



Die große Photovoltaik-Dachanlage auf der Münchner Messe hat eine Nennleistung von rund 1 MW_{el} (Foto: Shell Solar).

Entwicklung der erneuerbaren Energien

Regenerative Energieträger – ein Überblick

HARALD KOHL | WOLFHART DÜRRSCHMIDT

Erneuerbare Energien haben sich zum globalen Erfolgsmodell entwickelt. Welchen Beitrag leisten sie in Deutschland, der EU und international? Wie hoch ist ihr Ausbaupotenzial? Eine aktuelle Bilanz des Innovationsgeschehens.

Erneuerbare Energien haben sich heute in Europa, den USA und Asien zum Erfolgsmodell entwickelt. Aktuelle Beschlüsse, Daten, Berichte, Studien, Gesetze etc. finden sich auf der Themenseite des Bundesumweltministeriums zu erneuerbaren Energien [1].

Die EU mit anspruchsvollen Zielen

Schauen wir uns zuerst die Entwicklung in der Europäischen Union an: Am 25. Juni 2009 ist die Richtlinie 2009/28/EG des Europäischen Parlaments und Rates zur Förderung der Erneuerbaren Energien in der Europäischen Union in Kraft getreten [2]. Verbindliches Ziel dieser Richt-

linie ist es, den Anteil der erneuerbaren Energie am gesamten Brutto-Endenergieverbrauch in der EU von ca. 8,5 % im Jahr 2005 auf 20 % bis zum Jahr 2020 zu steigern. Dabei soll ihr Anteil im Verkehrssektor in allen Mitgliedstaaten im Jahr 2020 mindestens 10 % betragen. Darin eingerechnet sind nicht nur Biotreibstoffe, sondern auch der Antrieb mit Strom auf Basis erneuerbarer Energie. Für den Anteil regenerativer Energie am gesamten Brutto-Endenergieverbrauch (Strom, Wärme/Kälte und Transport) wurde für jeden Mitgliedstaat ein verbindliches eigenes Ziel festgelegt, das vom Ausgangswert abhängt. Für Deutschland liegt dieses Ziel für das Jahr 2020 bei 18 %, für die Nachbarländer Belgien bei 13 %, Dänemark bei 30 %, Frankreich bei 23 %, Luxemburg bei 11 %, die Niederlande bei 14 %, Österreich bei 34 %, Polen bei 15 % und Tschechien bei 13 %.

Die Mitgliedstaaten können die Instrumente zum Erreichen dieser Ziele selbst wählen. Besonders erfolgreich verläuft der Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energie zur Stromgewinnung in den Mitgliedstaaten, die Vorrang- und



Montage einer Windenergieanlage im Offshore-Windenergiepark Alpha Ventus, der 2009 in der Nordsee in Betrieb ging (Foto: alpha ventus).

Einspeiseregulungen analog zum deutschen Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) eingeführt haben. 20 der EU-Staaten haben inzwischen solche gesetzliche Förderinstrumente in Kraft; global sind es bereits über 50 Staaten [3, 4].

Als Zwischenbilanz ergaben sich für das Jahr 2009 folgende Anteile der erneuerbaren Energie in der EU: Elektrizität: rund 17 %, Wärme/Kälte: rund 10 %, Straßenverkehr: rund 4 %. Die Anlagen zur Stromgewinnung, vor allem aus der Windkraft, der Solarenergie und der Bioenergie, konnten deutlich weiter entwickelt werden. Sie dürften auch in Zukunft diesen Vorsprung halten. Dabei kommt es nicht nur auf den technischen Fortschritt und die Kosteneffizienz an, sondern auf die Ausgestaltung nach allen Kriterien der Nachhaltigkeit. Systemanalyse und -optimierung, Partizipation und Akzeptanz der Beteiligten, ökologische Begleitforschung, Umwelt- und Naturschutz sowie Ressourcenschonung erhalten zunehmende Bedeutung. Damit im Jahr 2020 10 % Anteil im Transportbereich und 20 % Anteil am gesamten Endenergieverbrauch erzielt werden können, muss die Stromversorgung 2020 bereits rund ein Drittel auf erneuerbaren Energien basieren. Mit regelmäßigen Berichten der Mitgliedstaaten und der EU-Kommission wurde ein engmaschiges Monitoringsystem entwickelt [4-6].

Windenergie boomt international

Gerade das Beispiel der Windenergie zeigt, dass die Erfolge selbst bei vergleichbarer Ausgangssituation sehr unterschiedlich sein können. Die umwelt- und energiepolitischen Rahmenbedingungen sind hier entscheidend. Besonders das deutsche Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) mit sei-

TAB. 1 | GLOBAL INSTALLIERTE WINDLEISTUNG IN MW IM JAHR 2010

Region	Land (Beispiele)	Ende 2009	neu in 2010	Ende 2010
Afrika und Mittlerer Osten	Ägypten	430	120	550
	Marokko	253	33	286
	total	866	213	1 079
Asien	China	25 805	16 500	42 287
	Indien	10 926	2 139	13 065
	Japan	2 085	221	2 304
	total	39 639	19 022	58 641
Europa (EU- und Nicht-EU-Staaten)	Deutschland	25 777	1 493	27 214
	Spanien	19 160	1 516	20 676
	Italien	4 849	948	5 797
	Frankreich	4 574	1 086	5 660
	Vereinigtes Königreich	4 245	962	5 204
	Österreich	995	16	1 011
total	76 300	9 883	86 075	
Lateinamerika und Karibik	Brasilien	606	326	931
	Mexiko	202	316	519
	total	1 306	703	2 008
Nordamerika	USA	35 086	5 115	40 180
	Kanada	3 319	690	4 009
	total	38 405	5 805	44 189
Pazifik	Australien	1 702	167	1 880
	total	2 221	176	2 397
Global total		158 738	35 802	194 390

Quelle: [10]. Wegen Rundungen, Rückbau von Anlagen und unterschiedlichen Statistiken teilweise vorläufige Werte und Abweichungen von nationalen Statistiken.

nen investitionsfreundlichen Einspeise- und Vergütungsregelungen hat - neben der ähnlichen spanischen Gesetzgebung - im internationalen Vergleich besonders gut gewirkt. Im Jahr 2010 waren mit rund 48 000 MW Windleistung in Deutschland und Spanien über die Hälfte der gesamten Windleistung in der EU (rund 84 000 MW) installiert [7].

Aber nicht nur in der EU, auch in China, Indien und den USA boomt der große Markt für Windenergieanlagen (Tabelle 1). Hier hat sich in den letzten beiden Jahrzehnten ein leistungsfähiger Maschinenbauzweig entwickelt. Durchgesetzt haben sich überwiegend Megawattanlagen. Zu den führenden Herstellern gehören dänische und deutsche Firmen. Etwa drei Viertel der in Deutschland hergestellten Windkraftanlagen werden mittlerweile exportiert. Einen ähnlichen Vorsprung hat sich Deutschland im Solarstrombereich erarbeitet, sowohl bei der Photovoltaik als auch bei der Solarthermie.

