

HANSER



Leseprobe

zu

„Erneuerbare Energien und Klimaschutz“

von Volker Quaschning

Print-ISBN: 978-3-446-46293-9

E-Book-ISBN: 978-3-446-46415-5

Weitere Informationen und Bestellungen unter
<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-46293-9>
sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München



Vorwort zur 1. Auflage

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

Vorwort zur 5. Auflage

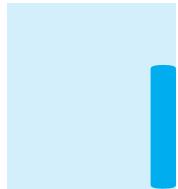
Die sehr guten Verkaufszahlen und die positive Resonanz zu diesem Fachbuch haben gezeigt, dass die Thematik und die Art der Darstellung auf ein breites Interesse stoßen. Trotz sorgfältigster Prüfung lassen sich kleinere Fehler und Unstimmigkeiten nicht vermeiden. Ein besonderer Dank gilt daher allen Leserinnen und Lesern, die mit Hinweisen zur Beseitigung von Fehlern beigetragen haben. Die fünfte Auflage wurde umfassend aktualisiert. Sie enthält alle aktuellen Daten zu den erneuerbaren Energien und wurde um neueste Trends erweitert. Ein eigener Abschnitt erläutert, welche Schritte nötig wären, um das Pariser Klimaschutzabkommen einzuhalten und so die Lebengrundlagen der künftigen Generationen zu bewahren. Es bleibt zu hoffen, dass dieses Buch damit einen Beitrag leisten kann, die Energiewende auf das nötige Tempo zu steigern.

Berlin, im Herbst 2019

Prof. Dr. Volker Quaschning

Hochschule für Technik und Wirtschaft HTW Berlin

www.volker-quaschning.de



Inhalt

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Unser Hunger nach Energie..... | 13 |
| 1.1 | Energieversorgung – 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 | 22 |
| 1.1.5 | Das Jahrhundert der fossilen Energieträger..... | 26 |
| 1.1.6 | Das erneuerbare Jahrhundert | 27 |
| 1.2 | Energiebedarf – wer was wo wie viel verbraucht..... | 28 |
| 1.3 | Die SoDa-Energie | 32 |
| 1.4 | Energievorräte – Reichtum auf Zeit | 35 |
| 1.4.1 | Nicht-konventionelle Vorräte – Verlängerung des Ölzeitalters..... | 36 |
| 1.4.2 | Ende in Sicht | 38 |
| 1.4.3 | Das Ende der Spaltung | 39 |
| 1.5 | Hohe Energiepreise – Schlüssel für den Klimaschutz..... | 40 |
| 2 | Klima vor dem Kollaps | 43 |
| 2.1 | Es ist warm geworden – Klimaveränderungen heute | 43 |
| 2.1.1 | Immer schneller schmilzt das Eis | 43 |
| 2.1.2 | Naturkatastrophen kommen häufiger..... | 47 |
| 2.2 | Schuldiger gesucht – Gründe für den Klimawandel..... | 50 |
| 2.2.1 | Der Treibhauseffekt..... | 50 |
| 2.2.2 | Hauptverdächtiger Kohlendioxid..... | 51 |
| 2.2.3 | Andere Übeltäter | 56 |
| 2.3 | Aussichten und Empfehlungen – was kommt morgen?..... | 58 |
| 2.3.1 | Wird es in Europa bitterkalt?..... | 61 |
| 2.3.2 | Empfehlungen für einen wirksamen Klimaschutz | 63 |
| 2.4 | Schwere Geburt – Politik und Klimawandel | 66 |
| 2.4.1 | Deutsche Klimapolitik..... | 66 |
| 2.4.2 | Klimapolitik international..... | 67 |
| 2.5 | Selbsthilfe zum Klimaschutz..... | 69 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 3 | Vom Energieverschwenden zum Energie- und Kohlendioxidsparen..... | 71 |
| 3.1 | Wenig effizient – Energiever(sch)wendung heute | 71 |
| 3.2 | Privater Energiebedarf – zu Hause leicht gespart..... | 75 |
| 3.2.1 | Private Elektrizität – viel Geld verschwendet..... | 75 |
| 3.2.2 | Wärme – fast ohne heizen durch den Winter..... | 78 |
| 3.2.3 | Transport – mit weniger Energie weiterkommen | 83 |
| 3.3 | Industrie und Co – schuld sind doch nur die anderen..... | 86 |
| 3.4 | Die eigene Kohlendioxidbilanz..... | 87 |
| 3.4.1 | Direkt selbst verursachte Emissionen..... | 87 |
| 3.4.2 | Indirekt verursachte Emissionen | 89 |
| 3.4.3 | Gesamtemissionen..... | 91 |
| 3.5 | Ökologischer Ablashandel..... | 92 |
| 4 | Die Energiewende – der Weg in eine bessere Zukunft?..... | 96 |
| 4.1 | Kohle- und Kernkraftwerke – Krücke statt Brücke..... | 97 |
| 4.1.1 | Energie- und Automobilkonzerne – aufs falsche Pferd gesetzt | 97 |
| 4.1.2 | Braunkohle – Klimakiller made in Germany..... | 100 |
| 4.1.3 | Kohlendioxidsequestrierung – aus dem Auge aus dem Sinn | 102 |
| 4.1.4 | Atomkraft – Comeback strahlend gescheitert..... | 104 |
| 4.2 | Effizienz und KWK – ein gutes Doppel für den Anfang | 106 |
| 4.2.1 | Kraft-Wärme-Kopplung – Brennstoff doppelt genutzt..... | 106 |
| 4.2.2 | Energiesparen – mit weniger mehr erreichen | 107 |
| 4.3 | Regenerative Energiequellen – Angebot ohne Ende | 109 |
| 4.4 | Deutschland wird erneuerbar | 110 |
| 4.4.1 | Auf alle Sektoren kommt es an | 111 |
| 4.4.2 | Energiewende im Wärmesektor | 112 |
| 4.4.3 | Energiewende im Verkehrssektor..... | 115 |
| 4.4.4 | Energiewende im Elektrizitätssektor | 118 |
| 4.4.5 | Sichere Versorgung mit regenerativen Energien | 120 |
| 4.4.6 | Dezentral statt zentral – weniger Leitungen für das Land | 123 |
| 4.5 | Gar nicht so teuer – die Mär der unbezahlbaren Kosten | 125 |
| 4.6 | Energierevolution statt laue Energiewende | 127 |
| 4.6.1 | Deutsche Energiepolitik – im Schatten der Konzerne | 127 |
| 4.6.2 | Energiewende in Bürgerhand – eine Revolution steht ins Haus | 128 |
| 5 | Photovoltaik – Strom aus Sand | 130 |
| 5.1 | Aufbau und Funktionsweise..... | 131 |
| 5.1.1 | Elektronen, Löcher und Raumladungszonen | 131 |
| 5.1.2 | Wirkungsgrad, Kennlinien und der MPP..... | 133 |
| 5.2 | Herstellung von Solarzellen – vom Sand zur Zelle | 136 |
| 5.2.1 | Siliziumsolarzellen – Strom aus Sand | 136 |
| 5.2.2 | Von der Zelle zum Modul | 138 |
| 5.2.3 | Dünnschichtsolarzellen | 139 |
| 5.3 | Photovoltaikanlagen – Netze und Inseln | 140 |
| 5.3.1 | Sonneninseln | 140 |
| 5.3.2 | Sonne am Netz | 143 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 5.3.3 | Mehr solare Unabhängigkeit | 147 |
| 5.4 | Planung und Auslegung | 150 |
| 5.4.1 | Geplante Inseln..... | 150 |
| 5.4.2 | Geplant am Netz..... | 152 |
| 5.4.3 | Geplante Autonomie..... | 156 |
| 5.5 | Ökonomie..... | 158 |
| 5.5.1 | Was kostet sie denn? | 159 |
| 5.5.2 | Förderprogramme | 160 |
| 5.5.3 | Es geht auch ohne Mehrwertsteuer..... | 162 |
| 5.6 | Ökologie..... | 163 |
| 5.7 | Photovoltaikmärkte | 164 |
| 5.8 | Ausblick und Entwicklungspotenziale | 166 |
| 6 | Solarthermieanlagen – mollig warm mit Sonnenlicht..... | 168 |
| 6.1 | Aufbau und Funktionsweise..... | 170 |
| 6.2 | Solarkollektoren – Sonnensammler..... | 172 |
| 6.2.1 | Schwimmbadabsorber | 172 |
| 6.2.2 | Flachkollektoren..... | 173 |
| 6.2.3 | Luftkollektoren..... | 174 |
| 6.2.4 | Vakuum-Röhrenkollektor..... | 175 |
| 6.3 | Solarthermische Anlagen | 177 |
| 6.3.1 | Warmes Wasser von der Sonne | 177 |
| 6.3.1.1 | Schwerkraftsysteme..... | 178 |
| 6.3.1.2 | Systeme mit Zwangsumlauf | 179 |
| 6.3.2 | Heizen mit der Sonne | 181 |
| 6.3.3 | Solare Siedlungen..... | 183 |
| 6.3.4 | Kühlen mit der Sonne..... | 184 |
| 6.3.5 | Schwimmen mit der Sonne..... | 185 |
| 6.3.6 | Kochen mit der Sonne | 186 |
| 6.4 | Planung und Auslegung | 187 |
| 6.4.1 | Solarthermische Trinkwassererwärmung..... | 188 |
| 6.4.1.1 | Grobauslegung..... | 188 |
| 6.4.1.2 | Detaillierte Auslegung..... | 189 |
| 6.4.2 | Solarthermische Heizungsunterstützung..... | 190 |
| 6.5 | Ökonomie..... | 193 |
| 6.5.1 | Wann rechnet sie sich denn? | 193 |
| 6.5.2 | Förderprogramme | 194 |
| 6.6 | Ökologie..... | 194 |
| 6.7 | Solarthermiemärkte | 195 |
| 6.8 | Ausblick und Entwicklungspotenziale | 197 |
| 7 | Solarkraftwerke – noch mehr Kraft aus der Sonne..... | 199 |
| 7.1 | Konzentration auf die Sonne | 200 |
| 7.2 | Solare Kraftwerke | 202 |
| 7.2.1 | Parabolrinnenkraftwerke | 202 |
| 7.2.2 | Solarturmkraftwerke..... | 206 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 7.2.3 | Dish-Stirling-Kraftwerke | 208 |
| 7.2.4 | Aufwindkraftwerke | 209 |
| 7.2.5 | Konzentrierende Photovoltaikkraftwerke..... | 210 |
| 7.2.6 | Solare Chemie | 211 |
| 7.3 | Planung und Auslegung | 212 |
| 7.3.1 | Konzentrierende solarthermische Kraftwerke | 213 |
| 7.3.2 | Aufwindkraftwerke | 214 |
| 7.3.3 | Konzentrierende Photovoltaikkraftwerke..... | 214 |
| 7.4 | Ökonomie | 215 |
| 7.5 | Ökologie | 216 |
| 7.6 | Solarkraftwerksmärkte | 217 |
| 7.7 | Ausblick und Entwicklungspotenziale..... | 218 |
| 8 | Windkraftwerke – luftiger Strom..... | 221 |
| 8.1 | Vom Winde verweht – woher der Wind kommt | 222 |
| 8.2 | Nutzung des Windes | 225 |
| 8.3 | Anlagen und Parks | 229 |
| 8.3.1 | Windlader..... | 229 |
| 8.3.2 | Große netzgekoppelte Windkraftanlagen | 231 |
| 8.3.3 | Kleinwindkraftanlagen | 234 |
| 8.3.4 | Windparks | 236 |
| 8.3.5 | Offshore-Windparks..... | 237 |
| 8.4 | Planung und Auslegung | 241 |
| 8.5 | Ökonomie | 243 |
| 8.6 | Ökologie | 246 |
| 8.7 | Windkraftmärkte | 247 |
| 8.8 | Ausblick und Entwicklungspotenziale..... | 249 |
| 9 | Wasserkraftwerke – nasser Strom | 251 |
| 9.1 | Anzapfen des Wasserkreislaufs..... | 252 |
| 9.2 | Wasserturbinen | 254 |
| 9.3 | Wasserkraftwerke | 257 |
| 9.3.1 | Laufwasserkraftwerke | 257 |
| 9.3.2 | Speicherwasserkraftwerke..... | 259 |
| 9.3.3 | Pumpspeicherkraftwerke | 260 |
| 9.3.4 | Gezeitenkraftwerke | 262 |
| 9.3.5 | Wellenkraftwerke | 262 |
| 9.3.6 | Meeresströmungskraftwerke | 263 |
| 9.4 | Planung und Auslegung | 264 |
| 9.5 | Ökonomie | 266 |
| 9.6 | Ökologie | 267 |
| 9.7 | Wasserkraftmärkte | 268 |
| 9.8 | Ausblick und Entwicklungspotenziale..... | 270 |
| 10 | Geothermie – tiefgründige Energie | 271 |
| 10.1 | Anzapfen der Erdwärme | 272 |
| 10.2 | Geothermieheizwerke und Geothermiekraftwerke..... | 276 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 10.2.1 | Geothermische Heizwerke..... | 276 |
| 10.2.2 | Geothermische Kraftwerke..... | 277 |
| 10.2.3 | Geothermische HDR-Kraftwerke | 279 |
| 10.3 | Planung und Auslegung | 280 |
| 10.4 | Ökonomie..... | 281 |
| 10.5 | Ökologie..... | 282 |
| 10.6 | Geothermiemärkte..... | 283 |
| 10.7 | Ausblick und Entwicklungspotenziale | 284 |
| 11 | Wärmepumpen – aus kalt wird heiß | 285 |
| 11.1 | Wärmequellen für Niedertemperaturwärme | 285 |
| 11.2 | Funktionsprinzip von Wärmepumpen | 288 |
| 11.2.1 | Kompressionswärmepumpen..... | 288 |
| 11.2.2 | Absorptionswärmepumpen und Adsorptionswärmepumpen | 290 |
| 11.3 | Planung und Auslegung | 291 |
| 11.4 | Ökonomie..... | 294 |
| 11.5 | Ökologie..... | 296 |
| 11.6 | Wärmepumpenmärkte | 298 |
| 11.7 | Ausblick und Entwicklungspotenziale | 299 |
| 12 | Biomasse – Energie aus der Natur..... | 300 |
| 12.1 | Entstehung und Nutzung von Biomasse..... | 301 |
| 12.2 | Biomasseheizungen..... | 304 |
| 12.2.1 | Brennstoff Holz | 304 |
| 12.2.2 | Kamine und Kaminöfen | 308 |
| 12.2.3 | Scheitholzkessel | 309 |
| 12.2.4 | Holzpelletheizungen | 310 |
| 12.3 | Biomasseheizwerke und Biomassekraftwerke | 312 |
| 12.4 | Biotreibstoffe | 314 |
| 12.4.1 | Bioöl..... | 315 |
| 12.4.2 | Biodiesel..... | 315 |
| 12.4.3 | Bioethanol | 316 |
| 12.4.4 | BtL-Kraftstoffe..... | 318 |
| 12.4.5 | Biogas..... | 319 |
| 12.5 | Planung und Auslegung | 320 |
| 12.5.1 | Scheitholzkessel | 320 |
| 12.5.2 | Holzpelletheizung | 321 |
| 12.6 | Ökonomie..... | 323 |
| 12.7 | Ökologie..... | 325 |
| 12.7.1 | Feste Brennstoffe..... | 325 |
| 12.7.2 | Biotreibstoffe..... | 327 |
| 12.8 | Biomassemärkte | 328 |
| 12.9 | Ausblick und Entwicklungspotenziale | 330 |
| 13 | Erneuerbare Gase und Brennstoffzellen | 331 |
| 13.1 | Energieträger Wasserstoff..... | 333 |
| 13.2 | Methanisierung..... | 336 |

