

HANSER



Leseprobe

zu

„Photovoltaik“

von Konrad Mertens

Print-ISBN: 978-3-446-46404-9
E-Book-ISBN: 978-3-446-46506-0

Weitere Informationen und Bestellungen unter
<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-46404-9>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Vorwort

Dieses Buch entstand in Folge meiner Vorlesungen zum Thema Photovoltaik an der Fachhochschule Münster. Immer wieder fragten die Studenten nach einem geeigneten Lehrbuch, das ich ihnen zur Begleitung der Vorlesung empfehlen könne. Leider war die Suche auf dem Buchmarkt schwierig, obwohl es eine ganze Reihe von Büchern zum Thema Photovoltaik gibt. Viele Lehrbücher konzentrieren sich fast ausschließlich auf die Zelltechnologien und betrachten diese von einer sehr theoretischen, formellastigen Seite. Hinzu kommt, dass der Inhalt oftmals veraltet ist. Auf der anderen Seite existieren Bücher zur Planung und Auslegung von Photovoltaikanlagen. Diese können einem Solarinstallateur durchaus Hilfestellung geben, vereinfachen aber die technischen Sachverhalte so stark, dass sie keine Basis zu einem echten Verständnis der Photovoltaik sind.

Aus diesem Grund wurde im vorliegenden Buch Wert auf eine anschauliche und gleichzeitig korrekte Darstellung der physikalischen und elektrotechnischen Grundlagen gelegt. Neben den Zelltechnologien stehen auch die Systemtechnik (Wechselrichter, Anlagentypen etc.) sowie Planung und Betrieb (Standortwahl, Monitoring von Anlagen etc.) im Mittelpunkt. Eine Besonderheit ist außerdem die Präsentation aktueller Methoden zur Vermessung und Qualitätsuntersuchung von Solarmodulen, wie sie im Photovoltaik-Testlabor der Fachhochschule Münster angewendet werden.

Ein ausdrücklicher Dank gilt meinen Studenten, die mit großem Interesse und Engagement die Vorlesung Photovoltaik Jahr für Jahr bereichern. Ihre klugen Fragen haben Eingang in dieses Buch gefunden, so dass die jeweiligen Antworten auch dem Leser dienen können. Außerdem bedanke ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Josef Lindenbaum für fruchtbare fachliche Diskussionen und seine Unterstützung bei einer Vielzahl von Messungen.

„Papa, seit du an diesem Buch schreibst, hast du gar keine Zeit mehr für uns“, diesen Vorwurf hörte ich gelegentlich während der Entstehungszeit dieses Buches. Daher gilt mein besonderer Dank meiner Frau Annette sowie meinen Kindern Martin, Barbara und Viktoria, die mich während dieser Zeit immer unterstützt haben.

Steinfurt, im August 2011

Konrad Mertens

Vorwort zur fünften Auflage

Die große Nachfrage macht es möglich, dass die inzwischen fünfte Auflage dieses Lehrbuches erscheinen kann. Ausdrücklich bedanke ich mich bei den Lesern für die durchweg positiven Kommentare zur vierten Auflage.

Die Entwicklung der Photovoltaik ist rasant, sowohl bei der Technik wie bei den Kosten. Die Photovoltaik ist inzwischen die günstigste aller erneuerbaren Energien – eine Entwicklung, die sich in den nächsten Jahren noch fortsetzen wird. Die aktuelle Ausgabe umfasst daher vielfältige Aktualisierungen und bleibt in dieser dynamischen Branche für jeden Interessierten up-to-date.

Besonders hinweisen möchte ich auf die Website

www.lehrbuch-photovoltaik.de

Auf dieser finden sich unter anderem die Abbildungen des Buches, unterstützende Software, die Lösungen der Übungsaufgaben und Korrekturen zum Buch.

Ich wünsche allen Lesern viel Freude und Erfolg beim Einarbeiten in die Photovoltaik.

Steinfurt, im Februar 2020

Konrad Mertens

Inhalt

1	Einführung	19
1.1	Einleitung	19
1.1.1	Wozu Photovoltaik?	19
1.1.2	Für wen ist dieses Buch gedacht?	20
1.1.3	Aufbau des Buches	20
1.2	Was ist Energie?	21
1.2.1	Definition der Energie	21
1.2.2	Einheiten der Energie	23
1.2.3	Primär-, Sekundär- und Endenergie	23
1.2.4	Energieinhalte verschiedener Stoffe	24
1.3	Probleme der heutigen Energieversorgung	25
1.3.1	Wachsender Energiebedarf	25
1.3.2	Verknappung der Ressourcen	26
1.3.3	Klimawandel	27
1.3.4	Gefährdung und Entsorgung	29
1.4	Erneuerbare Energien	30
1.4.1	Die Familie der erneuerbaren Energien	30
1.4.2	Vor- und Nachteile von erneuerbaren Energien	31
1.4.3	Bisherige Entwicklung der erneuerbaren Energien	32
1.5	Photovoltaik – das Wichtigste in Kürze	32
1.5.1	Was bedeutet „Photovoltaik“?	32
1.5.2	Was sind Solarzellen und Solarmodule?	33
1.5.3	Wie ist eine typische Photovoltaikanlage aufgebaut?	33
1.5.4	Was „bringt“ eine Photovoltaikanlage?	34
1.6	Geschichte der Photovoltaik	35
1.6.1	Wie alles begann	35
1.6.2	Die ersten echten Solarzellen	36
1.6.3	From Space to Earth	38
1.6.4	Vom Spielzeug zur Energiequelle	38

2	Strahlungsangebot der Sonne	41
2.1	Eigenschaften der Solarstrahlung	41
2.1.1	Solarkonstante	41
2.1.2	Spektrum der Sonne	42
2.1.3	Air Mass	43
2.2	Globalstrahlung	44
2.2.1	Entstehung der Globalstrahlung	44
2.2.2	Beiträge von Diffus- und Direktstrahlung	45
2.2.3	Globalstrahlungskarten	47
2.3	Berechnung des Sonnenstandes	48
2.3.1	Sonnendeklination	48
2.3.2	Berechnung der Bahn der Sonne	51
2.4	Strahlung auf geneigte Flächen	53
2.4.1	Strahlungsberechnung mit dem Dreikomponentenmodell	53
2.4.1.1	Direktstrahlung	54
2.4.1.2	Diffusstrahlung	55
2.4.1.3	Reflektierte Strahlung	56
2.4.2	Strahlungsabschätzung mit Diagrammen und Tabellen	57
2.4.3	Ertragsgewinn durch Nachführung	59
2.5	Strahlungsangebot und Weltenergieverbrauch	60
2.5.1	Der Solarstrahlungs-Energiewürfel	60
2.5.2	Das Sahara-Wunder	61
3	Grundlagen der Halbleiterphysik	64
3.1	Aufbau von Halbleitern	64
3.1.1	Bohrsches Atommodell	64
3.1.2	Periodensystem der Elemente	66
3.1.3	Aufbau des Siliziumkristalls	67
3.1.4	Verbindungshalbleiter	67
3.2	Bändermodell des Halbleiters	68
3.2.1	Entstehung von Energiebändern	68
3.2.2	Unterscheidung in Isolatoren, Halbleiter und Leiter	69
3.2.3	Eigenleitungsdichte	70
3.3	Ladungstransport in Halbleitern	71
3.3.1	Feldströme	71
3.3.2	Diffusionsströme	73
3.4	Dotierung von Halbleitern	74
3.4.1	n-Dotierung	74

3.4.2	p-Dotierung	75
3.5	Der pn-Übergang	75
3.5.1	Prinzipielle Wirkungsweise	76
3.5.2	Bänderdiagramm des pn-Übergangs	77
3.5.3	Verhalten bei angelegter Spannung	79
3.5.4	Dioden-Kennlinie	80
3.6	Wechselwirkung von Licht mit Halbleitern	81
3.6.1	Phänomen der Lichtabsorption	81
3.6.1.1	Absorptionskoeffizient	82
3.6.1.2	Direkte und indirekte Halbleiter	83
3.6.2	Lichtreflexion an Oberflächen	85
3.6.2.1	Reflexionsfaktor	85
3.6.2.2	Antireflexbeschichtung	86
4	Aufbau und Wirkungsweise der Solarzelle	90
4.1	Betrachtung der Photodiode	90
4.1.1	Aufbau und Kennlinie	90
4.1.2	Ersatzschaltbild	91
4.2	Funktionsweise der Solarzelle	92
4.2.1	Prinzipieller Aufbau	92
4.2.2	Rekombination und Diffusionslänge	93
4.2.3	Was passiert in den einzelnen Zellbereichen?	94
4.2.4	Back-Surface-Field	96
4.3	Photostrom	96
4.3.1	Absorptionswirkungsgrad	97
4.3.2	Quantenwirkungsgrad	98
4.3.3	Spektrale Empfindlichkeit	98
4.4	Kennlinie und Kenngrößen	99
4.4.1	Kurzschlussstrom I_K	101
4.4.2	Leerlaufspannung U_L	101
4.4.3	Maximum Power Point (MPP)	101
4.4.4	Füllfaktor FF	102
4.4.5	Wirkungsgrad η	102
4.4.6	Temperaturabhängigkeit der Solarzelle	103
4.5	Elektrische Beschreibung realer Solarzellen	105
4.5.1	Vereinfachtes Modell	105
4.5.2	Standard-Modell (Ein-Dioden-Modell)	105
4.5.3	Zwei-Dioden-Modell	106

