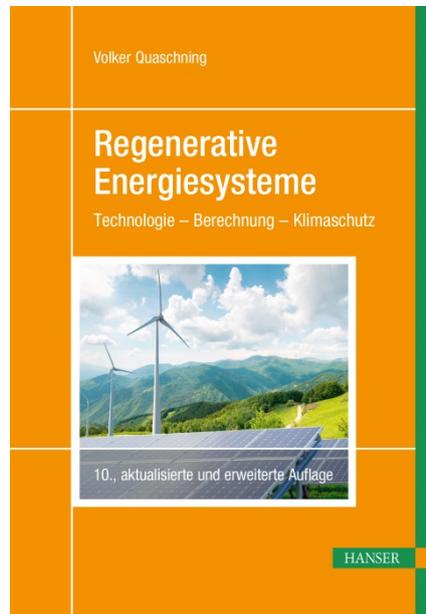


HANSER



Leseprobe

zu

„Regenerative Energiesysteme“

von Volker Quaschnig

ISBN (Buch): 978-3-446-46113-0

ISBN (E-Book): 978-3-446-46114-7

Weitere Informationen und Bestellungen unter
<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-46113-0>

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 Quaschnig

Vorwort zur zehnten 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.

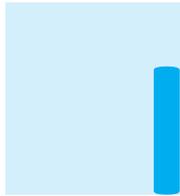
Vorherige Auflagen des Buches wurden bereits in mehrere Sprachen übersetzt. Diese zehnte Auflage wurde vollständig aktualisiert und um wichtige neue Entwicklungen erweitert.

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

Berlin, im Juni 2019

Prof. Dr. Volker Quaschnig

Hochschule für Technik und Wirtschaft HTW Berlin
www.volker-quaschnig.de



Inhaltsverzeichnis

1	Energie und Klimaschutz	13
1.1	Der Begriff Energie	13
1.2	Entwicklung des Energiebedarfs	18
1.2.1	Entwicklung des Weltenergiebedarfs.....	18
1.2.2	Entwicklung des Energiebedarfs in Deutschland.....	20
1.3	Reichweite konventioneller Energieträger	23
1.4	Der Treibhauseffekt	25
1.5	Kernenergie contra Treibhauseffekt	31
1.5.1	Kernspaltung	31
1.5.2	Kernfusion	35
1.6	Nutzung erneuerbarer Energien	35
1.6.1	Geothermische Energie	37
1.6.2	Planetenergie	37
1.6.3	Sonnenenergie	38
1.6.3.1	Nutzung der direkten Sonnenenergie.....	38
1.6.3.2	Nutzung der indirekten Sonnenenergie.....	41
1.7	Energiewende und Klimaschutz	46
1.7.1	Szenarien für den globalen Klimawandel	46
1.7.2	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	64
2	Sonnenstrahlung	68
2.1	Einleitung	68
2.2	Der Fusionsreaktor Sonne.....	69
2.3	Sonnenstrahlung auf der Erde	73
2.4	Bestrahlungsstärke auf der Horizontalen	79
2.5	Sonnenposition und Einfallswinkel	82
2.6	Bestrahlungsstärke auf der geneigten Ebene	86
2.6.1	Direkte Strahlung auf der geneigten Ebene	86
2.6.2	Diffuse Strahlung auf der geneigten Ebene.....	87
2.6.3	Bodenreflexion	88
2.6.4	Strahlungsgewinn durch Neigung oder Nachführung	89
2.7	Berechnung von Abschattungsverlusten	92
2.7.1	Aufnahme der Umgebung	92
2.7.2	Bestimmung des direkten Abschattungsgrades	94
2.7.3	Bestimmung des diffusen Abschattungsgrades	95
2.7.4	Gesamtermittlung der Abschattungen.....	96
2.7.5	Optimaler Abstand bei aufgeständerten Solaranlagen	97

2.8	Solarstrahlungsmesstechnik und Sonnensimulatoren	101
2.8.1	Messung der globalen Bestrahlungsstärke	101
2.8.2	Messung der direkten und der diffusen Bestrahlungsstärke	103
2.8.3	Satellitenmessungen	103
2.8.4	Künstliche Sonnen	106
3	Nicht konzentrierende Solarthermie.....	107
3.1	Grundlagen	107
3.2	Solarthermische Systeme.....	110
3.2.1	Solare Schwimmbadbeheizung	110
3.2.2	Solare Trinkwassererwärmung.....	111
3.2.2.1	Schwerkraft- oder Thermosiphonanlagen	113
3.2.2.2	Anlagen mit Zwangsumlauf	114
3.2.3	Solare Heizungsunterstützung	117
3.2.4	Rein solare Heizung	118
3.2.5	Solare Nahwärmeversorgung	119
3.2.6	Solares Kühlen	120
3.3	Solkollektoren.....	121
3.3.1	Speicherkollektoren	122
3.3.2	Flachkollektoren	124
3.3.3	Vakuumröhrenkollektoren	127
3.4	Kollektorabsorber	128
3.5	Kollektorleistung und Kollektorwirkungsgrad	131
3.6	Rohrleitungen	136
3.6.1	Leitungsaufheizverluste	139
3.6.2	Zirkulationsverluste	139
3.7	Speicher	141
3.7.1	Trinkwasserspeicher.....	142
3.7.2	Schwimmbekken	145
3.8	Anlagenauslegung.....	148
3.8.1	Nutzwärmebedarf	148
3.8.2	Solarer Deckungsgrad und Nutzungsgrad	149
3.8.3	Solare Trinkwasseranlagen.....	151
3.8.4	Anlagen zur solaren Heizungsunterstützung.....	152
3.8.5	Rein solare Heizung	154
3.9	Aufwindkraftwerke	154
4	Konzentrierende Solarthermie	157
4.1	Einleitung	157
4.2	Konzentration von Solarstrahlung	157
4.3	Konzentrierende Kollektoren	160
4.3.1	Linienkollektoren.....	161
4.3.1.1	Kollektorarten und Kollektorgeometrie.....	161
4.3.1.2	Kollektornutzleistung und Kollektorwirkungsgrad.....	163
4.3.1.3	Längenausdehnung.....	167
4.3.1.4	Parabolrinnenkollektorfelder	167
4.3.2	Punktkonzentratoren	170
4.4	Wärme­kraft­ma­schin­en	171
4.4.1	Carnot-Prozess	171
4.4.2	Clausius-Rankine-Prozess	171
4.4.3	Joule-Prozess.....	174
4.4.4	Stirling-Prozess	175

4.5	Konzentrierende solarthermische Anlagen.....	175
4.5.1	Parabolrinnenkraftwerke	175
4.5.2	Solarturmkraftwerke	180
4.5.2.1	Offener volumetrischer Receiver	181
4.5.2.2	Druck-Receiver.....	182
4.5.3	Dish-Stirling-Anlagen.....	183
4.5.4	Sonnenöfen und Solarchemie	184
4.6	Stromimport	185
5	Photovoltaik	188
5.1	Einleitung	188
5.2	Funktionsweise von Solarzellen	190
5.2.1	Atommodell nach Bohr	190
5.2.2	Photoeffekt	191
5.2.3	Funktionsprinzip einer Solarzelle	193
5.3	Herstellung von Solarzellen und Solarmodulen	200
5.3.1	Solarzellen aus kristallinem Silizium.....	200
5.3.2	Solarmodule mit kristallinen Zellen.....	205
5.3.3	Solarzellen aus amorphem Silizium.....	206
5.3.4	Solarzellen aus anderen Materialien.....	207
5.3.5	Modultests und Qualitätskontrolle	209
5.4	Elektrische Beschreibung von Solarzellen	211
5.4.1	Einfaches Ersatzschaltbild	211
5.4.2	Erweitertes Ersatzschaltbild (Eindiodenmodell).....	212
5.4.3	Zweidiodenmodell.....	215
5.4.4	Zweidiodenmodell mit Erweiterungsterm	215
5.4.5	Weitere elektrische Zellparameter	217
5.4.6	Temperaturabhängigkeit.....	219
5.4.7	Parameterbestimmung	222
5.5	Elektrische Beschreibung von Solarmodulen	223
5.5.1	Reihenschaltung von Solarzellen.....	223
5.5.2	Reihenschaltung unter inhomogenen Bedingungen	225
5.5.3	Parallelschaltung von Solarzellen	230
5.5.4	Technische Daten von Solarmodulen.....	230
5.6	Solargenerator und Last.....	231
5.6.1	Widerstandslast	231
5.6.2	Gleichspannungswandler	233
5.6.3	Tiefsetzsteller	234
5.6.4	Hochsetzsteller.....	236
5.6.5	Weitere Gleichspannungswandler	237
5.6.6	MPP-Tracker.....	238
5.7	Akkumulatoren	240
5.7.1	Akkumulatorarten.....	240
5.7.2	Bleiakkumulator	241
5.7.3	Lithium-Ionen-Akkumulator	245
5.7.4	Andere Akkumulatortypen.....	249
5.7.5	Akkumulatorsysteme	250
5.7.6	Andere Speichermöglichkeiten	253
5.8	Wechselrichter.....	254
5.8.1	Wechselrichtertechnologie	254
5.8.1.1	Rechteckwechselrichter.....	255
5.8.1.2	Moderne Wechselrichtertopologien	258

5.8.2	Wechselrichter in der Photovoltaik.....	259
5.8.2.1	Funktionen und Aufgaben des Wechselrichters	259
5.8.2.2	Wechselrichterwirkungsgrade	261
5.8.2.3	Anlagenkonzepte	264
5.9	Photovoltaische Eigenverbrauchssysteme.....	265
5.9.1	Photovoltaische Eigenverbrauchssysteme mit Speicher	265
5.9.2	Photovoltaische Eigenverbrauchssysteme mit Heizung	269
5.10	Planung und Auslegung.....	271
5.10.1	Inselnetzsysteme.....	271
5.10.2	Rein netzgekoppelte Systeme	274
5.10.3	Eigenverbrauchssysteme.....	277
5.10.3.1	Eigenverbrauchssysteme ohne Speicher	277
5.10.3.2	Eigenverbrauchssysteme mit Batteriespeicher	281
5.10.3.3	Thermische Nutzung und NetZRückspeisung.....	288
6	Windkraft	290
6.1	Einleitung	290
6.2	Dargebot von Windenergie.....	291
6.2.1	Entstehung des Windes.....	291
6.2.2	Angabe der Windstärke.....	292
6.2.3	Windgeschwindigkeitsverteilungen	293
6.2.4	Einfluss der Umgebung und Höhe	295
6.3	Nutzung der Windenergie.....	298
6.3.1	Im Wind enthaltene Leistung	298
6.3.2	Widerstandsläufer.....	300
6.3.3	Auftriebsläufer	302
6.4	Bauformen von Windkraftanlagen.....	306
6.4.1	Windkraftanlagen mit vertikaler Drehachse	306
6.4.2	Windkraftanlagen mit horizontaler Drehachse.....	307
6.4.2.1	Anlagenaufbau.....	307
6.4.2.2	Rotorblätter	308
6.4.2.3	Windgeschwindigkeitsbereiche	310
6.4.2.4	Leistungsbegrenzung und Sturmabschaltung	311
6.4.2.5	Windnachführung	313
6.4.2.6	Turm, Fundament, Getriebe und Generator.....	314
6.4.2.7	Offshore-Windkraftanlagen.....	315
6.5	Elektrische Maschinen	316
6.5.1	Elektrische Wechselstromrechnung.....	317
6.5.2	Drehfeld	320
6.5.3	Synchronmaschine	324
6.5.3.1	Aufbau	324
6.5.3.2	Elektrische Beschreibung.....	325
6.5.3.3	Synchronisation	328
6.5.4	Asynchronmaschine	328
6.5.4.1	Aufbau und Betriebszustände.....	328
6.5.4.2	Ersatzschaltbilder und Stromortskurven	330
6.5.4.3	Leistungsbilanz.....	332
6.5.4.4	Drehzahl-Drehmoment-Kennlinien und typische Generatordaten.....	333
6.6	Elektrische Anlagenkonzepte.....	335
6.6.1	Asynchrongenerator mit direkter Netzkopplung	335
6.6.2	Synchrongenerator mit direkter Netzkopplung	338
6.6.3	Synchrongenerator mit Umrichter und Zwischenkreis.....	339

6.6.4	Drehzahlregelbare Asynchrongeneratoren	341
6.6.5	Inselnetzanlagen	341
6.7	Netzbetrieb	342
6.7.1	Anlagenertrag	342
6.7.2	Netzanschluss	343
7	Wasserkraft	345
7.1	Einleitung	345
7.2	Dargebot der Wasserkraft	346
7.3	Wasserkraftwerke	350
7.3.1	Laufwasserkraftwerke	350
7.3.2	Speicherwasserkraftwerke	352
7.3.3	Pumpspeicherkraftwerke	353
7.3.4	Betonkugelspeicher und Lageenergiespeicher	356
7.4	Wasserturbinen	358
7.4.1	Turbinenarten	358
7.4.1.1	Kaplan-Turbine und Rohr-Turbine	359
7.4.1.2	Ossberger-Turbine	361
7.4.1.3	Francis-Turbine	361
7.4.1.4	Pelton-Turbine	362
7.4.2	Turbinenwirkungsgrad	362
7.5	Weitere technische Anlagen zur Wasserkraftnutzung	364
7.5.1	Gezeitenkraftwerke	364
7.5.2	Meeresströmungskraftwerke	365
7.5.3	Wellenkraftwerke	366
8	Geothermie	368
8.1	Geothermievorkommen	368
8.2	Geothermische Heizwerke	372
8.3	Geothermische Stromerzeugung	373
8.3.1	Kraftwerksprozesse	373
8.3.2	Geothermische Kraftwerke	375
8.4	Wärmepumpen	377
8.4.1	Kompressions-Wärmepumpen	377
8.4.2	Absorptions-Wärmepumpen	379
8.4.3	Adsorptions-Wärmepumpen	380
8.4.4	Einsatzgebiete, Planung und Ertragsberechnung	381
9	Nutzung der Biomasse	386
9.1	Vorkommen an Biomasse	386
9.1.1	Feste Bioenergieträger	388
9.1.2	Flüssige Bioenergieträger	392
9.1.2.1	Pflanzenöl	392
9.1.2.2	Biodiesel	393
9.1.2.3	Bioalkohole	393
9.1.2.4	Biomass-to-Liquid (BtL)-Brennstoffe	394
9.1.3	Gasförmige Bioenergieträger	395
9.1.4	Flächenerträge und Umweltbilanz	397
9.2	Biomasseanlagen	398
9.2.1	Biomasseheizungen	398
9.2.2	Biomassekraftwerke	401

10	Wasserstoffherzeugung, Brennstoffzellen und Methanisierung	402
10.1	Wasserstoffherzeugung und -speicherung	402
10.2	Brennstoffzellen.....	405
10.2.1	Einleitung	405
10.2.2	Brennstoffzellentypen.....	406
10.2.3	Wirkungsgrade und Betriebsverhalten	409
10.3	Methanisierung und Untertagespeicherung.....	411
11	Wirtschaftlichkeitsberechnungen	415
11.1	Einleitung	415
11.2	Energiegestehungskosten	416
11.2.1	Berechnungen ohne Kapitalverzinsung.....	416
11.2.1.1	Solarthermische Anlagen zur Trinkwassererwärmung	417
11.2.1.2	Solarthermische Kraftwerke	418
11.2.1.3	Photovoltaikanlagen	419
11.2.1.4	Windkraftanlagen	421
11.2.1.5	Wasserkraftanlagen	422
11.2.1.6	Geothermieanlagen.....	422
11.2.1.7	Holzpelletsheizungen.....	424
11.2.2	Berechnungen mit Kapitalverzinsung.....	425
11.2.2.1	Solarthermische Anlagen zur Trinkwassererwärmung	428
11.2.2.2	Solarthermische Kraftwerke	428
11.2.2.3	Photovoltaikanlagen	428
11.2.2.4	Windkraftanlagen	429
11.2.3	Vergütung für regenerative Energieanlagen	429
11.2.4	Zukünftige Entwicklung der Kosten für regenerative Energien	430
11.2.5	Kosten konventioneller Energiesysteme	432
11.3	Externe Kosten des Energieverbrauchs.....	434
11.3.1	Subventionen im Energiemarkt.....	435
11.3.2	Ausgaben für Forschung und Entwicklung	437
11.3.3	Kosten für Umwelt- und Gesundheitsschäden.....	438
11.3.4	Sonstige externe Kosten.....	439
11.3.5	Internalisierung der externen Kosten.....	439
11.4	Kritische Betrachtung der Wirtschaftlichkeitsberechnungen	440
11.4.1	Unendliche Kapitalvermehrung.....	441
11.4.2	Die Verantwortung des Kapitals.....	442
12	Simulation und Downloads zum Buch.....	444
12.1	Allgemeines zur Simulation.....	444
12.2	Der Downloadbereich zum Buch	445
12.2.1	Start und Überblick	445
12.2.2	Abbildungen und Software-Links	446
12.2.3	Vermischtes.....	448
	Literaturverzeichnis	449
	Sachwortverzeichnis	458

rend andere Länder kaum Erfolge haben oder sogar noch steigende Emissionen aufweisen.