| | | |
|------------------------|--|------------|
| 13.3 | Transport und Speicherung von EE-Gasen | 337 |
| 13.3.1 | Transport und Speicherung von Wasserstoff..... | 337 |
| 13.3.2 | Transport und Speicherung von erneuerbarem Methan..... | 338 |
| 13.4 | Hoffnungsträger Brennstoffzelle..... | 341 |
| 13.5 | Ökonomie | 344 |
| 13.6 | Ökologie | 345 |
| 13.7 | Märkte, Ausblick und Entwicklungspotenziale..... | 346 |
| 14 | Sonnige Aussichten – Beispiele für eine nachhaltige Energieversorgung ... | 348 |
| 14.1 | Klimaverträglich wohnen..... | 348 |
| 14.1.1 | Kohlendioxidneutrales Standardfertighaus..... | 349 |
| 14.1.2 | Plusenergie-Solarhaus | 350 |
| 14.1.3 | Plusenergiehaus-Siedlung | 351 |
| 14.1.4 | Heizen nur mit der Sonne..... | 352 |
| 14.1.5 | Null Heizkosten nach Sanierung | 353 |
| 14.2 | Klimaverträglich arbeiten und produzieren..... | 354 |
| 14.2.1 | Büros und Läden im Sonnenschiff | 354 |
| 14.2.2 | Nullemissionsfabrik | 355 |
| 14.2.3 | Kohlendioxidfreie Schwermaschinenfabrik | 356 |
| 14.2.4 | Plusenergie-Firmenzentrale..... | 357 |
| 14.3 | Klimaverträglich Auto fahren | 358 |
| 14.3.1 | Weltumrundung im Solarmobil..... | 358 |
| 14.3.2 | In dreunddreißig Stunden quer durch Australien..... | 359 |
| 14.3.3 | Abgasfrei ausgeliefert | 360 |
| 14.3.4 | Elektroautos für Alle | 361 |
| 14.4 | Klimaverträglich Schiff fahren und fliegen..... | 363 |
| 14.4.1 | Moderne Segelschifffahrt..... | 363 |
| 14.4.2 | Solarfähre am Bodensee | 364 |
| 14.4.3 | Höhenweltrekord mit Solarflugzeug | 365 |
| 14.4.4 | Mit dem Solarflugzeug um die Erde..... | 366 |
| 14.4.5 | Fliegen für Solarküchen | 367 |
| 14.5 | Alles wird erneuerbar..... | 368 |
| 14.5.1 | Ein Dorf wird unabhängig | 368 |
| 14.5.2 | Hybridkraftwerk für die sichere regenerative Versorgung | 370 |
| 14.6 | Happy End | 371 |
| Anhang..... | 379 | |
| A.1 | Energieeinheiten und Vorsatzzeichen | 379 |
| A.2 | Geografische Koordinaten von Energieanlagen..... | 380 |
| A.3 | Weiterführende Informationen im Internet | 383 |
| Literatur | 384 | |
| Register..... | 388 | |

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 sogenannte 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 Immer schneller schmilzt das Eis

Nach der letzten Eiszeit haben sich die weltweiten Temperaturen um rund 3,5 Grad Celsius erhöht. Durch die Erwärmung und die abtauen Eismassen sind die Meeresspiegel um über 120 Meter angestiegen. Heute dicht besiedelte Gebiete waren während der letzten Eiszeit durch meterhohe Eispanzer bedeckt und ehemals fruchtbare Landschaften sind seitdem im Meer versunken. Über die letzten 7000 Jahre waren die Klimabedingungen auf der Erde allerdings außerordentlich konstant. Die Meeresspiegel haben sich so gut wie gar nicht und die Temperaturen nur um wenige Zehntel Grad Celsius verändert. Diese Klimastabilität

war eine der wesentlichen Voraussetzungen dafür, dass sich die Menschheit weiterentwickeln konnte. Unsere Zivilisation mit ihren Siedlungsgebieten und landwirtschaftlichen Flächen hat sich auf die stabilen Bedingungen eingestellt. Zerstören wir diese Stabilität, wird das enorme Auswirkungen auf das Leben haben, wie wir es heute kennen.

Ein Blick auf die Entwicklung seit der letzten Eiszeit ist auch hilfreich, wenn es um die Einschätzung künftiger Temperaturveränderungen geht. *Abbildung 2.1* zeigt, dass bereits relativ kleine Temperaturänderungen große Auswirkungen haben können. Eine Erwärmung von 1 Grad Celsius klingt für Viele erst einmal nicht sehr dramatisch. Setzt man das in Relation zu dem Temperaturanstieg seit der letzten Eiszeit, ist bereits dieser Wert mehr als bedenklich.