4.5.4	Bestimmung der Parameter des Ersatzschaltbildes	107
4.6	Betrachtungen zum Wirkungsgrad	110
4.6.1	Spektraler Wirkungsgrad	110
4.6.2	Theoretischer Wirkungsgrad	114
4.6.3	Verluste in der realen Solarzelle	115
4.6.3.1	Optische Verluste	115
4.6.3.2	Elektrische Verluste	118
4.7	Hocheffizienzzellen	119
4.7.1	Buried-Contact-Zelle	119
4.7.2	Punktkontakt-Zelle (IBC-Zelle)	120
4.7.3	PERL- und PERC-Zelle	121

5 Zellentechnologien 123

5.1	Herstellung kristalliner Silizium-Zellen	123
5.1.1	Vom Sand zum Silizium	123
5.1.1.1	Herstellung von Polysilizium	123
5.1.1.2	Herstellung von monokristallinem Silizium	125
5.1.1.3	Herstellung von multikristallinem Silizium	126
5.1.1.4	Herstellung von quasimonokristallinem Silizium	127
5.1.2	Vom Silizium zum Wafer	127
5.1.2.1	Waferherstellung	127
5.1.2.2	Wafer aus Foliensilizium	128
5.1.3	Herstellung von Standard-Solarzellen	129
5.1.4	Herstellung von Solarmodulen	131
5.2	Zellen aus amorphem Silizium	133
5.2.1	Eigenschaften von amorphem Silizium	133
5.2.2	Herstellungsverfahren	134
5.2.3	Aufbau der pin-Zelle	135
5.2.4	Staebler-Wronski-Effekt	136
5.2.5	Stapelzellen	138
5.2.6	Kombizellen aus mikromorphem Material	139
5.2.7	Integrierte Serienverschaltung	140
5.3	Weitere Dünnschichtzellen	142
5.3.1	CIS-Zellen	142
5.3.2	Zellen aus Cadmium-Tellurid	145
5.4	Hybride Waferzellen	147
5.4.1	Kombination von c-Si und a-Si (HIT-Zelle)	148
5.4.2	Stapelzellen aus III/V-Halbleitern	149

5.5	Sonstige Zellenkonzepte	149
5.5.1	Farbstoffsolarzelle	150
5.5.2	Organische Solarzelle	150
5.5.3	Perowskit-Solarzelle	151
5.6	Konzentratorsysteme.....	151
5.6.1	Prinzip der Strahlungsbündelung	151
5.6.2	Was bringt die Konzentration?	152
5.6.3	Beispiele von Konzentratorsystemen	153
5.6.4	Vor- und Nachteile von Konzentratorsystemen	154
5.7	Ökologische Fragestellungen zur Zellen- und Modulherstellung.....	154
5.7.1	Umweltauswirkungen bei Herstellung und Betrieb.....	154
5.7.1.1	Beispiel Cadmium-Tellurid	155
5.7.1.2	Beispiel Silizium	155
5.7.2	Verfügbarkeit der Materialien	156
5.7.2.1	Silizium	156
5.7.2.2	Cadmium-Tellurid	156
5.7.2.3	CIS	157
5.7.2.4	III/V-Halbleiter	158
5.7.3	Energierücklaufzeit und Erntefaktor	158
5.8	Zusammenfassung	161

6 Solarmodule und Solargeneratoren 164

6.1	Eigenschaften von Solarmodulen	164
6.1.1	Solarzellenkennlinie in allen vier Quadranten.....	164
6.1.2	Parallelschaltung von Zellen	165
6.1.3	Reihenschaltung von Zellen	166
6.1.4	Einsatz von Bypassdioden	167
6.1.4.1	Reduzierung von Verschattungsverlusten	167
6.1.4.2	Vermeidung von Hotspots	169
6.1.5	Typische Kennlinien von Solarmodulen.....	172
6.1.5.1	Variation der Bestrahlungsstärke	172
6.1.5.2	Temperaturverhalten	173
6.1.6	Sonderfall Dünnschichtmodule	174
6.1.7	Beispiele von Datenblattangaben	176
6.2	Verschaltung von Solarmodulen.....	177
6.2.1	Parallelschaltung von Strings.....	177
6.2.2	Was passiert bei Verkabelungsfehlern?	177
6.2.3	Verluste durch Mismatching	178

6.2.4	Schlaue Verschaltung bei Verschattung.....	179
6.3	Gleichstrom-Komponenten	181
6.3.1	Prinzipieller Anlagenaufbau.....	181
6.3.2	Gleichstromverkabelung.....	182
6.4	Anlagentypen.....	184
6.4.1	Freilandanlagen	185
6.4.2	Flachdachanlagen	187
6.4.3	Schrägdachanlagen.....	188
6.4.4	Fassadenanlagen.....	190
6.4.5	Schwimmende Anlagen	191

7 Systemtechnik netzgekoppelter Anlagen 193

7.1	Solargenerator und Last	193
7.1.1	Widerstandslast	193
7.1.2	DC/DC-Wandler	194
7.1.2.1	Idee	194
7.1.2.2	Tiefsetzsteller	195
7.1.2.3	Hochsetzsteller	197
7.1.3	MPP-Tracker	199
7.2	Aufbau netzgekoppelter Anlagen.....	200
7.2.1	Einspeisevarianten	200
7.2.2	Anlagenkonzepte	201
7.3	Aufbau von Wechselrichtern	203
7.3.1	Aufgaben des Wechselrichters	203
7.3.2	Netzgeführte und selbstgeführte Wechselrichter.....	204
7.3.3	Trafoloser Wechselrichter	204
7.3.4	Wechselrichter mit Netztrafo.....	206
7.3.5	Wechselrichter mit HF-Trafo	207
7.3.6	Dreiphasige Einspeisung.....	208
7.3.7	Weitere schlaue Konzepte	209
7.4	Wirkungsgrad von Wechselrichtern	210
7.4.1	Umwandlungswirkungsgrad	211
7.4.2	Europäischer Wirkungsgrad.....	212
7.4.3	Gesamtwirkungsgrad.....	214
7.4.4	Schlaues MPP-Tracking	214
7.5	Dimensionierung von Wechselrichtern	215
7.5.1	Leistungsdimensionierung	215
7.5.2	Spannungsdimensionierung	216

7.5.3	Stromdimensionierung	217
7.6	Anforderungen der Netzbetreiber	217
7.6.1	Vermeidung von Inselbetrieb	218
7.6.2	Maximale Einspeiseleistung.....	219
7.6.3	Blindleistungsbereitstellung.....	220
7.7	Sicherheitsaspekte.....	223
7.7.1	Erdung des Generators und Blitzschutz	223
7.7.2	Brandschutz	224

8 Speicherung von Solarstrom..... 225

8.1	Prinzip der Solarstromspeicherung	225
8.2	Akkumulatoren.....	226
8.2.1	Blei-Säure-Batterie	227
8.2.1.1	Prinzip und Aufbau	227
8.2.1.2	Typen von Bleiakkus	229
8.2.1.3	Akkukapazität	231
8.2.1.4	Spannungsverlauf	232
8.2.1.5	Fazit	232
8.2.2	Laderegler	232
8.2.2.1	Serienregler	233
8.2.2.2	Shuntregler	233
8.2.2.3	MPP-Laderegler	234
8.2.2.4	Produktbeispiele	234
8.2.3	Lithium-Ionen-Batterie	235
8.2.3.1	Prinzip und Aufbau	236
8.2.3.2	Reaktionen beim Lade- und Entladevorgang	237
8.2.3.3	Materialkombinationen und Zellspannung	238
8.2.3.4	Sicherheitsaspekte	239
8.2.3.5	Ladeverfahren	239
8.2.3.6	Bauformen	240
8.2.3.7	Lebensdauer	241
8.2.3.8	Einsatzbereiche	242
8.2.3.9	Fazit	242
8.2.4	Natrium-Schwefel-Batterie	242
8.2.4.1	Prinzip und Aufbau	242
8.2.4.2	Besonderheiten der Hochtemperatur-Batterie	243
8.2.4.3	Natrium-Schwefel-Batterien in der Praxis	244
8.2.4.4	Fazit	245