Erfolgreiche Politik in Deutschland

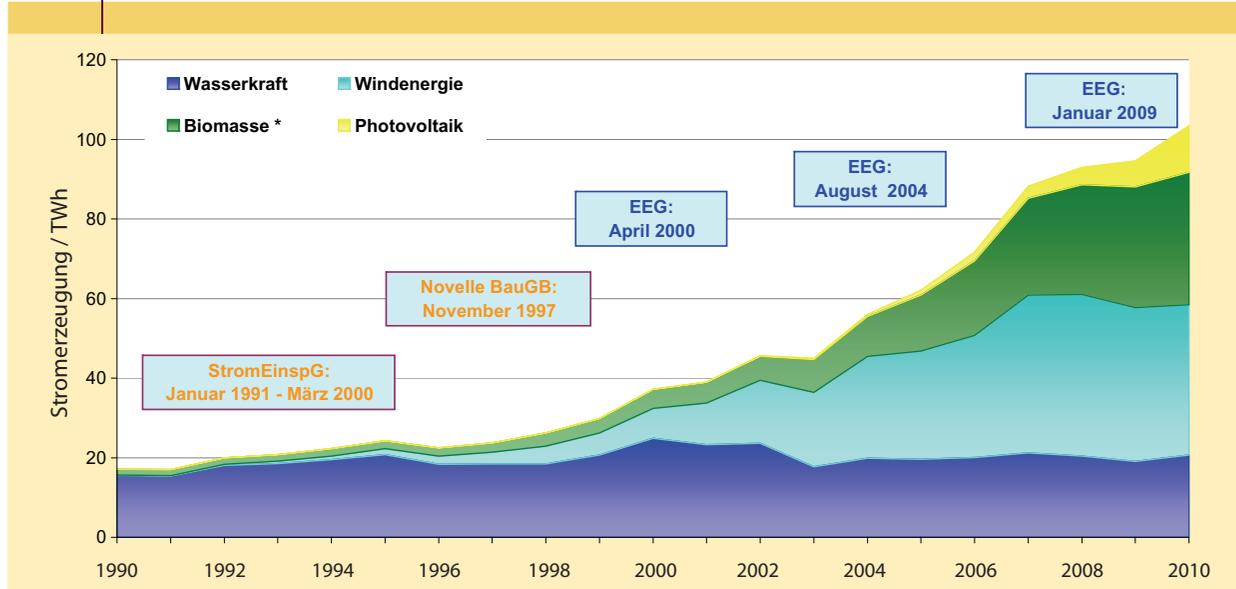
Besonders das deutsche Beispiel zeigt, wie das Engagement einzelner Protagonisten, die Unterstützung durch passende Instrumente (Forschung und Entwicklung, EEG, EEWärmeG, Markteinführungshilfen etc.) sowie die Kooperation von Wissenschaft und innovativen Unternehmen im Bereich der erneuerbaren Energie völlig neue High-Tech-Branchen entstehen ließ. Sie sind heute wirtschaftlich erfolgreiche Global Player. Die TU Berlin analysierte diese Entwicklung der letzten Jahrzeh-

INTERNET

BMU-Publikation [4] und anderes Material
www.erneuerbare-energien.de

ABB. 1 DEUTSCHER STROM AUS ERNEUERBARER ENERGIE

Entwicklung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Deutschland von 1990 bis 2010 (TWh: Terawattstunden; 1 TWh = 1 Mrd. kWh; EEG: Erneuerbare-Energien-Gesetz seit 1.4.2000; StromEinspG: Stromerzeugungsgesetz von 1.1.1991 bis 31.03.2000; BauGB: Baugesetzbuch) (Quelle: [4]).



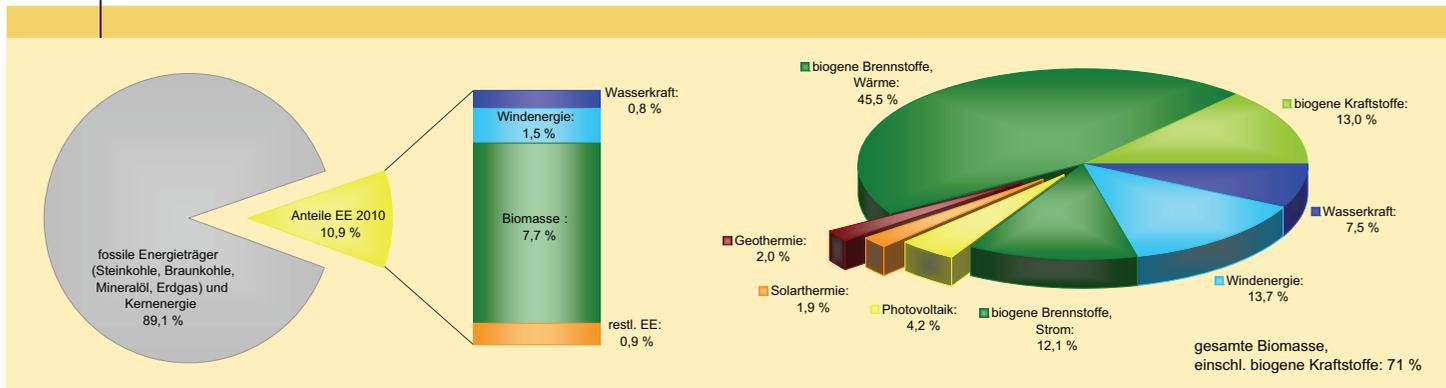
te in einem vom deutschen Bundesumweltministerium (BMU) geförderten Forschungsprojekt [8–9]. Schauen wir uns die Entwicklung in Deutschland genauer an.

In Deutschland hat die erneuerbare Energie in den letzten Jahren stürmisch zugelegt. Im Jahr 2010 stammten 17 % der Energie aus deutschen Steckdosen aus regenerativen Energiequellen, fast sechs Mal so viel wie noch 1990 [4]. Dies lag zunächst am erfolgreichen Ausbau der Windenergie, inzwischen aber auch der Bioenergie und Photovoltaik. Mit einer Energiebereitstellung von 37 Terawattstunden (TWh) im Jahr 2010 hat die Windenergie die traditionell vorhandene Wasserkraft (mit 19,7 TWh in 2010) deutlich überholt. Die Stromerzeugung aus Bioenergie (einschließlich des biogenen Anteils des Abfalls) hat sich mit rund 34 TWh in 2010 inzwischen auf Platz zwei vorgearbeitet. Auch die Photovoltaik hat kräftig aufgeholt und trug 2010 mit 12 TWh bereits zwei Prozent zur Stromversorgung bei. Sie hat damit seit

dem Jahr 2000 um den Faktor 200 zugelegt. Die geothermische Stromgewinnung spielt noch eine geringe Rolle. Abbildung 1 zeigt die rasante Ausbaudynamik der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen in Deutschland. Im ersten Halbjahr 2011 stieg der Anteil der erneuerbaren Energie an der gesamten Stromgewinnung bereits auf rund 20 % [1].

Deutschland hat damit das vor wenigen Jahren von der Bundesregierung beschlossene Ausbauziel für Strom aus erneuerbaren Energien – 12,5 % wurden damals für das Jahr 2010 angestrebt – deutlich übertroffen; ein großer Erfolg aller Beteiligten. Die neuen Beschlüsse der Bundesregierung zum Energiewendepaket vom 6. Juni 2011 enthalten insbesondere auch ambitioniertere Ausbauziele für die erneuerbare Energie in Deutschland. Für den Strombereich wurden diese Ziele im neuen EEG bereits im Sommer 2011 gesetzlich verankert [1]. Die Details sind in „Ausbauziele zur erneuerbaren Energie in Deutschland“ auf S. 11 aufgeführt.

