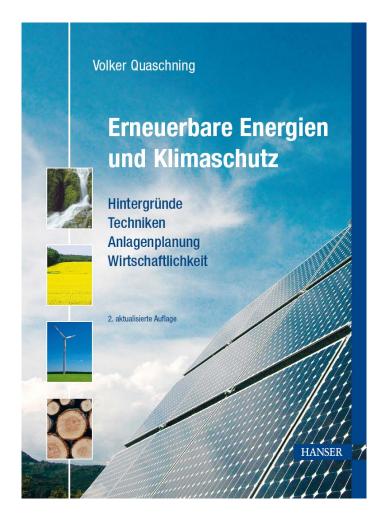
## Volker Quaschning

# **Erneuerbare Energien und Klimaschutz**

Hintergründe – Techniken – Anlagenplanung – Wirtschaftlichkeit



339 Seiten 222 Bilder 17 Tabellen

Kartoniert in Farbe

ISBN 978-3-446-41961-2

Leseprobe...

## **Vorwort**

Die Energie- und Klimaproblematik ist endlich dort angekommen, wo sie hingehört: in der breiten Öffentlichkeit. Dabei sind die Zusammenhänge von Energieverbrauch und Klimaerwärmung bereits seit vielen Jahrzehnten bekannt. Schon Ende der 1980er-Jahre erklärte die damalige deutsche Bundesregierung Klimaschutz zum Regierungsziel. Zahlreiche Experten forderten bereits damals den schnellen Umbau unserer Energieversorgung. Die dafür nötigen Schritte erfolgten allerdings bestenfalls halbherzig. Dabei lässt sich das Klimaproblem nicht aussitzen. Von Jahr zu Jahr wird immer deutlicher erkennbar, dass der Klimawandel bereits eingesetzt hat. Die Prognosen der Klimaforscher sind verheerend. Gelingt es uns nicht, die Notbremse zu ziehen, werden die katastrophalen Folgen des Klimawandels unsere heutigen Vorstellungsgrenzen weit überschreiten. Die Verleihung des Friedensnobelpreises im Jahr 2007 an den Klimapolitiker Al Gore und den Weltklimarat, die seit Jahren eindringlich vor den Klimafolgen warnen, sind eher ein Zeichen der Hilflosigkeit als einer nahenden Lösung des Problems.

Neben den Klimafolgen zeigen immer neue Rekorde bei den Preisen für Erdöl oder Erdgas, dass diese unseren Bedarf nicht mehr lange decken können und schnellstmöglich andere Alternativen erschlossen werden müssen.

Die Lösung ist dabei recht simpel. Sie lautet: regenerative Energien. Diese wären in der Lage, in nur wenigen Jahrzehnten unsere gesamte Energieversorgung vollständig zu übernehmen. Nur so können wir unsere Abhängigkeit von immer teurer werdenden und Krisen verursachenden Energieträgern wie Erdöl oder Uran beenden und unseren Energiehunger nachhaltig klimaverträglich stillen.

Der Weg dahin ist aber für viele noch ziemlich unklar. Oft traut man den regenerativen Energien nicht zu, eine wirkliche Alternative zu bieten. Dabei unterschätzt man völlig deren Möglichkeiten und prophezeit ein Zurück zur Steinzeit, wenn einmal das Erdöl und die Kohle erschöpft sein werden.

Dieses Buch soll solche Vorurteile zerstreuen. Es beschreibt klar und verständlich, welche verschiedenen Techniken und Potenziale zur Nutzung regenerativer Energien existieren, wie diese funktionieren und wie sie eingesetzt werden können. Das Zusammenspiel der verschiedenen Technologien ist dabei stets im Fokus. Am Beispiel Deutschlands wird auf-

gezeigt, wie eine nachhaltige Energieversorgung aussehen kann und wie diese umzusetzen ist. Dabei dient dieses Buch weniger als Handlungskatalog für eine zögerliche Politik, sondern soll vielmehr allen Leserinnen und Lesern Wege aufzeigen, selbst Beiträge für eine klimaverträgliche Energiewirtschaft zu leisten. Neben der Erläuterung von Energiesparmaßen liefert das Buch dazu konkrete Planungshilfen für die Realisierung eigener regenerativer Energieanlagen.

Das Buch ist bewusst so geschrieben, dass es einem breiten Leserkreis die nötigen Informationen bietet. Es soll sowohl den Einstieg in die verschiedenen Technologien ermöglichen als auch für Personen mit einigen Vorkenntnissen interessante Hintergrundinformationen liefern.

Damit ist dieses Buch eine wichtige Ergänzung zu dem von mir verfassten und bereits beim Hanser Verlag erschienenen Fachbuch "Regenerative Energiesysteme". Das große Interesse an dem mittlerweile in der sechsten Auflage erschienenen und ins Englische und ins Arabische übersetzten Fachbuch hat gezeigt, dass ein Bedarf an entsprechender Literatur besteht. Als Rückmeldung zu diesem Fachbuch und zu zahlreichen meiner Vorträge wurde stets das Interesse an einem allgemeinverständlichen, aber dennoch umfassenden Buch geäußert. Das neue Buch soll nun diese Lücke schließen und damit auch eine Unterstützung bei der Gestaltung einer nachhaltigen Energieversorgung liefern.