Die Emissionen der meisten Schwellen- und Entwicklungsländer, die in der Regel auf einem viel niedrigeren Niveau als der entwickelten Länder liegen, nehmen hingegen kontinuierlich zu. Besonders groß ist der Einfluss der Zunahme der Kohlendioxidemissionen aus der Verbrennung fossiler Energieträger, die inzwischen mehr als zwei Drittel aller Treibhausgase ausmachen. Sollen die Ziele des Pariser Klimaschutzabkommen wirklich erreicht werden, muss in den nächsten Jahren eine radikale Kehrtwende bei der Gestaltung der weltweiten Energieversorgung erfolgen.

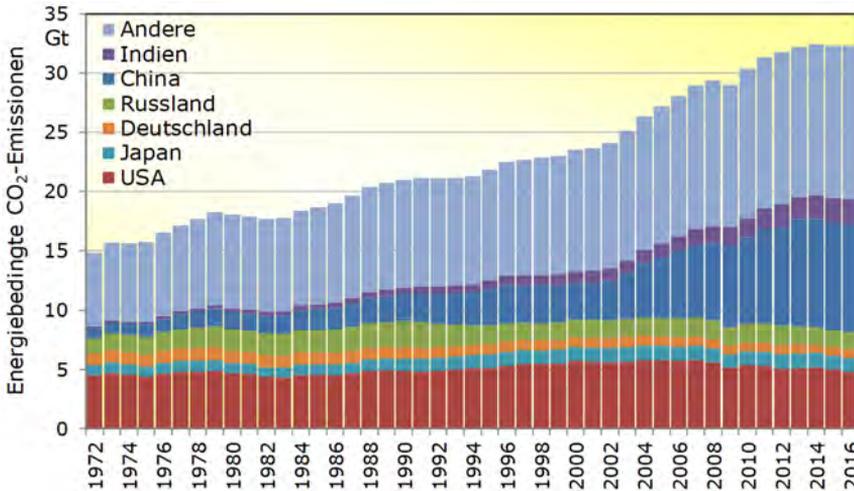


Bild 1.22 Weltweite Entwicklung der energiebedingten Kohlendioxidemissionen (Daten: [IEA18])

1.7.3 Energiewende und Klimaschutz in Deutschland

1.7.3.1 Entwicklung der Kohlendioxidemissionen in Deutschland

In Deutschland dominiert Kohlendioxid aus der Verbrennung fossiler Energieträger mit einem Anteil von über 80 % die Treibhausgasemissionen. Während Deutschland Anfang der 2000er-Jahre noch als Vorbild im Klimaschutz galt, hat es diese Rolle inzwischen eingebüßt. Dabei standen die Klimaschutzerfolge in den 1990er-Jahren bereits auf wackligen Beinen. Die wirtschaftlichen Umbrüche in Ostdeutschland nach der Wiedervereinigung sorgten damals für einen deutlichen Rückgang der Kohlendioxidemissionen (Bild 1.23). Teil einer durchdachten Klimaschutzstrategie war das allerdings nicht. Der Ausbau erneuerbarer Energien und Energieeinsparungen ermöglichen zwar weiterhin einen leichten kontinuierlichen Rückgang der Kohlendioxidemissionen. Für einen wirksamen Klimaschutz ist der Rückgang allerdings viel zu langsam.

Mit der derzeitigen Energiepolitik und den selbst gesteckten niedrigen Ausbauzielen für erneuerbare Energien hat Deutschland keine Möglichkeit, die Regierungsziele mit einem Rückgang der Treibhausgasemissionen um 40 % bis 2020, um 55 % bis 2030 und um 80 bis 95 % bis 2050 gegenüber 1990 zu erreichen. Dabei sind diese Ziele bereits deutlich zu

niedrig, um sicher die im Pariser Klimaschutzabkommen geforderte Begrenzung der globalen Erwärmung auf 1,5 °C zu erreichen.

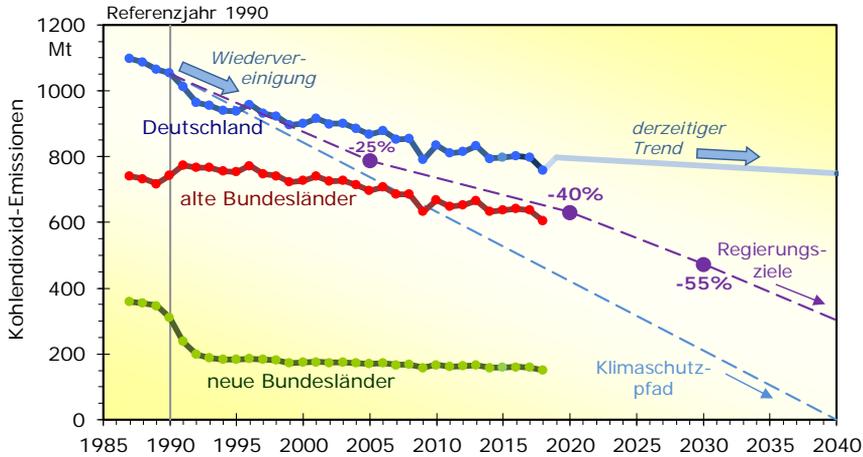


Bild 1.23 Entwicklung der Kohlendioxidemissionen in Deutschland

Möchte Deutschland seinen Beitrag zum Erreichen der Pariser Klimaschutzziele leisten, müssen der Ausbau erneuerbarer Energien deutlich forciert und die Einsparziele verschärft werden. Dabei darf der Fokus nicht ausschließlich auf der Substitution fossiler Kraftwerke zur Stromerzeugung liegen. Auch die Sektoren Verkehr und Wärme müssen schnellstmöglich dekarbonisiert werden, da auch diese einen entscheidenden Anteil an den Kohlendioxidemissionen haben.



Bild 1.24 Anteil verschiedener Verursacherguppen an den Kohlendioxidemissionen in Deutschland im Jahr 2016 (Daten: [UBA18a])

1.7.3.2 Regenerative Energieversorgung in Deutschland

Im Gegensatz zu anderen Ländern verfügt Deutschland nicht über so große Potenziale regenerativer Energieformen, dass einzelne regenerative Energien komplett die Energieversorgung sicherstellen können. In Deutschland ist daher ein breiter Mix verschiedener regenerativer Energieträger erforderlich, der im Wesentlichen von der Solarenergie und der Windkraft dominiert werden wird. Die Erschließung der Tiefengeothermie ist in Deutschland wegen der dafür erforderlichen großen Bohrtiefen vergleichsweise teuer. Die Potenziale für die Biomassenutzung sind wegen der limitierten Anbauflächen begrenzt. Daher wird Strom aus erneuerbaren Energien durch eine Kopplung der Sektoren Elektrizitätswirtschaft, Wärme und Verkehr auch einen großen Teil der Wärmeversorgung und des Energiebedarfs für den Verkehr abdecken müssen.

Wärmeversorgung

Im Gegensatz zum klassischen Elektrizitätsbedarf existieren beim Wärmedarf erhebliche Reduktionspotenziale. Rund die Hälfte ließe sich hier innerhalb der nächsten 30 Jahre einsparen und der verbleibende Wärmebedarf dann vollständig regenerativ decken. Um dieses Ziel zu erreichen, müsste aber die Gebäudesanierungsrate deutlich ansteigen. Neben einer optimalen Dämmung kann eine kontrollierte Be- und Entlüftung über einen Wärmetauscher die Verluste erheblich verringern.

Auch im Wärmebereich wird eine Vielzahl an regenerativen Technologien künftig die Versorgung sicherstellen. Keine der Technologien verfügt über die Potenziale, den gesamten Wärmebedarf in Deutschland decken zu können. In Abhängigkeit des Standorts und Gebäudetyps gibt es jeweils verschiedene technologisch und ökonomisch optimale Varianten. Bild 1.25 zeigt die unterschiedlichen Bausteine einer regenerativen Wärmeversorgung.

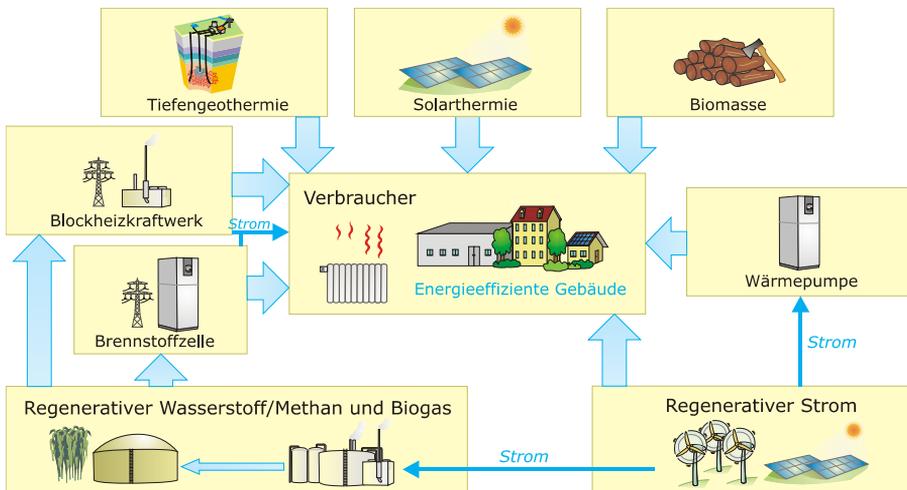


Bild 1.25 Bausteine einer regenerativen Wärmeversorgung

Da bei der Installation von Öl- und Gasheizungen von einer Lebensdauer von 20 Jahren ausgegangen werden kann, dürften ab 2020 eigentlich keine neuen Öl- und Gasheizun-

gen mehr installiert werden, wenn für das Erreichen der Pariser Klimaschutzziele eine Klimaneutralität bis zum Jahr 2040 angestrebt wird.

Prinzipiell ist es technisch möglich, fossiles und damit klimaschädliches Erdgas durch Gas aus erneuerbaren Energien zu substituieren. Klimaneutrales Gas muss aber erst einmal in sogenannten Power-to-Gas-Anlagen (P2G) in Form von Wasserstoff und Methan durch den Einsatz von Strom aus regenerativen Kraftwerken erzeugt werden (Bild 1.26). Dabei muss mit Verlusten in der Größenordnung von 35 % gerechnet werden. Diese Verluste entstehen in Form von Abwärme, die zum Teil genutzt werden kann, um beispielsweise fossile Fernwärme zu ersetzen. Da die Power-to-Gas-Anlagen allerdings je nach Verfügbarkeit von Strom aus Photovoltaik- oder Windkraftanlagen nicht permanent laufen können, muss dann die Wärmeversorgung durch thermische Speicher abgesichert werden.

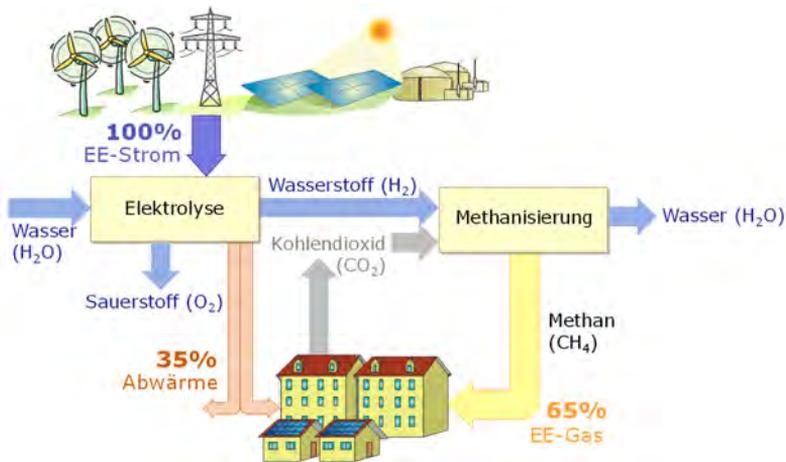


Bild 1.26 Prinzip der Substitution von fossilem Erdgas durch aus erneuerbarem Strom erzeugtem Methan (Power-to-Gas, P2G). [Qua16]

Soll das bislang benötigte fossile Erdgas im Wärmesektor ohne Eingriffe in die Heizungs-systeme ausschließlich durch Gas aus P2G-Anlagen versorgt werden, wäre zur Erzeugung der benötigten Gasmengen ein enormer zusätzlicher Strombedarf erforderlich.

Der klassische Strombedarf bei Einfamilienhäusern in Deutschland liegt derzeit in der Größenordnung von 4000 bis 5000 kWh/a. Bild 1.27 zeigt den zusätzlichen Strombedarf durch die regenerative Wärmeversorgung. Bei einem unsanierten Altbau liegt er bei einer Wärmeversorgung durch eine Gasheizung, die mit Gas aus erneuerbaren Energien versorgt wird, durch den Strombedarf bei der Gaserzeugung bei über 40 000 kWh/a. Der dafür nötige Ausbau regenerativer Kraftwerke in Deutschland im Zeitraum von 20 Jahren ist wenig realistisch. Lediglich durch den massiven Import von erneuerbarem Gas ließe sich das Szenario zumindest theoretisch realisieren. Die Umsetzungswahrscheinlichkeit in einem überschaubaren Zeitrahmen ist allerdings gering.

