

Leseprobe

Volker Quaschnig

Regenerative Energiesysteme

Technologie - Berechnung - Simulation

ISBN (Buch): 978-3-446-44267-2

ISBN (E-Book): 978-3-446-44333-4

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-44267-2>

sowie im Buchhandel.



Vorwort

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 im ersten und elften Kapitel 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 neunten Auflage

Das große Interesse für dieses zum Standardlehrbuch gewordene 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.

Das Reaktorunglück von Fukushima und 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.

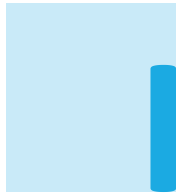
Vorherige Auflagen des Buches wurden bereits in mehrere Sprachen übersetzt. Diese neunte Auflage wurde erneut vollständig aktualisiert und um wichtige neue Entwicklungen erweitert.

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 September 2014

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	24
1.5	Kernenergie contra Treibhauseffekt	30
1.5.1	Kernspaltung	30
1.5.2	Kernfusion	33
1.6	Nutzung erneuerbarer Energien	34
1.6.1	Geothermische Energie	35
1.6.2	Planetenenergie	36
1.6.3	Sonnenenergie	36
1.6.3.1	Nutzung der direkten Sonnenenergie	37
1.6.3.2	Nutzung der indirekten Sonnenenergie	40
1.7	Energiewende und Klimaschutz	44
1.7.1	Szenarien für den globalen Klimawandel	44
1.7.2	Internationaler Klimaschutz	48
1.7.3	Energiewende und Klimaschutz in Deutschland	50
1.7.3.1	Entwicklung der Kohlendioxidemissionen in Deutschland	50
1.7.3.2	Regenerative Energieversorgung in Deutschland	52
1.7.3.3	Umbau der Energieversorgung	56
2	Sonnenstrahlung	58
2.1	Einleitung	58
2.2	Der Fusionsreaktor Sonne	59
2.3	Sonnenstrahlung auf der Erde	63
2.4	Bestrahlungsstärke auf der Horizontalen	69
2.5	Sonnenposition und Einfallswinkel	72
2.6	Bestrahlungsstärke auf der geneigten Ebene	76
2.6.1	Direkte Strahlung auf der geneigten Ebene	76
2.6.2	Diffuse Strahlung auf der geneigten Ebene	77
2.6.3	Bodenreflexion	78
2.6.4	Strahlungsgewinn durch Neigung oder Nachführung	79
2.7	Berechnung von Abschattungsverlusten	82
2.7.1	Aufnahme der Umgebung	82
2.7.2	Bestimmung des direkten Abschattungsgrades	84
2.7.3	Bestimmung des diffusen Abschattungsgrades	85
2.7.4	Gesamtermittlung der Abschattungen	86

2.7.5	Optimaler Abstand bei aufgeständerten Solaranlagen	87
2.8	Solarstrahlungsmesstechnik und Sonnensimulatoren	91
2.8.1	Messung der globalen Bestrahlungsstärke	91
2.8.2	Messung der direkten und der diffusen Bestrahlungsstärke	93
2.8.3	Satellitenmessungen	93
2.8.4	Künstliche Sonnen	96
3	Nicht konzentrierende Solarthermie.....	97
3.1	Grundlagen	97
3.2	Solarthermische Systeme.....	100
3.2.1	Solare Schwimmbadbeheizung	100
3.2.2	Solare Trinkwassererwärmung.....	101
3.2.2.1	Schwerkraft- oder Thermosiphonanlagen	103
3.2.2.2	Anlagen mit Zwangsumlauf	104
3.2.3	Solare Heizungsunterstützung	107
3.2.4	Rein solare Heizung.....	108
3.2.5	Solare Nahwärmeversorgung.....	109
3.2.6	Solares Kühlen.....	110
3.3	Solarkollektoren.....	111
3.3.1	Speicherkollektoren	112
3.3.2	Flachkollektoren.....	114
3.3.3	Vakuumröhrenkollektoren	117
3.4	Kollektorabsorber	118
3.5	Kollektorleistung und Kollektorwirkungsgrad.....	121
3.6	Rohrleitungen	126
3.6.1	Leitungsaufheizverluste	129
3.6.2	Zirkulationsverluste.....	129
3.7	Speicher	131
3.7.1	Trinkwasserspeicher.....	132
3.7.2	Schwimmbetten	135
3.8	Anlagenauslegung.....	138
3.8.1	Nutzwärmebedarf	138
3.8.2	Solarer Deckungsgrad und Nutzungsgrad	139
3.8.3	Solare Trinkwasseranlagen.....	141
3.8.4	Anlagen zur solaren Heizungsunterstützung.....	142
3.8.5	Rein solare Heizung.....	144
3.9	Aufwindkraftwerke	144
4	Konzentrierende Solarthermie	147
4.1	Einleitung	147
4.2	Konzentration von Solarstrahlung	147
4.3	Konzentrierende Kollektoren	150
4.3.1	Linienkollektoren.....	151
4.3.1.1	Kollektorarten und Kollektorgeometrie.....	151
4.3.1.2	Kollektornutzleistung und Kollektorwirkungsgrad.....	153
4.3.1.3	Längenausdehnung.....	157
4.3.1.4	Parabolrinnenkollektorfelder	157
4.3.2	Punktkonzentratoren	160
4.4	Wärmekraftmaschinen	161
4.4.1	Carnot-Prozess	161
4.4.2	Clausius-Rankine-Prozess	161
4.4.3	Joule-Prozess.....	164

4.4.4	Stirling-Prozess	165
4.5	Konzentrierende solarthermische Anlagen.....	165
4.5.1	Parabolrinnenkraftwerke	165
4.5.2	Solarturmkraftwerke	170
4.5.2.1	Offener volumetrischer Receiver.....	171
4.5.2.2	Druck-Receiver.....	172
4.5.3	Dish-Stirling-Anlagen.....	173
4.5.4	Sonnenöfen und Solarchemie	174
4.6	Stromimport	175
5	Photovoltaik	178
5.1	Einleitung	178
5.2	Funktionsweise von Solarzellen	180
5.2.1	Atommodell nach Bohr	180
5.2.2	Photoeffekt	181
5.2.3	Funktionsprinzip einer Solarzelle	183
5.3	Herstellung von Solarzellen und Solarmodulen	190
5.3.1	Solarzellen aus kristallinem Silizium.....	190
5.3.2	Solarmodule mit kristallinen Zellen.....	195
5.3.3	Solarzellen aus amorphem Silizium.....	196
5.3.4	Solarzellen aus anderen Materialien	197
5.3.5	Modultests und Qualitätskontrolle	199
5.4	Elektrische Beschreibung von Solarzellen.....	200
5.4.1	Einfaches Ersatzschaltbild	200
5.4.2	Erweitertes Ersatzschaltbild (Eindiodenmodell).....	201
5.4.3	Zweidiodenmodell.....	204
5.4.4	Zweidiodenmodell mit Erweiterungsterm	204
5.4.5	Weitere elektrische Zellparameter	206
5.4.6	Temperaturabhängigkeit.....	208
5.4.7	Parameterbestimmung	211
5.5	Elektrische Beschreibung von Solarmodulen.....	212
5.5.1	Reihenschaltung von Solarzellen.....	212
5.5.2	Reihenschaltung unter inhomogenen Bedingungen	214
5.5.3	Parallelschaltung von Solarzellen	218
5.5.4	Technische Daten von Solarmodulen.....	218
5.6	Solargenerator und Last.....	220
5.6.1	Widerstandslast	220
5.6.2	Gleichspannungswandler	221
5.6.3	Tiefsetzsteller	222
5.6.4	Hochsetzsteller.....	225
5.6.5	Weitere Gleichspannungswandler	225
5.6.6	MPP-Tracker	226
5.7	Akkumulatoren	228
5.7.1	Akkumulatorarten	228
5.7.2	Bleiakkumulator	229
5.7.3	Andere Akkumulatortypen.....	234
5.7.4	Akkumulatorsysteme	235
5.7.5	Andere Speichermöglichkeiten	239
5.8	Wechselrichter	239
5.8.1	Wechselrichtertechnologie	239
5.8.1.1	Rechteckwechselrichter.....	240