An dieser Stelle danke ich meiner Frau Cornelia, meinem Vater Günter, meinem Onkel Manfred sowie Friedrich Sick, die mit ihren Anregungen zum Entstehen dieses Buches beigetragen haben. Ein ganz besonderer Dank gilt auch dem Carl Hanser Verlag und im Speziellen Erika Hotho, Franziska Kaufmann und Mirja Werner für die Unterstützung und Realisierung dieses Buches.

Berlin, im Sommer 2008

Prof. Dr. Volker Quaschning

Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin

www.volker-quaschning.de

## Vorwort zur 2. Auflage

Die sehr guten Verkaufszahlen und die positive Resonanz zu diesem Fachbuch haben gezeigt, dass die Thematik und die Art der Darstellung auf ein breites Interesse gestoßen sind. Trotz sorgfältigster Prüfung lassen sich kleinere Fehler und Unstimmigkeiten nur selten völlig vermeiden. Ein besonderer Dank gilt daher allen Leserinnen und Lesern, die mit Hinweisen zur Beseitigung von Fehlern beigetragen haben. Darüber hinaus wurde diese Auflage aktualisiert, sodass nur neuestes Datenmaterial enthalten ist.

Berlin, im Sommer 2009

Prof. Dr. Volker Quaschning

# Inhalt

1	Unse	r Hunger nach Energie	13
1.1	Energi	ieversorgung – gestern und heute	14
	1.1.1	Von der französischen Revolution bis ins 20. Jahrhundert	14
	1.1.2	Die Epoche des schwarzen Goldes	17
	1.1.3	Erdgas – der jüngste fossile Energieträger	20
	1.1.4	Atomkraft – gespaltene Energie	21
	1.1.5	Das Jahrhundert der fossilen Energieträger	25
1.2	Energi	iebedarf – wer was wo wie viel verbraucht	26
1.3	Die So	Da-Energie	30
1.4	Energi	ievorräte – Reichtum auf Zeit	33
1.5	Das E	nde der Spaltung	35
1.6	Heutig	ge Ölpreise – Politik, Angebot und Nachfrage	36
2	Klima	a vor dem Kollaps?	38
2.1	Es ist	warm geworden – Klimaveränderungen heute	38
	2.1.1	Langsam schmilzt das Eis	
	2.1.2	Naturkatastrophen kommen häufiger	
2.2	Schuldiger gesucht – Gründe für den Klimawandel		43
	2.2.1	Der Treibhauseffekt	43
	2.2.2	Hauptverdächtiger Kohlendioxid	44
	2.2.3	Andere Übeltäter	49
2.3	Aussichten und Empfehlungen – was kommt morgen?		
	2.3.1	Wird es in Europa bitterkalt?	53
	2.3.2	Empfehlungen für einen wirksamen Klimaschutz	56
2.4	Schwe	ere Geburt – Politik und Klimawandel	
	2.4.1	Deutsche Klimapolitik	56
	2.4.2	Klimapolitik international	
2.5	Selbst	hilfe zum Klimaschutz	
3	Vom	Energieverschwenden zum Energie- und Kohlendioxidsparen	61
3.1		g effizient – Energiever(sch)wendung heute	

3.2	Private	er Energiebedarf – zu Hause leicht gespart	65
	3.2.1	Private Elektrizität – viel Geld verschleudert	65
	3.2.2	Wärme – fast ohne heizen durch den Winter	68
	3.2.3	Transport – mit weniger Energie weiterkommen	73
3.3	Industr	rie und Co – schuld sind doch nur die anderen	76
3.4	Die eig	gene Kohlendioxidbilanz	77
	3.4.1	Direkt selbst verursachte Emissionen	77
	3.4.2	Indirekt verursachte Emissionen	78
	3.4.3	Gesamtemissionen	81
3.5	Ökolog	gischer Ablasshandel	82
4	Kohle	endioxidfreie Energieversorgung – Vision oder Utopie?	85
<b>4</b> .1	Optionen einer kohlendioxidfreien Energieversorgung		
4.1	4.1.1	Effiziente Kraftwerke – mehr Strom mit weniger Kohlendioxid	
	4.1.2	Kohlendioxidsequestrierung – weg mit dem Kohlendioxid	
	4.1.3	Atomkraft – strahlend sauber	
	4.1.3	Kraft-Wärme-Kopplung – Brennstoff doppelt genutzt	
	4.1.4	Energiesparen – mit weniger mehr erreichen	
4.2		erative Energiequellen – Angebot ohne Ende	
4.2	_	zum Klimaschutz	
4.3	4.3.1	Runter mit dem Primärenergiebedarf	
	4.3.1	Stromerzeugung ganz ohne atomare und fossile Kraftwerke	
	4.3.3	Dämmung und regenerative Energien zur Wärmeversorgung	
	4.3.4	Effizienzsteigerung und neue Konzepte für den Verkehr	
4.4			
4.4	Sicher	e Versorgung mit regenerativen Energien	100
5	Photo	ovoltaik – Strom aus Sand	102
5.1	Aufbai	u und Funktionsweise	103
	5.1.1	Elektronen, Löcher und Raumladungszonen	103
	5.1.2	Wirkungsgrad, Kennlinien und der MPP	
5.2	Herste	llung von Solarzellen – vom Sand zur Zelle	
	5.2.1	Siliziumsolarzellen – Strom aus Sand	
	5.2.2	Von der Zelle zum Modul	110
	5.2.3	Dünnschichtsolarzellen	111
5.3	Photov	oltaikanlagen – Netze und Inseln	112
	5.3.1	Sonneninseln	
	5.3.2	Sonne am Netz	115
5.4	Planun	ng und Auslegung	119
	5.4.1	Geplant am Netz	119
	5.4.2	Geplante Inseln	
5.5		omie	
	5.5.1	Was kostet sie denn?	
	5.5.2	Förderprogramme	
	5.5.3	Es geht auch ohne Mehrwertsteuer	
5.6		gie	
5.7		voltaikmärkta	131

