

Volker Quaschnig

Erneuerbare Energien und Klimaschutz

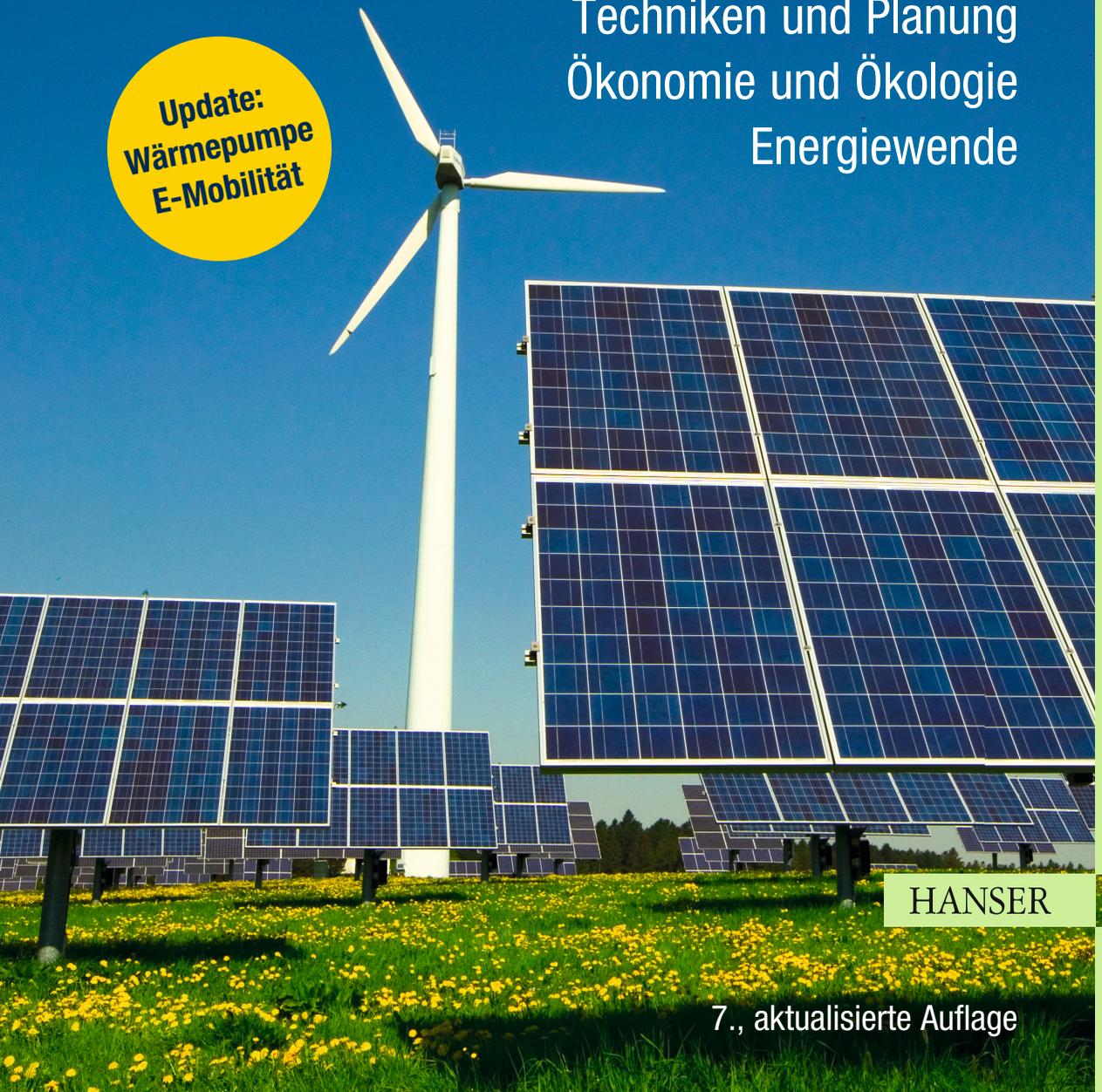
Hintergründe

Techniken und Planung

Ökonomie und Ökologie

Energiewende

Update:
Wärmepumpe
E-Mobilität



HANSER

7., aktualisierte Auflage

Quaschning
Erneuerbare Energien und Klimaschutz



Bleiben Sie auf dem Laufenden!

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

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Volker Quaschnig

Erneuerbare Energien und Klimaschutz

Hintergründe – Techniken und Planung –
Ökonomie und Ökologie – Energiewende

7., aktualisierte Auflage

HANSER

Über den Autor:

Prof. Dr.-Ing. Volker Quaschnig, Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) Berlin



Print-ISBN: 978-3-446-47976-0

E-Book-ISBN: 978-3-446-48108-4

Alle in diesem Werk enthaltenen Informationen, Verfahren und Darstellungen wurden zum Zeitpunkt der Veröffentlichung nach bestem Wissen zusammengestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Werk enthaltenen Informationen für Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht. Ebenso wenig übernehmen Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt also auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Die endgültige Entscheidung über die Eignung der Informationen für die vorgesehene Verwendung in einer bestimmten Anwendung liegt in der alleinigen Verantwortung des Nutzers.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

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

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Werkes, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 UrhG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Wir behalten uns auch eine Nutzung des Werks für Zwecke des Text- und Data Mining nach § 44b UrhG ausdrücklich vor.

© 2025 Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München

www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Dr. Philippa Söldenwagner-Koch

Herstellung: Eberl & Koesel Studio, Kempten

Covergestaltung: Max Kostopoulos

Titelmotiv: © stock.adobe.com/VRD

Satz: le-tex publishing services GmbH, Leipzig

Druck: CPI Books GmbH, Leck

Printed in Germany

Inhalt

Vorwort zur 1. Auflage	XV
Vorwort zur 7. Auflage	XVII
1 Unser Hunger nach Energie	1
1.1 Energieversorgung – gestern und heute	2
1.1.1 Von der französischen Revolution bis ins 20. Jahrhundert	2
1.1.2 Die Epoche des schwarzen Goldes	5
1.1.3 Erdgas – der jüngste fossile Energieträger	8
1.1.4 Atomkraft – gesplattene Energie	10
1.1.5 Das Jahrhundert der fossilen Energieträger	15
1.1.6 Das erneuerbare Jahrhundert	16
1.2 Energiebedarf – wer was wo und wie viel verbraucht	17
1.3 Die SoDa-Energie	21
1.4 Energievorräte – Reichtum auf Zeit	24
1.4.1 Nicht-konventionelle Vorräte – Verlängerung des Ölzeitalters	25
1.4.2 Ende in Sicht	27
1.4.3 Das Ende der Spaltung	29
1.5 Hohe Energiepreise – Schlüssel für den Klimaschutz	29
2 Klima vor dem Kollaps	33
2.1 Es ist warm geworden – Klimaveränderungen heute	34
2.1.1 Immer schneller schmilzt das Eis	34
2.1.2 Naturkatastrophen kommen häufiger	36

2.2	Schuldige gesucht – Gründe für den Klimawandel	40
2.2.1	Der Treibhauseffekt	40
2.2.2	Hauptverdächtiger Kohlendioxid	42
2.2.3	Andere Übeltäter	46
2.3	Aussichten und Empfehlungen – was kommt morgen?	50
2.3.1	Wird es in Europa bitterkalt?	52
2.3.2	Empfehlungen für einen wirksamen Klimaschutz	55
2.4	Schwere Geburt – Politik und Klimawandel	58
2.4.1	Deutsche Klimapolitik	58
2.4.2	Klimapolitik international	59
2.5	Selbsthilfe zum Klimaschutz	62
3	Vom Energieverschwenden zum Energie- und Kohlendioxidsparen	65
3.1	Wenig effizient – Energiever(sch)wendung heute	66
3.2	Privater Energiebedarf – zu Hause leicht gespart	69
3.2.1	Private Elektrizität – viel Geld verschleudert	69
3.2.2	Wärme – fast ohne Heizen durch den Winter	73
3.2.3	Transport – mit weniger Energie weiterkommen	78
3.3	Industrie und Co. – schuld sind doch nur die anderen	81
3.4	Die eigene Kohlendioxidbilanz	82
3.4.1	Direkt selbst verursachte Emissionen	82
3.4.2	Indirekt verursachte Emissionen	84
3.4.3	Gesamtemissionen	86
3.5	Ökologischer Ablasshandel	87
4	Die Energiewende – der Weg in eine bessere Zukunft?	91
4.1	Kohle- und Kernkraftwerke – Krücke statt Brücke	92
4.1.1	Energie- und Automobilkonzerne – aufs falsche Pferd gesetzt	92
4.1.2	Unterschätzter Klimakiller Erdgas	97
4.1.3	Kohlendioxidsequestrierung – aus dem Auge, aus dem Sinn	98
4.1.4	Atomkraft – Comeback strahlend gescheitert	101
4.2	Effizienz und KWK – ein gutes Doppel für den Anfang	103
4.2.1	Kraft-Wärme-Kopplung – nur ohne Erdgas eine gute Lösung	103
4.2.2	Energiesparen – mit weniger mehr erreichen	104

4.3	Regenerative Energiequellen – Angebot ohne Ende	106
4.4	Deutschland wird erneuerbar	108
4.4.1	Der Elektrizitätssektor wird erneuerbar	109
4.4.2	Auf alle Sektoren kommt es an	110
4.4.3	Energiewende im Wärmesektor	113
4.4.4	Energiewende im Verkehrssektor	117
4.4.5	Nötige Ausbaupfade für regenerative Energien	119
4.4.6	Sichere Energieversorgung mit regenerativen Energien	122
4.5	Gar nicht so teuer – die Mär der unbezahlbaren Kosten	127
4.6	Energierévolution statt laue Energiewende	131
4.6.1	Deutsche Energiepolitik – im Schatten der Konzerne	131
4.6.2	Bürgerenergie und Klimajobwunder	133
5	Photovoltaik – Strom aus Sand	137
5.1	Aufbau und Funktionsweise	138
5.1.1	Elektronen, Löcher und Raumladungszonen	138
5.1.2	Wirkungsgrad, Kennlinien und der MPP	140
5.2	Herstellung von Solarzellen – vom Sand zur Zelle	143
5.2.1	Siliziumsolarzellen – Strom aus Sand	143
5.2.2	Von der Zelle zum Modul	145
5.2.3	Dünnschichtsolarzellen	147
5.3	Photovoltaikanlagen – Netze und Inseln	148
5.3.1	Sonneninseln	148
5.3.2	Sonne am Netz	151
5.3.3	Sonnenbalkons	155
5.3.4	Mehr solare Unabhängigkeit	157
5.4	Planung und Auslegung	160
5.4.1	Geplante Inseln	160
5.4.2	Geplant am Netz	162
5.4.3	Geplante Autonomie	166
5.5	Ökonomie	168
5.5.1	Was kostet sie denn?	169
5.5.2	Förderprogramme	171
5.5.3	Es geht auch ohne Steuern	172

5.6	Ökologie	174
5.7	Photovoltaikmärkte	175
5.8	Ausblick und Entwicklungspotenziale	176
6	Solarthermieranlagen – mollig warm mit Sonnenlicht	179
6.1	Aufbau und Funktionsweise	181
6.2	Solkollektoren – Sonnensammler	183
6.2.1	Schwimmbadabsorber	183
6.2.2	Flachkollektoren	184
6.2.3	Luftkollektoren	185
6.2.4	Vakuum-Röhrenkollektor	186
6.3	Solarthermische Anlagen	188
6.3.1	Warmes Wasser von der Sonne	188
6.3.1.1	Schwerkraftsysteme	189
6.3.1.2	Systeme mit Zwangsumlauf	190
6.3.2	Heizen mit der Sonne	192
6.3.3	Solare Siedlungen	194
6.3.4	Kühlen mit der Sonne	195
6.3.5	Schwimmen mit der Sonne	197
6.3.6	Kochen mit der Sonne	198
6.4	Planung und Auslegung	199
6.4.1	Solarthermische Trinkwassererwärmung	199
6.4.1.1	Grobauslegung	199
6.4.1.2	Detaillierte Auslegung	200
6.4.2	Solarthermische Heizungsunterstützung	202
6.5	Ökonomie	204
6.5.1	Wann rechnet sie sich denn?	204
6.5.2	Förderprogramme	206
6.6	Ökologie	206
6.7	Solarthermiemärkte	207
6.8	Ausblick und Entwicklungspotenziale	209