5.8.1.2	Moderne Wechselrichtertopologien	243
5.8.2	Wechselrichter in der Photovoltaik.....	244
5.8.2.1	Funktionen und Aufgaben des Wechselrichters	244
5.8.2.2	Wechselrichterwirkungsgrade	246
5.8.2.3	Anlagenkonzepte	249
5.9	Photovoltaische Eigenverbrauchssysteme.....	250
5.9.1	Photovoltaische Eigenverbrauchssysteme mit Speicher	250
5.9.2	Photovoltaische Eigenverbrauchssysteme mit Heizung.....	253
5.10	Planung und Auslegung.....	255
5.10.1	Inselnetzsysteme.....	255
5.10.2	Rein Netzgekoppelte Systeme.....	258
5.10.3	Eigenverbrauchssysteme.....	260
5.10.3.1	Eigenverbrauchssysteme ohne Speicher	260
5.10.3.2	Eigenverbrauchssysteme mit Batteriespeicher	265
6	Windkraft	272
6.1	Einleitung	272
6.2	Dargebot von Windenergie.....	273
6.2.1	Entstehung des Windes.....	273
6.2.2	Angabe der Windstärke.....	274
6.2.3	Windgeschwindigkeitsverteilungen	275
6.2.4	Einfluss der Umgebung und Höhe.....	277
6.3	Nutzung der Windenergie.....	280
6.3.1	Im Wind enthaltene Leistung	280
6.3.2	Widerstandsläufer.....	282
6.3.3	Auftriebsläufer	284
6.4	Bauformen von Windkraftanlagen.....	288
6.4.1	Windkraftanlagen mit vertikaler Drehachse	288
6.4.2	Windkraftanlagen mit horizontaler Drehachse.....	289
6.4.2.1	Anlagenaufbau.....	289
6.4.2.2	Rotorblätter	290
6.4.2.3	Windgeschwindigkeitsbereiche	292
6.4.2.4	Leistungsbegrenzung und Sturmabschaltung.....	293
6.4.2.5	Windnachführung.....	295
6.4.2.6	Turm, Fundament, Getriebe und Generator.....	296
6.4.2.7	Offshore-Windkraftanlagen.....	297
6.5	Elektrische Maschinen	298
6.5.1	Elektrische Wechselstromrechnung.....	299
6.5.2	Drehfeld	302
6.5.3	Synchronmaschine	306
6.5.3.1	Aufbau	306
6.5.3.2	Elektrische Beschreibung.....	307
6.5.3.3	Synchronisation	310
6.5.4	Asynchronmaschine	310
6.5.4.1	Aufbau und Betriebszustände.....	310
6.5.4.2	Ersatzschaltbilder und Stromortskurven	312
6.5.4.3	Leistungsbilanz.....	314
6.5.4.4	Drehzahl-Drehmoment-Kennlinien und typische Generatordaten.....	315
6.6	Elektrische Anlagenkonzepte.....	317
6.6.1	Asynchrongenerator mit direkter Netzkopplung	317
6.6.2	Synchrongenerator mit direkter Netzkopplung	320

6.6.3	Synchrongenerator mit Umrichter und Zwischenkreis.....	321
6.6.4	Drehzahlregelbare Asynchrongeneratoren.....	323
6.6.5	Inselnetzanlagen	323
6.7	Netzbetrieb	324
6.7.1	Anlagenertrag.....	324
6.7.2	Netzanschluss.....	325
7	Wasserkraft	327
7.1	Einleitung	327
7.2	Dargebot der Wasserkraft	328
7.3	Wasserkraftwerke	332
7.3.1	Laufwasserkraftwerke	332
7.3.2	Speicherwasserkraftwerke	334
7.3.3	Pumpspeicherkraftwerke	335
7.4	Wasserturbinen	338
7.4.1	Turbinenarten	338
7.4.1.1	Kaplan-Turbine und Rohr-Turbine	339
7.4.1.2	Ossberger-Turbine	340
7.4.1.3	Francis-Turbine	340
7.4.1.4	Pelton-Turbine	341
7.4.2	Turbinenwirkungsgrad	341
7.5	Weitere technische Anlagen zur Wasserkraftnutzung.....	343
7.5.1	Gezeitenkraftwerke.....	343
7.5.2	Meeresströmungskraftwerke.....	344
7.5.3	Wellenkraftwerke.....	345
8	Geothermie	347
8.1	Geothermievorkommen	347
8.2	Geothermische Heizwerke	351
8.3	Geothermische Stromerzeugung	352
8.3.1	Kraftwerksprozesse	352
8.3.2	Geothermische Kraftwerke	354
8.4	Wärmepumpen.....	356
8.4.1	Kompressions-Wärmepumpen	356
8.4.2	Absorptions-Wärmepumpen.....	358
8.4.3	Adsorptions-Wärmepumpen.....	359
8.4.4	Einsatzgebiete, Planung und Ertragsberechnung.....	360
9	Nutzung der Biomasse.....	365
9.1	Vorkommen an Biomasse	365
9.1.1	Feste Bioenergieträger	367
9.1.2	Flüssige Bioenergieträger.....	371
9.1.2.1	Pflanzenöl	371
9.1.2.2	Biodiesel	372
9.1.2.3	Bioalkohole	372
9.1.2.4	Biomass-to-Liquid (BtL)-Brennstoffe.....	373
9.1.3	Gasförmige Bioenergieträger	374
9.1.4	Flächenerträge und Umweltbilanz	376
9.2	Biomasseanlagen	377
9.2.1	Biomasseheizungen.....	377
9.2.2	Biomassekraftwerke.....	380

10	Wasserstofferzeugung, Brennstoffzellen und Methanisierung	381
10.1	Wasserstofferzeugung und -speicherung	381
10.2	Brennstoffzellen.....	384
10.2.1	Einleitung	384
10.2.2	Brennstoffzellentypen.....	385
10.2.3	Wirkungsgrade und Betriebsverhalten	388
10.3	Methanisierung und Untertagespeicherung.....	390
11	Wirtschaftlichkeitsberechnungen	394
11.1	Einleitung.....	394
11.2	Energiegestehungskosten	395
11.2.1	Berechnungen ohne Kapitalverzinsung.....	395
11.2.1.1	Solarthermische Anlagen zur Trinkwassererwärmung	396
11.2.1.2	Solarthermische Kraftwerke	397
11.2.1.3	Photovoltaikanlagen	398
11.2.1.4	Windkraftanlagen	398
11.2.1.5	Wasserkraftanlagen.....	399
11.2.1.6	Geothermieranlagen.....	400
11.2.1.7	Holzpelletsheizungen.....	401
11.2.2	Berechnungen mit Kapitalverzinsung.....	402
11.2.2.1	Solarthermische Anlagen zur Trinkwassererwärmung	405
11.2.2.2	Solarthermische Kraftwerke	405
11.2.2.3	Photovoltaikanlagen	405
11.2.2.4	Windkraftanlagen	406
11.2.3	Vergütung für regenerative Energieanlagen	406
11.2.4	Zukünftige Entwicklung der Kosten für regenerative Energien.....	406
11.2.5	Kosten konventioneller Energiesysteme	409
11.3	Externe Kosten des Energieverbrauchs.....	411
11.3.1	Subventionen im Energiemarkt.....	412
11.3.2	Ausgaben für Forschung und Entwicklung	414
11.3.3	Kosten für Umwelt- und Gesundheitsschäden.....	415
11.3.4	Sonstige externe Kosten.....	416
11.3.5	Internalisierung der externen Kosten.....	416
11.4	Kritische Betrachtung der Wirtschaftlichkeitsberechnungen	418
11.4.1	Unendliche Kapitalvermehrung.....	418
11.4.2	Die Verantwortung des Kapitals.....	419
12	Simulation und die DVD zum Buch.....	421
12.1	Allgemeines zur Simulation.....	421
12.2	Die DVD zum Buch	422
12.2.1	Start und Überblick	422
12.2.2	Abbildungen	423
12.2.3	Software	423
12.2.4	Vermischtes.....	424
	Literaturverzeichnis	426
	Sachwortverzeichnis.....	434

2

2 Sonnenstrahlung

2.1 Einleitung

Die Sonne ist die mit Abstand größte regenerative Energiequelle. Erdwärme und die Planetenanziehung sind, wie im vorigen Kapitel bereits erläutert, im Vergleich zur Energie der Sonne unbedeutend. Die Sonnenstrahlung kann direkt durch solarthermische oder photovoltaische Anlagen genutzt werden. Auch die Windkraft und Wasserkraft basieren letztendlich auf der Energie der Sonne und können auch als indirekte Sonnenenergie bezeichnet werden. Da die genaue Kenntnis der Sonnenstrahlung für die Berechnung und Simulation vieler regenerativer Energiesysteme von Bedeutung ist, ist dieses Kapitel dem Themengebiet Solarstrahlung gewidmet. Es umfasst hauptsächlich Berechnungen aus dem Bereich der Photometrie. Die wichtigsten photometrischen Größen sind in Tabelle 2.1 dargestellt, wobei bei der Nutzung der Sonnenenergie hauptsächlich die strahlungsphysikalischen Größen von Bedeutung sind. Die lichttechnischen Größen beziehen sich lediglich auf den sichtbaren Anteil des Lichtes, wohingegen Solaranlagen auch den nicht sichtbaren ultravioletten und infraroten Anteil ausnutzen können.

Bei zahlreichen der folgenden Berechnungen werden physikalische Naturkonstanten benötigt, die im Anhang zusammenfassend dargestellt sind.