8.2.5	Redox-Flow-Batterie	245
8.2.5.1	Prinzip und Aufbau	245
8.2.5.2	Verhalten im praktischen Einsatz	248
8.2.5.3	Konkrete Anwendungen	249
8.2.5.4	Fazit	249
8.2.6	Vergleich der verschiedenen Batterietypen	250
8.3	Speichereinsatz zur Erhöhung des Eigenverbrauchs	251
8.3.1	Eigenverbrauch in Privathaushalten	251
8.3.1.1	Lösung ohne Speicher	251
8.3.1.2	Lösung mit Speicher	252
8.3.1.3	Beispiele von Speichersystemen	253
8.3.1.4	Was kostet die Speicherung einer Kilowattstunde?	255
8.3.1.5	Das Smart Home	256
8.3.2	Eigenverbrauch in Gewerbebetrieben	257
8.3.2.1	Beispiel Produktionsbetrieb	257
8.3.2.2	Beispiel Krankenhaus	258
8.4	Speichereinsatz aus Sicht des Netzes	258
8.4.1	Peak-Shaving durch Speicher	259
8.4.2	Marktanreizprogramm für Solarspeicher	259
8.5	Inselsysteme	262
8.5.1	Prinzipieller Aufbau	262
8.5.2	Beispiele von Inselsystemen	263
8.5.2.1	Solar Home Systems	263
8.5.2.2	Hybridsysteme	264
8.5.3	Dimensionierung von Inselanlagen	266
8.5.3.1	Erfassung des Stromverbrauchs	266
8.5.3.2	Dimensionierung des PV-Generators	267
8.5.3.3	Auswahl des Akkus	269
9	Photovoltaische Messtechnik	271
9.1	Messung solarer Strahlung	271
9.1.1	Globalstrahlungssensoren	271
9.1.1.1	Pyranometer	271
9.1.1.2	Strahlungssensoren aus Solarzellen	273
9.1.2	Messung von Direkt- und Diffusstrahlung	274
9.2	Leistungsmessung von Solarmodulen	275
9.2.1	Aufbau eines Solarmodul-Leistungsprüfstands	275
9.2.2	Güteklassen von Modulflashern	276

9.2.3	Bestimmung der Modulparameter	277
9.3	Peakleistungsmessung vor Ort	278
9.3.1	Prinzip der Peakleistungsmessung	278
9.3.2	Möglichkeiten und Grenzen des Messprinzips	279
9.4	Thermographie-Messtechnik	280
9.4.1	Prinzip der Infrarot-Temperaturmessung	280
9.4.2	Hell-Thermographie von Solarmodulen	281
9.4.3	Dunkel-Thermographie	283
9.5	Elektrolumineszenz-Messtechnik	284
9.5.1	Messprinzip	284
9.5.2	Beispiele von Aufnahmen	285
9.5.3	LowCost-Outdoor-Elektrolumineszenz-Untersuchungen	288
9.6	Untersuchungen zur spannungsinduzierten Degradation (PID)	290
9.6.1	Erklärung des PID-Effektes	291
9.6.2	Prüfung von Modulen auf PID	292
9.6.3	EL-Untersuchungen zu PID	294
9.7	String-Dunkelkennlinien-Technik	295
9.7.1	Motivation	295
9.7.2	Messmethode	296
9.7.3	Detektion von PID	296
9.7.4	Detektion von defekten Bypassdioden und Zellverbindern	297
9.7.5	Fazit	300

10 Planung und Betrieb netzgekoppelter Anlagen 301

10.1	Planung und Dimensionierung	301
10.1.1	Standortwahl	301
10.1.2	Verschattungen	302
10.1.2.1	Verschattungsanalyse	302
10.1.2.2	Nahverschattungen	303
10.1.2.3	Eigenverschattungen	305
10.1.2.4	Optimierte Stringverschaltung	306
10.1.3	Anlagendimensionierung mit Simulationsprogrammen	306
10.1.3.1	Wechselrichter-Auslegungstools	306
10.1.3.2	Simulationsprogramme für Photovoltaikanlagen	306
10.2	Wirtschaftlichkeit von Photovoltaikanlagen	309
10.2.1	Das Erneuerbare-Energien-Gesetz	309
10.2.2	Renditeberechnung	309
10.2.2.1	Eingangsgrößen	310

10.2.2.2	Amortisationszeit	310
10.2.2.3	Objektrendite	311
10.2.2.4	Renditeerhöhung durch Eigenverbrauch des Solarstroms	313
10.2.2.5	Weitere Einflussgrößen	313
10.3	Überwachung, Monitoring und Visualisierung	314
10.3.1	Methoden zur Anlagenüberwachung	314
10.3.2	Monitoring von PV-Anlagen	314
10.3.2.1	Spezifische Erträge	314
10.3.2.2	Verluste	316
10.3.2.3	Performance Ratio	316
10.3.2.4	Konkrete Maßnahmen zum Monitoring	317
10.3.3	Visualisierung	317
10.4	Betriebsergebnisse von konkreten Anlagen	318
10.4.1	Schrägdachanlage aus dem Jahre 1996	318
10.4.2	Schrägdachanlage aus dem Jahre 2002	320
10.4.3	Flachdachanlage aus dem Jahre 2008	321
11	Zukünftige Entwicklung	323
11.1	Potential der Photovoltaik	323
11.1.1	Theoretisches Potential	323
11.1.2	Technisch nutzbare Strahlungsenergie	323
11.1.3	Technisches Stromerzeugungspotential	325
11.1.4	Photovoltaik versus Biomasse	326
11.2	Effiziente Förderinstrumente	327
11.3	Preis- und Vergütungsentwicklung	328
11.3.1	Preisentwicklung von Solarmodulen	328
11.3.2	Entwicklung der Einspeisevergütung	330
11.4	Erneuerbare Energien im heutigen Stromversorgungssystem	331
11.4.1	Struktur der Stromerzeugung	332
11.4.2	Kraftwerksarten und Regelenergie	333
11.4.3	Zusammenspiel aus Sonne und Wind	334
11.4.4	Exemplarische Stromproduktionsverläufe	335
11.5	Überlegungen zur zukünftigen Energieversorgung	337
11.5.1	Betrachtung unterschiedlicher Zukunftsszenarien	338
11.5.2	Optionen zur Speicherung von elektrischer Energie	341
11.5.2.1	Pumpspeicherwerke	342
11.5.2.2	Druckluftspeicher	342
11.5.2.3	Batteriespeicherung	342

11.5.2.4 Elektromobilität	343
11.5.2.5 Wasserstoff als Speicher	343
11.5.2.6 Power-to-Gas: Methanisierung	343
11.5.3 Alternativen zur Speicherung	345
11.5.3.1 Aktives Lastmanagement durch Smart Grids	345
11.5.3.2 Ausbau des Stromnetzes	345
11.5.3.3 Begrenzung der Einspeiseleistung	345
11.5.3.4 Einsatz flexibler Kraftwerke	346
11.6 Fazit	346
12 Übungsaufgaben	347
13 Anhang	358
13.1 Einfluss von Ausrichtung und Neigung auf die Jahresstrahlungssumme an verschiedenen Standorten	358
13.1.1 Standort Hamburg	359
13.1.2 Standort München	360
13.1.3 Standort Bern	361
13.1.4 Standort Wien	362
13.1.5 Standort Marseille	363
13.1.6 Standort Kairo	364
13.2 Checkliste zu Planung, Installation und Betrieb einer Photovoltaikanlage	365
13.3 Im Buch verwendete Abkürzungen	367
13.4 Physikalische Konstanten/Materialparameter	368
Literatur	369
Index	379

1

Einführung

Die Versorgung unserer Industriegesellschaft mit elektrischer Energie ist einerseits unverzichtbar, bringt aber andererseits verschiedene Umwelt- und Sicherheitsprobleme mit sich. In diesem ersten Kapitel sehen wir uns daher die bisherige Energieversorgung an und lernen die erneuerbaren Energien als eine zukunftsfähige Alternative kennen. Gleichzeitig wird die Photovoltaik im Schnelldurchgang vorgestellt und ihre kurze aber erfolgreiche Geschichte betrachtet.

■ 1.1 Einleitung

In der Einleitung soll geklärt werden, warum wir uns mit Photovoltaik beschäftigen und für wen dieses Buch geeignet ist.

1.1.1 Wozu Photovoltaik?

In den vergangenen Jahren ist immer deutlicher geworden, dass die bisherige Art der Energieerzeugung nicht zukunftsfähig ist. So wird die **Endlichkeit der Ressourcen** an steigenden Preisen für Öl und Gas bereits heute spürbar. Gleichzeitig erkennen wir die ersten Auswirkungen der **Verbrennung von fossilen Energieträgern**: Das Abschmelzen von Gletschern, ein Anstieg des Meeresspiegels und eine Zunahme von Wetterextremen. Schließlich zeigt die **Atomkatastrophe in Fukushima**, dass auch die Atomenergie keinen zukunftsfähigen Weg weist: Neben der **ungelösten Endlagerfrage** sind immer weniger Menschen bereit, das **Risiko der Verstrahlung** großer Landesteile in Kauf zu nehmen.

Glücklicherweise gibt es eine **Lösung**, mit der eine nachhaltige Energieversorgung sichergestellt werden kann: Die **erneuerbaren Energien**. Diese nutzen unerschöpfliche Quellen als Grundlage der Energieversorgung und können bei geeigneter Kombination verschiedener Technologien wie Biomasse, Photovoltaik, Windkraft etc. eine Vollversorgung sicherstellen. Eine besondere Rolle im Reigen der erneuerbaren Energien spielt die **Photovoltaik**. Sie erlaubt die direkte, emissionsfreie Umwandlung von Sonnenlicht in elektrische Energie und wird aufgrund ihres großen Potentials eine **wesentliche Säule des zukünftigen Energiesystems** sein.