7	Solkraftwerke – noch mehr Kraft aus der Sonne	211
7.1	Konzentration auf die Sonne	212
7.2	Solare Kraftwerke	214
7.2.1	Parabolrinnenkraftwerke	214
7.2.2	Solarturmkraftwerke	218
7.2.3	Dish-Stirling-Kraftwerke	221
7.2.4	Aufwindkraftwerke	222
7.2.5	Konzentrierende Photovoltaikkraftwerke	223
7.2.6	Solare Chemie	224
7.3	Planung und Auslegung	225
7.3.1	Konzentrierende solarthermische Kraftwerke	226
7.3.2	Aufwindkraftwerke	227
7.3.3	Konzentrierende Photovoltaikkraftwerke	227
7.4	Ökonomie	228
7.5	Ökologie	229
7.6	Solkraftwerksmärkte	230
7.7	Ausblick und Entwicklungspotenziale	231
8	Windkraftwerke – luftiger Strom	235
8.1	Vom Winde verweht – woher der Wind kommt	237
8.2	Nutzung des Windes	239
8.3	Anlagen und Parks	243
8.3.1	Windlader	243
8.3.2	Große netzgekoppelte Windkraftanlagen	245
8.3.3	Kleinwindkraftanlagen	249
8.3.4	Windparks	250
8.3.5	Offshore-Windparks	251
8.4	Planung und Auslegung	255
8.5	Ökonomie	258
8.6	Ökologie	262
8.7	Windkraftmärkte	263
8.8	Ausblick und Entwicklungspotenziale	265

9	Wasserkraftwerke – nasser Strom	267
9.1	Anzapfen des Wasserkreislaufs	268
9.2	Wasserturbinen	270
9.3	Wasserkraftwerke	273
9.3.1	Laufwasserkraftwerke	273
9.3.2	Speicherwasserkraftwerke	275
9.3.3	Pumpspeicherkraftwerke	276
9.3.4	Gezeitenkraftwerke	278
9.3.5	Wellenkraftwerke	279
9.3.6	Meeresströmungskraftwerke	280
9.4	Planung und Auslegung	281
9.5	Ökonomie	283
9.6	Ökologie	283
9.7	Wasserkraftmärkte	285
9.8	Ausblick und Entwicklungspotenziale	286
10	Geothermie – tiefgründige Energie	287
10.1	Anzapfen der Erdwärme	288
10.2	Geothermieheizwerke und Geothermiekraftwerke	292
10.2.1	Geothermische Heizwerke	292
10.2.2	Geothermische Stromerzeugung	293
10.2.3	Geothermische HDR-Kraftwerke	295
10.3	Planung und Auslegung	297
10.4	Ökonomie	297
10.5	Ökologie	299
10.6	Geothermiamärkte	299
10.7	Ausblick und Entwicklungspotenziale	300
11	Wärmepumpen – aus kalt wird heiß	303
11.1	Wärmequellen für Niedertemperaturwärme	304
11.2	Funktionsprinzip von Wärmepumpen	306
11.2.1	Kompressionswärmepumpen	306
11.2.2	Absorptionswärmepumpen und Adsorptionswärmepumpen	308
11.3	Planung und Auslegung	309
11.3.1	Luft-Wasser- und Luft-Luft-Wärmepumpen	310

11.3.2	Sole-Wasser- und Wasser-Wasser-Wärmepumpen	313
11.3.3	Wärmepumpen im Altbau	315
11.4	Ökonomie	317
11.5	Ökologie	319
11.6	Wärmepumpenmärkte	322
11.7	Ausblick und Entwicklungspotenziale	323
12	Biomasse – Energie aus der Natur	325
12.1	Entstehung und Nutzung von Biomasse	326
12.2	Biomasseheizungen	329
12.2.1	Brennstoff Holz	330
12.2.2	Kamine und Kaminöfen	333
12.2.3	Scheitholzessel	335
12.2.4	Holzpelletsheizungen	336
12.3	Biomasseheizwerke und Biomassekraftwerke	338
12.4	Biotreibstoffe	340
12.4.1	Bioöl	340
12.4.2	Biodiesel	341
12.4.3	Bioethanol	342
12.4.4	BtL-Kraftstoffe	343
12.4.5	Biogas	344
12.5	Planung und Auslegung	345
12.5.1	Scheitholzessel	345
12.5.2	Holzpelletsheizung	346
12.6	Ökonomie	348
12.7	Ökologie	351
12.7.1	Feste Brennstoffe	351
12.7.2	Biotreibstoffe	353
12.8	Biomassemärkte	354
12.9	Ausblick und Entwicklungspotenziale	356
13	Erneuerbare Gase, E-Fuels und Brennstoffzellen	357
13.1	Energieträger Wasserstoff	360
13.2	Methanisierung	364
13.3	E-Fuels	365

13.4	Transport und Speicherung von EE-Gasen	367
13.4.1	Transport und Speicherung von Wasserstoff	367
13.4.2	Transport und Speicherung von erneuerbarem Methan	369
13.5	Brennstoffzellen – aus Gas wird Strom	371
13.6	Ökonomie	375
13.7	Ökologie	377
13.8	Märkte, Ausblick und Entwicklungspotenziale	378
14	Sonnige Aussichten – Beispiele für eine nachhaltige Energieversorgung	381
14.1	Klimaverträglich wohnen	381
14.1.1	Plusenergie-Solarhaus	382
14.1.2	Plusenergiehaus-Siedlung	383
14.1.3	Heizen nur mit der Sonne	384
14.1.4	Null Heizkosten nach Sanierung	385
14.1.5	Sanieren in Rekordtempo	386
14.1.6	Wärmepumpen im Altbau	387
14.1.7	Fernwärme zukunftsfest machen	388
14.2	Klimaverträglich arbeiten und produzieren	389
14.2.1	Büros und Läden im Sonnenschiff	389
14.2.2	Nullmissionsfabrik	390
14.2.3	Kohlendioxidfreie Schwermaschinenfabrik	390
14.2.4	Plusenergie-Firmenzentrale	391
14.2.5	Nullenergie-Hotel	392
14.3	Klimaverträglich reisen	393
14.3.1	Rasanter Aufstieg der Elektroautos	393
14.3.2	Weltumrundung im Solarmobil	394
14.3.3	In dreiunddreißig Stunden quer durch Australien	395
14.3.4	Solar geladen	396
14.3.5	Renaissance der Nachtzüge	398
14.3.6	Moderne Segelschiffahrt	399
14.3.7	Solarfähre am Bodensee	400
14.3.8	Elektrische Fähren in Norwegens Fjorden	401
14.3.9	Höhenweltrekord mit Solarflugzeug	402

14.3.10	Mit dem Solarflugzeug um die Erde	403
14.3.11	Klimaneutrales Fliegen	404
14.4	Alles wird erneuerbar	405
14.4.1	Ein Dorf wird unabhängig	405
14.4.2	Hybridkraftwerk für die sichere regenerative Versorgung	406
14.5	Happy End	407
15	Anhang	415
15.1	Energieeinheiten und Vorsatzzeichen	415
15.2	Geografische Koordinaten von Energieanlagen	416
15.3	Weiterführende Informationen im Internet	421
	Literatur	423
	Index	427

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 aufgezeigt, 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 Energiesparmaßnahmen 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 7. 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. Bei Energiewendetechnologien und den Auswirkungen der Klimakrise sind die Entwicklungen derzeit sehr dynamisch. Bei der Photovoltaik und bei Wärmepumpen sind die Zubauzahlen besonders stark gestiegen. Die siebte Auflage wurde darum umfassend aktualisiert. Sie enthält alle aktuellen Daten zu erneuerbaren Energien, Energiewende und Klimaschutz. Das Buch zeigt Wege auf, wie Deutschland seinen Beitrag für das Einhalten des Pariser Klimaschutzabkommens leisten und so die Lebensgrundlagen der künftigen Generationen bewahren kann. Es bleibt zu hoffen, dass dieses Buch Anstöße geben kann, die Energiewende auf das nötige Tempo zu steigern. Ein besonderer Dank gilt Bernhard Siegel sowie den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Hanser Verlags für die perfekte Unterstützung bei der Aktualisierung des Buchs.

Berlin, im Sommer 2024

Prof. Dr. Volker Quaschnig

Hochschule für Technik und Wirtschaft HTW Berlin

www.volker-quaschnig.de

1

Unser Hunger nach Energie

Wer kennt sie nicht, die TV-Kultserie Raumschiff Enterprise. Dank ihr wissen wir bereits heute, dass man sich in nicht allzu ferner Zukunft aufmachen wird, die unendlichen Weiten des Weltraums zu erforschen. Die Energiefrage ist dann längst gelöst. Der im Jahr 2063 erfundene Warpantrieb liefert unbegrenzt Energie, mit der Captain Kirk sein Raumschiff Enterprise mit Überlichtgeschwindigkeit zu neuen Abenteuern steuern kann. Energie ist im Überfluss vorhanden, auf der Erde herrschen Friede und Wohlstand und Umweltprobleme gibt es nicht mehr. Doch vollkommen gefahrlos ist auch diese Art der Energieversorgung nicht. Einen Warpkernebruch schaut man sich am besten aus sicherer Entfernung an, wie seinerzeit den Super-GAU eines antiken Kernkraftwerks. Und auch das Warpplasma ist eine nicht ganz ungefährliche Materie, wie das regelmäßige Fernsehserienpublikum zu berichten weiß.

Leider – oder manchmal auch zum Glück – sind die Fiktionen der Traumfabriken weit vom wirklichen Leben entfernt. Die Erfindung des Warpantriebs erscheint aus heutiger Sicht recht unwahrscheinlich, auch wenn dies eingefleischte Star-Trek-Fans anders sehen mögen. Derzeit ist man noch nicht einmal ansatzweise in der Lage, die vergleichsweise simple Kernfusion zu beherrschen. Somit müssen wir zur Lösung unseres Energieproblems auf heute bekannte und auch funktionierende Techniken mitsamt ihren Problemen zurückgreifen.

In der Realität hatte die Energienutzung schon immer spürbare Einflüsse auf die Umwelt. Die aus heutiger Sicht mangelhafte Verbrennung von Holz und die damit verbundenen gesundheitsschädlichen Abgase rund um die Feuerstätten haben beispielsweise die Lebenserwartung unserer Vorfahrinnen und Vorfahren deutlich reduziert. Eine schnell steigende Weltbevölkerung, zunehmender Wohlstand und der damit verbundene Energiehunger haben den Bedarf an Energie sprunghaft ansteigen lassen. Waren die durch den Energiebedarf ausgelösten Umweltprobleme bislang stets regional begrenzt, haben die Auswirkungen unseres Energiehungers mittlerweile eine globale Dimension erreicht. Das globale Klima droht chaotische Verhältnisse anzunehmen. Unser Energieverbrauch ist dabei Hauptauslöser der weltweiten Klimaerwärmung.

Resignation oder Furcht sind aber die falschen Antworten auf die immer größer werdenden Probleme. Es gibt Alternativen zur heutigen Energieversorgung. Es ist möglich, eine langfristig sichere und bezahlbare Energieversorgung aufzubauen, die nur minimale und beherrschbare Umweltauswirkungen haben wird. Dieses Buch beschreibt, wie diese Energieversorgung aussehen muss und welchen Beitrag alle Einzelnen leisten können, damit wir doch noch gemeinsam das Klima retten können. Zuerst ist es aber erforderlich, die Ursachen der heutigen Probleme näher zu betrachten.

1.1 Energieversorgung – gestern und heute

1.1.1 Von der französischen Revolution bis ins 20. Jahrhundert

Zu Zeiten der französischen Revolution, also gegen Ende des 18. Jahrhunderts, war in Europa die tierische Muskelkraft die wichtigste Energiequelle. Damals standen 14 Millionen Pferde und 24 Millionen Rinder mit einer Gesamtleistung von rund 7,5 Milliarden Watt als Arbeitstiere zur Verfügung [Köni99]. Dies entspricht immerhin der Leistung von mehr als 100 000 Mittelklasseautos.



Leistung und Energie oder andersherum

Die Begriffe Leistung und Energie hängen untrennbar zusammen. Obwohl alle die Unterschiede schon mal im Physikunterricht gehört haben sollten, werden beide Begriffe gerne verwechselt und fehlerhaft verwendet.

Die *Energie* ist die gespeicherte Arbeit, also die Möglichkeit Arbeit zu verrichten. Energie heißt auf Englisch „energy“ und trägt das Formelzeichen E . Die Arbeit heißt auf Englisch „work“ und wird mit dem Formelzeichen W abgekürzt.

Die *Leistung* (engl.: „power“, Formelzeichen: P) gibt an, in welcher Zeit die Arbeit verrichtet oder die Energie verbraucht wird.

$$P = \frac{W}{t} \left(\text{Leistung} = \frac{\text{Arbeit}}{\text{Zeit}} \right)$$

Wenn zum Beispiel eine Person einen Eimer Wasser hochhebt, ist dies eine Arbeit. Durch die verrichtete Arbeit wird die Lageenergie des Wassereimers vergrößert. Wird der Eimer doppelt so schnell hochgehoben, ist die benötigte Zeit geringer, die Leistung ist doppelt so groß, auch wenn die Arbeit die gleiche ist.