Tabelle 2.1 Wichtige strahlungsphysikalische und lichttechnische Größen [DIN5031]

Strahlungsphysikalische Größen			Lichttechnische Größen		
Name	Formelzeichen	Einheit	Name	Formelzeichen	Einheit
Strahlungsenergie	Q_e	Ws	Lichtmenge	Q_v	lm s
Strahlungsleistung	Φ_e	W	Lichtstrom	Φ_v	lm
spezif. Ausstrahlung	M_e	W/m ²	spez. Lichtausstrahlung	M_v	lm/m ²
Strahlstärke	I_e	W/sr	Lichtstärke	I_v	cd = lm/sr
Strahldichte	L_e	W/(m ² sr)	Leuchtdichte	L_v	cd/m ²
Bestrahlungsstärke	E_e	W/m ²	Beleuchtungsstärke	E_v	lx = lm/m ²
Bestrahlung	H_e	Ws/m ²	Belichtung	H_v	lx s

Einheiten: W = Watt; m = Meter; s = Sekunde; sr = Steradian; lm = Lumen; lx = Lux; cd = Candela

2.2 Der Fusionsreaktor Sonne

Die Sonne ist der Zentralkörper unseres Sonnensystems. Es wird angenommen, dass sie bereits seit 5 Milliarden Jahren mit ihrer jetzigen Helligkeit strahlt, und ihre weitere Lebensdauer dürfte noch einmal in der gleichen Größenordnung liegen. Die Sonne besteht zu etwa 80 % aus Wasserstoff, zu 20 % aus Helium und nur zu 0,1 % aus anderen Elementen. Tabelle 2.2 enthält die wichtigsten Daten der Sonne im Vergleich zur Erde.

Tabelle 2.2 Daten von Sonne und Erde

	Sonne	Erde	Verhältnis
Durchmesser	1 391 320 km	12 756 km	1 : 109
Umfang	4 370 961 km	40 075 km	1 : 109
Oberfläche	$6,081 \cdot 10^{12} \text{ km}^2$	$5,101 \cdot 10^8 \text{ km}^2$	1 : 11 897
Volumen	$1,410 \cdot 10^{18} \text{ km}^3$	$1,0833 \cdot 10^{12} \text{ km}^3$	1 : 1 297 590
Masse	$1,9891 \cdot 10^{30} \text{ kg}$	$5,9742 \cdot 10^{24} \text{ kg}$	1 : 332 946
Mittlere Dichte	$1,409 \text{ g/cm}^3$	$5,516 \text{ g/cm}^3$	1 : 0,26
Schwerebeschleunigung (Oberfläche)	$274,0 \text{ m/s}^2$	$9,81 \text{ m/s}^2$	1 : 28
Oberflächentemperatur	5 777 K	288 K	1 : 367
Mittelpunkttemperatur	15 000 000 K	6 700 K	1 : 2 200

Die Strahlungsleistung der Sonne stammt aus **Kernfusionsprozessen**. Hierbei werden über verschiedene Zwischenreaktionen vier Wasserstoffkerne (Protonen ^1p) zu einem Heliumkern (Alpha-Teilchen $^4\alpha$) verschmolzen, der aus zwei Neutronen ^1n und zwei positiv geladenen Protonen ^1p besteht. Dabei werden zwei Positronen e^+ und zwei Neutrinos ν_e erzeugt. Die Gleichung der Bruttoreaktion, die in Bild 2.1 illustriert ist, lautet somit:

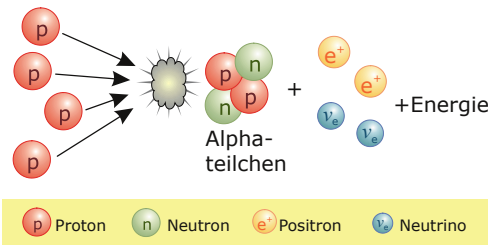


Bild 2.1 Fusion von vier Wasserstoffkernen zu einem Heliumkern (Alpha-Teilchen)

Werden die Massen der atomaren Bauteile vor und nach der Reaktion gegenübergestellt, lässt sich feststellen, dass die Gesamtmasse nach der Reaktion abgenommen hat. Die entsprechenden Teilchenmassen können aus Tabelle 2.3 entnommen werden.

Die Massendifferenz Δm berechnet sich über

$$\Delta m = 4 \cdot m(^1\text{p}) - m(^4\alpha) - 2 \cdot m(\text{e}^+) \quad (2.2)$$

zu $\Delta m = 4 \cdot 1,00727647 \text{ u} - 4,0015060883 \text{ u} - 2 \cdot 0,00054858 \text{ u} = 0,02650263 \text{ u}$.

Tabelle 2.3 Verschiedene Teilchen- und Nuklidmassen ($1 \text{ u} = 1,660565 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$)

Teilchen bzw. Nuklid	Masse	Teilchen bzw. Nuklid	Masse
Elektron (e^-)	0,00054858 u	Wasserstoff (1H)	1,007825032 u
Proton (1p)	1,00727647 u	Helium (4He)	4,002603250 u
Neutron (1n)	1,008664923 u	Alphateilchen (4α)	4,0015060883 u

Bei dieser Rechnung wurde die Masse der Neutrinos ν_e vernachlässigt. Die Masse eines Positrons e^+ entspricht der eines Elektrons e^- .

Die Gesamtmasse aller nach der Fusion entstandenen Teilchen ist somit geringer als die Summe aller an der Fusion beteiligten Teilchen vor der Reaktion. Der Massedefekt Δm erklärt sich durch die Umwandlung von Δm in frei werdende Energie ΔE , wobei ΔE über die Beziehung

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2 \quad (2.3)$$

berechnet werden kann. Mit $c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ ergibt sich die bei einer Fusion freigesetzte Energie zu $\Delta E = 3,955 \cdot 10^{-12} \text{ J} = 24,687 \text{ MeV}$. Die unterschiedlichen Massen und die damit verbundene Energiedifferenz lassen sich über die sogenannte Bindungsenergie E_b eines Korns ${}^{N+Z}\text{K}$ erklären. Ein Atomkern besteht aus N Neutronen ${}^1\text{n}$ und Z Protonen ${}^1\text{p}$. Beim Zusammenbau des Atomkerns aus Protonen und Neutronen muss, damit ein stabiler Kern entsteht, dessen Bindungsenergie frei werden. Die Bindungsenergie eines Heliumkerns kann aus der Massendifferenz zwischen dem Alphateilchen und zwei Neutronen plus zwei Protonen ermittelt werden.

Bei der obigen Betrachtung wurden die Elektronen in der Atomhülle jeweils vernachlässigt und nur die Atomkerne betrachtet. Bei einem Wasserstoffatom ${}^1\text{H}$ befinden sich ein Elektron, bei einem Heliumatom ${}^4\text{He}$ zwei Elektronen in der Hülle. Zwei der vier Elektronen der Wasserstoffatome finden sich im Heliumatom wieder. Die anderen beiden Elektronen annihilieren mit den Positronen, das heißt, die zwei Elektronen und die zwei Positronen werden in Strahlungsenergie umgewandelt. Diese Strahlungsenergie entspricht also dem Vierfachen der Masse eines Elektrons beziehungsweise der Strahlungsenergie von 2,044 MeV.

Insgesamt wird also bei der Fusionsreaktion die Gesamtenergie von 26,731 MeV freigesetzt. Diese kleine Energiemenge ist an sich noch nicht aufsehenerregend. Doch durch die große Zahl von verschmelzenden Kernen summiert sich die dabei in jeder Sekunde frei werdende Energie zu der großen Summe von $3,8 \cdot 10^{26} \text{ Ws}$.

Pro Sekunde verliert die Sonne 4,3 Millionen Tonnen an Masse ($\Delta \dot{m} = 4,3 \cdot 10^9 \text{ kg/s}$). Hieraus ergibt sich die Strahlungsleistung $\Phi_{e,S}$ der Sonne:

$$\Phi_{e,S} = \Delta \dot{m} \cdot c^2 = 3,845 \cdot 10^{26} \text{ W} . \quad (2.4)$$

Wird dieser Wert durch die Sonnenoberfläche A_{Sonne} dividiert, ergibt sich die **spezifische Ausstrahlung der Sonne**:

$$M_{e,S} = \frac{\Phi_{e,S}}{A_{\text{Sonne}}} = 63,3 \frac{\text{MW}}{\text{m}^2} . \quad (2.5)$$

Jeder Quadratmeter der Sonnenoberfläche gibt die Strahlungsleistung von 63,3 MW ab. Ein Viertel Quadratkilometer der Sonnenoberfläche strahlt im Jahr mit rund 500 EJ so viel

Energie ab, dass diese Menge dem aktuellen Primärenergiebedarf der ganzen Erde entspricht. Von dieser Energie erreicht jedoch nur ein geringer Teil die Erde.

