Kapitel 1
Abkehr von fossilen Brennstoffen: Probleme, Ziele und Lösungsansätze

Schon vor einigen Jahren schlug Lord Browne, der damalige Chef des Konzerns „British Petroleum“, als neue Fassung für den weltbekannten Kurznamen BP den Namen „Beyond Petroleum“ vor. Damit hat er in zwei Wörtern eines der vordringlichsten Ziele benannt, das von der Weltwirtschaft bis zur Mitte dieses Jahrhunderts erreicht werden sollte: eine drastische Verringerung des Einsatzes fossiler Energieträger und der damit verbundenen Emission des Treibhausgases Kohlendioxid.

In der Europäischen Union gibt es feste Vereinbarungen, in einem ersten Schritt bis 2020 den Ausstoß der klimaschädlichen Treibhausgase im Vergleich zu 1990 um mindestens ein Fünftel zu verringern. Dabei ist eine vermehrte Substitution fossiler durch nukleare Energie weltweit umstritten, in Deutschland politisch negativ entschieden; Kernfusion steht, wenn überhaupt, erst in 50 Jahren zur Diskussion. Die CO_2-Rückhaltung und Einlagerung in tiefe Schichten ist wohl grundsätzlich möglich, aber technisch unerprobt.

So wird neben drastischen Verbesserungen der Energieeffizienz v. a. eine rasche und weitgehende Substitution fossiler durch erneuerbare Energie als realistischer Weg beschritten: Der Anteil von Energie aus Sonne, Wasser, Wind und Biomasse am gesamten Primärenergieeinsatz soll bis 2020 in der Europäischen Union auf mindestens 20% erhöht werden, Deutschland soll seinen Anteil von 6,6% in 2007 auf 18% in 2020 erhöhen. Bei der Stromerzeugung hat Deutschland diesen Anteil von 18% erneuerbarer Energie schon 2007 erreicht, bis 2020 soll hier knapp ein Drittel erreicht werden, bis 2050 drei Viertel, v. a. durch Offshore-Windenergie. Damit entsteht ein zusätzlicher Übertragungsbedarf im Hoch- und Höchstspannungsnetz.

1.1 Probleme fossiler Energieträger: abnehmende Ressourcen, zunehmende politische Abhängigkeit, Klimawandel

In den letzten Jahrzehnten hat sich langsam und mühsam gegen mächtige Interessen die Einsicht in wachsenden Kreisen der Bevölkerung und vieler maßgeblicher Politiker durchgesetzt, dass die Abhängigkeit von den fossilen Energieträgern wie Kohle, Erdöl und Erdgas so schnell wie möglich verringert, längerfristig weitgehend

L. Jarass et al., *Windenergie*,
DOI 10.1007/978-3-540-85253-7_1, © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2009

beendet werden muss. Seit Langem gibt es erhebliche Zweifel, ob ein vermehrter Einsatz von Kernenergie (Abschn. 1.2.3) bei der anstehenden Umwandlung des Energiesystems in Richtung Dezentralisierung, Sparsamkeit und Effizienz sinnvoll und hilfreich wäre.

Die Überzeugungsarbeit von Wissenschaftlern, die den bereits erfahrbaren Klimawandel als überwiegend von Menschen verursachte Bedrohung der Lebensbedingungen aller Lebewesen, auch des Menschen, verdeutlichen konnten, haben schließlich in vielen Ländern auch politische Mehrheiten, wenngleich noch knapp, für den erforderlichen Wandel geschaffen. Dazu haben auch angewandte Forschung und die Initiative innovativer Unternehmer bei der Nutzung erneuerbarer Energien erheblich beigetragen.

Eine Entkopplung der gesellschaftlichen Wohlfahrt von dem Einsatz der zunehmend knapperen fossilen Ressourcen mit ihren bedrohlichen Folgewirkungen, die Zurückdrängung der Kerntechnik, die untrennbar mit friedensbedrohendem militärischen Einsatz verbunden ist (siehe Iran und Nordkorea) und mit ihren Jahrtausende weiterwirkenden radioaktiven Überbleibseln unbeherrschbar bleibt: Das sind die Ziele, die eine weltweite intellektuelle Elite fordert und in den letzten Jahren ein Stück weit durchsetzen konnte. Das deutsche Erneuerbare-Energien-Gesetz, das – trotz einiger wohl erforderlicher Korrekturen – weltweit als vorbildlich gilt, ist ein Ergebnis dieser Anstrengungen und steht als mittlerweile weitgehend unumstrittene Grundlage der weiteren Entwicklung auch im Zentrum dieses Buches.

Es geht um drei miteinander eng verbundene Ziele:

- Verringerung des menschengemachten Klimawandels als Folge der Immission von CO_2 und anderer Treibhausgase;
- Verringerung der Auswirkungen eines weiteren drastischen Preisanstiegs bei Erdöl und Erdgas, der aufgrund nicht nur kurzfristiger Spekulationen, sondern auch aufgrund einer echten Verknappung von günstig gewinnbaren Ressourcen zu erwarten ist;
- Verringerung der politischen Abhängigkeit von unberechenbaren Regimen und politisch instabilen Regionen, in denen ein Großteil der Öl- und Gasvorkommen liegen.

Wer zum Problem des Klimawandels jenseits von Sensationsmeldungen, aber auch unverantwortlichen Beschwichtigungen seriöse und verständliche wissenschaftliche Information sucht, der sei auf [Rahmstorf/Schellnhuber 2006] hingewiesen. Hier werden nicht nur die bereits eingetretenen Schäden und die Vorboten weit drastischerer Schäden beschrieben und beziffert, sondern auch die Strategien dargestellt, mit denen in einer sich anbahnenden globalen Zusammenarbeit die Katastrophen im Verlauf der nächsten Jahrzehnte zumindest begrenzt werden können. Der Zielkatalog und das Maßnahmenbündel, die in der Nachfolge der Rio-Konferenz und des Kyoto-Protokolls von 1997 von internationalen und nationalen Regierungskommissionen entwickelt und schließlich durch den im Februar 2005 in Kraft getretenen Kyoto-Vertrag international verbindlich festgelegt wurden, werden weiter unten genauer dargestellt. Der Einsatz erneuerbarer Energien, nicht zuletzt der Windenergie, wird hier eine wichtige Rolle spielen.

1.1.1 Energiepreisentwicklung

Zum Problem des Preisanstiegs von Erdöl und Erdgas zunächst ein Blick auf die Entwicklung der letzten Jahrzehnte: In den ersten 30 Jahren nach dem Zweiten Weltkrieg konnte durch den extrem niedrigen Ölpreis und die Erschließung neuer Ölfelder weltweit der trügerische Eindruck einer unbeschränkten Energiefülle entstehen. Damit wurde eine Entwicklung in Gang gesetzt, deren Folgen noch lange weiterwirken. Sowohl die Konsumgewohnheiten und Konsumerwartungen wie die entsprechenden technischen Standards in Architektur und Bautechnik, in Verkehrswesen und Städtebau, in der Technik im weitesten Sinne von Heizsystemen über Automobile bis zur Beleuchtung sind bis heute stark von dieser Periode der sorglosen Energieverschwendung geprägt. Der Energieaufwand für Raumheizung, der heute in Deutschland knapp ein Drittel des Endenergieverbrauchs ausmacht, könnte mehr als halbiert werden, wenn Millionen von Wohnungen und Zehntausende von öffentlichen Gebäuden, v. a. aus den 1950er und 1960er Jahren, energietechnisch auf den neuesten Stand gebracht würden.

Die Siedlungsstruktur, die sich – ganz von der selbstverständlichen Benutzung des Privatautos durch einen Großteil der Bevölkerung geprägt – fast überall in Westeuropa und erst recht in den USA entwickelt hat, ist hingegen kaum umkehrbar. Die energetischen Folgen können auch durch Angebotsverdichtungen im Bereich des Öffentlichen Nahverkehrs nur langsam gemildert werden. Insoweit kommt alternativen Antriebssystemen für Kraftwagen, die den CO_2-Ausstoß erheblich verringern, eine große Bedeutung zu.

Die Ölpreiskrisen der späteren 1970er Jahre haben zwar erstmals eine Gegenbewegung ausgelöst, denn immerhin vervierfachte sich der Rohölpreis pro barrel (159 Liter) von knapp 3 US$ in 1973 auf rund 12 US$ in 1974 und stieg dann schlagartig in 1979 auf rund 30 US$, vgl. Abb. 1.1.

