



Die weltweit größte Photovoltaik-Dachanlage auf der Münchner Messe hat eine Nennleistung von rund 1 MW_{el}. Sie speiste 2004 rund 1000 MWh elektrischer Energie ins Netz (Foto: Shell Solar).

Entwicklung der erneuerbaren Energien

Regenerative Energieträger im Aufwind

HARALD KOHL

Naturkatastrophen und steigende Erdölpreise rücken erneuerbare Energien wieder ins öffentliche Interesse. Welchen Beitrag leisten sie heute in Deutschland, welchen in der Welt? Wie hoch ist ihr Ausbaupotenzial? Eine Zwischenbilanz.

Vor dreißig Jahren stand Deutschland still – zwar sonntags nur und nur auf den Straßen. Doch wengleich die autofreien Wochenenden mehr symbolischen als energie-wirtschaftlichen Charakter hatten, sitzt der Schock bis heute tief. Seit der ersten Ölpreiskrise kommt die energiepolitische Debatte in Deutschland nicht mehr zum Erliegen. Wie muss die Energieversorgung Deutschlands in der Zukunft aussehen? Ist die Versorgung mit Strom, Wärme und Treibstoffen sicher? Welcher Energiemix wird sich positiv auf die Entwicklung des weltweiten Klimas auswirken?

Die Antwort auf diese Fragen kann in einem kräftig wachsenden Beitrag der regenerativen Energieträger liegen.

Das 21. Jahrhundert wird das Jahrhundert der Sonne, Wind- und Wasserkraft, der energetischen Nutzung der Biomasse und vielleicht auch der Erdwärme werden.

Strom, Wärme und Verkehr

In Deutschland haben die erneuerbaren Energien in den letzten Jahren vor allem bei der Stromerzeugung stürmisch zugelegt [1]. Im Jahr 2005 stammten 10,2 % der Energie aus deutschen Steckdosen aus erneuerbaren Energien, fast dreimal mehr als noch 1990 [2]. Das liegt vor allem am Ausbau der Windenergie. Mit einer Energiebereitstellung von inzwischen rund 26,5 TWh pro Jahr hat sie die traditionell vorhandene Wasserkraft mit rund 21,5 TWh überholt (Abbildung 1). Auch die Stromerzeugung aus der Nutzung von Biomasse hat mit 13,1 TWh einen Höchststand erreicht, mit weiter steigender Tendenz. Photovoltaik und geothermische Stromerzeugung spielen noch eine marginale Rolle. Dennoch wächst die Stromerzeugung mit photovoltaischen Zellen rasant: in Deutschland seit 2000 um den Faktor 15.



So könnte ein Offshore-Windpark auf hoher See aussehen
(Photomontage von Nordex).

Deutschland ist damit auf dem besten Wege, das von der letzten Bundesregierung angestrebte Ziel zu erreichen, nach dem im Jahr 2010 die erneuerbaren Energiequellen mindestens 12,5 % des Strombedarfs decken sollen. Das ferner liegende Ziel von mindestens 20 % bis 2020 könnte bei der derzeitigen Entwicklung vielleicht sogar übertroffen werden.

Auch mit der Wärmebereitstellung aus erneuerbaren Quellen geht es aufwärts. 2005 betrug der Anteil an der Wärmeerzeugung in Deutschland 5,4 %. Weit vorne steht dabei die Biomasse mit jährlich knapp 76,5 TWh. Hier ergänzt sich traditionelle Holzverbrennung mit moderner Nutzung, zum Beispiel durch Holzpellettheizungen. Besonders dynamisch entwickelt sich die solarthermische Wärmenutzung über Kollektoren auf Dächern und anderen Flächen. Seit 2000 hat sie sich mehr als verdoppelt, seit Anfang der 1990er-Jahre gar mehr als verzwanzigfach.

Sogar im Verkehr gewinnen regenerative Energieträger langsam an Boden. Zwar verbrennen die Automotoren in Deutschland noch einen vergleichsweise kleinen Anteil an biogenen Kraftstoffen, vor allem Biodiesel und in geringen Mengen auch Bioethanol. Er liegt erst bei 3,4 % des Gesamtverbrauchs im Straßenverkehr, doch das ist immerhin schon mehr als das Achtfache der Menge des Jahres 2000.

Heutiger Stand

Wo stehen die erneuerbaren Energien insgesamt? Abbildung 2 zeigt die Struktur des Primär-Energieverbrauchs in Deutschland im Jahr 2005. Es überrascht nicht, dass fossile Quellen die Energieversorgung nach wie vor dominieren: Braunkohle, Steinkohle, Mineralöl, Erdgas decken 82 % des Bedarfs. Hinzu kommt der Beitrag der Kernenergie an der

Stromerzeugung von 12 %. Für die erneuerbaren Energien bleiben damit 3,6 % am Primär-Energieverbrauch, Mitte der 1990er-Jahre lag ihr Anteil noch bei etwa 1,5 %. Mehr als die Hälfte dieser regenerativen Energie stammt aus der Biomasse-Nutzung, Windenergie trägt 14,6 % und Wasserkraft 11,9 % bei (Abbildung 2).