Deutliche Effizienzgewinne lassen sich hingegen durch Wärmepumpen erreichen (vgl. Abschnitt 8.4). Wärmepumpen sind elektrische Heizsysteme, die neben elektrischer Energie auch Niedertemperaturumgebungswärme mitnutzen. Moderne Wärmepumpen erreichen durchschnittliche Jahresarbeitszahlen (JAZ) von 3. Damit können sie aus einer

kWh an elektrischer Energie 3 kWh an Wärme erzeugen. Die Jahresarbeitszahl von Wärmepumpen lässt sich z.B. durch den Einsatz von Abwärmenutzung oder durch Vorwärmung der Niedertemperaturwärme über solarthermische Kollektoren weiter steigern. Werte von 5 sind dann möglich. Werden Wärmepumpen mit einer JAZ von 5 eingesetzt und der Wärmebedarf der Gebäude durch Sanierung halbiert, sinkt der Strombedarf für die Gebäudebeheizung in diesem Beispiel um über 90 % auf gerade einmal noch 3000 kWh/a.

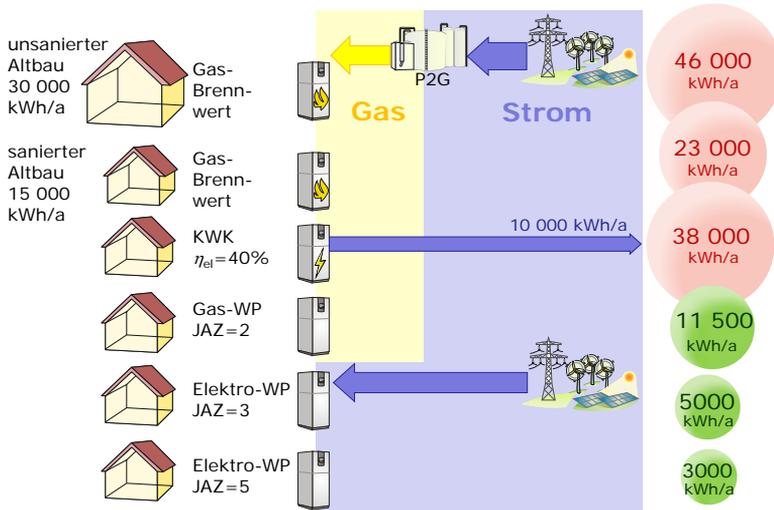


Bild 1.27 Effizienz und Strombedarf von strombasierten regenerativen Wärmeversorgungssystemen [Qua16]

Möchte man die Wärmeversorgung in Deutschland möglichst effizient auf Klimaschutz ausrichten, muss also der Absatz von Wärmepumpen deutlich gesteigert und der von Gasheizungssystemen spürbar reduziert werden.

Transport

Für einen effektiven Klimaschutz sind auch im Transportbereich in den nächsten Jahren erhebliche Veränderungen erforderlich. Heute basiert der Transportbereich überwiegend auf fossilen Brennstoffen wie Benzin, Diesel oder Kerosin. Effizientere Motortechniken werden nicht ausreichen, um die nötigen Reduktionen an Treibhausgasen zu erzielen.

Gerade einmal rund 5 % der Energie im Verkehrsbereich stammt in Deutschland aus erneuerbaren Energien. Den überwiegenden Anteil decken dabei Biotreibstoffe wie Biodiesel oder Ethanol ab, die herkömmlichen Treibstoffen beigemischt werden. Der Ersatz von fossilen Brennstoffen durch Brennstoffe auf Basis von Biomasse kann allerdings nur sehr begrenzt zur Reduzierung der Treibhausgase beitragen. Die verfügbaren landwirtschaftlichen Flächen zum Anbau von Rohstoffen zur Biotreibstoffherzeugung sind bei Weitem zu gering, um die fossilen Treibstoffe ersetzen zu können.

Daher werden dringend alternative Antriebe benötigt. Im Straßenverkehr werden große Hoffnungen auf die Elektromobilität gesetzt. Elektromotoren sind erheblich effizienter

Versuche, Akkumulatoren zu modellieren, wie beispielsweise das Modell von Gretsch [Gre78].

5.7.3 Lithium-Ionen-Akkumulator

Lithium-Ionen-Akkumulatoren umfassen eine ganze Gruppe an Batteriespeichern mit unterschiedlichen Materialkombinationen auf der Basis von Lithium. Lithium-Akkumulatoren weisen keinen Memory-Effekt auf und sind schnellladefähig. Neben der hohen Energiedichte hat dieser Akkutyp auch eine geringe Selbstentladerate, erreicht relativ viele Ladezyklen und weist einen hohen Wirkungsgrad auf. Wegen der vielen Vorteile nehmen die Marktanteile von Lithium-Akkumulatoren kontinuierlich zu, obwohl sie derzeit noch teurer als Bleiakkumulatoren sind. Da der Preis von Bleiakkumulatoren in erster Linie durch den Materialpreis von Blei bestimmt wird und die weltweiten Bleivorkommen begrenzt sind, könnte sich der Kostenunterschied in absehbarer Zeit umkehren.

Lithium-Batteriezellen reagieren jedoch sehr empfindlich auf kritische Betriebszustände wie Tiefentladung oder Überladung und können im Extremfall in Brand geraten oder explodieren. Daher müssen sie mit einem elektronischen **Batteriemanagementsystem** (BMS) überwacht und geschützt werden.

Beim Lithium-Ionen-Akkumulator besteht die positive Elektrode aus Lithium-Metall-oxiden wie Lithiumkobaltoxid (LiCoO_2), **Lithiumeisenphosphat** (LiFePO_4), Mischoxiden aus LiCoO_2 , LiNiO_2 und LiMnO_2 oder LiMn_2O_4 . Bei Elektroautos kommt sehr häufig Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid ($\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$) zum Einsatz, das auch mit **Li-NMC** abgekürzt wird. Die negative Elektrode besteht meist aus Graphit, aber auch aus anderen Materialien wie Lithiumtitanaten (z. B. $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$). Die beiden Elektroden werden durch einen ionendurchlässigen Separator auf Polymerbasis getrennt. Eine keramische Beschichtung kann das Auftreten von Kurzschlüssen erschweren und damit die Sicherheit erhöhen. Als Elektrolyt dienen Salze oder Polymere. Beim Laden des Lithium-Ionen-Akkumulators wandern positiv geladene Lithium-Ionen durch den Separator von der positiven zur negativen Elektrode (Bild 5.53).

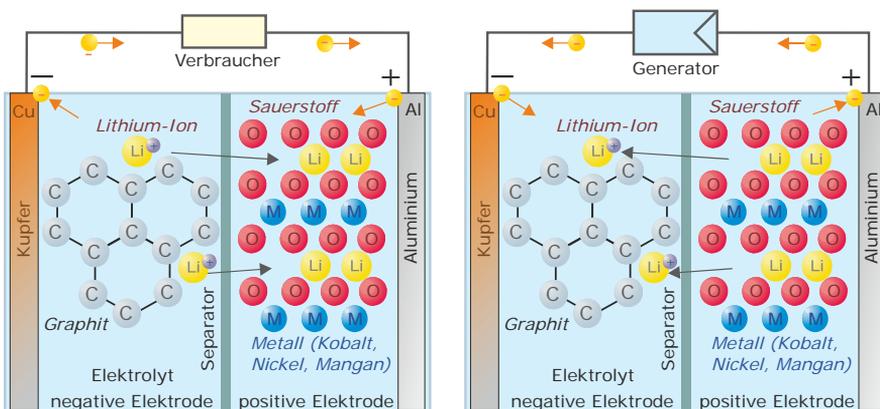
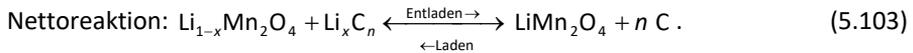
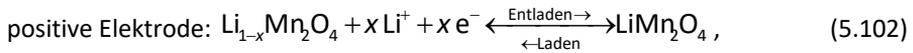
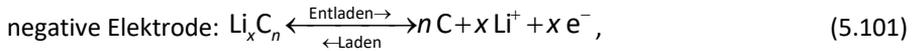


Bild 5.53 Prinzipieller Aufbau und Funktionsweise eines Lithium-Ionen-Akkumulators

Die chemischen Reaktionen, hier beispielhaft für den Lithium-Mangan-Akkumulator, lauten:



Die meisten Lithium-Ionen-Akkumulatoren werden mit Kobalt-Verbindungen hergestellt. **Kobalt** ist ein relativ seltenes Element und ist durch fragwürdige Abbaubedingungen unter Einsatz von Kinderarbeit in der Demokratischen Republik Kongo in Verruf geraten. **Lithiumeisenphosphat-Akkumulatoren** sind eine Alternative, die eine größere Zellsicherheit aber meist auch eine geringere Energiedichte aufweist.

Anders als der Name es vermuten lassen würde, hat Lithium nicht den größten Materialanteil am Lithium-Akkumulator. Dieser liegt gerade einmal im unteren Prozent- oder gar Promillebereich, sodass 80 bis 140 g Lithium derzeit für eine Speicherkapazität von 1 kWh ausreichen. Ein sehr großer Gewichtsanteil entfällt hingegen auf Aluminium und Kupfer, die als Ableiter an den Elektroden dienen.

Im Vergleich zu anderen Akkumulatortypen lassen sich Lithium-Ionen-Akkumulatoren besonders gut industriell fertigen, was auch künftig noch große Kostensenkungen verspricht. Die verschiedenen Komponenten wie Ableiter, Elektroden und Separator werden als Folien von der Rolle produziert und zusammengefügt. Als Bauformen haben sich drei Zelltypen durchgesetzt:

- zylindrische Zellen,
- prismatische Zellen,
- Pouch-Zellen.

In der Pouch-Zelle, auch Coffeebag-Zelle genannt, werden die verschiedenen Folien gestapelt und in eine kunststoffbeschichtete Aluminiumfolie eingeschweißt. Am verbreitetsten sind jedoch zylindrische Zellen, bei denen die Folien aufgewickelt werden. Sehr häufig wird dabei die Bauform 18650 verwendet, die einen Durchmesser von 18,2 mm und eine Länge von 65,2 mm hat.

Das elektrische Verhalten von Lithium-Ionen-Akkumulatoren ähnelt dem anderer Akkumulatortypen. Die Zellspannung liegt je nach Materialkombination zwischen knapp 2 V und gut 4 V. Die Zellspannung sinkt kontinuierlich mit der entnommenen Kapazität beziehungsweise der Entladetiefe ab. Die **Entladetiefe** wird auch DOD (Depth of Discharge) genannt. Oftmals wird auch der **Füllgrad** SOC (State of Charge) als Parameter verwendet. Bei einem SOC von 100 % ist die Batterie vollständig geladen, die Entladetiefe DOD beziehungsweise die normierte entnommene Kapazität beträgt dann 0 %.

Am Ende des Entladevorgangs nimmt der Spannungsabfall spürbar zu. Eine steigende **Entladerate** (C-Rate) reduziert ebenfalls die Spannung (Bild 5.54). Die C-Rate gibt dabei an, wie schnell der Akkumulator entladen wird. Bei 1C wird der Akkumulator in einer Stunde komplett entladen. Bei 2C erfolgt die Entladung in einer halben Stunde.

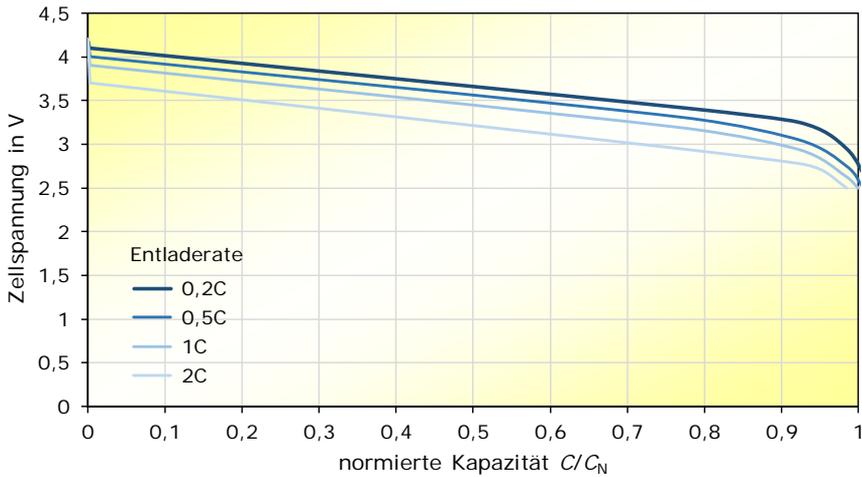


Bild 5.54 Zellspannung eines Lithium-Akkumulators in Abhängigkeit der normierten Kapazität und der Entladerate

Neben der Entladerate und der entnommenen Kapazität hat auch die Zelltemperatur einen wesentlichen Einfluss auf den Spannungsverlauf, die entnehmbare Kapazität und die Lebensdauer. Bild 5.55 zeigt schematisch den Temperatureinfluss. Bei sehr niedrigen Temperaturen kann es dabei zu Abweichungen vom typischen Spannungsverlauf kommen. Überhitzt die Zelle, kann dies zu Kurzschlüssen führen. Der Separator besteht meist aus Polymeren, die ab einer gewissen Temperatur schmelzen. Bei einigen Zelltypen auf Oxidbasis kann es bei Temperaturen deutlich oberhalb von 100 °C zum thermischen Durchgehen der Zelle kommen. Zellen auf Basis von Lithiumeisenphosphat haben diese kritische Eigenschaft allerdings nicht.