Doch sank er 1986 schlagartig wieder auf den Wert von 1978 und pendelte dann fast 15 Jahre lang bis 1999 um beruhigende Werte zwischen 10 und 20 US$. Erst seit 2000 gibt es deutlichere Preiserhöhungssignale: 2000 stieg der nominale Rohölpreis wieder auf gut 25 US$ an, und seit 2004 verdoppelte er sich schließlich bis Ende 2006 auf über 60 US$. Ende 2007 erreichte er erstmalig 100 US$, stieg bis Mitte Juli 2008 auf fast 150 US$ an und sank dann wieder auf gut 100 US$.

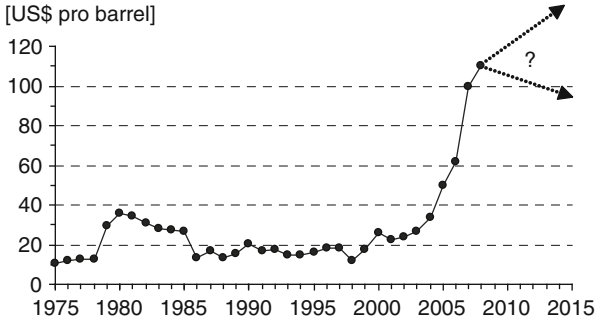

Abb. 1.1 Rohölpreise 1973–2008 (nach [IEA 2008a, Part I, Tab. 1, S. 4])

Die nationalen Energiepreise sind nicht nur von den internationalen Rohölpreisen in US$ abhängig (Abb. 1.1), sondern auch von den Wechselkursänderungen der nationalen Währung zum US$, von der nationalen Steuerpolitik, von der nationalen Inflation, also der durchschnittlichen Preissteigerung für alle Güter und Dienstleistungen etc. Für das Verbraucherverhalten relevant sind diese nationalen Energiepreise für die Endverbraucher unter Berücksichtigung der jeweiligen nationalen Inflation. Ein gutes Maß hierfür ist der inflationsbereinigte Preisindex für Energie. Er wird jeweils berechnet mit den nationalen Preisen und Inflationsraten und gewichtet mit den nationalen Verbrauchsmengen.

Abbildung 1.2 zeigt die Energiepreisentwicklung in der OECD, unterschieden in Haushalte und Industrie. Die OECD-Länder umfassen Europa inklusive Türkei, USA, Kanada, Mexiko, Japan, Korea und Australien.

Wird der reale, also preisbereinigte Energiepreis für das Jahr 2000 auf 100% angesetzt, so ergibt sich folgendes Bild für die über alle OECD-Länder und Energieträger gewichtet gemittelten Energiepreise:

Bereits 1978 lagen sie erstmals auf dem Niveau von 2000, stiegen dann bis 1981 um über ein Drittel auf rund 140%, sanken bis 1985 wieder auf rund 130% ab und fielen dann schlagartig bis 1987 auf rund 100%, das Ausgangsniveau in 1978. Dann sanken sie langsam auf 90% und stiegen erst 2000 wieder auf 100% an. Erst seit 2002/2003 kam es zu drastischen Rohenergiepreiserhöhungen, zuerst bei Rohöl, vgl. Abb. 1.1, in der Folge auch bei Erdgas und Kohle, so dass der preisbereinigte Energiepreisindex Anfang 2008 wieder fast das Höchstniveau von 1982, nämlich rund 140% erreicht hat. Vielfach wird mit weiter steigenden Preisen gerechnet, aber auch ein Absinken ist nicht ganz auszuschließen.

Die Energiepreise für die Industrie sind in der OECD in den Hochpreiszeiten etwas stärker gestiegen, weil die Haushaltspreise wegen des dort hohen festen Steueranteils am Endverkaufspreis weniger abhängig von der allgemeinen Rohenergiepreisentwicklung sind.

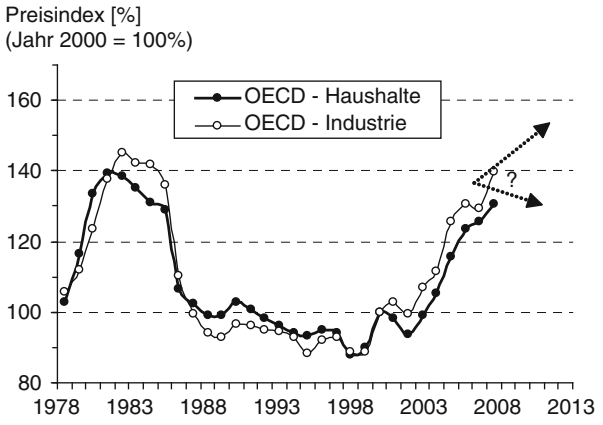

Abb. 1.2 Energiepreisentwicklung für Haushalte und für Industrie, OECD, preisbereinigt, 1978–2008 ([IEA 2008a, Part II, Tab. 2, S. 56/57]; Werte für 2008 sind für I/2008)

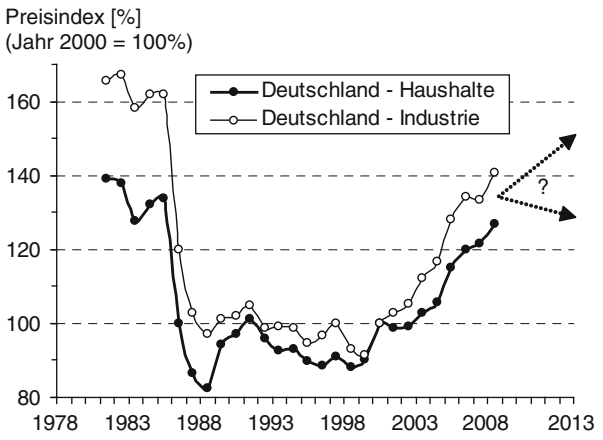

Abb. 1.3 Energiepreisentwicklung für Haushalte und für Industrie, Deutschland, preisbereinigt, 1983–2008 ([IEA 2008a, Part II, Tab. 1, S. 56/57]; Werte für 2008 sind für I/2008)

Abbildung 1.3 zeigt die Energiepreisentwicklung in Deutschland, wiederum unterschieden in Haushalte und Industrie.

Wird der reale, also preisbereinigte Energiepreis für das Jahr 2000 wieder auf 100% angesetzt, so ergibt sich ein ähnliches Bild wie für den in Abb. 1.2 gezeigten OECD-Durchschnitt: Die Energiepreise sanken von 1981, dem ersten für Deutschland verfügbaren Jahr für Industrie wie auch für Haushalte bis 1985 geringfügig, dann aber schlagartig um ein gutes Drittel, und schwankten anschließend um ein konstantes Niveau. Seit 2002/2003 stiegen die inflationsbereinigten Energiepreise deutlich an, um Anfang 2008 fast wieder das Höchstniveau von 1982, nämlich rund 140%, zu erreichen. In Deutschland wird allgemein mit weiter steigenden Preisen gerechnet.

1.1.2 Abhängigkeit und Erpressbarkeit Europas

Konkretes Anschauungsmaterial für die Abhängigkeit und Erpressbarkeit Europas wie Deutschlands liefern die letzten Jahre:

- Das terroristische Drohpotenzial steigt zunehmend, insbesondere im gesamten Nahen Osten. Hier geht es nicht mehr um die Frage der Höhe von Energie- und Rohstoffpreisen, sondern um politisch-ideologische Machtansprüche, u. a. im Zusammenhang mit der ungelösten Palästinafrage: „Wie hoch muss der Ölpreis steigen, bis die Existenz Israels zur Disposition steht?“ [Broder 2006, S. 67].
- Die militärischen Einsätze vieler westlicher Staaten im Irak und in Afghanistan belegen nicht nur die Bedeutung des Nahen und Mittleren Ostens für die Energieversorgung der westlichen Industriestaaten, sondern auch das gewandelte Verständnis von militärischen Auslandseinsätzen: Es geht nicht um konkrete Bedrohungen der Souveränität einzelner Staaten, sondern um den Erhalt und die Erweiterung strategischer Einflusssphären, insbesondere im Energiebereich.