5.8	Ausblic	ck und Entwicklungspotenziale	132
6	Solart	hermieanlagen – mollig warm mit Sonnenlicht	134
6.1	Aufbau	ı und Funktionsweise	136
6.2	Solarko	ollektoren – Sonnensammler	138
	6.2.1	Schwimmbadabsorber	138
	6.2.2	Flachkollektoren	139
	6.2.3	Luftkollektoren	140
	6.2.4	Vakuum-Röhrenkollektor	141
6.3	Solarth	ermische Anlagen	143
	6.3.1	Warmes Wasser von der Sonne	143
	6.3.1.1	Schwerkraftsysteme	143
	6.3.1.2	Systeme mit Zwangsumlauf	145
	6.3.2	Heizen mit der Sonne	147
	6.3.3	Solare Siedlungen	148
	6.3.4	Kühlen mit der Sonne	149
	6.3.5	Schwimmen mit der Sonne	150
	6.3.6	Kochen mit der Sonne	151
6.4	Planun	g und Auslegung	152
	6.4.1	Solarthermische Trinkwassererwärmung	153
	6.4.1.1	Grobauslegung	153
	6.4.1.2	Detaillierte Auslegung	154
	6.4.2	Solarthermische Heizungsunterstützung	155
6.5	Ökonoı	mie	157
	6.5.1	Wann rechnet sie sich denn?	157
	6.5.2	Förderprogramme	159
6.6	Ökolog	zie	159
6.7	Solarth	ermiemärkte	160
6.8	Ausblic	ck und Entwicklungspotenziale	162
7		kraftwerke – noch mehr Kraft aus der Sonne	
7.1		ntration auf die Sonne	
7.2		Kraftwerke	
	7.2.1	Parabolrinnenkraftwerke	
	7.2.2	Solarturmkraftwerke	
	7.2.3	Dish-Stirling-Kraftwerke	
	7.2.4	Aufwindkraftwerke	
	7.2.5	Konzentrierende Photovoltaikkraftwerke	
	7.2.6	Solare Chemie	
7.3	•	g und Auslegung	
	7.3.1	Konzentrierende solarthermische Kraftwerke	
	7.3.2	Aufwindkraftwerke	
	7.3.3	Konzentrierende Photovoltaikkraftwerke	
7.4		mie	
7.5	_	rie	
7.6	Solarkr	aftwerksmärkte	181

7.7	7 Ausblick und Entwicklungspotenziale	
8	Windkraftwerke – luftiger Strom	185
8.1	Vom Winde verweht - woher der Wind kommt	186
8.2	Nutzung des Windes	189
8.3	Anlagen und Parks	193
	8.3.1 Windlader	193
	8.3.2 Netzgekoppelte Windkraftanlagen	195
	8.3.3 Windparks	198
	8.3.4 Offshore-Windparks	200
8.4	Planung und Auslegung	203
8.5	Ökonomie	205
8.6	Ökologie	208
8.7	Windkraftmärkte	210
8.8	Ausblick und Entwicklungspotenziale	211
9	Wasserkraftwerke – nasser Strom	213
9.1	Anzapfen des Wasserkreislaufs	
9.2	Wasserturbinen	
9.3	Wasserkraftwerke	
· .c	9.3.1 Laufwasserkraftwerke	
	9.3.2 Speicherwasserkraftwerke	
	9.3.3 Pumpspeicherkraftwerke	
	9.3.4 Gezeitenkraftwerke	
	9.3.5 Wellenkraftwerke	
	9.3.6 Meeresströmungskraftwerke	
9.4	Planung und Auslegung	
9.5	Ökonomie	
9.6	Ökologie	
9.7	Wasserkraftmärkte	
9.8	Ausblick und Entwicklungspotenziale	
10	Geothermie – tiefgründige Energie	233
10.1	Anzapfen der Erdwärme	
10.1	Geothermieheizwerke und Geothermiekraftwerke	
10.2	10.2.1 Geothermische Heizwerke	
	10.2.2 Geothermische Kraftwerke	
	10.2.3 Geothermische HDR-Kraftwerke	
10.3	Planung und Auslegung	
10.4	Ökonomie	
10.5	Ökologie	
10.6	Geothermiemärkte	
10.7	Ausblick und Entwicklungspotenziale	
11	Wärmepumpen – aus kalt wird heiß	
11.1	Wärmequellen für Niedertemperaturwärme	247