Der Grund für den kräftigen Aufschwung regenerativer Energieträger in Deutschland liegt vor allem in der Politik. In den letzten zehn 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 1991 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. Die Kosten werden auf den Strompreis umgelegt.

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 im Laufe des 21. Jahrhunderts nur dann zu einem wesentlichen Pfeiler der Energieversorgung, wenn sie Praxistauglichkeit und Wirtschaftlichkeit beweisen. Dazu muss jede Technologie den langen Weg von der Forschung und Entwicklung über Pilot- und Demonstrationsprojekte bis hin zur vollen Wettbewerbsfähigkeit schaffen [3]. Das geht nur mit staatlicher Förderung.

Potenzial und Grenzen

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

Grundsätzlich ist das Potenzial enorm groß. Die meisten erneuerbaren Energien speisen sich aus Solarenergie, und die Sonne sorgt für einen kontinuierlichen Energiefluss von über 1,3 kW/m² an der Erdoberfläche. Geothermie nutzt die Wärme des Erdinneren, die sich vor allem aus radioaktiven Zerfallsprozessen speist [4].

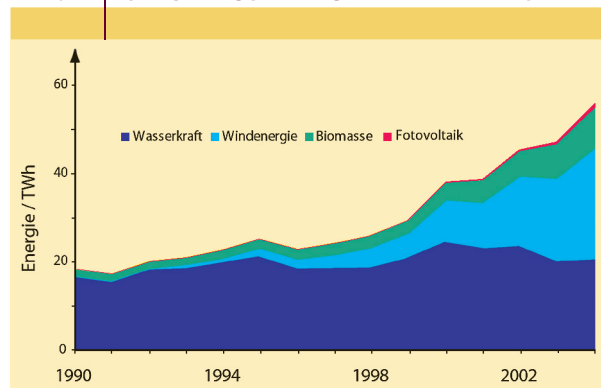
Diese Energiequellen sind freilich bei weitem nicht vollständig nutzbar. Umwandlungsprozesse, Grenzen für Wirkungsgrade und Anlagengrößen

INTERNET

BMU-Broschüre [2] und anderes Material
www.erneuerbare-energien.de

Entwicklung des Anteils von erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung in Deutschland [2].

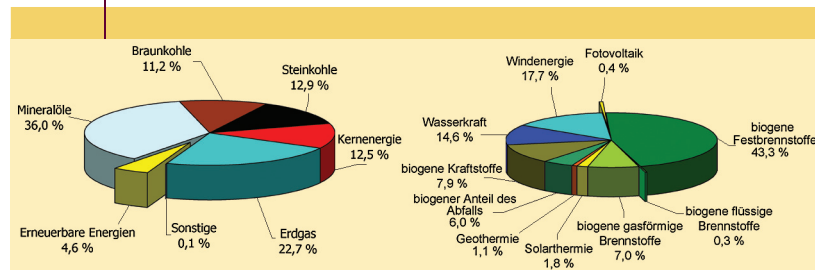
ABB. 1 STROM AUS ERNEUERBAREN ENERGIEN



schaffen technische Restriktionen. Hinzu kommen infrastrukturelle Einschränkungen, zum Beispiel 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 Energiedarbringung aus fluktuierenden Quellen eine wichtige Rolle. Außerdem sollen erneuerbare Energien auch ökologisch verträglich sein. Die Beanspruchung von Böden, Beeinträchtigung von Fließgewässern 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, 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, können erneuerbare Energien beträchtliche Teile des deutschen Energiebedarfs decken. Schätzungen zufolge sind es bis zu 6200 PJ pro Jahr [1]. Das entspricht rund 40 % des derzeitigen Primärenergieverbrauchs. Bei diesen Schätzungen sind

ABB. 2 PRIMÄRENERGIEVERBRAUCH IN DEUTSCHLAND



Links: Aufteilung des deutschen Primär-Energieverbrauchs von insgesamt 14 238 PJ (Petajoule) im Jahr 2005 auf die verschiedenen Energieträger. Rechts: Anteile der erneuerbaren Energien 2005, zusammen produzierten sie 164 TWh Wärme und Strom [2].

die Randbedingungen in Form nutzbarer Flächen für Kollektoren und Solarzellen, für Windkraftstandorte und den Energiepflanzenanbau sehr restriktiv gewählt.

Berücksichtigt man, dass in den nächsten Jahrzehnten viele Techniken im Energieverbrauch sicher effizienter werden, könnte Deutschland allein innerhalb der eigenen Grenzen 60 % seiner Energie regenerativ bereitstellen. Die dafür nötige breite und vielfältige Nutzung der erneuerbaren Energien erfordert aber auch, dass die verschiedenen Energiequellen entsprechend ihren besonderen Eigenschaften genutzt werden müssen. Schauen wir uns also die einzelnen Sparten genauer an.

