

Konrad Mertens



Photovoltaik

Lehrbuch zu Grundlagen,
Technologie und Praxis



6., aktualisierte und erweiterte Auflage

HANSER



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 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 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 Bleiakkus	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	326
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, 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 be-rufenem 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):

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

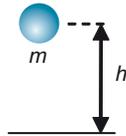
mit g : Erdbeschleunigung, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

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.

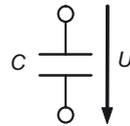
a) Potentielle Energie:

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



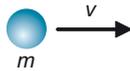
c) Kondensator-Energie:

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



b) Kinetische Energie:

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



d) Energie am Widerstand:

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

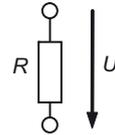


Bild 1.1 Darstellung verschiedener Energieformen

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.

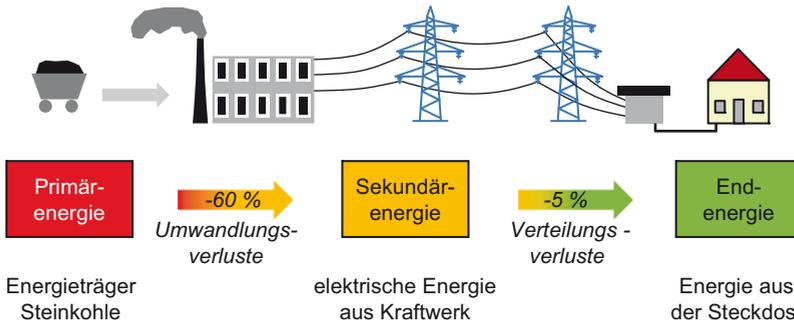


Bild 1.2 Darstellung der Energiearten am Beispiel der Steinkohleverstromung: Nur etwa ein Drittel der eingesetzten Primärenergie kommt beim Endkunden an der Steckdose an

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 [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:

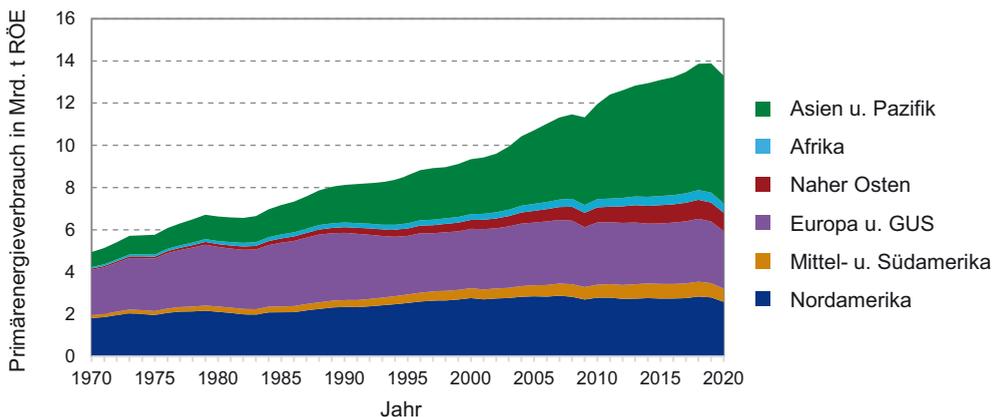
$1 \text{ m}^3 \text{ Erdgas} \approx 11 \text{ Öl} \approx 11 \text{ Benzin} \approx 1 \text{ kg Kohle} \approx 2 \text{ kg Holz} \approx 10 \text{ kWh}$

■ 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.

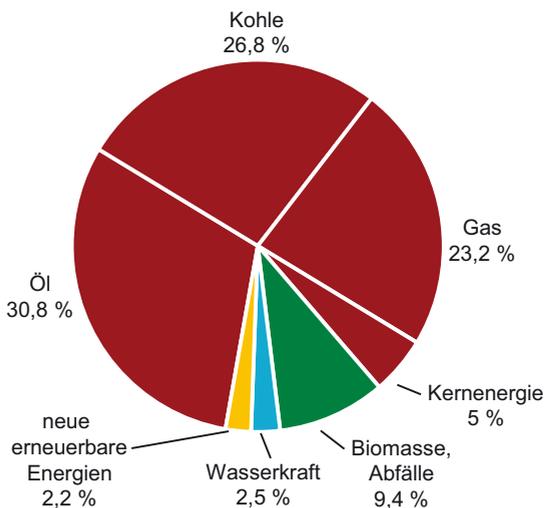


Bild 1.4 Aufteilung der weltweiten Primärenergienutzung im Jahr 2020 nach den Energieträgern [www.iea.org]

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.

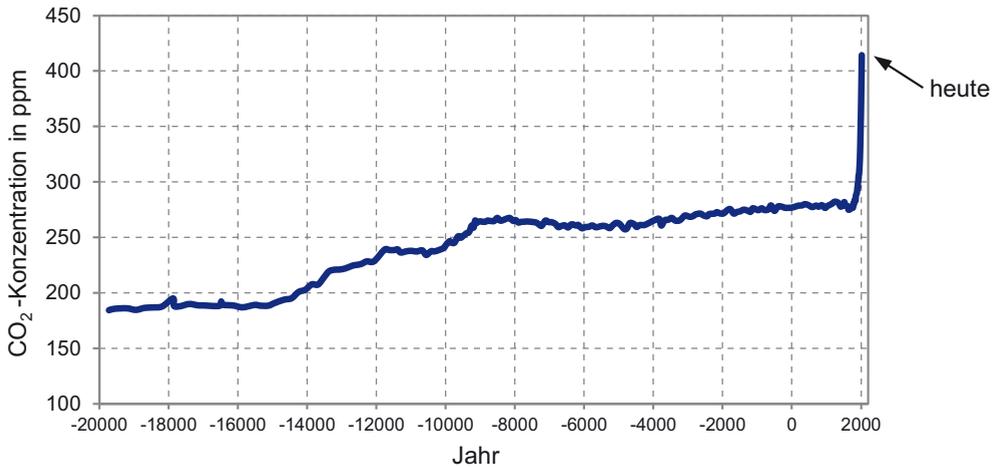


Bild 1.5 Entwicklung des CO₂-Gehalts in der Atmosphäre in den letzten 22.000 Jahren: Auffällig ist der steile Anstieg seit Beginn der Industrialisierung [Nef94, Mon04, www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends]

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.