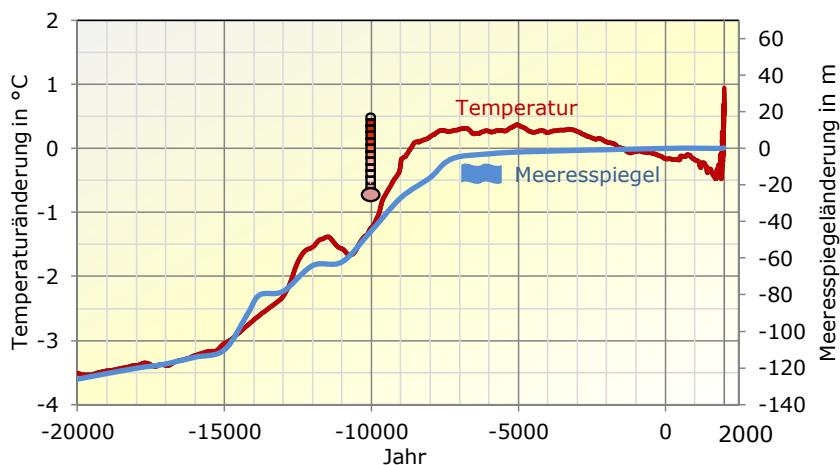


Abbildung 2.1 Temperatur- und Meeresspiegeländerung seit 20 000 v. Chr. bis 2018

Daten: [NASA19, Mar13, Sha12, Fle98], Zeitraum 1951 bis 1980 entspricht null

Durch den Einfluss der Menschen ist die Temperatur in den letzten 100 Jahren bereits um rund 1 Grad Celsius angestiegen und der Anstieg beschleunigt sich immer mehr. Man braucht kein Klimaexperte zu sein, um zu erkennen, dass der jüngste Anstieg keine normale Entwicklung sein kann. Vor allem das vergleichsweise hohe Tempo des Temperaturanstiegs bereitet Klimaexperten Sorgen. Eine natürliche Erklärung gibt es für diesen extremen Anstieg nicht.

Kommt es zu weiteren starken Änderungen der Klimabedingungen, werden sie zweifellos das Gesicht der Erde und unsere heutigen Lebensbedingungen stärker verändern als dies selbst das dramatischste geschichtliche Ereignis der letzten Jahrtausende vermocht hat. Experten halten darum eine Erwärmung oberhalb von 1,5 bis 2 Grad Celsius für nicht vertretbar. Die Bekämpfung des vom Menschen gemachten Treibhauseffekts und der damit verbundenen Erwärmung ist damit vermutlich heute die mit Abstand wichtigste Aufgabe zum Erhalt der Lebensgrundlagen künftiger Generationen.



Beobachtete Klimaveränderungen [IPCC07, EEA10, NOAA13]

- Die globale Oberflächentemperatur lag im Jahr 2016 bereits 0,98 Grad Celsius über dem Mittel von 1951 bis 1980.
- Die 2000er-Jahre waren die wärmste Dekade seit Beginn der Temperaturmessungen.
- 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 höher als jemals zuvor in den vergangenen 1300 Jahren.
- Weltweit schrumpfen die Gletscher sowie die Eisschilde auf Grönland und der Antarktis. Die Alpengletscher haben zwischen 1850 und 2010 bereits zwei Drittel ihres Volumens verloren.
- Die sommerliche arktische Meereisbedeckung ist von 7,5 Millionen Quadratkilometern im Jahr 1982 auf 3,5 Millionen Quadratkilometer im Jahr 2012 zurückgegangen.
- 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 Intensität 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.

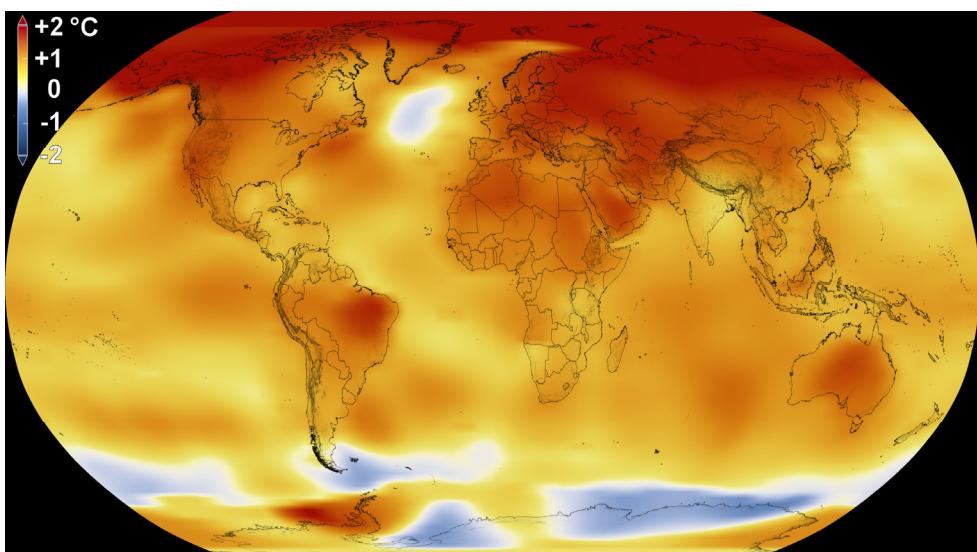


Abbildung 2.2 Temperaturänderung der Periode 2012-16 im Vergleich zum Mittelwert der Jahre 1951 bis 1980 (Quelle: NASA/Goddard Space Flight Center Scientific Visualization Studio, <http://svs.gsfc.nasa.gov>)

Die globale Erwärmung erfolgt nicht auf allen Teilen der Erde gleichmäßig. Vor allem im Bereich der Arktis hat die Temperaturänderung stellenweise schon 2 Grad Celsius überschritten (*Abbildung 2.2*). Generell erwärmt auch das Land schneller als die Ozeane. Bei einer durchschnittlichen Erwärmung von mehr als 4 Grad Celsius könnten sich einige Gebiete auf dem Festland zu regelrechten Todeszonen entwickeln, in denen der Mensch wegen der enormen Hitze ohne technische Hilfsmittel nicht mehr lange überleben könnte.

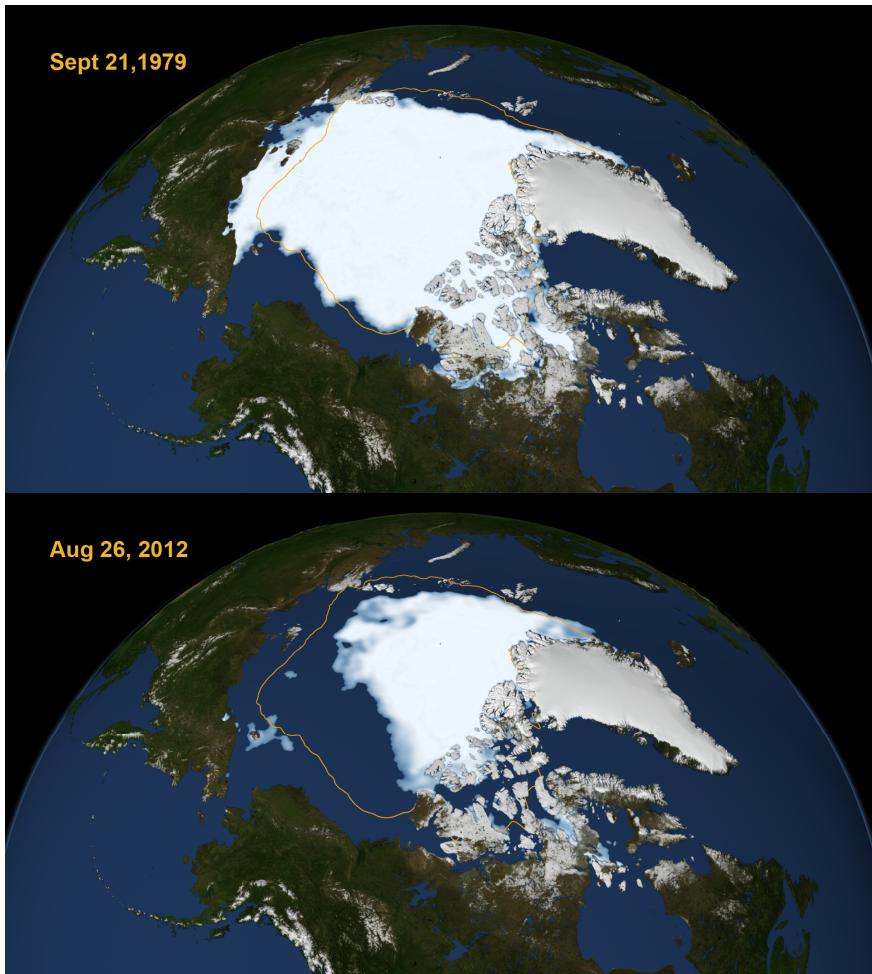


Abbildung 2.3 Sommerliche arktische Eisbedeckung für das Jahr 1979 (oben) und das Jahr 2012 (unten), Quelle: NASA, <http://svs.gsfc.nasa.gov>

Als Folge der Erwärmung dehnt sich das Wasser der Meere aus. Durch die Zunahme der Temperaturen schmelzen auch mehr und mehr arktisches Eis und das ewige Eis der Gletscher ab. Die Eisbedeckung des Meers in der Arktis ist innerhalb von 30 Jahren um über 50 Prozent zurückgegangen (*Abbildung 2.3*). Neben den Eismassen der Arktis schmelzen

auch viele Gletscher rasend schnell ab. Der größte Gletscher der Welt, der Bering-Gletscher in der Arktis Kanadas, ist während des letzten Jahrhunderts um mehr als 10 Kilometer geschrumpft. Von den Gebirgsgletschern in den Ostalpen ist bereits heute nur noch weniger als die Hälfte der Masse aus dem Jahr 1850 übrig.

Bislang sind die Meeresspiegel in den letzten 100 Jahren lediglich um rund 20 Zentimeter angestiegen. Sollte künftig das Festlandeis auf Grönland oder der Antarktis spürbar abschmelzen dürfte sich der Anstieg der Meeresspiegel aber spürbar beschleunigen.

2.1.2 Naturkatastrophen kommen häufiger

Mit den globalen Temperaturen nehmen auch die Wetterextreme zu. Größere Temperaturunterschiede verursachen heftigere Stürme, stärkere Regenfälle sowie häufigere Hochwasser und Überschwemmungen.

Bereits heute sind klima- und wetterbedingte Ereignisse die Hauptursache für Vertreibungen (*Abbildung 2.4*). Im Jahr 2017 mussten 16,1 Millionen Menschen weltweit vor Stürmen, Überschwemmungen, Dürren, Extremtemperaturen und Waldbränden fliehen. Zwischen 2008 und 2017 waren es sogar insgesamt 212 Millionen [iDMC19]. Ein Großteil der Menschen wird derzeit in Asien, Lateinamerika und der Karibik vertrieben. Darum werden diese Fluchtbewegungen in Europa momentan bestenfalls über die Nachrichten registriert. Bei steigenden Klimawandelfolgen dürfte aber auch Europa kaum vor diesen Bewegungen verschont bleiben. Steigen die Meeresspiegel durch die globale Erwärmung mittelfristig lediglich um einen Meter an, verlieren bereits rund 100 Millionen Menschen dauerhaft ihre Heimat.