Allerdings ist die Umstellung unserer Energieversorgung eine **gewaltige Aufgabe**, die nur mit der **Phantasie** und dem **Sachverstand von Ingenieuren und Technikern** zu meistern sein wird. Das vorliegende Buch soll dazu dienen, diesen Sachverstand für den Bereich der Photovoltaik zu vergrößern. Es geht dazu auf die Grundlagen, die Technologien, den praktischen Einsatz und die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen der Photovoltaik ein.

1.1.2 Für wen ist dieses Buch gedacht?

Dieses Buch wendet sich in erster Linie an Studierende der Ingenieurwissenschaften, die sich in das Thema Photovoltaik einarbeiten wollen. Es ist allerdings so verständlich geschrieben, dass es sich auch für Techniker, Elektroniker und technisch interessierte Laien eignet. Außerdem kann es Ingenieuren im Beruf helfen, sich in die Grundlagen und den aktuellen technischen und wirtschaftlichen Stand der Photovoltaik einzuarbeiten.

1.1.3 Aufbau des Buches

In dieser Einführung wollen wir uns zunächst mit dem Thema Energie auseinandersetzen: Was ist Energie und in welche Kategorien können wir sie einteilen? Auf dieser Grundlage betrachten wir dann die heutige Energieversorgung und die damit einher gehenden Probleme. Eine Lösung dieser Probleme stellen die erneuerbaren Energien dar, die als Nächstes in einem kurzen Überblick vorgestellt werden. Da uns in diesem Buch insbesondere die Photovoltaik interessiert, lernen wir zum Abschluss die relativ junge aber stürmische Geschichte der Photovoltaik kennen.

Das zweite Kapitel behandelt das solare Strahlungsangebot. Wir lernen die Eigenheiten des Sonnenlichts kennen und untersuchen, wie die Solarstrahlung möglichst effizient genutzt werden kann. Schließlich überlegen wir im Sahara-Wunder, welche Fläche notwendig wäre, um den gesamten Weltenergiebedarf aus Photovoltaik zu decken.

Im dritten Kapitel betrachten wir die Grundlagen der Halbleiterphysik. Hier geht es insbesondere um den Aufbau von Halbleitern und das Verständnis des pn-Übergangs. Außerdem wird das Phänomen der Lichtabsorption erklärt, ohne das keine Solarzelle funktionieren könnte. Wer mit der Halbleiterphysik schon vertraut ist, kann dieses Kapitel ohne weiteres überspringen.

In Kapitel 4 geht es ans Eingemachte: Wir lernen Aufbau, Wirkungsweise und Kenngrößen von Silizium-Solarzellen kennen. Außerdem wird detailliert betrachtet, von welchen Parametern der Wirkungsgrad einer Solarzelle abhängt. Anhand von Weltrekordzellen sehen wir uns dann an, wie diese Erkenntnisse erfolgreich umgesetzt werden konnten.

Kapitel 5 behandelt die Zellentechnologien: Wie ist der Weg vom Sand über die Silizium-Solarzelle bis zum Solarmodul? Welche anderen Materialien gibt es und wie sieht der Zellaufbau in diesem Fall aus? Neben diesen Fragen betrachten wir außerdem die ökologischen Auswirkungen der Produktion von Solarzellen.

Der Aufbau und die Eigenschaften von Solargeneratoren sind die Themen von Kapitel 6. Hier geht es z. B. um das optimale Verschalten von Solarmodulen, um die Auswirkungen von Verschattungen zu minimieren. Außerdem stellen wir verschiedene Anlagentypen wie Schrägdach- oder Freilandanlagen vor.

Kapitel 7 betrachtet die Systemtechnik und den Aufbau von netzgekoppelten Anlagen. Zu Beginn steht die Frage, wie man effizient Gleichstrom in Wechselstrom umwandelt. Anschließend lernen wir die verschiedenen Wechselrichtertypen und deren Vor- und Nachteile kennen.

Die Speicherung von Solarstrom ist das sehr aktuelle Thema von Kapitel 8. Wir lernen verschiedene Batterietypen mitsamt ihren Betriebsweisen kennen. Außerdem geht es um Systeme, mit

denen der **Eigenverbrauch** von Solarstrom im Privathaushalt oder in Gewerbebetrieben erhöht werden kann. In einem eigenen Unterkapitel werden **Inselanlagen** für den Einsatz in Entwicklungsländern betrachtet.

In **Kapitel 9** behandeln wir die **photovoltaische Messtechnik**. Neben der Erfassung solarer Strahlung geht es hier insbesondere um die Bestimmung der realen Leistung von Solarmodulen. Außerdem lernen wir moderne Methoden der Qualitätsanalyse wie Thermographie- und Elektrolumineszenz-Messtechnik kennen.

Planung und Betrieb netzgekoppelter Anlagen werden in **Kapitel 10** behandelt. Neben der optimalen Planung und Dimensionierung von Anlagen geht es hier um Verfahren zur Wirtschaftlichkeitsberechnung. Außerdem werden Methoden zur Überwachung von Anlagen vorgestellt und die Betriebsergebnisse konkreter Anlagen präsentiert.

Das **elfte Kapitel** stellt einen Ausblick auf die **Zukunft der Photovoltaik** dar. Zunächst schätzen wir ihr Stromerzeugungspotential in Deutschland ab. Daran schließt sich eine Betrachtung der Preisentwicklung der Photovoltaik und des Zusammenwirkens der verschiedenen Energien im heutigen Stromsystem an. Schließlich überlegen wir, wie das Energiesystem der Zukunft aussehen kann und welche Rolle dabei die Photovoltaik spielen wird.

Zu jedem Kapitel gibt es **Übungsaufgaben**, die helfen, den Stoff zu wiederholen und zu vertiefen. Außerdem bieten sie eine Kontrolle des eigenen Kenntnisstandes. Die **Lösungen** zu den Übungsaufgaben finden sich **im Internet** unter www.lehrbuch-photovoltaik.de

■ 1.2 Was ist Energie?

Die **Nutzung von Energie** ist für uns im Alltag **selbstverständlich**, ob beim Bedienen der Kaffeemaschine am Morgen, der Benutzung des Autos am Tag oder der Heimkehr in die warme Wohnung am Abend. Ebenso basiert die **Funktionsfähigkeit der gesamten modernen Industriegesellschaft** auf der Verfügbarkeit von Energie: Produktion und Transport von Waren, Computer gestützte Verwaltung und weltweite Kommunikation sind ohne ausreichende Versorgung mit Energie nicht denkbar.

Gleichzeitig wächst die Erkenntnis, dass die bisherige Art der **Energieversorgung** teilweise **unsicher, umweltschädlich** und **nur begrenzt verfügbar** ist.

1.2.1 Definition der Energie

Was verstehen wir nun genau unter Energie? Vielleicht hilft eine Definition der Energie aus berufenem Munde weiter. **Max Planck** (Begründer der Quantenphysik, 1858–1947) beantwortete die Frage folgendermaßen:

Energie ist Fähigkeit eines Systems, äußere Wirkungen (z. B. Wärme, Licht) hervorzu-
bringen.

Im Bereich der Mechanik kennen wir zum Beispiel die **potentielle Energie** (oder Lageenergie) einer Masse m , die sich in einer Höhe h befindet (Bild 1.1a):

$$W_{\text{Pot}} = m \cdot g \cdot h \quad (1.1)$$

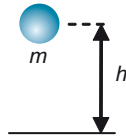
mit g : Erdbeschleunigung, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

Fällt etwa einem Kegelbruder die über 3 kg schwere Kugel herunter, so kann das System „Ein-Meter-hohe-Kugel“ deutliche Wirkungen an seinem Fuß hervorbringen. Schleudert er stattdessen die Kugel wie geplant nach vorn, verrichtet er **Arbeit** an der Kugel. Mit dieser Arbeit wird dem System Kugel Energie zugeführt. Somit können wir ganz allgemein sagen:

Durch Zufuhr oder Abgabe von Arbeit kann die Energie eines Systems verändert werden. Anders ausgedrückt: Energie ist gespeicherte Arbeit.