Man kann die Sonne idealerweise als schwarzen Körper betrachten. Somit lässt sich über das **Stefan-Boltzmann-Gesetz**

$$M_e(T) = \sigma \cdot T^4 \quad (2.6)$$

die **Oberflächentemperatur der Sonne** (T_{Sonne}) bestimmen. Mit der Stefan-Boltzmann-Konstanten $\sigma = 5,67051 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$ ergibt sich

$$T_{\text{Sonne}} = \sqrt[4]{\frac{M_{e,S}}{\sigma}} = 5777 \text{ K} . \quad (2.7)$$

Wird eine Hüllkugel mit einem Radius, der dem mittleren Abstand vom Erd- zum Sonnenmittelpunkt ($r_{\text{SE}} = 1,496 \cdot 10^8 \text{ km}$) entspricht, um die Sonne gebildet, tritt durch die Oberfläche A_{SE} der Hüllkugel die gleiche Gesamtstrahlungsleistung wie durch die Sonnenoberfläche A_{S} (Bild 2.2). Die auf einen Quadratmeter bezogene spezifische Ausstrahlung $M_{e,S}$ der Sonne ist jedoch deutlich größer als die Bestrahlungsstärke E_e auf der Hüllkugel.

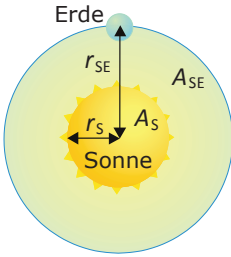


Bild 2.2 Durch die Kugeloberfläche mit dem Radius r_{SE} tritt die gleiche Strahlungsleistung wie durch die Sonnenoberfläche

Über $M_{e,S} \cdot A_{\text{S}} = E_e \cdot A_{\text{SE}}$ sowie durch Einsetzen von $A_{\text{SE}} = 4 \cdot \pi \cdot r_{\text{SE}}^2$ berechnet sich schließlich die Bestrahlungsstärke E_e zu

$$E_e = M_{e,S} \cdot \frac{A_{\text{S}}}{A_{\text{SE}}} = M_{e,S} \cdot \frac{r_{\text{S}}^2}{r_{\text{SE}}^2} . \quad (2.8)$$

Sie entspricht der extraterrestrischen Bestrahlungsstärke der Erde, die sich auf der Hüllkugel befindet. Da der Abstand zwischen Sonne und Erde nicht konstant ist, sondern sich im Verlauf eines Jahres zwischen $1,471 \cdot 10^8 \text{ km}$ und $1,521 \cdot 10^8 \text{ km}$ bewegt, schwankt die Bestrahlungsstärke E_e zwischen $1315 \text{ W}/\text{m}^2$ und $1406 \text{ W}/\text{m}^2$. Der Mittelwert wird als **Solarkonstante** E_0 bezeichnet und beträgt

$$E_0 = 1360,8 \pm 0,5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} . \quad (2.9)$$

Dieser Wert kann außerhalb der Erdatmosphäre auf einer Fläche senkrecht zur Sonneneinstrahlung gemessen werden [Kop11]. Die Schwankung im Verlauf des Jahres in Abhängigkeit vom Tag des Jahres J lässt sich wie folgt angeben:

$$E_0(J) = E_0 \cdot (1 + 0,0334 \cdot \cos(0,9855^\circ \cdot J - 2,7198^\circ)) . \quad (2.10)$$

Neben der gesamten Bestrahlungsstärke, die auf die Erde trifft, ist auch die spektrale Zusammensetzung der Sonnenstrahlung für die Nutzung der Solarenergie von großer Be-

deutung. Die Sonnenstrahlung wird durch Photonen verschiedener Wellenlänge λ übertragen. Im Wellenlängenbereich von 380 bis 780 nm beziehungsweise 0,38 bis 0,78 μm ist die Strahlung für den Menschen sichtbar. Tabelle 2.4 zeigt die zu verschiedenen Wellenlängen gehörenden Farben an.

Tabelle 2.4 Wellenlängen verschiedener Farbtöne

Farbton	Wellenlänge in nm	Farbton	Wellenlänge in nm
Ultraviolett	<380	Gelbgrün	560 ... 570
Purpurblau (Violett)	380 ... 450	Grünlichgelb	570 ... 575
Blau	450 ... 482	Gelb	575 ... 580
Grünlichblau	482 ... 487	Gelblichorange	580 ... 585
Cyan (Blaugrün)	487 ... 492	Orange	585 ... 595
Bläulichgrün	492 ... 497	Rötlichorange	595 ... 620
Grün	497 ... 530	Rot	620 ... 780
Gelblichgrün	530 ... 560	Infrarot	>780

1 μm = 1000 nm, 1 nm = 0,001 μm

Die Sonne kann näherungsweise als schwarzer Körper betrachtet werden, dessen Temperatur der Sonnenoberflächentemperatur von 5777 K entspricht. Die von der Wellenlänge λ abhängige **spektrale Strahldichte** $L_{e,\lambda}$ eines schwarzen Körpers für eine absolute Temperatur T lässt sich nach Planck über

$$L_{e,\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda \cdot T}\right) - 1} \cdot \frac{1}{\Omega_0} \tag{2.11}$$

berechnen. Hierbei sind

$$c_1 = 2 \cdot h \cdot c^2 = 1,191 \cdot 10^{-16} \text{ Wm}^2 \tag{2.12} \quad \text{und} \quad c_2 = \frac{h \cdot c}{k} = 1,439 \cdot 10^{-2} \text{ m K} . \tag{2.13}$$

$\Omega_0 = 1 \text{ sr}$ wird nur zur Korrektur der Einheitenbilanz benötigt, wobei Steradian sr die Einheit des Raumwinkels ist. Strahlt ein Körper gleichmäßig in alle Richtungen des Raumes ab, berechnet sich daraus die von der Wellenlänge λ abhängige spektrale spezifische Ausstrahlung $M_{e,\lambda}$ und die spektrale Bestrahlungsstärke

$$E_{e,\lambda} = \frac{r_s^2}{r_{SE}^2} \cdot M_{e,\lambda} = \frac{r_s^2}{r_{SE}^2} \cdot \pi \cdot L_{e,\lambda} . \tag{2.14}$$

Die zuvor bestimmte Bestrahlungsstärke E_e ergibt sich aus der Integration der von der Wellenlänge abhängigen spektralen Bestrahlungsstärke $E_{e,\lambda}$:

$$E_e = \int E_{e,\lambda} d\lambda . \tag{2.15}$$

In der Realität lässt sich eine geringfügige Abweichung des Spektrums zum idealen Verlauf eines schwarzen Körpers messen (Bild 2.3). Das reale Spektrum außerhalb der Erdatmosphäre trägt die Bezeichnung Spektrum AM0. Bei diesem sogenannten extraterres-

trischen Spektrum entfallen 7 % der Bestrahlungsstärke auf den ultravioletten, 47 % auf den sichtbaren und 46 % auf den infraroten Bereich.

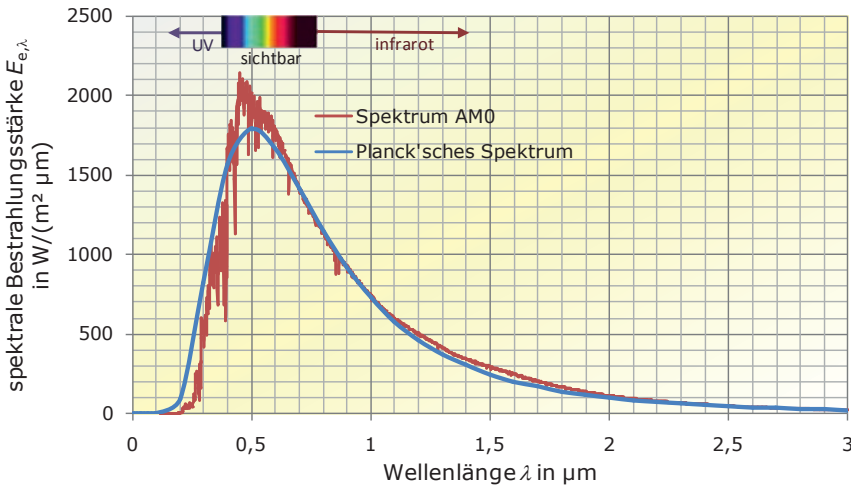


Bild 2.3 Spektrum AM0 und Planck'sches Spektrum für einen Temperaturstrahler mit einer Temperatur von 5777 K

2.3 Sonnenstrahlung auf der Erde

Auf der Erde werden üblicherweise Werte für die Bestrahlungsstärke gemessen, die unter denen im Weltall liegen. Die Ursache sind Reduktionen der Bestrahlungsstärke, die beim Durchdringen der Atmosphäre auftreten. Hierbei unterscheidet man zwischen:

- Reduktion durch Reflexion an der Atmosphäre,
- Reduktion durch Absorption der Atmosphäre (hauptsächlich: O_3 , H_2O , O_2 , CO_2),
- Reduktion durch Rayleigh-Streuung,
- Reduktion durch Mie-Streuung.

Die Reduktion durch **Absorption** wird durch verschiedene Gasteilchen der Atmosphäre verursacht. Die Absorption der verschiedenen Bestandteile der Atmosphäre, wie Wasserdampf, Ozon, Sauerstoff und Kohlendioxid, ist stark selektiv und erfasst nur einige Bereiche des Sonnenspektrums.