Wasserkraft

Wasser ist historisch 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. Derzeit können die etwa 5500 großen und kleinen Anlagen rund 25 TWh Energie jährlich bereitstellen, 90 % davon in Bayern und Baden-Württemberg. Das weltweite Potenzial der Wasserkraft ist erheblich größer: Knapp 18 % des erzeugten Stroms kommt aus Wasserkraftwerken [5]. Damit liegt die Wasserkraft – global gesehen – etwa gleichauf mit der Kernkraft. Bislang ist sie die einzige regenerative Energiequelle, die im großen Umfang zum Weltbedarf an elektrischer Energie beiträgt. 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 bringen soll, was etwa 14 Kernkraftwerksblöcken entspricht [5].

In Deutschland bietet die so genannte „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. Das allein schränkt schon die Ausbaumöglichkeiten stark ein.

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, denn sie können bis zu 90 % der kinetischen Energie des durchfließenden Wassers in Strom umwandeln [5]. Zum Vergleich: Moderne Erdgas-Kombikraftwerke erreichen 60 % Wirkungsgrad, Leichtwasserreaktoren sogar nur etwa 33 %.

Windenergie

Die zweite, wichtige regenerative Energiequelle ist der Wind. Moderne Windkraftanlagen, deren Rotoren das Auftriebsprinzip nutzen, erreichen Wirkungsgrade von bis zu 50 %. Deutschland ist Wind-Weltmeister: 17 574 Windräder erzeugten im Jahr 2005 knapp 4,3 % des deutschen Stroms.

Weltweit sind annähernd 48 GW elektrischer Windkraft-Leistung installiert, davon mehr als ein Drittel in Deutschland. Der rasante Zubau der letzten Jahre schwächt sich allerdings ab, denn an Land ist die Mehrzahl der geeigneten Standorte erschlossen. Der nächste Schritt wird daher der Ausbau von Windenergie auf hoher See sein.

Kritik an der Windenergie wird vor allem wegen möglicher Geräuschemissionen, möglicher Störung der Tierwelt, besonders von Vögeln, und der Veränderung des Landschaftsbildes geübt. Außerdem hat Wind den Nachteil, dass er nicht kontinuierlich zur Verfügung steht. Dieser Nachteil lässt sich allerdings durch verbesserte Windprognosen und intelligentes Einspeisemanagement in ein dezentral ausgestattetes Stromnetz minimieren.

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 ist die Kopplung von beidem. In Deutschland stammen derzeit 94 % der erneuerbaren Wärme aus Biobrennstoffen, vor allem aus der Holzverbrennung – aber zunehmend auch aus Restholzkraftwerken, Hackschnitzel- und Pellet-Heizungen und Biogasanlagen. Auch der Anteil an der Stromversorgung steigt allmählich: 2005 betrug er 2,1 %.

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.

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 sind inzwischen mehr als 7,2 Millionen Quadratmeter Kollektorfläche installiert.

Die solarthermische Stromerzeugung steckt dagegen noch in der Entwicklungsphase [6]. Parabolrinnenkollektoren, Solartürme oder Paraboloidkraftwerke erzeugen Temperaturen bis über 1000 °C, die mit Hilfe von Gas- und Dampfturbinen in Strom verwandelt werden können. Diese Technologien könnten mittelfristig zur Stromversorgung beitragen. Effizient sind sie allerdings nur in Ländern mit hoher Sonneneinstrahlung wie etwa Spanien. 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 [1].

Die unmittelbarste und technologisch reizvollste Solar-energienutzung ist sicherlich die Photovoltaik. Energie-wirtschaftlich ist ihr Anteil – vor allem wegen der noch ho-

hen Stromgestehungskosten – noch marginal. Dennoch zeigt der Photovoltaikmarkt das weitaus dynamischste Wachstum: Allein im Jahre 2005 wurde eine Peak-Leistung von 600 MW_p zugebaut. Insgesamt sind damit in Deutschland über 1400 MW_p installiert. Neue Herstellungstechniken bieten zudem die Chance, Solarzellen wesentlich billiger und Energie sparender herzustellen und ihnen damit zum Durchbruch zu verhelfen [7,8].

Geothermie

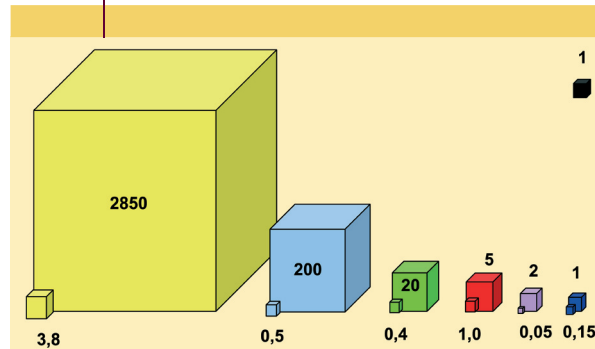
Die derzeit noch am wenigsten genutzte regenerative Ressource ist die Erdwärme. Vor allem die Tiefengeothermie nutzt bei Bohrungen von bis zu 5 km Tiefe entweder heiße Thermalwässer oder schafft durch die Injektion von Wasser in heiße, trockene Gesteinsschichten (Hot-Dry-Rock-Verfahren) eine hydraulische Stimulation [4]. Bei Temperaturen über 120 °C kann auch Strom erzeugt werden – in Deutschland bislang einzig 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 [4]. Wenn es gelingt, die Geothermie in größerem Stil zu nutzen, dann könnte sie mit ihrer Gleichmäßigkeit und Verlässlichkeit einen erheblichen Beitrag zur Grundlastversorgung leisten.