- Die Bombardierung oder Sprengung von Ölquellen zeigen ebenso wie die Versuche, bombenfähiges Spaltmaterial zu erlangen, dass die wirtschaftliche und soziale Entwicklung nicht nur der Länder des Nahen Ostens, sondern auch der westlichen Welt zunehmend gefährdet wird.
- Die Unterbrechung der russischen Gaslieferungen nach Europa im Winter 2006/2007 zeigt, dass auch Konflikte zwischen Russland und seinen Nachbarn unmittelbare und sehr empfindliche Auswirkungen auf ganz Europa haben können.

Da nicht absehbar ist, wie diese bedrohlichen, politisch ausgelösten Verknappungen beendet werden können, bleibt nur die Schlussfolgerung, die Energie- und Rohstoffabhängigkeiten von diesen Ländern zu verringern. Dies wird unterstrichen durch die starke Vermutung, dass die Ölförderung ihren Höhepunkt dauerhaft überschritten habe, und auch deshalb die Zeit für ein Umsteuern der Energieversorgungsstrukturen denkbar knapp sei [Hauke/Wiesmann 2007].

Doch abgesehen von diesen dramatischen Bedrohungen bleibt ja die Frage, wie lange noch Millionen Endverbraucher die überbordenden Gewinne der internationalen Energiekonzerne finanzieren sollen statt einer zukunftssicheren Energieversorgung.

1.2 Ziele und Maßnahmen zur Lösung des Klimaproblems

Die wissenschaftlichen und politischen Anstrengungen der letzten Jahrzehnte haben schließlich zur Festlegung völkerrechtlich verbindlicher international abgestimmter Klimaschutzziele geführt: Rio-Konferenz 1992 und Kyoto-Protokoll 1997, das 2005 in Kraft trat. Wichtige Verbraucherländer, wie die USA, sind dieser Konvention allerdings bisher nicht beigetreten. Das von der UNO und den weltweiten wissenschaftlichen Dachorganisationen gestützte, von den Mitgliedsregierungen getragene „Intergovernmental Panel on Climate Change“ hat diese Ziele seither präzisiert [IPCC 2007a, 2007b]: Um die Erwärmung des Erdklimas auf die möglicherweise gerade noch tolerierbare Temperaturzunahme von global 2 °C zu beschränken, muss der menschengemachte Anstieg der Kohlendioxid-Konzentration in der Atmosphäre so eingeschränkt werden, dass ein Wert von 450 ppm (Teile pro Million)[1] nicht überschritten wird.

Vor dem Jahr 1800 lag dieser Wert für viele Jahrhunderte bei 280 ppm und ist seither mit wachsender Anstiegsrate, insbesondere seit 1950, auf derzeit 370 ppm gestiegen. Es bleibt also ein nur geringer Spielraum von 70 bis 80 ppm und ein knappes Zeitfenster bis höchstens zur Mitte dieses Jahrhunderts zur stabilen

[1] Dieses für kleine Beimengungen in Gasen oder Flüssigkeiten gebräuchliche Maß ist wie folgt zu verstehen: 450 ppm CO_2 in der Atmosphäre bedeutet, dass auf 1 Mio. Moleküle des Grundstoffs, bei Luft also knapp 0,75 Mio. Stickstoff- und knapp 0,25 Mio. Sauerstoff-Moleküle, 450 Kohlendioxid-Moleküle entfallen.

Einhaltung der noch für zulässig gehaltenen Maximalkonzentration von 450 ppm; dies erfordert eine Halbierung der Kohlendioxid-Emissionen gegenüber dem Wert von 1990. Es bedarf demnach enormer politischer, wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Anstrengungen, um die erforderlichen Maßnahmen zu entwickeln und umzusetzen. Hier soll nur die technische Seite dieser möglichen Maßnahmen knapp zusammengefasst werden, Verweise auf die Fülle von neuer Literatur, auch zu der politischen und wirtschaftlichen Umsetzung, finden sich in [Rahmstorf/Schellnhuber 2006]:

(1) Effizienzsteigerungen und Einsparungen (Abschn. 1.2.1),
(2) Ausbau nicht-fossiler Energiegewinnung, und zwar
    a. Erneuerbare und nachwachsende Energie (Abschn. 1.2.2),
    b. Nukleare Optionen (Abschn. 1.2.3),
(3) Kohlendioxid-Rückhaltung (Sequestrierung) (Abschn. 1.2.4).

1.2.1 Effizienzsteigerungen und Einsparungen

Durch Effizienzsteigerung, so heißt es in den meisten zusammenfassenden Untersuchungen, könnte in den entwickelten Ländern, etwa in Westeuropa, bis zur Hälfte des heutigen Primärenergieeinsatzes eingespart werden, in Schwellenländern vermutlich sogar noch mehr. Dies betrifft nahezu alle der oben schon erwähnten Bereiche der Technik mit ungezählten technischen Einzelmaßnahmen der unterschiedlichsten Art:

- Neubau und Nachrüstung aller Arten von Gebäuden in Richtung Null-Energie-Häuser;
- kompaktere Siedlungsformen und Anbindung an den Öffentlichen Nahverkehr;
- neue Heizsysteme aller Art;
- sparsamere Haushaltsgeräte;
- Automobile mit niedrigem Verbrauch, etwa Hybrid-Autos, deren Batterien mit Strom aus erneuerbaren Energien geladen werden;
- neue, v. a. dezentrale Strom- und Wärmeerzeugungssysteme;
- Kraftwerke mit erheblich höherem Wirkungsgrad, etwa mit zweistufigen Gas-Dampf-Turbinen;
- energieeffiziente Beleuchtung, etwa durch Verbot des Verkaufs von herkömmlichen Glühbirnen (wie in EU und Australien) usw.

Um all dies durchzusetzen, werden wohl Zuckerbrot und Peitsche erforderlich sein, d. h. monetäre Anreize und preisliche Abschreckung, sanfte Leitlinien und strikte Normen bis hin zu Verboten. Bei lokal verorteten Gütern wie Immobilien, aber auch Konsumgütern, Privatautos und dergleichen, kann dies im Prinzip durch Normensetzungen und fiskalische Instrumente auf jeweiliger Landesebene angestrebt werden. In anderen Fällen, etwa der überfälligen Besteuerung von Flugbenzin, müsste zumindest eine EU-weite Regulierung erfolgen.

1.2.2 Erneuerbare und nachwachsende Energie

Das Potenzial, die noch zu lösenden Probleme und die Grenzen des Einsatzes erneuerbarer Energie sind, nicht zuletzt veranlasst durch das deutsche Erneuerbare-Energien-Gesetz und die darauf aufbauenden entsprechenden Gesetze, in vielen anderen Ländern Gegenstand intensiver Forschung und Entwicklung[2]. Neben dem Wind, dessen Nutzung im Folgenden detailliert behandelt wird, haben die verschiedensten Arten der Biomassenutzung weltweit, aber auch in Deutschland, vorläufig noch das größte Potenzial. Den „nachwachsenden Treibstoffen“ Bioethanol, vorwiegend aus Zuckerrohr oder Mais gewonnen, und Biodiesel aus verschiedenen Ölpflanzen stellen zwei neue Studien [Fargione 2008, Scharlemann/Laurance 2008] allerdings ein durchgehend schlechtes Zeugnis aus: Zum Zwecke des Energiepflanzenanbaus gerodete Wälder binden weit mehr CO_2 als die neuen Pflanzungen, zudem wird beim Abfackeln der Wälder viel CO_2 freigesetzt und der Boden durch Erosion und Nährstoffverarmung gefährdet, der Flächenverbrauch ist hoch. Schließlich lässt die Konkurrenz zur Nahrungsmittelerzeugung auf bestehenden Anbauflächen die Preise für Grundnahrungsmittel armer Bevölkerungen, etwa für Mais, massiv ansteigen: eine durchwegs negative Bilanz.

Dagegen schneidet die Biogaserzeugung weit besser ab: Die Energieausbeute pro Ackerfläche ist mehr als doppelt so hoch wie bei Biosprit, die Erzeugung erfolgt in Tausenden von dezentralen und unauffälligen Anlagen im Anbaugebiet, Monokultur sowie der Gebrauch von Kunstdünger und Pestiziden kann durch Mischpflanzungen vermieden werden. Das produzierte Biogas kann nach Vorbehandlung direkt in die Gasnetze eingespeist werden und so die Gasimporte vermindern [Schmack 2007]. Schließlich und für die Durchsetzung besonders wichtig: Der Produktionsprozess ist im Wesentlichen derselbe, der sich beim natürlichen Zerfall von Pflanzenmasse im Boden abspielt. Der Bodenschlamm des Gärgefäßes enthält als Dünger alle Wertstoffe der Pflanzen in direkt verwertbarer Form: Stickstoff als Ammonium und in den Bakterien gebunden, alle Mineralien und die Humusbildner, die zur Bodenerneuerung unverzichtbar sind. Hier entsteht wirklich ein geschlossener ökologischer Kreislauf, dem nur die Energie entzogen wird, die zuvor durch Sonneneinstrahlung den Pflanzen zugeführt wurde.

