



Bundesministerium  
für Umwelt, Naturschutz  
und Reaktorsicherheit

# Erneuerbare Energien

Innovationen für eine nachhaltige Energiezukunft



# IMPRESSUM

## IMPRESSUM

Herausgeber:	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) Referat Öffentlichkeitsarbeit · 11055 Berlin E-Mail: service@bmu.bund.de · Internet: www.bmu.de · www.erneuerbare-energien.de		
Redaktion:	Dr. Wolfhart Dürrschmidt, Dieter Böhme, Elke Hammer BMU, Referat KI III 1 „Allgemeine und grundsätzliche Angelegenheiten der erneuerbaren Energien“		
Fachliche Bearbeitung:	Dr. Martin Pehnt (ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH) mit Dr. Lars-Arvid Brischke, Sirkka Jacobsen, Dr. Guido Reinhardt, Horst Fehrenbach, Regine Vogt, Jan Walter (IFEU)		
Gestaltung:	design_idee, büro_für_gestaltung, Erfurt		
Druck:	Silber Druck, Niestetal		
Abbildungen:	<p>Titelseite: Holger Mette/iStockphoto S. 4: Laurence Chaperon S. 15: khorixas/fotolia S. 19: Thaut Images/fotolia S. 20: ZPVP GmbH/Netzwerk Fluss-Strom S. 22: Michael Hughes/picture-alliance/www.photon-pictures.com S. 28: Susanne Fern/piclease S. 31: BildPix.de/fotolia S. 51: Norbert Hirneisen/piclease S. 53: Paul Langrock/Zenit S. 59: Mark Edwards/Still Pictures S. 60: MVV Energie AG S. 62: MVV Energie AG S. 64: @nt/fotolia S. 66 (li): Jan-Peter Kasper/picture-alliance/ZB S. 66 (re): Martin Pehnt S. 67: Agentur für Erneuerbare Energien S. 69 (li): Bernd Müller/BMU S. 69 (mi): Bernd Müller/BMU S. 69 (re): Bernd Müller/BMU S. 70 (li): MTU Friedrichshafen S. 70 (re): Norsk Hydro Electrolyseurs S. 71: Daimler AG S. 73: Lichtblick AG S. 74: Stadtwerke Neckarsulm S. 75 (li): RegModHarz-Konsortium S. 75 (mi): Vestas S. 75 (re): Vestas S. 76 (li): Paul Langrock/Zenit S. 76 (re): Paul Langrock/Zenit S. 77: 3dtool/fotolia S. 78 (o): Bundesverband Windenergie S. 78 (u): Stiftung Offshore-Windenergie/DOTI S. 79: Uni Kassel</p>	<p>S. 80: Paul Langrock/Zenit S. 81 (li): Bundesverband Windenergie S. 81 (re): Bundesverband Windenergie S. 82: Paul Langrock/Zenit S. 84 (li): Paul Langrock/Zenit S. 84 (mi): ISFH S. 84 (re): FH München S. 86 (li): Günter Fischer/ALIMDI.NET S. 86 (re): www.brinkhoff-fotos.de S. 87: Rainer Weisflog S. 88: Jochen Zick/Keystone S. 89 (li): DLR S. 89 (mi): Stadtwerke Jülich S. 89 (re): DLR S. 90 (li): Solarmundo S. 90 (re): DLR/www.markus-steur.de S. 91 (li): DLR S. 91 (re): vario images S. 92 (li): DLR S. 92 (re): DLR S. 95 (li): Michael Nast/DLR S. 95 (mi): ExpoStadt S. 95 (re): Paul Langrock/Zenit S. 96: Jörg Boethling/agenda S. 97: Michael Nast/DLR S. 98 (li): Rainer Weisflog S. 98 (re): Rainer Weisflog S. 101: Stadtwerke Crailsheim S. 103: Rolf Disch Solararchitektur S. 104: WestPic/fotolia S. 105 (li): C.A.R.M.E.N. S. 105 (mi): Haase S. 105 (re): Rainer Weisflog S. 106: blickwinkel/McPhoto S. 107 (li): www.BilderBox.com S. 107 (re): Falk Heller/argum S. 111: HAASE Energietechnik AG &amp; Co. KG S. 112: Rainer Weisflog S. 115 (li): Nordzucker</p>	<p>S. 115 (mi): logen S. 115 (re): Jochen Zick/Keystone S. 116 (li): Alexander Volkmann S. 116 (re): Wolfgang Steche/VISUM S. 117: Jochen Zick/Keystone S. 119: Choren Industries S. 120: Waltraud Grubitzsch/picture-alliance/dpa/dpaweb S. 121: Rainer Weisflog S. 124: Konrad Wothe/ALIMDI.NET S. 126 (li): Stefan Thomas/picture-alliance/ZB S. 126 (mi): Werner Otto S. 126 (re): Martin Schutt/picture-alliance/ZB S. 127: Rainer Weisflog S. 128: blickwinkel/McPhoto S. 130 (li): Universität Stuttgart S. 130 (mi): ISET S. 130 (re): Voith AG S. 131 (li): ISET S. 131 (re): ISET S. 132: ISET S. 133: ISET S. 135: Statkraft/picture-alliance/ZB S. 136 (li): Hans-Günter Wessely/photoplexus S. 136 (mi): Jens Büttner/picture-alliance/ZB S. 136 (re): Bestec GmbH S. 138: Bestec GmbH S. 139: Pfalzwerke AG S. 140: Bestec GmbH S. 143: Stephan Rumpf/picture-alliance/Sueddeutsche Zeitung Photo S. 144: Bernd Wüstneck/picture-alliance/ZB</p>
Stand:	Oktober 2011		
8. akt. Auflage:	40.000 Exemplare		

