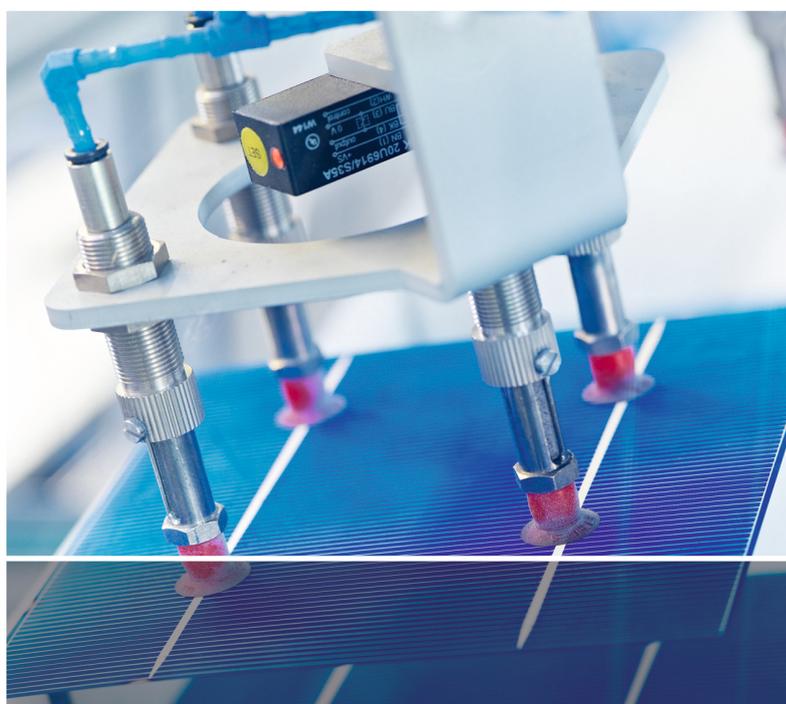


Konrad Mertens



Photovoltaik

Lehrbuch zu Grundlagen,
Technologie und Praxis



6., aktualisierte und erweiterte Auflage

HANSER

Mertens
Photovoltaik



Ihr Plus – digitale Zusatzinhalte!

Auf unserem Download-Portal finden Sie zu diesem Titel kostenloses Zusatzmaterial. Geben Sie dazu einfach diesen Code ein:

`plus-fwsdz-two4m`

plus.hanser-fachbuch.de



Bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Konrad Mertens

Photovoltaik

Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis

6., aktualisierte und erweiterte Auflage

HANSER

Der Autor:

Prof. Dr.-Ing. Konrad Mertens

Fachhochschule Münster



Alle in diesem Buch enthaltenen Informationen wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und mit Sorgfalt geprüft und getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Buch enthaltenen Informationen mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor(en, Herausgeber) und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht.

Ebenso wenig übernehmen Autor(en, Herausgeber) und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, sind vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) – auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2022 Carl Hanser Verlag München

Internet: www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Dipl.-Ing. Natalia Silakova-Herzberg

Herstellung: Frauke Schafft

Covergestaltung: Max Kostopoulos

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Titelbild: © Solar-Fabrik AG

Satz: le-tex publishing services, Leipzig

Druck und Bindung: CPI books GmbH, Leck

Printed in Germany

Print-ISBN 978-3-446-47194-8

E-Book-ISBN 978-3-446-47429-1

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 Zellentechnologien 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 Zellentechnologien 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 sechsten Auflage

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

Die Entwicklung der Photovoltaik geht weiter rasant voran. Bei aktuell kontinuierlichen Wirkungsgradsteigerungen der Solarmodule reduzieren sich gleichzeitig die Gestehungskosten für Solarstrom. Zusätzlich entstehen neue Anwendungsfelder wie Agri-Photovoltaik und Elektromobilität.

Unter anderem die Ukraine-Krise hat gleichzeitig deutlich gemacht, dass es „Kein Weiter so“ in der Energieversorgung geben darf. Folgerichtig wurden die Photovoltaik-Ausbauziele durch die Bundesregierung erhöht und müssen konsequent umgesetzt werden. Ein vollständiger Umstieg auf erneuerbare Energien ist notwendig und möglich. Schön, wenn dieses Buch dazu einen Beitrag liefern kann.