Die Einheit der Leistung ist Watt (Abkürzung: W). Für die Abkürzung der Einheit Watt wird der gleiche Buchstabe wie für das Formelzeichen der Arbeit verwendet, was die Unterscheidung nicht gerade erleichtert.

Die Einheit der Energie ist Wattsekunde (Ws) oder Joule (J). Daneben werden noch andere Einheiten verwendet. Anhang 15.1 beschreibt eine Umrechnung zwischen verschiedenen Energieeinheiten.

Da die benötigten Leistungen und Energien oft sehr groß sind, werden häufig Vorsatzzeichen wie Mega (M), Giga (G), Tera (T), Peta (P) oder Exa (E) verwendet (vgl. Anhang 15.1).

Das zweite Standbein der damaligen Energieversorgung war Brennholz – und zwar mit strategischer Bedeutung. Heute geht man davon aus, dass die Verlagerung des Machtzentrums aus dem Mittelmeerraum in die Gebiete nördlich der Alpen unter anderem auf den dortigen Waldreichtum und die damit verbundenen Energiepotenziale zurückzuführen ist. Nachdem die islamische Welt noch bis ins 15. Jahrhundert auf der iberischen Halbinsel eine Vormachtstellung bewahren konnte, schwand ihr Einfluss unter anderem durch Holzmangel. Es fehlte zunehmend an Brennholz zum Einschmelzen von Metall für Schiffskanonen und andere Waffen. Energiekrisen sind also nicht erst eine Erfindung des späten 20. Jahrhunderts.

Neben Muskelkraft und Brennholz wurden bis in die Anfänge des 20. Jahrhunderts auch andere erneuerbare Energien intensiv genutzt (Bild 1.1). Ende des 18. Jahrhunderts waren in Europa zwischen 500 000 und 600 000 Wassermühlen im Einsatz. Die Windkraftnutzung fand vor allem in flachen Gegenden mit hohem Windangebot Verbreitung. In den vereinigten Niederlanden waren zum Beispiel Ende des 17. Jahrhunderts rund 8000 Windmühlen in Betrieb.



Bild 1.1 Brennholz, Arbeitstiere, Wind- und Wasserkraft deckten noch im 18. Jahrhundert weitgehend die weltweite Energieversorgung.

Fossile Energieträger waren lange Zeit nur von untergeordneter Bedeutung. Steinkohle aus Lagerstätten unter der Erdoberfläche war als Energieträger zwar durchaus bekannt, wurde jedoch weitgehend gemieden. Erst als der Mangel an Holz in einigen Ge-

bieten Europas zu Energieengpässen führte, begann man, die Kohlevorkommen zu erschließen. Die höhere Energiedichte der Steinkohle erwies sich außerdem als vorteilhaft bei der Stahlherstellung. Ihr Vormarsch ließ sich nicht mehr bremsen: Während um das Jahr 1800 noch 60 Prozent der Steinkohle in Haushalten für Heizzwecke dienten, überwog bereits 40 Jahre später der Einsatz in Eisenhütten und in der Produktion.



Fossile Energieträger – gespeicherte Sonnenenergie

Fossile Energieträger sind konzentrierte Energieträger, die in sehr langen Zeiträumen aus tierischen oder pflanzlichen Überresten entstanden sind. Zu den fossilen Energieträgern zählen Erdöl, Erdgas, Steinkohle, Braunkohle und Torf. Die Ausgangsstoffe fossiler Energieträger konnten nur durch Umwandlung von Sonnenstrahlung über Jahrtausende entstehen. Somit sind fossile Energieträger eine Form von gespeicherter Sonnenenergie.

Chemisch gesehen basieren fossile Energieträger auf organischen Kohlenstoff-Verbindungen. Bei der Verbrennung mit Sauerstoff entsteht daher nicht nur Energie in Form von Wärme, sondern immer auch das Treibhausgas Kohlendioxid sowie weitere Verbrennungsprodukte.

Um 1530 förderten Kohlebergwerke in Großbritannien ungefähr 200 000 Tonnen, um 1750 etwa 5 Millionen Tonnen und im Jahr 1854 bereits 64 Millionen Tonnen. Hauptkohleförderländer waren neben Großbritannien die USA und Deutschland, die um das Jahr 1900 gemeinsam einen Anteil von 80 Prozent an der Weltproduktion besaßen [Köni99].



Erneuerbare Energien – gar nicht so neu

Die Vorkommen an fossilen Energieträgern wie Erdöl, Erdgas oder Kohle sind begrenzt. Sie werden in einigen Jahrzehnten verbraucht und damit einfach weg sein. Erneuerbare Energieträger „erneuern“ sich hingegen von selbst. Entzieht ein Wasserkraftwerk beispielsweise einem Fluss die Kraft des Wassers, hört dadurch der Fluss nicht auf zu fließen. Der Energiegehalt des Flusses erneuert sich von selbst, indem die Sonne Wasser verdunstet und der Regen den Fluss wieder speist.

Erneuerbare Energien werden auch als regenerative Energien oder alternative Energien bezeichnet. Andere erneuerbare Energieformen sind beispielsweise Windenergie, Biomasse, Erdwärme oder Sonnenenergie. Auch die Sonne wird in rund 4 Milliarden Jahren einmal erloschen sein. Verglichen mit den wenigen Jahrzehnten, die uns fossile Energieträger noch zur Verfügung stehen, ist dieser Zeitraum aber nahezu unendlich groß.

Übrigens werden erneuerbare Energien bereits wesentlich länger genutzt als fossile Energieträger, obwohl zwischen traditionellen und heutigen Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien technologische Quantensprünge liegen. Neu sind erneuerbare Energien deshalb dennoch nicht – nur die Erkenntnis, dass erneuerbare Energien langfristig die einzige Option für eine sichere und umweltverträgliche Energieversorgung sind.

Ende des 20. Jahrhunderts stieg die weltweite Kohleförderung schließlich auf annähernd 4 Milliarden Tonnen an. Die Kohleförderung in Deutschland und in Großbritannien hat mit einem Anteil von unter drei Prozent am Weltmarkt ihre einstige Vormachtstellung verloren. Kraftwerke zur Stromerzeugung nutzen heute einen Großteil der Kohle. Hauptförderländer sind derzeit mit deutlichem Abstand China und die USA.

1.1.2 Die Epoche des schwarzen Goldes

Wie Kohle besteht Erdöl aus Umwandlungsprodukten von tierischen und pflanzlichen Stoffen, der Biomasse der Urzeit. Über einen Zeitraum von Millionen von Jahren lagerten sich Plankton und andere Einzeller in wenig durchlüfteten Meeresbecken ab und wurden eingeschlossen. Aufgrund von Sauerstoffmangel konnten sie sich nicht zersetzen. Chemische Umwandlungsprozesse machten aus ihnen schließlich Erdöl und Erdgas. Die ursprünglich eingelagerte Biomasse hat wiederum ihren Ursprung in der Sonne, sodass die fossilen Energieträger wie Kohle, Erdöl oder Erdgas nichts anderes als Langzeitkonserven der Sonnenenergie sind. Die ältesten Öllagerstätten sind etwa 350 Millionen Jahre alt. Das Gebiet um den Persischen Golf, wo heute das meiste Öl gefördert wird, lag noch vor 10 bis 15 Millionen Jahren vollständig unter dem Meeresspiegel.

Die Erschließung von Erdölvorkommen erfolgte wesentlich später als die der Steinkohlevorkommen. Heute kaum mehr vorstellbar, doch lange Zeit mangelte es an sinnvollen Anwendungen für den flüssigen Energieträger. Anfangs schmierte man Erdöl auf die Haut, um Hauterkrankungen zu heilen. Seine leichte Entzündlichkeit im Vergleich zu Stein- und Holzkohle gaben Erdöl den Ruf eines äußerst gefährlichen Brennstoffs. In kleinen Mengen wurde Erdöl bereits vor Jahrtausenden als Heil- und Beleuchtungsmittel verwendet. Die Petroleumlampe und später die Erfindung von Verbrennungsmotoren brachten Ende des 19. Jahrhunderts schließlich den Durchbruch.

Der eigentliche Beginn der industriellen Mineralölförderung war im August 1859. In diesem Jahr stieß der Amerikaner Edwin L. Drake in der Nähe von Titusville im amerikanischen Bundesstaat Pennsylvania bei einer Bohrung in etwa 20 Metern Tiefe auf Erdöl. Besonders ein Name verbindet sich mit der weiteren Erdölförderung in Amerika: John Davison Rockefeller. Er gründete 1862 im Alter von 23 Jahren eine Erdölfirma, aus der die Standard Oil und später die Exxon Corporation hervorgingen, und vereinigte große Bereiche der amerikanischen Ölwirtschaft.

Es dauerte dennoch bis ins 20. Jahrhundert hinein, bis fossile Energieträger und speziell das Erdöl den Energiemarkt beherrschten. Im Jahr 1860 wurden weltweit gerade einmal 100 000 Tonnen Öl gefördert. 1895 waren es bereits 14 Millionen Tonnen. Nach einer Gewerbestatistik des Deutschen Reichs aus dem Jahr 1895 waren 18362 Wind-

motoren, 54529 Wassermotoren, 58530 Dampfmaschinen und 21350 Verbrennungskraftmaschinen im Einsatz [Gas05]. Die Hälfte der Antriebsaggregate wurde selbst damals noch mit regenerativen Energieträgern betrieben.

Im 20. Jahrhundert stieg die Erdölförderung sehr stark an. Im Jahr 1929 kletterte sie bereits auf über 200 Millionen Tonnen, um dann in den 1970er-Jahren auf über 3000 Millionen Tonnen emporzuschnellen (Bild 1.2). Heute ist Erdöl der wichtigste Energieträger der meisten Industrieländer. Der durchschnittliche Verbrauch in Deutschland liegt bei über 1400 Litern Erdöl pro Jahr pro Person – Kleinkinder und Rentner:innen eingeschlossen. Das entspricht etwa 10 Badewannen.

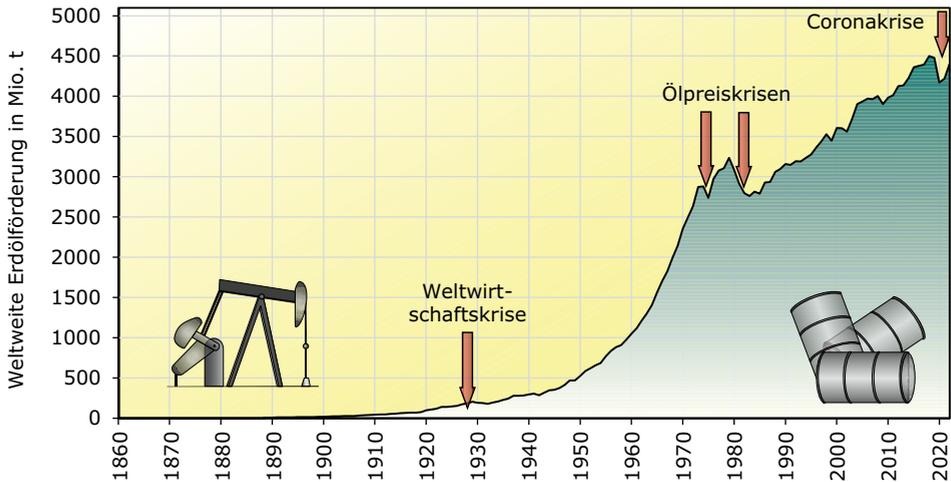


Bild 1.2 Erdölförderung seit dem Jahr 1860

Die große Abhängigkeit von einem Energieträger kann für eine Gesellschaft durchaus problematisch sein, wie uns die Vergangenheit vor Augen geführt hat. 1960 wurde die Organisation der Erdölexportländer OPEC (Organization of the Petroleum Exporting Countries) gegründet. Das Ziel der OPEC, deren Sitz sich in Wien befindet, ist die Koordinierung und Vereinheitlichung der Erdölpolitik der Mitgliedsländer. Hierzu zählen Algerien, Ecuador, Gabun, Indonesien, Irak, Iran, Katar, Kuwait, Libyen, Nigeria, Saudi-Arabien, Venezuela und die Vereinigten Arabischen Emirate. Zusammen kontrollierten sie Ende des 20. Jahrhunderts etwa 40 Prozent der weltweiten Erdölförderung. Als Folge des Jom-Kippur-Kriegs zwischen Israel, Syrien und Ägypten setzten die OPEC-Staaten im Jahr 1973 eine Verknappung der Fördermengen durch. Die Folge war die erste Ölkrise mit drastisch gestiegenen Ölpreisen. Ausgelöst durch Förderausfälle und Verunsicherung nach der Revolution im Iran und dem folgenden ersten Golfkrieg kam es im Jahr 1979 zur zweiten Ölkrise mit Ölpreisen von bis zu 38 US-Dollar pro Barrel.