ABB. 2 ENDENERGIEVERBRAUCH IN DEUTSCHLAND 2010



Links: Anteile der konventionellen und erneuerbaren Energiequellen (EE) am gesamten Endenergieverbrauch von 9060 Petajoule (PJ, 1 PJ = 10¹⁵ J, Joule) in Deutschland 2010; rechts: Struktur der Endenergiebereitstellung aus erneuerbaren Energiequellen von insgesamt 275,2 Terawattstunden (TWh) in Deutschland 2010 (Quelle: [4]).

Heutiger Stand

Abbildung 2 zeigt links die Struktur des Endenergieverbrauchs in Deutschland im Jahr 2010. Es überrascht nicht, dass fossile Quellen sowie die Kernenergie mit zusammen 89,1 % noch dominieren [4]. Die erneuerbaren Energiequellen kamen 2010 bereits auf 10,9 %. Rechts zeigt Abbildung 2 die Struktur der Endenergiebereitstellung aus erneuerbarer Energie im Jahr 2010 [4]. Über zwei Drittel dieser regenerativen Energieträger (71 %) stammen aus Biomasse. Die Windenergie steuert 13,4 %, Wasserkraft 7,2 %, Solarenergie 6,3 % und Geothermie 2,1 % bei.

Der Grund für den kräftigen Aufschwung regenerativer Energieträger in Deutschland liegt vor allem in der Politik. In den letzten zwanzig Jahren wurden Rahmenbedingungen geschaffen, die den erneuerbaren Energien trotz ihrer vergleichsweise noch hohen Strombereitstellungskosten die Chance geben, sich im Markt zu etablieren. Neben verschiedenen Förderprogrammen und dem Markteinführungsprogramm der Bundesregierung waren es vor allem das Stromeinspeisegesetz (StrEG) von 1990 und das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) von 2000, das diese Entwicklung in Gang setzte. Das Prinzip: Regenerativ erzeugter Strom wird vorrangig und garantiert ins öffentliche Netz eingespeist und mit einem Mindestsatz vergütet. Auf der Basis regelmäßiger EEG-Erfahrungsberichte wird das EEG der aktuellen Situation angepasst, zuletzt im Sommer 2011 [1].

Die Vergütungen sind nach Sparten und anderen Erfordernissen der einzelnen Energieträger gestaffelt. Sie sind degressiv gestaltet, sinken also Jahr für Jahr. Das soll dafür sorgen, dass erneuerbare Energietechnologien ihre Kosten reduzieren und mittelfristig zu Marktpreisen wettbewerbsfähig werden. Die regenerativen Technologien können das nur durch zeitweilige Förderung schaffen, wie sie in der Vergangenheit auch anderen Energietechniken wie etwa der Kernenergie gewährt wurden. Sie werden bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts nur dann zum Hauptpfeiler der Energieversorgung, wenn sie Praxistauglichkeit und Wirtschaftlichkeit beweisen. Dazu muss jede Technologie den langen Weg von der Forschung und Entwicklung über Pilot- und Demonstrationsprojekte sowie Markteinführungshilfen bis hin zur vollen Wettbewerbsfähigkeit schaffen. Das geht nur mit staatlicher Unterstützung sowie der schrittweisen Einbeziehung der ökonomischen Nutzwirkung.

Potenzial und Grenzen

Oft wird das Potenzial der Techniken, die erneuerbare Energiequellen erschließen, skeptisch beurteilt. Können erneuerbare Energien entscheidend zur Sättigung des wachsenden weltweiten Energiehungers beitragen? Sind dem Aufschwung nicht physikalische, technische, ökologische und infrastrukturelle Grenzen gesetzt?

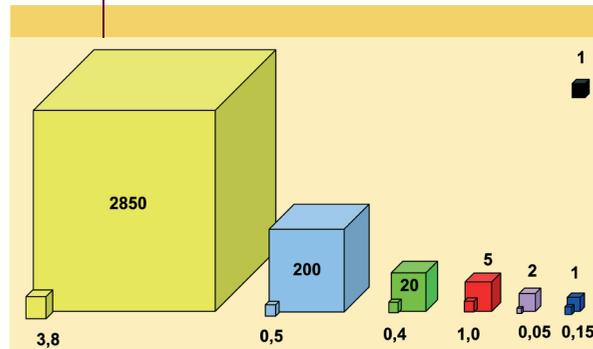
Grundsätzlich ist das Potenzial enorm groß. Die meisten erneuerbaren Energien speisen sich direkt und indirekt aus Solarenergie, und die Sonne sorgt für einen kontinuierlichen Energiefluss von über $1,3 \text{ kW/m}^2$ an der Erdober-

fläche. Geothermie nutzt die Wärme des Erdinneren, die sich aus der kinetischen Energie aus der Entstehungsphase der Erde und radioaktiven Zerfallsprozessen speist (siehe Kapitel „Energie aus der Tiefe“ in diesem Buch).

Diese Energiequellen sind bei weitem nicht vollständig nutzbar. Umwandlungsprozesse, Grenzen für Wirkungsgrade und Anlagengrößen schaffen technische Restriktionen. Hinzu kommen infrastrukturelle Einschränkungen, wie Ortsgebundenheit bei der Erdwärme, begrenzter Transportradius für biogene Brennstoffe, Verfügbarkeit von Flächen und Konkurrenz bei ihrer Nutzung. Nicht zuletzt spielt die begrenzte Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit der Energiedarbietung aus fluktuierenden Quellen eine wichtige Rolle. Außerdem sollen erneuerbare Energien auch ökologisch verträglich sein. Die Beanspruchung von Böden, Beeinträchtigung von Fließgewässern, Arten- und Naturschutz sowie der Landschafts- und Meeresschutz setzen weitere Grenzen. Das alles sorgt dafür, dass das natürliche, globale Angebot an erneuerbaren Energien und die daraus technisch gewinnbaren Energiemengen weit auseinander klaffen (Abbildung 3).

Trotz dieser Einschränkungen ist eine breite Versorgung mit erneuerbaren Energien möglich. Damit sie zuverlässig und stabil ist, braucht es einen möglichst vielfältigen Mix verschiedener regenerativer Energiequellen. Prinzipiell können Wasser- und Windkraft, Meeresenergie, Biomasse-Nutzung, Solarenergie und Geothermie zusammen alle Bedürfnisse decken. Deutschland ist dafür ein gutes Beispiel. Obwohl nicht im sonnigen Süden gelegen und mit nur begrenzten Ressourcen im Bereich der Wasserkraft und Geothermie, kann erneuerbare Energie langfristig den gesamten deutschen Energiebedarf decken. Schätzungen zufolge liegt das langfristig nachhaltige nutzbare Potenzial in Deutschland bei etwa 800 TWh für Strom, 900 TWh für Wärme und 90 TWh bei Treibstoffen [4, 11]. Dies entspricht rund 130 % des derzeitigen Stromverbrauchs und 70 % des der-

ABB. 3 | NATÜRLICHES ANGEBOT UND NUTZBARKEIT



Das natürliche Angebot an regenerativer Energie im Verhältnis zum heutigen Weltenergieverbrauch (schwarzer Würfel, auf 1 normiert). Kleine Würfel: Anteil der jeweiligen Energiequelle, der technisch, ökonomisch und ökologisch vernünftig nutzbar ist. Gelb: Solarstrahlung auf Kontinente, blau: Wind, grün: Biomasse, rot: Erdwärme, dunkelblau: Wasser (Quelle: [11]).

zeitigen Wärmebedarfs. Bei verbesserter Energieeffizienz und sinnvollem Einsatz von Strom bei Wärme- und Kälteanwendungen sowie Mobilität lässt sich der Energiebedarf in Deutschland langfristig vollständig auf Basis erneuerbarer Energiequellen decken.