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? Ein Blick auf die aktuelle Situation zeigt: Die Energiewirtschaft und insbesonde-

ABB. 3 | NATÜRLICHES ANGEBOT UND NUTZBARKEIT



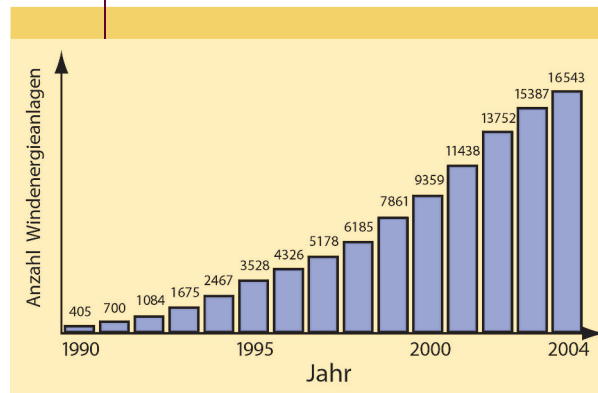
Das natürliche Angebot an regenerativer Energie im Verhältnis zum heutigen Weltenergieverbrauch (schwarzer Würfel, auf 1 normiert). Kleine Würfel: Anteil der jeweiligen Energiequelle, der technisch, ökonomisch und ökologisch vernünftig nutzbar ist. Gelb: Solarstrahlung auf Kontinente, blau: Wind, grün: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

re die Stromerzeuger stehen vor wichtigen Investitionsentscheidungen, denn der deutsche Kraftwerkspark ist in die Jahre gekommen. Bis 2020 müssen Produktionskapazitäten von 40 bis 45 GW_{el} modernisiert oder ersetzt werden. Das ist immerhin ein Drittel der heutigen Kapazitäten.

Damit öffnet sich gegenwärtig ein Zeitfenster für Investitionen in den Ausbau regenerativer Energien. An dieser Situation würde auch eine Verlängerung der Restlaufzeiten einiger deutscher Kernkraftwerke wenig ändern, denn sie würde die notwendige Erneuerung nur um wenige Jahre verzögern. Spätestens nach 2020 wird Deutschland wohl von einem breiten Energiemix vieler Energieträger gespeist werden. Dazu gehören auch hocheffiziente fossile Kraftwerke. Nach Meinung einiger Energieexperten könnten „CO₂-freie“ Kraftwerke dann ebenfalls einen Beitrag liefern, in denen das CO₂ abgetrennt und deponiert wird.

Wie sich erneuerbare Energien langfristig etablieren könnten, haben eine Reihe von Studien und Szenarienrechnungen untersucht. Danach werden sie sich sukzessive ihren Anteil an der Energieversorgung erobern. In der Regel sind sie zuerst noch unausgereift, kostenintensiv und verharren deshalb auf niedrigem Niveau. Mit technologischer und ökonomischer Entwicklung geraten sie dann in eine Phase stetigen, zeitweise auch rasanten, fast exponentiellen Wachstums. Erst wenn technologische, ökonomische oder strukturelle Begrenzungsfaktoren zum Tragen kommen, schwächt sich die Zunahme ab und strebt dauerhaft einem konstanten Anteil zu. Ein schönes Beispiel für dieses Modell ist die Entwicklung der landgebundenen Windkraft. Abbildung 4 illustriert ihren raschen Zuwachs in den vergangenen Jahren in Deutschland. Doch der Wendepunkt ist bereits sichtlich überschritten, die windstarken und wirtschaftlich attraktiven Standorte an Land sind weitgehend ausgeschöpft. Es wird zwar noch zu einem weiteren Zubau kommen. Doch bereits in wenigen Jahren wird die Entwicklung des Anteils der Windenergie einem stabilen Niveau entgegen streben. Chancen bieten sich dann noch durch das „Repowering“, der Modernisierung von Altanlagen mit neuen, leistungsstärkeren Rotoren und Generatoren. Das kann die Energieerzeugungskapazität der Windkraft an Land noch weiter steigern.

ABB. 4 | WINDKRAFTANLAGEN IN DEUTSCHLAND



Die Entwicklung der Windkraft an Land in Deutschland zeigt eine zeitweilig fast exponentielle Zunahme. Jüngst deutet sich jedoch ein Wendepunkt zu geringerem Wachstum an
(Quelle: Deutsches Windenergie-Institut).