Drastisch gestiegene Erdölpreise warfen das Trendwachstum der Weltwirtschaft und des Energieverbrauchs um etwa vier Jahre zurück. Die Industrienationen, die stets

niedrige Ölpreise gewohnt waren, reagierten geschockt. Autofreie Sonntage und Förderprogramme zur Nutzung erneuerbarer Energien waren die Folge. Differenzen zwischen den einzelnen OPEC-Staaten führten wieder zu steigenden Förderquoten und zu einem starken Preisverfall Ende der 1980er-Jahre. Damit verringerte sich auch das Engagement der Industrienationen zur Nutzung regenerativer Energien wieder stark.



Vom Elsässer Heringsfass zum Erdölbarrel

Die kommerzielle Erdölförderung im europäischen Kulturkreis hat ihren Ursprung in Pechelbronn im Elsass und geht auf das Jahr 1735 zurück. Dort begann man auch, Erdölprodukte in Fässer abzufüllen. Hierzu wählte man gereinigte Heringsstonnen. Gesalzener Hering wurde damals in großen Mengen in Fässern verkauft, sodass diese Fässer vergleichsweise billig waren. Mit zunehmender Ölproduktion wurden später eigens Fässer der eingeführten Größe gefertigt. Den Fassboden strich man blau, um einer Verwechslung mit Fässern für Nahrungsmittel vorzubeugen. Als in den USA die kommerzielle Erdölförderung begann, übernahmen die Unternehmen die Techniken aus dem Elsass. Dazu gehörten auch die Heringsnormfässer, die nun die englische Bezeichnung Barrel für Fass trugen. Seitdem hat sich das Heringsfassvolumen als internationale Maßeinheit für Erdöl gehalten. Die Abkürzung für Barrel lautet bbl, was für „blue barrel“ steht, und bedeutet ein Fass mit blauem Boden.

1 petroleum barrel (US) = 1 bbl (US) = 158987 l (Liter)

Der dramatische Preisverfall für Rohöl von fast 40 US-Dollar pro Barrel auf 10 Dollar führte zu wirtschaftlichen Problemen einiger Förderländer und machte es auch unattraktiv, neue Ölquellen zu erschließen. Im Jahr 1998 konnte die Einigkeit der OPEC-Staaten weitgehend wiederhergestellt werden. Man verständigte sich auf geringere Förderquoten, um einen weiteren Preisverfall zu stoppen. Der Preis stieg, und zwar stärker als anfänglich beabsichtigt. Nun rächten sich die fehlenden Investitionen in Energiesparmaßnahmen. Der Wirtschaftsboom in China und anderen Ländern kurbelte die Nachfrage nach Erdöl weiter an, die nun kaum noch zu decken war. In der Folge kletterten die Ölpreise auf immer neue Rekordhochs. Auch wenn der Ölpreis durch die Finanzkrise zwischenzeitlich stark fiel, sind wegen der begrenzten Vorkommen immer wieder neue Rekordpreise zu erwarten.

Dennoch hat sich seit Anfang der 1980er-Jahre einiges grundlegend geändert. Der Energieverbrauch stagnierte in vielen Industrieländern trotz anhaltenden Wirtschaftswachstums auf hohem Niveau und es setzte sich die Erkenntnis durch, dass Energieverbrauch und Bruttonationaleinkommen nicht zwangsläufig aneinander gekoppelt sind. Steigender Wohlstand ist auch bei stagnierendem oder sinkendem Energieverbrauch möglich. Nichtsdestotrotz wurde wegen der lange Zeit anhaltenden niedrigen Ölpreise versäumt, wirkliche Alternativen aufzubauen und Einsparmöglichkeiten zu nutzen.

Dies zeigt sich vor allem im Automobilsektor. Die Autos wurden schneller, komfortabler, schwerer und PS-stärker, aber nur geringfügig sparsamer. Heute stehen glückliche

Jahreswagenbesitzer:innen mit 50 PS mehr als vor 20 Jahren im Stau, was jedoch durch die Klimaanlage und eine Hightech-Stereoanlage erheblich angenehmer ist. Dafür ist auch der Tank größer, damit das schwerere Auto bei fast gleichem Verbrauch noch den Weg bis zur nächstbilligeren Tankstelle schafft. Als Folge der Klimadiskussion und der hohen Ölpreise müssen nun die Automobilkonzerne im Zeitraffertempo dem Auto Eigenschaften hinzufügen, die in den letzten Jahrzehnten kaum gefragt waren: Sparsamkeit und geringer Ausstoß von Treibhausgasen. Da viele Automobilunternehmen sich mit den neuen Anforderungen schwertun, setzen sie weiterhin auf altbewährte Konzepte: Sie verhindern oder verwässern durch ihren Einfluss auf die Politik die für den Klimaschutz dringend erforderlichen strengen Einsparvorgaben. Oder sie versuchen wie der VW-Konzern mit illegalen Methoden bestehende Vorschriften zu umgehen. Hätte Volkswagen die in den USA gezahlten Strafen in die Entwicklung emissionsfreier Elektroautos gesteckt, wäre das Unternehmen in diesem Bereich sicher weltweit führend und hätte ganz nebenbei einen enormen Beitrag zum Klimaschutz geleistet. Möglicherweise wird sich der VW-Skandal im Nachhinein für Deutschland noch als großer Glücksfall herausstellen. Er hat die technischen Einspargrenzen herkömmlicher Verbrennungsmotoren aufgezeigt und den Umstieg auf Elektroautos erheblich beschleunigt. Am Ende hat er vielleicht sogar verhindert, dass deutsche Autohersteller durch ein kompromissloses Festhalten an alten Technologien international komplett den Anschluss verlieren.

Eigentlich ist Erdöl aber viel zu schade, um es nur zu verbrennen. Neben dem Einsatz als Energieträger, vor allem als Heizöl und Motorkraftstoff, ist Erdöl auch ein wichtiger Rohstoff in der chemischen Industrie. Es dient beispielsweise als Ausgangsstoff zur Herstellung von Kunststoffstühlen, Plastiktüten, Nylonstrümpfen, Polyesterhemden, Duschgels, Duftwässern oder Vitamintabletten.

1.1.3 Erdgas – der jüngste fossile Energieträger

Erdgas gilt als der sauberste fossile Energieträger. Bei der Verbrennung von Erdgas entstehen weniger Schadstoffe und weniger klimaschädliches Kohlendioxid als bei der Verbrennung von Erdöl oder Kohle. Das ändert aber nichts an der Tatsache, dass bei der Verbrennung von Erdgas für einen wirksamen Klimaschutz ebenfalls deutlich zu viele Treibhausgase entstehen. Außerdem werden in der Statistik extrem klimaschädliche Methanemissionen nicht erfasst, welche die Klimabilanz von Erdgas erheblich verschlechtern.

Das Ausgangsmaterial zur Entstehung von Erdgas bildeten meist Landpflanzen in den flachen Küstengewässern der Tropen, zu denen vor 300 Millionen Jahren auch die norddeutsche Tiefebene zählte. Aufgrund fehlenden Sauerstoffs in den Küstensümpfen konnte das organische Material nicht verwesen und es entstand Torf. Mit der Zeit lagerten sich neue Schichten aus Sand und Ton auf dem Torf ab, der sich im Lauf der Jahrmillionen in Braun- und Steinkohle umwandelte. Durch hohe Drücke in

Tiefen von einigen Kilometern und die dort herrschenden Temperaturen von 120 bis 180 Grad entstand daraus dann das Erdgas.

Erdgas ist jedoch nicht gleich Erdgas, sondern ein Gemisch verschiedener Gase, je nach Vorkommen mit ganz unterschiedlicher Zusammensetzung. Der Hauptbestandteil ist Methan. Oft enthält das Gas größere Mengen an Schwefelwasserstoff. Dieser ist giftig und riecht bereits in geringen Konzentrationen extrem nach faulen Eiern. Darum muss Erdgas häufig erst in Erdgasaufbereitungsanlagen mit chemisch-physikalischen Prozessen gereinigt werden. Da in einer Erdgaslagerstätte meist auch Wasser enthalten ist, muss das Gas getrocknet werden, um unnötig hohe Korrosionen in den Erdgasleitungen zu vermeiden.



Bild 1.3 Links: Bau einer Erdgaspipeline in Ostdeutschland, rechts: Erdgasspeicher Rehden, 60 Kilometer südlich von Bremen für 4,2 Milliarden Kubikmeter Erdgas (Fotos: WINGAS GmbH)

Noch in den 1950er-Jahren war Erdgas als Energieträger praktisch bedeutungslos. Erst Anfang der 1960er-Jahre wurde es im größeren Maßstab gefördert und gehandelt. Gründe für die im Vergleich zu Kohle und Erdöl späte Nutzung sind die hohen Bohrtiefen von mehreren Tausend Metern und der aufwendigere Transport. Während Erdöl anfangs noch in Holzfässern transportiert wurde, sind für den Transport von Gasen Druckspeicher oder Pipelines notwendig (Bild 1.3). Heute gibt es Pipelines

mit einer Länge von Tausenden von Kilometern, von den weit abgelegenen Fördergebieten direkt zur Gasheizung im Einfamilienhaus. Auch Deutschland fördert Erdgas, doch werden mittlerweile über 95 Prozent des Bedarfs aus Importen vor allem aus Norwegen, den Niederlanden und Belgien gedeckt.

Die Nachfrage nach Erdgas ist jedoch nicht über das Jahr konstant. In Deutschland ist sie im Winter doppelt so groß wie im Sommer. Da es nicht wirtschaftlich ist, die Förderung im Sommer auf die Hälfte zu drosseln, gibt es riesige Speicher, welche die ungleiche Nachfrage zwischen Sommer und Winter ausgleichen. Hierzu dienen sogenannte Kavernenspeicher und Porenspeicher. Kavernen sind künstlich ausgespülte Hohlräume in Salzstöcken, aus denen das gespeicherte Gas schnell wieder entnommen werden kann, zum Beispiel zur Deckung kurzzeitiger Engpässe. Große Gasmenge lassen sich in Porenspeichern lagern. Hier wird das Gestein wieder mit dem gefüllt, was es über 300 Millionen Jahre gespeichert und in wenigen Jahrzehnten hergegeben hat. Insgesamt sind in Deutschland Speicher mit einem Volumen von über 25 Milliarden Kubikmetern in Betrieb, in Planung oder im Bau. Dies entspricht einem Quader mit einer Grundfläche von 20 mal 20 Kilometern und einer Höhe von über 60 Metern. In absehbarer Zeit wird Methan oder Wasserstoff aus erneuerbaren Energien das fossile Erdgas ersetzen. Bereits die heute existierenden Erdgasspeicher sind ausreichend, um saisonale Schwankungen einer vollständig erneuerbaren Energieversorgung auszugleichen. Erdgasspeicher und -netze werden daher schon sehr bald eine zentrale Rolle bei der Sicherstellung einer künftigen nachhaltigen Energieversorgung spielen.

1.1.4 Atomkraft – gesplattene Energie

Im Dezember 1938 spalteten Otto Hahn und Fritz Straßmann in Berlin-Dahlem, im Kaiser-Wilhelm-Institut für Chemie, auf einem einfachen Experimentiertisch einen Urankern und legten damit den Grundstein für die weitere Erforschung und künftige Nutzung der Kernenergie. Der Experimentiertisch kann übrigens heute im Deutschen Museum in München bewundert werden.

Bei dem Experiment wurde ein Uran-235-Kern durch langsame Neutronen beschossen. Hierbei spaltete sich der Kern und es entstanden zwei atomare Trümmer, Krypton und Barium, sowie zwei bis drei weitere Neutronen. Wenn noch mehr Uran-235 vorhanden ist, können diese neuen Neutronen ebenfalls Urankerne spalten, die wiederum Neutronen freisetzen und somit entsteht eine Kettenreaktion. Ist die Uranmenge ausreichend groß, entsteht durch eine unkontrollierte Kettenreaktion eine Atombombe. Gelingt es, die Geschwindigkeit der Kettenreaktion zu kontrollieren, lässt sich Uran-235 auch als Brennstoff für Kraftwerke nutzen.