11.2	Funktionsprinzip von Wärmepumpen	250
	11.2.1 Kompressionswärmepumpen	250
	11.2.2 Absorptionswärmepumpen und Adsorptionswärmepumpen	251
11.3	Planung und Auslegung	253
11.4	Ökonomie	256
11.5	Ökologie	258
11.6	Wärmepumpenmärkte	
11.7	Ausblick und Entwicklungspotenziale	
12	Biomasse – Energie aus der Natur	262
12.1	Entstehung und Nutzung von Biomasse	263
12.2	Biomasseheizungen	266
	12.2.1 Brennstoff Holz	266
	12.2.2 Kamine und Kaminöfen	270
	12.2.3 Scheitholzkessel	271
	12.2.4 Holzpelletsheizungen	272
12.3	Biomasseheizwerke und Biomassekraftwerke	
12.4	Biotreibstoffe	
	12.4.1 Bioöl	
	12.4.2 Biodiesel	
	12.4.3 Bioethanol	
	12.4.4 BtL-Kraftstoffe	
	12.4.5 Biogas	
12.5	Planung und Auslegung	
12.5	12.5.1 Scheitholzkessel	
	12.5.2 Holzpelletsheizung	
12.6	Ökonomie	
12.7	Ökologie	
12.7	12.7.1 Feste Brennstoffe	
	12.7.1 Teste Bremstoffe	
12.8	Biomassemärkte	
12.9	Ausblick und Entwicklungspotenziale	291
13	Wasserstoffwirtschaft und Brennstoffzellen	
13.1	Energieträger Wasserstoff	
	13.1.1 Herstellung von Wasserstoff	
	13.1.2 Speicherung und Transport von Wasserstoff	
13.2	Hoffnungsträger Brennstoffzelle	
13.3	Ökonomie	
13.4	Ökologie	
13.5	Märkte, Ausblick und Entwicklungspotenziale	303
14	Sonnige Aussichten – Beispiele für eine nachhaltige Energieversc	
14.1	Klimaverträglich wohnen	
	14.1.1 Kohlendioxidneutrales Standardfertighaus	306
	14.1.2 Plusenergie-Solarhaus	307

	14.1.3	Plusenergiehaus-Siedlung	308
	14.1.4	Heizen nur mit der Sonne	309
	14.1.5	Null Heizkosten nach Sanierung	310
14.2	Klimav	verträglich arbeiten und produzieren	311
	14.2.1	Büros und Läden im Sonnenschiff	311
	14.2.2	Nullemissionsfabrik	312
	14.2.3	Kohlendioxidfreie Schwermaschinenfabrik	312
14.3	Klimav	verträglich Auto fahren	313
	14.3.1	Abgasfreie Elektropower	314
	14.3.2	Weltumrundung im Solarmobil	315
	14.3.3	In dreiunddreißig Stunden quer durch Australien	316
	14.3.4	Game over CO <sub>2</sub> !	317
14.4	Klimav	verträglich Schiff fahren und fliegen	318
	14.4.1	Moderne Segelschifffahrt	318
	14.4.2	Solarfähre am Bodensee	319
	14.4.3	Höhenweltrekord mit Solarflugzeug	320
	14.4.4	Mit dem Solarflugzeug um die Erde	321
	14.4.5	Fliegen für Solarküchen	322
14.5	Kohlen	ndioxidfreier Strom für die Insel	324
14.6	14.4.5 Fliegen für Solarküchen		325
Anha	ng		326
A.1			
A.2	Geogra	afische Koordinaten von Energieanlagen	327
A.3	Weiterführende Informationen im Internet		
Litera	atur		330
Regis	ster		333

# 2 Klima vor dem Kollaps?

Dass sich das Klima ändert, wissen wir eigentlich schon lange. Unzählige Eis- und Warmzeiten haben gezeigt, dass die Klimabedingungen auf der Erde ständigen Wechseln unterworfen sind. Für menschliche Zeithorizonte dauert ein Wechsel jedoch relativ lange. Etwa alle 100 000 Jahre kam es in der jüngeren Erdgeschichte zu Eiszeiten, die jeweils durch deutlich kürzere Warmzeiten unterbrochen waren. Unsere jetzige Warmzeit, das so genannte Holozän, begann vor etwa 11 700 Jahren. Da die letzten Warmzeiten im Schnitt nur rund 15 000 Jahren andauerten, müssten wir eigentlich unweigerlich auf die nächste Eiszeit zusteuern.

Die genauen Ursachen für den Wechsel zwischen Warm- und Eiszeiten lassen sich nur bedingt rekonstruieren. Natürliche Effekte wie Veränderungen der Sonnenaktivität, Änderungen der Erdbahngeometrie, Vulkanismus, Änderungen von Meeresströmungen sowie Verschiebung der Kontinentalplatten gelten als Hauptursachen von Klimaänderungen. Kommen mehrere Ursachen zusammen, sind auch recht abrupte Änderungen möglich. Das belegt die Klimageschichte der Erde. Insofern ist die in jüngster Zeit beobachtete Erderwärmung nichts Ungewöhnliches. Außergewöhnlich ist nur, dass vermutlich erstmals Lebewesen der Erde einen abrupten Klimawandel verursachen – nämlich wir Menschen.