Fotovoltaische Stromerzeugung ist mittlerweile nach intensivster Entwicklung und zunehmender großtechnischer Anwendung nicht mehr weit von der Wirtschaftlichkeit entfernt. Noch 2006 wurde sie durch einen Einspeisepreis gefördert, der beim mehr als Fünffachen der Einspeisevergütung für Windenergie lag. Seit 2009 liegt ihr Einspeisepreis nur noch beim gut Doppelten für Offshore-Windenergie. Die Kostenentwicklung der Halbleiter- und Dünnschicht-Technik für die Mikroelektronik deutet darauf hin, dass – für viele überraschend – fotovoltaische Stromerzeugung bereits bis 2020 betriebswirtschaftlich konkurrenzfähig mit herkömmlicher Stromerzeugung sein könnte, insbesondere in sehr sonnenreichen Ländern des Mittelmeerraums. In Deutschland war die fotovoltaische Stromerzeugung noch 2002

[2] Eine vorzügliche Übersicht über Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit und Umweltaspekte der erneuerbaren Energien gibt [Kaltschmitt 2006].

vernachlässigbar, 2007 waren es mit 3,5 TWh schon 0,6% der Stromnachfrage (Tab. 11.2, Z. 3.2), ein Wert, der in optimistischen Schätzungen aus 2006 für 2010 prognostiziert worden war (Tab. 11.6, Nettostromerzeugung, Fotovoltaik). Aufgrund der erwarteten drastischen Kostensenkung dürften die hier für 2020 erwarteten 8 TWh weit überschritten werden. Auch der solarthermischen Stromerzeugung werden erhebliche Potenziale attestiert.

Die solarthermische Nutzung zur Wärmeerzeugung steht wegen der stark gestiegenen Heizöl- und Gaspreise bereits an der Wirtschaftlichkeitsschwelle, insbesondere wenn sie bei ausreichender Dachfläche mit zur Heizungsunterstützung projektiert wird.

Vielfältige technologische Entwicklungen gibt es weiter im Bereich der Geothermie (oberflächennah zur Wärmeerzeugung, aus größeren Tiefen zur Stromerzeugung), der Nutzung der Wellen- und Gezeitenenergie und der Entwicklung so genannter Aufwindkraftwerke.

Bereits Anfang der 1980er Jahre wurden Aufwindkraftwerke für heiße trockene Regionen projektiert, ein Versuchskraftwerk wurde damals in Südspanien fertig gestellt. Für die Wüste in Namibia wurde Anfang 2007 ein 400-MW-Projekt vorgestellt mit 7 km^2 Glasdach und einem 1.500 m hohen Aufwindturm: Meerwasserentsalzung, Intensivlandwirtschaft und Stromerzeugung unter einem Dach – nur ein Ingenieurtraum?

Diese so vielfältigen wie vielversprechenden Ansätze moderner „Ingenieurkunst" sind nicht nur ein entscheidender Ansatz zur Bewältigung der Klimaprobleme, sondern durch ihren weitgehend dezentralen Charakter auch geeignet, die Partizipation an ihren Erträgen auf eine sehr breite Basis zu stellen.

1.2.3 Nukleare Optionen

Ob der weitere Ausbau bzw. eine Wiederbelebung der Kernenergie einen wichtigen Beitrag zur CO_2-Vermeidung und zur Verringerung von problematischen Abhängigkeiten leisten kann und soll, ist äußerst umstritten. Fest steht, dass technisch und wirtschaftlich auch nach 50 Jahren Reaktorentwicklung zunächst nur der Leichtwasserreaktor herkömmlicher Bauart zur Verfügung steht, in dem die von 0,7% im Natururan auf etwa 3% angereicherten spaltbaren Uran-235-Kerne gespalten werden.

Andere Reaktortypen haben sich technisch, sicherheitstechnisch und kostenmäßig als äußerst problematisch erwiesen. Das gilt insbesondere für die Brutreaktoren, auf die einst so große Hoffnungen gesetzt wurden: Der bei ihrem Einsatz in 100-Tonnen-Mengen umzusetzende erbrütete Brennstoff Plutonium ist der Bombenrohstoff schlechthin, darüber hinaus äußerst toxisch und als hochaktiver Alphastrahler bestens auch sonst für Anschläge geeignet. Schließlich bleiben auch bei den konventionellen Reaktoren das Grundübel der nirgends wirklich gesicherten Endlagerung der hochradioaktiven und langlebigen Endprodukte, wie des Plutoniums und anderer Transurane, und das ungelöste Problem der Sicherung der Reaktoren gegen terroristische Attacken, etwa durch gezielte Flugzeugabstürze.

Wenn man dem gedanklichen Ansatz folgt, dass Atomkraftwerke einen nennenswerten Beitrag zur globalen CO_2-Begrenzung leisten sollen, die zudem schnell erfolgen muss, so ergeben sich neben den schon genannten zwei weitere, grundlegende Schwierigkeiten:

- Die heutige Bedeutung der Kernenergie wird weit überschätzt. Sie trug 2006 weltweit nur zu 6,2% zur Deckung des Primärenergiebedarfs bei (in den OECD-Staaten waren es 2007 10,6%), und zwar weltweit ausschließlich zur Stromerzeugung mit einem Anteil von 14,8% [IEA 2008b, S. 24.]. In 2030 werden es laut IEA nur noch knapp 5% sein [IEA 2008b, S. 6/7, S. 46], weil u. a. aufgrund fehlender Fertigungskapazitäten mehr vorhandene Atomkraftwerke stillgelegt als neu zugebaut werden [Atomkraft 2006, S. 327 ff.].
- Auch wenn der Preis des Natururans bei den Stromgestehungskosten derzeit noch eine vergleichsweise geringe Rolle spielt, so wäre wegen der Beschränktheit der Uranressourcen eine langfristige Nutzung auf hohem Niveau nur unter Einsatz von erbrütetem Plutonium darstellbar, also um den Preis des Einstiegs in die Brütertechnologie mit den oben skizzierten Risiken.

Letztlich ist die Frage, ob die gesamtwirtschaftlichen Kosten, nämlich das Risiko und die gesellschaftlichen Konflikte beim weltweiten Bau von Hunderten neuer Kernkraftwerke, in einem vernünftigen Verhältnis stehen zu der damit erzielbaren Verminderung von Kohlendioxid bei der Stromerzeugung, wobei Kernkraftwerke eben nur Strom erzeugen, aber weder nutzbare Wärme noch Treibstoffe und all das Andere, wofür fossile Rohstoffe heute dienen.

So viel zur Kernspaltung, doch wie steht es um die Kernverschmelzung? Seit 5 Jahrzehnten wird die Hoffnung genährt, den Prozess der Kernfusion von Wasserstoff zu Helium auf der Erde zu zähmen, statt der Wasserstoffbombe also den Fusionsreaktor mit fast unerschöpflichen Ressourcen zu bauen und so die Energiequelle der Sterne zu erschließen, die seit gut 10 Milliarden Jahren den Kosmos zum Leuchten bringt. Trotz gewaltiger weltweiter Anstrengungen musste die vermutete Frist zur Einlösung dieser Erwartung seit 50 Jahren jedes Jahrzehnt um weitere 10 Jahre verlängert werden. Auch wenn die Weltgemeinschaft der Forscher nun mit dem Versuchsreaktor ITER in Südfrankreich mit einer Anfangsfinanzierung von rund 10 Mrd. € einen neuen heroischen Versuch unternimmt, wird man frühestens etwa im Jahr 2050 entscheiden können, ob das dort verfolgte Konzept auch nur die Chance der Weiterentwicklung zu einem Kraftwerk bietet.