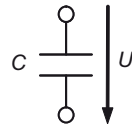
a) **Potentielle Energie:**

$$W_{\text{Pot}} = m \cdot g \cdot h$$



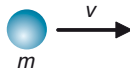
c) **Kondensator-Energie:**

$$W_{\text{Kon}} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$$



b) **Kinetische Energie:**

$$W_{\text{Kin}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$



d) **Energie am Widerstand:**

$$W_{\text{El}} = \frac{U^2}{R} \cdot t$$

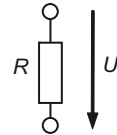


Bild 1.1 Darstellung verschiedener Energieformen

Im Fall des Kegelbruders erhält die Kugel beim Vorwärtsschleudern **kinetische Energie** W_{Kin} (oder Bewegungsenergie, siehe Bild 1.1b):

$$W_{\text{Kin}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (1.2)$$

mit v : Geschwindigkeit der Kugel

Eine ähnliche Formel beschreibt in der Elektrotechnik die in einem **Kondensator** gespeicherte **Energie** W_{Kon} :

$$W_{\text{Kon}} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 \quad (1.3)$$

mit C : Kapazität des Kondensators

U : Spannung am Kondensator

Liegt wiederum eine Spannung U an einem ohmschen Widerstand R an, so wird in ihm in der Zeit t eine **elektrische Arbeit** W_{El} umgesetzt (Bild 1.1d):

$$W_{\text{El}} = P \cdot t = \frac{U^2}{R} \cdot t \quad (1.4)$$

Die **Leistung** P gibt an, welche Arbeit in der Zeit t geleistet wird:

$$P = \frac{\text{Arbeit}}{\text{Zeit}} = \frac{W}{t} \quad (1.5)$$

1.2.2 Einheiten der Energie

Leider werden viele verschiedene Einheiten zur Beschreibung von Energie benutzt. Die wichtigste Beziehung lautet:

$$1 \text{ J (Joule)} = 1 \text{ Ws} = 1 \text{ Nm} = 1 \text{ kg} \cdot (\text{m/s})^2 \quad (1.6)$$

Beispiel 1.1 Anheben eines Sacks Kartoffeln

Hebt man einen Zentner Kartoffeln um einen Meter hoch, so erhält er dadurch eine Lageenergie von

$$W_{\text{Pot}} = m \cdot g \cdot h = 50 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 1 \text{ m} = 490,5 \text{ Nm} = 490,5 \text{ Ws}$$

■

In der Elektrotechnik ist die Einheit Kilowattstunde (kWh) sehr gebräuchlich, diese ergibt sich zu:

$$1 \text{ kWh} = 1000 \text{ Wh} = 1000 \text{ W} \cdot 3600 \text{ s} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Ws} = 3,6 \text{ MWs} = 3,6 \text{ MJ} \quad (1.7)$$

Da in der Energiewirtschaft oft sehr große Energiemengen behandelt werden, ist hier die Auflistung der Einheitenvorsätze zur Abkürzung von Zehnerpotenzen sinnvoll, siehe Tabelle 1.1.

Tabelle 1.1 Vorsätze und Vorsatzzeichen

Vorsatz	Vorsatzzeichen	Faktor	Zahl
Kilo	k	10^3	Tausend
Mega	M	10^6	Million
Giga	G	10^9	Milliarde
Tera	T	10^{12}	Billion
Peta	P	10^{15}	Billiarde
Exa	E	10^{18}	Trillion

1.2.3 Primär-, Sekundär- und Endenergie

Energie liegt typischerweise in Form von Energieträgern (Kohle, Gas, Holz etc.) vor. Diese Art der Energie bezeichnen wir als **Primärenergie**. Um sie für praktische Anwendungen nutzen zu können, muss sie umgewandelt werden. Möchte man etwa elektrische Energie erzeugen, so wird z. B. in einem Kohlekraftwerk Steinkohle verbrannt, um damit heißen Wasserdampf zu erzeugen. Der Druck des Wasserdampfes wird wiederum genutzt, um einen Generator anzutreiben, welcher elektrische Energie am Kraftwerksausgang zur Verfügung stellt (Bild 1.2). Diese Energie bezeichnen wir als **Sekundärenergie**. Durch die beschriebene Prozesskette entstehen relativ hohe **Umwandlungsverluste**. Wird die Energie dann weiter zu den Haushalten transportiert, fallen zusätzliche Verluste in den Kabeln und Trafostationen an. Diese fassen wir unter den **Verteilungsverlusten** zusammen. Beim Endkunden kommt schließlich die **Endenergie** an.

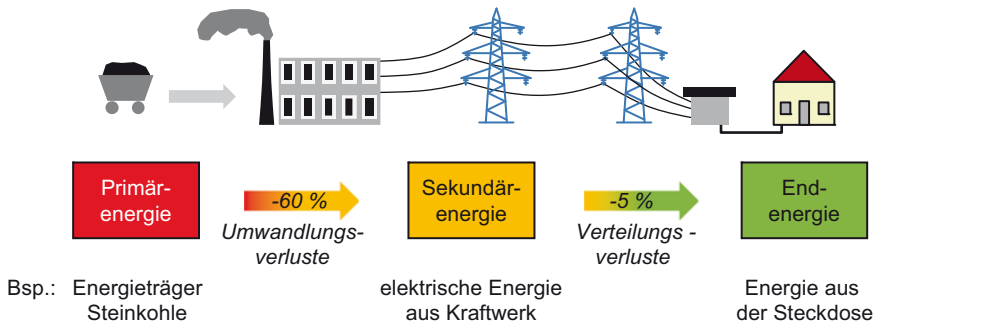


Bild 1.2 Darstellung der Energiearten am Beispiel der Steinkohleverstromung: Nur etwa ein Drittel der eingesetzten Primärenergie kommt beim Endkunden an der Steckdose an

Bei einem mit **Benzin** betriebenen Auto ist das **Erdöl** der Primärenergieträger. Durch Raffination wird es zu **Benzin** umgewandelt (Sekundärenergieträger) und anschließend zur Tankstelle gebracht. Sobald das **Benzin im Tank** ist, liegt es dort als Endenergie vor. Diese muss wiederum von der **Nutzenergie** unterschieden werden; im Fall des Autos ist das die mechanische Bewegung des Fahrzeugs. Da ein Automotor einen Wirkungsgrad von unter 30 % hat, kommt somit nur ein geringer Teil der eingesetzten Primärenergie auf der Straße an. Im Fall der elektrischen Energie wäre die Nutzenergie z. B. Licht (Lampe) oder Wärme (Kochplatten).

Um elektrische Endenergie an der Steckdose zur Verfügung zu stellen, muss die in Bild 1.2 gezeigte Umwandlungs- und Verteilungskette durchlaufen werden. Da der Wirkungsgrad von konventionellen Kraftwerken mit ca. 40 % relativ klein ist, ergibt sich als **Gesamtwirkungsgrad** η_{Gesamt} bis zur Steckdose beim Endverbraucher:

$$\eta_{\text{Gesamt}} = \eta_{\text{Kraftwerk}} \cdot \eta_{\text{Verteilung}} \approx 0,4 \cdot 0,95 \approx 0,38 \quad (1.8)$$

Somit können wir festhalten:

Im Fall der konventionellen elektrischen Energieversorgung kommt nur etwa **ein Drittel** der eingesetzten **Primärenergie an der Steckdose** an.

Dennoch wird elektrische Energie in vielen Bereichen eingesetzt, da sie einfach zu transportieren ist und Anwendungen erlaubt, die kaum mit anderen Energieformen realisiert werden können (z. B. Computer, Motoren etc.). Gleichzeitig gibt es allerdings Nutzungen, für die der wertvolle Strom nicht verwendet werden sollte. So wird im Fall einer elektrischen Raumheizung nur ein Drittel der eingesetzten Primärenergie genutzt, während es bei einer modernen Gastherme über 90 % sind.

1.2.4 Energieinhalte verschiedener Stoffe

Um den Energiegehalt verschiedener Energieträger einschätzen zu können, sind in Tabelle 1.2 die Umrechnungsfaktoren dargestellt:

Tabelle 1.2 Umrechnungsfaktoren verschiedener Energieträger [Kal14, Wik18]

Energieträger	Energiegehalt	Bemerkungen
1 kg Steinkohle	8,14 kWh	–
1 kg Rohöl	11,63 kWh	Benzin: 8,7 kWh/Liter, Diesel: 9,8 kWh/Liter
1 m ³ Erdgas	8,82 kWh	–
1 kg Holz	4,3 kWh	(bei 15 % Feuchte)

In der Energiewirtschaft wird oft die Einheit **t RÖE** verwendet. Dies bedeutet **Tonnen Rohöleinheiten** und bezieht sich auf den Umrechnungsfaktor für 1 kg Rohöl in obiger Tabelle. 1 t RÖE sind somit $1000 \text{ kg} \cdot 11,63 \text{ kWh/kg} = 11.630 \text{ kWh}$. Entsprechend erfolgt die Umrechnung von **Tonnen Steinkohleeinheiten (t SKE)** mit dem Faktor für Steinkohle aus Tabelle 1.2.

Ganz grob können wir uns als **Faustregel** merken:

$$1 \text{ m}^3 \text{ Erdgas} \approx 11 \text{ Öl} \approx 11 \text{ Benzin} \approx 1 \text{ kg Kohle} \approx 2 \text{ kg Holz} \approx 10 \text{ kWh}$$

1.3 Probleme der heutigen Energieversorgung

Die heutige weltweite Energieversorgung bringt eine Reihe von Problemen mit sich, deren wichtigste Aspekte wir im Folgenden vorstellen.