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.

Das Zusatzmaterial finden Sie auch auf *plus.hanser-fachbuch.de*.

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

Steinfurt, im April 2022

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	31
1.5	Photovoltaik – das Wichtigste in Kürze	32
1.5.1	Was bedeutet „Photovoltaik“?	32
1.5.2	Was sind Solarzellen und Solarmodule?	32
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	39

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-, PERC- und TOPCon-Zelle 121

5 Zellentechnologien 124

- 5.1 Herstellung kristalliner Silizium-Zellen 124
 - 5.1.1 Vom Sand zum Silizium 124
 - 5.1.1.1 Herstellung von Polysilizium 124
 - 5.1.1.2 Herstellung von monokristallinem Silizium 126
 - 5.1.1.3 Herstellung von multikristallinem Silizium 127
 - 5.1.1.4 Herstellung von quasimonokristallinem Silizium 128
 - 5.1.2 Vom Silizium zum Wafer 128
 - 5.1.2.1 Waferherstellung 128
 - 5.1.2.2 Wafer aus Foliensilizium 129
 - 5.1.3 Herstellung von Standard-Solarzellen 130
 - 5.1.4 Herstellung von Solarmodulen 132
- 5.2 Zellen aus amorphem Silizium 134
 - 5.2.1 Eigenschaften von amorphem Silizium 134
 - 5.2.2 Herstellungsverfahren 135
 - 5.2.3 Aufbau der pin-Zelle 136
 - 5.2.4 Staebler-Wronski-Effekt 137
 - 5.2.5 Stapelzellen 139
 - 5.2.6 Kombizellen aus mikromorphem Material 140
 - 5.2.7 Integrierte Serienverschaltung 141

5.3	Weitere Dünnschichtzellen	143
5.3.1	CIS-Zellen	143
5.3.2	Zellen aus Cadmium-Tellurid	146
5.4	Hybride Waferzellen	148
5.4.1	Kombination von c-Si und a-Si (HIT-Zelle)	149
5.4.2	Neue Zell- und Modulhersteller	150
5.4.2.1	Meyer Burger	150
5.4.2.2	Nexwafe	151
5.4.2.3	Heckert Solar	151
5.4.3	Stapelzellen aus III/V-Halbleitern	151
5.5	Sonstige Zellenkonzepte	153
5.5.1	Farbstoffsolarzelle	153
5.5.2	Organische Solarzelle	153
5.5.3	Perowskit-Solarzelle	153
5.6	Konzentratorsysteme	155
5.6.1	Prinzip der Strahlungsbündelung	155
5.6.2	Was bringt die Konzentration?	155
5.6.3	Beispiele von Konzentratorsystemen	156
5.6.4	Vor- und Nachteile von Konzentratorsystemen	157
5.7	Ökologische Fragestellungen zur Zellen- und Modulherstellung	158
5.7.1	Umweltauswirkungen bei Herstellung und Betrieb	158
5.7.1.1	Beispiel Cadmium-Tellurid	158
5.7.1.2	Beispiel Silizium	158
5.7.2	Verfügbarkeit der Materialien	161
5.7.2.1	Silizium	162
5.7.2.2	Cadmium-Tellurid	162
5.7.2.3	CIS	162
5.7.2.4	III/V-Halbleiter	163
5.7.3	Energierücklaufzeit und Erntefaktor	163
5.8	Zusammenfassung	166

6 Solarmodule und Solargeneratoren 169

6.1	Eigenschaften von Solarmodulen	169
6.1.1	Solarzellenkennlinie in allen vier Quadranten	169
6.1.2	Parallelschaltung von Zellen	170
6.1.3	Reihenschaltung von Zellen	171