Hohe See und freies Feld

Der nächste große Schritt im Wandel des Energiesystems in Deutschland dürfte der Start der Offshore-Windenergie sein. Im deutschen Küstenmeer und in der „Ausschließlichen Wirtschaftszone“ wird mit einem Leistungspotenzial von bis zu 25 GW elektrischer Gesamtleistung gerechnet.

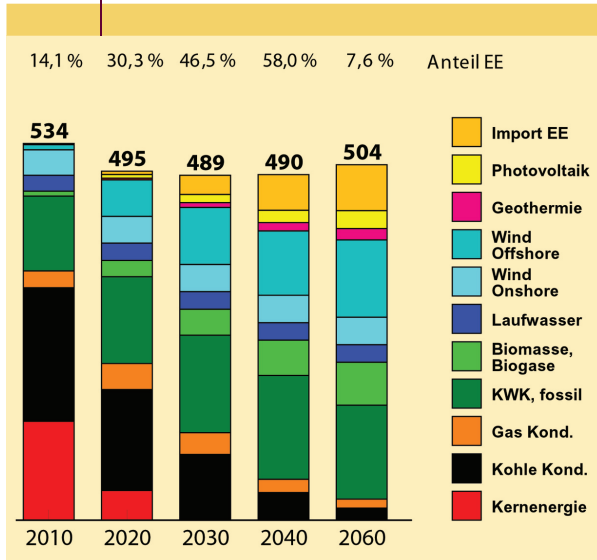
Solche Offshore-Windanlagen müssen weit vor der Küste in Wassertiefen bis zu 60 m gebaut werden. Das gilt besonders für die windreiche Nordsee. Im küstennahen Flachwasser gibt es wegen des Naturschutzes, traditionellen Nutzungsrechten wie Kiesabbau, militärischen Sperrgebieten und der Schifffahrt keine geeigneten 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 40 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. Nur wenn sie etwa 5 MW_{el} erreichen, können sie unter solchen Bedingungen ökonomisch arbeiten. Um in der Nordsee bald das erste deutsche Offshore-Testfeld bauen zu können, haben Unternehmen, Verbände und Netzbetreiber gemeinsam eine Offshore-Stiftung gegründet. 2007 soll es bei der Forschungsplattform Fino in der Nähe von Borkum West entstehen. Arbeitet es erfolgreich, kann Windpark für Windpark aus den Fluten wachsen.

Die Biomasse wird mittelfristig eine immer wichtigere Rolle spielen. Berücksichtigt man die Belange des Natur- und Landschaftsschutzes, und will man sie umweltverträglich nutzen, so wird bis 2020 vor allem die konsequente Nutzung biogener Reststoffe im Mittelpunkt stehen. Dies bezieht sich auf die inzwischen bereits fortgeschrittene thermische Verwertung von Restholz und Landschaftspflegeresten, aber auch auf den verstärkten Einsatz von Biogasanlagen. Eine wachsende, ökologisch verträgliche Nutzung von Biomasse wird sich auch strukturell auswirken: Sie eröffnet der Land- und Forstwirtschaft neue, auf lange Frist konzipierte Perspektiven und Möglichkeiten. Viele Landwirte könnten so zu „Energiewirten“ werden.

Flüssige Treibstoffe aus Biomasse können in Deutschland in noch viel stärkerem Maße fossile Treibstoffe substituieren, als das heute der Fall ist. Allerdings wird es kurzfristig in Deutschland keine größeren neuen Anbauflächen für Energiepflanzen geben. Der Schutz der Ackerstandorte vor Erosion, die Bereitstellung von Flächen zum naturschutzrechtlich vorgeschriebenen Biotopverbund und andere Nachhaltigkeitsziele verhindern den Ausbau weitgehend. Nach 2020 werden der geringere Nahrungsbedarf der rückläufigen Bevölkerung und landwirtschaftliche Ertragssteigerungen vermutlich signifikante Zuwächse in der Produktion von Energiepflanzen ermöglichen. Dies erlaubt schließlich auch langfristig höhere Anteile von Biokraftstoffen im Verkehr.

ABB. 5 | STROMERZEUGUNG IN ZUKUNFT



Stromerzeugung in Deutschland nach Kraftwerksarten und Energiequellen im Zukunftsszenario „NaturschutzPlus I“ [9]. EE: Erneuerbare Energien.

Die anderen erneuerbaren Energieträger werden in Deutschland erst in späterer Zukunft eine energiewirtschaftlich spürbare Rolle spielen können. Dazu kann dann die Photovoltaik gehören und importierter Strom aus solarthermischen Kraftwerken.