Zwei ungelöste und vielleicht wirklich unlösbare Probleme stehen an: Die Lösbarkeit des ersten Problems – die Stabilität des Plasmaeinschlusses – mag durch ITER entschieden werden; das zweite Problem – die Festigkeit der „Ersten Wand" – bleibt offen. Die beiden Probleme lassen sich wie folgt beschreiben: Im Inneren von Fixsternen, wie der Sonne, wird der „Rohstoff", ein sehr dichtes und gut 10 Mio. °C heißes Gemisch aus Wasserstoff-Atomkernen und Elektronen, genannt Plasma, durch das zentral nach innen gerichtete extrem starke Gravitationsfeld der riesigen Sonnenmasse zusammengehalten. Dennoch zeigen Sonnenflecken und die immer wieder auftretenden Eruptionen, erst recht die extremen zeitlichen Helligkeitsschwankungen mancher Fixsterne die Instabilität dieser Feuerbälle an. Auf

der Erde aber haben wir es nicht – wie auf der Sonne – mit einem Feuerball von Billionen Tonnen Wasserstoff zu tun, in dem bei hoher Dichte schon oberhalb 10 Mio. °C genügend Kerne verschmelzen, um das nukleare Feuer aufrecht zu erhalten. Im Fusionsreaktor muss vielmehr – mangels einer zentralen zusammenhaltenden Kraft – das Plasma aus einigen Hundert Gramm von schwerem und überschwerem Wasserstoff durch extrem starke Magnetfelder zu einem in sich verwundenen Schlauch zusammengepresst werden, in dem die Teilchen mit hoher Geschwindigkeit in einer Vakuumkammer umlaufen. In dem kleinen Plasmavolumen muss die Temperatur noch etwa auf das Fünffache der Temperatur im Sonneninneren erhöht werden, bis der Energieertrag der dann fusionierenden Kerne den Aufwand für Kompression und Erhitzung übersteigt. Die Oberfläche dieses Plasmaschlauchs, der nur durch das Magnetfeld der großen weit außen liegenden Spulen gegen den inneren Druck zusammengehalten wird, ist und bleibt trotz immer neuer Gegenmaßnahmen äußerst instabil: Jede kleinste Inhomogenität schaukelt sich blitzschnell auf; das strömende Plasma erzeugt selbst Magnetfelder und reißt wie bei einem platzenden Ballon den Plasmaschlauch in Millionstel Sekunden weit auf, so dass der kostbare Brennstoff in das umgebende Vakuumgefäß ausströmt.

Wenn aber diese Instabilitäten doch irgendwann beherrscht und der Fusionsprozess aufrechterhalten werden kann, so entsteht pro Kernverschmelzung ein schnelles Neutron, das 80% der bei einer Fusion freigesetzten Energie trägt. Da es keine Ladung trägt, durchläuft dieses Teilchen unablenkbar und ungebremst das Magnetfeld, das die geladenen Plasmateilchen auf ihre Bahn zwingt und einschließt und trifft mit etwa einem Sechstel der Lichtgeschwindigkeit geraden Wegs direkt auf die Innenwand des Vakuumgefäßes. Erst durch den Zusammenstoß mit den Atomkernen dieser so genannten „Ersten Wand“ wird seine Energie letztlich in Wärme umgesetzt und kann so nutzbar gemacht werden.

Es ist aber bis heute noch kein Material für die Wand des Plasmagefäßes gefunden worden, das unter diesem Beschuss nicht nach kurzer Zeit porös wird und zerfällt. Außerdem entstehen durch den Neutronenbeschuss hochradioaktive Isotope, nicht viel weniger als bei der Kernspaltung im uranbetriebenen Reaktor, die bei jedem Auswechseln der Wand entsorgt werden müssen.

So bleibt die Kernfusion wohl bestenfalls eine Großtechnologie für das 22. Jahrhundert, falls wir es nicht doch vorziehen, die Fusionsenergie auch in Zukunft von dorther zu beziehen, wo sie noch einige Milliarden Jahre zuverlässig entsteht: von unserer Sonne.

1.2.4 Kohlendioxid-Rückhaltung

Eine Zukunftstechnologie, also die Entwicklung eines ganzen Bündels von ineinandergreifenden technischen Maßnahmen, die in den nächsten 15 bis 25 Jahren weltweit zur Anwendung kommen könnten, um das Klimaschutzziel zu erreichen, nämlich Stabilisierung der CO_2-Konzentration bei maximal 450 ppm, trägt den Namen Kohlendioxid-Rückhaltung bzw. Kohlenstoff-Sequestrierung [Rahmstorf/Schellnhuber 2006, Kap. 5; Rentzing 2007]. Möglichst alle Großanlagen, bei

denen Kohle oder Kohlenwasserstoffe, wie Erdöl oder Erdgas, als Energieträger eingesetzt werden, v. a. Braun- und Steinkohlekraftwerke, Hochöfen und andere mit Kohle befeuerten Anlagen, aber schließlich auch Öl- und Gaskraftwerke müssen hierfür mit Rauchgaskühlung und CO_2-Abscheidung, z. B. durch Verflüssigung, ausgerüstet werden. Das komprimierte Kohlendioxid wird in Pipelines gesammelt und mit hohem Druck in tief liegende geologische Schichten verpresst, wo es für viele Jahrhunderte verbleiben soll. Dabei ergibt sich ein weiteres Risiko: Das wesentlich leichtere Methan (= Erdgas), selbst ein wirksames Treibhausgas, das typischerweise in den darüber liegenden porösen Schichten liegt, wird ausgetrieben und bewirkt, wenn es nicht aufgefangen und gesammelt werden kann, seinerseits die Klimaerwärmung. Andere Überlegungen befassen sich mit dem Verpressen in Salzkavernen. Viele der einzelnen Schritte auf diesem Weg benutzen großtechnisch erprobte Verfahren; ob die Koordination gelingt und genügend gasdichte tiefe geologische Formationen erschlossen werden können, ist freilich noch offen. Gleiches gilt für die Frage der Kosten, der infrastrukturellen Konsequenzen und der Notwendigkeit, das gelagerte Kohlendioxid für Jahrtausende von der Atmosphäre fernzuhalten.

China, das immerhin einem Fünftel der Erdbevölkerung in den nächsten Jahrzehnten einen vielfach höheren Lebensstandard als heute bieten will, und dafür schon jetzt den Energieeinsatz enorm steigert, verfügt über zeitlich weit reichende Kohlevorräte, aber wohl auch über viele geeignete geologische Speichermöglichkeiten.

1.3 Leitszenarien für zukünftige Energiestrukturen

1.3.1 Wie sind die Aussichten, die Energie- und Klimaziele zu erreichen?

Der Weltklimarat hat Anfang Mai 2007 seinen dritten Bericht vorgelegt [IPCC 2007c]. Wie schon bei der Vorstellung der ersten beiden Berichte [IPCC 2007a, 2007b] wurde betont, dass v. a. schnell gehandelt werden müsse, wenn der weltweite Temperaturanstieg auf 2 °C begrenzt werden soll – schnell und konsequent!

Schon zuvor waren einige führende weltwirtschaftliche Forschungsinstitute übereinstimmend zu dem gleichen Ergebnis gekommen: Eine weltweit koordinierte Anstrengung von Staaten und Städten, Wirtschaftsunternehmen aller Art und einer organisierten Öffentlichkeit kann den doppelten Umschwung – Energieeffizienz plus CO_2-Rückhaltung und erneuerbare Energie – bewältigen. Die Kosten dieser dritten industriellen Revolution können, gemessen am Weltsozialprodukt, im 1%-Bereich liegen. Den umfangreichsten und viel beachteten Beleg dafür lieferte im Oktober 2006 im Auftrag der britischen Regierung der frühere Vizepräsident der Weltbank, Sir Nicholas Stern [Stern 2006a, 2006b]. Dem Ausbau der Windenergie kommt dabei zumindest für die Stromerzeugung in vielen Ländern, etwa den Nordseeanliegerstaaten, eine wesentliche Rolle zu.

Die Staats- und Regierungschefs der EU einigten sich am 9. März 2007 verpflichtend darauf, bis 2020 den Ausstoß der klimaschädlichen Treibhausgase in der Europäischen Union im Vergleich zu 1990 um mindestens 20% zu verringern, und sogar um 30%, falls sich die anderen Industrieländer zu vergleichbaren Reduzierungen verpflichten. Der Anteil von Energie aus Sonne, Wasser, Wind und Biomasse am gesamten Primärenergieeinsatz soll bis 2020 auf mindestens 20% erhöht werden. In Deutschland betrug der Anteil in 2007 6,6%[3], bei der Stromerzeugung 18% (Tab. 11.3), bis 2020 sollen es bei der Stromerzeugung 30% werden. Dies vermittelt einen Eindruck von der Größe der Aufgabe, die in relativ kurzer Zeit bewältigt werden muss.