# INHALT

<b>Vorwort</b>	<b>4</b>
<b>Erneuerbare Energien: Garanten einer zukunftsfähigen Energieversorgung</b>	<b>6</b>
<b>Die ökologischen Qualitäten der erneuerbaren Energien</b>	<b>22</b>
<b>Stand und Perspektiven erneuerbarer Energien</b>	<b>32</b>
<b>Neue Versorgungsstrukturen</b>	<b>60</b>
<b>Windenergie - stark im Aufwind</b>	<b>75</b>
<b>Photovoltaik - Sonnenstrom überall</b>	<b>84</b>
<b>Solarthermische Kraftwerke – saubere Energie aus dem Sonnengürtel der Erde</b>	<b>89</b>
<b>Sonnenkollektoren und passive Solarnutzung – die Sonne ins Haus geholt</b>	<b>95</b>
<b>Biomasse - der Dauerbrenner für Wärme und Strom</b>	<b>105</b>
<b>Biokraftstoffe - Mobilität aus Pflanzen und Abfällen</b>	<b>115</b>
<b>Wasserkraft - bewährt und aktuell</b>	<b>126</b>
<b>Strom aus dem Meer</b>	<b>130</b>
<b>Geothermie und Wärmepumpe – die Energie aus dem Erdinneren und aus der Umwelt</b>	<b>136</b>
<b>Erneuerbare Energien und darüber hinaus: Was jeder Einzelne zum Klimaschutz beitragen kann</b>	<b>145</b>
<b>Glossar</b>	<b>148</b>

# VORWORT

Liebe Leserin,  
lieber Leser,



das jüngst mit breiter, parteiübergreifender Mehrheit in Bundestag und Bundesrat beschlossene Gesetzespaket zur Energieversorgung der Zukunft hat historischen Charakter. Es verbindet den erstmals zeitlich klar festgelegten Ausstieg aus der wirtschaftlichen Nutzung der Atomenergie mit einem strategisch umfassenden Konzept für den Einstieg ins Zeitalter der erneuerbaren Energien und der Energieeffizienz. Das hat es so noch nicht gegeben. Damit beenden wir nicht nur einen jahrzehntealten gesellschaftlichen Konflikt, sondern schaffen auch die Grundlage für nachhaltiges Wirtschaftswachstum, denn die Energiewende ist zugleich das wichtigste Wachstums- und Modernisierungsprojekt für die deutsche Wirtschaft: Nirgendwo sonst bestehen solche Wachstumschancen wie im Sektor der Energie- und Umwelttechnologien und insbesondere im Bereich der erneuerbaren Energien. Allein im Bereich der erneuerbaren Energien ist die Zahl der Arbeitsplätze auf rund 370.000 gewachsen.

Wir haben schon viel erreicht: Der Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromversorgung ist heute mit rund 20 Prozent etwa dreimal so hoch wie vor zehn Jahren. Die Ausbaudynamik setzen wir fort: Mindestens 35 Prozent unserer Stromerzeugung sollen erneuerbare Energieträger spätestens bis zum Jahr 2020 beisteuern. Nach dem Jahr 2020 soll ihr Anteil kontinuierlich weiter steigen: auf mindestens

50 Prozent bis spätestens 2030 und mindestens 80 Prozent bis spätestens 2050. Entscheidend ist, dass wir dabei Versorgungssicherheit und Bezahlbarkeit für alle sicherstellen. Das bedeutet die Förderung der Erneuerbaren zu vereinfachen, ihre Kosteneffizienz zu belohnen und sie stärker im Markt zu verankern. Mit dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) haben wir nicht nur die rasante Entwicklung erneuerbarer Energieträger im Bereich der Stromerzeugung beschleunigt, sondern auch einen stabilen Entwicklungsrahmen für eine gesunde, innovationsstarke Branche geschaffen. Das EEG wird zu einem innovativen Marktordnungsgesetz werden. Die geförderten Technologien sollen sich so schnell wie möglich selbst tragen. Dafür brauchen wir bessere Marktbedingungen im Verhältnis zu den konventionellen Energien sowie eine stärkere Koppelung an die Nachfrage. Dazu soll auch die neu eingeführte Flexibilitäts- und Marktprämie beitragen.

In einem nächsten Schritt wollen wir das große Potenzial der erneuerbaren Energien auf dem Wärmemarkt erschließen. Das Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG) und das aufgestockte Marktanzreizprogramm sind der Ausgangspunkt für eine Verdopplung der Wärmeproduktion aus erneuerbaren Energien bis 2020. Derzeit arbeiten wir an dem Erfahrungsbericht zum Erneuerbare-Energien-

Wärmegesetz. Auf dessen Grundlage wollen wir das Gesetz im nächsten Jahr grundlegend novellieren.

Erfolg werden wir aber nur haben, wenn wir zugleich die Energie-Infrastruktur modernisieren. Der Rechtsrahmen zur Biogaseinspeisung, das Energieleitungsausbaugesetz, aber auch die staatliche Förderung von dezentralen Wärmenetzen sind Bestandteile einer solchen Infrastrukturpolitik, die auf hohe Anteile erneuerbarer Energien setzt. Unser Blick ist dabei auf die langfristige Entwicklung des Energiesystems gerichtet. Sowohl der überwiegend dezentrale Charakter von erneuerbaren Energien und effizienter Energienutzung als auch die regionale und überregionale Vernetzung tragen wesentlich zur Verbesserung der Energiesicherheit bei. Eine besondere Bedeutung kommt den Kommunen und Regionen zu, von denen heute viele an einer Vollversorgung mit regenerativen Energien einschließlich der damit verbundenen Wertschöpfung vor Ort arbeiten. Dabei gibt es auch neue Chancen für Energiegenossenschaften, die sich kommunal gründen. Die Energieversorgung der Zukunft wird durch den Ausbau der erneuerbaren Energien jedenfalls viel dezentraler, regionaler, nachfrageorientierter, mittelständischer und damit zugleich importunabhängiger sein.

Die Vielfältigkeit der Weiterentwicklungen ist ein Zeichen für die Kreativität und Dynamik, die im Bereich der erneuerbaren Energien steckt. Eine aktuelle Wissensbasis ist Voraussetzung für die weitere Entwicklung. Diese jetzt seit schon zwölf Jahren herausgegebene Publikation des Bundesumweltministeriums bietet – vollständig aktualisiert und umfangreich ergänzt – einen ebenso spannenden wie informativen Überblick über den aktuellen Stand der Technik und über die nachhaltig erschließbaren Potenziale, Entwicklungsperspektiven und Einsatzmöglichkeiten erneuerbarer Energien. Kaum ein Bereich verkörpert so sehr die Zukunft „made in Germany.“ Deutschland kann und wird damit Vorbild für andere sein und vorangehen bei einer Entwicklung, die wie kaum eine andere das 21. Jahrhundert prägen wird.