Bei der Kernspaltung gibt es einen sogenannten Massendefekt. Die Masse aller Teilchen nach der Spaltung ist geringer als die des ursprünglichen Urankerns. Bei der

vollständigen Spaltung von einem Kilogramm Uran-235 kommt es zu einem Masseverlust von einem einzigen Gramm. Diese verlorene Masse wird dabei vollständig in Energie umgewandelt. Dabei wird eine Energiemenge von 24 Millionen Kilowattstunden frei. Um die gleiche Energiemenge freizusetzen, müsste man rund 3000 Tonnen Kohle verbrennen.



Kernenergienutzung in Deutschland

Die Pariser Verträge vom 5. Mai 1955 gestatteten Deutschland die zivile Nutzung der Kernenergie. Die Erwartungen waren hoch. Es wurde eigens ein Atomministerium geschaffen. Der erste Atomminister hieß Franz Josef Strauß. Am 31. Oktober 1957 nahm Deutschland an der TU München den ersten Forschungsreaktor, das sogenannte Atomei, in Betrieb. Im Juni 1961 speiste das Kernkraftwerk Kahl erstmals Strom in das öffentliche Stromnetz ein. Im Jahr 1972 begannen die kommerziellen Kernkraftwerke Stade und Würgassen mit der Stromlieferung, und im Jahr 1974 wurde mit Biblis der weltweit erste Block mit 1200 Megawatt in Betrieb genommen. Im Jahr 1989 ging das letzte neu errichtete Kraftwerk Neckarwestheim ans Netz. Der Bund hatte bis dahin über 19 Milliarden Euro in die Forschung und Entwicklung der Kernenergie investiert. Die Sorgen der Bevölkerung wegen der Risiken der Kernenergie nahmen jedoch stetig zu und verhinderten den Bau weiterer Kraftwerke. Im Jahr 2000 beschloss Deutschland schließlich den Atomausstieg. Nachdem eine andere Bundesregierung im Jahr 2011 erst einmal die Laufzeiten wieder deutlich verlängerte, wurde bereits im gleichen Jahr nach den Unfällen im Atomkraftwerk Fukushima erneut der Ausstieg beschlossen. Die letzten Atomkraftwerke in Deutschland gingen im Frühjahr 2023 vom Netz. Trotz einer über 50-jährigen Geschichte der Kernenergienutzung in Deutschland ist die Problematik der Endlagerung hochradioaktiver Stoffe bis heute nicht endgültig geklärt.

Nach Hahns Entdeckung wurde die Nutzung der Kernenergie vor allem durch die Militärs vorangetrieben. Albert Einstein, der im Jahr 1933 vor der nationalsozialistischen Verfolgung in die USA emigriert war, verfasste am 2. August 1939 einen Brief an den damaligen US-Präsidenten Roosevelt, in dem er darauf hinwies, dass Hitler-Deutschland große Anstrengungen unternahm, reines Uran-235 herzustellen, das für den Bau einer Atombombe verwendet werden kann. Nachdem am 1. September 1939 der zweite Weltkrieg ausbrach, wurde von der amerikanischen Regierung das Manhattan-Projekt ins Leben gerufen. Ziel war die Entwicklung und der Bau einer einsatzfähigen Atombombe. Als größtes Problem erwies sich hierbei die Gewinnung von signifikanten Mengen an Uran-235, das zum Aufrechterhalten der Kettenreaktion unbedingt notwendig ist. Wird nämlich metallisches Uran aus Uranerz raffiniert, besteht dies zu 99,3 Prozent aus dem schwereren Uran-238, das für die Herstellung der Bombe praktisch nutzlos ist. Es hat sogar die Eigenschaft, Neutronen abzubremsen und zu absorbieren und somit die Kettenreaktion zum Erliegen zu bringen. Nur 0,7 Prozent des Urans bestehen aus Uran-235, das für eine Kettenreaktion auf höhere Anteile angereichert werden muss. Mit Hilfe der Chemie ließ sich keine Trennung von Uran-235 und Uran-238

erreichen, denn chemisch sind beide Isotope völlig identisch. Somit musste nach anderen Wegen gesucht werden. Letztendlich gelang die Trennung durch eine Zentrifuge, da die beiden Isotope unterschiedliche Massen haben.

Im Laufe der Jahre 1939 bis 1945 verschlang das Manhattan-Projekt mehr als zwei Milliarden US-Dollar. Unter der Leitung des Physikers Oppenheimer wurde schließlich das gewünschte Ziel erreicht: Am 16. Juli 1945, gut zwei Monate nach der Kapitulation Deutschlands, erfolgte im US-amerikanischen New Mexico der erste Atombombentest. Nachdem ein Einsatz in Deutschland nicht mehr zur Diskussion stand, wurden die Atombomben kurz vor Ende des zweiten Weltkriegs mit den bekannten Folgen im japanischen Hiroshima und Nagasaki eingesetzt.

Die zivile Nutzung der Kernenergie erfolgte erst einige Jahre später. Zwar wurden seit 1941 von Wissenschaftlern wie Eisenberg oder Fermi Versuche in Reaktoren betrieben, doch gelang es erst am 20. Dezember 1951 im US-Bundesstaat Idaho, mit dem Versuchsreaktor EBR 1 elektrischen Strom durch Kernenergie zu erzeugen.



- www.kernD.de; Informationen von Kerntechnik Deutschland e. V.
- www.bund.net/atomkraft; Informationen des BUND zur Kernenergie
- www.atomindustrie.de; Professionelle Satireseite zur Kernenergienutzung

Im Gegensatz zur unkontrollierten Kettenreaktion bei der Explosion einer Atombombe sollte die Kernspaltung in einem Atomkraftwerk kontrolliert erfolgen. Ist die Kettenreaktion erst einmal in Gang gesetzt, muss die Zahl der bei der Kernspaltung neu entstehenden Neutronen begrenzt werden. Jede Spaltung eines Urankerns setzt zwei bis drei Neutronen frei, von denen aber nur ein einziges Neutron einen weiteren Kern spalten darf. Regelstäbe, die Neutronen einfangen, reduzieren die Zahl der freiwerdenden Neutronen. Wird diese Zahl nämlich zu groß, gerät der Prozess außer Kontrolle. Dann verhält sich ein Atomkraftwerk ähnlich wie eine Atombombe und es kommt zu einer unkontrollierten Kettenreaktion. Technisch, so war die führende Auffassung der damaligen Zeit, lässt sich die Kernspaltung kontrollieren und eine unerwünschte Reaktion vollständig ausschließen.

Die anfängliche Euphorie bei der Nutzung der Kernenergie legte sich, als es am 28. März 1979 in Harrisburg, der Hauptstadt des US-Bundesstaats Pennsylvania, zu einem Reaktorunfall kam. Hierbei entwichen große Mengen an Radioaktivität. Viele Tiere und Pflanzen wurden geschädigt und die Zahl der menschlichen Totgeburten in der Umgebung nahm nach dem Unglück stark zu.

Am 26. April 1986 kam es in der 30000 Einwohner:innen zählenden Stadt Tschernobyl in der Ukraine zu einem weiteren schweren Kernreaktorunfall. Das offiziell Unwahrscheinliche geschah: Die Kettenreaktion geriet außer Kontrolle und es kam zu einer Kernschmelze. Die dabei freigesetzte Radioaktivität führte auch in Deutschland zu hohen Strahlenbelastungen. Eine Vielzahl von Helferinnen und Helfern, die den Schaden vor Ort einzudämmen versuchten, bezahlten diesen Einsatz mit dem Leben und Tausende von Menschen starben in der Folgezeit an Krebserkrankungen.

Am 11. März 2011 wurde das japanische Atomkraftwerk Fukushima Daiichi von einem starken Erdbeben und einem schweren Tsunami getroffen. Die Anlage war für ein derartiges Ereignis nicht ausgelegt und die Reaktorkühlung versagte. Als Folge kam es zu Kernschmelzen und mehreren Explosionen, die vier der sechs Reaktoren zerstörten und erhebliche Mengen an Radioaktivität freisetzen. Rund 150 000 Menschen in der Umgebung wurden evakuiert und hunderttausende zurückgelassene Tiere verhungerten. Das bei der Havarie eingesetzte radioaktive Kühlwasser wurde aufgefangen und wird nun in kleinen Mengen ins Meer abgelassen – für die nächsten 30 Jahre.

Ein weiteres Problem der zivilen Nutzung von Kernenergie stellen die radioaktiven Reststoffe dar. Beim Einsatz von Uran-Brennelementen in Kernkraftwerken entstehen große Mengen an radioaktiven Abfällen, die noch über Jahrtausende eine tödliche Bedrohung sein werden. Die gefahrlose Lagerung dieser Reststoffe ist weltweit bisher ein ungelöstes Problem.

Technisch ist die Nutzung der Kernenergie faszinierend, die Elektrizitätserzeugung mit relativ geringen Brennstoffmengen sehr verlockend. Doch dem Nutzen stehen große Risiken gegenüber. Daher wurde in Deutschland vereinbart, die Kernenergienutzung auslaufen zu lassen. Nach dem Abschalten des letzten Kernkraftwerks in Deutschland wird das Abenteuer Kernenergie die Bundesregierung allein insgesamt weit mehr als 40 Milliarden für Forschung und Entwicklung gekostet haben. Ein bizarres Paradeprojekt für die enormen Fehlinvestitionen ist Deutschlands teuerster Freizeitpark. Im nordrhein-westfälischen Kalkar wurde für rund 4 Milliarden Euro der Prototyp eines sogenannten schnellen Brutreaktors errichtet. Aufgrund von Sicherheitsbedenken, unter anderem wegen des stark reaktiven Kühlmittels Natrium, ging das Kraftwerk niemals in Betrieb. Heute befindet sich in der Industriearuine des Kraftwerks der Freizeitpark Kernwasser Wunderland Kalkar (Bild 1.4).



Bild 1.4 Auf dem Gelände des niemals in Betrieb gegangenen schnellen Brutreaktors in Kalkar befindet sich heute der Freizeitpark Kernwasser Wunderland (Fotos: www.wunderlandkalkar.eu).

Von der konservativen Politik und einigen Unternehmen wurde die Kernenergie immer wieder als vermeintliche Zukunftstechnologie ins Feld geführt. Von der Vielzahl angekündigter Projekte der letzten Jahre wurde allerdings nur ein geringer Teil realisiert. Vor allem die enormen Kosten neuer Kernkraftwerke beenden meist recht schnell die nuklearen Träume. Um neue Kernkraftwerke in Europa überhaupt noch wirtschaftlich betreiben zu können, sind hohe Subventionen erforderlich. Für das umstrittene Neubauprojekt Hinkley Point C in Großbritannien sind für den Atomstrom Vergütungen vorgesehen, die deutlich über denen von Solar- und Windkraftanlagen liegen. Wenn die Kernenergie als höchst umstrittene Technologie aber nicht einmal mehr wirtschaftliche Vorteile aufweisen kann, sind die Tage der Kernenergie ganz sicher gezählt. Weltweit waren Mitte des Jahres 2023 insgesamt noch 412 Kernkraftwerke in Betrieb. Für die Weltenergieversorgung ist die Kernenergie jedoch relativ unwichtig. Ihr Anteil ist kleiner als der der Wasserkraft und deutlich geringer als der von Brennholz. Wollte man durch die Kernenergie einen Großteil der fossilen Kraftwerke ersetzen, wären Uranvorräte in wenigen Jahren erschöpft. Somit sind Kernkraftwerke keine wirkliche Alternative für den Klimaschutz, obwohl einige Politiker:innen und vor allem die profitierenden Unternehmen dies in der Öffentlichkeit oft gerne so darstellen. Langfristig werden in eine ganz neue Variante der Atomkraftnutzung große Hoffnungen gesetzt und Geldsummen investiert: in die Kernfusion. Als Vorbild hierfür dient die Sonne, die ihre Energie durch Verschmelzung von Wasserstoffkernen freisetzt. Dieser Vorgang soll auf der Erde nachvollzogen werden, ganz ohne Risiko einer unerwünschten Kettenreaktion à la Tschernobyl oder Fukushima. Doch die Sache hat einen Haken: Damit die Kernfusion in Gang kommt, müssen die Teilchen auf Temperaturen von mehreren Millionen Grad Celsius erhitzt werden. Kein bekanntes Material kann diesen Temperaturen dauerhaft standhalten. Darum werden andere Technologien, wie zum Beispiel der Einschluss der Reaktionsmaterialien durch starke Magnetfelder, erprobt. Auch wenn dies bereits gelungen ist, zeigen bisherige Versuchsreaktoren das Verhalten von nassem Holz. Trotz enormer Energiemengen zum Anfeuern gingen sie stets von selbst wieder aus.