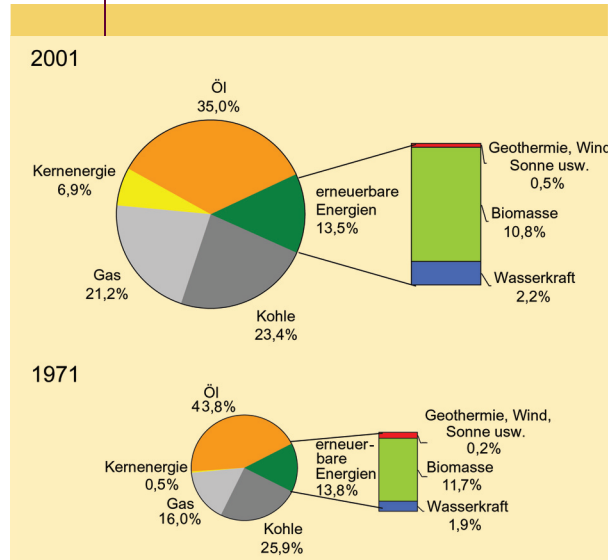
Eine besondere Hoffnung ruht heute auf der Geothermie. Allerdings ist es wegen der technischen Herausforderungen für eine Vorhersage ihres zukünftigen Beitrags zur Primärenergieversorgung noch zu früh. Die Nutzung von Erdwärme wird auch erst dann richtig effizient, wenn sie neben Strom vor allem Wärme produziert. Das erfordert den Ausbau von Nah- und Fernwärmenetzen, verlangt also weitere Investitionen.

Ökologisch optimierter Ausbau

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 [9]. In ihr berücksichtigte es die technische Entwicklung, Wirtschaftlichkeit, Versorgungssicherheit und ökologische wie soziale Verträglichkeit. Diese Studie macht die wesentlichen Trends sichtbar.

Abbildung 5 zeigt die Stromerzeugung in Deutschland nach Kraftwerksarten und Energiequellen im Szenario „NaturschutzPlus I“ [9]. Dieses Szenario strebt einen wirtschaftlich vertretbaren Ausbau der erneuerbaren Energien an, berücksichtigt jedoch gleichzeitig die ökologischen Be-

ABB. 6 | PRIMÄRENERGIEVERBRAUCH DER WELT



Entwicklung des Primärenergieverbrauchs der Weltbevölkerung: 1971 lag der Gesamtverbrauch bei 234 000 PJ und 2003 bei 420 000 PJ [10, 11].

lange. Ferner geht es davon aus, dass die Nutzung der Kernenergie in Deutschland zwischen 2020 und 2030 ausläuft.

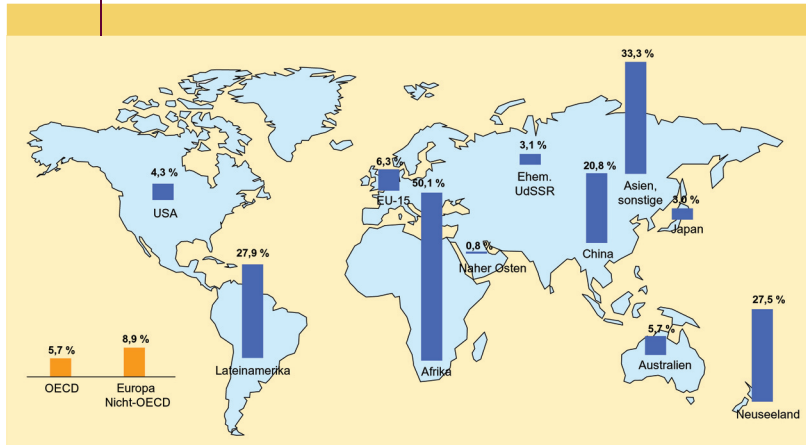
Die Entwickler des Szenarios kommen zu dem Ergebnis, dass der heute vor allem aus fossilen und nuklearen Quellen stammende Strom Zug um Zug durch erneuerbare Energien ersetzt wird.

Dabei werden Kohlekraftwerke, Gaskraftwerke und vor allem die Kraft-Wärme-Kopplung auf der Basis fossiler Brennstoffe noch weit ins 21. Jahrhundert hinein eine wichtige Rolle spielen. Spätestens zur Mitte des Jahrhunderts dürfte dann der Anteil des Stroms aus erneuerbaren Energien die Fünfzigprozent-Marke überschreiten. Wesentliche Beiträge werden Offshore-Windparks und die Stromgewinnung aus Biomasse und Biogas liefern. Der Anteil der Photovoltaik und Geothermie wird erkennbar, aber noch nicht tragend sein. Hinzu könnte importierter Strom aus regenerativen Quellen kommen.

Klar ist aber auch: Die Veränderung des Strommixes muss mit einer deutlichen Steigerung der Energieeffizienz und damit einer Verringerung des Gesamtstromverbrauchs einhergehen. Nur wenn Energieeinsparung, Effizienzsteigerung und der Ausbau der erneuerbaren Energien zugleich zügig vorangetrieben werden, wird eine nachhaltige Energieversorgung in Deutschland möglich.