1.3.1 Wachsender Energiebedarf

Bild 1.3 zeigt die Entwicklung des weltweiten Primärenergieverbrauchs seit 1970. Dieser hat sich im betrachteten Zeitraum fast verdreifacht; das durchschnittliche jährliche Wachstum lag

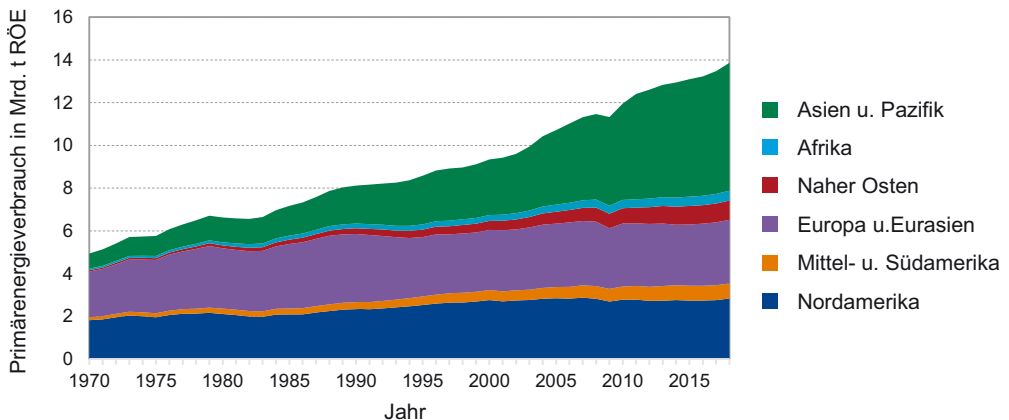


Bild 1.3 Entwicklung des weltweiten Primärenergiebedarfs seit 1970 [www.bp.com/]

bei 2,2 %. Nachdem zunächst hauptsächlich die westlichen Industrieländer den Hauptteil ausmachten, holten die Schwellenländer, insbesondere China, in den letzten Jahren deutlich auf. Als Grund für den Anstieg des Energiebedarfs ist zum einen die **wachsende Weltbevölkerung** zu nennen. Diese hat sich in den letzten 40 Jahren von 3,7 Mrd. auf heute 7,6 Mrd. Menschen verdoppelt. Bis zum Jahr 2050 erwartet die UNO einen weiteren Anstieg auf ca. 10 Mrd. Menschen.

Die zweite Ursache für die beschriebene Entwicklung ist der **steigende Lebensstandard**. So liegt der **Primärenergiebedarf in Deutschland** bei ca. 45.000 kWh/Kopf; in einem nur schwach industrialisierten Land wie Bangladesch dagegen bei nur 1500 kWh/Kopf. Bei wachsendem Wohlstand in den Entwicklungsländern wird sich der dortige Pro-Kopf-Verbrauch deutlich erhöhen. In China als sehr dynamischem Schwellenland liegt er inzwischen bei über 27.000 kWh/Kopf. Die internationale Energieagentur (IEA) geht davon aus, dass China seinen Energiebedarf in den nächsten 25 Jahren um 75 % erhöhen wird, Indien sogar um 100 %.

Der wachsende Energiebedarf wäre grundsätzlich nicht gravierend, wenn nicht eine Reihe von Problemen damit einher ginge:

1. Verknappung der Ressourcen
2. Klimawandel
3. Gefährdung/Entsorgung

Diese werden nun etwas genauer betrachtet.

1.3.2 Verknappung der Ressourcen

Der weltweite Energiebedarf wird heute hauptsächlich durch die **fossilen Energieträger** Erdöl, Erdgas und Kohle gedeckt. In Bild 1.4 ist zu sehen, dass sie einen Anteil von rund 81 % einnehmen, während Biomasse, Wasserkraft und neue erneuerbare Energien (Wind, Photovoltaik, Solarthermie etc.) bislang lediglich ca. 14 % erreichen.

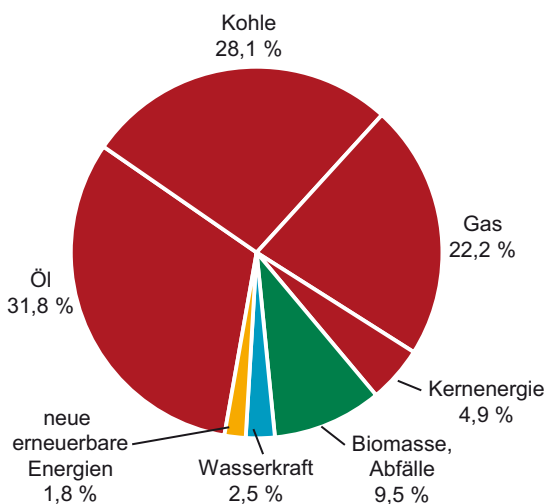


Bild 1.4 Aufteilung der weltweiten Primärenergienutzung im Jahr 2017 nach den Energieträgern [www.iea.org]

Tabelle 1.3 Förderung und Reichweite von fossilen Energieträgern [BGR17]

	Erdöl		Erdgas		Kohle	
	2001	2016	2001	2016	2001	2016
Förderung EJ/a	147	184	80	126	91	157
Reserven EJ	6351	7155	5105	7202	19.620	21.374
Reichweite	43 a	39 a	64 a	57 a	215 a	136 a
Reichweite bei jährlichem Wachstum von 2,2 %		28 a		37 a		64 a

Die starke Nutzung der fossilen Quellen führt inzwischen zu einer Verknappung. In Tabelle 1.3 sind die einzelnen Fördermengen der Jahre 2001 und 2016 aufgelistet. Bereits im Jahr 2001 betrug die geschätzte **Reichweite von Erdöl** nur noch 43 Jahre; die von **Erdgas** 64 Jahre. Lediglich die Kohle wurde mit einer relativ großen Reichweite von 215 Jahren abgeschätzt. Bis zum Jahr 2016 konnten dann zwar zusätzliche Lagerstätten entdeckt werden, allerdings hatte sich bis dahin der Jahresverbrauch deutlich erhöht. Somit reduzierten sich die Reichweiten auf 39 bis 136 Jahre. Geht man davon aus, dass der Weltenergiebedarf weiterhin wie bisher wachsen wird, so verringern sich die Reichweiten drastisch auf **28 bis 64 Jahre** (siehe auch Übungsaufgabe 1.3). Die Verknappung der Brennstoffe wird zu **stark steigenden Preisen** und **Verteilungskriegen** führen.

In den letzten Jahren wurde begonnen, zusätzlich zur Ölförderung auch **Ölsande und Ölschiefer** abzubauen, um daraus Öl zu gewinnen. Insbesondere in Kanada und den USA gibt es beträchtliche Vorkommen davon. Allerdings ist für die Erzeugung des **synthetischen Erdöls** ein großer Energieeinsatz notwendig. Die Förderung im Tagebau führt darüber hinaus zur Zerstörung von zuvor intakten Ökosystemen. Im Fall von dem auch in Deutschland diskutierten **Fracking** wird ein Gemisch aus Wasser, Sand und chemischen Zusätzen in den Boden gepresst, um damit das Gestein aufzubrechen und so das darin gebundene Gas zu erhalten. Hier besteht die Gefahr einer Vergiftung des Grundwassers.

Somit ist die Nutzung dieser zusätzlichen fossilen Quellen ebenfalls **keine echte Zukunftsoption**.

1.3.3 Klimawandel

Bei der Verrottung von Biomasse (Holz, Pflanzen etc.) entweicht **Kohlendioxid (CO₂)** in die Atmosphäre. Gleichzeitig wachsen Pflanzen durch Photosynthese neu und nehmen dabei CO₂ aus der Luft auf. Im Lauf der Erdgeschichte hat sich daraus ein Gleichgewicht eingestellt, das zu einer relativ konstanten CO₂-Konzentration in der Atmosphäre geführt hat.

Werden Holz, Kohle, Erdgas oder Erdöl verbrannt, so entsteht ebenfalls CO₂, das in die Umgebungsluft abgegeben wird. Im Fall von Holz ist das nicht tragisch, so lange abgeholzte Wälder wieder aufgeforstet werden. Das neu wachsende **Holz bindet CO₂** aus der Luft und nutzt es zum Aufbau der entstehenden Biomasse.

Im Fall der fossilen Energieträger sieht dies allerdings anders aus. Diese bildeten sich vor Jahrmillionen aus Biomasse und werden nun innerhalb von ein bis zwei Jahrhunderten im buchstäblichen Sinne verheizt. Bild 1.5 zeigt den Verlauf der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre

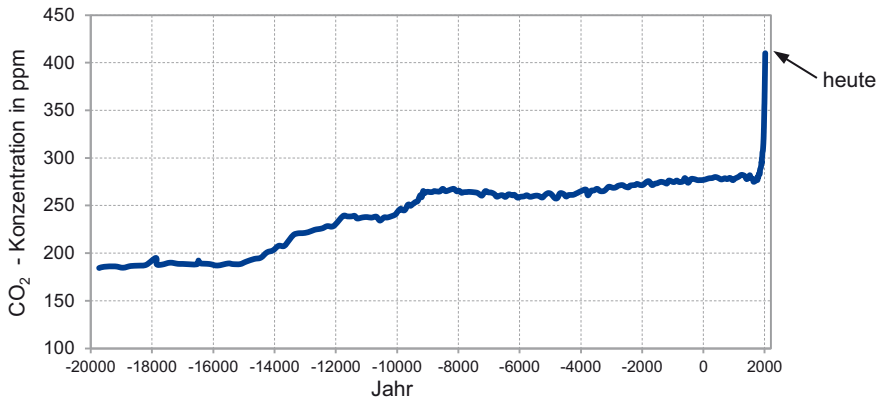


Bild 1.5 Entwicklung des CO₂-Gehalts in der Atmosphäre in den letzten 22.000 Jahren: Auffällig ist der steile Anstieg seit Beginn der Industrialisierung [Nef94, Mon04, www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends]

in den letzten 20.000 Jahren. Offensichtlich gab es auch schon früher Schwankungen dieser Konzentration, wirklich **beunruhigend** ist allerdings der **steile Anstieg seit Beginn der Industrialisierung**. Im Jahr 2020 lag die Konzentration bei ca. 410 ppm (parts per million), einem Wert, der seit Millionen von Jahren nicht mehr erreicht wurde.