Ob diese Technologie überhaupt jemals funktionieren wird, kann derzeit nicht ernsthaft vorausgesagt werden. Einige meinen, das Einzige, was sich seit Jahren bei der Kernfusion mit Sicherheit voraussagen lässt, ist die stets gleichbleibende Zeitspanne von 50 Jahren, in der ein funktionierender Reaktor einmal ans Netz gehen soll.

Doch selbst wenn diese Technologie einmal ausgereift sein sollte, gibt es verschiedene Gründe, die gegen den Ausbau der Kernfusion sprechen. Diese Technologie ist deutlich aufwendiger und damit auch teurer als die heutige Kernspaltung. Wie bereits erwähnt, ist heute die Finanzierung von herkömmlichen Kernkraftwerken schwierig. Schon aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten werden Alternativen wie regenerative Energien zu bevorzugen sein. Werden trotzdem enorme Geldsummen in Fusionsversuche gesetzt, fehlen diese beim Aufbau von Energiealternativen. Heute wäre man froh, wenn man einen Fusionsreaktor überhaupt zum Laufen bekäme. Ein Einsatz dieser Technologie für Regelzwecke ist daher aus heutiger Sicht wenig vorstellbar.

Genau diese Eigenschaften wären aber nötig, wenn Fusionskraftwerke einmal gemeinsam mit regenerativen Kraftwerken wie Solar- und Windkraftanlagen einen Beitrag zur Energieversorgung leisten sollen. Für das regenerative Zeitalter ist die Fusionstechnologie also ungeeignet. Außerdem entstehen auch beim Betrieb einer Kernfusionsanlage radioaktive Stoffe und Abfälle, von denen eine Gefährdung ausgeht. Es gibt also sehr wenige Gründe, die für die weitere Verwendung staatlicher Gelder in diese Technologie sprechen.

1.1.5 Das Jahrhundert der fossilen Energieträger

Während bis Ende des 19. Jahrhunderts klassische erneuerbare Energien einen Großteil des Energiehungers der Menschheit deckten, kann das 20. Jahrhundert als Jahrhundert der fossilen Energieträger gelten. Bis zur ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts lösten fossile Energieträger in Verbrennungskraftmaschinen klassische Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien wie Windmühlen, Wasserräder oder durch Muskelkraft angetriebene Fahrzeuge und Maschinen fast vollständig ab. Unter den regenerativen Energien konnten sich nur die moderne Wasserkraft zur Stromerzeugung und die Biomasse hauptsächlich als Brennmaterial behaupten.

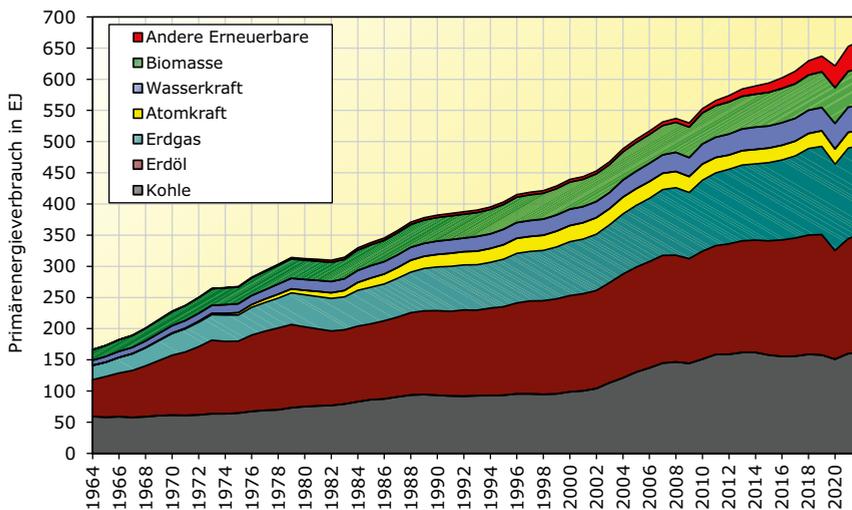


Bild 1.5 Entwicklung des weltweiten Primärenergiebedarfs (Daten: [EI23])

Nach dem zweiten Weltkrieg stieg die Energienachfrage nahezu explosionsartig an. Die fossilen Energieträger konnten ihren Anteil weiter deutlich ausbauen. Im Jahr 2019 deckten fossile Energieträger noch rund 77 Prozent des weltweiten Primärenergiebedarfs (vgl. Kasten „Energie kann gar nicht verbraucht werden“ in Abschnitt 1.2 und Bild 1.5). Wasserkraft und Atomkraft hatten einen Anteil von rund 6

und 4 Prozent und die Biomasse von etwa 9 Prozent. Alle anderen erneuerbaren Energien kamen auf fast 4 Prozent. Inzwischen zeichnen sich zaghafte Umbrüche ab. Solar- und Windkraft haben kontinuierlich hohe Steigerungsraten beim Zubau, sodass sich deren Anteil am Weltenergiebedarf in den nächsten Jahren signifikant erhöhen wird. Die Nutzung von Kohle stagnierte seit 2011 auf sehr hohem Niveau, während der Bedarf an Erdöl und Erdgas bis 2019 weiter stieg. Durch die Corona-Krise kam es im Jahr 2020 zu starken Einbrüchen bei den fossilen Energieträgern, die aber schnell wieder ausgeglichen wurden. Die „anderen Erneuerbaren“, unter die die Photovoltaik und Windkraft fallen, konnten in den letzten Jahren enorme Zuwächse verzeichnen. Im Jahr 2019 haben sie bereits die Atomkraft überholt. Es ist nicht zu erwarten, dass sich das dynamische Wachstum bei der Photovoltaik und der Windkraft abschwächen wird, sodass diese in wenigen Jahren fossile Energieträger zurückdrängen könnten.

1.1.6 Das erneuerbare Jahrhundert

Obwohl derzeit der Anteil erneuerbarer Energien noch vergleichsweise gering ist und der Verbrauch fossiler Energieträger trotz aller Klimaschutzbekenntnisse weiter steigt, ist das 21. Jahrhundert bereits auf dem Weg, das Jahrhundert der erneuerbaren Energien zu werden. Viele können sich einen schnellen Wandel noch nicht vorstellen. Dieses Schicksal haben erneuerbare Energien mit der Einführung einer Vielzahl neuer Technologien gemeinsam. So soll beispielsweise Kaiser Friedrich Wilhelm II. anfangs den Wandel im Verkehrsbereich bezweifelt haben: „Ich glaube an das Pferd. Das Automobil ist eine vorübergehende Erscheinung.“

Internet und Handy haben uns vorgemacht, wie schnell sich neue Technologien durchsetzen können. Vor allem der Ausbau der Windkraft und der Photovoltaik erfolgen derzeit rasant, mit Wachstumsraten, die an die Einführung des Internets und des Mobilfunks erinnern. Deutschland war lange Zeit Vorreiter bei der Nutzung erneuerbarer Energien. Bereits 2011 wurde hier die millionste Solaranlage eröffnet (Bild 1.6), Ende 2023 waren bereits weit über 3 Millionen Anlagen in Betrieb. Andere Länder wie China haben aber inzwischen Deutschland die Führungsrolle beim Ausbau erneuerbarer Energien abgenommen, nachdem die damalige deutsche Regierung den Zubau ab dem Jahr 2013 massiv eingeschränkt hat. Dennoch besteht kein Zweifel: Das Zeitalter der erneuerbaren Energien hat bereits weltweit begonnen. Schon bald werden sie die Dominanz der fossilen Energien brechen. Es bleibt nur die Frage, ob die Ablösung schnell genug gelingt, um den ebenfalls immer schneller voranschreitenden Klimawandel noch rechtzeitig stoppen zu können. Die Chancen dafür stehen aber möglicherweise besser als viele derzeit zu hoffen wagen.



Bild 1.6 Links: Trotz der intensiven Nutzung fossiler Energieträger boomt der Windenergieausbau in den USA, rechts: die millionste Solarstromanlage in Deutschland, Fotos: Dennis Schwartz/REpower Systems SE und BSW-Solar

1.2 Energiebedarf – wer was wo und wie viel verbraucht

Der Energiebedarf auf der Erde ist höchst unterschiedlich verteilt. Sechs Staaten der Erde, nämlich China, USA, Russland, Indien, Japan und Deutschland, verbrauchen mehr als die Hälfte der Energie.

Die USA benötigen alleine etwa ein knappes Sechstel der Energie weltweit, obwohl in den USA weniger als ein Zwanzigstel der Erdbevölkerung lebt. Würde jeder Mensch in Indien genauso viel Energie beanspruchen wie die in den USA, fiel der Weltenergiebedarf bereits um 60 Prozent höher aus. Wenn alle Länder auf der Erde den gleichen Energiehunger wie die USA entwickeln, dann klettert der Bedarf sogar auf über das Dreifache.

Möchte man eine Aussage treffen, welche Länder der Erde besonders viel Energie verbrauchen, darf natürlich nicht nur auf den Gesamtverbrauch geschaut werden. Die Bevölkerungszahl spielt dabei beim Vergleich auch eine entscheidende Rolle. Zwar verbraucht Indien mehr Energie als Deutschland. Bei über einer Milliarde Menschen ist dies aber auch zu erwarten. Der Pro-Kopf-Verbrauch in Indien beträgt rund ein Sechstel des Verbrauchs in Deutschland. Obwohl Indien also das Land mit dem viert-höchsten Primärenergieverbrauch der Erde ist, liegt der Pro-Kopf-Verbrauch unter der Hälfte des Weltdurchschnitts. Bild 1.7 zeigt, in welchen Ländern der Pro-Kopf-

Primärenergiebedarf im Vergleich zum Weltdurchschnitt besonders hoch beziehungsweise besonders niedrig ist. Dabei fällt auf, dass die westlichen Industriestaaten und Länder mit großem Erdölvorkommen einen besonders hohen Verbrauch haben. Wohlstand und günstige Energiepreise kurbeln demnach den Verbrauch an. Trennt man die Erde in Nord- und Südhalbkugel, zeigt sich, dass die Länder mit sehr hohem Verbrauch – mit Ausnahme von Australien, Neuseeland und Südafrika – sich alle auf der Nordhalbkugel befinden. Deutschland und Frankreich zusammen verbrauchen mehr als der gesamte afrikanische Kontinent mit seinen über eine Milliarde Menschen.



Energie kann gar nicht verbraucht werden

Wer im Physikunterricht schon einmal geäußert hat, dass der Energieverbrauch viel zu hoch sei, wird mit Sicherheit auf Unverständnis gestoßen sein – nicht, weil die Physiklehrerin oder der Physiklehrer ein mangelndes Verständnis für die Energieproblematik der Erde hat, sondern weil sie den Energieerhaltungssatz verinnerlicht haben. Danach kann Energie weder verbraucht noch erzeugt, sondern nur von einer Form in eine andere umgewandelt werden.

Betrachten wir einmal das Beispiel Auto. Dass das Auto viel verbraucht, spüren wir bei jedem Volltanken. Das vom Auto benötigte und von uns teuer bezahlte Benzin ist eine Art von gespeicherter chemischer Energie. Durch Verbrennung entsteht thermische Energie. Diese wird vom Motor in Bewegungsenergie umgewandelt und an das Auto weitergegeben. Ist das Benzin verbraucht, steht das Auto wieder. Die Energie ist dann jedoch nicht verschwunden, sondern durch Abwärme des Motors sowie über die Reibung an den Reifen und mit der Luft als Wärme an die Umgebung abgegeben. Diese Umgebungswärme kann aber in der Regel von uns Menschen nicht weiter genutzt werden. Aus Umgebungswärme werden wir nie wieder Benzin herstellen können. Durch die Autofahrt wird der nutzbare Energiegehalt des Benzins in nicht mehr nutzbare Umgebungswärme überführt. Für uns ist diese Energie also verloren und damit verbraucht, auch wenn dies im physikalischen Sinne nicht korrekt ist.

Anders sieht es beispielsweise bei einer Photovoltaikanlage aus. Sie wandelt die Sonnenbestrahlung direkt in elektrische Energie um. Es wird gerne davon gesprochen, dass eine Solaranlage Energie erzeugt. Physikalisch ist auch dies nicht korrekt. Die Solaranlage wandelt lediglich schlecht nutzbare Solarstrahlung in hochwertige Elektrizität um.