Abbildung 2.4 Anzahl der weltweit Vertriebenen durch klima- und wetterbedingte Naturkatastrophen wie Stürme und Überschwemmungen (Daten: iDMC [iDMC19])



Beispiele großer Naturkatastrophen

- Winter 1990: Die Orkane Daria, Herta, Vivian und Wiebke töten 272 Menschen in Europa und richten Schäden von 12,8 Milliarden Euro an.
- 29.04.1991: Eine Sturmflut als Folge des tropischen Zyklons Gorky erfasst Bangladesch. 138 000 Menschen sterben. Die materiellen Schäden sind mit 3 Milliarden Euro in dem armen Land vergleichsweise gering.
- 26.12.1999: Orkan Lothar verwüstet große Gebiete in Europa. 110 Menschen sterben. Die Schäden betragen 11,5 Milliarden Euro.
- August 2002: Ungewöhnlich starke Regenfälle mit bis zu 400 Litern pro Quadratmeter sorgen für heftige Überschwemmungen in Deutschland und einigen Nachbarländern. In Europa verlieren 230 Menschen ihr Leben und es gibt Schäden von 18,5 Milliarden Euro.
- August 2003: Die größte Hitzewelle in Europa seit Beginn der Klimaaufzeichnungen fordert 70 000 Menschenleben und verursacht Schäden in der Höhe von 13 Milliarden Euro.
- August 2005: Hurrikan Katrina wütet in den USA und zerstört die Stadt New Orleans. 1322 Menschen sterben. Der bislang teuerste Sturm aller Zeiten verursacht Schäden von 125 Milliarden US-Dollar (rund 95 Milliarden Euro).
- 18. Januar 2007: Der Orkan Kyrill fegt über Europa hinweg. Die Deutsche Bahn stellte erstmals in der Geschichte den kompletten Zugverkehr in Deutschland ein.
- Oktober 2010: Eine ungewöhnliche Dürre in Ostafrika versuracht dramatische Ernteausfälle. Rund 260 000 Menschen verhungern.
- Oktober 2012: Hurrikan Sandy verwüstet Teile der Karibik sowie der US-Ostküste und trifft auch ungewöhnlich weit nördlich New York hart. Insgesamt sterben 253 Menschen. Die Schäden betragen 66 Milliarden US-Dollar (rund 50 Milliarden Euro).
- Juni 2013: Elf Jahre nach der Jahrhundertflut von 2002 sorgen schon wieder extreme Niederschläge für massive Überschwemmungen und Rekordwasserstände in Deutschland, Österreich und Tschechien. Es gibt erneut Todesopfer und Milliardenschäden.
- Juli 2016: Extreme Niederschläge und Überschwemmungen verursachen in China Schäden in der Höhe von 20 Milliarden US-Dollar. 60 Millionen Menschen waren insgesamt betroffen, 237 sterben.
- September 2017: Die Hurrikans Harvey, Irma und Maria zerstören Teile der Karibik und die US-Metropole Houston. Die Schäden werden mit 215 Milliarden US-Dollar beziffert. 324 Menschen starben.
- Sommer 2018: Eine Hitzewelle und eine Rekorddürre treffen Deutschland. Über 1200 Menschen sterben durch die Hitze. Die Schäden in der Land- und Forstwirtschaft betragen viele Milliarden Euro.

Auch die Zahl der Sachschäden nehmen nach Beobachtungen der Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft kontinuierlich zu. In Rekordjahren überstieg die weltweite Schadenssumme bereits 200 Milliarden Euro.

Alleine der Hurrikan Katrina, der im Jahr 2005 die US-amerikanische Stadt New Orleans verwüstete, richtete Schäden in einer Höhe von rund 125 Milliarden US-Dollar an und kostete 1300 Menschen das Leben (*s. auch Abbildung 2.5*). Im Jahr 2017 zerstörte der Hurrikan Harvey weiter Teile von Houston. Innerhalb weniger Tage fielen dort stellenweise

mehr als 1500 Liter Regen pro Quadratmeter. 200 000 Häuser wurden dabei beschädigt oder zerstört. Insgesamt wird mit Kosten von 85 Milliarden US-Dollar gerechnet.



Abbildung 2.5 Schäden durch Hurrikans in den USA (Fotos: US Department of Defense | Pixabay)

Auch in Deutschland haben die Extremereignisse zugenommen. Beispiele in den letzten Jahren waren Starkregen und Überschwemmungen (*Abbildung 2.6*). Bei Vielen ist der Rekordhitzesommer im Jahr 2003 in Erinnerung geblieben. Durch große Hitzewellen sinken die Ernteerträge. Wegen der enormen Belastungen für den Körper und den Kreislauf steigt auch die Sterberate an. Im Sommer 2003 sind in Europa infolge der großen Hitze rund 70 000 Menschen mehr gestorben als in einem normalen Jahr. Schätzungsweise 7000 Hitzetote waren es allein in Deutschland.



Abbildung 2.6 Schäden durch Hochwasser und Unwetter in Deutschland

Fotos: Wikimedia Commons - Stefan Penninger | Pixabay

Während momentan die finanziellen Schäden durch Naturkatastrophen zumindest in Deutschland noch überschaubar sind, rechnet man mit einem deutlichen Anstieg bis zum

Ende des Jahrhunderts. Bei einer ungebremsten globalen Erwärmung um 4,5 Grad Celsius errechnete das Deutsche Institut für Wirtschaftsforschung DIW Gesamtkosten des Klimawandels nur für Deutschland von rund 3000 Milliarden Euro bis zum Jahr 2100 [Kem07].

2.2 Schuldiger gesucht – Gründe für den Klimawandel

2.2.1 Der Treibhauseffekt

Ohne den schützenden Einfluss der Atmosphäre würden auf der Erde Temperaturen von etwa –18 Grad Celsius herrschen. Wir säßen dann auf einem Eisplaneten.

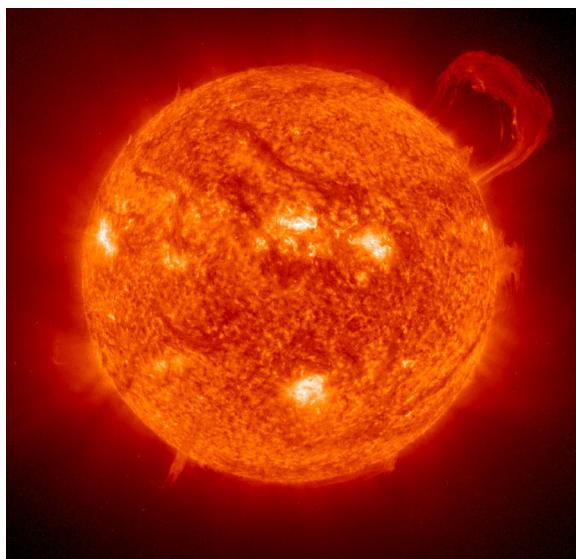


Abbildung 2.7 Veränderungen der Sonnenaktivität sind nur für einen kleinen Bruchteil der globalen Erwärmung verantwortlich (Bild: NASA).

Verschiedene natürliche Spurengase in der Atmosphäre, wie Wasserdampf, Kohlendioxid oder Ozon verhindern, dass die Erde sämtliche eintreffende Sonnenenergie wieder ins Weltall abgibt. Einen Teil strahlen diese Gase wie in einem Treibhaus zur Erde zurück. Dieser natürliche Treibhauseffekt ist die Grundlage für das Leben auf unserer Erde. Dadurch hat sich heute eine mittlere Temperatur von etwa +15 Grad Celsius eingestellt.

Bei den Spurengasen in der Atmosphäre hat sich in den letzten Jahrtausenden ein Gleichgewicht gebildet, welches das Leben in der Form, wie wir es heute kennen, erst ermöglichte. Gründe für den beobachteten Klimawandel wurden bereits viele diskutiert. Lange Zeit haben Skeptiker den Klimawandel an sich in Frage gestellt. Nachdem heute niemand mehr wirklich ernsthaft behaupten kann, dass es nicht wärmer geworden ist, versuchen einige nun die Schuld auf natürliche Effekte zu schieben: Beispielsweise auf die Sonnenaktivität. Sie war in den vergangenen Jahrzehnten vermutlich größer als in allen 8000 Jahren zuvor.

Nachweislich hat sich tatsächlich die Strahlungsmenge, die die Erde erreicht, leicht erhöht. Wissenschaftler schließen aber aus, dass dies eine so starke Erwärmung verursachen kann. Bestenfalls ein Zehntel der beobachteten Temperaturzunahme geht auf die gestiegene Sonnenaktivität zurück.

Die plausibelste Ursache für die Erwärmung ist, dass sich durch menschliche Einflüsse die Anteile von Spurengasen signifikant verändert haben. Die Konzentration an Gasen, die nachweislich eine globale Erwärmung bewirken, hat in den letzten Jahrzehnten stark zugenommen. Der Mensch verursacht also eine Verstärkung des natürlichen Treibhauseffekts. Dieser vom Menschen hervorgerufene Treibhauseffekt heißt auch anthropogener Treibhauseffekt (*Abbildung 2.10*). Sehr neu ist diese Theorie allerdings nicht.



Atmen wir das Klima kaputt?

Beim Ausatmen enthält die Atemluft rund 4 Prozent an Kohlendioxid – etwa hundertmal mehr als beim Einatmen. Pro Jahr pustet jeder damit rund 350 Kilogramm an Kohlendioxid in die Atmosphäre. Wenn wir ein Lagerfeuer entzünden und dabei Holz verbrennen, setzen wir damit ebenfalls Kohlendioxid frei. Pflanzen, Tiere und Menschen sind jedoch in einem biogeochimischen Kreislauf eingebunden. Der Mensch nimmt Kohlenhydrate zu sich und atmet Sauerstoff ein. Beide Stoffe setzt er in Kohlendioxid um, das er wieder ausatmet.

Pflanzen binden wiederum dieses Kohlendioxid und liefern unsere Kohlenhydrate. Kohlenhydrate sind organische Verbindungen aus Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff und werden in Pflanzen durch Photosynthese aufgebaut. Getreide und Nudeln bestehen zum Beispiel zu 75 Prozent aus Kohlenhydraten. Der Weizen in der italienischen Spaghettinudel hat vielleicht sogar das Kohlendioxid in Kohlenhydrate umgewandelt, das wir im letzten Urlaub ausgeatmet haben.

Wenn eine Pflanze verbrennt, verrottet oder eben als Kohlenhydratlieferant endet, entsteht dabei genauso viel Kohlendioxid wie diese zuvor aus der Luft entnommen hat. Die natürlichen Kreisläufe sind also CO₂-neutral und verursachen keinen Anstieg der Konzentration. Das gilt aber nicht für die Urlaubsfahrt nach Italien und den Transport der Spaghettinudel nach Deutschland.