Warum ist die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre nun so bedeutend für uns? Der Grund liegt darin, dass CO₂ neben anderen Spurengasen (z. B. Methan, CH₄) über den **Treibhauseffekt** die Temperatur auf der Erde beeinflusst. Wir betrachten zur Erklärung Bild 1.6. Das Licht der Sonne (sichtbare und infrarote Strahlung ①) gelangt relativ ungehindert durch die Atmosphäre und wird vom Erdboden absorbiert ②. Hierdurch erwärmt sich die Erdoberfläche ③ und strahlt als sogenannter schwarzer Strahler (siehe Kapitel 2) Wärmestrahlung ④ ab. Diese Strahlung wird wiederum von den Spurengasen absorbiert ⑤ und als Wärme an die Umgebung abgegeben ⑥. Die **Wärmeenergie bleibt** somit zum größten Teil **in der Atmosphäre** und wird nur zu einem geringen Teil in den Weltraum zurückgeworfen.

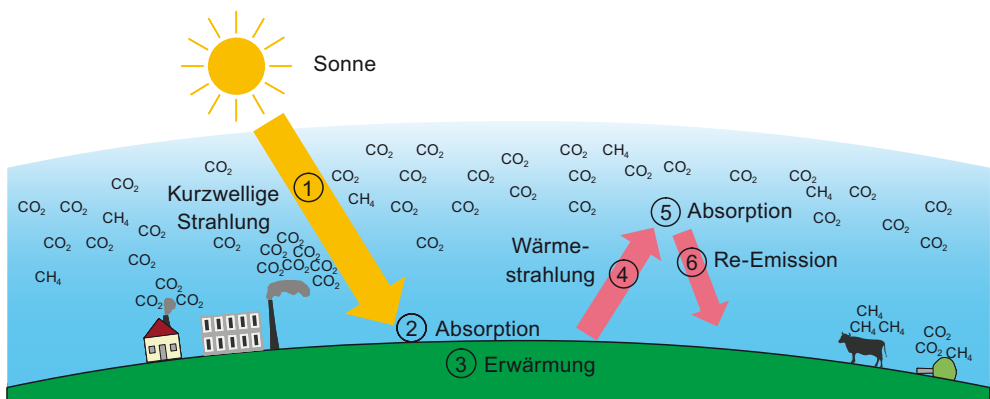


Bild 1.6 Prinzipdarstellung des Treibhauseffekts: Die von der Erde abgestrahlte Wärmestrahlung wird von den Treibhausgasen zurückgehalten

Der Vergleich mit einem Treibhaus ist also durchaus passend: Die Atmosphäre mitsamt der Spurengase wirkt wie die Scheibe eines Treibhauses, die die Sonnenstrahlung in das Treibhaus hineinlässt, die innen entstandene Wärmestrahlung aber zurückhält. Die Folge ist eine Aufheizung des Treibhauses.

Nun können wir zunächst einmal froh sein, dass es den Treibhauseffekt überhaupt gibt. Ohne ihn läge die mittlere Temperatur auf der Erde bei -18°C . Durch den natürlichen Treibhauseffekt beträgt die tatsächliche mittlere Temperatur ca. 15°C . Die durch den Menschen verursachte zusätzliche Emission von CO_2 , Methan etc. führt allerdings als anthropogener Treibhauseffekt zu einer weiteren Erwärmung. Seit Beginn der Industrialisierung lag dieser Temperaturanstieg bei etwa $0,8^{\circ}\text{C}$. Der Weltklimarat erwartet, dass sich dieser bis zum Ende des 21. Jahrhunderts auf mindestens 2°C erhöhen wird, falls die Emissionen an Treibhausgasen nicht gebremst werden [www.ipcc.ch].

Als Folgen der Temperaturerhöhung ist bereits heute die Verkleinerung von Gletschern und des Schmelzen des Eises am Nordpolarmeer zu beobachten. Außerdem werden extreme Wetterphänomene (Hurrikans, Dürreperioden in manchen Regionen) mit dem Temperaturanstieg in Verbindung gebracht. Langfristig rechnet man bei weiter steigenden Temperaturen mit einem deutlichen Meeresspiegelanstieg und der Verschiebung von Klimazonen.

Um den Klimawandel abzubremsen, wurde 1997 auf dem Weltklimagipfel im japanischen Kyoto das Kyoto-Protokoll verabschiedet. In diesem verpflichteten sich die Industrieländer, ihre Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2012 um 5,2 % unter das Niveau von 1990 zu senken. Erklärtes Ziel war die Begrenzung des durch den Menschen verursachten Temperaturanstiegs auf 2°C .

Deutschland verpflichtete sich freiwillig, die Emissionen um 21 % zu senken. Nachdem Deutschland die angestrebten Ziele erreicht hatte, beschloss die Bundesregierung im Jahr 2010, eine Reduktion von 40 % bis zum Jahr 2020 und von 55 % bis zum Jahr 2030 (gegenüber 1990) anzustreben. Wesentliche Elemente zur Erreichung dieses Ziels sind neben der Steigerung der Energieeffizienz der Ausbau der erneuerbaren Energien. Nach der Reaktorkatastrophe von Fukushima wurde darüber hinaus beschlossen, die Stromversorgung bis zum Jahr 2050 vollständig auf erneuerbare Energien umzustellen.

Dies steht im Einklang mit den UN-Klimakonferenzen in Paris (2015) und Bonn (2017). Diese legten fest, dass die weltweiten Nettotreibhausgasemissionen zwischen 2045 und 2060 auf null reduziert werden müssen, um die weltweite Erwärmung auf 2 Grad Celsius zu begrenzen.

1.3.4 Gefährdung und Entsorgung

Eine annähernd CO_2 -freie Elektrizitätserzeugung stellt die Kernenergie dar. Allerdings bringt sie eine Reihe von anderen Problemen mit sich. So zeigte die Reaktorkatastrophe von Fukushima im Jahr 2011, dass das Risiko für einen Super-Gau (größter anzunehmender Unfall) nie völlig ausschließbar ist. Auch wenn in Deutschland kein Tsunami zu erwarten ist, besteht dennoch eine hohe Gefährdung, da die hiesigen Atomkraftwerke nur ungenügend gegen Terrorangriffe geschützt sind.

Hinzu kommt die ungeklärte Endlagerung der strahlenden Abfälle. Bislang gibt es weltweit kein Endlager für hoch radioaktiven Abfall. Dieser muss für Tausende von Jahren sicher gela-

Index

1000-Dächer-Programm 38

A

Aachener Modell 39
Absorption 65, 81
Absorptionskoeffizient 82, 84, 85, 94, 133
Absorptionswirkungsgrad 97
Air Mass 42, 43
Albedo 56
Amortisationszeit 310
Anlagenmonitoring 314
Anlagenvisualisierung 314
Anode 237
Antireflexbeschichtung 86, 92, 115, 117
Arbeit 22
a-Si 133
Auslegungsfaktor 215
Autarkiegrad 201, 252

B

Back-Surface-Field 96, 119, 121, 130
Bändermodell 68
Bandabstand 68, 78, 81, 106, 110, 142
Banddiagramm 77
Bandlücke 68, 70
Bandlückenwellenlänge 110, 111
Basis 92, 95, 130, 131
Bestrahlungsstärke 42, 90, 101
Betonfundament 185
Betriebskosten 310
Beweglichkeit 71, 136
Biomasse 326
Bleiakku 227, 353
Blei-Säure-Akku 227
Blindleistung 220
Blindleistungsbereitstellung 220
Bohrsches Atommodell 64
Bohrsches Postulat 64

Boost Converter 197
Brechungsindex 85
Brick 126
Buck Converter 195
Buried-Contact 117–119
Busbar 93, 117
Bypassdioden 167, 176, 282
Bypassing 240

C

Cadmium-Tellurid (CdTe) 67, 155
CCCV 239, 353
CdTe 67, 84, 155, 156, 174
CID 240, 367
Cloud Enhancements 45
c-Si 82
Current Interrupt Device 240
Current Matching 138
Czochralski-Verfahren 36, 125

D

Dangling Bonds 133, 137
DC/DC-Wandler 194
Dead Layer 94, 122
Degradation 131, 137, 139, 205, 313
Depth of Discharge 229
Diffusionslänge 80, 93, 94, 120
Diffusionsspannung 76, 77, 79, 81
Diffusionsstrom 73, 77, 107
Diffusionszelle 136
Diffusstrahlung 44, 55, 154, 275
Dioden-Kennlinie 80
direkter Halbleiter 83
Direktstrahlung 44, 45, 54, 274
DoD 229, 254, 255
Dotierung 33, 74, 77, 94, 118
Dreikomponentenmodell 53, 306
Driftgeschwindigkeit 71