In Bild 2.4 ist jeweils das Spektrum AM0 im Weltall und AM1,5g auf der Erde dargestellt. Beim Spektrum AM1,5g sind deutlich die Einbrüche infolge von Absorption verschiedener Gaspertikel zu erkennen. Das Spektrum AM1,5g kann bei klarem Himmel bei einer Sonnenhöhe von $41,8^\circ$ auf einer um 37° in Richtung Sonne geneigten Ebene gemessen werden. Die gesamte Bestrahlungsstärke dieses Spektrums entspricht 1000 W/m^2 . Das Spektrum AM1,5g dient als Referenz bei der Klassifizierung von Photovoltaikmodulen.

Die Reduktion durch **Rayleigh-Streuung** erfolgt an molekularen Bestandteilen der Luft, deren Durchmesser deutlich kleiner als die Wellenlänge des Lichtes ist. Der Einfluss der Rayleigh-Streuung nimmt mit abnehmender Wellenlänge des Lichtes zu.



Sachwortverzeichnis

A

Abfluss 333
Abregelverluste 266
Abschattung 82, 86, 214
Abschattungsgrad
 diffuser 85, 86
 direkter 85
Abschattungsverluste 88
Abschattungswinkel 88
Absorber 119, 149, 171
 Beschichtung 119, 149
 Fläche 101
 Rohr 157
 selektiver 120
 Temperatur 149
Absorption der Atmosphäre 63
Absorptionsgrad 115, 154
Absorptionskoeffizient 190
Absorptions-Wärmepumpe 358
Abzinsung 403
Adsorptions-Wärmepumpe 359
AFC (alkalische Brennstoffzelle) 385
Ah-Wirkungsgrad 230
Air Mass 64
Akkumulator 228
 am Solargenerator 236
 Arten 228
 Autarkiegrade 269
 Blei 229, 253
 Daten 229
 Eigenverbrauchsanteile 269
 Kapazität 230
 Lithium-Ionen 229, 234, 253
 NaNiCl 235
 NaS 229, 235
 NiCd 229
 NiMH 229, 234
 Systeme 235, 251, 252
Akzeptor 186
Albedo 79
alkalische Brennstoffzelle 385

alkalische Elektrolyse 382
Alphateilchen 59
AM (Air Mass) 64
Andasol 170, 397
Anlagenkonzepte für Windkraftanlagen 317
Anlaufwindgeschwindigkeit 292
Annuitätsfaktor 404
Anstellwinkel 285
Anströmgeschwindigkeit 285
Antireflexionsschicht 193
Arbeitspunkt 220, 236
Asynchrongenerator 317, 323
Asynchronmaschine 310
Atomkraft *siehe* Kernenergie
aufgeständerte Solaranlagen 87
Auftriebsbeiwert 284, 285
Auftriebskraft 284
Auftriebsläufer 284
Aufwindkraftwerk 144
Ausbauabfluss 333
Ausbaufallhöhe 333
Auslegungswindgeschwindigkeit 292
äußerer Photoeffekt 181
Ausstrahlung, spezifische 60
Autarkie 253, 264
Autarkiegrad 264, 268, 270
Azimutantrieb 295

B

B2-Brückenschaltung 240, 243
B6-Brückenschaltung 243
Bandabstand 182, 209
 verschiedener Halbleiter 183
Bändermodell 182
Batterie *siehe* Akkumulator
Batteriekapazität 257
Batteriespeichersysteme 252
Beaufort-Skala 275
Beihilfen 412
Beschichtung, selektive 119
Bestrahlung 58

Bestrahlungsstärke 58, 61
 diffuse 70, 77
 direkte 70, 76
 geneigte Ebene 76
 horizontale 69
 Messung 91, 93
 Tagesgänge 66
Betriebskosten 395
Betz'scher Leistungsbeiwert 281
Beweglichkeit 184
Bioalkohole 372
Biodiesel 372
Bioenergieträger
 feste 367
 flüssige 371
 gasförmige 374
Bioethanol 372
Biogas 375, 390
Biokraftstoffserträge 377
Biomasse 365
 Heizungen 377
 Kraftwerke 380
 Potenziale 366
 Produktion 42
 Vorkommen 365
Biomass-to-Liquid 373
Blatteinstellwinkel 285
Bleiakkumulator 229, 253
 Betriebszustände 232
 Ladezustand 231
Blindleistung 301, 305
Blindleistungskompensation 319
Blindwiderstand 301
Blockingdiode 235, 238
Bodenreflexion 78
Bohr'sches Atommodell 180
Bohrturm 350
Boltzmann-Konstante 184
Bor 186
Brennstoffzelle 43, 384
Brückenschaltung 240
BtL-Brennstoffe 373
Bulb-Turbine 340
Bypassdioden 215

C

C4-Pflanzen 366
Cadmiumtellurid 183, 197
Carnot-Prozess 161
CCS 46
CEC-Wirkungsgrad 247
Cermet 120
CIS-Solarzelle 197
Clausius-Rankine-Prozess 161
COP (Coefficient of Performance) 361
Coulomb-Kraft 180
CVD (Chemical Vapor Deposition) 191

D

dachintegrierte Photovoltaikanlage 179
Dampfkraftwerke 161
Dampfreformierung 381
Dänisches Konzept 317
Darrieus-Rotor 289
Deckungsgrad, solarer 139
Defektelektronen 184
Deklination 73
dezentrale Versorgung 57
DHÜ 176
Dichte der Luft 280
Dielektrizitätskonstante 180
Differenzierung der Globalstrahlung 71
diffuser Abschattungsgrad 86
diffuser Strahlungsanteil 72
Diffusionsspannung 186
Diffusstrahlung 70, 77
Diode 200
Diodendurchbruch 204
Diodenfaktor 200, 212
Diodensättigungsstrom 212
direkter Abschattungsgrad 85
Direktmethanol-Brennstoffzelle 386
Direktstrahlung 70, 76
Dish-Stirling-Anlagen 173
Distickstoffoxid 26
Divergenz 148
DMFC (Direktmethanol-Brennstoffzelle) 386
Donator 185
doppelte Abdeckung 116
dreieckiges Silizium 191
Drehfeld 302, 303
Drehmoment 286
 Asynchronmaschine 315
 Synchronmaschine 309
Drehstrommaschinen 299
Drehstromwicklung 303
Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie 315
Dreieckschaltung 304
Druck-Receiver 172
Dünnschichtzellen 196
Durchström-Turbine 340

E

EEG 272, 406, 413
Effektivwert 300
EFG-Verfahren 192
Eigenleitung 184
Eigenverbrauchsanteil 261, 268, 270
Eigenverbrauchssysteme 250, 260
Einblattrotoren 290
Eindiodenmodell 201
Einfallswinkel 75, 153
Einfallswinkelkorrekturfaktor 125, 154
Einkreisssystem 104
Eintakt-Sperrwandler 226

elektrische Feldkonstante 180
 elektrische Leitfähigkeit 185
 elektrische Maschinen 298
 elektrische Wechselstromrechnung 299
 elektrischer Widerstand 220
 Elektrizitätsversorgung 52
 Elektroherd 16
 Elektrolumineszenz 199
 Elektrolyse 55, 382
 Elektrolyt 230, 232, 387
 Elektronendichte 184, 185
 Elektronenmasse 180
 elektrotechnische Größen 179
 Elementarladung 180
 Elevation 72
 Emissionsgrad 115, 136
 empfehlenswerte Rohrdurchmesser 128
 Empfindlichkeit, spektrale 189
 Endenergie 17
 Endenergieverbrauch 22
 Endverluste 153
 Energie
 Einheiten 14
 Elektron 181
 Energieerhaltungssatz 15
 Gestehungskosten 396, 404
 Importe 411
 kinetische 280
 Photon 181
 Preise 410
 Pumpspeicherkraftwerke 335
 Wind 280
 Energiebänder 181
 Energiebedarf
 Deutschland 20, 52
 Entwicklung 18
 Entwicklung weltweit 44
 Welt 18
 zukünftiger 44
 Energiewende 50
 Energiezustände 182
 ENS 246
 enthalpische Zellspannung 388
 Entladestrom 232
 Entladetiefe 231
 Entropie 163
 Erde
 Bestrahlungsstärke 61
 Daten 59
 Primärenergieverbrauch 19
 Erdgas 390, 401
 Erdgasspeicher 54, 392
 Erdkern 347
 Erdkollektor 363
 Erdöl 19, 401, 410
 Erdsonden 363
 Erdwärmekollektor 363
 Erfahrungskurve 407

Erfahrungswert 408
 Erneuerbare-Energien-Gesetz 272, 406, 413
 Erregerstrom 307
 Erregerwicklung 306
 Ersatzschaltbild
 Asynchronmaschine 313
 Asynchronmaschine, vereinfachtes 314
 Solarzelle, vereinfachtes 201
 Solarzelle, Zweidiodenmodell 204
 Synchronmaschine 308
 Ethanol 372
 Euro-Wirkungsgrad 246
 EVA (Ethylen-Vinyl-Acetat) 196
 EVA-Vernetzungsanalyse 199
 externe Kosten 411, 416
 externer Quantenwirkungsgrad 188