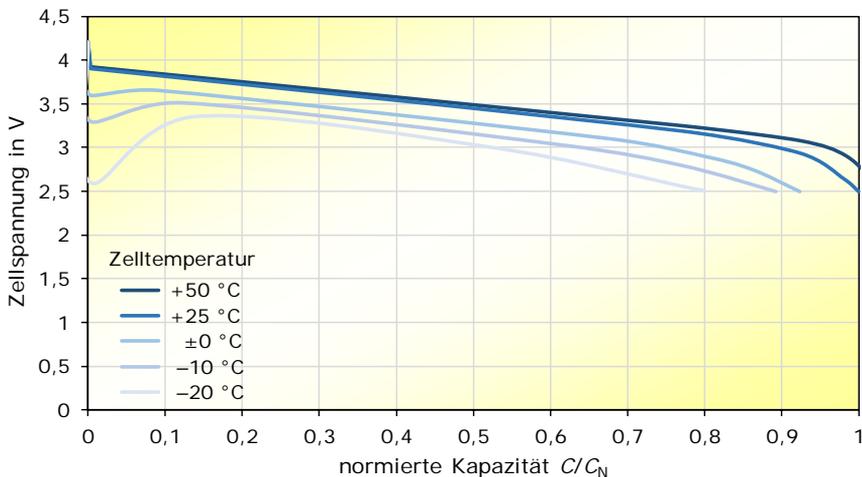


Bild 5.55 Zellspannung eines Lithium-Akkumulators in Abhängigkeit der normierten Kapazität und der Zelltemperatur



Literaturverzeichnis

Literatur zu Kapitel 1: Energie und Klimaschutz

- [AEE18] Agentur für Erneuerbare Energien e.V. (AEE): *Beschäftigung durch Erneuerbare Energien*. Berlin, verschiedene Jahre bis 2016
- [AGEB19] AG Energiebilanzen e.V.: *Daten und Infografiken*. Internet: www.ag-energiebilanzen.de, 2019
- [BP18] BP: *BP Statistical Review of World Energy 2018*. London: 2018
- [BGR17] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): *Energiestudie 2017*. Hannover: BGR, 2017, Internet: www.bgr.bund.de
- [BMWia] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (Hrsg.): *Energiedaten*. Berlin, verschiedene Jahrgänge bis 2019
- [BMWib] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (Hrsg.): *Erneuerbare Energien in Zahlen*. Berlin, verschiedene Jahrgänge bis 2019
- [BWE11] Bundesverband WindEnergie e.V. (BWE): *Potenzial der Windenergienutzung an Land*. Berlin, 2011
- [CDI18] Carbon Dioxide Information Analysis Center CDIAC: *NASA GISS Surface Temperature (GISTEMP) Analysis*, 2018, Internet: <http://cdiac.ornl.gov>
- [Deu19] Deutsche Windguard: *Status des Windenergieausbaus in Deutschland Jahr 2018*. Internet: www.windguard.de, 2019
- [EIA18] US Energy Information Administration (EIA): *International Energy Statistics*. Internet: www.eia.gov/countries/, 2018
- [Enq95] Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ des 12. Deutschen Bundestages (Hrsg.): *Mehr Zukunft für die Erde*. Bonn: Economica Verlag, 1995
- [EST03] European Solar Thermal Industry Federation (ESTIF): *Sun in Action II*. Brüssel: ESTIF, 2003
- [EST14] European Solar Thermal Industry Federation (ESTIF): *Solar Thermal Markets in Europe*. Brüssel: ESTIF, verschiedene Jahrgänge bis 2014
- [Fle98] Fleming, Kevin; Johnston, Paul; Zwart, Dan; Yokoyama, Yusuke; Lambeck, Kurt; Chappell, John: Refining the eustatic sea-level curve since the Last Glacial Maximum using far- and intermediate-field sites. In: *Earth and Planetary Science Letters* 163, 1-4 (1998), S. 327-342, doi:10.1016/S0012-821X(98)00198-8
- [HEAL13] Health and Environment Alliance HEAL: *Was Kohlestrom wirklich kostet*. Brüssel, 2013
- [Hil95] Hiller, Karl: Erdöl: Globale Vorräte, Ressourcen, Verfügbarkeit. In: *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 45. Jg. (1995) Heft 11, S. 698-708
- [Hof95] Hoffmann, Cornelis: Bereitstellungsnutzungsgrade elektrischer Energie. In: *Elektrizitätswirtschaft* Jg. 94 (1995) Heft 11, S. 626-632
- [IEA18] International Energy Agency IEA (Hrsg.): *Key World Energy Statistics 2018*. Paris: 2018
- [IEA18b] International Energy Agency Solar Heating and Cooling Programme IEA-SHC (Hrsg.): *Solar Heat Worldwide*. Paris, verschiedene Jahrgänge bis 2018, Internet: www.iea-shc.org
- [IEA18c] International Energy Agency IEA-PVPS (Hrsg.): *Trends in Photovoltaic Applications*. Paris, verschiedene Jahrgänge bis 2018, Internet: www.iea-pvps.org
- [IPC05] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): *Carbon Dioxide Capture and Storage*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005, Internet: www.ipcc.ch

- [IPC06] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Hayama: IPCC, 2006
- [IPC07] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): *Climate Change 2007, Synthesis Report*. Valencia: IPCC, 2007
- [IPC13] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): *Climate Change 2013, The Physical Science Basis*. Genf: IPCC, 2013, Internet: www.ipcc.org
- [IPC18] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): *Global Warming of 1.5°C*. Incheon: IPCC, 2018, Internet: www.ipcc.org
- [IRE18] International Renewable Energy Agency IREA: *Renewable Energy and Jobs 2018*. Abu Dhabi, 2018
- [Kom19] Kommission Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung: *Abschlussbericht*. Berlin, 26.01.2019
- [Lev13] Levermann, A.; Clark, P.; Marzeion, B.; Milne, G.; Pollard, D.; Radic, V.; Robinson, A.: The multimillennial sea-level commitment of global warming. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110 (2013), p. 13745-13750
- [Mar13] Marcott, Shaun A.; Shakun, Jeremy D.; Clark, Peter U.; Mix, Alan C.: A Reconstruction of Regional and Global Temperature for the Past 11,300 Years. In: *Science* 339, 1198 (2013), DOI: 10.1126/science.122802
- [NAS13] NASA Goddard Space Flight Center: *GIS Surface Temperature Analysis*. Internet: <http://data.giss.nasa.gov/gistemp/>, 2013
- [Nat12] Naturfreunde Deutschland e.V.: *Atomausstieg selber machen*. Internet: www.atomausstieg-selber-machen.de, 2012
- [NOAA18] National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA), Earth System Research Laboratory (ESRL): *The NOAA Annual Greenhouse Gas Index*. Internet: www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi, 2018
- [Qua00] Quaschnig, Volker: *Systemtechnik einer klimaverträglichen Elektrizitätsversorgung in Deutschland für das 21. Jahrhundert*. Düsseldorf: VDI Fortschritt-Berichte Reihe 6 Nr. 437, 2000
- [Qua16] Quaschnig, Volker: *Sektorkopplung durch die Energiewende*. HTW Berlin, 2016
- [Qua18] Quaschnig, Volker: *Erneuerbare Energien und Klimaschutz*. München: Hanser Verlag, 4. Auflage, 2018
- [Qua19] Quaschnig, Volker: *Datenservice Regenerative Energien und Klimaschutz*. Internet: www.volker-quaschnig.de/datserv, 2019
- [Sch12] Schaeffer, Michael; Hare, William; Rahmstorf, Stefan; Vermeer, Martin: Long-term sea-level rise implied by 1.5° C and 2° C warming levels. In: *Nature Climate Change* 6/2012
- [Sch18] Schneider, Mycle; Froggatt, Antony: *The World Nuclear Industry Status Report 2018*. A Mycle Schneider Consulting Project, Paris, London 2018
- [Sdk18] Statistik der Kohlenwirtschaft e.V.: *Der Kohlenbergbau in der Energiewirtschaft in der Bundesrepublik Deutschland*. Essen, 2018
- [Sha12] Shakun, Jeremy D.; Clark, Peter U.; He, Feng; Marcott, Shaun A.; Mix, Alan C.; Liu, Zhengyu; Otto-Bliesner, Bette; Schmittner, Andreas; Bard, Edouard: Global Warming Preceded by Increasing Carbon Dioxide Concentrations During the Last Deglaciation. In: *Nature* 484, S. 49-55 (2012)
- [Sel90] Selzer, Horst: Windenergie, Studie A.2.2a. In: *Energie und Klima*, Band 3 Erneuerbare Energien. Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ des Deutschen Bundestages, Economica Verlag, 1990
- [Sta18] Statista: *Anteil der Energieträger an der Stromerzeugung des Energiekonzerns RWE im Jahr 2017*. 2018, Internet: www.statista.com,
- [Sti94] Stiftung Warentest: *test-Heft 7/1994*, Berlin
- [UBA06] Umweltbundesamt (Hrsg.): *Technische Abscheidung und Speicherung von CO₂*. Dessau: UBA, 2006
- [UBA14] Umweltbundesamt (Hrsg.): *Nationaler Inventarbericht zum deutschen Treibhausgasinventar 1990-2012*. Dessau: Umweltbundesamt, 2014
- [UBA18a] Umweltbundesamt (Hrsg.): *Übersicht zur Entwicklung der energiebedingten Emissionen und Brennstoffeinsätze in Deutschland 1990-2016*. Dessau: Umweltbundesamt, 2018
- [UBA18b] Umweltbundesamt (Hrsg.): *Register über Schadstoffe und deren Freisetzung in die Umwelt*. 2018, Internet: www.thru.de
- [UNF98] United Nation Framework Convention on Climate Change UNFCCC: *Methodological issues while processing second national communications: Greenhouse Gas Inventories*. Buenos Aires: FCCC/SBSTA, 1998

- [UNF18] United Nation Framework Convention on Climate Change UNFCCC: *National Greenhouse Gas Inventory Data for the Period 1990-2016*. 2018, Internet: www.unfccc.int
- [Wei96] v. Weizsäcker, E.U.; Lovins, A.B.; Lovins, L.H.: *Faktor Vier*. München: Droemersche Verlagsanstalt Knauer, 1996
- [Wis18] Wissenschaftlicher Dienst Deutscher Bundestag: *Stillegung von Kohlekraftwerken*. Berlin: Ausarbeitung WD3-3000-360/18 vom 31.10.2018

Literatur zu Kapitel 2: Sonnenstrahlung

- [DIN4710] Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN): *DIN 4710, Meteorologische Daten zur Berechnung des Energieverbrauchs von heiz- und raumluftechnischen Anlagen*. Berlin: Beuth Verlag, 1982
- [DIN5031] Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN): *DIN 5031, Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik*. Berlin: Beuth Verlag, 1982
- [DIN5034] Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN): *DIN 5034 Teil 2, Tageslicht in Innenräumen*. Berlin: Beuth Verlag, 1985
- [DIN9488] Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN): *DIN EN ISO 9488, Sonnenenergie - Vokabular*. Berlin: Beuth Verlag, 1999
- [Die57] Dietze, Gerhard: *Einführung in die Optik der Atmosphäre*. Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig K.G., 1957
- [Hul05] Huld T.; Šúri M.; Dunlop E.; Albuissou M.; Wald L.: *Integration of HelioClim-1 database into PVGIS to estimate solar electricity potential in Africa*. 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 6.-10. Juni 2005, Barcelona, Internet: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>
- [IEC95] International Electrotechnical Commission (IEC): *IEC 904-9: Photovoltaische Geräte – Teil 9: Leistungsanforderungen an Sonnensimulatoren*. Genf: IEC, 1995
- [JRC10,13] European Commission Joint Research Centre (JRC): *Photovoltaic Geographical Information System PVGIS*. Internet: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis>. ISPRA, 2010, 2013
- [Kam90] Kambezidis, H.D.; Papanikolaou, N.S.: Solar Position and Atmospheric Refraction. In: *Solar Energy* Vol. 44 (1990), S. 143-144
- [Klu79] Klucher, T.M.: Evaluation of Models to Predict Insolation on Tilted Surfaces. In: *Solar Energy* Vol. 23 (1979), S. 111-114
- [Kop11] Kopp, Greg; Lean, Judith L.: A new, lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance. In: *Geophysical Research Letters*, Vol. 38, L01706, 7 pp., 2011
- [Pal96] Palz, W.; Greif, J.: *European Solar Radiation Atlas*. Berlin: Springer, 1996
- [Per86] Perez, Richard; Stewart, Ronald: Solar Irradiance Conversion Models. In: *Solar Cells* Vol.18 (1986), S. 213-222
- [Per87] Perez, Richard; Seals, Robert; Ineichen, Pierre; Stewart, Ronald; Menicucci, David: A New Simplified Version of the Perez Diffuse Irradiance Model for Tilted Surfaces. In: *Solar Energy* Vol.39 (1987), S. 221-231
- [Per90] Perez, Richard; Ineichen, Pierre; Seals, Robert; Michalsky, Joseph ; Stewart, Ronald: Modeling Daylight Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiance. In: *Solar Energy* Vol. 44 (1990), S. 271-289
- [Qua96] Quaschnig, Volker: *Simulation der Abschattungsverluste bei solarelektrischen Systemen*. Berlin: Verlag Dr. Köster, 1996
- [Rei89] Reindl, D.T.; Beckman, W.A.; Duffie, J.A.: Diffuse Fraction Correlations. In: *Proceedings of ISES Solar World Conference 1989*, S. 2082-2086
- [Sat87] Sattler, M.A.; Sharples, S.: Field Measurements of the Transmission of Solar Radiation through Trees. In: *Proceedings of ISES Solar World Conference 1987*, S. 3846-3850
- [Sch70] Schulze, R.: *Strahlenklima der Erde*. Darmstadt: Steinkoff, 1970
- [Sch04] Schillings, C.; Meyer, R.; Mannstein, H.: *Projektbericht SOKRATES-Projekt*. Stuttgart: DLR, 2004
- [TÜV84] TÜV-Rheinland: *Atlas über die Sonnenstrahlung in Europa*. TÜV-Verlag, 1984
- [Wal78] Walraven, R: Calculating the Position of the Sun. In: *Solar Energy* Vol. 20 (1978), S. 393-397
- [Wil81] Wilkinson, B.J.: An Improved FORTRAN Program for the Rapid Calculation of the Solar Position. In: *Solar Energy* Vol. 27 (1981), S. 67-68

Literatur zu Kapitel 3: Nicht konzentrierende Solarthermie

- [Bun92] Bundesministerium für Forschung und Technologie (Hrsg.): *Erneuerbare Energien*. Bonn, 1992
- [BdE96] Bund der Energieverbraucher (BdE, Hrsg.): *Phönix Solar Projekt. Informationsschrift*. Rheinbreitenbach: BdE, 1996
- [DIN06] Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN): *DIN EN 12975-2, Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile - Kollektoren - Teil 2: Prüfverfahren*. Berlin: Beuth Verlag, 2006
- [Fac90] Fachinformationszentrum Karlsruhe (Hrsg.): *Transparente Wärmedämmung (TWD) zur Gebäudeheizung mit Sonnenenergie*. BINE Projekt Info-Service Nr. 2/1990
- [Fac93] Fachinformationszentrum Karlsruhe (Hrsg.): *Erfahrungen mit solarbeheizten Schwimmbädern*. BINE Projekt Info-Service Nr. 8/1993
- [Fac95] Fachinformationszentrum Karlsruhe (Hrsg.): *Wärmedämmung für Warmwasserspeicher, Heizkessel und Kühlzellen*. BINE Projekt Info-Service Nr. 11/1995
- [Gie89] Gieck, K.: *Technische Formelsammlung*. Heilbronn: Gieck Verlag, 1989
- [Hah94] Hahne, E.; Kübler, R.: Monitoring and Simulation of the Thermal Performance of Solar Heated Outdoor Swimming Pools. In: *Solar Energy* Vol. 53 (1994), S. 9-19
- [Hum91] Humm, Othmar: *Niedrig Energiehäuser*. Staufen: Ökobuch Verlag, 1991
- [Kha95] Khartchenko, N.: *Thermische Solaranlagen*. Berlin: Springer, 1995
- [Kle93] Kleemann, M.; Meliß, M.: *Regenerative Energiequellen*. Berlin: Springer, 1993
- [Lad95] Ladener, Heinz: *Solaranlagen*. Staufen: Ökobuch Verlag, 1995
- [Smi94] Smith, Charles C.; Löf, George; Jones, Randy: Measurement and Analysis of Evaporation from an Inactive Outdoor Swimming Pool. In: *Solar Energy* Vol. 53 (1994) No. 1, S. 3-7
- [The85] Theunissen, P.-H.; Beckman, W.A.: Solar Transmittance Characteristics of Evacuated Tubular Collectors with Diffuse Back Reflectors. In: *Solar Energy* Vol. 35 (1985) Nr. 4, S. 311-320
- [Ung91] Unger, J.: Aufwindkraftwerk contra Photovoltaik. In: *BWK* Bd. 43 (1991) Nr. 7/7, S. 375-379
- [VDI2067] Verein Deutscher Ingenieure VDI (Hrsg.): *VDI 2067 Blatt 4. Berechnung der Kosten von Wärmeversorgungsanlagen; Warmwasserversorgung*. Düsseldorf: VDI Verlag, 1982
- [Wag95] Wagner & Co. (Hrsg.): *So baue ich eine Solaranlage, Technik, Planung und Montage*. Cölbe: Wagner & Co. Solartechnik GmbH, 1995