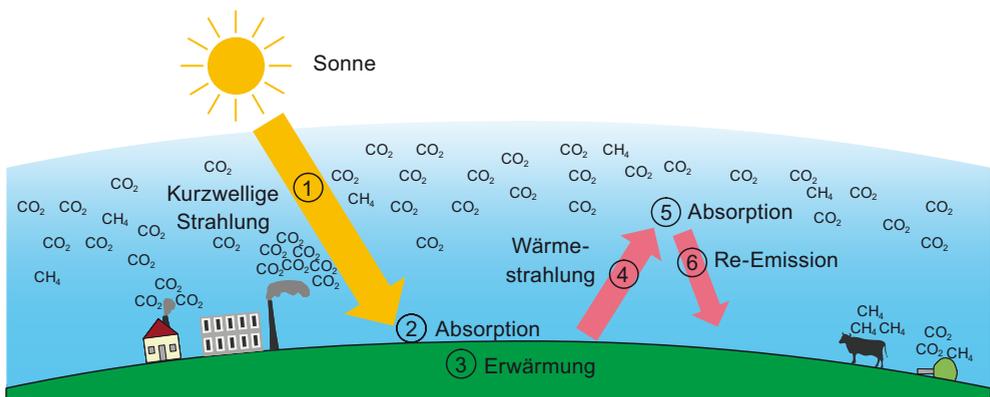


Bild 1.6 Prinzipdarstellung des Treibhauseffekts: Die von der Erde abgestrahlte Wärmestrahlung wird von den Treibhausgasen zurückgehalten

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. Nach der Reaktorkatastrophe von Fukushima im Jahr 2011 wurde darüber hinaus entschieden, die **Stromversorgung bis zum Jahr 2050 vollständig auf erneuerbare Energien** umzustellen. Wesentliche Elemente zur Erreichung dieses Ziels sind neben der Steigerung der **Energieeffizienz** der **Ausbau der erneuerbaren Energien**. Dies steht im Einklang mit der **UN-Klimakonferenz in Paris (2015)**. Diese legte fest, dass die weltweiten Nettotreibhausgasemissionen zwischen 2045 und 2060 **auf null reduziert** werden müssen, um die weltweite **Erwärmung auf 1,5 bis 2 Grad Celsius** zu begrenzen.

Die im Jahr 2021 gebildete deutsche Ampelkoalition hat sich ausdrücklich zum Pariser Abkommen bekannt. Als Ziel wurde festgelegt, die **erneuerbaren Energien** im Strombereich **bis zum Jahr 2030 auf 80 % auszubauen**. Für die **Photovoltaik** heißt dies, dass bis zum Jahr 2030 eine **installierte Leistung von rund 200 GWp** erreicht werden soll. Dies bedeutet einen **Zubau von rund 15 GWp pro Jahr!** Im Bereich der **Windenergie an Land** sollen wiederum **zwei Prozent der Landesflächen** ausgewiesen werden und die Kapazitäten im **Offshore-Bereich auf mindestens 30 GW** ausgebaut werden (siehe auch **Abschnitt 11.5**).

1.3.4 Gefährdung und Entsorgung

Eine annähernd CO₂-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 gelagert werden. Dabei stellt sich die Frage, ob es **ethisch vertretbar** ist, zukünftigen Generationen eine solche **Erblast** zu hinterlassen.

Schließlich soll auch hier die **Verfügbarkeit** betrachtet werden. Die bekannten Reserven an Uran inklusive der geschätzten zusätzlichen Vorräte liegen bei ca. 4.6 Mio. Tonnen. Dabei sind bereits die Vorkommen mit relativ geringen Urankonzentrationen eingerechnet, die sich nur mit hohem Aufwand gewinnen lassen. Nimmt man den aktuellen Jahresenergiebedarf von 68.000 t/a als Grundlage, so kommt man auf eine Reichweite von 67 Jahren [Lüb06]. Unter der Annahme der Steigerung des Energiebedarfs würde sich die Reichweite nochmals verringern. Wollte man die heutige weltweite **Energieversorgung komplett auf Kernenergie** umstellen, so würde das Uran lediglich für **4 Jahre reichen**.

1.4 Erneuerbare Energien

1.4.1 Die Familie der erneuerbaren Energien

Bevor wir uns genauer der Photovoltaik zuwenden, wollen wir sie einordnen in die Familie der erneuerbaren Energien. Der Ausdruck **erneuerbar** (oder **regenerativ**) bedeutet, dass sich das Energieangebot nicht verbraucht. Der Wind weht jedes Jahr wieder neu, die Sonne geht jeden Tag auf und Pflanzen wachsen nach der Ernte wieder neu nach. Im Fall der Geothermie kühlt sich die Erde zwar ab, dies macht sich allerdings erst in Tausenden von Jahren bemerkbar.