F

FAME (Fettsäuremethylester) 372
 Farbstoffzellen 198
 Farbtöne 62
 Feldeffekttransistor 237, 239
 Feldstärke, magnetische 302
 feste Bioenergieträger 367
 Festmeter 369
 Fettsäuremethylester 372
 Fischer-Tropsch-Synthese 374
 Flächennutzungsgrad 87
 Flachkollektor 114
 Absorber 119
 Frontscheibe 115
 Kollektorgehäuse 116
 Flasher 96
 Flicker 325
 Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) 26
 Flusssdichte, magnetische 302
 flüssige Bioenergieträger 371
 Forschung und Entwicklung 414
 Fotovoltaik *siehe* Photovoltaik
 Fourier-Analyse 241
 Francis-Turbine 340
 Freileitungen 175
 Fresnelkollektor 150
 Frischwasserstation 106
 Frontscheibe 115
 Fukushima 33
 Füllfaktor 207

G

Gallium-Arsenit 183
 gasförmige Bioenergieträger 374
 Gasherd 16
 Gasturbine 164
 Gasungsspannung 232
 Generator 298
 geostrophischer Wind 279
 Geothermie 35, 347

Kosten 400
Geothermische Heizwerke 351
Geothermische Kraftwerke 352
Gesamtkosten 395
Geschichte der Photovoltaik 178
Geschichte der Windkraft 272
gespeicherte Wärme 130
Getriebe 296
getriebelose Windkraftanlage 322
Gezeitenkraftwerke 36, 343
Gibbs'sches Potenzial 388
Giermotor 295
Gierwinkel 295
Gleichdruckturbine 338
Gleichspannungswandler 221
Gleitzahl 285
globale Bestrahlung 67
globale Zirkulation 274
Gondel 296
Grenzschichtprofil 278, 279
Grid Parity 408
Grid-Parity 261
Gütegrad 361

H

H5-Schaltung 244
Hadley-Zelle 273
Halbleiter 182
 direkt 190
 indirekt 190
 n-leitend 186
 p-leitend 186
Halbleitersensor 92
harmonische Analyse 241
Harrisburg 32
Häufigkeitsverteilung 275
H-Brückenschaltung 240
Heat Pipe 117
Heizwert
 Biomasse 366
 Holz 368, 369
Heliostatenfelder 160
Hellmann, Potenzansatz 279
HERIC-Schaltung 244
Heterojunction 195
Heteroübergang 195
HGÜ 176
High-Flow-Prinzip 105
Himmelsklarheit 78
Himmelstemperatur 136
HIT-Zelle 194, 208, 210, 219
Hochsetzsteller 225, 245
Höchstspannungs-Gleichstrom-Übertragung 176
Holzbriketts 368
Holzfeuchte 368
Holzhackschnitzel 370
Holzpellets 368, 370

Preise 401
Horizonthelligkeitsindex 78
Hot-Dry-Rock-Verfahren 350
Hot-Spots 215
H-Rotor 289

I

IAM *siehe* Einfallswinkelkorrekturfaktor
Importe fossiler Energieträger 411
innerer Photoeffekt 183
Inselnetzwechselrichter 245
Intergovernmental Panel on Climate Change 44
internationaler Klimaschutz 48
interner Quantenwirkungsgrad 188
intrinsische Trägerdichte 184
invertierender Wandler 225
Investitionskosten 395
Ionisationsenergie 181, 185
IPCC 44
ISCCS-Kraftwerk 169
Isolator 182
Itaipu-Kraftwerk 334, 399

J

Jahresarbeitszahl 361
Jahresdauerlinie 330
Joule-Prozess 164

K

Käfigläufer 311
Kalina-Prozess 353
Kapazität (Akkumulator) 230
Kapitalvermehrung 418
Kapitalwert 403
Kaplan-Turbine 339
Karbonatschmelzen-Brennstoffzelle 387
Kavernenspeicher 392
Kernenergie 30
 Anteil an der Stromerzeugung 31
 Entwicklungskosten 414
 Kernfusion 33
 Kernspaltung 30
 Unfälle 32, 415
 Uranvorkommen 24, 31
Kernfusion 33, 59
kinetische Energie 280
Kippmoment 310, 316
Kippschlupf 316
Klimaschutzvorgaben 29
 Welt 29
Klimaveränderungen 28
Klirrfaktor 243
Kloss'sche Formel 316
Klucher-Modell 77
Kohlendioxid 25, 382
 Abscheidung 46
 Emissionen 45, 49, 50

Konzentration 26, 46
 spezifische Emissionsfaktoren 48
 Wärmepumpe 363
 Kohlepennig 412
 Kollektor 111, 151
 Austrittstemperatur 127
 Durchfluss 126
 Durchsatz 126
 Endverluste 153
 Fläche, Pro-Kopf 38
 Nutzleistung 121, 153
 Stillstandstemperatur 123, 149
 Wirkungsgrad 121, 122, 156
 Kollektorkreisnutzungsgrad 140
 Kollektorstandtemperatur 122
 komplexe Wechselstromrechnung 300
 Kompressions-Wärmepumpe 356
 Konvektion 115, 117, 121, 136
 Konversionsfaktor 122
 Konzentrationsfaktor 148
 Konzentratormodul 199
 konzentrierende Kollektoren 150
 konzentrierende Solarthermie 147
 konzentrierende solarthermische Anlagen 165
 Kosten
 externe 411, 416
 Forschung und Entwicklung 414
 Geothermie 400
 Holzpelletsheizung 401
 konventionelle Energiesysteme 409
 Naturkatastrophen 416
 Photovoltaik 398, 405
 solartherm. Wassererwärmung 396, 405
 solarthermische Kraftwerke 397, 405
 Wärmepumpe 400
 Wasserkraft 399
 Windkraft 398, 406
 Kostensenkungen 407
 Kreisfrequenz 299
 Kreisfrequenz, Elektron 180
 Kristallgitter 184
 künstliche Sonne 96
 Kupfer-Indium-Diselenid 197
 Kupferrohre 128
 Kurzschlussstrom 206
 Kværner-Verfahren 382
 Kyoto-Protokoll 48, 49

L

Laderegler 237
 Ladewirkungsgrad 230
 Ladezustandsbilanzierung 233
 Lagerraumvolumen 379
 Laminieren 196
 Längenausdehnung 157
 Längsregler 237
 Laser Grooved Buried Contact 194

Latentwärmespeicherung 132
 Läufer 306, 311
 Laufwasserkraftwerke 332
 Lee 278
 Leeläufer 295
 Leerlaufspannung 206, 210, 219, 389
 Legionellen 106
 Leistung 14, 280, 301, 324
 Pumpspeicherkraftwerk 336
 Turbine 342
 Wasser 332
 Wasserkraftwerk 333
 Wind 280
 Leistungsbeiwert 281, 287
 Approximation 287
 nach Betz 281
 Schalenkreuzanemometer 283
 Widerstandsläufer 284
 Leistungsdichte des Windes 272
 Leistungsfaktor 302
 Leistungstransistoren 239
 Leistungszahl 361
 Leiter 182
 Leitfähigkeit 182, 185
 Leitungen 126, 236
 Leitungsaufheizverluste 129
 Leitungsband 182
 Leitungsverluste 236
 Leuchtdichte 58
 LGBC (Laser Grooved Buried Contact) 194
 lichttechnische Größen 58
 Light-Trapping 190, 194
 Linienkollektoren 151
 Linienkonzentratoren 150
 Lithium-Ionen-Akkumulator 229, 234, 253
 Löcherdichte 184, 186
 logarithmisches Grenzschichtprofil 278
 Low-Flow-Prinzip 105
 Luftmassenstrom 280
 Luftspaltleistung 315
 Luftverschmutzung 415
 Luv 278
 Luvläufer 295

M

magnetische Feldkonstante 302
 magnetische Feldstärke 302
 magnetische Induktion 302
 Maschinen, elektrische 298
 Massendefekt 30
 Massenstrom 127, 280
 Master-Slave-Wechselrichter 249
 maximale Konzentration 148
 maximaler Solarzellenwirkungsgrad 187, 198
 Maximum Power Point 206
 MCFC (Karbonatschmelzen-Brennstoffzelle) 387
 Meeresspiegel, Anstieg 28

Meeresspiegelanstieg 46
Meeresströmungskraftwerke 344
Mehrspeichersysteme 107
Membran-Brennstoffzelle 386
Methan 25, 390
Methanisierung 55, 390
Mie-Streuung 63
mikrokristalline Solarzelle 197
mikromorphe Solarzelle 197
mittlere Ortszeit 73
Modultests 199
Modulwechselrichter 250
Momentanleistung 301
Momentenbeiwert 286
MOSFET 237, 239
MPP (Maximum Power Point) 206
 Regelung 227
 Tracker 226, 237
MPP-Anpassungswirkungsgrad 245