Literatur zu Kapitel 4: Konzentrierende Solarthermie

- [Dud94] Dudley, Vernon E.; Kolb, Gregroy J.; Mahoney, A. Roderick; Matthews, Chauncey W.: *Test Results SEGS LS-2 Solar Collector*. Sandia Report SAN94-1884. Sandia National Laboratories. Albuquerque: 1994
- [Her12] Hering, E.; Martin, R.; Stohrer, M.: *Physik für Ingenieure*. Berlin: Springer Verlag, 2012
- [Hos88] Hosemann, G. (Hrsg.): *Hütte Taschenbücher der Technik, Elektrische Energietechnik, Band 3: Netze*. Berlin: Springer, 29. Auflage 1988
- [Kle93] Kleemann, M.; Meliß, M.: *Regenerative Energiequellen*. Berlin: Springer 1993
- [Lip95] Lippke, Frank: *Simulation of the Part-Load Behavior of a 30 MWe SEGS Plant*. Sandia Report SAN95-1293. Sandia National Laboratories. Albuquerque: 1995
- [Pil96] Pilkington Solar Internation (Hrsg.): *Statusbericht Solarthermische Kraftwerke*. Köln: 1996
- [Qua05] Zukunftsaussichten von Solarstrom. In: *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 55. Jg (2005) Heft 6, S. 386-388.
- [Sch02] Schlaich Bergermann und Partner (Hrsg.): *EuroDish-Stirling System Description*. Stuttgart: 2002
- [Sti85] Stine, William B.; Harrigan, Raymond W.: *Solar Energy Fundamentals and Design*. New York: John Wiley & Sons, 1985

Literatur zu Kapitel 5: Photovoltaik

- [DGS08] Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie (DGS, Hrsg.): *Leitfaden Photovoltaische Anlagen*. Berlin: 2008
- [DIN03] Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN): *DIN EN V 61000 Teil 2-2, VDE 0839 Teil 2-2. Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV), Verträglichkeitspegel für niederfrequente Störgrößen und Signalübertragung in öffentlichen Niederspannungsnetzen*. Berlin: Beuth Verlag, 2003

- [DIN05] Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN): *DIN EN 61000-3-2, VDE 0838 Teil 2. Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV), Grenzwerte für Oberschwingungsströme (Geräte-Eingangsstrom ≤ 16 A je Leiter)*. Berlin: Beuth Verlag, 2005
- [DIN05b] Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN): *DIN EN 61215 / IEC 61215 Ed. 2. Terrestrische Photovoltaik-(PV-)Module mit Silizium-Solarzellen - Bauarteignung und Bauartzulassung*. Berlin: VDE Verlag, 2005
- [DIN08] Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN): *DIN EN 61646 / IEC 61646 Ed. 2. Terrestrische Dünnschicht-Photovoltaik-(PV-)Module - Bauarteignung und Bauartzulassung*. Berlin: VDE Verlag, 2008
- [Goe05] Goetzberger, Adolf; Hoffmann, Volker U.: *Photovoltaic Solar Energy Generation*. Berlin: Springer, 2005
- [Gre78] Gretschek, Ralf: *Ein Beitrag zur Gestaltung der elektrischen Anlage in Kraftfahrzeugen*. Nürnberg-Erlangen: Habilitationsschrift, 1978
- [Has86] Hasyim, E.S.; Wenham, S.R.; Green, M.A.: Shadow Tolerance of Modules Incorporating Integral Bypass Diode Solar Cells. In: *Solar Cells* Vol. 19 (1986), S. 109-122
- [Her12] Hering, E.; Martin, R.; Stohrer, M.: *Physik für Ingenieure*. Berlin: Springer Verlag, 2012
- [Köt96] Köthe, Hans K.: *Stromversorgung mit Solarzellen*. München: Franzis, 1996
- [Las90] Lasnier, F.; Ang, T.G.: *Photovoltaic Engineering Handbook*. Bristol: Hilger, 1990
- [Lec92] Lechner, M.D.: *Physikalisch-chemische Daten*. Berlin: Springer, 1992
- [Lew01] Lewerenz, H.J.; Jungblut, H.: *Photovoltaik*. Berlin: Springer, 2001
- [Mic92] Michel, Manfred: *Leistungselektronik*. Berlin: Springer, 1992
- [PRE94] Fachbereich Physik, Arbeitsgruppe regenerative Energiesysteme (PRE), Universität Oldenburg: *Handbuch zu INSEL (Interactive Simulation of Renewable Energy Supply Systems)*. Oldenburg, 1994
- [Qua96a] Quaschnig, Volker: *Simulation der Abschattungsverluste bei solarelektrischen Systemen*. Berlin: Verlag Dr. Köster, 1996 - ISBN 3-89574-191-4
- [Qua96b] Quaschnig, Volker; Hanitsch, Rolf: Höhere Erträge durch schattentolerante Photovoltaikanlagen. In: *Sonnenenergie & Wärmetechnik* 4/96, S. 30-33
- [Qua12] Quaschnig, Volker; Weniger, Johannes; Tjarko, Tjaden: Photovoltaik - Der unterschätzte Markt. In: *BWK* Bd. 64 (2012) Nr. 7/8, S. 25-28
- [Qua13] Quaschnig, Volker: *Erneuerbare Energien und Klimaschutz*. München: Hanser Verlag, 2013
- [Tie02] Tietze, U.; Schenk, Ch.: *Halbleiter-Schaltungstechnik*. Berlin: Springer, 2002
- [Tja14] Tjaden, T.; Weniger, J.; Bergner, J.; Schnorr, F.; Quaschnig, V.: Einfluss des Standorts und des Nutzerverhaltens auf die energetische Bewertung von PV-Speichersystemen. In: *29. Symposium Photovoltaische Solarenergie*, Bad Staffelstein, 2014
- [VDE11] VDE: *VDE-AR-N 4105 Anwendungsregel: Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz*. Berlin: VDE-Verlag, 2011
- [Wag06] Wagner, Andreas: *Photovoltaik Engineering*. Berlin: VDI Springer, 2006.
- [Wag07] Wagemann, Hans-Günther; Eschrich, Heinz: *Photovoltaik*. Wiesbaden: Teubner Verlag, 2007
- [Wen13a] Weniger, Johannes: *Dimensionierung und Netzintegration von PV-Speichersystemen*. Masterarbeit, Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, 2013
- [Wen13b] Weniger, Johannes; Quaschnig, Volker: Begrenzung der Einspeiseleistung von netzgekoppelten Photovoltaiksystemen mit Batteriespeichern. In: *28. Symposium Photovoltaische Solarenergie*. Bad Staffelstein, 2013
- [Wen17a] Weniger, Johannes; Tjaden, Tjarko; Quaschnig, Volker: Vergleich verschiedener Kennzahlen zur Bewertung der energetischen Performance von PV-Batteriesystemen. In: *32. Symposium Photovoltaische Solarenergie*. Bad Staffelstein, 2017
- [Wen17b] Weniger, Johannes; Tjarko, Tjaden: *Performance-Simulationsmodell für AC-gekoppelte PV-Batteriesysteme (PerModAC)*. Berlin, HTW Berlin, 2017
Internet: <https://pvspeicher.htw-berlin.de/veroeffentlichungen/daten/permodac/>
- [Wen18] Weniger, Johannes; Maier, Selina; Kranz Lena; Orth, Nico; Böhme, Nico; Quaschnig, Volker: *Stromspeicher-Inspektion 2018*. Berlin, HTW Berlin, 2018
- [Wol77] Wolf, M.; Noel, G.T.; Stirn, R.J.: Investigation of the Double Exponential in the Current-Voltage Characteristics of Silicon Solar Cells. In: *IEEE Transactions on Electron Devices* Vol. ED-24 (1977) No. 4, S. 419-428

Literatur zu Kapitel 6: Windkraft

- [BDEW08] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. BDEW (Hrsg.): *Technische Richtlinie Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz*. Berlin: BDEW, 2008
- [Bet26] Betz, Albert: *Windenergie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen*. Staufen: Ökobuch, Unveränderter Nachdruck aus dem Jahr 1926
- [Chr89] Christoffer, Jürgen; Ulbricht-Eissing, Monika: *Die bodennahen Windverhältnisse in der Bundesrepublik Deutschland*. Offenbach: Deutscher Wetterdienst, Ber.Nr.147, 1989
- [Ene06] Enercon: *Enercon Windenergieanlagen - Produktübersicht*. Aurich: Enercon GmbH, 2006
- [Fis06] Fischer, Rolf: *Elektrische Maschinen*. München: Hanser Verlag, 2006
- [Gas07] Gasch, Robert; Twele, Jochen (Hrsg.): *Windkraftanlagen*. Stuttgart: Teubner, 2007
- [Hau96] Hau, Erich: *Windkraftanlagen*. Berlin: Springer, 1996
- [Her12] Hering, E.; Martin, R.; Stohrer, M.: *Physik für Ingenieure*. Berlin: Springer Verlag, 2012
- [Kle93] Kleemann, M.; Meliß, M.: *Regenerative Energiequellen*. Berlin: Springer, 1993
- [Mol90] Molly, Jens-Peter: *Windenergie*. Karlsruhe: C.F. Müller, 1990
- [Mü194] Müller, G.: *Grundlagen elektrischer Maschinen*. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft, 1994
- [Ris09] Risø National Laboratory, Wind Energy Division (Hrsg.): *WAsP - Wind Atlas Analysis and Application Program*. Riskilde: Risø Nat. Laboratory, 2009
- [Tro89] Troen, Ib ; Petersen, Erik L.: *European Wind Atlas*. Roskilde: Risø National Laboratory, 1989
- [UBA13] Umweltbundesamt (Hrsg.): *Potenzial der Windenergie an Land*. Dessau: UBA, 2013
- [VDI94] Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): Stoffwerte von Luft. In: *VDI-Wärmeatlas*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1994
- [Ves97] Vestas: Technische Unterlagen zu den Windkraftanlagen V42 und V44. Husum: Vestas Deutschland GmbH, 1997

Literatur zu Kapitel 7: Wasserkraft

- [BAFU19] Schweizerisches Bundesamt für Umwelt BAFU: *Hydrologische Daten*. Internet: www.hydrodaten.admin.ch/de/, 2019
- [Bar04] Bard, J.; Caselitz, P.; Giehardt, J.; Peter, M.: Erste Meeresströmungsturbinen-Pilotanlage vor der englischen Küste. In: Tagungsband *Kassler Symposium Energie-Systemtechnik 2004*
- [Böh62] Böhler, Karl: *Pumpspeicherkraftwerk Vianden*. Sonderdruck aus: Die Wasserwirtschaft, Heft 12/1961 und Heft 1/1962. Stuttgart: Franckh'sche Verlagshandlung
- [Brö00] Brösicke, Wolfgang: *Sonnenenergie*. Berlin: Verlag Technik 2000
- [EIA19] US Energy Information Administration (EIA): *International Energy Statistics*. Internet: www.eia.gov/countries/, 2019
- [Gie03] Giesecke, J.; Mosonyi, E.: *Wasserkraftanlagen*. Berlin: Springer, 2003
- [Gra01] Graw, Kai-Uwe: *Nutzung der Tidenenergie*. Universität Leipzig, Grundbau und Wasserbau, 2001
- [Ita04] Itaipu Binacional (Hrsg.): *Itaipu Binacional Technical Data*. Internet: www.itaipu.gov.br
- [Kön99] König, Wolfgang (Hrsg.): *Propyläen Technikgeschichte*. Berlin: Propyläen Verlag 1999
- [LGRP] Landesamt für Gewässerkunde Rheinland-Pfalz (Hrsg.): *Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch Rheingebiet*. Mainz: Landesamt für Gewässerkunde, verschiedene Jahrgänge
- [LUBW] Landesamt für Umweltschutz Baden-Württemberg (Hrsg.): *Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch, Rheingebiet Teil I*. Karlsruhe: Landesamt für Umweltschutz, verschiedene Jahrgänge
- [Qua18] Quaschnig, Volker: *Erneuerbare Energien und Klimaschutz*. München: Hanser Verlag, 2018
- [Raa89] Raabe, Joachim: *Hydraulische Maschinen und Anlagen*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1989
- [Vat03] Vattenfall Europe (Hrsg.): *Wasserkraft Goldisthal – Aus Wasser wird Energie*. Berlin: 2003
- [Voi08] Voith Siemens Hydro Power Generation (Hrsg.): *Turbinen*. Internet: www.vs-hydro.com
- [VIK98] Verband der Industriellen Energie- und Kraftwirtschaft e.V. VIK (Hrsg.): *Statistik der Energiewirtschaft*. Essen, verschiedene Jahrgänge, letzter Jahrgang 1996/97, erschienen 1998
- [Wik18] Wikipedia: *Gezeitenkraftwerk Shiwa-ho*. de.wikipedia.org/wiki/Gezeitenkraftwerk_Sihwa-ho, 2018

Literatur zu Kapitel 8: Geothermie

- [Aue11] Auer, Falk; Schote, Herbert: Ein großer Beitrag zum Klimaschutz. In: *Sonnenenergie 6-2011*, S. 32-34
- [BAFA14] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle BAFA: *Erneuerbare Energien- Wärmepumpen mit Prüfsertifikat des COP-Wertes*. Eschborn: BAFA, 2014
- [Bit12] Bitzer Kühlmaschinenbau GmbH (Hrsg.): *Kältemittel-Report 17*. Sindelfingen: 2012
- [EU07] Amtsblatt der Europäischen Union: *Entscheidung der Kommission vom 9.11.2007 zur Festlegung der Umweltkriterien für die Vergabe des EG-Umweltzeichens an Elektro-, Gasmotor oder Gasabsorptionswärmepumpen*, 2007/742/EG
- [Fri99] Frischknecht, Rolf: *Umweltrelevanz natürlicher Kältemittel*. Bern: Bundesamt für Energie, 1999
- [Mia11] Miara, Marek; Günther, Danny; Kramer, Thomas; Oltersdorf, Thore; Wapler, Jeannette: *Wärmepumpen Effizient – Messtechnische Untersuchung von Wärmepumpenanlagen zur Analyse und Bewertung der Effizienz im realen Betrieb*. Freiburg: Fraunhofer ISE, 2011
- [Pas03] Paschen, H.; Oertel, D.; Grünwald, R.: *Möglichkeiten geothermischer Stromerzeugung in Deutschland*. Karlsruhe: Büro für Technikfolgen-Abschätzung TAB, Arbeitsbereich Nr. 84, 2003
- [Qua18] Quaschnig, Volker: *Erneuerbare Energien und Klimaschutz*. München: Hanser Verlag, 2018
- [Sch02] Schellschmidt, R.; Hurter, S.; Förster, A.; Huenges, E.: Germany. In: Hurter, S. und Haenel, R. (Hrsg.): *Atlas of Geothermal Resources in Europe*. Office for Official Publications of the EU, Luxemburg 2002
- [UBA17] Umweltbundesamt (Hrsg.): *Treibhauspotenziale ausgewählter Verbindungen*. Dessau: Umweltbundesamt, 2017
- [VDI4640] Verein Deutscher Ingenieure VDI (Hrsg.): VDI 4640. *Thermische Nutzung des Untergrunds*. Düsseldorf: VDI Verlag, 2008