Wasserkraft

Wasser ist eine der ältesten Energiequellen. Heute liefert die Wasserkraft in Deutschland nur einen kleinen, seit Jahrzehnten stabilen Beitrag: 3 bis 4 % des Stroms stammen aus Speicher- und Laufwasserkraftwerken. Das Potenzial ist in Deutschland insgesamt recht gering, anders als in Alpenländern wie Österreich und der Schweiz. In Zukunft wird sie deshalb hier nur moderat ausgebaut werden können. 2010 stellten die über 7000 großen und kleinen Anlagen rund 20 TWh Energie bereit, 90 % davon in Bayern und Baden-Württemberg. Das weltweite Potenzial der Wasserkraft ist erheblich größer: 16 % des erzeugten Stroms kam 2010 aus Wasserkraftwerken [12, 13]. Damit liegt die Wasserkraft – global gesehen – vor der Kernkraft. Bislang ist sie die einzige regenerative Energiequelle, die im großen Umfang zum Weltbedarf an elektrischer Energie beiträgt; die anderen Sparten der erneuerbaren Energie trugen 2010 zusammen rund 3 % zur globalen Stromerzeugung bei [12, 13]. Entscheidend ist dabei vor allem die „große Wasserkraft“. Ein Beispiel ist das chinesische Drei-Schluchten-Projekt, das es auf eine elektrische Leistung von über 18 GW bringt, was etwa 14 Kernkraftwerksblöcken entspricht (siehe Kapitel „Fließende Energie“).

In Deutschland bietet die sogenannte „kleine“ Wasserkraft noch begrenzte Entwicklungsmöglichkeiten. Neubau und Modernisierung derartiger Wasserkraftanlagen unter 1 MW Leistung hat allerdings ökologische Grenzen, denn sie nutzen Bäche und kleine Flüsse und können deren Ökosysteme verändern. Synergieeffekte lassen sich dann erzielen, wenn bestehende Wasserkraftanlagen mit Querverbauungen (Dämmen) so modernisiert werden, dass die Leistung erhöht und zugleich der gewässerökologische Zustand verbessert wird. Das Ausbaupotenzial in Deutschland wird von derzeit 20 auf 25 TWh pro Jahr geschätzt.

Die Vorteile der Wasserkraft liegen auf der Hand: Die Energie steht meist stetig zur Verfügung, und Wasserkraftwerke sind sehr langlebig. Zudem sind Wasserturbinen extrem effizient, sie können bis zu 90 % der kinetischen Energie des fließenden Wassers in Strom umwandeln. Zum Vergleich: Moderne Erdgas-Kombikraftwerke erreichen 60 % Wirkungsgrad, Leichtwasserreaktoren sogar nur etwa 33 %.

Windenergie an Land

In Deutschland hat die Nutzung der Windenergie (36,5 TWh) die der Wasserkraft (19,7 TWh) im Jahr 2010 deutlich überholt. Moderne Windenergieanlagen erreichen Wirkungsgrade von bis zu 50 %. Im Jahr 2010 wurde eine Windleistung von 1 551 MW neu installiert, so dass 21 607 Windräder mit einer Gesamtleistung von 27 214 MW etwa 6 % des Strombedarfs erzeugten [14]. In einem durchschnittlichen Windjahr wären es bereits 7 % gewesen. Inzwischen kommt das sogenannte Repowering in Gang: al-

ABB. 4 | WINDENERGIEANLAGEN IN DEUTSCHLAND



Entwicklung der Windenergie in Deutschland von 1990 bis 2010. Die Balken zeigen die Gesamtzahl der Windenergieanlagen im jeweiligen Jahr an, die blaue Kurve die installierte Gesamtleistung in Megawatt (MW) (Quelle: [14]).

te Anlagen werden durch moderne, leistungsfähigere ersetzt. So wurden 2010 116 alte Windanlagen mit zusammen 56 MW durch 80 neue mit insgesamt 183 MW Leistung ersetzt [14].

Im ersten Halbjahr 2011 wurden in Deutschland 356 Anlagen mit einer Gesamtleistung von zusammen 793 MW errichtet; pro Anlage also gut 2 MW. Bei einem langfristig nachhaltig realisierbaren Windpotenzial in Deutschland an Land von 80 000 MW und einer durchschnittlich installierten Leistung von 2,5 MW wären 32 000 solcher Anlagen erforderlich. Derzeit (Mitte 2011) sind es bereits rund 22 000 Anlagen mit einer durchschnittlich installierten Leistung von 1,3 MW. Im Hinblick auf Akzeptanz, Bürgerbeteiligung, Schallschutz, Anliegen des Natur- und Landschaftsschutzes wird es also vor allem darauf ankommen, im Zuge der Genehmigungsverfahren und der Raumplanung an geeigneten Standorten leistungsfähige Windanlagen auf hohen Masten (größerer Windertrag) zu errichten.

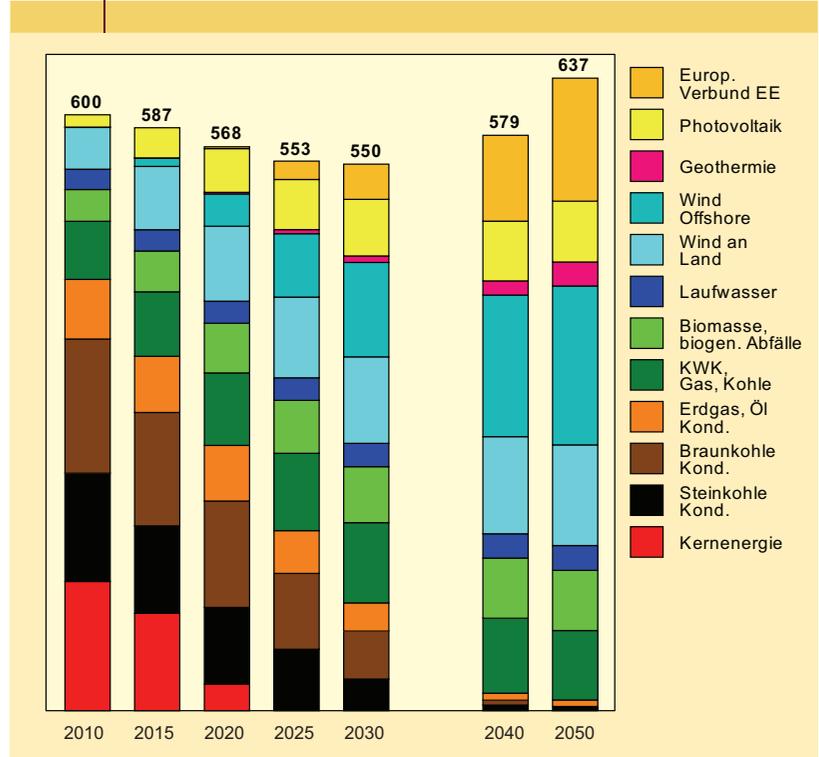
Damit kann die Anzahl der Anlagen begrenzt und doch ein hoher Ertrag erzielt werden: 32 000 Anlagen an Land mit je 2,5 MW können bei 2 500 Volllaststunden im Jahr zusammen 200 TWh Strom liefern, das heißt, etwa ein Drittel des heutigen Elektrizitätsbedarfs. Dies ist möglich an geeigneten Küstenstandorten, aber auch im Binnenland bei Nabenhöhen über 100 m. Ein geringer Teil dieses Potenzials könnte auch durch moderne kleine Anlagen erschlossen werden, wobei auch hier die genannten Kriterien zu berücksichtigen sind. Ein etwa gleich großes Potenzial in der Größenordnung von 200 TWh kann zusätzlich durch Windanlagen in der Nord- und Ostsee (Offshore) hinzukommen, so dass allein die Nutzung der Windkraft in Deutschland langfristig zwei Drittel unseres heutigen Strombedarfs (rund 600 TWh) decken kann.