2.2.2 Hauptverdächtiger Kohlendioxid

Bereits im Jahr 1896 rechnete der schwedische Wissenschaftler und Nobelpreisträger Svante Arrhenius erstmals vor, dass eine Verdoppelung des Kohlendioxidegehalts (CO₂) der Atmosphäre zu einer Temperaturerhöhung um 4 bis 6 Grad Celsius führen würde [Arr96]. Ein Zusammenhang der beobachteten Klimaerwärmung mit dem Kohlendioxidanstieg in Folge der Industrialisierung wurde in den 1930er-Jahren bereits diskutiert. Er war aber seinerzeit noch nicht eindeutig zu belegen.

Erst gegen Ende der 1950er-Jahre gelang der Nachweis, dass die Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre ansteigt [Rah04]. Heute gilt als bewiesen, dass die Zunahme der Kohlendioxidkonzentration die Hauptursache für die beobachtete Erwärmung ist.

Der Anstieg der Kohlendioxidkonzentration resultiert hauptsächlich aus der Nutzung fossiler Energien. Verbrennen wir fossile Energieträger, ist dies chemisch gesehen eine Oxi-

5

5 Photovoltaik – Strom aus Sand

Der Begriff Photovoltaik wird aus den zwei Wörtern Photo und Volta gebildet. Hierbei steht Photo für Licht und kommt vom griechischen phōs beziehungsweise photós. Der im Jahr 1745 geborene italienische Physiker Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio Graf von Volta war Erfinder der Batterie und gilt zusammen mit Luigi Galvani als Begründer der Elektrizität. Mit der Photovoltaik verbindet ihn jedoch nicht sehr viel. Im Jahr 1897, siebzig Jahre nach Voltas Tod, wurde ihm zu Ehren jedoch die Maßeinheit der elektrischen Spannung Volt genannt. Photovoltaik steht also für die direkte Umwandlung von Sonnenlicht in Elektrizität.

Photovoltaik, Fotovoltaik, PV und FV?



In der alten Rechtschreibung war alles klar: Photovoltaik wird mit „Ph“ geschrieben.

Die neue deutsche Rechtschreibreform ließ dann auch Fotovoltaik als Schreibweise zu. Dies macht durchaus Sinn, machen wir doch Urlaubsfotos, keine Urlaubsphotos. Ob sich die Fotovoltaik indes wie das Foto als allgemeine Schreibweise durchsetzen wird, ist ungewiss. Seit jeher wird die Photovoltaik liebvoll mit PV abgekürzt. Was eine PV-Anlage ist, verstehen alle Fachleute. Logischerweise müsste jetzt auch die neue Abkürzung FV gelten. Von einer FV-Anlage hat aber bislang noch nie jemand etwas gehört. Da Photovoltaik auf Englisch photovoltaics heißt und ebenfalls mit PV abgekürzt wird, hat die Schreibweise Fotovoltaik künftig wohl schlechtere Karten.

Beim Hantieren mit elektrochemischen Batterien mit Zink- und Platin-Elektroden stellte der neunzehnjährige Franzose Alexandre Edmond Becquerel eine Zunahme der elektrischen Spannung fest, wenn er diese mit Licht bestrahlte. Im Jahr 1876 wurde diese Erscheinung auch am Halbleiter Selen nachgewiesen. Im Jahr 1883 stellte der Amerikaner Charles Fritts eine Selen-Solarzelle her. Wegen der hohen Preise für Selen und der sehr aufwändigen Herstellung fand diese Zelle aber keine Verwendung zur Stromerzeugung. Die physikalische Ursache, warum bestimmte Materialen bei Bestrahlung mit Sonnenlicht eine elektrische Spannung erzeugen, verstand man seinerzeit noch nicht. Den dafür verantwortlichen Photoeffekt konnte viele Jahre später erst Albert Einstein beschreiben. Hierfür bekam er schließlich im Jahr 1921 den Nobelpreis.

Mitte der 1950er-Jahre begann das Zeitalter der Halbleitertechnik. Das in der Natur häufig vorkommende Halbleitermaterial (vgl. Info S. 132) 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 der 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.

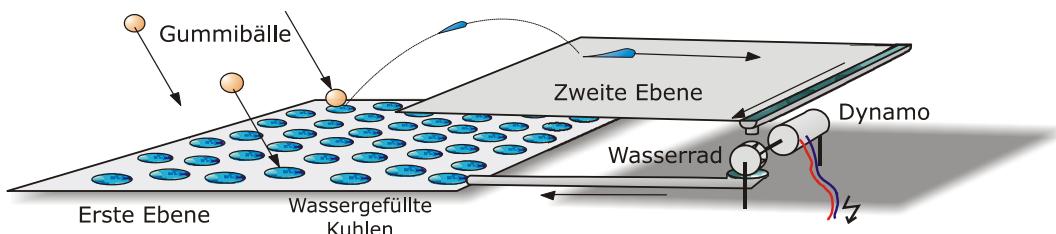


Abbildung 5.1 Modell zur Veranschaulichung der Vorgänge in einer Solarzelle

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 sogenannten Elektronen. Diese entsprechen dem Wasser unseres einfachen Modells. Für die Solarzelle wird also ein Material benötigt, in dem 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 Eigen-

schaften. 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 Bestrahlung 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 Gallium-arsenid (GaAs), Cadmiumtellurid (CdTe) oder Kupferindiumdiselenid (CuInSe₂) gibt es auch organische Halbleiter. Alle genannten Materialien 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, mit dem 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, wird der Halbleiter dotiert. Hierzu wird eine Seite der Halbleiterscheibe mit Elementen wie Bor und die andere Seite mit 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 verschiedenen 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 Frontkontakte reflektiert.

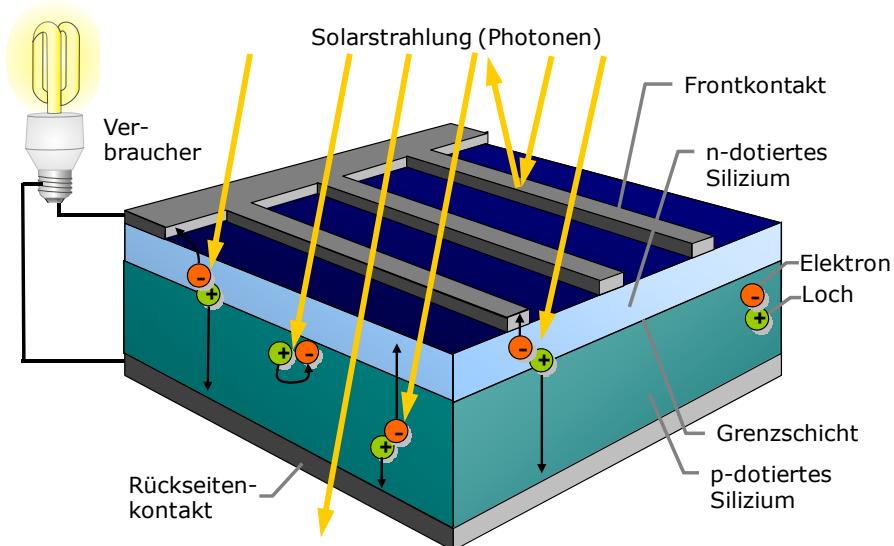


Abbildung 5.2 Aufbau und Vorgänge in einer Solarzelle [Qua13]

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

$$\eta = \frac{P_{\text{el}}}{\Phi} \quad \left(\text{Wirkungsgrad} = \frac{\text{abgegebene elektrische Leistung}}{\text{eintreffende solare Strahlungsleistung}} \right)$$



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 fast 24 Prozent. Im Labor wurden sogar schon über 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-

zellen müssen hier die Wirkungsgrade aber noch verbessert werden. Konzentratorzellen, auf die Sonnenlicht durch Spiegel oder Linsen konzentriert wird, erreichen sehr hohe Wirkungsgrade, sind aber auch deutlich teurer als normale Siliziumzellen.

Tabelle 5.1 Wirkungsgrade verschiedener Solarzellen

| Zellmaterial | Maximaler Zellwirkungsgrad (Labor) | Maximaler Zellwirkungsgrad (Serie) | Typischer Modulwirkungsgrad | Flächenbedarf für 1 kW _p |
|----------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|
| Monokristallines Silizium | 26,7 % | 24 % | 19 % | 5,3 m ² |
| Multikristallines Silizium | 22,3 % | 20 % | 17 % | 5,9 m ² |
| Amorphes Silizium | 14,0 % | 8 % | 6 % | 16,7 m ² |
| CIS / CIGS | 23,4 % | 16 % | 15 % | 6,7 m ² |
| CdTe | 22,1 % | 17 % | 16 % | 6,3 m ² |
| Konzentratorzelle | 47,1 % | 40 % | 30 % | 3,3 m ² |

Neben dem Wirkungsgrad gibt es noch weitere Kenngrößen, die Photovoltaikmodule beschreiben. In Datenblättern für Photovoltaikmodule findet man meist eine sogenannte Strom-Spannungs-Kennlinie. Der maximale Strom I_K fließt bei einem kurzgeschlossenen Photovoltaikmodul. Der Kurzschlussfall ist für das Modul ungefährlich. Der Kurzschlussstrom ist begrenzt und hängt von der solaren Bestrahlungsstärke ab. Wird gar nichts an das Photovoltaikmodul angeschlossen, befindet es sich im Leerlauf und es fließt kein Strom. Dann stellt sich die Leerlaufspannung U_L ein. Im Kurzschluss und im Leerlauf kann das Photovoltaikmodul keine Leistung abgeben. Zwischen Leerlauf und Kurzschluss hängt der Strom von der Spannung ab. Der prinzipielle Verlauf der Kennlinie ist für alle Solarmodule ähnlich (*Abbildung 5.3*).