### 2.1 Es ist warm geworden - Klimaveränderungen heute

#### 2.1.1 Langsam schmilzt das Eis

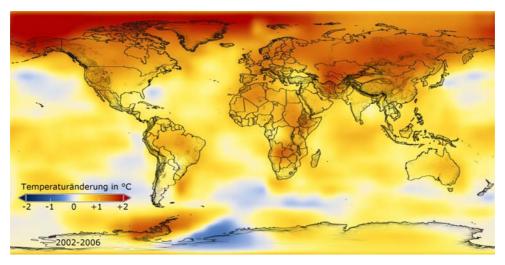
Die Klimabedingungen der Erde sind seit einigen Tausend Jahren relativ konstant. Darauf haben sich unsere Zivilisation, Siedlungsgebiete und landwirtschaftlichen Flächen eingestellt. Heute dicht besiedelte Gebiete waren in den letzten Eiszeiten durch meterhohe Eispanzer bedeckt und während der heißesten Perioden der Klimageschichte wären unsere Küstenstädte metertief im Meer versunken. Kommt es zu starken Änderungen der Klimabedingungen, werden sie zweifellos das Gesicht der Erde und unsere heutigen Lebensbe-

dingungen stärker verändern als dies selbst das dramatischste geschichtliche Ereignis der letzten Jahrtausende vermocht hat.



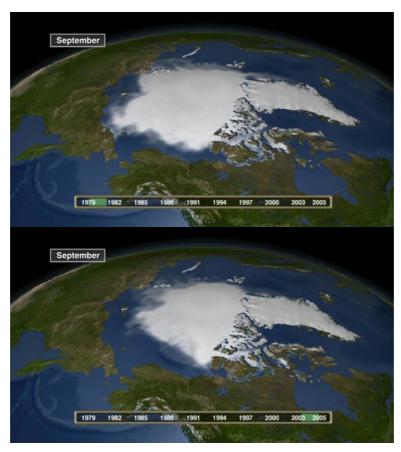
#### Beobachtete Klimaveränderungen [IPC07]

- Die globale Oberflächentemperatur ist zwischen den Jahren 1906 und 2005 um 0,74 Grad Celsius gestiegen.
- 11 der letzten 12 Jahre waren die wärmsten seit Beginn der Aufzeichnungen.
- Die Temperaturzunahme der letzten 50 Jahre ist doppelt so hoch wie die der letzten 100 Jahre. Die Erwärmung der Arktis erfolgte mehr als doppelt so schnell.
- Die Temperaturen der letzten 50 Jahre waren sehr wahrscheinlich höher als jemals zuvor in den vergangenen 1300 Jahren.
- Weltweit schrumpfen die Gletscher sowie die Eisschilde auf Grönland und der Antarktis.
- Der Meeresspiegel ist seit 1993 durchschnittlich um 3,1 Millimeter pro Jahr gestiegen, im 20. Jahrhundert insgesamt um 17 Zentimeter. Mehr als die Hälfte geht auf die thermische Ausdehnung der Meere zurück, etwa 25 Prozent auf Abschmelzen der Gebirgsgletscher und etwa 15 Prozent auf das Abschmelzen der arktischen Eisschilde.
- Die Häufigkeit von heftigen Niederschlägen hat zugenommen.
- Häufigkeit und Intensitäten von Dürren sind seit den 1970er-Jahren gestiegen.
- Die Häufigkeit von Temperaturextremen hat zugenommen.
- Die Intensität tropischer Wirbelstürme ist seit den 1970er-Jahren stärker geworden.



**Abbildung 2.1** Temperaturänderung der Jahre 2002 bis 2006 im Vergleich zum langjährigen Mittel. Quelle: NASA, http://svs.gsfc.nasa.gov

In den letzten hundert Jahren hat sich die mittlere Temperatur der Erde um gut 0,7 Grad Celsius erhöht. Auf den ersten Blick klingt dies nicht viel. Die Erwärmung auf der Erde erfolgt jedoch nicht in allen Gebieten gleichmäßig und ist auch nicht über das Jahr konstant. Liegen die Temperaturen von 10 Monaten im normalen Bereich, können zwei Monate folgen, die bereits um mehr als 4 Grad Celsius über dem Mittel liegen. In einigen Regionen der Erde ist die Temperaturzunahme bereits jetzt schon im Jahresmittel größer als 2 Grad Celsius (*Abbildung 2.1*).



**Abbildung 2.2** Arktische Eisbedeckung im September, gemittelt über die Jahre 1979 bis 1981 (oben) und die Jahre 2003 bis 2005 (unten). Quelle: NASA, http://svs.gsfc.nasa.gov

Als Folge der Erwärmung dehnt sich das Wasser der Meere aus. Durch die Zunahme der Temperaturen schmilzt auch mehr und mehr arktisches Eis und das ewige Eis der Gletscher ab. Dadurch erhöht sich der Meeresspiegel weiter.

Die Temperaturen in der Polarregion steigen sogar noch schneller als im Rest der Welt. Die Eisbedeckung der Arktis ist innerhalb von 20 Jahren um etwa 10 bis 15 Prozent zurückgegangen (Abbildung 2.2). Neben den Eismassen der Arktis schmelzen auch viele

Mitte der 1950er-Jahre begann das Zeitalter der Halbleitertechnik. Das in der Natur häufig vorkommende Halbleitermaterial (*vgl. Info S. 104*) Silizium wurde zum neuen Modematerial und im Jahr 1954 erblickte schließlich die erste Silizium-Solarzelle aus den amerikanischen Bell Laboratories das Sonnenlicht. Dies war die Basis für die erfolgreiche und kommerzielle Weiterentwicklung der Photovoltaik.

