

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 Quaschning

Erneuerbare Energien und Klimaschutz

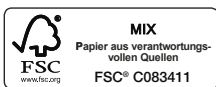
Hintergründe – Techniken und Planung –
Ökonomie und Ökologie – Energiewende

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 – gesplante 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	Energiewende 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	Geothermiemärkte	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	Scheitholzkessel	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	Scheitholzkessel	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	Nullemissionsfabrik	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 Quaschning

Hochschule für Technik und Wirtschaft HTW Berlin

www.volker-quaschning.de

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 Warpkerknbruch 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.

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

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 18 362 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.

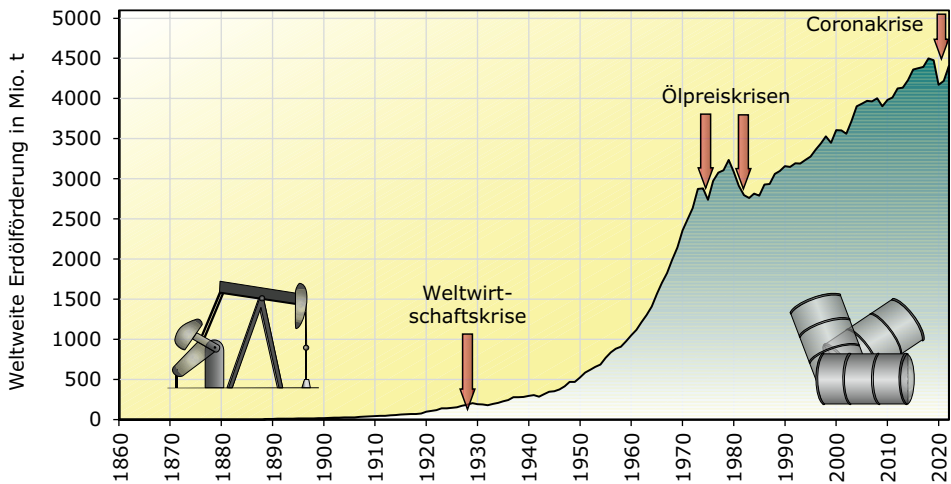


Bild 1.2 Erdölförderung seit dem Jahr 1860

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) = 158 987 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 Bruttosozialprodukt 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