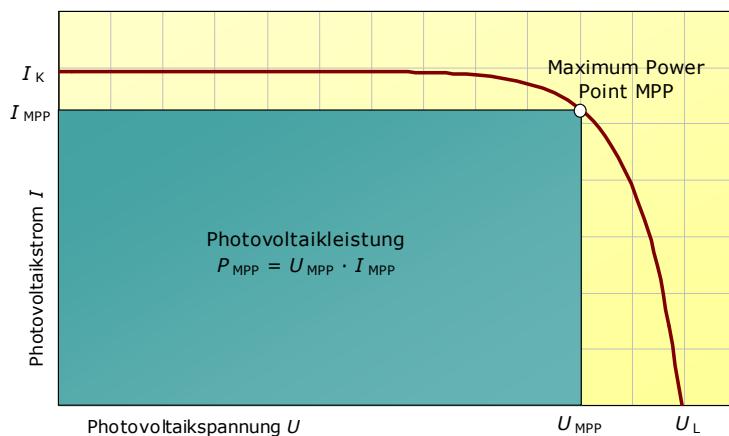


Abbildung 5.3 Strom-Spannungs-Kennlinie eines Photovoltaikmoduls

In der Praxis möchte man dem Photovoltaikmodul die maximale Leistung entnehmen. Diese entspricht dem größten Rechteck, das sich unter die Kennlinie schieben lässt. Die rechte obere Kante des Rechtecks auf der Kennlinie heißt MPP. Das ist die Abkürzung für „Maximum Power Point“. Die Spannung, die zum MPP gehört, heißt MPP-Spannung, kurz U_{MPP} . Auf Englisch heißt sie „MPP voltage“ und hat die Abkürzung V_{MPP} . Bei dieser Spannung gibt das Photovoltaikmodul die maximale Leistung ab. In der Praxis erreicht man den Betrieb nahe des MPP, indem beispielsweise eine Batterie angeschlossen wird, deren Spannung nahe der MPP-Spannung ist, oder indem ein Wechselrichter automatisch die MPP-Spannung am Photovoltaikmodul einstellt.

Der Strom des Photovoltaikmoduls und damit die Leistung sinken mit der Anzahl der ein-treffenden Photonen, also der Bestrahlungsstärke des Sonnenlichts. Halbiert sich die solare Bestrahlungsstärke, geht auch die Leistung des Photovoltaikmoduls um die Hälfte zurück. Bei hohen Temperaturen sinkt ebenfalls die Leistung eines Photovoltaikmoduls. Bei einem Temperaturanstieg um 25 Grad Celsius sinkt bei kristallinen Solarzellen die Leistung um rund 10 Prozent. Darum sollte beim Einbau von Photovoltaikmodulen darauf geachtet werden, dass sie immer gut hinterlüftet sind und ein Luftzug die Module kühlt.

Um Photovoltaikmodule vergleichen zu können, hat man sich international auf Standard-testbedingungen (STC) geeinigt. Die MPP-Leistung von Solarzellen und Modulen wird dabei bei einer solaren Bestrahlungsstärke von 1000 Watt pro Quadratmeter und einer Modultemperatur von 25 Grad Celsius bestimmt. Da in der Praxis die Bestrahlungsstärke meist niedriger ist und Photovoltaikmodule sich im Sommer bis über 60 Grad Celsius erwärmen können, stellt die bei Standardtestbedingungen ermittelte MPP-Leistung einen Maximalwert dar. Dieser wird nur in seltenen Fällen erreicht und noch seltener überschritten. Deshalb hat diese Leistung auch die Einheit „Watt Peak“, kurz W_p .

Tabelle 5.2 Wichtige Kenngrößen für Photovoltaikmodule

| Kenngroße | Formel-zeichen | Einheit | Beschreibung |
|---|--|--------------|--|
| Leerlaufspannung (open circuit voltage) | U_L (V_{ooc}) | Volt, V | Spannung des PV-Moduls im Leerlauf ohne angeschlossene Last |
| Kurzschlussstrom (short circuit current) | I_k (I_{sc}) | Ampere, A | Strom des PV-Moduls im Kurzschluss bei kurzgeschlossenem Modul |
| MPP-Spannung (MPP voltage) | U_{MPP} (V_{MPP}) | Volt, V | Spannung, bei der das Photovoltaikmodul die maximale Leistung abgibt |
| MPP-Strom (MPP current) | I_{MPP} (I_{MPP}) | Ampere, A | zur MPP-Spannung zugehöriger Strom |
| MPP-Leistung (MPP power) | P_{MPP} (P_{MPP}) | Watt, W | maximale Leistung, die ein PV-Modul abgeben kann |

5.2 Herstellung von Solarzellen – vom Sand zur Zelle

5.2.1 Siliziumsolarzellen – Strom aus Sand

Silizium, der Rohstoff für Computerchips und Solarzellen, ist zwar nach Sauerstoff das zweithäufigste Element in der Erdkruste. Doch kommt Silizium in der Natur fast ausschließlich in gebundener Form wie Quarzsand, silikathaltigen Gesteinen oder Kieselsäure in den Weltmeeren vor. Selbst der menschliche Körper enthält etwa 20 Milligramm pro Kilogramm Körpergewicht an Silizium.

Reines Silizium wird hingegen meist aus Quarzsand gewonnen. Chemisch ist Quarzsand reines Siliziumdioxid (SiO_2). Um daraus Silizium zu gewinnen, müssen die Sauerstoffatome (O_2) durch hohe Temperaturen abgetrennt werden. Dieser Vorgang heißt Reduktion und erfolgt beispielsweise in einem Lichtbogenofen bei Temperaturen von rund 2000 Grad Celsius. Das Resultat ist industrielles Rohsilizium mit einer Reinheit von 98 bis 99 Prozent.

Für die Herstellung von Solarzellen muss das Rohsilizium noch weiter gereinigt werden. Hierzu kommt meist das Siemens-Verfahren zur Anwendung. Dabei wird das Rohsilizium mit Chlorwasserstoff zu Trichlorsilan umgesetzt und dann destilliert. Bei hohen Temperaturen von 1000 bis 1200 Grad Celsius scheidet man das Silizium in langen Stäben wieder ab. Das so gewonnene multikristalline Solarsilizium hat eine Reinheit von über 99,99 Prozent.



Abbildung 5.4 Multikristallines Silizium für Solarzellen (links: Rohsilizium, Mitte: Siliziumblöcke, rechts: Siliziumwafer, Fotos: PV Crystalox Solar plc.)

Für die Herstellung von Halbleitersilizium für Computerchips und monokristalline Solarzellen wird das Silizium erneut aufgeschmolzen. Beim sogenannten Tiegelziehen nach Czochralski taucht man einen Kristallkeim in einen Tiegel mit einer Siliziumschmelze und zieht diesen mit einer Drehbewegung langsam nach oben. Das flüssige Silizium lagert sich an den Kristall an und es entsteht ein langer runder Siliziumstab. Dabei richten sich die Siliziumkristalle in eine Richtung aus. Es entsteht monokristallines Silizium. Größere Verunreinigungen bleiben im Schmelztiegel zurück, sodass dieses Halbleitersilizium Reinheiten von über 99,9999 Prozent erreicht.

Als nächstes schneiden Drahtsägen die langen Siliziumstäbe in dünne Scheiben, die sogenannten Wafer. Dabei entstehen große Sägeverluste. Bis zu 50 Prozent des wertvollen Siliziummaterials gehen beim Sägen verloren. Alternativ können auch zwei dünne Drähte durch eine flüssige Siliziumschmelze gezogen werden. Hierbei entstehen zwischen beiden Drähten ebenfalls dünne Siliziumscheiben. Durch Eintauchen in eine Säure lassen sich Sägeschäden entfernen und die Oberfläche glätten. In der Vergangenheit hatten Siliziumwafer eine Dicke von 0,3 bis 0,4 Millimeter. Um Material und Kosten zu sparen, versucht man heute die Waferdicke auf deutlich unter 0,2 Millimeter zu reduzieren. Dies war technisch eine große Herausforderung, da dabei der hauchdünne Wafer nicht zerbrechen darf.

Die fertigen Wafer werden gasförmigen Dotierungstoffen ausgesetzt. Dadurch entstehen die zuvor beschriebene p- und n-Schicht. Eine wenige Millionstel Millimeter dicke transparente Antireflexschicht aus Siliziumnitrid verleiht der Siliziumsolarzelle die typisch dunkelblaue Farbe. Diese Schicht reduziert die Reflexionsverluste des silbrig grauen Siliziums auf der Vorderseite der Solarzelle. Je dunkler die Zelle erscheint, desto weniger Licht reflektiert die Zelle.

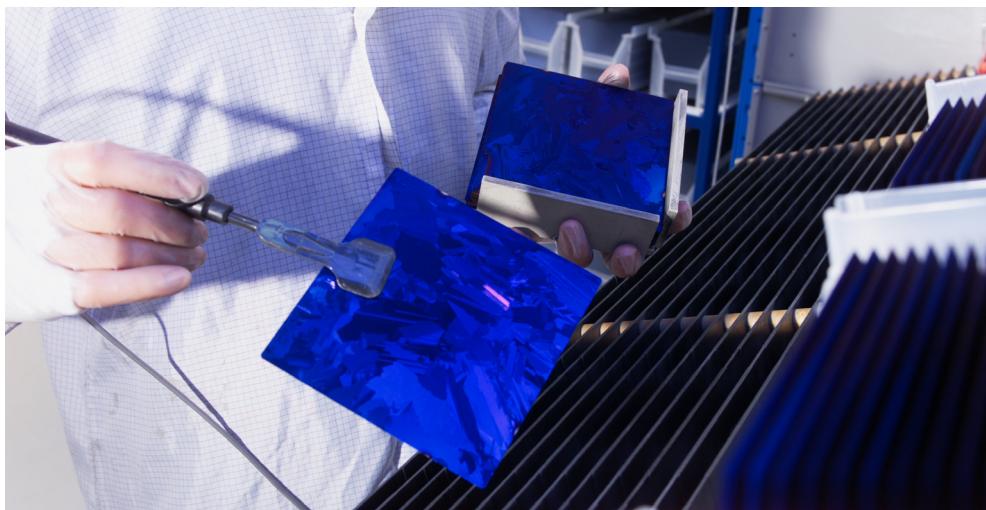


Abbildung 5.5 Multikristalline Solarzellen mit Antireflexschicht vor dem Aufbringen der Frontkontakte
(Foto: BSW, www.sunways.de)

Abschließend werden die Front- und Rückseitenkontakte per Siebdruck aufgebracht. Um die Verluste an den lichtundurchlässigen Frontkontakten zu verringern, vergraben einige Hersteller diese unter der Oberfläche oder versuchen sie ebenfalls auf die Zellrückseite zu verlegen. Damit steigen zwar der Wirkungsgrad der Zelle, aber auch der Aufwand und die Kosten bei der Herstellung. Die fertigen Zellen werden schließlich getestet und nach Leistungsklassen sortiert, um sie dann weiter zu Photovoltaikmodulen zu verarbeiten.