6.1.4	Einsatz von Bypassdioden	172
6.1.4.1	Reduzierung von Verschattungsverlusten	172
6.1.4.2	Vermeidung von Hotspots	174
6.1.5	Typische Kennlinien von Solarmodulen	177
6.1.5.1	Variation der Bestrahlungsstärke	177
6.1.5.2	Temperaturverhalten	178
6.1.6	Halbzellenmodule	179
6.1.6.1	Betrachtung der Verlustleistung	180
6.1.6.2	Aufbau von Halbzellenmodulen	181
6.1.6.3	Verhalten bei Teilverschattungen	182
6.1.7	Sonderfall Dünnschichtmodule	184
6.1.8	Beispiele von Datenblattangaben	186
6.2	Verschaltung von Solarmodulen	186
6.2.1	Parallelschaltung von Strings	186
6.2.2	Was passiert bei Verkabelungsfehlern?	188
6.2.3	Verluste durch Mismatching	189
6.2.4	Schlaue Verschaltung bei Verschattung	189
6.3	Gleichstrom-Komponenten	192
6.3.1	Prinzipieller Anlagenaufbau	192
6.3.2	Gleichstromverkabelung	193
6.4	Anlagentypen	195
6.4.1	Freilandanlagen	195
6.4.2	Flachdachanlagen	197
6.4.3	Schrägdachanlagen	199
6.4.4	Fassadenanlagen	200
6.4.5	Schwimmende Anlagen	202
6.4.6	Agri-Photovoltaik	204
6.4.6.1	Kulturschutzsysteme	204
6.4.6.2	Weitere Projekte und Technologien	206
6.4.6.3	Nutzung vertikaler bifacialer Agri-PV-Systeme	207
6.4.6.4	Installation einer Großanlage	209
6.4.6.5	Einsatz von bifacialen Solarzäunen	209
6.4.7	Photovoltaik-Kraftwerke außerhalb des Erneuerbare-Energien-Gesetzes	210
6.4.8	Vereinbarkeit von Ökonomie und Ökologie	210

7	Systemtechnik netzgekoppelter Anlagen	213
7.1	Solargenerator und Last	213
7.1.1	Widerstandslast	213
7.1.2	DC/DC-Wandler	214
7.1.2.1	Idee	214
7.1.2.2	Tiefsetzsteller	215
7.1.2.3	Hochsetzsteller	217
7.1.3	MPP-Tracker	219
7.2	Aufbau netzgekoppelter Anlagen	220
7.2.1	Einspeisevarianten	220
7.2.2	Anlagenkonzepte	221
7.3	Aufbau von Wechselrichtern	223
7.3.1	Aufgaben des Wechselrichters	223
7.3.2	Netzgeführte und selbstgeführte Wechselrichter	224
7.3.3	Trafoloser Wechselrichter	224
7.3.4	Wechselrichter mit Netztrafo	226
7.3.5	Wechselrichter mit HF-Trafo	227
7.3.6	Dreiphasige Einspeisung	228
7.3.7	Weitere schlaue Konzepte	229
7.4	Wirkungsgrad von Wechselrichtern	230
7.4.1	Umwandlungswirkungsgrad	231
7.4.2	Europäischer Wirkungsgrad	232
7.4.3	Gesamtwirkungsgrad	234
7.4.4	Schlaues MPP-Tracking	234
7.5	Dimensionierung von Wechselrichtern	235
7.5.1	Leistungsdimensionierung	235
7.5.2	Spannungsdimensionierung	236
7.5.3	Stromdimensionierung	237
7.6	Anforderungen der Netzbetreiber	237
7.6.1	Vermeidung von Inselbetrieb	238
7.6.2	Maximale Einspeiseleistung	239
7.6.3	Blindleistungsbereitstellung	240
7.7	Sicherheitsaspekte	243
7.7.1	Erdung des Generators und Blitzschutz	243
7.7.2	Brandschutz	244

