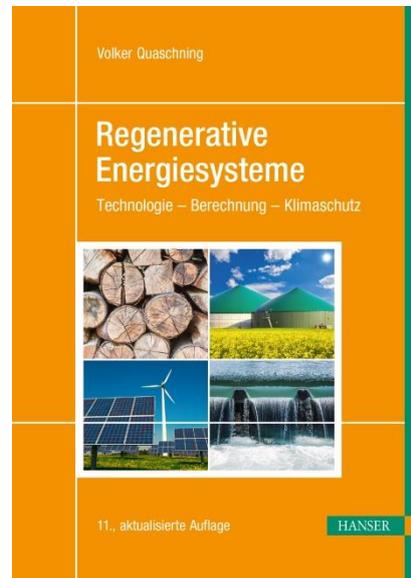


HANSER



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	Planetenergie	37
1.6.3	Sonnenenergie	38
1.6.3.1	Nutzung der direkten Sonnenenergie	38
1.6.3.2	Nutzung der indirekten Sonnenenergie	41
1.7	Energiewende und Klimaschutz	46
1.7.1	Szenarien für den globalen Klimawandel	46
1.7.2	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	Punkt-konzentratoren	172
4.4	Wärme-kraftmaschinen	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 NetZRückspeisung.....	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	Geothermieanlagen	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

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

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

Tabelle 1.2 Vorsätze und Vorsatzzeichen

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

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

Als Beispiel soll ein Zeitschriftenartikel aus den 1990er-Jahren über ein Solarhaus dienen. Er beschreibt eine Photovoltaikanlage mit einer Gesamtleistung von 2,2 kW. Später im Text beklagte der Autor, dass die damalige Vergütung pro kW bei der Einspeisung in das öffentliche Netz mit 0,087 € äußerst gering war. Den Einheiten nach zu urteilen, wurde die Anlage nach Leistung (Einheit der Leistung = kW) vergütet, das wären für die gesamte Anlage dann $2,2 \text{ kW} \cdot 0,087 \text{ €/kW} = 0,19 \text{ €}$. Sicher, Solarstrom wurde lange Zeit schlecht vergütet, doch mit knapp 20 Euro-Cents insgesamt musste sich wohl kein Anlagenbesitzer 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 $\vartheta_1 = 15 \text{ °C}$ auf $\vartheta_2 = 98 \text{ °C}$ zu erwärmen, berechnet sich mit der Wärmekapazität c von Wasser $c_{\text{H}_2\text{O}} = 4,187 \text{ kJ}/(\text{kg K})$ über

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

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

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

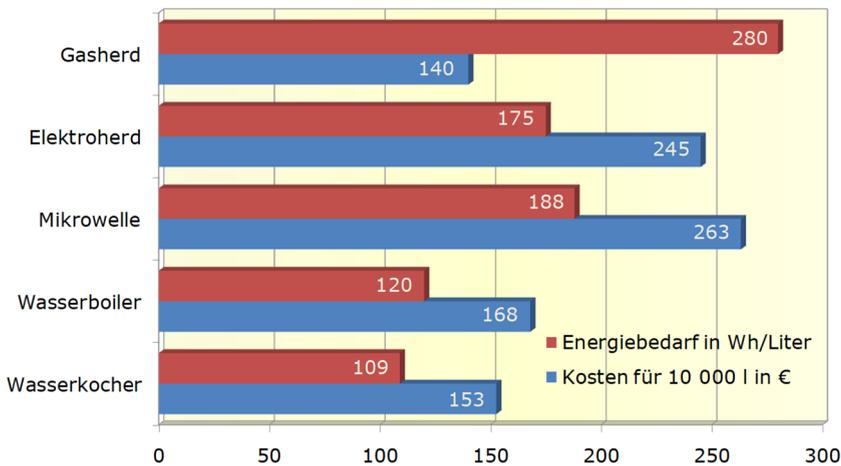


Bild 1.1 „So viel kostet kochendes Wasser“ aus dem Jahr 1994 [Sti94]

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.

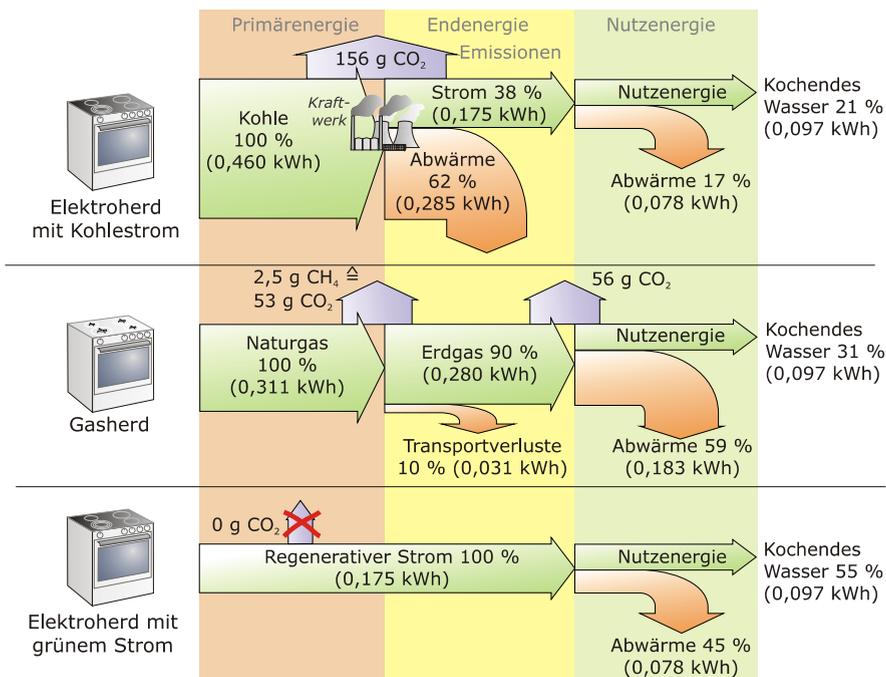


Bild 1.2 Energiewandlungskette, Verluste und Kohlendioxidemissionen beim Wasserkochen

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 Wassererwärmung durch Elektro- und Gasherd sind nochmals in Bild 1.2 vergleichend gegenübergestellt.

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

1.2 Entwicklung des Energiebedarfs

1.2.1 Entwicklung des Weltenergiebedarfs

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

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

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

Die Dimensionen des Anstiegs des Weltenergieverbrauchs zeigt Bild 1.3, welches die jährliche Erdölförderung darstellt, wobei 1 Mio. t Rohöl etwa $42 \text{ PJ} = 42 \cdot 10^{15} \text{ J}$ 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
 Biokraftstoffträge 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
 Darrius-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
 dreieckiges 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
 Einblattrotoren 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
 Holz hackschnitzel 393
 Holzpellets 391, 393
 Preise 428
 Horizontally Index 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
 - Kohlepfeffig 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
 Preissteigerungsrate 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
 Rheinfeldern 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 AMO 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
 - Stromrichtererkaskade 343
 - Strömungsverlauf 301
 - Stromverbrauch 55
 - Stundenwinkel 86
 - Subventionen 439
 - Synchrondrehzahl 324
 - Synchrongenerator 340
 - Synchronisation 330
 - Synchronisierbedingungen 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
 - Zweikreissystem 116, 117
 - Zweispichersysteme 119