5.2.2 Von der Zelle zum Modul

Siliziumsolarzellen sind meist quadratisch. Die Kantenlänge wird in Zoll gemessen. Früher hatten Solarzellen typischerweise 4 Zoll (ca. 10 cm). Mittlerweile haben sich 6 Zoll (ca. 15 Zentimeter) als Standard durchgesetzt. Einzelne Hersteller haben auch schon 8 Zoll (ca. 20 Zentimeter) große Solarzellen produziert. Bei größeren Solarzellen sind weniger Verarbeitungsschritte notwendig, um die Zellen zu einem Modul zusammenzubauen. Allerdings steigt auch das Risiko, dass die Zellen bei der weiteren Verarbeitung brechen. Mit der Größe der Solarzelle steigt der Strom an, während die Spannung konstant bleibt. Die elektrische Spannung einer Solarzelle beträgt nur 0,6 bis 0,7 Volt.

Für praktische Anwendungen werden deutlich größere Spannungen benötigt. Darum schaltet man viele Zellen zu Solarmodulen in Reihe. Dazu werden die Frontkontakte einer Zelle jeweils mit den Rückseitenkontakten der nächsten Zelle mit aufgelöteten Drähten verbunden. Um eine ausreichend hohe Spannung zum Laden von 12-Volt-Batterien zu erreichen, schaltet man 32 bis 40 Zellen in Reihe. Für die Netzeinspeisung über Wechselrichter werden höhere Spannungen benötigt. Hierfür sind Solarmodule mit mindestens 60 in Reihe geschalteten Zellen üblich.

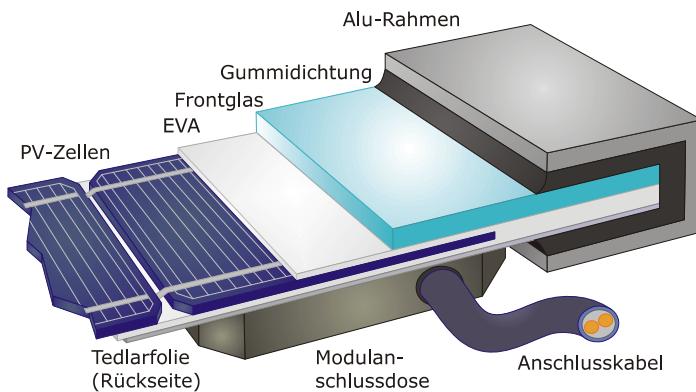


Abbildung 5.6 Prinzipieller Aufbau eines Photovoltaikmoduls

Da Solarzellen sehr empfindlich sind, leicht zerbrechen und durch Feuchtigkeit korrodieren, müssen sie geschützt werden. Hierzubettet man die Solarzellen in einen speziellen Kunststoff zwischen einer Frontglasscheibe und einer Kunststofffolie auf der Rückseite ein (*Abbildung 5.6*). Einige Hersteller verwenden auch Glas für die Rückseite. Das Glas sorgt

R

Register

A

Ablasshandel 92
Absorber 169, 206
 Beschichtung 174
 Schwimmbad 172
 selektiv 174
Absorptionswärmepumpe 290
Adsorptionswärmepumpe 290
alkalische Elektrolyse 335
Archimedes 201
arktische Eisbedeckung 46
Atombombe 23
Atomkraft 22, 104
Atomkraftwerk 24
Auftriebsprinzip 228
Aufwindkraftwerk 209
Auslegung
 Holzpelletslagerraum 322
 Photovoltaik 150
 Scheitholzkessel 320
 solare Heizungsunterstützung 190
 solare Trinkwassererwärmung 188
 Solarkraftwerke 212
 Solarthermieranlagen 187
 Wärmepumpe 291
 Wasserkraftwerke 264
 Windkraft 241
Ausrichtung Solaranlage 154
Autarkie 147, 157
Autobahn 117

B

BAFA 194, 324
Bahn 84
Barrel 19
Batterie 142, 148, 230

Batteriekapazität 152
Be- und Entlüftung 82
Beaufort-Windskala 226
Berechnung
 Batteriekapazität 152
 Größe des Erdwärmekollektors 291
 Holzpelletslagerraumgröße 322
 Kollektorgöße 189
 Kollektorwirkungsgrad 171
 Leistung des Windes 225
 Leistungszahl der Wärmepumpe 287
 Photovoltaikanlagenertrag 155
 Photovoltaikleistung 152
 PV-Leistung für Inselnetzsysteme 151
 Scheitholzkesselleistung 320
 Solarkraftwerksertrag 213
 Speichergröße 189
 Wasserkraftwerksleistung 265
 Windkraftjahresertrag 241
 Betz'scher Leistungsbeiwert 227
BHKW 106
Biodiesel 315
Bioethanol 316
Biogas 319
Biogasanlage 319
Biomasse 113, 300
 Entstehung 301
 Heizungen 304
 Heizwerke 312
 Kraftwerke 312
 Märkte 328
 Nutzung in Deutschland 329
 Ökologie 325
 Ökonomie 323
 Potenziale 303
 Treibstoffe 314, 327
Biöl 315
Biotreibstoffe 314, 327
Blockheizkraftwerke 106

Bohrturm 275
 Bohrung
 Tiefengeothermie 274
 Wärmepumpe 293
 Braunkohlekraftwerk Jänschwalde 99
 Braunkohletagebau 100
 Brennstoffzelle 341
 Brennstoffzellenstacks 343
 Bruttoinlandsprodukt 107
 BtL-Kraftstoffe 318
 Bypassdioden 139

C

C4-Pflanzen 303
 Clean Development Mechanism 93
 COP 287

D

Dämmung 81
 Dampfreformierung 335
 direkt-normale Bestrahlungsstärke 213
 Dish-Stirling-Kraftwerk 208
 DNI 213
 Dreiliterhaus 80, 349
 Dünnenschicht-Photovoltaikmodul 139

E

EEG 94
 EE-Gas 332
 Eigentümer erneuerbarer Energien 128
 Eigenverbrauch 147, 157
 Eisbedeckung 46
 Eiszeit 43
 Elektrizitätsversorgung 119
 Elektroauto 117
 Elektroherd 73
 Elektrolyse 335
 Emissionshandel 93
 Endenergie 30, 72
 Endenergieverbrauch 74
 Verkehr 84
 Energie 14, 29, 72
 Energiekonzerne 97, 127
 Energiepolitik 127
 Energiereserven 39
 Energiesparen 71
 Energiesparlampen 76, 92
 Energiespartipps 78, 85
 Energiewende 96
 EnEV 80
 Erdgas 20, 324
 Erdgasspeicher 21, 339
 Erdkern 272
 Erdöl 17, 36, 324

Erdölbarrel 19
 Erdölpreise 41
 Erdölreserven 38
 Erdwärmekollektor 291
 Erneuerbare-Energien-Gesetz 94
 Biomassekraftwerke 325
 geothermische Kraftwerke 281
 Wasserkraft 267

F

FCKW 56, 57, 296
 Fenster 81
 Festmeter 306
 Fischtreppe 267
 FKW 56, 58, 70, 296
 Flachkollektor 173
 Flatcon-Technologie 211
 Flüssigwasserstoff 338
 fossile Energieträger 16
 fossile Stromerzeugung 127
 Fotovoltaik *siehe* Photovoltaik
 Fracking 37
 Francis-Turbine 256
 Fresnelkollektor 201
 Fridays for Future 375
 Fukushima 24

G

Gasherd 73
 Geothermie 271
 HDR-Kraftwerk 279
 Heizwerk 276
 Kraftwerk 277
 Märkte 283
 Ökologie 282
 Ökonomie 281
 Wärmepumpe 285
 geothermischer Tiefengradient 273
 Gezeitenkraftwerke 262
 globale Zirkulation 223
 Goldisthal 261
 Golfstrom 59, 63
 Greta Thunberg 375
 Grönlandeis 59, 61
 grüner Strom 73
 GuD-Kraftwerke 106, 205

H

Hadley-Zelle 223
 Halbleiter 132
 Harrisburg 24
 Häufigkeitsverteilung 242
 Haushaltsstrompreise 125
 HDR 275

Register

Heizkosteneinsparungen 79
Heizwert von Holz 308
Helios 365
Herstellung
 Biodiesel 316
 Bioethanol 316
 BiL-Kraftstoffe 318
 RME 316
 Solarzellen 136
HFKW 296
Hohlspiegel 201
Holz 304
Holzbriketts 305
Holzfeuchte 307
Holzpellets 305
 Heizung 310, 321
 Norm 306
 Preise 324
Holzständerbauweise 81
Hot Dry Rock 275, 279
Hurrikan Katrina 48
Hybridkraftwerk 370

I

IPCC 59

J

Jahresarbeitszahl 114, 287
Jahresdauerlinie 265
Joint Implementation 92

K

Kalina-Prozess 278
Kalkar 24
Kältemaschine 289
Kältemittel 288, 296
Kamin, Kaminofen 309
Kammersysteme 262
Kaplan-Turbine 255
Karbonschmelzen-Brennstoffzelle 343
Kavernenspeicher 340
Kernenergie 22, 105
Kernenergieausstieg 105
Kernfusion 26
KfW-40-Haus 80
KfW-60-Haus 80
Kleinwindkraftanlagen 234
Klimaschutz 63, 69
Klimaveränderungen 43
Klimawandel 59
Knallgasreaktion 331
Kohlendioxid 51, 56, 103, 335
 Abtrennung 103
 Bilanz 87

Konzentration 52, 53
Sequestrierung 102
Kohlendioxidemissionen
 Deutschland 67
 Heizung 88
 Kraftwerk Jänschwalde 100
 Kraftwerk Neurath 101
 Länder der Erde 52
 Nahrungsmittel 89
 Papierverbrauch 90
 Spritverbrauch 85
 Verkehr 84
 Wasserstoffherstellung 345
kohlendioxidfreie Kraftwerke 103
Kollektor 169, 172, 201
Kollektorgroße 189
Kollektowirkungsgrad 171
Kombikraftwerk 121
Kompressionswärmepumpe 288
kontrollierte Be- und Entlüftung 82
konventionelle Vorkommen 35
Konzentration von Solarstrahlung 200
Konzentrator 201
Konzentratorzellen 211
konzentrierende Photovoltaik 210
Kraftstoffertrag je Hektar 327
Kraft-Wärme-Kopplung 106
Kraftwerk
 Atom 24, 104
 Aufwind 209
 Biomasse 312
 Blockheiz 106
 Braunkohle 99
 Dish-Stirling 208
 Geothermie 277
 Gezeiten 262
 HDR 279
 Jänschwalde 99
 kohlendioxidfreies 103
 Kombi 121
 konzentrierende Photovoltaik 210
 Laufwasser 257
 Meeresströmung 263
 Neurath 100
 ORC 277
 Parabolrinnen 202
 Photovoltaik 140
 Pumpspeicher 260
 SEGS 204
 Solarturm 206
 Speicherwasser 259
 Wellen 262
 Wind 221
Kurzschlussstrom 135
Kværner-Verfahren 335
KWK 106