8	Speicherung von Solarstrom	245
8.1	Prinzip der Solarstromspeicherung	245
8.2	Akkumulatoren	246
8.2.1	Blei-Säure-Batterie	247
8.2.1.1	Prinzip und Aufbau	247
8.2.1.2	Typen von Bleiakku	249
8.2.1.3	Akkukapazität	251
8.2.1.4	Spannungsverlauf	252
8.2.1.5	Fazit	252
8.2.2	Laderegler	252
8.2.2.1	Serienregler	253
8.2.2.2	Shuntregler	253
8.2.2.3	MPP-Laderegler	254
8.2.2.4	Produktbeispiele	254
8.2.3	Lithium-Ionen-Batterie	255
8.2.3.1	Prinzip und Aufbau	256
8.2.3.2	Reaktionen beim Lade- und Entladevorgang	257
8.2.3.3	Materialkombinationen und Zellspannung	258
8.2.3.4	Sicherheitsaspekte	259
8.2.3.5	Ladeverfahren	259
8.2.3.6	Bauformen	260
8.2.3.7	Lebensdauer	261
8.2.3.8	Einsatzbereiche	262
8.2.3.9	Fazit	262
8.2.4	Natrium-Schwefel-Batterie	262
8.2.4.1	Prinzip und Aufbau	262
8.2.4.2	Besonderheiten der Hochtemperatur-Batterie	263
8.2.4.3	Natrium-Schwefel-Batterien in der Praxis	264
8.2.4.4	Fazit	265
8.2.5	Redox-Flow-Batterie	265
8.2.5.1	Prinzip und Aufbau	265
8.2.5.2	Verhalten im praktischen Einsatz	268
8.2.5.3	Fortschritte bei Redox-Flow-Batterien	269
8.2.5.4	Konkrete Anwendungen	269
8.2.5.5	Fazit	270
8.2.6	Vergleich der verschiedenen Batterietypen	270

8.3	Speichereinsatz zur Erhöhung des Eigenverbrauchs	270
8.3.1	Eigenverbrauch in Privathaushalten	271
8.3.1.1	Lösung ohne Speicher	272
8.3.1.2	Lösung mit Speicher	273
8.3.1.3	Beispiele von Speichersystemen	274
8.3.1.4	Was kostet die Speicherung einer Kilowattstunde?	274
8.3.1.5	Das Smart Home	277
8.3.2	Eigenverbrauch in Gewerbebetrieben	277
8.3.2.1	Beispiel Produktionsbetrieb	277
8.3.2.2	Beispiel Krankenhaus	278
8.4	Speichereinsatz aus Sicht des Netzes	280
8.4.1	Peak-Shaving durch Speicher	280
8.4.2	Marktanreizprogramm für Solarspeicher	280
8.5	Das Dream-Team Photovoltaik und Elektroauto	284
8.5.1	Vergleich der Wirkungsgrade	284
8.5.2	Aktuelle Situation	284
8.5.3	Die Tücken der Ladetechnik	285
8.5.4	Visualisierung des Ladezustands	286
8.5.5	Elektroauto als Stromspeicher?	287
8.6	Inselsysteme	287
8.6.1	Prinzipieller Aufbau	287
8.6.2	Beispiele von Inselsystemen	288
8.6.2.1	Solar Home Systems	288
8.6.2.2	Hybridsysteme	289
8.6.3	Dimensionierung von Inselanlagen	291
8.6.3.1	Erfassung des Stromverbrauchs	291
8.6.3.2	Dimensionierung des PV-Generators	292
8.6.3.3	Auswahl des Akkus	294

9 Photovoltaische Messtechnik **296**

9.1	Messung solarer Strahlung	296
9.1.1	Globalstrahlungssensoren	296
9.1.1.1	Pyranometer	296
9.1.1.2	Strahlungssensoren aus Solarzellen	298
9.1.2	Messung von Direkt- und Diffusstrahlung	299

9.2	Leistungsmessung von Solarmodulen	300
9.2.1	Aufbau eines Solarmodul-Leistungsprüfstands	300
9.2.2	Güteklassen von Modulflashern	301
9.2.3	Bestimmung der Modulparameter	302
9.3	Peakleistungsmessung vor Ort	303
9.3.1	Prinzip der Peakleistungsmessung	303
9.3.2	Möglichkeiten und Grenzen des Messprinzips	304
9.4	Thermographie-Messtechnik	305
9.4.1	Prinzip der Infrarot-Temperaturmessung	305
9.4.2	Hell-Thermographie von Solarmodulen	306
9.4.3	Dunkel-Thermographie	308
9.5	Elektrolumineszenz-Messtechnik	309
9.5.1	Messprinzip	309
9.5.2	Beispiele von Aufnahmen	310
9.5.3	LowCost-Outdoor-Elektrolumineszenz-Untersuchungen	313
9.6	Untersuchungen zur spannungsinduzierten Degradation (PID)	315
9.6.1	Erklärung des PID-Effektes	316
9.6.2	Prüfung von Modulen auf PID	317
9.6.3	EL-Untersuchungen zu PID	319
9.7	String-Dunkelkennlinien-Technik	320
9.7.1	Motivation	320
9.7.2	Messmethode	321
9.7.3	Detektion von PID	321
9.7.4	Detektion von defekten Bypassdioden und Zellverbindern	322
9.7.5	Fazit	325