Länder mit besonders hohem Energieverbrauch decken ihren Energiebedarf meist zu großen Teilen aus fossilen Energieträgern. Dabei gibt es durchaus Ausnahmen wie Island, wo Geothermie und Wasserkraft dominieren. Länder mit besonders niedrigem Energiebedarf greifen hingegen oft in hohem Maße auf sogenannte traditionelle Biomasse zurück. Hierunter versteht man Feuerholz oder andere herkömmliche tierische oder pflanzliche Produkte wie getrockneten Tierdung. Über 2 Milliarden Menschen weltweit nutzen Brennholz und Holzkohle zum Kochen und Heizen. In Afrika südlich der Sahara sind in einigen Ländern sogar rund 90 Prozent der Bevölkerung vollkommen auf Brennstoffe aus traditioneller Biomasse angewiesen.

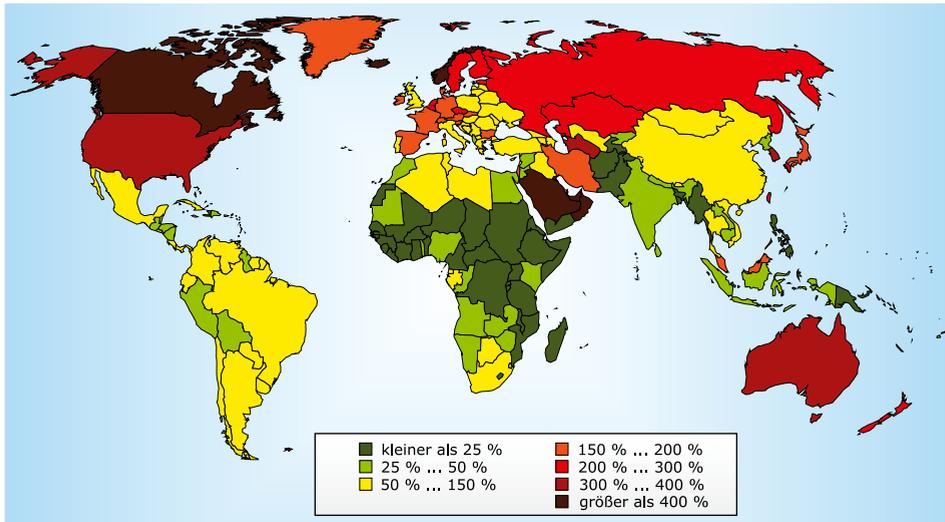


Bild 1.7 Pro-Kopf-Primärenergiebedarf bezogen auf den Weltdurchschnitt

Bei den Industrieländern hingegen gibt es ebenfalls große Unterschiede. Während viele Industrieländer wie Deutschland oder die USA noch bis zu mehr als 80 Prozent ihres Primärenergiebedarfs aus fossilen Energieträgern oder der Atomkraft decken, ist der Anteil erneuerbarer Energien in einzelnen Industrieländern bereits heute wesentlich höher. Die Alpenländer sowie Norwegen und Schweden haben einen deutlich höheren Anteil an Wasserkraft. Auch die Biomasse spielt in einigen Ländern wie Schweden oder Finnland eine größere Rolle. In Island ist die Erdwärme die Energieform mit dem größten Anteil. Wasserkraft und Geothermie decken in Island zusammen weit über 80 Prozent des Energiebedarfs.

Die Demokratische Republik Kongo ist hingegen ein typisches Beispiel für die Energieversorgung der ärmsten Länder der Erde. Sie basiert noch zu mehr als 90 Prozent auf traditioneller Biomasse. Bild 1.8 zeigt die unterschiedliche Nutzung einzelner Energieformen bei der Deckung des Energiebedarfs in verschiedenen Ländern.



Primärenergie, Apfelenergie und Birnenenergie

Beim Vergleich des eigenen Stromverbrauchs mit dem Gasverbrauch wird von der Energiemenge her fast immer der Gasverbrauch höher ausfallen, wenn wir unsere Wohnung mit Gas beheizen. Beim Vergleich der Gas- und Stromrechnung sind die Unterschiede schon nicht mehr so groß. Elektrizität und Erdgas sind zwei Arten von Energie oder Energieträgern, die wie Äpfel und Birnen nicht direkt vergleichbar sind. Um eine Kilowattstunde Elektrizität aus Gas herzustellen, müssen in einem Kraftwerk zwei bis drei Kilowattstunden Gas verfeuert werden. Der Rest verpufft meist ungenutzt als Abwärme in die Umgebung. Um verschiedene Energieformen vergleichbar zu machen, unterscheidet man deshalb zwischen Primärenergie, Endenergie und Nutzenergie.

Primärenergie ist Energie in ursprünglicher, technisch noch nicht aufbereiteter Form wie zum Beispiel Kohle, Rohöl, Naturgas, Uran, Solarstrahlung, Wind, Holz oder Kuhmist (Biomasse).

Endenergie oder Sekundärenergie ist Energie in der Form, wie sie der Verbraucherin oder dem Verbraucher zugeführt wird, wie zum Beispiel Erdgas, Benzin, Heizöl, Elektrizität oder Fernwärme.

Nutzenergie ist Energie in letztendlich genutzter Form, wie zum Beispiel Licht zur Beleuchtung, Wärme zur Heizung oder Antriebsenergie für Maschinen und Fahrzeuge.

Am häufigsten werden verschiedene Energieformen auf der Primärenergiebasis verglichen. Nicht selten gehen bei der Umwandlung von Primärenergie zu Nutzenergie mehr als 90 Prozent des ursprünglichen Energiegehalts verloren. Die Zuordnung erneuerbarer Energien ist dabei nicht immer ganz einheitlich. Strom aus Solar- oder Windkraftwerken wäre nach der Definition eigentlich eine Endenergie. Viele Statistiken bezeichnen diesen aber als Primärelektrizität und werten ihn als Primärenergie. Über die Ursachen lässt sich nur spekulieren. Einerseits ist die statistische Erfassung der zu erneuerbarem Strom zugehörigen „echten“ Primärenergie schwierig, andererseits ist das regenerative Angebot so groß, dass Wirkungsgrade bei der Umwandlung von Primär- zu Endenergie an Bedeutung verlieren. Analog zu Strom aus regenerativen Kraftwerken wird auch regenerativ erzeugter Wasserstoff in vielen Statistiken als Primärenergie gewertet, obwohl dieser im engeren Sinn ebenfalls eine Art von Endenergie ist.

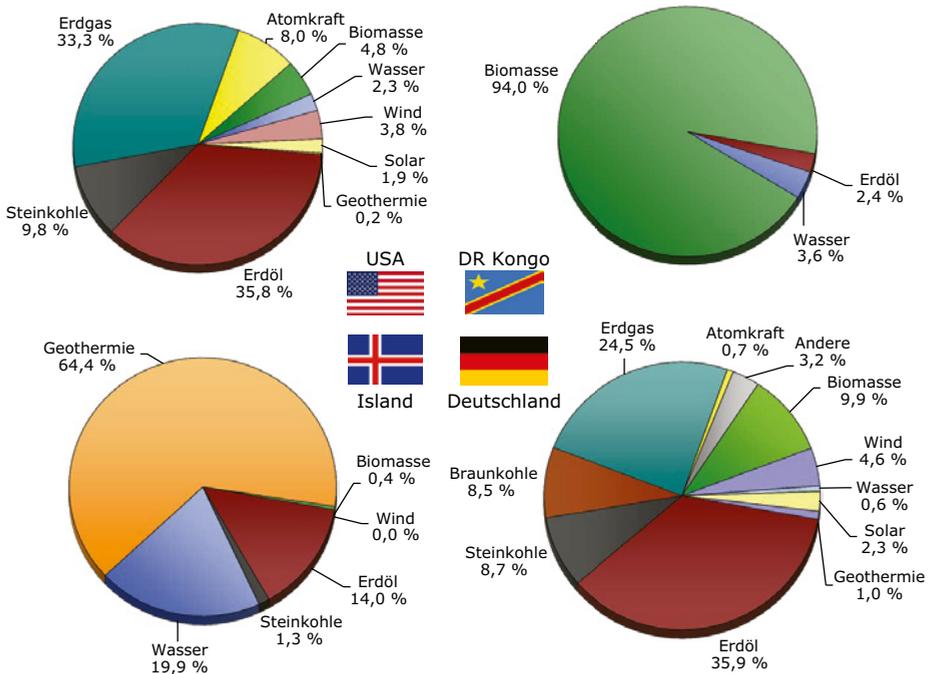


Bild 1.8 Anteile verschiedener Energieträger an der Deckung des Primärenergiebedarfs in der DR Kongo (im Jahr 2021), Deutschland (2023), Island (2023) und den USA (2022), Daten: [EI23; AGE23; EIA24; NEA23]

1.3 Die SoDa-Energie

Nur rund 2 Prozent des deutschen Primärenergieverbrauchs im Jahr 2022 wurden laut Statistik durch Solarenergie gedeckt. Auch der Anteil anderer erneuerbarer Energien ist noch sehr gering. Für viele ist deshalb kaum vorstellbar, dass regenerative Energien in wenigen Jahren das Klima retten sollen. In Wahrheit haben aber regenerative Energien heute bereits einen Anteil von über 99 Prozent am deutschen Energieaufkommen, wenn man in den offiziellen Statistiken nur einmal richtig rechnen würde.

„Traue keiner Statistik, die du nicht selbst gefälscht hast“, soll bereits Winston Churchill gesagt haben, wobei dieser Ausspruch in keiner offiziellen Quelle belegt ist. Ebenso verbreitet wie die Zuordnung des gängigen Zitats an Churchill ist die Aussage, dass ein wesentlicher Teil unseres Energiebedarfs derzeit durch fossile Energieträger gedeckt wird. Dies besagen zumindest alle üblichen Energiestatistiken. Hier stellt sich die Frage, wie wir Energiebedarf definieren.

Heizwärme eines Heizkörpers, Licht einer gewöhnlichen Glühbirne oder die Antriebsenergie eines Schiffsdiesels sind allgemein anerkannte Bestandteile unseres Energiebedarfs. Erwärmt durch Fenster einfallende Sonnenstrahlung die Räume, ermöglicht Sonnenlicht in taghell beleuchten Häusern und auf Straßen das Ausschalten der künstlichen Beleuchtung oder treibt Wind unser Segelboot quer über den Atlantik, so erfasst dies keine Energiestatistik. Das beheizte Gewächshaus, bei dem unter künstlichem Licht Nutzpflanzen heranwachsen, schafft es ebenfalls in die Energiestatistiken – das überdachte Frühbeet, in dem Pflanzen alleine durch Sonnenlicht gedeihen, hingegen nicht. Die Flutlichtbeleuchtung eines Stadions während eines abendlichen Fußballspiels ist Teil unseres Energiebedarfs. Findet das Fußballspiel bei strahlendem Sonnenschein statt, wird laut Energiestatistik in der durch die Sonne hell ausgeleuchteten Fußballarena eigentlich kein Licht benötigt. Werfen wir Kunstschneemaschinen an, um das immer spärlicher werdende Schneeaufkommen in den Skigebieten zu kompensieren, ist dies ein Fall für die Energiestatistik – der natürliche Schnee hingegen nicht. Füllen wir unsere Trinkwasserspeicher durch elektrische Pumpen, zählen wir die Energie. Füllt Regen die Speicher, ist dies nicht weiter zu beachten. Auch der hohe Strombedarf von elektrischen Wäschetrocknern erhöht den Energiebedarf. Trocknen hingegen Wind und Sonne die Wäsche auf einer herkömmlichen Wäscheleine, decken sie im Sinne der Statistik keinerlei Bedarf.

Alle natürlichen, nicht technisch umgewandelten Energieformen sind nicht Bestandteil des Energiebedarfs im herkömmlichen Sinne, obwohl es eigentlich egal sein müsste, woher die Energie kommt, die unser Badewasser erwärmt, die Pflanzen zum Wachsen bringt oder für Beleuchtung sorgt. Die Verfügbarkeit von natürlichen Energieformen wie Sonnenenergie ist für uns aber so selbstverständlich, weil sie sowieso da ist und deshalb so wertlos erscheint, dass sie es nicht einmal in die Statistiken schafft. Dies verzerrt aber unseren Eindruck über den Energiebedarf und setzt die Möglichkeiten der erneuerbaren Energien in ein falsches Licht.

Deutschland hat eine Fläche von 357093 Quadratkilometern. Die jährliche solare Bestrahlung beträgt im Mittel 1064 Kilowattstunden pro Quadratmeter. Somit erreicht Deutschland in jedem Jahr eine solare Energiemenge von 380 Billionen Kilowattstunden. Dies ist knapp hundertmal so viel wie der in der Statistik ausgewiesene Primärenergieverbrauch von Deutschland und sogar mehr als der gesamte statistische Primärenergiebedarf der Erde. Ein Teil dieser Strahlung erwärmt unsere Erde und Luft, ein anderer Teil wird in Pflanzenwachstum, also Biomasseproduktion umgewandelt.