Erneuerbare Energien im Weltmaßstab

Eine dauerhafte Lösung für Klimapolitik, Versorgungssicherheit und gerechtem Zugang zu Energie kann nur im globalen Maßstab geschaffen werden. Davon sind wir heute noch weit entfernt (Abbildung 6). Der Anteil der erneuerbaren Energien am Welt-Primärenergieverbrauch liegt derzeit bei 13,4 %. Er ist damit seit dem Beginn der 1970er-Jah-

ABB. 7 | WELTANTEIL ERNEUERBARER ENERGIEN**Anteil der erneuerbaren Energien am Primärenergieverbrauch in verschiedenen Regionen im Jahr 2001 [11].**

re praktisch gleich geblieben. Das liegt am gestiegenen Energieverbrauch der Weltbevölkerung, denn immerhin hat sich die gesamte Energiebereitstellung aus regenerativen Energieträgern seither nahezu verdoppelt.

Die Nutzung erneuerbarer Energien ist regional unterschiedlich ausgeprägt. In einigen Ländern Europas, Nord- und Südamerikas und in Japan spielt die konventionelle Wasserkraft traditionell eine besonders große Rolle. Länder wie Österreich, die Schweiz, Norwegen oder Kanada profitieren dabei von günstigen topografischen Verhältnissen. Beim Beitrag erneuerbarer Energien zur weltweiten Stromversorgung dominiert die Wasserkraft.

In den Entwicklungsländern können erneuerbare Energien jedoch nicht nur Positives bewirken. Das beweist zum Teil die Geschichte großer Staudammprojekte mit ihren gelegentlich sehr negativen sozialen Folgen und Auswirkungen auf die lokalen Ökosysteme. Ein zweites großes Problem ist die traditionelle Verbrennung von Biomasse. Sie treibt zwar besonders in Afrika, aber auch in vielen Ländern Asiens den statistischen Anteil scheinbar erneuerbarer Energien an der Primär-Energieversorgung hoch (Abbildung 7). Doch sie ist nicht wirklich nachhaltig, denn dabei werden die Wälder oft irreversibel abgeholzt. Gerade für Entwicklungs- und Schwellenländer gilt also, dass erneuerbare Energien auch mit kritischem Blick auf die Verhältnisse eingesetzt werden müssen.

Investitionskosten

Die Diskussion um die erneuerbaren Energien verläuft in einem Spannungsverhältnis zwischen technischen auf der einen sowie ökonomischen und politischen Argumenten auf der anderen Seite. Besonders deutlich wird dies an der Frage der Kosten.

Die meisten regenerativen Energien sind heute noch teurer als ihre fossilen und nuklearen Pendanten. Das ist wie beschrieben der Grund für die finanzielle Förderung erneuerbarer Energien, sei es durch eine Umlagefinanzierung

wie im Strombereich, sei es durch gezielte Unterstützung wie im Marktanzreizprogramm der Bundesregierung im Bereich der regenerativen Wärme. Ziel bleibt der Anreiz zur Reduzierung der spezifischen Kosten, daher die durchgehend degressive Ausgestaltung. Dabei wird allerdings die Höhe dieser Förderung häufig überschätzt. Dies gilt besonders für den Strombereich, der von massiven wirtschaftlichen Interessen und einer oligopolistischen Marktstruktur in Deutschland geprägt ist. Eine detaillierte Darstellung hierzu findet sich in der BMU-Publikation „Was Strom aus Erneuerbaren Energien wirklich kostet“, zu finden auf www.bmu.de.

Nach einer Studie des Instituts für Physik der Universität Oldenburg betragen die Investitionskosten für Windenergieanlagen in Deutschland im Durchschnitt rund 1000 €/kW. Bei aktuellen Kohlekraftwerken sind es 800 bis 1000 €/kW und bei dem derzeit in Finnland in Planung befindlichen Kernkraftwerk geschätzte 1700 bis 2000 €/kW. Dabei sind externe Folgekosten nicht berücksichtigt: Zusätzliche Einrichtungen zur Minimierung der CO₂-Emissionsreduzierung etwa durch Abscheidung und Speicherung von Kohlenstoff würden fossile Kraftwerke erheblich verteuern. Ökonomisch relevant sind letztlich aber die Kosten pro erzeugter Kilowattstunde. Hier gehen bei den konventionellen Energien zusätzlich die Kosten für die Brennstoffe ein, die bei Wind-, Wasser- und Solarenergie entfallen.

Die gesamte Energiebilanz

Die Gesamt-Energiebilanz für Herstellung, Betrieb und Entsorgung ist in der Tat für alle Sparten der Erneuerbaren Energien positiv. Berechnungen des DLR Stuttgart und des ifeu-Instituts Heidelberg ergeben energetische Amortisationszeiten von 3 bis 7 Monaten bei Windenergieanlagen, 9 bis 13 Monaten bei Wasserkraftanlagen, 3 bis 7 Monaten bei solarthermischen Kraftwerken und 1,5 bis 2,5 Jahren bei Sonnenkollektoren. Am aufwändigsten sind derzeit noch photovoltaische Anlagen. Sie amortisieren sich energetisch erst nach 2 bis 3 Jahren (Dünnschicht-Zellen) und 3 bis 5 Jahren (polykristallines Silizium). Die Lebensdauer all dieser Anlagen liegt aber um ein Vielfaches höher. Kraftwerke und Brennkessel auf der Basis nicht-regenerativer Energien amortisieren sich übrigens energetisch nie, denn sie verbrauchen immer mehr Brennstoffe, als sie Nutzenergie erzeugen.