An windreichen Tagen übersteigt der Windstromertrag in bestimmten Regionen Deutschlands bereits heute die Stromnachfrage, bei Windflauten müssen andere Kraftwerke das schwankende Angebot ausgleichen. Dies betrifft zunehmend auch die Photovoltaik, während Wasserkraft und Biomasse „eingebaute“ Energiespeicher haben und damit regelbar sind. Das zukünftige Energiesystem wird dem fluktuierenden Stromangebot gerecht werden müssen durch schnell regelbare dezentrale Kraftwerke (BHKW; Erdgas oder Gas auf Basis erneuerbarer Energie), Energiespeicher, Lastmanagement etc. Diese Neuausrichtung der Systemoptimierung unter dem Gesichtspunkt der Versorgungssicherheit und der Nutzung von Regelungs-, Steuerungs-, Informations- und Kommunikationstechnik gilt als besondere Herausforderung für die nächste Zeit [15-16].

Biomasse

Die energetische Nutzung der Biomasse wird oft unterschätzt. Zurzeit wird sie in Deutschland als Brennstoff neu entdeckt. Holz, Bioabfälle, Gülle und andere Stoffe pflanzlicher und tierischer Herkunft können thermisch, aber auch in der Stromerzeugung genutzt werden. Besonders effizient

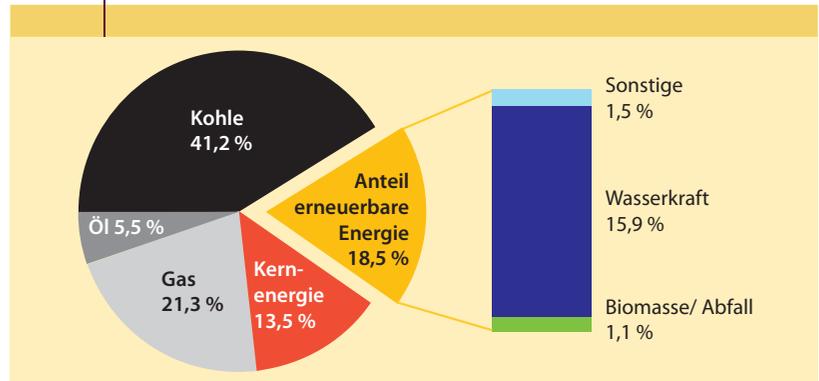
ABB. 5 STROMERZEUGUNG IN ZUKUNFT



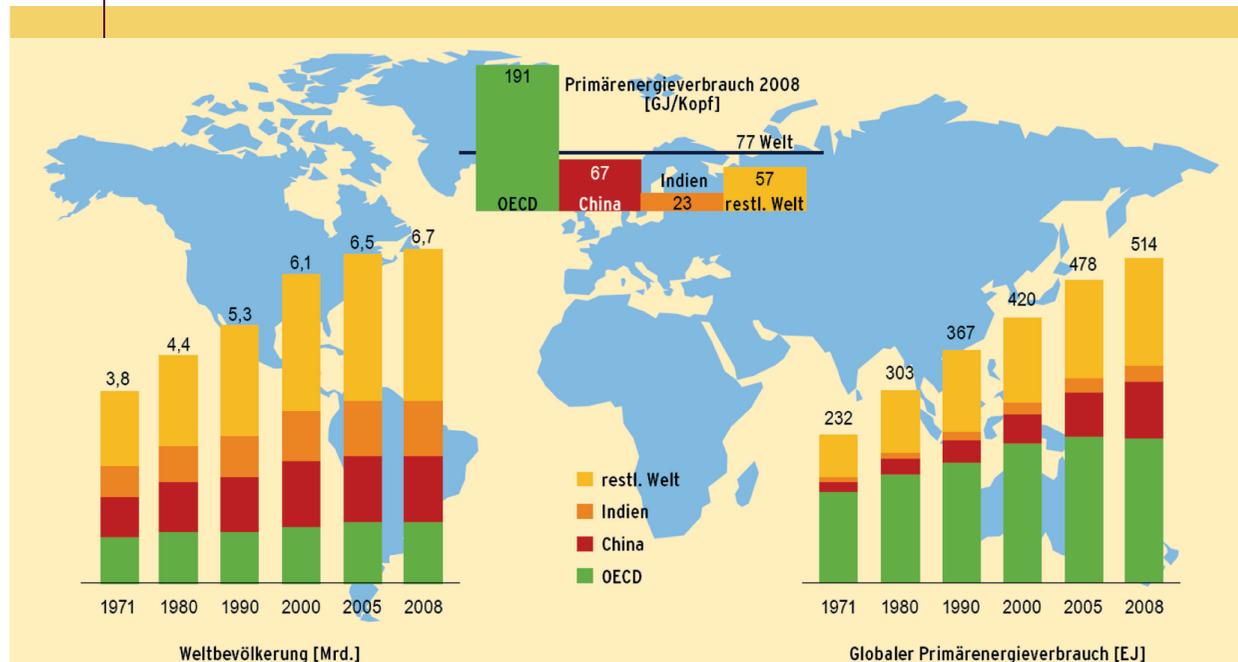
Stromerzeugung in Deutschland nach Kraftwerksarten und Energiequellen im Basisszenario A der „Leitstudie 2010“. Zahlen über den Balken: Bruttostromerzeugung in TWh. Der Kernenergie-Ausstiegspfad entspricht etwa dem Ausstiegsschluss vom 6. Juni 2011 (Quelle: [16]).

ist die Kopplung von beidem. In Deutschland stammen derzeit 90 % der erneuerbaren Wärme aus Biobrennstoffen, vor allem aus der Holzverbrennung - aber zunehmend auch aus Restholzkraftwerken, Hackschnitzel- und Pelletheizungen und Biogasanlagen sowie dem biogenen Anteil des Abfalls. Ihr Anteil an der Stromversorgung steigt: 2010 deckte er mit 34 TWh bereits 5,6 % des gesamten deutschen Stromverbrauchs.

ABB. 6 WELTSTROM AUS ERNEUERBAREN



Anteile der erneuerbaren Energiequellen an der Stromerzeugung im Jahr 2008 (Quellen: [4, 18]).