Dr. Norbert Röttgen  
Bundesminister für Umwelt, Naturschutz  
und Reaktorsicherheit

# ERNEUERBARE ENERGIEN: GARANTEN EINER ZUKUNFTSFÄHIGEN ENERGIEVERSORGUNG

Binnen zwei Jahrzehnten haben sich die erneuerbaren Energien von einer „alternativen Energiequelle“ für wenige Pioniere aus Wissenschaft, Politik und Wirtschaft zu einem der wichtigsten wirtschaftlichen Trends des angehenden 21. Jahrhunderts entwickelt. Aus den sprichwörtlichen Garagen- und Hinterhof-firmen in Nord- und Süddeutschland wurden Unternehmen, die sich auf der ganzen Welt engagieren, Milliarden Euro umsetzen und allein in Deutschland knapp 370.000 Menschen beschäftigen. Die Windkraftbranche schafft besonders an den deutschen Küsten neue Jobs – gerade dort, von wo man lange Zeit überwiegend trübe Nachrichten aus der Werftbranche vernommen hatte. Und die Solarbranche hat sich ihre Heimat in Ostdeutschland gesucht und viele ehemalige Mitarbeiter der chemischen Industrie aufgenommen. Windkraft, Biomasse, Solarindustrie und viele weitere Firmen im Umfeld erneuerbarer Energien schaffen heute hochqualifizierte Jobs in einer zukunftssicheren, boomenden Branche. Die erneuerbaren Energien schicken sich an, der deutschen Autoindustrie als Aushängeschild des „Made in Germany“ den Rang streitig zu machen. Weltweit werden erneuerbare Energien zu einem wesentlichen Wirtschaftsfaktor; 211 Milliarden Euro wurden im Jahr 2010 in erneuerbare Energieanlagen investiert.

Erneuerbare Energien entnehmen der Ökosphäre nur geringe Teile der natürlichen Energieströme. Zur Regenerierung steht die unerschöpfliche Kraft der Sonne bereit – dieser gigantische, weit entfernte Fusionsreaktor, der seit Jahrmilliarden die Erde mit Energie versorgt. Alles Leben auf der Erde bezieht seine Energie aus der Kraft der Sonne. Pflanzen wachsen mit Hilfe von Sonnenstrahlung und bauen Biomasse auf. Die Sonne treibt auch das Wetter an, sorgt für Wind und Niederschläge und schafft so die Voraussetzungen für Wind- und Wasserkraft.

Sonnenkollektoren, solarthermische Kraftwerke und Solarzellen nutzen die Sonnenstrahlung direkt ohne den Umweg über ein anderes Medium. Schließlich kann man auch die Erdwärme anzapfen, eine Energie, die aus der Wärme des radioaktiven Zerfalls im Erdinneren und der noch von der Erdentstehung verbliebenen Bewegungsenergie stammt, oder man kann die Schwerkraft nutzen, die für die Gezeiten verantwortlich ist.

Windkraft, Solarenergie, kleine Wasserkraftwerke und die Energie aus Biomasse und Erdwärme haben vor nicht so langer Zeit lediglich einen homöopathischen Anteil an der deutschen Energieversorgung gehabt. Heute tragen sie besonders in der Stromversorgung einen wesentlichen Teil dazu bei, dass sich in Deutschland die Waschmaschinen drehen, das Licht angeht und in den Betrieben die Maschinen laufen. Diese erstaunliche Entwicklung ist das Ergebnis einer Melange aus Ingenieurgeist, Umweltbewusstsein und konsequenter Politik. Deutschland hat seit den 1990er Jahren mit dem Stromeinspeisungsgesetz und seit 2000 mit dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) denjenigen Technikern und Kaufleuten ein Experimentierfeld eröffnet, die getrieben durch ein erwachendes Klimabewusstsein und ihre Ablehnung der Atomenergie eine neue, nachhaltige Energieversorgung entwickeln wollten.

Auch in Meinungsumfragen gibt seitdem eine konstant hohe Mehrheit der Bürger an, dass sie für die Förderung und den Ausbau der Erneuerbaren sind. Und dennoch konnte kaum jemand ahnen, wie schnell die Ideen der Visionäre einmal real werden sollten. Alle Prognosen zum Ausbau der erneuerbaren Energien haben Wind- und Solarkraft übertroufen. Heute investieren auch die Großkonzerne in Branchen, denen sie lange skeptisch gegenüberstanden. 2008 und 2009 wurden in Europa wie auch in den Vereinigten Staaten mehr Kraftwerke auf Basis erneuerbarer Energieträger als Kohle-, Gas- und Kernkraftwerke gebaut.

Dabei ist die Erneuerbare-Energie-Branche mehr als nur irgendein neuer technischer Trend, mit dem sich Geld verdienen lässt. Diese Technologien sind das bisher erfolgreichste Mittel im Kampf gegen den Klimawandel, weil sie Energie bereitstellen, nahezu ohne das Klimagas Kohlendioxid auszustoßen. Sie eröffnen Industriestaaten wie Entwicklungsländern gleichermaßen die Möglichkeit, die benötigte Energie im eigenen Land zu erzeugen und so wertvolle Devisen in die eigene Entwicklung zu investieren – und zwar dauerhaft. Damit verringern sie die Abhängigkeit von den immer knapper werdenden fossilen Rohstoffen, besonders von Öl und Gas. Und entschärfen die Krisen und Kriege rund um die Regionen, in denen sich heute die größten Vorkommen finden.

Erneuerbare Energien sind zumindest in einer betriebswirtschaftlichen Betrachtung und bei Vernachlässigung der sogenannten externen Kosten (siehe Seite 21) häufig noch teurer als Strom und Wärme aus fossilen und nuklearen Rohstoffen.