10 Planung und Betrieb netzgekoppelter Anlagen

10.1	Planung und Dimensionierung	326
10.1.1	Standortwahl	326
10.1.2	Verschattungen	327
10.1.2.1	Verschattungsanalyse	327
10.1.2.2	Nahverschattungen	328
10.1.2.3	Eigenverschattungen	330
10.1.2.4	Optimierte Stringverschaltung	331
10.1.3	Anlagendimensionierung mit Simulationsprogrammen	331
10.1.3.1	Wechselrichter-Auslegungstools	331
10.1.3.2	Simulationsprogramme für Photovoltaikanlagen	331

10.2	Wirtschaftlichkeit von Photovoltaikanlagen	334
10.2.1	Das Erneuerbare-Energien-Gesetz	334
10.2.2	Renditeberechnung	334
10.2.2.1	Eingangsgrößen	334
10.2.2.2	Amortisationszeit	335
10.2.2.3	Objektrendite	336
10.2.2.4	Renditeerhöhung durch Eigenverbrauch des Solarstroms	337
10.2.2.5	Weitere Einflussgrößen	338
10.3	Überwachung, Monitoring und Visualisierung	338
10.3.1	Methoden zur Anlagenüberwachung	339
10.3.2	Monitoring von PV-Anlagen	339
10.3.2.1	Spezifische Erträge	339
10.3.2.2	Verluste	340
10.3.2.3	Performance Ratio	341
10.3.2.4	Konkrete Maßnahmen zum Monitoring	341
10.3.3	Visualisierung	342
10.4	Betriebsergebnisse von konkreten Anlagen	343
10.4.1	Schrägdachanlage aus dem Jahre 1996	343
10.4.2	Schrägdachanlage aus dem Jahre 2002	345
10.4.3	Flachdachanlage aus dem Jahre 2008	346
11	Zukünftige Entwicklung	348
11.1	Potential der Photovoltaik	348
11.1.1	Theoretisches Potential	348
11.1.2	Technisch nutzbare Strahlungsenergie	348
11.1.3	Technisches Stromerzeugungspotential	350
11.1.4	Photovoltaik versus Biomasse	351
11.2	Effiziente Förderinstrumente	352
11.3	Preis- und Vergütungsentwicklung	354
11.3.1	Preisentwicklung von Solarmodulen	354
11.3.2	Entwicklung der Einspeisevergütung	355
11.4	Erneuerbare Energien im heutigen Stromversorgungssystem	356
11.4.1	Struktur der Stromerzeugung	357
11.4.2	Kraftwerksarten und Regelenergie	358
11.4.3	Zusammenspiel aus Sonne und Wind	359
11.4.4	Exemplarische Stromproduktionsverläufe	361

11.5 Überlegungen zur zukünftigen Energieversorgung	362
11.5.1 Betrachtung unterschiedlicher Zukunftsszenarien	362
11.5.2 Optionen zur Speicherung von elektrischer Energie	367
11.5.2.1 Pumpspeicherwerke	367
11.5.2.2 Druckluftspeicher	368
11.5.2.3 Batteriespeicherung	368
11.5.2.4 Nutzung der Elektromobilität für das Stromnetz	369
11.5.2.5 Wasserstoff als Speicher	369
11.5.2.6 Power-to-Gas: Methanisierung	370
11.5.3 Alternativen zur Speicherung	371
11.5.3.1 Aktives Lastmanagement durch Smart Grids	371
11.5.3.2 Ausbau des Stromnetzes	372
11.5.3.3 Begrenzung der Einspeiseleistung	372
11.5.3.4 Einsatz flexibler Kraftwerke	372
11.6 Fazit	372
12 Übungsaufgaben	374
13 Anhang	385
13.1 Einfluss von Ausrichtung und Neigung auf die Jahresstrahlungssumme an verschiedenen Standorten	385
13.1.1 Standort Hamburg	386
13.1.2 Standort München	387
13.1.3 Standort Bern	388
13.1.4 Standort Marseille	389
13.1.5 Standort Kairo	390
13.2 Checkliste zu Planung, Installation und Betrieb einer Photovoltaikanlage	391
13.3 Im Buch verwendete Abkürzungen	393
13.4 Physikalische Konstanten/Materialparameter	394
Literatur	395
Index	405

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 zeigte 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, Computergestützte 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):

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

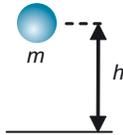
mit g : Erdbeschleunigung, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

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.