ABB. 7 WELTBEVÖLKERUNG UND PRIMÄRENERGIEVERBRAUCH

Wachstum der Weltbevölkerung (Mrd.: Milliarden) und ihres Verbrauchs an Primärenergie (EJ: Exajoule, 10^{18} Joule). 2008 verbrauchte jeder Mensch in den OECD-Staaten durchschnittlich 191 Gigajoule (GJ, 10^9 Joule), in China 67 GJ, in Indien, 23 GJ und im Rest der Welt 57 GJ. Der Durchschnittsverbrauch aller Menschen lag bei 77 GJ pro Kopf. (Quelle: [18].)

Biobrennstoffe stehen rund um die Uhr zur Verfügung und können wie jeder andere Brennstoff in Kraftwerken eingesetzt werden. Biogene Kraftstoffe bringen, wie schon erwähnt, regenerative Energien auch im Verkehr in Fahrt.

Biokraftstoffe sind allerdings auch massiv in die öffentliche Kritik geraten, weil sie nicht immer und überall ökologisch und sozial verträglich erzeugt werden. Im schlimmsten Fall können sie sogar eine schlechtere Klimabilanz als fossile Kraftstoffe aufweisen. Es bedarf also einer kritischen Analyse und Optimierung jeder Produktlinie, wie das Kapitel „Grüne Chance und Gefahr“ detaillierter diskutiert.

Solarenergie

Solarenergie ist die erneuerbare Energie schlechthin. Ihre einfachste Form ist die Nutzung der Solarwärme durch Sonnenkollektoren, zunehmend eingesetzt zur Erwärmung von Brauchwasser für Haushalte oder öffentliche Räume wie Sporthallen und Schwimmbäder. Auf deutschen Dächern waren 2010 rund 14 Millionen Quadratmeter Kollektorfläche installiert [4].

Auch die solarthermische Stromerzeugung hat inzwischen den Sprung zur kommerziellen Nutzung im großen Maßstab geschafft (siehe auch Kapitel „Wie die Sonne ins Kraftwerk kommt“). Parabolrinnenkollektoren, Solartürme oder Paraboloidkraftwerke erzeugen Temperaturen bis über $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, die mit Hilfe von Gas- und Dampfturbinen in Strom verwandelt werden können. Diese Technologien könnten mittelfristig nennenswert zur Stromversorgung beitragen. Effizient sind sie allerdings nur in Ländern mit hoher Son-

neneinstrahlung wie in der gesamten Mittelmeerregion. Deutschland müsste Solarstrom aus solchen Kraftwerken also über ein Verbundnetz beziehen. Das könnte zunächst europäisch angelegt sein, langfristig könnten auch nordafrikanische Länder über eine Ringleitung um das Mittelmeer solarthermisch erzeugten Strom liefern (siehe auch das Kapitel „Strom aus der Wüste“) [11, 16, 17].

Die unmittelbarste und reizvollste Solarenergienutzung ist sicherlich die Photovoltaik. Der Photovoltaikmarkt zeigt derzeit das weitaus dynamischste Wachstum: Von 2000 (76 MW) bis 2010 (17 320 MW) stieg in Deutschland die installierte Peak-Leistung auf mehr als das 20-Fache. Dies entspricht einer Wachstumsrate von 72 % pro Jahr in diesem Jahrzehnt [4]. Neue Herstellungstechniken bieten zudem die Chance, Solarzellen wesentlich billiger und Energie sparer herzustellen und ihnen damit zum Durchbruch zu verhelfen (siehe Kapitel „Solarzellen – ein Überblick“, „Solarzellen aus Folien-Silizium“ und „Photovoltaik auf Glas“).

Geothermie

Die derzeit noch am wenigsten genutzte regenerative Ressource ist die Erdwärme. Vor allem die Tiefengeothermie nutzt bei Bohrungen von bis zu 5 km Tiefe entweder heiße Thermalwässer oder schafft durch die Injektion von Wasser in heiße, trockene Gesteinsschichten (Hot-Dry-Rock-Verfahren) eine hydraulische Stimulation (siehe Kapitel „Energie aus der Tiefe“). Bei Temperaturen über $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ kann auch Strom erzeugt werden – in Deutschland zum Beispiel

am Standort Neustadt-Glewe in Mecklenburg-Vorpommern. Günstige Regionen mit hohen Thermalgradienten bieten in Deutschland vor allem die norddeutsche Tiefebene, das nordalpine Molassebecken und der Oberrheingraben.

Die Erdwärme hat den Vorteil, dass sie rund um die Uhr zur Verfügung steht. Dennoch stecken die geothermische Wärmenutzung und Stromerzeugung in den Kinderschuhen. Besonders die Tiefengeothermie ist technisch anspruchsvoll und erfordert deshalb noch intensive Forschung und Entwicklung. Die oberflächennahe Geothermie ist bereits deutlich weiter fortgeschritten, Wärmepumpen sind längst etabliert.

Die tiefe und oberflächennahe geothermische Wärmenutzung hat sich von rund 1,7 TWh im Jahr 2000 auf 5,6 TWh im Jahr 2010 mehr als verdreifacht. Wenn es gelingt, die Geothermie in größerem Stil zu nutzen, dann könnte sie mit ihrer Gleichmäßigkeit und Verlässlichkeit einen erheblichen Beitrag zur Versorgung leisten. Ihr langfristiges Potenzial in Deutschland wird auf 90 TWh in der Stromproduktion und 300 TWh für Wärme geschätzt.

Fenster der Möglichkeiten

Wie geht es weiter mit der Energieversorgung in Deutschland? Werden alle regenerativen Optionen eine Rolle spielen, und wenn ja, in welchem Maße? Der Beschluss der Bundesregierung vom 6. Juni 2011 enthält folgende zentrale Elemente der Energiewende in Deutschland:

- Ausstieg aus der Nutzung der Kernenergie bis spätestens Ende 2022,
- kontinuierlicher Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien,
- Modernisierung und Ausbau der Stromnetze,
- Steigerung der Energieeffizienz in allen Energiebereichen,
- Erreichen anspruchsvoller Klimaschutzziele und damit eine deutliche Minderung des Einsatzes fossiler Brennstoffe.

Ziel ist der Übergang zu einer langfristig überwiegend auf erneuerbarer Energie basierenden, sicheren Energieversorgung. Mit 17 % Stromanteil 2010 und knapp 11 % Anteil an der gesamten Energieversorgung wurden in den vergangenen Jahrzehnten die Grundlagen dafür geschaffen. Die anstehende Systemtransformation erfordert weiterhin großes Engagement.

Dass der Ausbau der erneuerbaren Energiequellen heute schon eine ganze Reihe positiver Effekte auch hinsichtlich ökonomischer Fragen bewirkt, zeigen ihre Ergebnisse für das Jahr 2010:

- Minderung der Treibhausgas-Emissionen um 118 Mio. t,
- Vermiedene Umweltschäden: 8,4 Mrd. € (insbes. Klimaschäden bei einem Durchschnittswert von 70 € pro Tonne CO₂),
- Vermiedene Energieimporte: rd. 6 Mrd. €,
- Investitionen: 26,6 Mrd. €,
- Beschäftigte: 367 000,
- Erhöhung der regionalen Wertschöpfung.

AUSBAUZIELE ZUR ERNEUERBAREN ENERGIE IN DEUTSCHLAND

Die deutsche Bundesregierung verfolgt mit dem Energiewendepaket vom 6. Juni 2011 und der Neufassung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes die hier zusammengefassten Ziele.