Doch die Entwicklung der umweltfreundlichen Technologien geht rasant vorwärts und viele der Technologien werden mit jedem Jahr günstiger, während fossile Energieträger knapper – und damit auch teurer werden. Gesamtwirtschaftlich gesehen ist schon heute der Nutzen der erneuerbaren Energien höher als deren Kosten.

Ein „Aber“ lautet: Auch die erneuerbaren Energien haben Auswirkungen auf Natur und Umwelt, sowohl positive als auch negative. Gerade bei der gewünschten Fortsetzung des dynamischen Ausbaus der erneuerbaren Energien sind diese zu berücksichtigen. Dazu gehören Auswirkungen, die sich aus der Installation und dem Betrieb der Anlagen sowie (im Bereich der

Biomasse) zusätzlich aus dem Anbau und der Bereitstellung von Brennstoffen beziehungsweise Substraten ergeben. Da jede Technologie mit spezifischen Auswirkungen auf Natur und Landschaft verbunden ist, werden diese im Abschnitt „Erneuerbare Energien und Naturschutz“ nach Sparten gegliedert betrachtet.

Dabei dürfen Erzeugung und Nutzung erneuerbarer Energien nicht zu Lasten der biologischen Vielfalt gehen. Vielmehr müssen Synergien zwischen Naturschutz und erneuerbaren Energien genutzt werden. Bei der Weiterentwicklung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes 2011 wurde durch entsprechende ökologische Anforderungen und durch Ausgestaltung der Vergütungsstruktur dieser Entwicklung Rechnung getragen. Damit wird das novellierte EEG (2012) als Förderinstrument zu einem Beispiel für ein kohärent ausgerichtetes Vorgehen mit Anreizen für einen umwelt- und naturverträglichen Ausbau der erneuerbaren Energien.

### Erneuerbare Energiequellen

Primärenergiequelle	Erscheinungsform	Natürliche Energieumwandlung	Technische Energieumwandlung	Sekundärenergie
Sonne	Biomasse	Biomasse-Produktion	Heizkraftwerk/Konversionsanlage	Wärme, Strom, Brennstoff
	Wasserkraft	Verdunstung, Niederschlag, Schmelzen	Wasserkraftwerk	Strom
	Windkraft	Atmosphärenbewegung	Windenergieanlage	Strom
		Wellenbewegung	Wellenkraftwerk	Strom
	Solarstrahlung	Meeresströmung	Meeresströmungskraftwerk	Strom
		Erwärmung der Erdoberfläche und Atmosphäre	Wärmepumpen	Wärme
			Meereswärmekraftwerk	Strom
		Solarstrahlung	Photolyse	Brennstoff
			Solarzelle, Photovoltaik-Kraftwerk	Strom
	Kollektor, solarthermisches Kraftwerk	Wärme, Strom		
Mond	Gravitation	Gezeiten	Gezeitenkraftwerk	Strom
Erde	Isotopenzerfall und Restwärme aus Erdentstehung	Geothermik	Heizwerk, Heizkraftwerk	Wärme, Strom

Erneuerbare Energien beziehen ihre Kraft vor allem aus der Sonnenstrahlung, aber auch aus dem Isotopenzerfall und der Restwärme der Erdentstehung im Erdinneren sowie der Gravitationskraft zwischen Erde und Mond.

Eine Energienutzung ist nachhaltig, wenn sie eine ausreichende und dauerhafte Verfügbarkeit von geeigneten Energieressourcen sicherstellt und zugleich die negativen Auswirkungen von Energiebereitstellung, -transport und -nutzung begrenzt.

## Die Nachhaltigkeit unserer Energieversorgung

Der Begriff „nachhaltige Entwicklung“ prägt seit etwa zwei Jahrzehnten die Diskussionen, wenn es um einen schonenden Umgang mit unserer natürlichen Umwelt, um eine gerechtere Verteilung des Wohlstands in der Welt und um eine humane Gestaltung der Lebensgrundlagen für alle Menschen geht. Nachhaltigkeit umfasst somit sowohl ökologische als auch ökonomische und soziale Aspekte, die stets gemeinsam und in ihrer Wechselwirkung betrachtet werden müssen. Eine umfassende Definition von Nachhaltigkeit wurde erstmals von der Brundtland-Kommission

erarbeitet und von der Rio-Konferenz 1992 aufgegriffen:

*„Nachhaltige Entwicklung befriedigt die Bedürfnisse der heutigen Generationen, ohne die Fähigkeiten künftiger Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen und ihre eigenen Lebensstile zu wählen.“*

Für diese nachhaltige Entwicklung spielt Energie eine zentrale Rolle. Die Art ihrer Verfügbarkeit wirkt sich praktisch auf alle Bereiche sozialen, ökonomischen und politischen Handelns aus; der Zustand von Umwelt und Klima wird durch sie beeinflusst, vielfach entscheidet sie über ein friedliches oder konfliktbelastetes Zusammenleben von Völkern. Einer Interpretation des Umweltministeriums zufolge ist „die Energienutzung nur nachhaltig, wenn sie eine ausreichende und dauerhafte Verfügbarkeit von geeigneten Energieressourcen sicherstellt und zugleich die negativen Auswirkungen von Energiebereitstellung, -transport und -nutzung begrenzt“.