#### 5.1 Aufbau und Funktionsweise

#### 5.1.1 Elektronen, Löcher und Raumladungszonen

Die Funktionsweise einer Solarzelle ist relativ kompliziert, muss man doch für deren Verständnis in extreme Tiefen höherer Physik eintauchen. Ein kleines übertragenes Modell, das in Abbildung 5.1 dargestellt ist, soll hier helfen, das Prinzip der Solarzelle zu verstehen. Man stelle sich hierzu zwei waagerechte Ebenen vor. Die zweite Ebene liegt ein wenig höher als die erste. In der ersten Ebene befindet sich eine Vielzahl von Kuhlen, also kleinen Löchern, die randvoll mit Wasser gefüllt sind. Das Wasser kann sich hier nicht von selbst bewegen. Nun beginnt jemand, kleine Gummibälle auf die erste Ebene zu werfen. Trifft ein Ball in eine Kuhle, spritzt das Wasser nach oben und gelangt so auf die zweite Ebene. Hier befinden sich keine Kuhlen, die das Wasser aufhalten. Die zweite Ebene ist nun geneigt, sodass das Wasser abfließt und von selbst in eine Abflussrinne gelangt. Diese ist über ein Rohr mit der unteren Ebene verbunden, wobei das Wasser beim Durchfließen ein kleines Wasserrad mit einem Dynamo antreibt. Ist das Wasser an der unteren Ebene angelangt, füllt es wieder die Kuhlen auf. Mit neuen Gummibällen kann der Kreislauf nun von vorne beginnen.

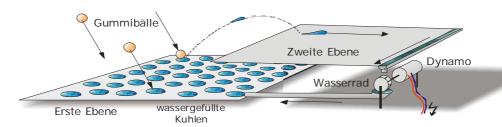


Abbildung 5.1 Modell zur Veranschaulichung der Vorgänge in einer Solarzelle

Mit einer Solarzelle hingegen wollen wir keinen Wasserkreislauf erzeugen, sondern elektrischen Strom zum Betrieb von Elektrogeräten generieren. Ein elektrischer Strom entsteht aus einem Fluss von negativen Ladungsträgern, den so genannten Elektronen. Diese entsprechen dem Wasser unseres einfachen Modells. Für die Solarzelle wird also ein Material benötigt, indem sich zwei Ebenen befinden: eine Ebene, in der Elektronen wie das Wasser

in den Kuhlen fest gebunden sind, und eine zweite Ebene, in der sich Elektronen frei bewegen können. Halbleiterwerkstoffe verfügen normalerweise genau über diese Eigenschaften. Lichtteilchen, die in der Physik Photonen genannt werden und den Gummibällen entsprechen, können hier Elektronen auf die zweite Ebene anheben.

#### Leiter, Nichtleiter und Halbleiter

Leiter wie Kupfer leiten elektrischen Strom immer verhältnismäßig gut, Nichtleiter wie verschiedene Kunststoffe so gut wie gar nicht. Halbleiter hingegen leiten – wie der Name schon andeutet – elektrischen Strom nur manchmal, zum Beispiel bei hohen Temperaturen, bei Anlegen einer elektrischen Spannung oder durch Bestrahlen mit Licht. Diese Effekte werden bei der Herstellung von elektronischen Schaltern wie Transistoren, Computerchips, speziellen Sensoren und auch Solarzellen genutzt.

Neben elementaren Halbleitern wie Silizium (Si) und Verbindungshalbleitern wie Galliumarsenid (GaAs), Cadmiumtellurid (CdTe) oder Kupferindiumdiselenid (CuInSe<sub>2</sub>) gibt es auch organische Halbleiter. Alle genannten Materialen werden in der Photovoltaik verwendet.

Für eine einwandfreie Funktion in unserem einfachen Modell ist die Neigung wichtig, da sich sonst das Wasser nicht von selbst in der Regenrinne sammelt. Auch bei Halbleitern muss die zweite Ebene über ein Gefälle verfügen, über das sich die Elektronen auf einer Seite sammeln. Im Gegensatz zu unserem einfachen Modell wird für das Sammeln nicht die Schwerkraft, sondern ein elektrisches Feld genutzt, das die negativ geladenen Elektronen auf eine Seite zieht. Um dieses Feld herzustellen, muss der Halbleiter dotiert werden. Hierzu wird eine Seite der Halbleiterscheibe mit Elementen wie Bor und die andere Seite anderen Elementen wie Phosphor gezielt verunreinigt. Da Bor und Phosphor selbst eine unterschiedliche Anzahl von Elektronen haben, erzeugen diese das notwendige Gefälle. Der Übergangsbereich heißt Raumladungszone. Hier entsteht ein elektrisches Feld, das Elektronen auf eine Seite zieht. Externe Kontakte sammeln sie dort. Über einen äußeren Stromkreis fließen sie zurück zur ersten Ebene. Dabei geben Sie elektrische Energie ab.

Abbildung 5.2 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer Siliziumsolarzelle. Die verschieden dotierten Seiten der Siliziumscheibe nennt man im Fachjargon n-dotiertes und p-dotiertes Silizium. Zwischen beiden Bereichen befindet sich die Grenzschicht mit der Raumladungszone. Licht in Form von Photonen trennt nun negative Ladungsteilchen (Elektronen) und positive Ladungsteilchen (Löcher) und sorgt dafür, dass sich die Elektronen in einer zweiten Ebene frei bewegen können. Im Gegensatz zum einfachen Modell sind Löcher ebenfalls beweglich. Durch die Raumladungszone werden Elektronen und Löcher getrennt. Dünne Frontkontakte sammeln die Elektronen auf der Vorderseite der Zelle.