Driftstrom 71
 Driftzelle 136
 DSM 345
 Dünnschichtmodule 140, 174
 Dünnschichtzelle 133, 135, 136, 142
 Dunkelkennlinien 295
 Dunkelstrom 91

E

EEG 33, 39, 309, 312
 effektive Zustandsdichte 71, 78
 EFG 128
 Eigenleitungsichte 70, 103, 114, 214
 Eigenverbrauch 225
 Eigenverbrauchsanteil 251
 Eigenverbrauchsquote 200, 225, 251, 312
 Eigenverschattungen 305
 Einspeisemanagement 219, 220
 Einspeisevarianten 200
 Einspeisevergütung 200, 310
 Electronic Grade 124
 Elektrolumineszenz-Messtechnik 284
 Emissionsfaktor 281
 Emissionsgrad 281
 Emitter 92, 94, 118, 130, 131
 – lokaler 120
 Empfindlichkeit, spektrale 98, 122
 Endenergie 23
 End-Ertrag 315
 Energie 21
 Energiebänder 68
 Energiemanagementsystem 253, 256, 260, 262
 Energierücklaufzeit 158
 Entladetiefe 229, 238, 241, 244, 253
 Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) 33, 39, 309
 Erntefaktor 159
 Ersatzschaltbild 91, 100
 Ertrag, spezifischer 35, 310
 Ertragswirkungsgrad 326
 Erzeugerzählpeilsystem 99, 164
 europäischer Wirkungsgrad 212
 EVA 131, 140, 156, 168

F

Farbstoffsolarzelle 150
 Fassadenanlagen 190
 Feldstrom 71, 136
 Fermidifferenzen 78
 Flachdachanlagen 187
 Flächennutzungsgrad 305
 Float-Zone-Verfahren 126
 Flussbettreaktor 124, 160
 Foliensilizium 128
 Freilandanlagen 185
 Freilaufdiode 196
 Fresnel-Linsen 151
 Fresnelsche Formeln 88
 Füllfaktor 102, 114, 174

G

GaAs 37, 67, 84, 149
 GaN 213
 Generatoranschlusskasten 181, 183, 202
 Generatorverluste 315
 Gesamtwirkungsgrad 214
 Globalstrahlung 44, 60, 154, 271
 Globalstrahlungssensoren 271
 Grätzel-Zelle 150

H

Halbleiter 64, 69
 – direkter 83
 – indirekter 83
 HIT-Zelle 148
 Hocheffizienzzellen 119
 Hochsetzsteller 197
 Hotspots 169, 176
 hybride Waferzellen 147

I

IBC-Zelle 120
 Idealitätsfaktor 100, 107
 indirekter Halbleiter 83
 Ingot 125, 156
 integrierte Serienverschaltung 140
 Interdigitated Back Contact 120

Interkalation 237
 Interkalationsmaterial 238
 Investitionskosten 310
 Isolationsüberwachung 204
 Isolator 69
 ITO 135

J

Jahreswirkungsgrad 215

K

Kabelverluste 184, 307
 Kathode 237
 Kernschatten 303
 Klimawandel 27
 Konzentratorsystem 151, 158
 Kurzschlussstrom 101

L

Lawinendurchbruch 81, 165
 Leerlaufspannung 101
 Leistungsoptimierer 203
 Leiter 69
 Leitungsband 68
 Lichtabsorption 81
 Light Trapping 118, 119, 121, 137, 139
 lokaler Emittter 120
 Lückbetrieb 197

M

Maxeon-Zelle 120
 Maximum Power Point 101
 metallurgisches Silizium 123
 mikromorph 139
 Minutenreserve 333
 Mismatching 178, 202, 209, 275, 316
 Modul-Wechselrichter 203
 Monitoring 314
 monokristallin 115, 125, 126
 MOSFET 195
 MPP-Tracker 199, 209
 multikristallin 126, 127

N

Nachführung 59, 154, 186
 NaS 242
 Natrium-Schwefel 242, 354
 Netzbetreiber 220, 223
 Netzkopplung 301
 Niederspannungsrichtlinie 223
 NOCT 174, 177

O

Objektrendite 311
 Ortszeit, wahre 51, 52

P

Parallelschaltung 165
 Parallelwiderstand 105, 108, 173, 277
 Peakleistungsmessung 278
 PECVD 134
 PERC-Zelle 121, 122
 Performance Ratio 316
 PERL-Zelle 121
 Personenschutz 204
 Photodiode 90, 92, 274
 Photostrom 90, 96
 Photovoltaik 32
 PID 205, 290, 355
 pin-Zelle 135, 140
 pn-Übergang 33, 75, 76, 78, 79, 90
 polykristallin 127
 Polysilizium 123, 156, 158
 Potentialstufe 78
 Powerline-Protokoll 203
 Power-to-Gas 343, 344
 Primärenergie 23, 24, 30, 158, 159
 Primärenergiebedarf 26, 61, 323
 Primärenergiefaktor 158
 Primärregelung 333
 Punktkontakt-Zelle 120, 131, 153
 Pyranometer 271

Q

Quantenwirkungsgrad 98, 122, 138

R

Rammfundament 185
 Raumladungszone 77, 90, 92, 94, 95, 106, 135
 Rayleigh-Streuung 43
 Recycling 155, 156, 161
 Redox-Flow 245, 354
 Redoxreaktion 227, 228
 Referenz-Ertrag 315
 Reflexionsfaktor 56, 85, 88, 97, 116–118, 121
 Regelenergie 333
 Reihenschaltung 166
 Rekombination 70, 93
 Rückseitenfolie 284
 Runaway 239

S

Sabatier-Prozess 343
 Sättigungsstrom 80, 92, 103, 114
 Sahara-Wunder 61
 Schleusenspannung 81, 167
 Schrägdachanlagen 188
 Schraubfundament 185
 Schwachlichtverhalten 172, 277, 306
 Sekundärenergie 23
 Sekundärregelung 333
 Serienverschaltung, integrierte 140
 Serienwiderstand 105, 109, 129, 277
 Shockley-Gleichung 80, 91, 106
 Shutdown 239
 SiC 213
 Siebdruck 129
 Siemens-Reaktor 124
 Silizium 33, 66, 67, 123
 – metallurgisches 123
 Simulationsprogramme 306
 Sizing Ratio 215
 Smart Meter 345
 SoC 379
 Solar-Grade 124
 Solarkonstante 41, 42

Solarmodul 33, 107, 131, 132, 164
 Solarzelle 33, 36, 92, 94
 Solarzellensymbol 100
 Sonnenazimuth 52
 Sonnenbahndiagramm 52, 303
 Sonnenbahnindikator 302
 Sonnendeklination 48, 51, 53
 Sonnenhöhe 52
 Sonnenhöhenwinkel 43
 Sonnenstandsnachführung 154
 spektrale Empfindlichkeit 98, 122
 spektraler Wirkungsgrad 110, 114
 spezifischer Ertrag 35, 310
 Staebler-Wronski-Effekt 137
 Standard-Ersatzschaltbild 105
 Standardtestbedingungen 34, 44
 Stapelfehler 291
 Stapelzelle 138, 149
 State of Charge 379
 STC 34
 Strahlungsbündelung 151
 Strang 33, 131
 String 33, 131, 177
 Stringdioden 177, 181, 182
 String-Dunkelkennlinien 295
 String-Ribbon 129
 Stringsicherungen 177
 String-Wechselrichter 202
 Stromerzeugungspotential 325
 Substrat-Zelle 138
 Superstrat 135, 206
 Superstrat-Zelle 135, 206
 Systemverluste 316
 Systemwirkungsgrad 62, 325

T

Tandemzelle 138
 Tastgrad 196
 TCO 135
 Tedlar-Folie 131
 Temperaturabhängigkeit 103, 104
 Temperaturkoeffizient 103, 104, 141, 173
 Temperaturverhalten 173
 Texturierung 115, 117, 118, 121, 129, 137
 theoretischer Wirkungsgrad 114, 115
 Thermal Runaway 239, 243

Thermalisierungsverluste 111
Thermographie-Messtechnik 280
Tiefsetzsteller 195
Transmissionsverluste 110, 136
Treibhauseffekt 28, 29
Trichlorsilan 123
Tripelzelle 138

U

Umwandlungswirkungsgrad 211

V

Valenzband 68
Vanadium-Redox-Flow 246
Verbindungshalbleiter 67
Verbraucherzählpeilsystem 91, 171, 178
Verschattungsanalyse 302
Verschattungsverluste 117, 167, 179, 307
VisiKid 317
Volllaststunden 47, 315
VRF 246

W

Wafer 127, 129, 131, 155, 160
Waferzellen, hybride 147
wahre Ortszeit 51, 52
Watt-Peak 34
Wechselrichter 34, 203
Wechselrichterwirkungsgrad 214
Wirkungsgrad 34, 102, 110, 126, 152, 161,
207, 210
– europäischer 212
– spektraler 110, 114
– theoretischer 114, 115

Z

Zentral-Wechselrichter 201
Zustandsdichte, effektive 71, 78
Zwei-Dioden-Ersatzschaltbild 109
Zwei-Dioden-Modell 106