Wie **Bild 1.7** zeigt, sind die eigentlichen **Primärenergien** der erneuerbaren Energien die **Planetenbewegung**, die **Erdwärme** und die **Solarstrahlung**. Während die Planetenbewegung lediglich im etwas exotischen Gezeitenkraftwerk genutzt wird, kann die Erdwärme sowohl zur Heizung von Gebäuden mithilfe einer Wärmepumpe als auch zur Erzeugung von elektrischer Energie in einem geothermischen Kraftwerk dienen.

Die Solarstrahlung ist wiederum die Grundlage für erstaunlich viele Energiearten. So wird die **Wasserkraftnutzung** erst möglich über die **Verdunstung des Wassers** und das anschließende Abregnen auf Land. Die **Atmosphärenbewegung** entsteht hauptsächlich durch Solarstrahlung, die somit ebenfalls die Basis der **Windkraftnutzung** darstellt. Im Fall der **Biomasseproduktion** ist es wiederum das Sonnenlicht, das zum Ablaufen der **Photosynthese** und damit dem Wachsen von Biomasse zwingend vorhanden sein muss.

Solarstrahlung kann außerdem unmittelbar zur Wärmeerzeugung genutzt werden, zum Beispiel im **thermischen Kollektor** zur Brauchwassererwärmung oder Wohnungsheizung. **Thermische Solarkraftwerke** erzeugen dagegen Prozesswärme aus konzentriertem Sonnenlicht, um

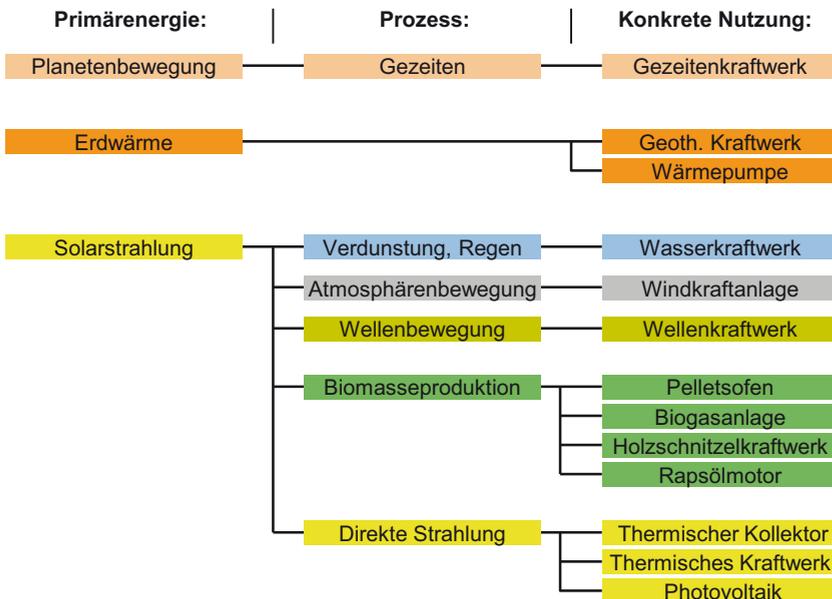


Bild 1.7 Verschiedene Möglichkeiten zur Nutzung erneuerbarer Energien

damit Generatoren zur elektrischen Energiegewinnung anzutreiben. Last but not least wandelt die **Photovoltaik** Solarstrahlung unmittelbar in elektrische Energie um.

Somit können wir die **Photovoltaik** als **junge Tochter der großen Familie** von erneuerbaren Energien ansehen. Diese übt allerdings einen ganz besonderen Reiz aus: sie ist als einzige in der Lage, Sonnenlicht auf direktem Wege in elektrische Energie umzuwandeln, ohne aufwändige Zwischenprozesse oder verschleißanfällige mechanische Konverter zu benötigen.

1.4.2 Vor- und Nachteile von erneuerbaren Energien

Die erneuerbaren Energien haben bestimmte gemeinsame Eigenschaften. Ihr wichtigster Vorteil liegt darin, dass sie im Gegensatz zu allen anderen Energieträgern **praktisch unerschöpflich** sind. Hinzu kommt, dass ihr Einsatz fast **ohne Emissionen** erfolgt und mit nur **geringen Umweltauswirkungen und Gefährdungen** verbunden ist.

Ein weiterer wichtiger Vorteil besteht in der Tatsache, dass praktisch **keine Brennstoffkosten** anfallen. Die Sonne scheint kostenlos, der Wind weht ohnehin und die Erdwärme ist ein fast unerschöpfliches Reservoir. Andererseits sind die **Energiedichten**, in denen die erneuerbaren Energien zur Verfügung stehen, **sehr gering**. Man benötigt große Flächen (Solarmodulfläche bei Photovoltaik, Rotorfläche bei Windkraftanlagen etc.), um ausreichend Energie „sammeln“ zu können. Dies bedeutet, dass typischerweise **hohe Investitionskosten** anfallen, da die großen Flächen einen **hohen Materialeinsatz** erfordern.

Ein weiterer schwer wiegender Nachteil ist das **schwankende Energieangebot**. Besonders **Photovoltaik und Windkraft** sind davon betroffen. Als Folge müssen weitere Kraftwerke (**Backup-Kraftwerke**) bereitgehalten werden, um eine konstante Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Die **Geothermie** ist von diesem Problem nicht betroffen, sie kann praktisch **unabhängig von Tages- und Jahreszeit** Energie liefern. Einen Sonderfall nimmt die **Biomasse** ein, die als einzige erneuerbare Energie **leicht gespeichert werden** kann (Holzstapel im Wald, Biogas im Tank etc.).