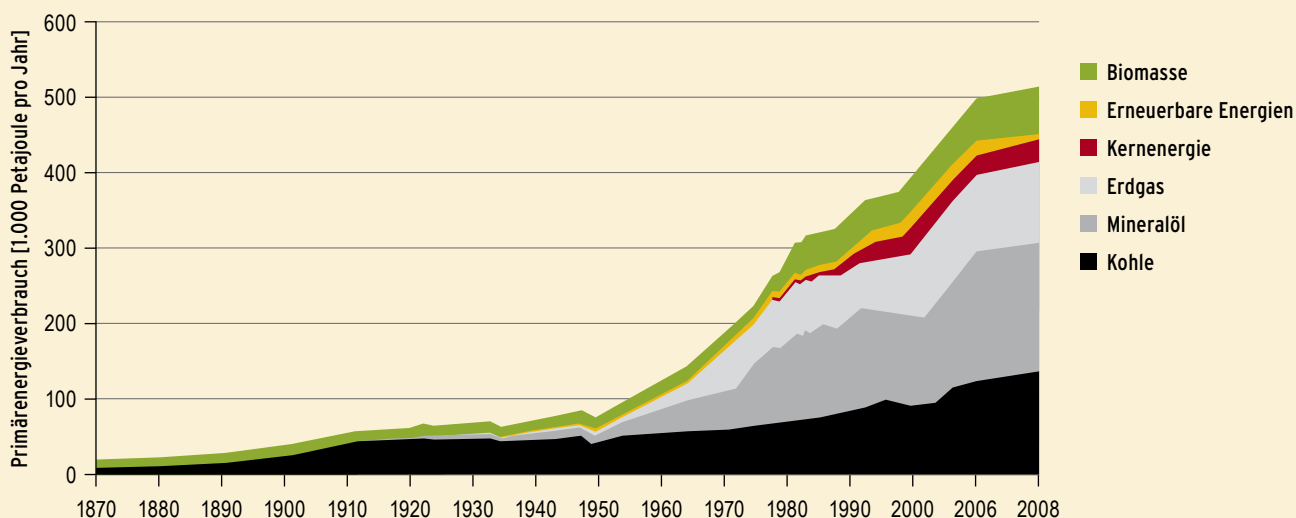
Daraus lassen sich konkrete Leitlinien definieren, die als Orientierung für die im Energiesektor handelnden

### → Leitlinien für eine weltweit nachhaltige Energieversorgung

- **1. Zugang und Verteilungsgerechtigkeit für alle:**  
Alle Menschen sollen vergleichbare Chancen beim Zugang zu Energieressourcen und zu Energiedienstleistungen haben.
- **2. Ressourcenschonung:**  
Wir dürfen die heutigen Energiequellen nicht zu Lasten kommender Generationen ausbeuten.
- **3. Erhalt der biologischen Vielfalt:**  
Die Ausgestaltung der künftigen energetischen Basis darf nicht zu einer Gefährdung der biologischen Vielfalt führen.
- **4. Umwelt-, Klima- und Gesundheitsverträglichkeit:**  
Die Anpassungs- und Regenerationsfähigkeit der Umwelt darf nicht durch energiebedingte Emissionen und Abfälle überfordert werden.
- **5. Soziale Verträglichkeit:**  
Bei der Gestaltung von Energieversorgungssystemen sollen alle Betroffenen teilhaben.
- **6. Risikoarmut und Fehlertoleranz:**  
Die Risiken der Energiebereitstellung und -nutzung müssen gering gehalten werden.
- **7. Umfassende Wirtschaftlichkeit:**  
Energie soll für den Einzelnen und gesamtwirtschaftlich bezahlbar bleiben.
- **8. Bedarfsgerechte Nutzungsmöglichkeit und dauerhafte Versorgungssicherheit:**  
Die Energieversorgung soll auf so vielen verschiedenen Säulen beruhen, dass sie flexibel auf die Bedürfnisse der Gesellschaft zugeschnitten ist und auf mögliche Krisen reagieren kann.
- **9. Internationale Kooperation:**  
Die Energieversorgung soll sich so entwickeln, dass Ressourcenkonflikte mit anderen Staaten gelöst werden und eine friedliche Kooperation durch gemeinsame Nutzung der jeweiligen Fähigkeiten und Potenziale gefördert wird.



## Entwicklung des Primärenergieverbrauchs weltweit



Entwicklung des weltweiten Primärenergieverbrauchs zwischen 1870 und 2008 sowie seiner Deckung nach Energiequellen einschließlich der nichtkommerziellen Nutzung von Biomasse (Brennholz)

Quellen: IEA World Energy Outlook 2010

**In nur wenigen hundert Jahren verbraucht die Menschheit in Jahrmillionen entstandene, wertvolle Rohstoffe und belastet zudem mit ihren Rückständen die Umwelt.**

Akteure und für die Entwicklung energiepolitischer Handlungsstrategien dienen können (siehe Kasten).

Diese Leitlinien sind als Mindestanforderungen einer nachhaltigen Entwicklung zu verstehen. Andere für die weitere Entwicklung von Gesellschaften und Staaten wesentliche Aktivitäten, wie die Vermehrung von Wohlstand oder von Freizügigkeit, sollten sich deshalb nur in einem Maß entfalten, das die Mindestanforderungen der Nachhaltigkeit nicht gefährdet.

Misst man nämlich die heutige Energieversorgung an den Mindestanforderungen einer nachhaltigen Entwicklung, so lassen sich wesentliche Defizite erkennen:

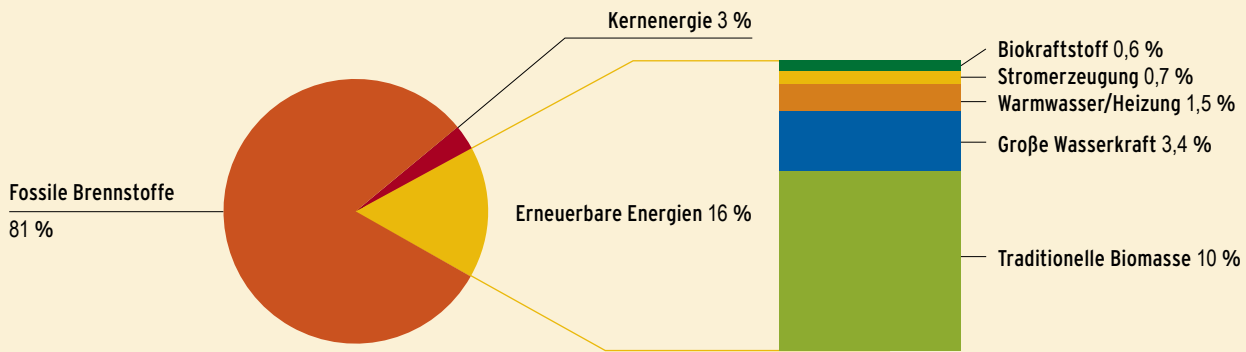
- der übermäßige Verbrauch begrenzter Ressourcen
- die sich abzeichnende globale Klimaveränderung
- das extrem starke Gefälle des Energieverbrauchs zwischen Industrie- und Entwicklungsländern
- die Risiken der Atomenergienutzung.