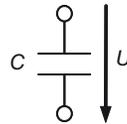
a) Potentielle Energie:

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



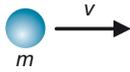
c) Kondensator-Energie:

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



b) Kinetische Energie:

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



d) Energie am Widerstand:

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

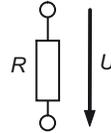


Bild 1.1 Darstellung verschiedener Energieformen

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:

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

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.

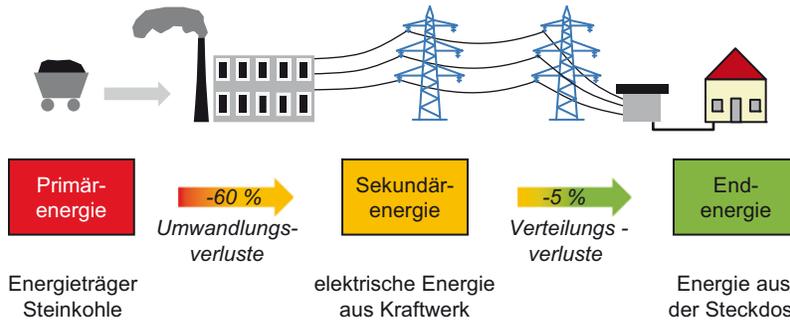


Bild 1.2 Darstellung der Energiearten am Beispiel der Steinkohleverstromung: Nur etwa ein Drittel der eingesetzten Primärenergie kommt beim Endkunden an der Steckdose an

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 [Kal20, 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

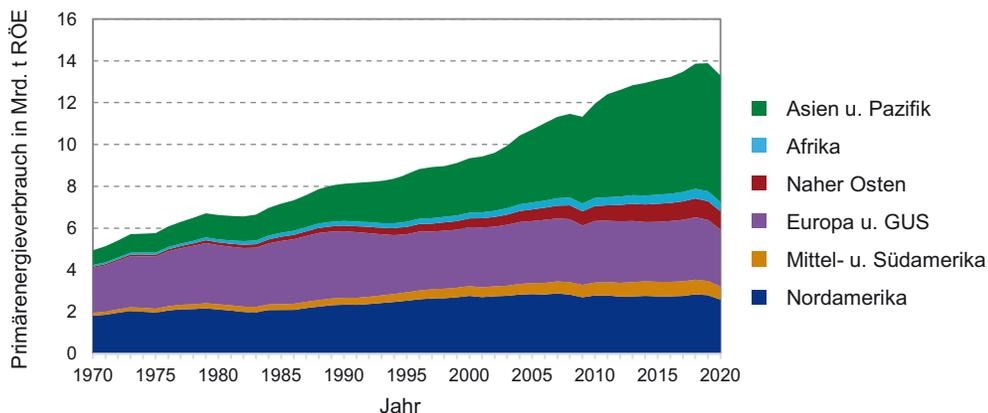


Bild 1.3 Entwicklung des weltweiten Primärenergiebedarfs seit 1970 [www.bp.com/]

bei rund 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 knapp 8 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 rund 30.000 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.