Literatur zu Kapitel 9: Nutzung der Biomasse

- [Abs04] Absatzförderungsfonds der deutschen Forst- und Holzwirtschaft (Hrsg.): *Pelletsheizungen – Technik und bauliche Anforderungen*. Bonn: Holzabsatzfonds, 2004
- [DGS04] Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, DGS (Hrsg.): *Leitfaden Bioenergieanlagen*. München: DGS, 2004
- [DIN11] Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN): *DIN EN 14961-2. Feste Biobrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen - Teil 2: Holzpellets für nichtindustrielle Verwendung*. Berlin: Beuth Verlag, 2011
- [Fac96] Fachinformationszentrum Karlsruhe (Hrsg.): *Biomasse, Energetische Nutzungsmöglichkeiten*. BINE Projekt Info-Service Nr. 9/1996
- [FNR08a] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., FNR (Hrsg.): *Biokraftstoffe Basisdaten Deutschland*. Gülzow: FNR, 2008
- [FNR08b] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., FNR (Hrsg.): *Biogas Basisdaten Deutschland*. Gülzow: FNR, 2008
- [Kal03] Kaltschmitt, M.; Merten, D.; Fröhlich, N.; Moritz, N.: *Energiegewinnung aus Biomasse. Externe Expertise für das WBGU-Hauptgutachten 2003*, Internet: www.wbgu.de/wbgu_jg2003_ex04.pdf
- [Kle93] Kleemann, M.; Meli, M.: *Regenerative Energiequellen*. Berlin: Springer, 1993
- [Qua13] Quaschnig, Volker: *Erneuerbare Energien und Klimaschutz*. München: Hanser Verlag, 2013

Literatur zu Kapitel 10: Wasserstofferzeugung, Brennstoffzellen und Methanisierung

- [Dre01] Dreier, T.; Wager, U.: Perspektiven einer Wasserstoff-Energiewirtschaft. In: *BWK* Bd. 53 (2001) Nr. 3, S. 47-54.
- [Fac90] Fachinformationszentrum Karlsruhe FIZ (Hrsg.): *Wasserstoff - Ein Energieträger und Speicher für die Zukunft*. BINE Projekt Info-Service Nr. 8/1990
- [Hüt10] Hüttenrauch, Jens; Müller-Syring, Gert: Zumischung von Wasserstoff zum Erdgas. In: *Energie Wasser Praxis* 10/2010, S. 68-71
- [KIT18] Karlsruher Institut für Technologie KIT (Hrsg.): *Power-to-Gas mit hohem Wirkungsgrad*. Presseinformation 9/2018 vom 5.2.2018
- [LBG13] Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen LBEG: Untertage-Gasspeicherung in Deutschland. In: *Erdöl, Erdgas, Kohle* 11/2013, S. 378-388

- [LBG17] Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen LBEG: Untertage-Gasspeicherung in Deutschland. In: *Erdöl, Erdgas, Kohle* 11/2017, S. 409-415
- [Qua13] Quaschnig, Volker: *Erneuerbare Energien und Klimaschutz*. München: Hanser Verlag, 2013
- [Ste11] Sterner, Michael; Jentsch, Mareike; Holzhammer, Uwe: *Energiewirtschaftliche und ökologische Bewertung eines Windgas-Angebotes*. Gutachten des Fraunhofer IWES, Kassel, 2011
- [Uba10] Umweltbundesamt (Hrsg.): *Energieziel 2050 – 100 % Strom aus erneuerbaren Quellen*. Dessau, 2010
- [Win89] Winter, C.-J.; Nitsch, J. (Hrsg.): *Wasserstoff als Energieträger*. Berlin: Springer, 1989

Literatur zu Kapitel 11: Wirtschaftlichkeitsberechnungen

- [BAFA19] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA): *EnergieINFO*. 2019, Internet: www.bafa.de
- [Ber19] Bergner, Joseph; Quaschnig, Volker: Zehn Kilowatt, Hürde oder Grenze? Dimensionierungsempfehlung für Prosumer. In: *34. Photovoltaik-Symposium*. Bad Staffelstein, 2019
- [Bmb19] Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF, Hrsg.): *Forschung und Innovation in Deutschland 2006, 2008, 2010, 2012, 2014, 2016 und 2018*. Berlin, 2006 bis 2019
- [Bmf18] Bundesministerium für Finanzen (BMF, Hrsg.): *19., 20., 21., 22., 23., 24., 25. Und 26. Subventionsbericht, Bericht der Bundesregierung über die Entwicklung der Finanzhilfen des Bundes und der Steuervergünstigungen für die Jahre 2002 bis 2018*. Berlin, 2003, 2006, 2008, 2010, 2012, 2013, 2015 und 2018
- [BMWi] Bundesministerium für Wirtschaft (BMWi, Hrsg.): *Wirtschaft in Zahlen*. Bonn, verschiedene Jahrgänge
- [Bmw06] Bundesministerium für Wirtschaft (BMWi, Hrsg.): *Finanzplanung bis 2009*. Berlin, 2006
- [Bro06] Brooks, Nick; Nicholls, Robert; Hall, Jim: *Sea Level Rise: Coastal Impacts and Responses. Externe Expertise für das WBGU-Sondergutachten 2006*. Berlin: WBGU, 2006, Internet: www.wbgu.de
- [DEPV19] Deutscher Energie-Pellet-Verband e.V.: *Pellet Preisentwicklung*. Internet: www.depv.de, 2019
- [Deu90] Deutscher Bundestag (Hrsg.): *Gesetz über die Einspeisung von Strom aus erneuerbaren Energien in das öffentliche Netz (Stromeinspeisegesetz) vom 7.12.1990*. BGBl. I S. 2633
- [Deu94] Deutscher Bundestag (Hrsg.): *Grundgesetz für die Bundesrepublik Deutschland*. Bonn, 1994
- [Deu97] Deutscher Bundestag (Hrsg.): *Bericht der Bundesregierung über die Entwicklung der Finanzhilfen des Bundes und der Steuervergünstigungen für die Jahre 1995 bis 1998*. Berlin, Bundestagsdrucksache 13/8420, 1997
- [Deu99] Deutscher Bundestag (Hrsg.): *Bericht der Bundesregierung über die Entwicklung der Finanzhilfen des Bundes und der Steuervergünstigungen für die Jahre 1997 bis 2000*. Berlin, Bundestagsdrucksache 14/1500, 1999
- [Deu06] Deutscher Bundestag (Hrsg.): *Bericht der Bundesregierung über die Entwicklung der Finanzhilfen des Bundes und der Steuervergünstigungen für die Jahre 2003 bis 2006*. Berlin, Bundestagsdrucksache 16/1020, 2006
- [FÖS17] Forum ökologisch-soziale Marktwirtschaft FÖS (Hrsg.): *Was Strom wirklich kostet*. Berlin, FÖS, 2017
- [FÖS18] Forum ökologisch-soziale Marktwirtschaft FÖS (Hrsg.): *Was Braunkohlestrom wirklich kostet*. Berlin, FÖS, 2018
- [Goe94] Goetzberger, Adolf: Wirtschaftlichkeit – Ein neuer Blick in Bezug auf Solaranlagen. In: *Sonnenenergie* 4/1994, S. 3-5
- [Hoh89] Hohmeyer, Olav: *Soziale Kosten des Energieverbrauchs*. Berlin: Springer, 1989
- [Hoh91] Hohmeyer, Olav ; Ottinger, Richard L. (Hrsg.): *External Environmental Costs of Electric Power*. Berlin: Springer 1991
- [IZE95] Informationszentrale der Elektrizitätswirtschaft e.V. (IZE): Was kommt nach dem Kohlepfeffig. In: *Stromthemen* 2/1995, S. 1-2
- [Kle97] Kleinkauf, W.; Durstewitz, M.; Hoppe-Kilpper, M.: Perspektiven der Windenergie-Technik in Deutschland. In: *Erneuerbare Energie* 4/97, S. 11-15
- [Mun12] Münchener Rück (Hrsg.): *NatCatService, Informationsplattform über Naturkatastrophen*. Internet: www.munichre.com, 2012
- [MWV18] Mineralölwirtschaftsverband e.V. (MWV): *Jahresbericht 2018*. Internet: www.mwv.de, 2018
- [Nit90] Nitsch, J.; Luther, J.: *Energieversorgung der Zukunft*. Berlin: Springer, 1990

- [Sta19] Statistisches Bundesamt: *Verbraucherpreisindizes für Deutschland*. Internet: www.destatis.de, 2019
- [Sta19b] Statistisches Bundesamt: *Daten zur Energiepreisentwicklung*. Internet: www.destatis.de, 2019
- [VDI91] Verein Deutscher Ingenieure: *VDI-Richtlinie 2067: Berechnung der Kosten von Wärmeversorgungsanlagen*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1991
- [Wir19] Wirth, Harry: *Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland*. Freiburg: Fraunhofer ISE, 2019
- [Wöh81] Wöhe, G.: *Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre*. München: Franz Vahlen, 1981



Sachwortverzeichnis

A

- Abfluss 351
- Abregelverluste 282
- Abschattung 92, 96, 225
- Abschattungsgrad
 - diffuser 95, 96
 - direkter 95
- Abschattungsverluste 98
- Abschattungswinkel 98
- Absorber 129, 159, 181
 - Beschichtung 129, 159
 - Fläche 111
 - Rohr 167
 - selektiver 130
 - Temperatur 159
- Absorption der Atmosphäre 73
- Absorptionsgrad 125, 164
- Absorptionskoeffizient 200
- Absorptions-Wärmepumpe 379
- Abzinsung 426
- Adsorptions-Wärmepumpe 380
- AFC (alkalische Brennstoffzelle) 406
- Ah-Wirkungsgrad 242
- Air Mass 74
- Akkumulator 240
 - am Solargenerator 251
 - Arten 240
 - Autarkiegrade 286
 - Blei 241
 - Daten 240
 - Eigenverbrauchsanteile 285
 - Kapazität 243
 - Lithium-Ionen 240, 245
 - NaNiCl 249
 - NaS 240, 249
 - NiCd 240
 - NiMH 240, 249
 - Systeme 250, 266, 267
- Akzeptor 196
- Albedo 89
- alkalische Brennstoffzelle 406
- alkalische Elektrolyse 403
- Alphateilchen 69
- Alterungszustand
 - Batterie 248
- AM (Air Mass) 74
- Andasol 180, 418
- Anlagenkonzepte für Windkraftanlagen 335
- Anlaufwindgeschwindigkeit 310
- Annuitätsfaktor 427
- Anströmgeschwindigkeit 303
- Anströmwinkel 303
- Antireflexionsschicht 203
- Arbeitsplätze 66
- Arbeitspunkt 232, 251
- Asynchrongenerator 335, 341
- Asynchronmaschine 328
- Atomkraft *siehe* Kernenergie
- aufgeständerte Solaranlagen 97
- Auftriebsbeiwert 302, 303
- Auftriebskraft 302
- Auftriebsläufer 302
- Aufwindkraftwerk 154
- Ausbauabfluss 351
- Ausbaufallhöhe 351
- Auslegungswindgeschwindigkeit 310
- äußerer Photoeffekt 191
- Ausstrahlung, spezifische 70
- Autarkie 269, 280
- Autarkiegrad 280, 285, 286
- Azimutantrieb 313

B

- B2-Brückenschaltung 255, 258
- B6-Brückenschaltung 258
- Bandabstand 192, 220
 - verschiedener Halbleiter 193
- Bändermodell 192
- Batterie *siehe* Akkumulator
- Batteriekapazität 273
- Batteriemanagementsystem 245
- Batteriespeichersysteme 268

- Beaufort-Skala 293
 Beihilfen 435
 Beschichtung, selektive 129
 Bestrahlung 68
 Bestrahlungsstärke 68, 71
 diffuse 80, 87
 direkte 80, 87
 geneigte Ebene 86
 horizontale 79
 Messung 101, 103
 Tagesgänge 76
 Betonkugelspeicher 356
 Betriebskosten 416
 Betz'scher Leistungsbeiwert 299
 Beweglichkeit 194
 Bioalkohole 393
 Biodiesel 393
 Bioenergieträger
 feste 388
 flüssige 392
 gasförmige 395
 Bioethanol 393
 Biogas 396, 411
 Biokraftstoffträger 398
 Biomasse 386
 Heizungen 398
 Kraftwerke 401
 Potenziale 387
 Produktion 44
 Vorkommen 386
 Biomass-to-Liquid 394
 Bleiakkumulator 241
 Betriebszustände 244
 Ladezustand 243
 Blindleistung 319, 323
 Blindleistungskompensation 337
 Blindwiderstand 319
 Blockingdiode 250, 252
 BMS (Batteriemanagementsystem) 245
 Bodenreflexion 88
 Bohr'sches Atommodell 190
 Bohrturm 371
 Boltzmann-Konstante 194
 Bor 196
 Braunkohle 66
 Brennstoffzelle 45, 405
 Brückenschaltung 255
 BtL-Brennstoffe 394
 Bulb-Turbine 360
 Bypassdioden 226
- C**
- C4-Pflanzen 387
 Cadmiumtellurid 193, 208
 CAPEX 416
 Carnot-Prozess 171
 CCS (Carbon Dioxide Capture and Storage) 49
 CEC-Wirkungsgrad 262
 Cermet 130
 CIS-Solarzelle 208
 Clausius-Rankine-Prozess 171
 COP (Coefficient of Performance) 382
 Coulomb-Kraft 190
 C-Rate 246
 CVD (Chemical Vapor Deposition) 201
- D**
- dachintegrierte Photovoltaikanlage 189
 Dampfkraftwerke 171
 Dampfreformierung 402
 Dänisches Konzept 335
 Darrius-Rotor 307
 Deckungsgrad, solarer 149
 Defektelektronen 194
 Deklination 83
 DHÜ 186
 Dichte der Luft 298
 Dielektrizitätskonstante 190
 Differenzierung der Globalstrahlung 81
 diffuser Abschattungsgrad 96
 diffuser Strahlungsanteil 82
 Diffusionsspannung 196
 Diffusstrahlung 80, 87
 Diode 211
 Diodendurchbruch 215
 Diodenfaktor 211, 223
 Diodensättigungsstrom 223
 direkter Abschattungsgrad 95
 Direktmethanol-Brennstoffzelle 407
 Direktstrahlung 80, 86
 Dish-Stirling-Anlagen 183
 Distickstoffoxid 27
 Divergenz 158
 DMFC (Direktmethanol-Brennstoffzelle) 407
 DOD (Depth of Discharge) 246
 Donator 195
 doppelte Abdeckung 126
 dreieckiges Silizium 201
 Drehfeld 320, 321
 Drehmoment 304
 Asynchronmaschine 333
 Synchronmaschine 327
 Drehstrommaschinen 317
 Drehstromwicklung 321
 Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie 333
 Dreieckschaltung 322
 Druck-Receiver 182
 Dünnschichtzellen 206
 Durchström-Turbine 361
- E**
- EEG (Erneuerbare Energien Gesetz) 290, 429, 436
 Effektivwert 318

