedingungen 220
 Ständer 322, 326
 Stapelzellen 210
 STC (Standardtestbedingungen) 220
 Stefan-Boltzmann-Gesetz 73
 Steinkohleeinheit 14
 Sternschaltung 324
 Stirling-Prozess 177
 Störstellenleitung 197
 Strahldichte 70, 74, 75
 Strahlungsgewinne 149
 Strahlungsleistung 70, 72
 strahlungsphysikalische Größen 70
 Strangdiode 232, 266
 Strangwechselrichter 267
 String-Ribbon-Verfahren 204
 Stromeinspeisegesetz 292
 Stromerzeugung 61
 Stromimport 187
 Stromortskurve 333
 Stromrichteraskade 343
 Strömungsverlauf 301
 Stromverbrauch 55
 Stundenwinkel 86
 Subventionen 439
 Synchrondrehzahl 324
 Synchrongenerator 340
 Synchronisation 330
 Synchronisierungsbedingungen 330
 Synchronmaschine 326
 Synthesegas 397
 System Performance Index 289

T

Tandemzellen 210
 TapChan-Anlagen 368
 Tastverhältnis 236, 240
 Taupunkttemperatur 148
 Tausend-Dächer-Programm 190
 TCO 207, 209, 262
 Technische Daten
 Asynchrongenerator 337
 Batteriespeichersysteme 270
 Dish-Stirling-Anlage 186

Itaipu-Kraftwerk 354
 Parabolrinnenkollektoren 164
 Parabolrinnenkraftwerke 179, 182
 Solarkollektor 135
 Solarmodule 233
 Solarturmkraftwerke 183
 Wechselrichter 265
 tektonische Platten 371
 Temperaturabhängigkeit bei Solarzellen 221
 Temperaturanstieg 29, 47
 Temperaturen, Geothermie 372
 Temperaturschichtung 147
 Temperatursensor 116
 Temperaturspannung 213, 221
 Texturätzen 206
 thermische Verluste 134
 thermischer Sensor 104
 thermodynamische Größen 110
 thermodynamischer Wirkungsgrad 412
 Thermografie 212
 Thermosiphonanlage 115
 Tiefentladung 246
 Tiefsetzsteller 236
 Tiegelziehverfahren 204
 Tinox 132
 Totalverlust der Kapitalanlage 445
 Transformator 262, 332
 Transmissionsgrad 127, 166
 Transmissionsverluste 147
 transparente Wärmedämmung 124
 Transport 59
 Treibhauseffekt 25
 anthropogener 25
 Indizien 29
 natürlicher 25
 Temperaturanstieg 29
 Verursachergruppen 28
 zukünftige Schäden 443
 Treibhausgas
 Distickstoffoxid 27
 Emissionen 52
 FCKW 27
 Kohlendioxid 26
 Methan 27
 Ozon 27
 Pro-Kopf-CO₂-Emissionen 28
 Schwefelhexafluorid 27
 Trinkwasserspeicher 144
 Triplezellen 210
 Tschernobyl 21, 32, 34
 T-S-Diagramm 175
 Turbine
 Dampfturbine 174
 Francis 363
 Gasturbine 176
 Kaplan 361
 ORC 376
 Ossberger 363

Pelton 364
 Pump 363
 Rohr 361
 Wind 300
 Turbinenarten 360
 Turboläufer 326
 türkiser Wasserstoff 406
 Turm 157, 182, 316
 Turmwirkungsgrad 157
 TWD (transparente Wärmedämmung) 124

U

Überdruckturbinen 361
 Übererregung 329
 Überlebenswindgeschwindigkeit 186, 312
 Übersetzungsverhältnis 239
 übersynchrone Stromrichteraskade 343
 Umfangsgeschwindigkeit 303, 305
 Umgebung, Beschreibung 94
 Umrechnungsfaktoren für Energieeinheiten 14
 Umrichter 235
 Untererregung 329
 Untertagespeicherung 414
 Uranabbau 32
 Uranvorräte 24

V

Vakuumflachkollektor 129
 Vakuumröhrenkollektor 129
 Valenzband 194
 variabler Schlupf 338
 verbotene Zone 194
 Verbraucherpreisindex 420
 Verdunstungsverluste 149
 Verluste, Wasserstoffspeicherung 408
 Verlustfaktor 353
 Verschattungen 170
 Verschmutzungen, Verluste 99
 Verzerrungsfaktor 259
 Vierquadrantenbetrieb 328
 Vollpolläufer 326
 Volumenstrom 139, 300
 Vorsätze 14
 Vorsatzzeichen 14