N

Nachführung 79
Nachführungswinkel 157
NaNiCl-Akkumulator 235
NA-Schutz 246
Natrium-Schwefel-Akkumulator 229, 235
n-Dotierung 186
Neigung 79, 80, 153
Neigungsgewinne 81
Nennwindgeschwindigkeit 292
Netzanschluss 325
Netzbetrieb 324
Netzfrequenz 304
Netzparität 408
Nevada Solar One 170, 397
Newton-Verfahren 203
Nickel-Cadmium-Akkumulator 229, 234
Nickel-Metall-Hydrid-Akkumulator 229, 234
Niederspannungsrichtlinie 246
Niedertemperaturspeicher 132
Niedertemperaturwärme 42
Nuklidmassen 60
Nutzenergie 17

O

Oberfläche, Kugelkappe 134
Oberflächenpassivierung 194
Oberflächentexturierung 194
Oberschwingungen 241
offene Gasturbine 164
offener Receiver 171
Öffnungswinkel der Sonne 148
Oil Parity 409
Ölkrise 18
Ölparität 409
Ölpreise 401, 410
optischer Wirkungsgrad 122, 154

ORC-Prozess 354
Ortszeit 73
Ossannakreis 314
Ossberger-Turbine 340
Ost-West-Ausrichtung 91
oxidkeramische Brennstoffzelle 387
Ozon 26

P

PAFC (Phosphorsäure-Brennstoffzelle) 386
Parabolrinnenkraftwerke 165
Parabolschüssel 160
Parallelregler 237
Parallelschaltung von Solarzellen 218
Parallelwiderstand 202, 212
partielle Oxidation 381
Passatwind 273
Passivierung 194
p-Dotierung 186
Pellets 370
Pelletslagerraum 379
Pelton-Turbine 341
PEM (Membran-Brennstoffzelle) 386
Perez-Modell 77
Performance Ratio 260
petrothermale Geothermie 355
Pfaffenhofen, Heizkraftwerk 380
Pflanzenöl 371
Phasenwinkel 299
Phosphor 185
Phosphorsäure-Brennstoffzelle 386
Photoeffekt 181
 äußerer 181
 innerer 183
Photostrom 189, 200, 209
Photovoltaik 39, 178
 Kosten 398, 405
Photovoltaiksystem
 AC-gekoppeltes Batteriesystem 251
 Batteriespeicher und Wärmepumpe 255
 DC-gekoppeltes Batteriesystem 252
 Inselnetzsystem mit Batteriespeicher 237
 thermische Nutzung 254
Photovoltaiksystem
 Wasserstoffspeicherung 253
PID (Potenzialinduzierte Degradation) 245
Pitch-Regelung 285, 294
Pitchwinkel 286
Planck'sches Spektrum 63
Planck'sches Wirkungsquantum 180
Planetenergie 36
Plutonium 32
pn-Übergang 186
Polpaarzahl 304
Polradspannung 307
Polradwinkel 307
Polteilung 304

polumschaltbare Generatoren 319
 Porenspeicher 392
 Potenzansatz nach Hellmann 279
 Potenziale
 Photovoltaik 39
 solarthermische Kraftwerke 37
 Windkraft 41
 Power-to-Gas 54, 391
 Preisindex 395
 Preissteigerungsrate 395
 Primärenergie 17
 Primärenergieverbrauch 19
 Deutschland 21
 Progress Ratio 407
 Pulsweitenmodulation 243
 Pumparbeit 337
 Pumpe 101, 104
 Pumpspeicherkraftwerke 335
 Punkt maximaler Leistung 206
 Punktkonzentratoren 151, 160
 PVC 119
 p-V-Diagramm 162
 PWM (Pulsweitenmodulation) 243
 Pyranometer 91
 Pyrheliometer 93

Q

Quantenwirkungsgrad 188

R

Rankine-Prozess 161
 Rapsölmethylester 372
 Rauigkeitslänge 279
 Raumladungszone 186, 187
 Raummeter 369
 Rayleigh-Streuung 63
 Rayleigh-Verteilung 277
 Receiver 147, 171
 Rechteckwechselrichter 240
 Reduktionsverpflichtungen 49
 Reflexionsgrad 115, 154
 Regelung
 MPP (Maximum Power Point) 227
 Pitch 285, 294
 Stall 293
 Reichweite
 Erdgas 23
 Erdöl 23
 fossile Energieträger 23
 Kohle 23
 Uran 24
 Reihenabstand, optimaler 87
 Reihenschaltung von Solarzellen 212
 Reihenschattungen 158
 relative Luftfeuchte 137
 relative spektrale Empfindlichkeit 189
 Reserven fossiler Energieträger 23

Resonanzwechselrichter 240
 reversible Zellspannung 388
 Rheinfelden 330, 399
 RME (Rapsölmethylester) 372
 Rohöleinheit 14
 Rohölpreise 410
 Rohrdurchmesser 127
 Rohrleitungen 126
 Rohr-Turbine 339
 Rotorblattzahl 290
 Rückflussdiode 235
 Rückseitenkontaktzellen 194
 rückseitige Wärmedämmung 116
 Rundholz 368

S

Sabatier-Prozess 390
 Sahara 68
 saisonaler Speicher 108
 Salzkavernen 384
 Sanftanlaufschaltung 317
 Sättigungsdampfdruck 136
 Sättigungsstrom 200, 209
 Säuredichte 231
 Savonius-Rotor 288
 Schalenkreuzanemometer 283
 Schattenball 93
 schattentolerante Module 215
 Scheinleistung 301, 305
 Scheitholz 368
 Scheitholzkessel 378
 Schenkelpolläufer 306
 Schichtenspeicher 106, 108
 Schleifringläufer 311
 Schlupf 311, 318
 schmutziges Silizium 191
 Schnellaufzahl 283, 285, 292
 Schüttraummeter 369
 Schwarzchrom 120
 Schwerkraftsystem 103
 Schwimmbadabdeckung 137
 Schwimmbadabsorber 119
 Schwimmbadbeheizung 100
 Schwimmbecken 135
 Sechspuls-Brückenschaltung 243
 SEGS-Parabolrinnenkraftwerke 166
 Selbstentladung 230
 selektive Beschichtung 119, 149
 Serienregler 237
 Serienwiderstand 201, 212
 Shottkydiode 235
 Shuntregler 237
 Siemens-Verfahren 191
 Silan-Prozess 191
 Silizium 183, 190
 Abkürzungen 191
 amorphes 196

- metallurgisches 190
- mikrokristallines 197
- monokristallines 192
- polykristallines 191
- Simulationsprogramme 421
- SOFC (oxidkeramische Brennstoffzelle) 387
- Software 421
- Solarchemie 174
- solare Deckungsrate 141, 143
- solare Heizung 108, 144
- solare Nahwärme 109
- solare Schwimmbadbeheizung 100
- solare Trinkwassererwärmung 101, 141
- solarer Deckungsgrad 139
- solares Kühlen 110
- Solargenerator 218, 220
- Solarkollektoren 38, 111, 150
- Solarkonstante 61
- Solarmodul 195, 212
 - Abschattungen 214
 - Aufbau 195
 - technische Daten 219
- Solarthermie 97
- solarthermische Kraftwerke 37
 - Kosten 397, 405
- solarthermische Systeme 100
- solarthermische Wassererwärmung 97
 - Kosten 396, 405
- Solarturmkraftwerke 170
- Solarzelle 180
 - Dünnschicht 196
 - Eindiodenmodell 201
 - elektrische Beschreibung 200
 - Ersatzschaltbilder 200
 - Funktionsprinzip 183
 - Funktionsweise 180
 - Herstellung 190
 - I-U-Kennlinie 201
 - Kennlinie 207
 - Parameterbestimmung 211
 - Prinzip 187
 - Temperaturabhängigkeit 208
 - Vorgänge in 188
 - Zellparameter 206
 - Zweidiodenmodell 204
- Sonne
 - Daten 59
 - Oberflächentemperatur 61
 - Position 72
 - spezifische Ausstrahlung 60
 - Strahlungsleistung 60
- Sonnenazimut 72
- Sonnenbahndiagramm 74, 84
- Sonneneinfallswinkel 75, 153
- Sonnenenergie 36
 - direkte 37
 - Energiemenge 36
 - indirekte 40
- Sonnenhöhe 72, 88
- Sonnenofen 174
- Sonnensimulator 96
- Sonnenstand 65, 72
- Sonnenstrahlung 58
- Sparkassenformel 402
- Speicher 131
 - Erdgas 54
 - Kollektor 112
 - Konzept 54
 - Medien 131
 - Möglichkeiten 239
 - Parabolrinnenkraftwerk 168
 - saisonal 108
 - Schichten 106, 108
 - Temperatur 134
 - Verluste 133, 134
 - Wasserkraftwerke 334
 - Zeitkonstante 134
- speicherbare Wärmemenge 132
- Speicherung sensibler Wärme 132
- spektrale Empfindlichkeit 92, 189
- Spektrum 64, 120
- Spektrum AM0 63
- Spektrum AM1,5g 64
- spezifische Ausstrahlung 58, 60
- Stadtgas 390
- Stall-Regelung 293
- Standardlastprofile 264
- Standardtestbedingungen 207
- Ständer 302, 306
- Stapelzellen 198
- STC (Standardtestbedingungen) 207
- Stefan-Boltzmann-Gesetz 61
- Steinkohleeinheit 14
- Sternschaltung 304
- Stirling-Prozess 165
- Störstellenleitung 185
- Strahldichte 58, 62, 63
- Strahlungsgewinne 137
- Strahlungsleistung 58, 60
- strahlungsphysikalische Größen 58
- Strangdiode 218, 249
- Strangwechselrichter 250
- String-Ribbon-Verfahren 192
- Stromeinspeisegesetz 272
- Stromimport 175
- Stromortskurve 313
- Stromrichterkaskade 323
- Strömungsverlauf 281
- Stundenwinkel 74
- Subventionen 412
- Synchrondrehzahl 304
- Synchrongenerator 320
- Synchronisation 310
- Synchronisierungsbedingungen 310
- Synchronmaschine 306
- Synthesegas 374