Nicht jedes Lichtteilchen sorgt aber dafür, dass ein Elektron von einem Loch getrennt wird. Ist die Energie des Photons zu gering, fällt das Elektron in das Loch zurück. Ist die Energie des Photons hingegen zu groß, wird nur ein Teil genutzt, um das Elektron vom Loch zu trennen. Einige Photonen gehen auch ungenutzt durch die Solarzelle, andere werden von den Frontkontakten reflektiert.

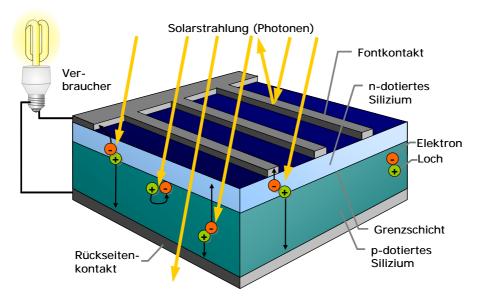


Abbildung 5.2 Aufbau und Vorgänge in einer Solarzelle [Qua07]

#### 5.1.2 Wirkungsgrad, Kennlinien und der MPP

Der Wirkungsgrad der Solarzelle beschreibt, welchen Anteil der solaren Strahlungsleistung die Zelle in elektrische Leistung umwandelt.



#### Solarzellenwirkungsgrad

$$\eta = \frac{P_{\text{el}}}{\Phi}$$

$$\left( Wirkungsgrad = \frac{abgegebene\ elektrische\ Leistung}{eintreffende\ solare\ Strahlungsleistung} \right)$$

Je höher der Wirkungsgrad ist, desto mehr elektrische Leistung pro Quadratmeter kann die Solarzelle erzeugen. Neben der Art der Materialien hat auch die Qualität bei der Herstellung einen entscheidenden Einfluss. Siliziumzellen erreichen heute in der Serienherstellung maximale Wirkungsgrade von über 20 Prozent. Im Labor wurden sogar schon knapp 25 Prozent erzielt (*Tabelle 5.1*).

Ein herkömmlicher Ottomotor erzielt übrigens auch keinen besseren Wirkungsgrad. Verglichen mit dem Wirkungsgrad von rund 5 Prozent der ersten Solarzelle aus dem Jahr 1954 ist die technologische Entwicklung extrem fortgeschritten. Werden einzelne Solarzellen zu Photovoltaikmodulen zusammengeschaltet, sinkt der Wirkungsgrad durch die notwendigen Zwischenräume zwischen den Zellen und den Modulrahmen etwas ab. Langfristig erhofft man sich durch andere Materialien weitere Kosteneinsparungen. Im Vergleich zu Silizium-

$$A_{\text{Kollektor}} \approx \frac{60 \text{ \%}}{30 \text{ \%}} \cdot \frac{Q_{\text{WW}}}{H_{\text{Solar}} \cdot f_{\text{Neigung}}}$$

Bei obigem Verbrauch soll die Kollektorgröße an Flachkollektoren für ein um ca.  $20^{\circ}$  nach Süd-Südwest ausgerichtetes und um  $30^{\circ}$  geneigtes Dach in Berlin berechnet werden. Die jährliche solare Bestrahlung beträgt dabei  $1000 \text{ kWh/(m}^2\text{ a)}$  und durch die Südausrichtung ergeben sich Neigungsgewinne von  $f_{\text{Neigung}} = 110 \% = 1,1$ . Damit berechnet sich die benötigte Fläche an Flachkollektoren zu

$$A_{\text{Kollektor}} \approx \frac{60 \%}{30 \%} \cdot \frac{2628 \text{ kWh}}{1000 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \cdot 1,1} = 4.8 \text{ m}^2.$$

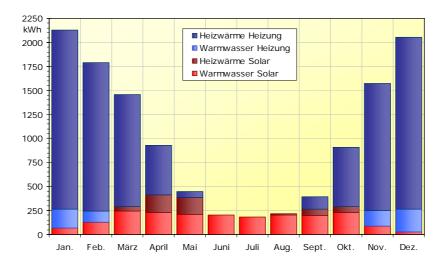
Die Ergebnisse hängen natürlich stark von der Qualität der Kollektoren ab und können deutlich variieren. Einige Online-Tools helfen ebenfalls bei der Anlagenauslegung (s. Webtipp). Eine noch bessere Detailplanung ist nur mit der Hilfe von ausgereiften Computerprogrammen möglich. Professionelle Fachfirmen sollten ebenfalls eine detaillierte Anlagenauslegung anbieten. Neben der Größe der Kollektoren und Speicher gehört hierzu auch die Auslegung anderer Komponenten wie Pumpen, Regelung oder Rohre.



#### 6.4.2 Solarthermische Heizungsunterstützung

Soll die solarthermische Anlage neben der Trinkwassererwärmung auch noch zur Heizungsunterstützung beitragen, ist eine größere Kollektorfläche nötig. Im Gegensatz zur solarthermischen Trinkwasserversorgung ist dafür eine optimale Gebäudedämmung sinnvoll, um einen größeren Teil des Wärmebedarfs durch die Sonne zu decken. Während der Warmwasserbedarf über das gesamte Jahr relativ konstant vorhanden ist, konzentriert sich der Heizwärmebedarf auf die Wintermonate. Im Winter ist aber der Ertrag von Solarkollektoren gering. Daher legt man ein solarthermisches System zur Heizungsunterstützung meist so aus, dass es neben dem Warmwasser nur in der Übergangszeit von März bis Oktober einen Teil des Heizwärmebedarfs decken kann. Im Winter liefert hingegen die herkömmliche Heizungsanlage im Wesentlichen den Wärmebedarf (Abbildung 6.20).