W

Wafer 205
 wahre Ortszeit 85
 Wärme 109
 Wärmeänderung 109
 Wärmebedarf bei Freibädern 113
 Wärmedurchgang 111
 Wärmedurchgangskoeffizient 110, 111, 145
 Wärmedurchgangszahl 110, 141, 145
 Wärmeenergie 16
 Wärmefluss 109, 110
 Wärmegestehungskosten 422, 432

Wärmekapazität 16, 110
 Wärmekraftmaschinen 173
 Wärmeleitfähigkeit 110, 111
 Wärmepumpe 45, 59, 272, 379, 384
 Kosten 427
 Wärmerohr 129
 Wärmespeicher 115
 Wärmestrahlung 127, 131, 133, 148
 Wärmestrom 110, 111
 Wärmetauscher 129, 144, 178, 180
 Wärmeträgerdurchsatz 118
 Wärmeübergangskoeffizient 110, 111, 148, 167
 Wärmeübergangszahl 141, 145
 Wärmeverluste 144
 Wärmeversorgung 56
 Warmwasserbedarf 150
 Wassergehalt 391
 Wasserkochen 15
 Wasserkraft 42, 347
 Kosten 426
 Wasserkraftanlagen 352
 Wasserstoff 404
 blauer 405
 energetische Daten 404
 Erzeugung 45
 grauer 405
 grüner 406
 Photovoltaik-Speichersystem 271
 Speichertypen 408
 Transport 59, 407
 türkiser 406
 Wasserturbinen 360
 Watt-peak (Wp) 220
 Wechselrichter 256
 Daten 265
 Master-Slave 266
 Photovoltaik 261
 Wirkungsgrad 263
 Wechselspannung 319
 Wechselstromrechnung 319
 Weibull-Verteilung 296
 Wellenkraftwerke 368
 Wellenlängen 74
 Weltenergieverbrauch 18
 Western Mill 42
 Wh-Wirkungsgrad 244
 Widerstandsbeiwert 302
 Widerstandskraft 302, 304
 Widerstandslast 233
 Widerstandsläufer 302
 Wind
 Dargebot 293
 Entstehung 293
 geostrophischer 299
 Geschwindigkeit 295
 Geschwindigkeitsverteilungen 295
 Leistung 300
 Nachführung 315

- Richtung 298
- Stärke 294
- Windkraft 42, 292
 - Energiewende 64
- Windkraftanlagen 308
 - Anlagenaufbau 316
 - Ertrag 344
 - getriebelose 342
 - horizontale Drehachse 309
 - in Deutschland 43
 - Komponenten 310
 - Kosten 425, 433
 - vertikale Drehachse 308
- Wirkleistung 321, 325
- Wirkungsgrad 16
 - Aufwindkraftwerk 157
 - Batterieladung 244
 - Betonkugelspeicher 358
 - Biomasseproduktion 388
 - Brennstoffzelle 412
 - CEC (California Energy Commission) 264
 - Euro 263
 - Generator 365
 - Gleichspannungswandler 235
 - Kollektorkreis 152
 - konzentrierender Kollektor 168
 - Kraftwerke in Deutschland 16
 - Lageenergiespeicher 360
 - Methanisierung 416

- optischer 134, 166
- Pumpspeicherkraftwerk 357
- Solarkollektor 134
- Solarzelle 199, 209, 210, 221
- Turbine 364
- Wasserkraftwerk 353
- Wasserstofferzeugung 416
- Wechselrichter 263
- Windkraftanlage 302
 - zusammengeschaltete Turbinen 366
- Wirtschaftlichkeitsberechnung 419
 - Kritik 444
 - mit Kapitalverzinsung 429
 - ohne Kapitalverzinsung 420

Z

- ZEBRA-Batterie 251
- Zeigerdiagramm 328
- Zeitkonstante des Speichers 146
- Zellspannung 225, 242, 412
- Zenitwinkel 87
- Zentrifugalkraft 192
- Zirkulationsverluste 141
- Zonenziehverfahren 204
- zweiachsige Nachführung 92
- Zweidiodenmodell 217
- Zweikreisssystem 116, 117
- Zweispeichersysteme 119