Der Anteil erneuerbarer Energiequellen am Stromverbrauch soll wie folgt wachsen:

- bis spätestens 2020: auf mindestens 35 %
- bis spätestens 2030: auf mindestens 50 %
- bis spätestens 2040: auf mindestens 65 %
- bis spätestens 2050: auf mindestens 80 %.

Die Wachstumsziele für den Anteil erneuerbarer Energie am gesamten Bruttoendenergieverbrauch (Strom, Wärme/Kälte, Transport) sind:

- bis 2020: 18 % (entspricht der EU-Richtlinie; s. o.)
- bis 2030: 30 %
- bis 2040: 45 %
- bis 2050: 60 %.

Ferner soll bis 2020 ihr Anteil an der gesamten Wärmebereitstellung auf 14 % wachsen und ihr Anteil am Endenergieverbrauch im Verkehrssektor auf 10 %.

Das Bundeskabinett in Berlin beschloss zudem am 6. Juni 2011 weitere Ziele, zu denen der Ausbau der erneuerbaren Energie wesentlich beiträgt. Die deutschen Treibhausgasemissionen sollen bezogen auf das Basisjahr 1990 bis 2020 um 40 % reduziert werden, bis 2050 um 80 bis 95 %. Der Stromverbrauch soll bis 2020 um 10 %, bis 2050 um 25 % sinken, der Primärenergieverbrauch bis 2020 um 20 %, bis 2050 um 50 %.

Werden alle relevanten Größen betrachtet (systemanalytische Kosten- und Nutzenwirkung, Verteilungseffekte, makroökonomische Effekte), so übertrifft bereits heute der Nutzen die Kosten. Trotzdem ist auf absehbare Zeit Unterstützung notwendig, weil diese komplex vernetzt sind [4, 19, 20]. Im Zuge der Kostendegression bei den verschiedenen Techniken zur Nutzung erneuerbarer Energie und zu erwartenden Kostensteigerungen bei den – begrenzten und klimaschädlichen – fossilen Energieträgern dürften die Nutzeffekte erheblich weiter zunehmen [16].

Meer und freies Feld

Der nächste große Schritt im Wandel des Energiesystems in Deutschland ist der Start der Offshore-Windenergie. Im deutschen Küstenmeer und in der „Ausschließlichen Wirtschaftszone“ wird mit einem Leistungspotenzial bis 2020 von bis zu 25 GW elektrischer Gesamtleistung gerechnet (siehe Kapitel „Die Nordsee geht ans Netz“).

Solche Offshore-Windanlagen müssen weit vor der Küste in Wassertiefen bis zu 60 m gebaut werden. Das gilt besonders für die windreiche Nordsee. Im küstennahen Flachwasser gibt es wegen des Naturschutzes, traditioneller Nutzungsrechte wie Kiesabbau, militärischer Sperrgebiete und der Schifffahrt nur wenige geeignete Standorte. Anlagen im tieferen Wasser erfordern jedoch eine aufwendigere Technik und sind teurer. Auch das Hochleistungs-Seekabel für den Stromtransport bis zur Küste treibt bei Längen von 30 bis 80 km die Investitionskosten hoch.

Dafür haben die küstenferneren Offshore-Anlagen auch einen wesentlichen Vorteil: Über den freien Wasserflächen ist der Wind stärker und stetiger. Das kompensiert die höheren spezifischen Kosten dieser Windparks. Allerdings müssen die einzelnen Anlagen auch leistungsstark sein. Wenn sie etwa 5 MW_{el} erreichen, können sie unter solchen Be-

dingungen ökonomisch arbeiten. Eine Vorreiterrolle in dieser Hinsicht spielt der Windpark Alpha Ventus, der 45 km vor Borkum in 30 m Wassertiefe steht: Am 12. August 2009 lieferten die ersten drei 5-Megawatt-Windenergieanlagen erstmals Strom, inzwischen laufen alle zwölf Anlagen [21]. Gute Dienste für die Entwicklung von Offshore-Windparks im tiefen Wasser leisten auch die Fino-Offshore-Plattformen. Die vom BMU unterstützte Fino-Forschungsinitiative in Nord- und Ostsee trägt eine Offshore-Stiftung, gegründet von Unternehmen, Verbänden und Netzbetreibern [22].

Ökologisch optimierter Ausbau, Szenarien

Wie sich die Anteile der erneuerbaren Energien am Energiemix in Deutschland wirklich entwickeln werden, kann man selbstverständlich nicht exakt prognostizieren. Dennoch können Modellrechnungen verdeutlichen, welche Pfade die Entwicklung unter plausiblen Annahmen nehmen könnte. Das Institut für Technische Thermodynamik des DLR in Stuttgart analysierte 2004 in einer umfassenden Studie für Deutschland verschiedene Szenarien [23]. In ihr berücksichtigte es die technische Entwicklung, Wirtschaftlichkeit, Versorgungssicherheit und ökologische wie soziale Verträglichkeit. Diese Studie macht die wesentlichen Trends sichtbar. Eine Reihe weiterer Studien zur ökologischen Optimierung und Begleitforschung untersucht einzelne Sparten der erneuerbaren Energien.

Abbildung 5 zeigt die Stromerzeugung in Deutschland nach Kraftwerksarten und Energiequellen im Szenario in der Leitstudie 2010 [16]. Dieses Szenario strebt einen wirtschaftlich vertretbaren Ausbau der erneuerbaren Energien an, berücksichtigt jedoch gleichzeitig die ökologischen Belange. Seit über zehn Jahren werden im Auftrag des BMU Szenarien für den Ausbau der erneuerbaren Energie erstellt. Diese Szenarien beachten ökologisch optimierte und nach Kriterien der Nachhaltigkeit gestaltete Wege. Sie berücksichtigen die Dynamik der technisch-wirtschaftlichen Entwicklung und die Wechselwirkungen des gesamten Energiesystems mit zunehmend höheren Anteilen der erneuerbaren Energie.

Die Leitstudie 2010 [16] hat den Energiewendeabschluss der Bundesregierung insofern antizipiert, als sie in den Basisszenarien A und B bereits von einem Kernenergieausstieg bis 2022 ausging. Auch wenn naturgemäß nicht alle Annahmen mit dem Beschluss vom 6. Juni 2011 übereinstimmen, so geben sie doch eine besonders gelungene Darstellung der Entwicklung der erneuerbaren Energietechniken sowie der restlichen Energieträger und der erforderlichen Transformation des Gesamtsystems wieder. Die Studie zeigt auch deutlich, dass die erforderlichen Treibhausgas-Minderungen bis 2020 und 2050 erreicht werden können: zur einen Hälfte durch den kontinuierlichen Ausbau der erneuerbaren Energien und zur anderen Hälfte durch Energieeinsparung, Verbesserung der Energieeffizienz und die Reduktion des Einsatzes fossiler Energieträger – trotz dem Ausstieg aus der Nutzung der Kernenergie.

Erneuerbare Energie im Weltmaßstab

Abbildung 6 zeigt die Anteile der verschiedenen Energieträger an der globalen Stromerzeugung im Jahr 2008. Fossile Energien dominieren mit 68 %, erneuerbare Energiequellen schaffen bereits 18,5 %, die Kernenergie liegt bei 13,5 %. Im Wärme- und Antriebsbereich hat bislang vor allem die Biomassenutzung nennenswerte Anteile erreicht, die allerdings auf Fragen der Nachhaltigkeit kritisch zu überprüfen ist.