- EFG-Verfahren 202
 Eigenleitung 194
 Eigenverbrauchsanteil 278, 284, 286
 Eigenverbrauchssysteme 265, 277
 Einbauwinkel 303
 Einblattrotoren 308
 Eindiodenmodell 212
 Einfallswinkel 85, 163
 Einfallswinkelkorrekturfaktor 135, 164
 Einkreisystem 114
 Eintakt-Sperrwandler 237
 elektrische Feldkonstante 190
 elektrische Leitfähigkeit 195
 elektrische Maschinen 316
 elektrische Wechselstromrechnung 317
 elektrischer Widerstand 232
 Elektrizitätsversorgung 58
 Elektroherd 16
 Elektrolumineszenz 210
 Elektrolyse 64, 403
 Elektrolyt 241, 244, 408
 Elektronendichte 194, 195
 Elektronenmasse 190
 elektrotechnische Größen 189
 Elementarladung 190
 Elevation 82
 Emissionsgrad 125, 146
 empfehlenswerte Rohrdurchmesser 138
 Empfindlichkeit, spektrale 199
 Endenergie 17
 Endenergieverbrauch 22
 Endverluste 163
 Energie
 - Betonkugelspeicher 357
 - Einheiten 14
 - Elektron 191
 - Energieerhaltungssatz 15
 - Gestehungskosten 417, 427
 - Importe 434
 - kinetische 298
 - Lageenergiespeicher 358
 - Photon 191
 - Preise 433
 - Pumpspeicherkraftwerke 353
 - Wind 298
 Energiebänder 191
 Energiebedarf
 - Deutschland 20
 - Entwicklung 18
 - Entwicklung weltweit 46
 - Welt 18
 - zukünftiger 46
 Energiewende 53
 Energiezustände 192
 ENS 261
 enthalpische Zellspannung 409
 Entladerate 246
 Entladestrom 244
 Entladetiefe 243, 246
 Entropie 173
 Erde
 - Bestrahlungsstärke 71
 - Daten 69
 - Primärenergieverbrauch 19
 Erdgas 60, 411, 424
 Erdgasspeicher 64, 413
 Erdkern 368
 Erdkollektor 384
 Erdöl 19, 424, 433
 Erdsonden 384
 Erdwärmekollektor 384
 Erfahrungskurve 430
 Erfahrungswert 431
 Erneuerbare-Energien-Gesetz 290, 429, 436
 Erregerstrom 325
 Erregerwicklung 324
 Ersatzschaltbild
 - Asynchronmaschine 331
 - Asynchronmaschine, vereinfachtes 332
 - Solarzelle, vereinfachtes 212
 - Solarzelle, Zweidiodenmodell 215
 - Synchronmaschine 326
 Ethanol 393
 Euro-Wirkungsgrad 261
 EVA (Ethylen-Vinyl-Acetat) 206
 EVA-Vernetzungsanalyse 210
 externe Kosten 434, 439
 externer Quantenwirkungsgrad 198
- F**
- FAME (Fettsäuremethylester) 393
 Farbstoffzellen 208
 Farbtöne 72
 Feldeffekttransistor 252, 254
 Feldstärke, magnetische 320
 feste Bioenergieträger 388
 Festkörperakkumulator 248
 Festmeter 390
 Feststoffbatterie 248
 Fettsäuremethylester 393
 Fischer-Tropsch-Synthese 395
 Flächennutzungsgrad 97
 Flachkollektor 124
 - Absorber 129
 - Frontscheibe 125
 - Kollektorgehäuse 126
 Flasher 106
 Flicker 343
 Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) 27
 Flusssdichte, magnetische 320
 flüssige Bioenergieträger 392
 Forschung und Entwicklung 437
 Fotovoltaik *siehe* Photovoltaik
 Fourier-Analyse 255
 Francis-Turbine 361

Freileitungen 185
 Fresnelkollektor 160
 Frischwasserstation 116
 Frontscheibe 125
 Fukushima 34
 Füllfaktor 218
 Füllgrad 246

G

Gallium-Arsenit 193
 gasförmige Bioenergieträger 395
 Gasherid 16
 Gaskraftwerke 60
 Gasturbine 174
 Gasungsspannung 244
 Generator 316
 geostrophischer Wind 297
 Geothermie 37, 368
 Kosten 422
 geothermische Heizwerke 372
 geothermische Kraftwerke 373
 Gesamtkosten 416
 Geschichte der Photovoltaik 188
 Geschichte der Windkraft 290
 gespeicherte Wärme 140
 Getriebe 314
 getriebelose Windkraftanlage 340
 Gezeitenkraftwerke 37, 364
 Gibbs'sches Potenzial 409
 Giermotor 313
 Gierwinkel 313
 Gleichdruckturbine 359
 Gleichspannungswandler 233
 Gleitzahl 303
 globale Bestrahlung 77
 globale Zirkulation 292
 Gondel 314
 Grenzschichtprofil 296, 297
 Gridparity 277, 431
 Gütegrad 382

H

H5-Schaltung 259
 Hadley-Zelle 291
 Halbleiter 192
 direkt 200
 indirekt 200
 n-leitend 196
 p-leitend 196
 Halbleitersensor 102
 harmonische Analyse 255
 Harrisburg 34
 Häufigkeitsverteilung 293
 H-Brückenschaltung 255
 Heat Pipe 127
 Heizwert
 Biomasse 387

Holz 389, 390
 Heliostatenfelder 170
 Hellmann, Potenzansatz 297
 HERIC-Schaltung 259
 Heterojunction 205
 Heteroübergang 205
 HGÜ 186
 High-Flow-Prinzip 115
 Himmelsklarheit 88
 Himmelstemperatur 146
 HIT-Zelle 205, 219, 221, 230
 Hochsetzsteller 236, 260
 Höchstspannungs-Gleichstrom-Übertragung 186
 Holzbriketts 389
 Holzfeuchte 389
 Holzhackschnitzel 391
 Holzpellets 389, 391
 Preise 424
 Horizontallykeitsindex 88
 Hot-Dry-Rock-Verfahren 371
 Hot-Spots 226
 H-Rotor 307

I

IAM *siehe* Einfallswinkelkorrekturfaktor
 Importe fossiler Energieträger 434
 innerer Photoeffekt 193
 Inselnetzwechselrichter 260
 Intergovernmental Panel on Climate Change 46
 internationaler Klimaschutz 51
 interner Quantenwirkungsgrad 198
 intrinsische Trägerdichte 194
 invertierender Wandler 237
 Investitionskosten 416
 Ionisationsenergie 191, 195
 IPCC 46
 ISCCS-Kraftwerk 179
 Isolator 192
 Itaipu-Kraftwerk 352, 422

J

Jahresarbeitszahl 56, 382
 Jahresdauerlinie 348
 Joule-Prozess 174

K

Käfigläufer 329
 Kalina-Prozess 374
 Kapazität (Akkumulator) 243
 Kapitalvermehrung 441
 Kapitalwert 426
 Kaplan-Turbine 359
 Karbonatschmelzen-Brennstoffzelle 408
 Kavernenspeicher 413
 Kernenergie 31
 Anteil an der Stromerzeugung 33
 Entwicklungskosten 437

Kernfusion 35
 Kernspaltung 31
 Unfälle 34, 438
 Uranvorkommen 24, 33
 Kernfusion 35, 69
 kinetische Energie 298
 Kippmoment 328, 334
 Kippschlupf 334
 Klimaschutzabkommen von Paris 30
 Klimaschutzvorgaben 31
 Klimaveränderungen 29
 Klirrfaktor 257
 Kloss'sche Formel 334
 Klucher-Modell 87
 Kobalt 246
 Kohleausstieg 59
 Kohlekommission 59
 Kohlendioxid 26, 403
 Abscheidung 49
 Emissionen 47, 54, 60
 Konzentration 26, 49
 spezifische Emissionsfaktoren 51
 Wärmepumpe 384
 Kohlepfeffig 435
 Kollektor 121, 161
 Austrittstemperatur 137
 Durchfluss 136
 Durchsatz 136
 Endverluste 163
 Fläche, pro-Kopf 39
 Nutzleistung 131, 163
 Stillstandstemperatur 133, 159
 Wirkungsgrad 131, 132, 166
 Kollektorkreisnutzungsgrad 150
 Kollektorwirkungsgradfaktor 132
 komplexe Wechselstromrechnung 318
 Kompressions-Wärmepumpe 377
 Konvektion 125, 127, 131, 146
 Konversionsfaktor 132
 Konzentrationsfaktor 158
 Konzentratormodul 209
 konzentrierende Kollektoren 160
 konzentrierende Solarthermie 157
 konzentrierende solarthermische Anlagen 175
 Kosten
 externe 434, 439
 Forschung und Entwicklung 437
 Geothermie 422
 Holzpelletsheizung 424
 konventionelle Energiesysteme 432
 Photovoltaik 419, 428
 solarthermische Kraftwerke 418, 428
 solarthermische Wassererwärmung 417, 428
 Wärmepumpe 423
 Wasserkraft 422
 Windkraft 421, 429
 Kostensenkungen 430
 Kreisfrequenz 317

Kreisfrequenz, Elektron 190
 Kristallgitter 194
 künstliche Sonne 106
 Kupfer-Indium-Diselenid 208
 Kupferrohre 138
 Kurzschlussstrom 217
 Kværner-Verfahren 403

L

Laderegler 251
 Ladewirkungsgrad 242
 Ladezustandsbilanzierung 274
 Lageenergiespeicher 357
 Lagerraumvolumen 400
 Laminieren 206
 Längenausdehnung 167
 Längsregler 252
 Laser Grooved Buried Contact 204
 Latentwärmespeicherung 142
 Läufer 324, 329
 Laufwasserkraftwerke 350
 Lee 296
 Leeläufer 313
 Leerlaufspannung 217, 221, 231, 410
 Legionellen 116
 Leistung 14, 298, 319, 342
 Pumpspeicherkraftwerk 354
 Turbine 363
 Wasser 350
 Wasserkraftwerk 351
 Wind 298
 Leistungsbeiwert 299, 305
 Approximation 305
 nach Betz 299
 Schalenkreuzanemometer 301
 Widerstandsläufer 302
 Leistungsdichte des Windes 290
 Leistungsfaktor 320
 Leistungstransistoren 254
 Leistungszahl 382
 Leiter 192
 Leitfähigkeit 192, 195
 Leitungen 136, 250
 Leitungsaufheizverluste 139
 Leitungsband 192
 Leitungsverluste 250
 Leuchtdichte 68
 LGBC (Laser Grooved Buried Contact) 204
 lichttechnische Größen 68
 Light-Trapping 200, 204
 Liniensammler 161
 Liniensammler 160
 Lithiumeisenphosphat 245
 Lithium-Ionen-Akkumulator 240, 245
 Löcherdichte 194, 196
 logarithmisches Grenzschichtprofil 296
 Low-Flow-Prinzip 115

Luftmassenstrom 298
 Luftspaltleistung 333
 Luftverschmutzung 438
 Luv 296
 Luvläufer 313

M

magnetische Feldkonstante 320
 magnetische Feldstärke 320
 magnetische Induktion 320
 Maschinen, elektrische 316
 Massendefekt 32
 Massenstrom 137, 298
 Master-Slave-Wechselrichter 264
 maximale Konzentration 158
 maximaler Solarzellenwirkungsgrad 197, 208
 Maximum Power Point 217
 MCFC (Karbonatschmelzen-Brennstoffzelle) 408
 Meeresspiegel, Anstieg 29
 Meeresspiegelanstieg 48
 Meeresströmungskraftwerke 365
 Mehrspeichersysteme 117
 Membran-Brennstoffzelle 407
 Methan 27, 411
 Methanisierung 64, 411
 Mie-Streuung 73
 mikrokristalline Solarzelle 208
 mikromorphe Solarzelle 208
 mittlere Ortszeit 83
 Modultests 209
 Modulwechselrichter 265
 Momentanleistung 319
 Momentenbeiwert 304
 MOSFET 252, 254
 MPP (Maximum Power Point) 217
 Regelung 238
 Tracker 238, 251
 MPP-Anpassungswirkungsgrad 259

N

Nachführung 89
 Nachführungswinkel 167
 NaNiCl-Akkumulator 249
 NA-Schutz 261
 Natrium-Schwefel-Akkumulator 240, 249
 n-Dotierung 196
 Neigung 89, 90, 163
 Neigungsgewinne 91
 Nennwindgeschwindigkeit 310
 Netzanschluss 343
 Netzbetrieb 342
 Netzfrequenz 322
 Netzparität 431
 Nevada Solar One 180, 418
 Newton-Verfahren 214
 Nickel-Cadmium-Akkumulator 240, 249
 Nickel-Metall-Hydrid-Akkumulator 240, 249

Niederspannungsrichtlinie 260
 Niedertemperaturspeicher 142
 Niedertemperaturwärme 44
 Nuklidmassen 70
 Nutzenergie 17

O

Oberfläche, Kugelkappe 144
 Oberflächenpassivierung 204
 Oberflächentexturierung 204
 Oberschwingungen 256
 offene Gasturbine 174
 offener Receiver 181
 Öffnungswinkel der Sonne 158
 Oil Parity 432
 Ölkrise 18
 Ölparität 432
 Ölpreise 424, 433
 OPEX 416
 optischer Wirkungsgrad 132, 164
 ORC-Prozess 375
 Ortszeit 83
 Ossannakreis 332
 Ossberger-Turbine 361
 Ost-West-Ausrichtung 101
 oxidkeramische Brennstoffzelle 408
 Ozon 27

P

PAFC (Phosphorsäure-Brennstoffzelle) 407
 Parabolrinnenkraftwerke 175
 Parabolschüssel 170
 Parallelregler 252
 Parallelschaltung von Solarzellen 230
 Parallelwiderstand 212, 223
 Pariser Klimaschutzabkommen 30
 partielle Oxidation 402
 Passatwind 291
 Passivierung 204
 p-Dotierung 196
 Pellets 391
 Pelletslagerraum 400
 Pelton-Turbine 362
 PEM (Membran-Brennstoffzelle) 407
 PERC-Solarzelle 204
 Perez-Modell 87
 Performance Ratio 276
 Perowskit-Solarzelle 209
 petrothermale Geothermie 376
 Pfaffenhofen, Heizkraftwerk 401
 Pflanzenöl 392
 Phasenwinkel 317
 Phosphor 195
 Phosphorsäure-Brennstoffzelle 407
 Photoeffekt 191
 äußerer 191
 innerer 193