## Fossile Energien – der Motor der heutigen Weltwirtschaft

Seit Beginn der Industrialisierung wächst der globale Energieverbrauch deutlich rascher als die Anzahl der Menschen. Während die Weltbevölkerung seit 1870 bis heute um das Vierfache auf rund 7 Milliarden Menschen stieg (2011), wuchs der weltweite Energieverbrauch und damit der Verbrauch fossiler Ressourcen wie Kohle, Mineralöl und Erdgas um das Sechzigfache auf rund 509.000 Petajoule (PJ) im Jahr 2009. Ein Mensch verbraucht heute im Durchschnitt 16-mal mehr Energie als vor 130 Jahren (Grafik „Entwicklung des Primärenergieverbrauchs“), die Bürger der Industriestaaten noch wesentlich mehr. Historische Einschnitte, wie die beiden Weltkriege, die Ölpreiskrisen oder der gravierende Rückgang der Industrieproduktion in den Staaten der früheren Sowjetunion, haben diesen Wachstumstrend nur kurz unterbrochen.

Bezogen auf den globalen Endenergieverbrauch stellen erneuerbare Energien mittlerweile 16 Prozent (2009) bereit, davon zehn Prozentpunkte in Form des traditionellen Einsatzes von Biomasse als Brennholznutzung in zahlreichen wenig entwickelten Ländern. Die übrigen erneuerbaren Energien, allen voran die Wasserkraft, haben zusammen einen Anteil von rund sechs Prozentpunkten. Das ist mehr als Atomenergie, die nur drei Prozent des Endenergiebedarfs deckt. Aber immer noch basieren fast 80 Prozent der Weltenergieversorgung auf fossilen Energieträgern, bei der kommerziellen Nutzung sogar fast 90 Prozent.

### Anteil erneuerbarer Energien am globalen Endenergiebedarf 2009



Der globale Anteil erneuerbarer Energien liegt derzeit bei rund 16 %.

Quelle: REN 21, 2011

Über Hunderte von Jahrtausenden Photosynthese waren notwendig, um die energiereichen Kohlenstoffverbindungen aufzubauen, die in Kohle, Öl und Gas stecken. In nur wenigen Hundert Jahren wird die Menschheit diese wertvollen Rohstoffe verbraucht haben und mit den Rückständen daraus die Umwelt belasten. Sowohl die weltweite als auch die deutsche Energieversorgung stützen sich überwiegend auf die endlichen fossilen Energieträger Kohle, Mineralöl und Erdgas. Es ist klar, dass selbst bei einem sehr raschen Umsteuern in der Energieversorgung fossile Energien noch Jahrzehnte eingesetzt werden. Damit gewinnt die Frage nach den noch verfügbaren Ressourcen und den Reichweiten dieser Energieträger eine zentrale Bedeutung.

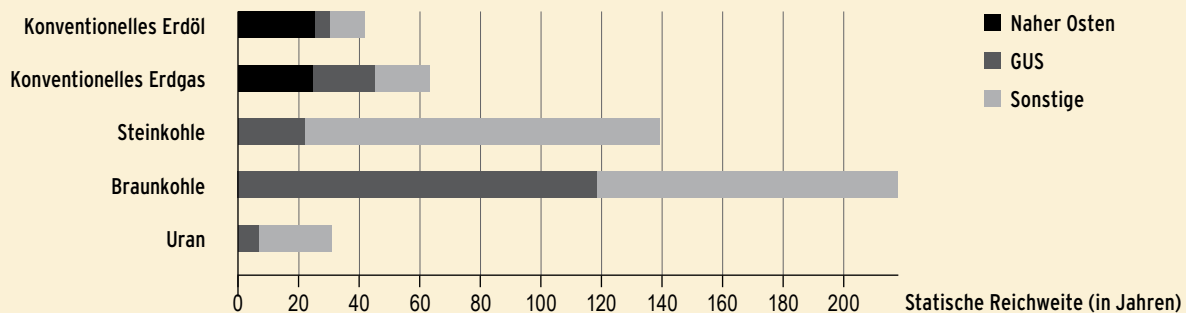
Bei den Reserven handelt es sich um jene Energiemengen, die sicher nachgewiesen und mit den heutigen technischen Möglichkeiten wirtschaftlich abbaubar sind; Ressourcen sind dagegen Mengen, die entweder geologisch nachgewiesen, aber derzeit

nicht wirtschaftlich förderbar sind, oder Mengen, die nicht nachgewiesen sind, jedoch aus geologischen Gründen in dem betreffenden Gebiet erwartet werden können.

Die noch vorhandenen Reserven an fossilen Energien betragen knapp 38 Millionen Petajoule (Stand 2007), was etwa dem 80-Fachen des derzeitigen jährlichen Weltenergieverbrauchs entspricht (Grafik „Reichweiten der Energiereserven“), aber lediglich das 2,2-Fache der bereits insgesamt verbrauchten Menge an fossilen Energien. Kohle macht gut die Hälfte dieser Reserven aus.

Konventionelles Erdöl ist im Verhältnis zu anderen fossilen Energieträgern bereits am stärksten ausgebeutet. Vergleicht man dies mit der großen gegenwärtigen Bedeutung des Erdöls mit einem Anteil von 38 Prozent an der globalen Energieversorgung, wird klar, dass hier in absehbarer Zeit auch auf die nicht konventionellen Ölreserven (Schweröl, Ölschiefer,