In vielen **Ländern der Dritten Welt** steht kein Stromnetz zur Verfügung. Dort kommt ein weiterer Vorteil der erneuerbaren Energien zum Tragen: die **dezentrale Verfügbarkeit und Nutzbarkeit**. So können autarke Dorfstromversorgungen weitab von großen Städten realisiert werden, ohne dass ein Überlandnetz notwendig ist.

1.4.3 Bisherige Entwicklung der erneuerbaren Energien

Bild 1.8 zeigt den Beitrag der erneuerbaren Energien zur Stromversorgung in Deutschland im Verlauf der Jahre. Zusätzlich zur klassischen Wasserkraft haben sich die Windkraft und Biomasse stürmisch entwickelt. In den letzten Jahren machte außerdem die Photovoltaik mit zwischenzeitlichen Wachstumsraten von über 50 % deutlich Boden gut. Im Jahr 2021 erzeugten die **erneuerbaren Energien** etwa 238 TWh an elektrischer Energie, dies entspricht einem Anteil von rund 41 % des deutschen **Bruttostrombedarfs** von 562 TWh. Den **größten Anteil** erbrachte die **Windkraft** mit 21 %, die **Photovoltaik** erreichte gut 9 % vor **Biomasse** (knapp 9 %) und **Wasserkraft** (3,5 %). Aufgrund des **schwachen Windjahrs** und **wenig Sonne** lag der Ertrag rund 5 % niedriger als im Vorjahr.

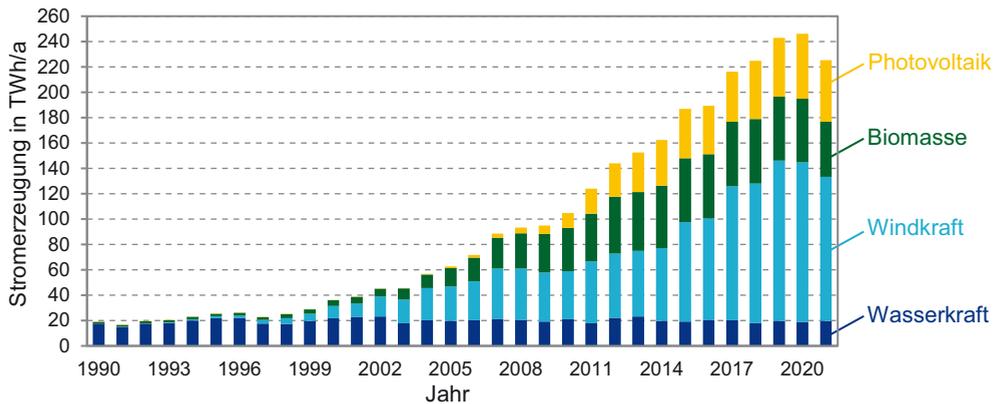


Bild 1.8 Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland seit 1990: Im Jahr 2021 lag der Beitrag zur Bruttostromerzeugung bei rund 225 TWh; dies entspricht etwa 40 % des gesamten Nettostromverbrauchs von 490 TWh/a (zum Unterschied zwischen Brutto- und Nettostromerzeugung siehe [Abschnitt 11.4.1](#)) [www.volker-quaschning.de]

■ 1.5 Photovoltaik – das Wichtigste in Kürze

In den folgenden Kapiteln werden wir uns durch einige Grundlagenthemen arbeiten, bei denen der Eine oder die Andere sich vielleicht fragt, wozu man das denn alles braucht. Daher wollen wir zunächst zur Motivationssteigerung und zum besseren Verständnis kurz die wichtigsten Aspekte der Photovoltaik betrachten.

1.5.1 Was bedeutet „Photovoltaik“?

Der Begriff **Photovoltaik** ist eine Zusammensetzung aus dem griechischen Wort *phós*, *phôtós* (Licht, des Lichtes) und dem Namen des italienischen Physikers Alessandro Volta (1745–1825). Dieser erfand die erste funktionsfähige elektrochemische Batterie; ihm zu Ehren wurde die Einheit der elektrischen Spannung als **Volt** benannt. Eine Übersetzung des Wortes **Photovoltaik** könnte daher heißen **Lichtbatterie** oder auch **Lichtenergiequelle**. Allgemeiner definieren wir, dass der Ausdruck **Photovoltaik** die direkte Umwandlung von Sonnenlicht in elektrische Energie beschreibt.

1.5.2 Was sind Solarzellen und Solarmodule?

Grundbaustein jeder Photovoltaikanlage ist die Solarzelle (siehe [Bild 1.9](#)). Diese besteht in den allermeisten Fällen aus **Silizium**, einem Halbleiter, der auch für Dioden, Transistoren und Computerchips verwendet wird. Durch Einbau von Fremdatomen (**Dotierung**) wird in der Zelle ein **pn-Übergang** erzeugt, der ein **elektrisches Feld** in den Kristall „einbaut“. Fällt **Licht** auf die Solarzelle, so werden **Ladungsträger** aus den Kristallbindungen **gelöst** und durch das **elektrische Feld** zu den äußeren Kontakten befördert. Als Folge entsteht an den Kontakten der So-