Ein wesentlicher Teil des Zuwachses an der Stromerzeugung, die 2006 in Deutschland 42%[4] des Primärenergieeinsatzes erforderte, soll durch Onshore-Windenergie und in Zukunft v. a. verstärkt durch die Nutzung von Offshore-Windenergie erreicht werden (Abschn. 7.1.1). Hier ergibt sich allerdings ein weites Feld von Problemen: Die Regionen, in denen derzeit die Windenergie auch ohne „Quersubventionierung“ genutzt werden kann, nämlich an den Küsten und weit vor den Küsten, liegen weit entfernt von den Schwerpunkten des Verbrauchs elektrischer Energie. Daher entsteht ein hoher Bedarf an zusätzlicher Übertragungsleistung über Hoch- und Höchstspannungsleitungen, für die das jetzige Einspeisungs- und Übertragungsnetz nicht ausgelegt ist (Abschn. 4.1.2; Abschn. 10.1.4). Es bleibt abzuwarten, ob in Süddeutschland Windenergieanlagen mit sehr hohen Türmen durchsetzbar sind und wirtschaftlich betrieben werden können. In jedem Fall ist insbesondere für die geplanten großen Offshore-Windkraftwerke eine Erhöhung der Übertragungsleistung von den Küstenregionen zu den Bevölkerungs- und Industriezentren erforderlich. Diese Erhöhung wird wohl wegen der Akzeptanzprobleme von neuen Freileitungstrassen nur von im Boden verlegten neuen Leitungssystemen mit sehr hohen Leistungen durchführbar sein, etwa mit bipolaren Kabelsystemen für Wechselstrom oder mit Gleichstromübertragung in Erdkabeln oder in gasisolierten Rohrleitungen (Abschn. 4.3.2(1)). E.ON-Netz realisiert jedenfalls die Netzanbindung der ersten Offshore-Windkraftwerke durch Gleichstromleitungen (Abschn. 4.4.2; Abschn.10.3.2).

Die Netzoptimierungen und Netzverstärkungen zum Zweck der Windenergieeinspeisung sind zunächst in den windbegünstigten, aber mit Leitungen hoher Übertragungskapazität wenig erschlossenen Küstengebieten durchzuführen; E.ON-Netz hat in Schleswig-Holstein schon eine Reihe derartiger Optimierungsmaßnahmen („Leitungsmonitoring“) durchgeführt. Im weiteren Verlauf des Windenergieausbaus wird die Fernübertragung der im Küstenbereich oder weit vor den Küsten erzeugten elektrischen Energie zunächst bis zu den Netzknoten am Festland und dann weiter zu den Verbrauchsschwerpunkten eines der vordringlichen Probleme darstellen. Aber

---

[3] In 2007 waren es 992 PJ von insgesamt 13.878 PJ Primärenergieverbrauch [Energiedaten 2008, Tab. 4: Primärenergieverbrauch nach Energieträgern]. Hinweis: 1 PJ entspricht einem thermischen Energieinhalt von 0,278 TWh_{th}.

[4] In 2006 waren es 5.813 PJ von insgesamt 13.878 PJ Primärenergieverbrauch [Energiedaten 2008, Tab. 23: Einsatz von Energieträgern zur Stromerzeugung].

auch die Struktur des Kraftwerkssystems muss schrittweise angepasst werden, um den raschen Ausgleich für die stark fluktuierende Windenergie zu ermöglichen.

Das weltweite Marktvolumen der erneuerbaren Energien wird sich bis zum Jahr 2020 auf jährlich bis zu 250 Mrd. € deutlich erhöhen [Dresdner Bank 2007], eine Versechsfachung gegenüber 2006. Insbesondere in Deutschland wird das Investitionsvolumen der erneuerbaren Energien schon in den nächsten Jahren deutlich anwachsen. Soll sich der Anteil der erneuerbaren Energiequellen, wie im Koalitionsvertrag 2005 vereinbart, schon bis zum Jahr 2012 auf 20% der Gesamtstromerzeugung erhöhen, so erfordert dies nach Einschätzung der Dresdner-Bank-Ökonomen Investitionen in Anlagen für erneuerbare Energien in Höhe von 70 Mrd. € pro Jahr. Gemäß der Allianz-Klima-Expertengruppe wird der Münchner Finanzkonzern bis zum Jahr 2010 bis zu 500 Mio. € in Projekte für erneuerbare Energien anlegen. Ein Großteil des Geldes soll in Windenergieprojekte investiert werden. Im Juni 2008 wurde das Erneuerbare-Energien-Gesetz (Abschn. 5.3.3) erneut novelliert, um den Anteil erneuerbarer Energien an der Stromversorgung bis 2020 auf 25% bis 30% und danach kontinuierlich weiter zu erhöhen.

Eine Quantifizierung des volkswirtschaftlichen Nutzens des Ausbaus der Windenergie, insbesondere durch Brennstoffeinsparung und CO_2-Vermeidung, wird in Abschn. 8.1 vorgenommen. Hinzu kommen qualitative Argumente wie verringerte Abhängigkeit von unsicheren Lieferländern und erhebliche positive Arbeitsplatzeffekte. Dies gilt auch bei verringertem Wirtschaftswachstum („Finanzkrise Ende 2008“): Gerade Investitionen in den Klimaschutz sind sehr kosteneffektiv und kurbeln das Wirtschaftswachstum an bei gleichzeitiger Absenkung der Umweltbelastung.

1.3.2 Stromerzeugung in Deutschland bis 2050

Die Leitstudie 2008 des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit [BMU 2007a, 2008c] legt dar, wie die Zielsetzung der Bundesregierung, die Klimagasemissionen bis 2050 in Deutschland auf rund 20% des Werts von 1990 zu senken, grundsätzlich umgesetzt werden kann. Diese Zielsetzung soll ohne Nutzung der Kernenergie erreicht werden. Über die verschiedenen Zwischenziele hinaus ist dieses langfristige Ziel (in allen Industriestaaten) zu erfüllen, wenn die CO_2-Konzentration in der Atmosphäre den kritischen Wert von ca. 450 ppm nicht überschreiten soll. Dies entspricht einer mittleren globalen Temperaturerhöhung von weniger als 2 °C gegenüber der Periode 1980 bis 1999.

Abbildung 1.4 zeigt eine Projektion der installierten Kraftwerksleistungen in Deutschland nach Energiequellen und Kraftwerksarten bis 2050. Dabei ist berücksichtigt, dass wegen des steigenden Anteils von erneuerbarer Energien im konventionellen Teil der Stromversorgung ein erhöhter Regelbedarf entsteht, der vorzugsweise mit Gaskraftwerken abgedeckt wird. Bei den spätestens ab 2040 geplanten sehr hohen Anteilen erneuerbarer Energien verschwindet die herkömmliche Grundlaststromerzeugung weitgehend, die verbleibenden fossil befeuerten Kraftwerke stellen dann ausschließlich die zu einer sicheren Stromversorgung erforderliche Ausgleichs-

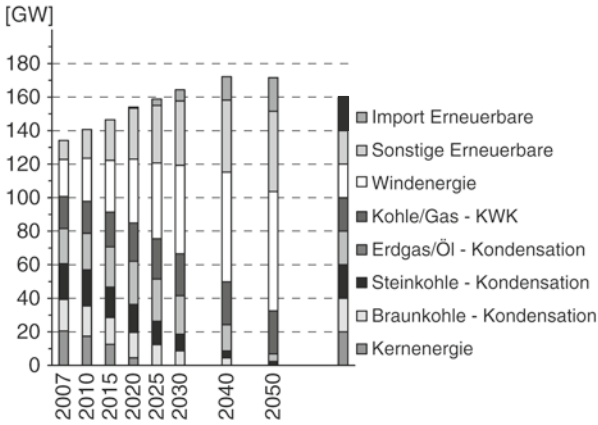

Abb. 1.4 Installierte Leistungen zur Stromerzeugung in Deutschland bis 2050 ([BMU 2007a, S. 36; BMU 2008c])

und Reserveleistung zur Verfügung. Eine wichtige Voraussetzung für die Umsetzung des in Abb. 1.4 gezeigten Umbaus ist auch, dass der Abbau der Kernkraftwerksleistung planmäßig erfolgt. Andernfalls ergeben sich Konflikte mit den Zubauplänen für fossile Kraftwerke, wenn gleichzeitig am massiven Ausbau der erneuerbaren Energien festgehalten werden soll.