Richtig ist, dass die Speicherung von regenerativ erzeugter Energie eine wichtige technische Herausforderung darstellt. Hier wird auch in Deutschland an vielen Techniken geforscht. Ob der Einsatz regenerativ erzeugten Wasserstoffs langfristig hierbei eine entscheidende Rolle einnehmen kann, bleibt abzuwarten. Klar ist aber, dass diese Möglichkeiten in den nächsten ein, zwei Jahrzehnten energetisch marginal bleiben werden. Viel geeigneter und kostengünstiger sind derzeit intelligentes, Einspeise- und nutzerseitiges Management und natürlich die Ausschöpfung der vielen noch brachliegenden Möglichkeiten zur Steigerung der Effizienz bei Energieumwandlung und beim Energieeinsatz.

Die Entwicklung der Energiepreise, die zunehmend deutlicher werdenden Verflechtungen von Energie- und Weltpolitik und die dadurch entstehenden Risiken sind Zeichen dafür, dass die Bedeutung Erneuerbarer Energien für unsere Versorgung möglicherweise viel schneller wachsen könnte, als erwartet.

Technologie des 21. Jahrhunderts

Dennoch werden regenerative Energien die Energietechnologie des 21. Jahrhunderts dominieren. Selbst im nicht sonnenverwöhnten Mitteleuropa steht insgesamt ein großes Potenzial an erneuerbaren Energien zur Verfügung. Das macht sie auf entscheidenden Feldern, die von geopolitisch heiklen Abhängigkeiten bis zur Wirtschaftlichkeit reichen, mittel- bis langfristig zum Punksieger gegenüber den fossilen und nuklearen Technologien. Konventionelle, vor allem fossile Energien wie Erdöl werden gegenüber heute deutlich teurer werden, während die klima- und ressourcenpolitischen Vorteile der erneuerbaren Energien sich allmählich auch ihren Preisen niederschlagen werden. Spätestens dann wird ihr Aufstieg nicht mehr zu bremsen sein.

Zusammenfassung

2005 kam 4,6 % des deutschen Primär-Energieverbrauchs aus erneuerbaren Energiequellen, bei der Stromproduktion lag ihr Anteil bei 10,2 %. Wesentliche Ursache ist der Boom bei der Windkraft, die vor allem durch Offshore-Windparks auf See weiter ausbaubar ist. Die Wasserkraft lieferte in Deutschland traditionell einen großen Beitrag zur Stromerzeugung, doch ihr Ausbaupotenzial ist gering. Die Photovoltaik, die solar- und die geothermische Stromerzeugung spielen derzeit noch eine kleine Rolle. Den deutschen Bedarf an Wärmeenergie deckten 2004 die erneuerbaren Energien zu 5,4 %, vor allem aus Biomasse. Die solarthermische Wärmeerzeugung hat sich gegenüber 2000 mehr als verdoppelt. Im Straßenverkehr spielen biogene Kraftstoffe mit 5,4 % noch eine untergeordnete Rolle. Bis 2050 könnte in Deutschland der Anteil regenerativer Energien am Primär-Energieverbrauch die Fünfzigprozentmarke überschreiten.

Literatur

- [1] Erneuerbare Energien – Innovationen für die Zukunft. BMU, Berlin 2004.
- [2] Erneuerbare Energien in Zahlen – Nationale und Internationale Entwicklung, Stand: Juni 2005. BMU, Berlin 2005.
- [3] Erneuerbare Energien – Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte, 3. Aufl. (Hrsg.: M. Kaltschmitt, A. Wiese, W. Streicher). Springer Verlag, Heidelberg 2003.
- [4] E. Huenges, Physik in unserer Zeit **2004**, 35(6), 282.
- [5] R. Wengenmayr, Technology Review **2005**, 8, 82.
- [6] R. Pitz-Paal, Physik in unserer Zeit **2004**, 35(1), 12.
- [7] G. Hahn, Physik in unserer Zeit **2004**, 35(1), 20.
- [8] N. Meyer, Physik in unserer Zeit **2004**, 35(2), 82.
- [9] J. Nitsch et al., Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien. DLR, Stuttgart 2004. Kurz- und Langfassung auf www.dlr.de/tt/institut/abteilungen/system/publications
- [10] International Energy Agency, Renewables Information Outlook 2002. IEA/OECD, Paris 2002.
- [11] International Energy Agency, Renewables Information Outlook 2003. IEA/OECD, Paris 2003.

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

Der Autor



Harald Kohl, geb. 1963, Studium der Physik in Heidelberg, Promotion am dortigen Max-Planck-Institut für Kernphysik; seit 1992 Referent im Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bonn und Berlin; derzeit verantwortlich für allgemeine und grundsätzliche Angelegenheiten der erneuerbaren Energien.

Anschrift:

Dr. Harald Kohl, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Referat Z III 1, Alexanderplatz 6, 10178 Berlin.
harald.kohl@bmu.bund.de