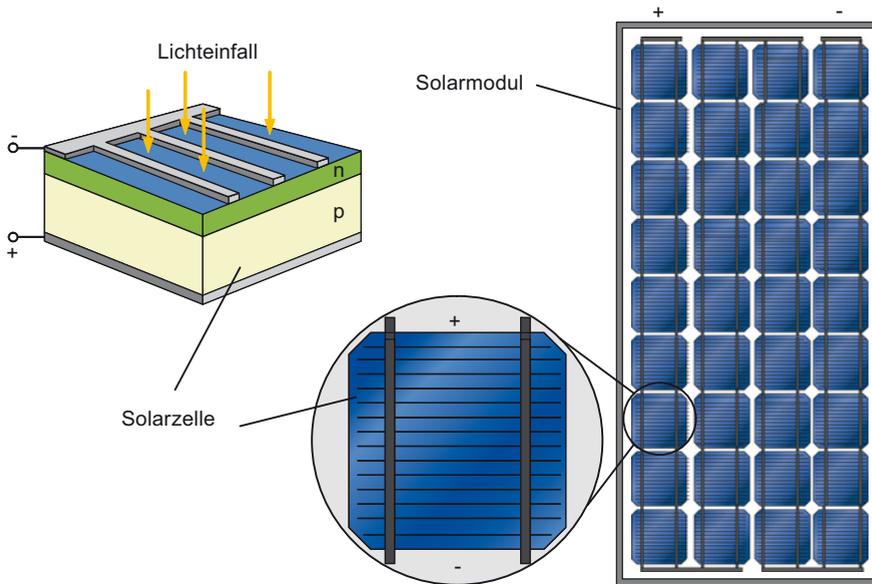


Bild 1.9 Solarzelle und Solarmodule als Grundbausteine der Photovoltaik

larzelle eine **Spannung** von etwa **0,5 Volt**. Der abgegebene **Strom** variiert je nach Einstrahlung und Zellenfläche und liegt zwischen **0 und 10 Ampere**.

Um auf gut nutzbare Spannungen im Bereich von 20 bis 50 Volt zu kommen, schaltet man viele Zellen in einem **Solarmodul** in Reihe (**Bild 1.9**). Außerdem werden die Solarzellen in dem Modul mechanisch geschützt und gegen Umwelteinflüsse (z. B. das Eindringen von Feuchtigkeit) versiegelt.

1.5.3 Wie ist eine typische Photovoltaikanlage aufgebaut?

Bild 1.10 zeigt den Aufbau einer klassischen in Deutschland lange Zeit üblichen netzgekoppelten Anlage. Mehrere Solarmodule werden zu einem **Strang (String)** in Reihe geschaltet und an einen **Wechselrichter** angeschlossen. Der **Wechselrichter** wandelt den von den Modulen gelieferten Gleichstrom in Wechselstrom um und speist ihn in das öffentliche Netz ein. Zur korrekten Vergütung des erzeugten Stroms misst ein **Einspeisezähler** die erzeugte Energiemenge. Getrennt davon ermittelt der **Verbrauchszähler** den Stromverbrauch im Haushalt.

Finanziert wird die Anlage auf der Grundlage des **Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG)**. Dieses garantiert, dass der eingespeiste **Strom über 20 Jahre** zu einem festgesetzten Preis vom Energieversorgungsunternehmen **vergütet** wird. Der Anlagenbesitzer wird damit gewissermaßen zum Kraftwerksbetreiber.

Heute gebaute Solarstromanlagen sehen mittlerweile anders aus, da typischerweise ein Teil des erzeugten Stroms im Haus selbst verbraucht wird (sogenannter „Eigenverbrauch“). In diesem Fall wird nur der überschüssige Solarstrom ins Netz eingespeist. Diesen Fall werden wir in **Kapitel 7** und **8** genauer betrachten.

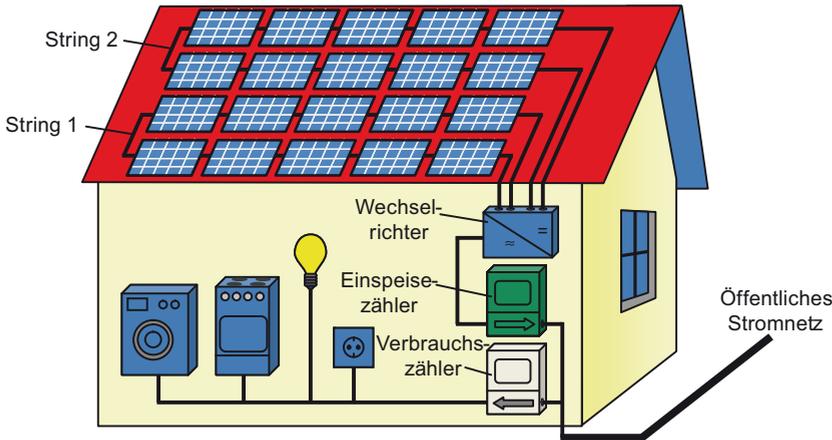


Bild 1.10 Aufbau einer klassischen netzgekoppelten Photovoltaikanlage: Ein Wechselrichter wandelt den von den Solarmodulen gelieferten Gleichstrom in Wechselstrom und speist ihn in das öffentliche Netz ein

1.5.4 Was „bringt“ eine Photovoltaikanlage?

Für die Besitzerin einer Solarstromanlage ist insbesondere interessant, welche Leistung ihre Anlage erbringt und welche Energiemenge im Laufe eines Jahres eingespeist werden kann.

Die Leistung eines Solarmoduls wird unter **Standardtestbedingungen** (**Standard-Test-Conditions, STC**) gemessen, die durch drei Randbedingungen festgelegt sind:

1. Volle Sonneneinstrahlung (Bestrahlungsstärke $E = E_{\text{STC}} = 1000 \text{ W/m}^2$)
2. Temperatur des Solarmoduls: $\vartheta_{\text{Modul}} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$
3. Standard-Lichtspektrum AM 1,5 (Näheres dazu in [Kapitel 2](#))

Die Leistung, die ein Solarmodul unter diesen Bedingungen erbringt, ist die **Nennleistung des Moduls**. Sie wird in **Watt-Peak (Wp)** angegeben, da sie faktisch die Spitzenleistung (Peak) des Moduls unter optimalen Bedingungen beschreibt.