Abbildung 1.5 zeigt eine Projektion der Entwicklung der gesamten Stromerzeugung inklusive fossile und nukleare Energieträger in Deutschland bis zum Jahr 2050.

Auch im Jahr 2020 dominiert noch die Kondensationsstromerzeugung mit 60% (2005 = 82%), fossile Brennstoffe stellen noch 67% des Stroms bereit. Die eigentliche strukturelle Umstellung der Stromversorgung, die zu einer Reduktion der Kondensationsstromerzeugung auf den für Regelungs- und Ausgleichszwecke erforderlichen Anteil führt, benötigt danach aber weitere 20 bis 30 Jahre.

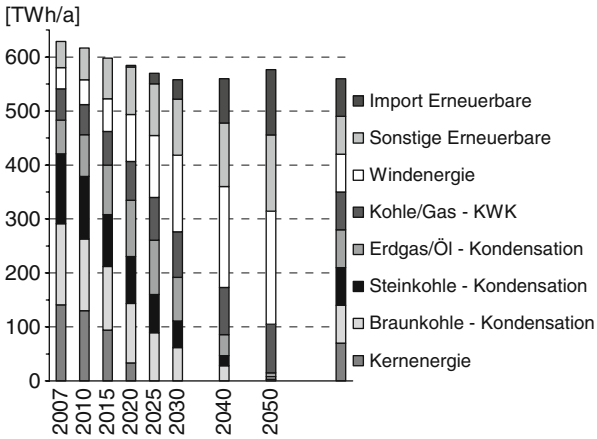

Abb. 1.5 Mögliche Entwicklung der gesamten Stromerzeugung in Deutschland bis 2050 ([BMU 2007a, S. 34; BMU 2008c])

Im Jahr 2050 beträgt in diesem Szenario der Kondensationsstromanteil nur noch 5%, derjenige der fossil befeuerten Kraft-Wärme-Kopplung 18%, die erneuerbaren Energien dominieren dann gemäß dieser Prognose die Stromversorgung mit 77% Anteil an der Bruttostromerzeugung. Aus Gründen der Kostenoptimierung, aber auch um mit erneuerbaren Energieträgern Regelungs- und Reserveaufgaben übernehmen zu können, stammen von den dann bereitgestellten rund 450 TWh/a Strom aus erneuerbaren Energieträgern nahezu die Hälfte aus regelbaren Energiequellen wie Biomasse, Geothermie, solarthermischen Kraftwerken oder bedingt regelbaren Energiequellen wie Laufwasserkraftwerken.

Auch der Offshore-Anteil der Windenergie zeigt eine günstige Erzeugungscharakteristik, welche die Sicherung der Stromversorgung unterstützen kann: gegenüber Onshore-Anlagen eine mehr als doppelt so große Jahresenergieerzeugung pro m^2 Rotorfläche und dies auch mit deutlich geringeren zeitlichen Schwankungen im Bereich von Stunden und Tagen. Wegen der zukünftigen großen Bedeutung dieses Sektors werden die Pläne und die zahlreichen noch offenen Probleme in einem eigenen Abschn. 7.2 dargestellt.

1.3.3 Regenerative Stromerzeugung in Deutschland bis 2050

Abbildung 1.6 zeigt in einer Ausschnittsvergrößerung aus Abb. 1.4 nur die installierten Leistungen zur *regenerativen* Stromerzeugung in Deutschland bis 2050.

Da Windenergie den größten Beitrag liefern soll, sind die Annahmen für ihren weiteren Ausbau von besonderem Einfluss. Der Einstieg in die Offshore-Nutzung hat sich gegenüber früheren Annahmen um mehrere Jahre verzögert. Mit einem

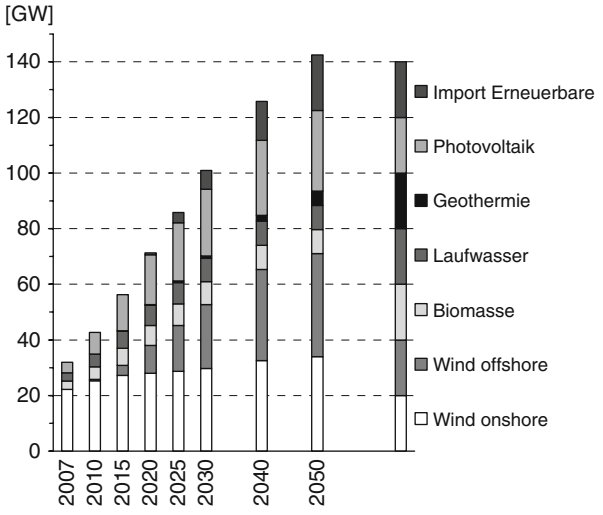

Abb. 1.6 Installierte Leistungen zur regenerativen Stromerzeugung in Deutschland bis 2050 ([BMU 2007a, S. 36; BMU 2008c])

Leistungsausbau auf über 1 GW könnte bis 2011 der Einstieg in eine energiewirtschaftlich relevante Nutzung beginnen, 2020 könnten 10 GW erreicht werden. Voraussetzung für diese Ausbaudynamik ist allerdings eine erfolgreiche Demonstration der ersten Offshore-Windparks und eine Vergütungsregelung für die Offshore-Windenergie, die diesen Einstieg und den nachfolgenden stetigen Ausbau attraktiv genug für die potenziellen Investoren machen. Die im Dezember 2006 in Kraft getretene Übertragung der Verantwortung für die Seekabelanbindungen der Offshore-Windparks auf die Übertragungsnetzbetreiber [IPlanBG 2006a] und die Kostenüberwälzung auf die Gesamtheit aller Netznutzer [EnWG 2008, § 17 Abs. 2a] sind dabei wichtige Schritte.

Für die Nutzung der Windenergie an Land wird sowohl von einem weiteren Neubau auf den derzeit ausgewiesenen, aber noch nicht genutzten Flächen als insbesondere auch von einem nennenswerten Beitrag des Repowering ab etwa 2010 ausgegangen. Das Wort Repowering bezeichnet eine erhebliche Leistungserhöhung durch den Ersatz von bestehenden Windenergieanlagen durch Anlagen mit höheren Türmen und insbesondere größeren Rotorflächen und damit wesentlich höheren installierten Leistungen im Bereich von 3 MW bis 6 MW je Anlage. Durch Zubau und Repowering soll die onshore insgesamt installierte Leistung auf gut 25 GW in 2010 und gut 27 GW in 2020 erhöht werden.

Onshore und offshore wären dann in 2020 rund 37 GW Windleistung installiert. Aus Windenergie würden dann rund 82 TWh/a produziert, gut 15% der für 2020 prognostizierten deutschen Stromnachfrage. Ab 2009 wurden die EEG-Mindestvergütungen für Windenergie deutlich angehoben (Abschn. 5.3.3). Es wird erwartet, dass dadurch die Ausbaugeschwindigkeit der Windenergie gegenüber den offiziellen Schätzungen etwas beschleunigt wird.

Das Gesamtpotenzial der installierten Windgeneratorleistung wird im Endausbau auf 70 GW geschätzt, davon je 35 GW onshore und offshore, bei einem Gesamtpotenzial der Windenergieproduktion von rund 200 TWh, nämlich 68 TWh onshore und mit 135 TWh doppelt so viel offshore wegen der dort deutlich höheren und gleichmäßigeren Windgeschwindigkeiten [BMU 2008b, S. 44].

Abbildung 1.7 zeigt die mögliche Entwicklung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern in Deutschland bis 2050; spätestens dann soll das gesamte Potenzial der Windenergie in Höhe von rund 200 TWh genutzt sein.

Von 63,5 TWh/a im Jahr 2005 kann nach dieser konservativen Prognose der Beitrag der erneuerbaren Energieträger zur Stromerzeugung bis 2010 auf 92 TWh/a und bis 2020 auf 156 TWh/a steigen. Der Prognosewert für 2010 wurde bereits 2007 mit 91,2 TWh erreicht [Energiedaten 2008, Tab. 22].