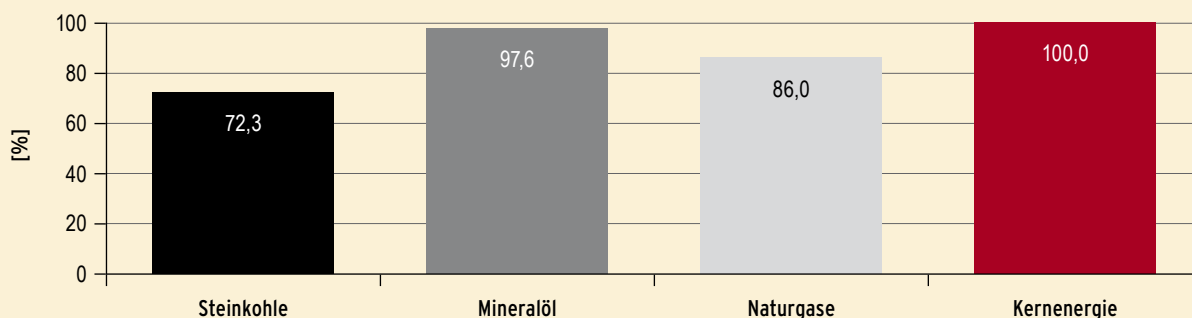
### Reichweiten der Energiereserven



Statische Reichweite weltweiter Energiereserven (bei unverändertem Verbrauchsniveau)

Quelle: BGR 2007

## Importabhängigkeit Deutschlands



Anteil importierter Energierohstoffe an der deutschen Energieversorgung 2009

Quelle: BMWi 2011

### → Die sicherheitspolitische Bedeutung erneuerbarer Energien

Auf der ganzen Welt decken heute noch fossile Energieträger wie Kohle, Öl und Gas überwiegend unseren Energiebedarf. Die Globalisierung und der wachsende Energiehunger der großen Schwellenländer verstärkt den Druck auf die knapper werdenden Energieressourcen und erhöht damit zugleich das Konfliktpotenzial auf internationaler Ebene: Die Abhängigkeit der energieverbrauchenden von den Energierohstoffe liefernden Staaten steigt ständig. Zentralisierte Versorgungsstrukturen wie Häfen und Pipelines bieten eine Angriffsfläche für terroristische Anschläge. Ein Großteil unserer Energieversorgung stammt zugleich aus den politisch fragilen Regionen im Nahen und Mittleren Osten, im Kaukasus und in Zentralasien.

Viele unterentwickelte Länder leiden noch heute unter Energiearmut: Der daraus resultierende Mangel an Grundversorgung und die Ungerechtigkeiten in der Versorgung mit Energie schaffen zudem weitere Konfliktpotenziale auf lokaler und globaler Ebene.

Erneuerbare anstelle fossiler Energieträger lösen eine ökologische Transformation unseres bestehenden Energiesystems aus und verringern bestehende Abhängigkeiten. Insbesondere Entwicklungsländer könnten ihre knappen Dollarreserven für eigene Entwicklungsprojekte nutzen. Dieser Wandel kann einen wesentlichen friedenspolitischen Beitrag zu einer verstärkten globalen Energiesicherheit leisten.

Durch ihre Dezentralität können die erneuerbaren Energieträger einen Beitrag zu einer gerechteren Verteilung der Wertschöpfung aus der Energiebereitstellung erreichen. Das gilt insbesondere für manche Länder wie Angola, die stark vom Ölexport abhängig sind. Die Profite dieses Exportes gehen dabei oft nur an kleine Eliten, die auch die Streitkräfte einsetzen, um ihre Privilegien zu schützen („Ressourcenfluch“). Außerdem ermöglichen erneuerbare Energien gerade in länd-

lichen Regionen den Zugang zu einer modernen Infrastruktur – Beleuchtung, Kommunikation, medizinische Versorgung.

Eine Versorgung unter Einsatz erneuerbarer Energien bedeutet daher eine Senkung der Importabhängigkeit: In Deutschland liegt der Anteil importierter Energieträger insgesamt bei über siebzig Prozent, wenn man die oft ignorierte Einfuhr von Kernbrennstoffen nicht außer Acht lässt (siehe Grafik „Importabhängigkeit“).

Der Ausbau der erneuerbaren Energien kann auch einen Beitrag zu einer verbesserten inneren Sicherheit leisten: Die Diskussion um die Sicherheit von Atomkraftwerken nach Fukushima und die Absicherung gegenüber terroristischen Anschlägen seit dem 11. September 2001 zeigt die Vorteile einer Abschaffung solcher Risikotechnologien. Setzt man erneuerbare Energien ein, so werden die Energieproduktionsstätten dezentralisiert. Diese Veränderung der Versorgungsstrukturen reduziert die nationale Verwundbarkeit.

Friedensimpulse können auch durch die grenzüberschreitende Kooperation bei der Entwicklung der erneuerbaren Energien mobilisiert werden, zum Beispiel beim gemeinsamen Bau von Wasserkraftwerken oder Solarkraftwerken, wie es aktuell im Rahmen des Solarplans für die Mittelmeerregion (Seite 56) diskutiert wird.

Flankierend ist bei der Entwicklung erneuerbarer Energien sicherzustellen, dass negative Folgeschäden vermieden werden, wie etwa bei der Palmölnutzung in Indonesien oder Malaysia durch Konkurrenz des Bioenergiehandels mit dem Recht indigener Völker oder beim Anbau von Zuckerrohr, Soja und Mais zu Lasten des Anbaus von Nahrungsmitteln in vielen lateinamerikanischen Ländern (siehe Kapitel „Biotreibstoffe“). Dies gilt auch beim Bau von Wasserkraftwerken.

## Sicherheitspolitische Bedeutung erneuerbarer Energien



Quelle: IFEU nach Wuppertal Institut & Adelphi Consult

Ölsande) und auf die teureren Ressourcen zurückgegriffen werden muss, wenn die weiterhin steigende Nachfrage auch in Zukunft gedeckt werden soll. Große Ressourcen, also bisher nicht wirtschaftlich erschließbare Vorkommen in Höhe von 255 Millionen Petajoule, werden noch bei der Kohle vermutet.