Rund 800 Millimeter oder 0,8 Kubikmeter Niederschlag gehen in Deutschland pro Quadratmeter nieder. Über ganz Deutschland summiert sich der jährliche Niederschlag auf 286 Milliarden Kubikmeter. Die Sonne verdunstet dieses Wasser, bevor es als Regen zur Erde gelangt. Für die Verdunstung von einem Kubikmeter Wasser werden 627 Kilowattstunden benötigt. Somit steckt im jährlichen Niederschlag eine Energiemenge von rund 179 Billionen Kilowattstunden.

Etwa 2 Prozent der Sonnenenergie werden in Bewegung des Windes umgewandelt. Hier kommen für Deutschland rund 8 Billionen Kilowattstunden zusammen. Sonne, Wind und Wasser zusammen haben in Deutschland alleine ein Energieaufkommen von rund 567 Billionen Kilowattstunden pro Jahr. Die Geothermie oder Meeresenergie ist in dieser Summe noch nicht einmal enthalten. Würde diese Energiemenge nur wenige Prozentpunkte sinken, wären Dürren oder arktische Winter die Folge.

Der Primärenergiebedarf von Deutschland wird in der Statistik im Jahr 2022 hingegen mit 12413 Petajoule ausgewiesen. Das sind umgerechnet etwas mehr als 3 Billionen Kilowattstunden. Natürlich kommen in dieser Statistik auch Solar-, Wasser- und Windkraft vor. Rund 0,5 Billionen Kilowattstunden pro Jahr soll der Anteil aller regenerativen Energien zusammen am Primärenergiebedarf in Deutschland betragen. Das ist der Anteil, den technische Anlagen zur regenerativen Energienutzung umsetzen. Die natürlichen Formen der regenerativen Energien, die sowieso da sind, fehlen in dieser Statistik völlig. So kommt es zu der kleinen offensichtlichen statistischen Diskrepanz zum zuvor berechneten regenerativen Energieaufkommen von 567 Billionen Kilowattstunden. Um den Unterschied zu herkömmlichen Statistiken zu verdeutlichen, werden im Folgenden bislang statistisch nicht erfasste natürliche regenerative Energieformen als SoDa-Energie bezeichnet, weil sie einfach „so da“ sind (Bild 1.9).

Wer nun meint, dass all diese Überlegungen statistische Haarspalterei sind, irrt. Da der Klimaschock in der Öffentlichkeit angekommen ist, besteht das allgemeine Interesse, fossile Energieträger möglichst schnell durch regenerative Energien zu ersetzen. Doch viele haben den Eindruck, das ist schwer und in überschaubaren Zeiträumen fast unmöglich. Gebetsmühlenartig wird wiederholt, dass die Solarenergie in Deutschland einen verschwindend geringen Anteil des Energieaufkommens deckt. Wäre das wahr, wäre diese Skepsis sicher auch berechtigt. Tatsächlich sind es aber die fossilen und nuklearen Energieträger, die gerade einmal 0,6 Prozent am Energieaufkommen in Deutschland haben. Dass 0,6 Prozent in absehbarer Zeit zu ersetzen sind, dürfte eigentlich niemand ernsthaft bezweifeln.

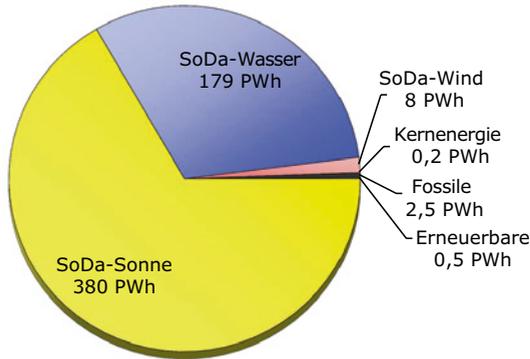


Bild 1.9 Gesamtenergieaufkommen in Deutschland unter Berücksichtigung der SoDa-Energie, also natürlicher regenerativer Energieformen

Die Explosion des indonesischen Vulkans Tambora im Jahr 1815 führt uns vor Augen, was der Ausfall auch nur eines Bruchteils der SoDa-Energie an Folgen hat. Gigantische Mengen an vulkanischen Gasen und Staub in der Atmosphäre reduzierten in den folgenden Jahren die Solarstrahlung. In den Jahren 1816 und 1817 kam es zu massiven Ernteaufschlägen in Europa. Zehntausende von Menschen verhungerten. Würde ein solches Ereignis heute passieren, wären ähnliche Folgen zu erwarten. Ein Großteil der Energie zur Sicherstellung unserer Nahrungsversorgung ist nämlich SoDa-Energie, direkt von der Sonne. Das verschwindend geringe Aufkommen an fossilen und nuklearen Energieträgern wäre aber nicht einmal ansatzweise in der Lage, auch nur relativ kleine Schwankungen der SoDa-Energie zu kompensieren.

Bleibt die Frage, was die SoDa-Energie wert ist. Erdöl frei Grenze kostete im Jahr 2023 rund 5 Cent pro Kilowattstunde, Erdgas gut 3 Cent pro Kilowattstunde. Da solare Strahlungsenergie und Windenergie nicht so einfach speicherbar sind wie Erdöl oder Erdgas, soll im Folgenden ihr Wert unter dem von Erdgas, also mit 2 Cent pro Kilowattstunde angesetzt werden, der Wert der SoDa-Wasserkraft wegen der besseren Speicherbarkeit mit 3 Cent pro Kilowattstunde. Damit berechnet sich ein Gesamtwert der SoDa-Energie von über 13 Billionen Euro pro Jahr. Alleine die SoDa-Sonnenenergie ist nach dieser Berechnung rund 7,6 Billionen Euro wert.

Natürliche regenerative Energieformen in der Größenordnung von 567 Billionen Kilowattstunden werden also alleine in Deutschland statistisch nicht erfasst. Dadurch verzerrt sich die öffentliche Wahrnehmung der heutigen Energieversorgung. Wir unterliegen dem falschen Eindruck, dass fossile und nukleare Energieträger den wesentlichen Anteil am Energieaufkommen haben. In Wahrheit ist ihr Anteil kleiner als ein Prozent und regenerative Energien sollten sie für einen wirksamen Klimaschutz möglichst schnell ersetzen. Hierfür stehen uns natürliche regenerative Energieformen im Wert von rund 13 Billionen Euro jährlich kostenlos zur Verfügung. Eigentlich können wir es uns nicht leisten, darauf zu verzichten.

1.4 Energievorräte – Reichtum auf Zeit

Nutzen wir heute fossile Energieträger, greifen wir auf vor Millionen von Jahren eingelagerte Sonnenenergie zurück, ohne dass diese Energieträger sich in für uns absehbarer Zeit erneuern könnten. Dabei ist unser heutiger Energiehunger derart emporgeschnellt, dass ein Großteil der Vorkommen an fossilen Lagerstätten noch im Laufe unseres 21. Jahrhunderts ausgebeutet sein wird. Auch die Lagerstätten, an denen sich kostengünstig der Brennstoff Uran für herkömmliche Atomkraftwerke gewinnen lässt, werden weniger.



Konventionell oder nicht-konventionell, das ist hier die Frage

Kein Erdölvorkommen auf der Erde gleicht dem anderen. Einige Quellen lagern in flüssiger Form nur hundert Meter unter dem Erdboden. Andere liegen in 10000 Metern Tiefe oder sind mit Sand vermischt und lassen sich, wenn überhaupt, nur mit sehr hohen Kosten fördern. Um einen besseren Überblick über mögliche Reichweiten zu erhalten, unterscheidet man bei der Angabe von noch vorhandenen Vorräten an Erdöl, Erdgas, Kohle und Uran daher zwischen Reserven und Ressourcen sowie konventionellen und nicht-konventionellen Vorkommen.

Reserven sind nachgewiesene und zu heutigen Preisen mit heutiger Technik wirtschaftlich gewinnbare Energierohstoffe.

Ressourcen sind nachgewiesene, aber derzeit technisch und/oder wirtschaftlich nicht gewinnbare sowie nicht nachgewiesene, aber vermutete, also rein spekulative Energierohstoffmengen. Nur ein Teil der Ressourcen wird sich daher erschließen lassen. Entwickelt sich die Technik weiter oder steigen die Rohstoffpreise, werden einige Ressourcen nach und nach den Reserven zugeschlagen. Die Reserven steigen dann an und die Ressourcen nehmen ab.

Gesamtpotenzial bezeichnet die Summe aus Reserven und Ressourcen. Dieses Potenzial wird sich nach heutigem Stand nicht in vollem Umfang erschließen lassen. Möglich ist aber, dass auch noch neue, unvermutete Vorkommen gefunden werden und damit die Reserven oder Ressourcen und das Potenzial wieder vergrößern.

Konventionelle Vorkommen sind Reserven oder Ressourcen, die mit herkömmlichen Förderverfahren erschlossen werden können. Dies ist Erdöl oder Erdgas in unterirdischen Hohlräumen, die sich über eine einfache Bohrung fördern lassen.

Nicht-konventionelle Vorkommen sind Reserven oder Ressourcen, die mit aufwendigen und neuartigen Förderverfahren erschließbar sind. Dies sind zum Beispiel Ölsande, Ölschiefer, Bitumen oder Erdöl und Erdgas in kleineren Hohlräumen in undurchlässigen Schichten, die erst mit einem sogenannten Frackingverfahren aufgebrochen werden müssen. Oft ist die Förderung von nicht-konventionellen Vorkommen deutlich teuer als von konventionellen.

Schon seit Jahrzehnten haben pessimistische Stimmen das nahe Ende der fossilen Energiereserven beschworen. Da man bereits vor 30 Jahren in der Schule gelernt hat, dass in 30 Jahren das Erdöl alle sein wird, ernteten Mahnungen in den vergangenen Jahren oft nur ein gleichgültiges Schulterzucken. Erst der starke Anstieg der Ölpreise seit dem Jahr 2000 hat erneut eine Sensibilität für die Endlichkeit des schwarzen Goldes geschaffen.

Speziell beim Erdöl hat die Zahl der neuen Funde in den letzten Jahren stark abgenommen. Der Energiehunger steigt schneller als neue Vorkommen erschlossen werden können. Die Ölpreise werden deshalb langfristig gesehen weiterhin ansteigen, auch wenn kurze Preisrückgänge immer wieder trügerische Entspannung signalisieren. Denn einerseits steigt die Nachfrage, während das Angebot eher rückläufig ist, andererseits steigen der Aufwand für das Erschließen neuer Vorkommen und damit die Kosten stetig an.

Während bei den ersten kommerziellen Bohrungen in Amerika im Jahr 1859 noch Erdöl in einer Tiefe von 20 Metern gefunden wurde, sind heutzutage Bohrtiefen von bis zu 10000 Metern durchaus üblich. Auch hat man große technische Fortschritte beim Aufspüren von Vorkommen gemacht, sodass man heute erheblich besser über mögliche Funde Bescheid weiß als noch vor einigen Jahrzehnten. Dies macht es aber auch unwahrscheinlicher, dass zahlreiche neue große, völlig unvermutete Vorkommen noch entdeckt werden.

1.4.1 Nicht-konventionelle Vorräte – Verlängerung des Ölzeitalters

Durch die seit den 1990er-Jahren extrem gestiegenen Öl- und Gaspreise ist die Erschließung ganz neuer Vorkommen interessant geworden, die mit nicht-konventionellen Methoden gefördert werden. In Nordamerika ist ein regelrechtes neues Öl- und Gasfieber ausgebrochen. Bereits in wenigen Jahren könnte der Kontinent jenseits des Atlantiks kurzzeitig sogar den Nahen Osten bei der Förderung von Erdöl und Erdgas überholen.

In der kanadischen Provinz Alberta und in Venezuela schlummern enorme Mengen an Ölsanden. Diese werden im Tagebau gefördert. Das kanadische Abbaugelände erstreckt sich dabei auf einer gigantischen Fläche von 149000 Quadratkilometern. Das entspricht in etwa der Fläche Englands. Bereits durch die Rodung der Wälder werden enorme Volumina an Kohlendioxid freigesetzt. Mit großen Mengen an Wasser und Energie wird dann das Öl vom Sand getrennt. Zurück bleiben stark belastete Abwässer und eine verwüstete Landschaft. Durch den hohen Energieverbrauch bei der Ölsandförderung nimmt der Kohlendioxidausstoß weiter zu. Berücksichtigt man die Freisetzung von Treibhausgasen durch die Waldrodung, sind zwischen 1990 und 2010 die Treibhausgasemissionen von Kanada um stolze 46 Prozent gestiegen. Das Ende des Ölzeitalters beginnt bereits jetzt, seine dreckigsten Spuren zu hinterlassen.