Der **Wirkungsgrad** η_{Modul} eines Solarmoduls gibt das Verhältnis aus gelieferter elektrischer **Nennleistung** P_{STC} bezogen auf die einfallende **optische Leistung** P_{Opt} an:

$$\eta_{\text{Modul}} = \frac{P_{\text{STC}}}{P_{\text{Opt}}} = \frac{P_{\text{STC}}}{E_{\text{STC}} \cdot A} \quad (1.9)$$

mit A : Modulfläche

Die **Wirkungsgrade** von **Silizium-Solarmodulen** liegen im Bereich von **15 bis 24 %**. Neben Silizium gibt es noch **weitere Materialien** wie Cadmiumtellurid oder Kupferindiumselenid, die unter dem Namen **Dünnschichttechnologien** zusammengefasst werden. Diese erreichen Modulwirkungsgrade von **7 bis 20 %** (siehe [Kapitel 5](#)).

Beispiel 1.2 Leistung und Ertrag einer Aufdachanlage

Angenommen, der Hausbesitzerin steht eine Dachfläche von 40 m^2 zur Verfügung. Sie kauft Module mit einem Wirkungsgrad von 20 %. Die Nennleistung der Anlage ergibt sich

zu:

$$P_{\text{STC}} = P_{\text{Opt}} \cdot \eta_{\text{Modul}} = E_{\text{STC}} \cdot A \cdot \eta_{\text{Modul}} = 1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 40 \text{ m}^2 \cdot 0,2 = 8 \text{ kWp}$$

In Deutschland erbringt eine nach Süden ausgerichtete Dachanlage typischerweise einen **spezifischen Ertrag** w_{Jahr} von ca. **900 kWh/kWp** (Kilowattstunden pro Kilowatt-Peak) pro Jahr. Damit ergibt sich für unsere Hausbesitzerin folgender Jahresertrag W_{Jahr} :

$$W_{\text{Jahr}} = P_{\text{STC}} \cdot w_{\text{Jahr}} = 8 \text{ kWp} \cdot 900 \frac{\text{kWh}}{\text{kWp} \cdot \text{a}} = 7200 \text{ kWh/a}$$

Im Vergleich zum **typischen Strombedarf eines Haushalts** von 3000 bis 4000 kWh pro Jahr ist die erzeugte Energiemenge somit nicht zu verachten.



Nach diesem Schnellkurs zum Thema Photovoltaik betrachten wir nun die noch recht junge Geschichte der Solarstromerzeugung.

■ 1.6 Geschichte der Photovoltaik

1.6.1 Wie alles begann

Im Jahr 1839 entdeckte der französische Wissenschaftler **Alexandre Edmond Becquerel** (er war übrigens der Vater von Antoine Henri Becquerel, nach dem die Einheit der Aktivität von radioaktiven Stoffen benannt ist) bei elektrochemischen Experimenten den **photoelektrischen Effekt**. Er steckte zwei beschichtete Platinelektroden in einen Behälter mit einem Elektrolyten und bestimmte den zwischen den Elektroden fließenden Strom (siehe **Bild 1.11a**). Becquerel stellte fest, dass sich die Stromstärke bei Bestrahlung des Behälters mit Licht veränderte [Bec39]. In diesem Fall handelte es sich um den **äußeren Photoeffekt**, bei dem Elektronen unter Lichteinfall aus einem Festkörper austreten.

1873 entdeckten dann der britische Ingenieur **Willoughby Smith** und sein Assistent **Joseph May**, dass der Halbleiter Selen seinen Widerstand ändert, wenn er mit Licht bestrahlt wird. Sie beobachteten damit zum ersten Mal den für die Photovoltaik relevanten **inneren Photoeffekt**, bei dem Elektronen im Halbleiter durch Licht aus ihren Bindungen gerissen werden und damit als freie Ladungsträger im Festkörper zur Verfügung stehen.

Drei Jahre später fanden die Engländer **William Adams** und **Richard Day** heraus, dass ein mit Platinelektroden versehener **Selenstab elektrische Energie produzieren** kann, wenn man ihn dem Licht aussetzt (siehe **Bild 1.11b**). Damit wurde zum ersten Mal der Beweis erbracht, dass ein Festkörper Lichtenergie direkt in elektrische Energie umwandeln kann. 1883 baute der New Yorker Erfinder **Charles Fritts** ein kleines „Modul“ aus Selenzellen mit einer Fläche von ca. 30 cm^2 , das immerhin einen **Wirkungsgrad von knapp 1 %** aufwies. Hierzu beschichtete er die Selenzellen mit einer hauchdünnen Elektrode aus Gold. Er sandte ein Modul an **Werner von Siemens** (deutscher Erfinder und Unternehmer, 1816–1892) zur Begutachtung. Dieser erkannte die Bedeutung der Entdeckung und erklärte vor der Königlichen Akademie von Preußen, dass damit „zum ersten Mal die direkte Wandlung von Licht in elektrische Energie gezeigt“ wurde [Wag19]. In der Folge entwickelte Siemens einen Belichtungsmesser auf der Basis von Selen.