Photostrom 199, 211, 220
 Photovoltaik 40, 188
 Energiewende 62
 Kosten 419, 428
 Photovoltaiksystem
 AC-gekoppeltes Batteriesystem 266
 Batteriespeicher und Wärmepumpe 270
 DC-gekoppeltes Batteriesystem 267
 Generator-gekoppeltes Batteriesystem 267
 Inselnetzsystem mit Batteriespeicher 252
 thermische Nutzung 270
 Photovoltaiksystem
 Wasserstoffspeicherung 269
 PID (Potenzialinduzierte Degradation) 260
 Pitch-Regelung 303, 312
 Pitchwinkel 303
 Planck'sches Spektrum 73
 Planck'sches Wirkungsquantum 190
 Planetenenergie 37
 Plutonium 33
 pn-Übergang 196
 Polpaarzahl 322
 Polradspannung 325
 Polradwinkel 325
 Polteilung 322
 polumschaltbare Generatoren 337
 Porenspeicher 413
 Potenzansatz nach Hellmann 297
 Potenziale
 Photovoltaik 40
 solarthermische Kraftwerke 39
 Windkraft 43
 Power-to-Gas 56, 63, 412
 Preisindex 416
 Preissteigerungsrate 416
 Primärenergie 17
 Primärenergieverbrauch 19
 Deutschland 21
 Progress Ratio 430
 Pulsweitenmodulation 258
 Pumparbeit 355
 Pumpe 111, 114
 Pumpspeicherkraftwerke 353
 Punkt maximaler Leistung 217
 Punktkonzentratoren 161, 170
 PVC 129
 p-V-Diagramm 172
 PWM (Pulsweitenmodulation) 258
 Pyranometer 101
 Pyrheliometer 103

Q

Quantenwirkungsgrad 198

R

Rankine-Prozess 171
 Rapsölmethylester 393

Rauigkeitslänge 297
 Raumladungszone 196, 197
 Raummeter 390
 Rayleigh-Streuung 73
 Rayleigh-Verteilung 295
 Receiver 157, 181
 Rechteckwechselrichter 255
 Reflexionsgrad 125, 164
 Regelung
 MPP (Maximum Power Point) 238
 Pitch 303, 312
 Stall 311
 regenerative Stromversorgung 61
 Reichweite
 Erdgas 24
 Erdöl 24
 fossile Energieträger 24
 Kohle 24
 Uran 24
 Reihenabstand, optimaler 97
 Reihenschaltung von Solarzellen 223
 Reihenverschattungen 168
 relative Luftfeuchte 147
 relative spektrale Empfindlichkeit 199
 Reserven fossiler Energieträger 24
 Resonanzwechselrichter 255
 reversible Zellspannung 409
 Rheinfelden 348, 422
 RME (Rapsölmethylester) 393
 Rohöleinheit 14
 Rohölpreise 433
 Rohrdurchmesser 137
 Rohrleitungen 136
 Rohr-Turbine 359
 Rotorblattzahl 308
 Rückflussdiode 250
 Rückseitenkontaktzellen 204
 rückseitige Wärmedämmung 126
 Rundholz 389

S

Sabatier-Prozess 411
 Sahara 78
 saisonaler Speicher 118
 Salzkavernen 405
 Sanftanlaufschaltung 335
 Sättigungsdampfdruck 146
 Sättigungsstrom 211, 220
 Säuredichte 243
 Savonius-Rotor 306
 Schalenkreuzanemometer 301
 Schattenball 103
 schattentolerante Module 226
 Scheinleistung 319, 323
 Scheitholz 389
 Scheitholzkessel 399
 Schenkelpolläufer 324

- Schichtenspeicher 116, 118
- Schleifringläufer 329
- Schlupf 329, 336
- schmutziges Silizium 201
- Schnelllaufzahl 301, 303, 310
- Schüttraummeter 390
- Schwarzchrom 130
- Schwefelhexafluorid 27
- Schwerkraftsystem 113
- Schwimmbadabdeckung 147
- Schwimmbadabsorber 129
- Schwimmbadbeheizung 110
- Schwimmbecken 145
- Sechspuls-Brückenschaltung 258
- SEGS-Parabolrinnenkraftwerke 176
- Sektorkopplung 60
- Selbstentladung 242
- selektive Beschichtung 129, 159
- Serienregler 252
- Serienwiderstand 212, 223
- Shottkydiode 250
- Shuntregler 252
- Siemens-Verfahren 201
- Silan-Prozess 201
- Silizium 193, 200
 - Abkürzungen 201
 - amorphes 207
 - metallurgisches 200
 - mikrokristallines 208
 - monokristallines 202
 - polykristallines 201
- Simulationsprogramme 444
- SOC (State of Charge) 246
- SOFC (oxidkeramische Brennstoffzelle) 408
- Software 444
- SOH (State of Health) 248
- Solarchemie 184
- solare Deckungsrate 151, 153
- solare Heizung 118, 154
- solare Nahwärme 119
- solare Schwimmbadbeheizung 110
- solare Trinkwassererwärmung 111, 151
- solarer Deckungsgrad 149
- solares Kühlen 120
- Solargenerator 230, 231
- Solarkollektoren 39, 121, 160
- Solarkonstante 71
- Solarmodul 205, 223
 - Abschattungen 225
 - Aufbau 205
 - technische Daten 231
- Solarthermie 107
- solarthemische Kraftwerke 39
 - Kosten 418, 428
- solarthemische Systeme 110
- solarthemische Wassererwärmung 107
 - Kosten 417, 428
- Solarturmkraftwerke 180
- Solarzelle 190
 - Dünnschicht 206
 - Eindiodenmodell 212
 - elektrische Beschreibung 211
 - Ersatzschaltbilder 211
 - Funktionsprinzip 193
 - Funktionsweise 190
 - Herstellung 200
 - I-U-Kennlinie 212
 - Kennlinie 218
 - Parameterbestimmung 222
 - Prinzip 197
 - Temperaturabhängigkeit 219
 - Vorgänge in 198
 - Zellparameter 217
 - Zweidiodenmodell 215
- Sonne
 - Daten 69
 - Oberflächentemperatur 71
 - Position 82
 - spezifische Ausstrahlung 70
 - Strahlungsleistung 70
- Sonnenazimut 82
- Sonnenbahndiagramm 84, 94
- Sonneneinfallswinkel 85, 163
- Sonnenenergie 38
 - direkte 38
 - Energiemenge 38
 - indirekte 41
- Sonnenhöhe 82, 98
- Sonnenofen 184
- Sonnensimulator 106
- Sonnenstand 75, 82
- Sonnenstrahlung 68
- Sparkassenformel 425
- Speicher 141
 - Batterien 240
 - Betonkugelspeicher 356
 - Erdgas 64
 - Kollektor 122
 - Konzept 64
 - Lageenergiespeicher 357
 - Medien 141
 - Möglichkeiten 253
 - Parabolrinnenkraftwerk 178
 - Pumpspeicher 353
 - saisonal 118
 - Schichten 116, 118
 - Temperatur 144
 - Verluste 143, 144
 - Wasserkraftwerke 352
 - Zeitkonstante 144
- speicherbare Wärmemenge 142
- Speicherung sensibler Wärme 142
- spektrale Empfindlichkeit 102, 199
- Spektrum 74, 130
- Spektrum AM0 73
- Spektrum AM1,5g 74

- spezifische Ausstrahlung 68, 70
 Stadtgas 411
 Stall-Regelung 311
 Standardlastprofile 281
 Standardtestbedingungen 218
 Ständer 320, 324
 Stapelzellen 208
 STC (Standardtestbedingungen) 218
 Stefan-Boltzmann-Gesetz 71
 Steinkohleeinheit 14
 Sternschaltung 322
 Stirling-Prozess 175
 Störstellenleitung 195
 Strahldichte 68, 72, 73
 Strahlungsgewinne 147
 Strahlungsleistung 68, 70
 strahlungsphysikalische Größen 68
 Strangdiode 230, 264
 Strangwechselrichter 265
 String-Ribbon-Verfahren 202
 Stromeinspeisegesetz 290
 Stromerzeugung 59
 Stromimport 185
 Stromortskurve 331
 Stromrichtererkaskade 341
 Strömungsverlauf 299
 Stromversorgung 61
 Stundenwinkel 84
 Subventionen 435
 Synchrondrehzahl 322
 Synchrongenerator 338
 Synchronisation 328
 Synchronisierbedingungen 328
 Synchronmaschine 324
 Synthesegas 395
 System Performance Index 287
- T**
- Tandemzellen 208
 TapChan-Anlagen 366
 Tastverhältnis 234, 238
 Taupunkttemperatur 146
 Tausend-Dächer-Programm 188
 TCO 205, 207, 260
 technische Daten
 - Asynchrongenerator 335
 - Batteriespeichersysteme 268
 - Dish-Stirling-Anlage 184
 - Itaipu-Kraftwerk 352
 - Parabolrinnenkollektoren 162
 - Parabolrinnenkraftwerke 177, 180
 - Solarkollektor 133
 - Solarmodule 231
 - Solarturmkraftwerke 181
 - Wechselrichter 263
- tektonische Platten 369
 Temperaturabhängigkeit bei Solarzellen 219
 Temperaturanstieg 29, 47
 Temperaturen, Geothermie 370
 Temperaturschichtung 145
 Temperatursensor 114
 Temperaturspannung 211, 219
 Texturätzen 204
 thermische Verluste 132
 thermischer Sensor 102
 thermodynamische Größen 108
 thermodynamischer Wirkungsgrad 409
 Thermografie 210
 Thermosiphonanlage 113
 Tiefentladung 244
 Tiefsetzsteller 234
 Tiegelziehverfahren 202
 Tinox 130
 Totalverlust der Kapitalanlage 441
 Transformator 260, 330
 Transmissionsgrad 125, 164
 Transmissionsverluste 145
 transparente Wärmedämmung 122
 Transport 57
 Treibhauseffekt 25
 - anthropogener 25
 - Indizien 29
 - natürlicher 25
 - Temperaturanstieg 29
 - Verursachergruppen 28
 - zukünftige Schäden 439
- Treibhausgas
 - Distickstoffoxid 27
 - Emissionen 52
 - FCKW 27
 - Kohlendioxid 26
 - Methan 27
 - Ozon 27
 - Pro-Kopf-CO₂-Emissionen 28
 - Schwefelhexafluorid 27
- Trinkwasserspeicher 142
 Triplezellen 208
 Tschernobyl 21, 32, 34
 T-S-Diagramm 173
 Turbine
 - Dampfturbine 172
 - Francis 361
 - Gasturbine 174
 - Kaplan 359
 - ORC 374
 - Ossberger 361
 - Pelton 362
 - Pump 361
 - Rohr 359
 - Wind 298
- Turbinenarten 358
 Turboläufer 324
 Turm 155, 180, 314
 Turmwirkungsgrad 155
 TWD (transparente Wärmedämmung) 122

U

Überdruckturbinen 359
 Übererregung 327
 Überlebenswindgeschwindigkeit 184, 310
 Übersetzungsverhältnis 237
 übersynchrone Stromrichteraskade 341
 Umfangsgeschwindigkeit 301, 303
 Umgebung, Beschreibung 92
 Umrechnungsfaktoren für Energieeinheiten 14
 Umrichter 233
 Untererregung 327
 Untertagespeicherung 411
 Uranabbau 32
 Uranvorräte 24

V

Vakuumflachkollektor 127
 Vakuumröhrenkollektor 127
 Valenzband 192
 variabler Schlupf 336
 verbotene Zone 192
 Verbraucherpreisindex 416
 Verdunstungsverluste 147
 Verluste, Wasserstoffspeicherung 405
 Verlustfaktor 351
 Verschattungen 168
 Verschmutzungen, Verluste 97
 Verzerrungsfaktor 257
 Vierquadrantenbetrieb 326
 Vollpolläufer 324
 Volumenstrom 137, 298
 Vorsätze 14
 Vorsatzzeichen 14

W

Wafer 203
 wahre Ortszeit 83
 Wärme 107
 Wärmeänderung 107
 Wärmebedarf bei Freibädern 111
 Wärmedurchgang 109
 Wärmedurchgangskoeffizient 108, 109, 143
 Wärmedurchgangszahl 108, 139, 143
 Wärmeenergie 16
 Wärmefluss 107, 108
 Wärmegeheimhaltungskosten 418, 428
 Wärmekapazität 16, 108
 Wärmekraftmaschinen 171
 Wärmeleitfähigkeit 108, 109
 Wärmepumpe 45, 56, 270, 377, 382
 Kosten 423
 Wärmerohr 127
 Wärmespeicher 113
 Wärmestrahlung 125, 129, 131, 146
 Wärmestrom 108, 109
 Wärmetauscher 127, 142, 176, 178

Wärmeträgerdurchsatz 116
 Wärmeübergangskoeffizient 108, 109, 146, 165
 Wärmeübergangszahl 139, 143
 Wärmeverluste 142
 Wärmeversorgung 55
 Warmwasserbedarf 148
 Wassergehalt 389
 Wasserkochen 15
 Wasserkraft 42, 345
 Kosten 422
 Wasserkraftanlagen 350
 Wasserstoff 402
 energetische Daten 402
 Erzeugung 45
 Photovoltaik-Speichersystem 269
 Speichertypen 404
 Transport 405
 Wasserturbinen 358
 Watt-peak (Wp) 218
 Wechselrichter 254
 Daten 263
 Master-Slave 264
 Photovoltaik 259
 Wirkungsgrad 261
 Wechselspannung 317
 Wechselstromrechnung 317
 Weibull-Verteilung 294
 Wellenkraftwerke 366
 Wellenlängen 72
 Weltenergieverbrauch 18
 Western Mill 42
 Wh-Wirkungsgrad 242
 Widerstandsbeiwert 300
 Widerstandskraft 300, 302
 Widerstandslast 231
 Widerstandsläufer 300
 Wind
 Dargebot 291
 Entstehung 291
 geostrophischer 297
 Geschwindigkeit 293
 Geschwindigkeitsverteilungen 293
 Leistung 298
 Nachführung 313
 Richtung 296
 Stärke 292
 Windkraft 42, 290
 Energiewende 62
 Windkraftanlagen 306
 Anlagenaufbau 314
 Ertrag 342
 getriebelose 340
 horizontale Drehachse 307
 in Deutschland 43
 Komponenten 308
 Kosten 421, 429
 vertikale Drehachse 306
 Wirkleistung 319, 323

Wirkungsgrad 16

- Aufwindkraftwerk 155
- Batterieladung 242
- Betonkugelspeicher 356
- Biomasseproduktion 386
- Brennstoffzelle 409
- CEC (California Energy Commission) 262
- Euro 261
- Generator 363
- Gleichspannungswandler 233
- Kollektorkreis 150
- konzentrierender Kollektor 166
- Kraftwerke in Deutschland 16
- Lageenergiespeicher 358
- Methanisierung 413
- optischer 132, 164
- Pumpspeicherkraftwerk 355
- Solarkollektor 132
- Solarzelle 197, 207, 208, 219
- Turbine 362
- Wasserkraftwerk 351
- Wasserstofferzeugung 413

Wechselrichter 261

- Windkraftanlage 300
 - zusammengeschaltete Turbinen 364
- Wirtschaftlichkeitsberechnung 415
- Kritik 440
 - mit Kapitalverzinsung 425
 - ohne Kapitalverzinsung 416

Z

- ZEBRA-Batterie 249
- Zeigerdiagramm 326
- Zeitkonstante des Speichers 144
- Zellspannung 223, 240, 409
- Zenitwinkel 85
- Zentrifugalkraft 190
- Zirkulationsverluste 139
- Zonenziehverfahren 202
- zweiachsige Nachführung 90
- Zweidiodenmodell 215
- Zweikreissystem 114, 115
- Zweispichersysteme 117