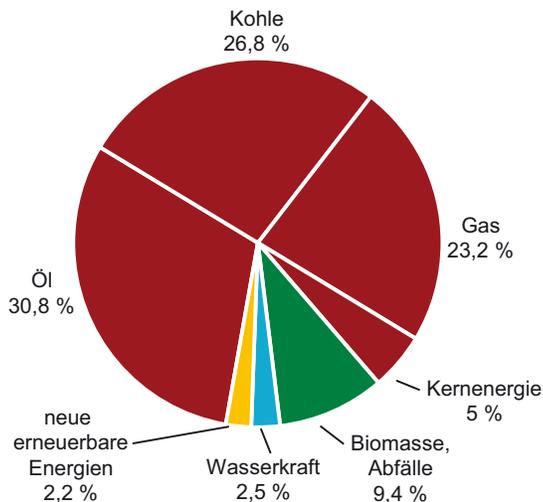


Bild 1.4 Aufteilung der weltweiten Primärenergienutzung im Jahr 2020 nach den Energieträgern [www.iea.org]

Die starke Nutzung der fossilen Quellen führt inzwischen bereits teilweise zu einer Verknappung. Geht man davon aus, dass der Weltenergiebedarf weiterhin wie bisher wachsen wird, so verringern sich die Reichweiten der fossilen Energieträger drastisch. Die Verknappung der Brennstoffe wird zu **stark steigenden Preisen** und ggf. **Verteilungskriegen** führen. Im aktuellen Jahrzehnt 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 zeitweise 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 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 2021 lag die Konzentration bei 415 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.

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.

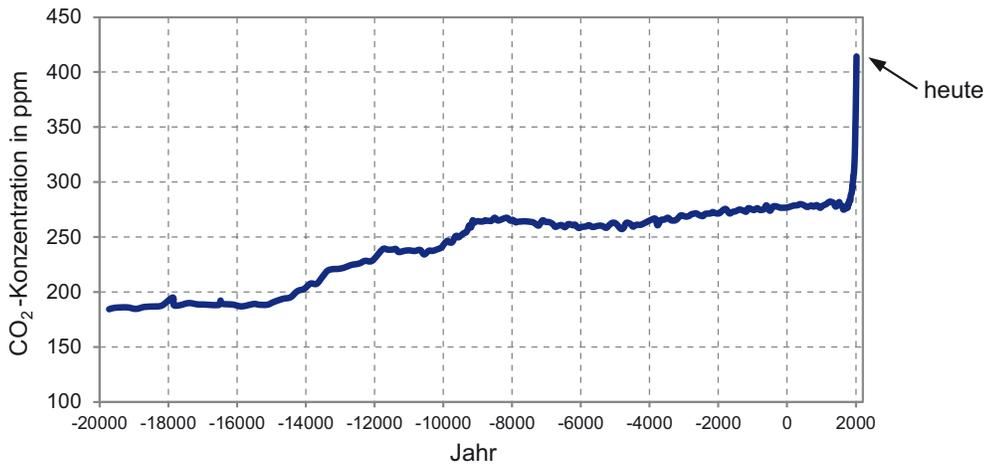


Bild 1.5 Entwicklung des CO₂-Gehalts in der Atmosphäre in den letzten 22.000 Jahren: Auffällig ist der steile Anstieg seit Beginn der Industrialisierung [Nef94, Mon04, www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends]

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 CO₂, 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.

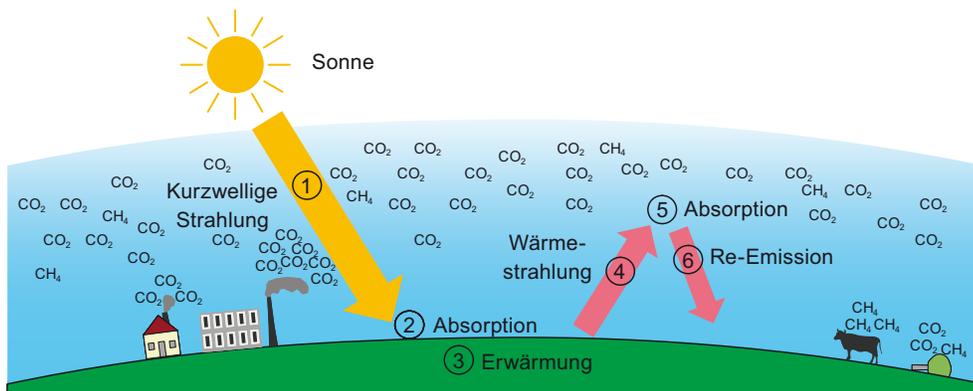


Bild 1.6 Prinzipdarstellung des Treibhauseffekts: Die von der Erde abgestrahlte Wärmestrahlung wird von den Treibhausgasen zurückgehalten