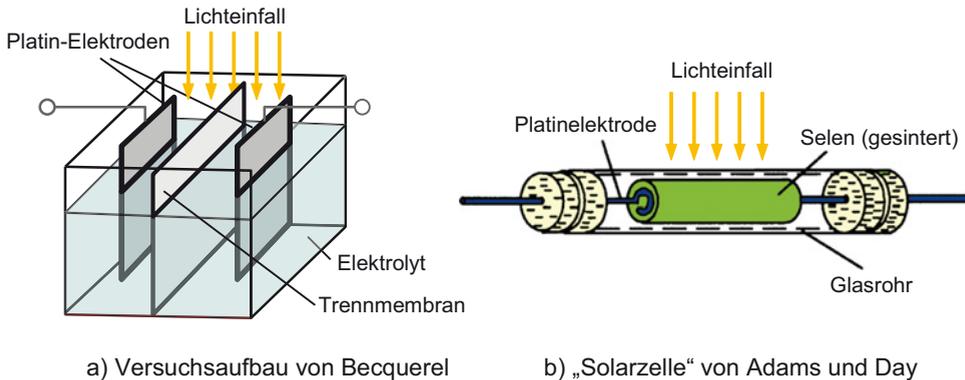


Bild 1.11 Die Anfänge der Photovoltaik: Elektrochemischer Versuchsaufbau von A. E. Becquerel und die erste Solarzelle von Adams und Day (nach [Gre02, Ada77])

In den folgenden Jahren konnten die physikalischen Hintergründe des Photoeffekts immer besser erklärt werden. Einen besonderen Anteil daran hatte [Albert Einstein](#) (1879–1955), der seine [Lichtquantentheorie](#) im Jahre 1905 vorstellte, für die er 16 Jahre später den Nobelpreis erhielt. Gleichzeitig gab es technologische Fortschritte: Der polnische Chemiker [Jan Czochralski](#) erfand 1916 bei der Firma AEG das nach ihm benannte [Kristallziehverfahren](#). Mit dem Czochralski-Verfahren wurde es möglich, Halbleiterkristalle als Einkristalle von hoher Qualität herzustellen.

1.6.2 Die ersten echten Solarzellen

Der Miterfinder des Transistors, der amerikanische Nobelpreisträger [William B. Shockley](#) (1910–1989), präsentierte 1950 eine Erklärung für die [Funktionsweise des pn-Übergangs](#) und legte damit die theoretische Grundlage für die heute eingesetzten Solarzellen. Auf dieser Basis entwickelten [Daryl Chapin](#), [Calvin Fuller](#) und [Gerald Pearson](#) in den Bell Labs die [erste Silizium-Solarzelle](#) mit einer Fläche von 2 cm^2 und einem [Wirkungsgrad](#) von bis zu 6 % und präsentierten sie am **25. April 1954** der Öffentlichkeit ([Bild 1.12](#)) [Cha54]. Die New York Times brachte das Ereignis am nächsten Tag auf der Titelseite und versprach den Lesern „die Erfüllung eines der größten Wünsche der Menschheit – der Nutzung der fast unbegrenzten Energie der Sonne“.

In der Bell-Zelle wurde zum ersten Mal das Konzept des pn-Übergangs mit dem inneren Photoeffekt kombiniert. Der pn-Übergang dient dabei als Förderband, das die gelösten Elektronen abtransportiert. Somit kann dieser Effekt genauer als [Sperrschicht-Photoeffekt](#) oder auch als [photovoltaischer Effekt](#) bezeichnet werden.

In den Folgejahren konnte der Wirkungsgrad bis auf 10 % gesteigert werden. Aufgrund des hohen Preises der Solarmodule (der Preis pro Watt lag bei mehr als dem 1000-Fachen des heutigen Preises) kamen zunächst nur Sonderanwendungen in Frage. Am 17. März 1958 startete erstmals ein [Satellit mit Solarzellen](#) an Bord: Der amerikanische Satellit [Vanguard I](#), der mit zwei Sendern ausgestattet war ([Bild 1.13](#)). Sender Nr. 1 wurde mit einer Quecksilberbatterie betrieben und stellte bereits nach 20 Tagen seinen Betrieb ein. Sender Nr. 2 bezog seine En-



Bild 1.12 Die Erfinder der ersten „echten“ Solarzelle: Chapin, Fuller und Pearson. Das rechte Bild zeigt das erste „Solarmodul“ der Welt, ein Minimodul aus 8 Solarzellen (Mit freundlicher Genehmigung des AT&T Archives and History Center)



Bild 1.13 Ansicht des Satelliten Vanguard I: Wegen seines Durchmessers von 16 cm wurde er auch als „Pampelmuse“ bezeichnet (Foto: NASA)

ergie aus sechs auf der Außenhaut des Satelliten angebrachten Solarzellen und arbeitete bis 1964.

Der Erfolg dieses Projektes führte dazu, dass sich die [Photovoltaik als Energiequelle für Satelliten](#) durchsetzte. Die Entwicklungen in den 1960er Jahren wurden daher von der Raumfahrt vorangetrieben. Neben den Siliziumzellen wurden erste Solarzellen aus Galliumarsenid (GaAs) und weiteren alternativen Materialien vorgestellt.

Als Vergleich zu [Vanguard I](#) ist in [Bild 1.14](#) eines der zwei Solararrays der 2007 gestarteten [Raumsonde Dawn](#) zu sehen.

Die Sonde hatte den Auftrag, den rund 400 Mio. Kilometer von der Sonne entfernten [Zwergplaneten Ceres](#) zu untersuchen. Seit 2015 hat sie ihn erreicht und sendet Fotos des Himmelskörpers. Der Name „Dawn“ (Dämmerung) ist gut gewählt: Aufgrund des großen Abstands zur Sonne erreicht die Sonde nur rund ein Zehntel der Sonnenstrahlung auf der Erde. Daher wurde besonders viel Aufwand bei der solaren Stromversorgung getrieben.