T

Tandemzellen 198
 TapChan-Anlagen 346
 Tastverhältnis 222, 226
 Taupunkttemperatur 136
 Tausend-Dächer-Programm 178
 TCO 195, 196, 245
 Technische Daten
 Asynchrongenerator 317
 Batteriespeichersysteme 252
 Dish-Stirling-Anlage 174
 Itaipu-Kraftwerk 334
 Parabolrinnenkollektoren 152
 Parabolrinnenkraftwerke 167, 170
 Solarkollektor 123
 Solarmodule 219
 Solarturmkraftwerke 171
 Wechselrichter 248
 tektonische Platten 348
 Temperaturabhängigkeit bei Solarzellen 208
 Temperaturanstieg 28, 45
 Temperaturen, Geothermie 349
 Temperaturschichtung 135
 Temperatursensor 104
 Temperaturspannung 200, 208
 Texturätzen 194
 thermische Verluste 122
 thermischer Sensor 92
 thermodynamische Größen 98
 thermodynamischer Wirkungsgrad 388
 Thermografie 199
 Thermosiphonanlage 103
 Tiefentladung 232
 Tiefsetzsteller 222
 Tiegelziehverfahren 192
 Tinox 120
 Totalverlust der Kapitalanlage 419
 Transformator 245, 312
 Transmissionsgrad 115, 154
 Transmissionsverluste 135
 transparente Wärmedämmung 112
 Transport 56
 Treibhauseffekt 24
 anthropogener 24
 Indizien 28
 natürlicher 24
 Temperaturanstieg 28
 Verursachergruppen 27
 zukünftige Schäden 415
 Treibhausgas
 Distickstoffoxid 26
 Emissionen 49
 FCKW 26
 Kohlendioxid 25
 Methan 25
 Ozon 26
 Pro-Kopf-CO₂-Emissionen 27

Trinkwasserspeicher 132
 Triplezellen 198
 Tschernobyl 21, 31, 32
 T-S-Diagramm 163
 Turbine
 Dampfturbine 162
 Francis 340
 Gasturbine 164
 Kaplan 339
 ORC 353
 Ossberger 340
 Pelton 341
 Pump 341
 Rohr 339
 Wind 280
 Turbinenarten 338
 Turboläufer 306
 Turm 145, 170, 296
 Turmwirkungsgrad 145
 TWD (transparente Wärmedämmung) 112

U

Überdruckturbinen 338
 Übererregung 309
 Überlebenswindgeschwindigkeit 174, 292
 Übersetzungsverhältnis 226
 übersynchrone Stromrichteraskade 323
 Umfangsgeschwindigkeit 283, 285
 Umgebung, Beschreibung 82
 Umrechnungsfaktoren für Energieeinheiten 14
 Umrichter 221
 Untererregung 309
 Untertagespeicherung 390
 Uranabbau 30
 Uranvorräte 24

V

Vakuumflachkollektor 117
 Vakuumröhrenkollektor 117
 Valenzband 182
 variabler Schlupf 318
 verbotene Zone 182
 Verbraucherpreisindex 395
 Verdunstungsverluste 137
 Verluste, Wasserstoffspeicherung 384
 Verlustfaktor 333
 Verschattungen 158
 Verschmutzungen, Verluste 87
 Verzerrungsfaktor 242
 Vierquadrantenbetrieb 308
 Vollpolläufer 306
 Volumenstrom 127, 280
 Vorsätze 14
 Vorsatzzeichen 14

W

Wafer 193

- wahre Ortszeit 73
 - Wärme 97
 - Wärmeänderung 97
 - Wärmebedarf bei Freibädern 101
 - Wärmedurchgang 99
 - Wärmedurchgangskoeffizient 98, 99, 133
 - Wärmedurchgangszahl 98, 129, 133
 - Wärmeenergie 16
 - Wärmefluss 97, 98
 - Wärmegeheimungskosten 397, 405
 - Wärmekapazität 16, 98
 - Wärmekeftmaschinen 161
 - Wärmeleitfähigkeit 98, 99
 - Wärmepumpe 43, 255, 356, 361
 - Kosten 400
 - Wärmerohr 117
 - Wärmespeicher 103
 - Wärmestrahlung 115, 119, 121, 136
 - Wärmestrom 98, 99
 - Wärmetauscher 117, 132, 166, 168
 - Wärmeträgerdurchsatz 106
 - Wärmeübergangskoeffizient 98, 99, 136, 155
 - Wärmeübergangszahl 129, 133
 - Wärmeverluste 132
 - Wärmeversorgung 55
 - Warmwasserbedarf 138
 - Wassergehalt 368
 - Wasserkochen 15
 - Wasserkraft 40, 327
 - Kosten 399
 - Wasserkraftanlagen 332
 - Wasserstoff 381
 - energetische Daten 381
 - Erzeugung 43
 - Photovoltaik-Speichersystem 253
 - Speichertypen 383
 - Transport 384
 - Wasserturbinen 338
 - Watt-peak (Wp) 207
 - Wechselrichter 239
 - Daten 248
 - Master-Slave 249
 - Photovoltaik 244
 - Wirkungsgrad 246
 - Wechselspannung 299
 - Wechselstromrechnung 299
 - Weibull-Verteilung 276
 - Wellenkraftwerke 345
 - Wellenlängen 62
 - Weltenergieverbrauch 18
 - Western Mill 41
 - Wh-Wirkungsgrad 230
 - Widerstandsbeiwert 282
 - Widerstandskraft 282, 284
 - Widerstandslast 220
 - Widerstandsläufer 282
 - Wind
 - Dargebot 273
 - Entstehung 273
 - geostrophischer 279
 - Geschwindigkeit 275
 - Geschwindigkeitsverteilungen 275
 - Leistung 280
 - Nachführung 295
 - Richtung 278
 - Stärke 274
 - Windkraft 41, 272
 - Windkraftanlagen 288
 - Anlagenaufbau 296
 - Energieertrag 399
 - Ertrag 324
 - getriebeiose 322
 - horizontale Drehachse 289
 - in Deutschland 41
 - Komponenten 290
 - Kosten 398, 406
 - vertikale Drehachse 288
 - Wirkleistung 301, 305
 - Wirkungsgrad 16
 - Aufwindkraftwerk 145
 - Batterieladung 230
 - Biomasseproduktion 365
 - Brennstoffzelle 388
 - CEC (California Energy Commission) 247
 - Euro 246
 - Generator 342
 - Gleichspannungswandler 221
 - Kollektorkreis 140
 - konzentrierender Kollektor 156
 - Kraftwerke in Deutschland 16
 - Methanisierung 392
 - optischer 122, 154
 - Pumpspeicherkraftwerk 337
 - Solarkollektor 122
 - Solarzelle 187, 197, 198, 208
 - Turbine 341
 - Wasserkraftwerk 333
 - Wasserstoffherzeugung 392
 - Wechselrichter 246
 - Windkraftanlage 282
 - zusammengeschaltete Turbinen 343
 - Wirtschaftlichkeitsberechnung 394
 - Kritik 418
 - mit Kapitalverzinsung 402
 - ohne Kapitalverzinsung 395
- ## Z
- ZEBRA-Batterie 235
 - Zeigerdiagramm 308
 - Zeitkonstante des Speichers 134
 - Zellspannung 213, 229, 388
 - Zenitwinkel 75
 - zentrale Versorgung 57
 - Zentrifugalkraft 180
 - Zirkulationsverluste 129

Zonenziehverfahren 192
zweiachsige Nachführung 80
Zweidiodenmodell 204

Zwei-Grad-Ziel 29, 46
Zweikreisssystem 104, 105
Zweispeichersysteme 107