Kyoto-Protokoll 68

L

Lachgas 56
Laufwasserkraftwerke 257
Leerlaufspannung 135
Leistung 14
Leistungsbeiwert 227
Leistungszahl 287
Leitungen 123
LH₂ 338
Linienkonzentrator 201
Lithosphäre 273
Luftkollektor 174
Luftreceiver 206

M

Manhattan-Projekt 23
Märkte
 Biomasse 328
 Geothermie 283
 Photovoltaik 164
 Solarkraftwerke 217
 Solarthermieranlagen 195
 Wärmepumpe 298
 Wasserkraft 268
 Wasserstoff 344
 Windkraft 247
Maximum Power Point 135
Meeresspiegelanstieg 45, 59, 60
Meeresströmungskraftwerke 263
Mehrwertsteuer 162
Methan 56, 332
 Speicherung 338
Methanisierung 336
Modulpreisenentwicklung 166
monokristallines Silizium 137
Moon-Speech 376
MPP 135

N

Naturkatastrophen 48
Neigungsgewinne 154
Netze 123
Netzparität 161
nicht-konventionelle Vorkommen 35, 36
Niedrigenergiehaus 80
Nullemissionsfabrik 355
Nullheizkostenhaus 353
Nutzenergie 30, 72

O

offener Kamin 308

Offshore-Windkraft 237

Ökologie
 Biomasse 325
 Geothermie 282
 Photovoltaik 163
 Solarkraftwerke 216
 Solarthermieranlagen 194
 Wärmepumpe 296
 Wasserkraft 267
 Wasserstoffherstellung 345
 Windkraft 246

Ökonomie

Biomasse 323
geothermische Anlagen 281
Photovoltaik 158
Solarkraftwerke 215
Solarthermieranlagen 193
Wärmepumpe 294
Wasserkraft 266
Wasserstoff 344
Windkraft 243
Ölkrisis 18
Ölparität 161
Ölpreise 41, 324
Ölsande 36
OPEC 18, 40
ORC-Kraftwerk 277
Orkan Kyrill 48
Oxidation, partielle 335
oxidkeramische Brennstoffzelle 343
oxygene Photosynthese 301
Ozon 57
 Ozonloch 57, 58
 Ozonschicht 57

P

Parabolrinnenkraftwerk 202
partielle Oxidation 335
Passatwind 223
Passivhaus 80
Pelton-Turbine 256
PEM-Brennstoffzelle 342
Performance Ratio 155
petrothermale Geothermie 279
Photosynthese 301
Photovoltaik 130
 Autarkiegrad 147, 157
 Dünnenschichtmodul 139
 Eigenverbrauchsanteil 147, 157
 Energiewende 119
 Funktionsweise 131
 Heizungsunterstützung 150
 Inselnetzanlagen 140
 Konzentratorzellen 211
 Märkte 164

- Modul 138
Modulpreisentwicklung 166
Netzanschluss 146
netzgekoppelte Anlagen 143
netzgekoppeltes Batteriesystem 148
Ökologie 163
Ökonomie 158
optimale Ausrichtung 154
Wirkungsgrad 134
- Planung
Biomasseheizung 323
geothermische Anlagen 280
Photovoltaik 150
Photovoltaikanlage 158, 163
Scheitholzkessel 320
solare Heizungsunterstützung 190
solare Trinkwassererwärmung 188
Solarstromkraftwerke 212
Solarthermieanlagen 187
Wärmepumpe 291, 294
Wasserkraftwerke 264
Windkraft 241
- Plugin-Hybridfahrzeug 358
Plusenergiehaus-Siedlung 351
Plusenergie-Solarhaus 350
polykristalline Solarzellen 137
Porespeicher 339
Power-to-Gas-Technologie 114, 332
PR 155
Primärenergie 30, 72
Primärenergiebedarf
 Biomasseanteil 328
 Energieträger 31
 Entwicklung weltweit 26
 Pro-Kopf 29, 107
Pro-Kopf-Primärenergiebedarf 29, 107
Pumpspeicherkraftwerke 260
Punktkonzentrator 202
PV *siehe* Photovoltaik
PVC 172
- R**
Rapsöl-Methylester 316
Raummeter 306
Receiver 206
Reduktionsziele 63
regenerative Stromversorgung 118, 120, 121
regenerative Wärmeversorgung 113
regenerativer Stromimport 220
regeneratives Energieangebot 109
Reserven 35
Ressourcen 35
Rinnenkraftwerk 202
RME 316
Rohöleinheit 379
- Rohr-Turbine 255
Rotorblatt 228
Rundholz 305
- S**
Scheitholz 305
Scheitholzkessel 309, 320
schneller Brutreaktor 25
Schüttraummeter 306
Schwerkraftsystem 178
Schwimmbadabsorber 172
Schwimmbaderwärmung 186
Schwimmersysteme 262
Scientists for Future 375
Segelschifffahrt 363
SEGS-Kraftwerke 204
Sektorkopplung 112, 118
selektive Beschichtung 174
selektiver Absorber 174
Silizium 136
SoDa-Energie 32
solar beheiztes Mehrfamilienhaus 352
Solar Impulse 366
Solarabsorber 169
Solarauto 359
solare Chemie 211
solare Deckungsrate 188, 191
solare Direktverdampfung 205
solare Heizungsunterstützung 181, 190
solare Nahwärmeversorgung 184
solare Schwimmbaderwärmung 186
solare Strahlungsenergie
 Deutschland 153
 Welt 212
solare Trinkwassererwärmung 180, 188
solares Kühlen 184
Solarfähre 364
Solarflugzeug 365
Solargas 332
Solarkocher 187
Solarkollektor 169, 172
Solarkraftwerke 199
 Aufwindkraftwerke 209
 Dish-Stirling-Kraftwerk 208
 konzentrierende Photovoltaik 210
 Märkte 217
 Ökologie 216
 Ökonomie 215
 Parabolrinnenkraftwerk 202
 Photovoltaik 143
 Planung 212
 Solarturmkraftwerk 206
 Solarküche 367
 Solarmobil 358
 Solarstrahlungsarten 213

Solarstromimport 220
 Solarthermieranlagen 168, 202
 Auslegung 187
 Heizungsunterstützung 181
 Kraftwerke 199
 Märkte 195
 Ökologie 194
 Ökonomie 193
 Planung 187
 Trinkwassererwärmung 180
 Solarturmkraftwerk 206
 Solarzelle
 Aufbau 133
 Funktionsweise 131
 Herstellung 136
 Wirkungsgrad 134
 Sonnenaktivität 50
 Sonnenenergie 109
 Sonnenofen 200, 211
 Sonnenschiff 354
 Speicher
 Batterie 142, 148, 230
 Erdgas 123, 339
 Heizwasser 150, 181
 Holzpellets 321
 Kavernen 340
 Methan 338
 Parabolrinnenkraftwerk 203
 Poren 339
 Pufferspeicher 320
 Pumpspeicher 260
 Speicherwasser 259
 Trinkwasser 150, 180, 181, 189
 Wasserstoff 337
 zentraler Wärmespeicher 184
 Speichergröße 189
 Speicherwasserkraftwerke 259
 Stadtgas 332
 Standardtestbedingungen 135
 Standby-Verluste 75
 STC 135
 Steinkohleeinheit 379
 Stirling-Motor 208
 Stratosphäre 57
 Stromerzeugung 127
 Stromerzeugungskosten
 Photovoltaik 160
 Windkraft 245
 Stromexport 127
 Stromimport 220
 Strompreise 125
 Strömungsverlauf, Windkraftanlage 227
 Stromverbrauch 77
 Stromversorgung 118, 120, 123

T
 tektonische Platten 273
 Temperaturänderung 45, 54, 59
 Thermosiphonanlage 179
 Tiefenbohrung 274
 Tiefengeothermie *siehe* Geothermie
 Tiefengradient 273
 Tiefentemperaturen 274
 Transport 83
 Treibhauseffekt 50
 Treibhausgase 58
 Treibhauspotenziale
 Kältemittel 296
 Treibhausgase 56
 Trinkwassererwärmung 180, 188
 Tschernobyl 24
 Turbine
 Bulb 255
 Francis 256
 Kaplan 255
 Ossberger 257
 Pelton 256
 Rohr 255
 Turmkraftwerk 206

U
 Übertragungsnetz 123
 Umsatzsteuer 162
 Untertagespeicher 339
 Uranvorkommen 39
 U-Wert 82

V
 Vakuumdämmstoffe 81
 Vakuum-Flachkollektor 176
 Vakuum-Röhrenkollektor 175
 Vakuumverglasungen 81
 Verkehr 115
 Verkehrssektor 83, 115
 Verteilnetz 123
 volumetrischer Receiver 206

W
 Wafer 137
 Wärmepumpe 114, 285
 Absorption 290
 Adsorption 290
 Funktionsprinzip 288
 Kältemittel 288
 Kompression 288
 Leistungszahl 287
 Märkte 298
 Ökologie 296
 Ökonomie 294

- Wärmequellen 286
Wärmequellen für Wärmepumpen 286
Wärmerohr 176
Wärmestrahlung 174
Wärmetauscher 176
Wärmeverluste 81
WärmeverSORGUNG 112, 113
Warmzeit 43
Wasserkochen 73
Wasserkraft 251
Gezeitenkraftwerke 262
Laufwasserkraftwerke 257
Märkte 268
Meeresströmungskraftwerke 263
Ökologie 267
Ökonomie 266
Pumpspeicherkraftwerke 260
Speicherwasserkraftwerke 259
Turbinen 254
Wellenkraftwerke 262
WASSERKREISLAUF DER ERDE 252
Wasserstoff 333
Ökologie 345
Ökonomie 344
Speicherung 337
Wasserturbinen 254
Wellenkraftwerke 262
Weltbevölkerung 108
Widerstandsprinzip 227
Wind 223
Windgas 332
Windgeschwindigkeit 224, 242
Windgeschwindigkeitsrekorde 226
- Wind-Inselsystem 230
Windkraft 221
Anlagenaufbau 232
Auftriebsprinzip 228
Auslegung 241
Energiewende 119
Märkte 247
netzgekoppelte Anlagen 231
Offshore 237
Ökologie 246
Ökonomie 243
Planung 241
Windlader 229
Windlader 229
Windpark 236
Wirkungsgrad
Biomassekraftwerk 313
Biomassewachstum 302
Brennstoffzelle 343
Dampfturbinenprozess 205
Kamine und Kaminöfen 308
Kollektor 171
Methanisierung 337
offener Kamin 308
ORC-Kraftwerk 278
Photovoltaik 134
Scheitholzkessel 309
World Solar Challenge 359

Z

- Zugdrachen 363