Das Array von 5 kW Leistung ist aus Hochleistungs-Dreifach-Stapelzellen aus InGaP/InGaAs/Ge (siehe [Kapitel 5](#)) aufgebaut, die im Weltraum einen [Wirkungsgrad von 27,5 %](#) erreichen [Fat05].



Bild 1.14 Modernes Solararray der Raumsonde Dawn mit einer Leistung von 5 kW (Foto: NASA)

1.6.3 From Space to Earth

Die terrestrische Nutzung von Photovoltaik beschränkte sich zunächst nur auf Anwendungen, bei denen das nächste Energieverbundnetz sehr weit entfernt war: Sendeanlagen, Signalsysteme, netzferne Berghütten etc. (Bild 1.15). Ein Umdenken setzte allerdings mit der Ölkrise im Jahr 1973 ein. Plötzlich standen alternative Energiequellen im Mittelpunkt des Interesses. 1977 wurde an den Sandia Laboratories in New Mexico ein Solarmodul mit dem Ziel entwickelt, ein Standardprodukt zur kostengünstigen Massenproduktion zu fertigen.



Bild 1.15 Beispiele für photovoltaische Inselanlagen: Telefonverstärker von 1955 mit der legendären Bell Solar Battery und moderner solarbetriebener Leuchtturm in Australien (Fotos: AT&T Archives and History Center, Erika Johnson)

Der Störfall im Atomkraftwerk Harrisburg (1979) und insbesondere die Reaktorkatastrophe in **Tschernobyl** (1986) verstärkten schließlich den Druck auf die Regierungen, neue Lösungen in der Energieversorgung anzustreben.

1.6.4 Vom Spielzeug zur Energiequelle

Ab Ende der 1980er Jahre intensivierten insbesondere die USA, Japan und Deutschland ihre Anstrengungen im Bereich der Photovoltaik-Forschungsförderung. Außerdem wurden Förderprogramme aufgelegt, die den Bau von netzgekoppelten Photovoltaikanlagen auf Einfamilienhäusern anregen sollten. In Deutschland war dies zunächst von 1990 bis 1995 das **1000-Dächer-Programm**, das wertvolle Erkenntnisse zur Zuverlässigkeit von Modulen und Wechselrichtern sowie zu Fragen der Netzeinspeisung lieferte [Gro97].

Das im Jahr 1991 eingeführte **Stromeinspeisegesetz** verpflichtete die Energieversorger, Strom aus kleinen erneuerbaren Kraftwerken (Wind, Photovoltaik etc.) aufzunehmen. Während sich die Windbranche daraufhin stürmisch entwickelte, reichte die festgesetzte Vergütung von 17 Pfennig pro kWh bei weitem nicht für einen rentablen Betrieb von Photovoltaikanlagen aus. Aus diesem Grund forderten Umweltschützer eine höhere Vergütung von Solarstrom. Eine Schlüsselrolle kam dabei dem **Solarenergie-Förderverein Deutschland e. V.** zu. Dieser erreichte, dass in Aachen im Jahr 1995 die **kostendeckende Vergütung** in Höhe von 2 DM pro kWh für Strom aus Photovoltaikanlagen eingeführt wurde, welche bundesweit unter der Bezeichnung **Aachener Modell** bekannt wurde. Auf der Basis dieses Modells wurde im Jahr 2000 das **Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)** eingeführt. Dieses Nachfolgegesetz des Stromeinspeisegesetzes legte für die verschiedenen erneuerbaren Energiequellen kostendeckende Vergütungssätze fest und führte für die Photovoltaik zu einem ungeahnten Boom (siehe **Bild 1.16**). So stieg die in Deutschland kumulierte installierte Photovoltaikleistung von gut **100 MWp** im Jahr 2000 auf gut **59 GWp** im Jahr 2021 (siehe **Bild 1.16**, dunkelrote Balken). Dies entspricht einem durchschnittlichen jährlichen **Wachstum von rund 30%**! Die jährlichen Installationen erreichten

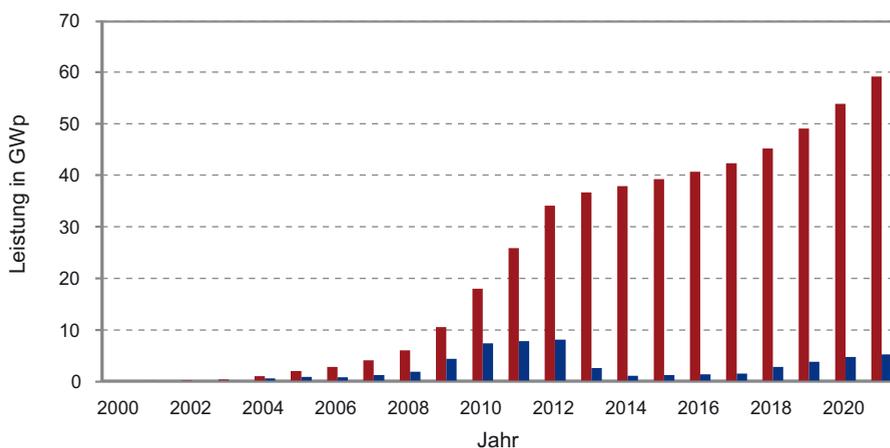


Bild 1.16 Entwicklung des Photovoltaikmarktes in Deutschland: Die insgesamt installierte Leistung liegt mittlerweile bei knapp 50 GWp [www.volker-quaschnig.de]