Mit der Größe der Kollektorfläche und des Speichers steigt auch der solare Deckungsgrad, also der durch die Sonne gedeckte Anteil des Wärmebedarfs. Damit reduziert sich auch der Anteil, den die herkömmliche Heizungsanlage erbringt. Handelt es sich um eine mit Öl oder Gas befeuerte fossile Anlage sinken auch mit zunehmender Größe der Solaranlage die Kohlendioxidemissionen. Eine sehr große Anlage produziert aber auch mehr Überschüsse, die sich nicht nutzen lassen. Darum sind in der Regel große Anlagen unwirtschaftlicher als kleinere. Insofern muss man sich bei der Auslegung überlegen, ob die Priorität auf einem möglichst großen Solaranteil oder einer möglichst guten Wirtschaftlichkeit liegt.



**Abbildung 6.20** Typischer Verlauf des Heizwärme- und des Warmwasserbedarfs in Deutschland und Anteile der Solaranlage und der herkömmlichen Heizung an der Bedarfsdeckung bei einem Altbau mit einem gesamten solaren Deckungsgrad von 20 %

Die folgenden zwei Auslegungsvarianten ermöglichen eine Grobauslegung.

Variante 1: Kleine Anlage für gute Wirtschaftlichkeit

- Kollektorfläche bei Flachkollektoren: 0,8 m² pro 10 m² Wohnfläche
- Kollektorfläche bei Vakuum-Röhrenkollektoren: 0,6 m² pro 10 m² Wohnfläche
- Speichergröße: mindestens 50 Liter pro m² Kollektorfläche

#### Variante 2: Mittelgroße Anlage für höheren solaren Deckungsgrad

- Kollektorfläche bei Flachkollektoren: 1,6 m² pro 10 m² Wohnfläche
- Kollektorfläche bei Vakuum-Röhrenkollektoren: 1,2 m² pro 10 m² Wohnfläche
- Speichergröße: 100 Liter pro m² Kollektorfläche

Eine optimale Auslegung berücksichtigt natürlich auch den tatsächlichen Heizwärmebedarf. Der unterscheidet sich bei einem Altbau erheblich von einem energiesparenden 3-Liter-Haus. Tabelle 6.1 zeigt Simulationsergebnisse für optimale Anlagen, die nach der beschriebenen Grobauslegung dimensioniert wurden.

Obwohl bei der mittelgroßen Anlage der Kollektor doppelt und der Speicher viermal so groß wie bei der kleinen Anlage ist, verdoppelt sich keineswegs der solare Deckungsgrad. Einen wesentlich größeren Einfluss auf die solare Deckungsrate als die Anlagengröße hat der Dämmstandard des Gebäudes. Wer also mit einem möglichst hohen solaren Deckungs-

grad einen großen Beitrag zum Klimaschutz leisten möchte, sollte unbedingt über optimale Dämmmaßnahmen nachdenken.

Tabelle 6.1 Solare Deckung

	Altbau	Standard- Neubau	Dreiliter- haus	Passiv- haus
Wärmebedarf Warmwasser in kWh	2 700	2 700	2 700	2 700
Heizwärmebedarf in kWh	25 000	11 500	3 900	1 950
Solare Deckung Variante 1 (kleine Anlage)	13 %	22 %	40 %	51 %
Solare Deckung Variante 2 (mittelgroße Anlage)	22 %	36 %	57 %	68 %

Annahmen: Standort Berlin, Ausrichtung 30° Süd unverschattet, 130 m² Wohnfläche, optimaler Flachkollektor mit Kombispeicher



#### Von der Idee der Solarthermieanlage auf dem Dach zur eigenen Anlage

- Ausrichtung und Neigung des Daches bestimmen. Ist das Dach von der Ausrichtung und Neigung geeignet? Empfehlung: mindestens 95 Prozent nach Abbildung 5.15 Ist das Dach nicht zu stark verschattet?
- Entscheiden, ob nur Trinkwasser erwärmt werden soll oder ob auch eine solare Heizungsunterstützung geplant ist.
- Grobauslegung per Faustformel durchführen.
- Eventuell Detailauslegung per Hand oder mit Simulationstools durchführen.
- Bei denkmalgeschützten Gebäuden denkmalschutzrechtliche Erlaubnis einholen.
- Angebote einholen.
- Auslegung von Fachfirma präzisieren lassen.
- Zuschüsse oder zinsgünstige Kredite beantragen (s. nächster Abschnitt).
- Auftrag erteilen.

#### 6.5 Ökonomie

#### 6.5.1 Wann rechnet sie sich denn?

Für Flachkollektoren sind je nach Ausführung zwischen knapp 200 und 350 Euro pro Quadratmeter zu veranschlagen, für Vakuum-Röhrenkollektoren zwischen 400 und 600 Euro pro Quadratmeter. Ein 300-Liter-Wärmespeicher kostet 700 bis 1100 Euro. Der Einbau einer solarthermischen Anlage ist besonders kostengünstig, wenn es sich um einen Neubau