Langfristig können auch im globalen Maßstab erneuerbare Quellen die Hauptenergieversorgung übernehmen [12, 13, 24]. Allerdings gelingt dies nicht allein mit ihrem Ausbau. So zeigt Abbildung 7 den parallelen Anstieg der Weltbevölkerung und des globalen Primärenergieverbrauchs von 1971 bis 2008 [18]. Ohne eine Energiewende im internationalen Kontext ist die erforderliche Trendumkehr nicht zu schaffen. Wir können das Ziel einer globalen Energieversorgung mit hohen Anteilen erneuerbarer Energie nur dann nachhaltig erreichen, wenn wir weitere erhebliche Anstrengungen unternehmen. Dazu gehört insbesondere, dass die Energieeffizienz und der Zugang zu Energie deutlich verbessert werden. Zudem muss das Bevölkerungswachstum deutlich vermindert werden.

Zusammenfassung

2010 kamen bereits rund 11 % des Endenergieverbrauchs in Deutschland aus erneuerbaren Energiequellen. Beim Stromverbrauch lag ihr Anteil bei 17 %, beim Wärmeverbrauch bei knapp 10 % und beim Kraftstoffverbrauch bei rund 6 %. Im ersten Halbjahr 2011 kam ihr Anteil an der Stromversorgung bereits auf rund 20 %. Die Deutsche Bundesregierung will mit ihren Beschlüssen vom Juni 2011 sichern, dass ein kontinuierlicher weiterer Ausbau erfolgen kann, der allen ökologischen, ökonomischen und sozialen Kriterien der Nachhaltigkeit gerecht wird. In Deutschland entwickelte sich auf dem Gebiet der erneuerbaren Energie eine leistungsfähige Wirtschaftsbranche mit knapp 400 000 Arbeitsplätzen. Die von der Politik beschlossenen Ausbauziele in Deutschland sind anspruchsvoll: mindestens 35 % bis spätestens 2020 und rund 80 % bis spätestens 2050 im Strombereich sowie 18 % bis 2020 und 60 % bis 2050 bei der gesamten Energieversorgung. Diese nationale Strategie ist eingebettet in eine EU-Richtlinie zur Förderung der erneuerbaren Energie. Auch bei der globalen Energieversorgung müssen regenerative Energieträger langfristig die Hauptrolle übernehmen. Erfolge aus der EU und anderen Staaten wirken dabei beispielgebend. Die weltweite Stromerzeugung kam 2008 zu 18,5 % aus erneuerbarer Energie.

Literatur

- [1] Bundesumweltministerium (BMU): Themenseite zu erneuerbaren Energien, www.erneuerbare-energien.de.
- [2] EP/ER: Richtlinie 2009/28/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien 2001/77/EG und 2003/30/EG, Amtsblatt der EU L140/15 v. 5. Juni 2009.

- [3] International Feed-In-Cooperation, www.feed-in-cooperation.org.
- [4] BMU: Erneuerbare Energien in Zahlen – Nationale und Internationale Entwicklung, Stand: Juli 2011. BMU, Berlin 2011. PDF-Download: www.erneuerbare-energien.de.
- [5] Europäische Kommission: Erneuerbare Energien: Fortschritte auf dem Weg zum Ziel für 2020, Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament und den Rat, KOM(2011) 31, 31.1.2011, eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0031:FIN:DE:PDF.
- [6] Eurostat, Statistisches Amt der Europäischen Gemeinschaften, Luxemburg: Online Database, epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/energy.
- [7] EWEA: Annual Report 2010 European Wind Energy Association, 2011. Download: www.ewea.org, dort unter „Publications“.
- [8] E. Bruns et al., Renewable Energies in Germany's Electricity Market; Springer, Heidelberg 2010.
- [9] Agentur für Erneuerbare Energien (Hrsg.): 20 Jahre Förderung von Strom aus Erneuerbaren Energien in Deutschland – eine Erfolgsgeschichte, 2010; www.unendlich-viel-energie.de.
- [10] Bundesverband Windenergie (BWE), www.wind-energie.de; European Wind Energy Association (EWEA), www.ewea.org; Global Wind Energy Council (GWEC), www.gwec.net.
- [11] BMU: Erneuerbare Energien – Innovationen für eine nachhaltige Energiezukunft, Heidelberg, aktualisierte Ausgabe Herbst 2011, www.erneuerbare-energien.de.
- [12] International Renewable Energy Agency (IRENA) 2011, www.irena.org.
- [13] Renewable Energy Policy Network – REN 21: Renewables 2011 Status Report, www.ren21.net.
- [14] Deutsches Wind Energie Institut – DEWI 2011: Jahresbilanz Windenergie 2010, www.dewi.de.
- [15] Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik – IWES 2011, www.iwes.fraunhofer.de.
- [16] DLR, IWES, IfnE, „Leitstudie 2010“, im Auftrag des BMU, Dezember 2010, www.erneuerbare-energien.de.
- [17] Desertec Foundation 2011, www.desertec.org.
- [18] International Energy Agency (IEA), Renewables Information, Edition 2010, IEA/OECD, Paris 2010.
- [19] ISI, GWS, IZES, DIW, Einzel- und gesamtwirtschaftliche Analyse von Kosten- und Nutzenwirkungen des Ausbaus Erneuerbarer Energien im deutschen Strom- und Wärmemarkt, Update 2010; im Auftrag des BMU, Juni 2011, www.erneuerbare-energien.de.
- [20] GWS, DIW, DLR, ISI, ZSW, Kurz- und langfristige Arbeitsplatzwirkungen des Ausbaus der erneuerbaren Energien in Deutschland, im Auftrag des BMU (Hrsg.), Februar 2011, www.erneuerbare-energien.de.
- [21] Alpha Ventus 2011, www.alpha-ventus.de.
- [22] FINO-Offshore-Plattformen 2011, www.fino-offshore.de.
- [23] Nitsch et. al.: Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien, DLR, Stuttgart 2004; im Auftrag des BMU, www.erneuerbare-energien.de.
- [24] IPCC-Sonderbericht Erneuerbare Energien 2011, www.ipcc.ch.

Die Publikationen des BMU sind im Referat Öffentlichkeitsarbeit in Berlin oder über www.erneuerbare-energien.de bestellbar.

Die Autoren



Harald Kohl, Studium der Physik in Heidelberg, Promotion am dortigen Max-Planck-Institut für Kernphysik; seit 1992 im Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit Bonn und Berlin, derzeit Referatsleiter für Bürgerkommunikation.



Wolfhart Dürrschmidt, Studium der Physik in Tübingen, Promotion im Institut für Physikalische und Theoretische Chemie der Universität Tübingen. Leiter des Grundsatz- und Strategiereferats für Erneuerbare Energien des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Berlin.

Anschrift

*Dr. Harald Kohl, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Referat K, Stresemannstraße 128-130, 10117 Berlin.
Dr. Wolfhart Dürrschmidt, BMU, Referatsleiter KI III 1, Köthener Straße 2-3, 10963 Berlin.
harald.kohl@bmu.bund.de,
wolfhart.duerrschmidt@bmu.bund.de*