Das Ziel der Bundesregierung, bis 2020 einen Anteil der erneuerbaren Energien von mindestens 30% an der Bruttostromerzeugung zu erreichen, wäre v. a. dann gefährdet, wenn das Erneuerbare-Energien-Gesetz grundsätzlich in Frage gestellt werden sollte (Kap. 5). Von Bedeutung ist weiter, dass die Klimaschutzziele nur dann erreicht werden, wenn die Senkung des Bruttostromverbrauchs um 11% bis 2020 erreicht wird, keine zusätzlichen Kohlekraftwerke über die heute schon im Bau befindlichen hinaus errichtet werden, und die Stilllegung alter ineffizienter Anlagen

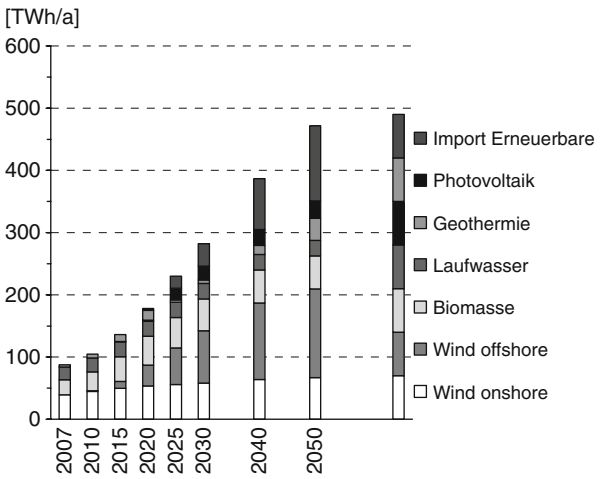

Abb. 1.7 Entwicklung der regenerativen Stromerzeugung in Deutschland bis 2050 ([BMU 2007a, S. 34; BMU 2008c])

erfolgt, sobald die vorgesehene Lebensdauer erreicht sein wird. Die entscheidenden Vorgaben, nämlich Ausstieg aus der Kernenergienutzung und Klimaschutzziele können dann gleichzeitig eingehalten werden.

Vor diesem Hintergrund des globalen Denkens und notwendigerweise lokalen Handelns wird in diesem Buch die stark wachsende Windenergieproduktion, das „Flagschiff" der erneuerbaren Energien detailliert beschrieben sowie Analysen und Vorschläge zu ihrer Integration in die bestehende Energieversorgung vorgestellt.

Literatur

[Atomkraft 2006] Mythos Atomkraft. Hrsg. von der Heinrich-Böll-Stiftung, Berlin, 2006.

[BMU 2007a] Leitstudie 2007 – Ausbaustrategie Erneuerbare Energien, Aktualisierung und Neubewertung bis zu den Jahren 2020 und 2030 mit Ausblick bis 2050. Nitsch J in Zusammenarbeit mit der Abteilung Systemanalyse und Technikbewertung des DLR – Institut für Technische Thermodynamik, Stuttgart. Untersuchung im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin, Februar 2007, aktualisiert im September 2008 [BMU 2008c]. http://www.erneuerbare-energien.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/leitstudie2007.pdf (abgerufen am 2.7.2008).

[BMU 2008b] Erneuerbare Energien in Zahlen – Internet Update. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin, Juni 2008. http://www.erneuerbare-energien.de/files/erneuerbare_energien/downloads/application/pdf/broschuere_ee_zahlen.pdf (abgerufen am 23.08.2008).

[BMU 2008c] Leitstudie 2008 – Ausbaustrategie erneuerbare Energien vor dem Hintergrund der aktuellen Klimaschutzziele Deutschlands und Europas. Nitsch J in Zusammenarbeit mit der Abt. Systemanalyse und Technikbewertung des DLR – Institut für Technische Thermodynamik, Stuttgart. Untersuchung im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin, September 2008. http://www.bmu.de/erneuerbare_energien/downloads/doc/42383.php (abgerufen am 16.10.2008).

[Broder 2006] Broder H M: Hurra, wir kapitulieren! wjs-Verlag, Berlin, 2006.

[Dresdner Bank 2007] Dresdner Bank rechnet mit Investitionsboom bei erneuerbarer Energie. Studie: bis zu Versechsfachung des Marktvolumens möglich. News vom 29. März 2007. http://www.wind-energie.de/de/aktuelles/article/dresdner-bank-rechnet-mit-investitionsboom-bei-erneuerbarer-energie/145/ (abgerufen am 7.9.2008).

[Energiedaten 2008] Energiedaten – Zahlen und Fakten. Nationale und Internationale Entwicklung. Gesamtausgabe der Energiedaten. Datensammlung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, Berlin, 2008. http://www.bmwi.de/BMWi/Navigation/Energie/energiestatistiken.html (abgerufen am 6.9.2008).

[EnWG 2008] EnWG – Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung. http://bundesrecht.juris.de/enwg_2005/index.html (abgerufen am 7.9.2008).

[Fargione 2008] Fargione J et al.: Land Clearing and the Biofuel Carbon Debt. Science, published Online 7 February 2008.

[Hauke/Wiesmann 2007] Hauke R, Wiesmann O: Peak-Oil: Der globale Krieg ums Öl. In: Blätter für deutsche und internationale Politik, Nr. 7/2007, S. 837 ff.

[IEA 2008a] Energy Prices and Taxes, quarterly Statistics. International Energy Agency, OECD, Paris, 2008.

[IEA 2008b] Key World Energy Statistics. International Energy Agency, OECD, Paris, 2008. http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2008/key_stats_2008.pdf (abgerufen am 6.9.2008).

[IPCC 2007a] Working Group I Report: The Physical Science Basis. Summary for Policy Makers. Intergovernmental Panel on Climate Change, Paris, 2 February 2007. http://www.ipcc.ch/SPM2feb07.pdf.

[IPCC 2007b] Working Group II Report: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Summary for Policy Makers. Intergovernmental Panel on Climate Change, Brussels, 6 April 2007. http://www.ipcc.ch/SPM13apr07.pdf.

[IPCC 2007c] Working Group III Report: Mitigation of Climatic Change. Summary for Policy Makers. Intergovernmental Panel on Climate Change, Bangkok, 4 May 2007. http://www.ipcc.ch/SPM040507.pdf.

[IPlanBG 2006a] Gesetz zur Beschleunigung von Planungsverfahren für Infrastrukturvorhaben (Infrastrukturplanungsbeschleunigungsgesetz). Gesetzesbeschluss des Deutschen Bundestages, Drucksache 764/06, 3.11.2006; unverändert akzeptiert durch Bundesratsbeschluss vom 24.11.2006. http://www.buzer.de/gesetz/7500/index.htm (abgerufen am 30.06.2008).

[Kaltschmitt 2006] Kaltschmitt M, Streicher W, Wiese A (Hrsg.): Erneuerbare Energien – Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. 4. Aufl., Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2006.

[Rahmstorf/Schellnhuber 2006] Rahmstorf S, Schellnhuber H J: Der Klimawandel. Beck-Verlag, München, 2006.

[Rentzing 2007] Rentzing S: Die Kohle-Wäscher. In: neue energie, Bundesverband WindEnergie e.V. – BWE, Osnabrück, Heft 5/2007, S. 24–30.

[Scharlemann/Laurance 2008] Scharlemann J, Laurance W: How Green Are Biofuels? Science 4, January 2008, vol. 319, no. 5859, S. 43–44.

[Schmack 2007] Insight Schmack Biogas. VDI-Nachrichten 02.02.2007, Nr. 5, S. 17.

[Stern 2006a] Stern N: Die wirtschaftlichen Folgen des Klimawandels. Zusammenfassung der Schlussfolgerungen, 30. Oktober 2006. http://ukingermany.fco.gov.uk/resources/de/news/2006/10/13436 (abgerufen am 17.10.2008).

[Stern 2006b] Stern N: Stern Review Report on the Economics of Climate Change. HM Treasury, London, 2006. Hard copy Cambridge University Press 2007. http://www.hm-treasury.gov.uk/6520.htm (abgerufen am 17.10.2008).

http://www.springer.com/978-3-540-85252-0

Windenergie
Zuverlässige Integration in die Energieversorgung
Jarass, L.; Obermair, G.M.; Voigt, W.
2009, XX, 295 S., Hardcover
ISBN: 978-3-540-85252-0