Die sich abzeichnenden Verknappungstendenzen der Reserven von Öl und Erdgas spiegeln sich auch in den „statischen Reichweiten“ dieser Energien wider (siehe Grafik „Statische Reichweiten“). Darunter ist die Zeitdauer zu verstehen, in der die Reserven bei ihrem gegenwärtigen Verbrauch vollständig erschöpft sein werden. Konventionelles Erdöl hat mit 42 Jahren die geringste Reichweite, bezieht man unkonventionelles Erdöl mit ein – also Schweröle, Ölsand und Ölschiefer – so liegt dieser Wert bei 58 Jahren. Erdgas reicht bei gleichbleibendem Verbrauch noch etwa 63 Jahre, während uns die Reserven von Kohle deutlich länger zur Verfügung stehen. Uran, eine weitere endliche Energiequelle, reicht bei einer Nutzung in Leichtwasserreaktoren und ohne Aufbereitung der Kernbrennstoffe nur etwa 30 Jahre. Zunächst mögen diese Zeiträume wenig besorgniserregend erschei-

nen. Eine solche Betrachtung lässt aber dreierlei außer Acht:

- Mit steigenden Preisen und in der Folge mit wirtschaftlichen Verwerfungen ist schon weit vor dem Versiegen der fossilen Energievorräte zu rechnen, nämlich ab dem Zeitpunkt, an dem die Förderung die Nachfrage auf Dauer nicht mehr decken kann. Beim Erdöl wird das Maximum der Ölförderung („Peak oil“) bald überschritten sein; der „mid-depletion point“, bei dem die Hälfte der Erdölvorräte verbraucht ist, dürfte bei gleichbleibender oder steigender Förderung in den nächsten fünf bis 20 Jahren erreicht sein. Spätestens dann dürften deutliche Preissteigerungen beim Rohöl auftreten. Erdgas allein kann die Deckungslücke nicht übernehmen und die Reserven an unkonventionellem Öl sind allemal teurer und deutlich umwelt- und klimaschädlicher. Wenn die Menschheit dagegen heute beginnt, den Verbrauch endlicher Energieträger zu mindern, so schützen wir uns vor den Gefahren zukünftiger, möglicherweise ähnlich drastischer Preissprünge, wie sie in den siebziger Jahren und Ende 2008 bei Erdöl zu beobachten waren.

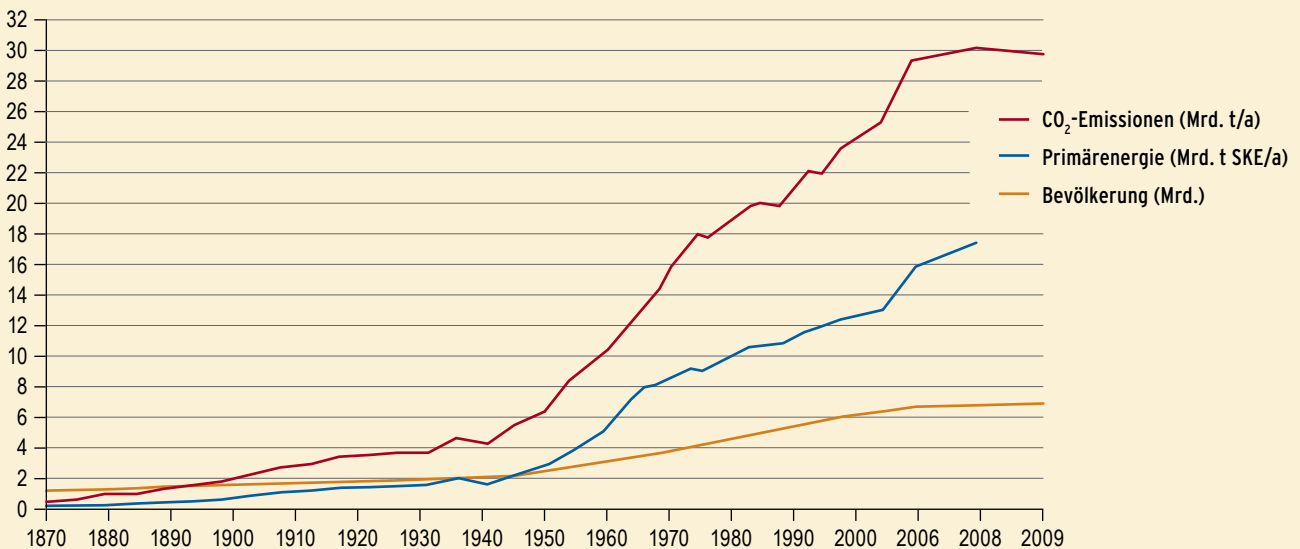
- Die Reserven an Erdöl und Erdgas sind zudem sehr ungleichmäßig über den Globus verteilt. Über 70 Prozent der Erdölreserven und über 65 Prozent der Erdgasreserven befinden sich innerhalb einer „strategischen Ellipse“ von Ländern, die von Saudi-Arabien im Süden über Irak und Iran bis nach Russland reicht. Nimmt man beide Tatsachen zusammen, so wird klar, welche brisante Versorgungssituation in absehbarer Zeit auf den „energiehungrigen Westen“ zukommen kann. Der gesicherte Zugang zu preisgünstigen Energieresourcen ist für die Industrieländer schon heute von so großer Bedeutung, dass er zur Entstehung und Vertiefung einer Vielzahl politisch oder sogar militärisch ausgetragener Konflikte beiträgt.
- Auch die intergenerative Gerechtigkeit (die gerechte Verteilung der Ressourcen zwischen heutigen und zukünftigen Generationen) wird ignoriert. Selbst wenn heutige Generationen zu dem Schluss kommen sollten, dass trotz der Ausbeutung der Reserven fossiler und nuklearer Energieträger zukünftigen Generationen eine angemessene Handlungsbasis erhalten bleibt, so muss angesichts der langen Entwicklungs- und Einführungszeiträume von neuen Energietechnologien die Mindestforderung lauten: Die Heutigen müssen mit der Einführung neuer Technologien beginnen, die nicht mehr auf den Einsatz fossiler oder nuklearer Brennstoffe angewiesen sind, und die Umstellung des Energiesystems voranbringen.

## Das Klima gerät aus dem Gleichgewicht

Es ist aber nicht nur die Erschöpfung der fossilen Ressourcen, die ein Umdenken über den Umgang mit Energie erzwingt. Auch die vielfach erschöpfte Aufnahmefähigkeit unserer Umwelt für die Abfallprodukte der Energienutzung macht ein Umlenken notwendig. Dies gilt insbesondere für jene Abfälle, die in die Atmosphäre entlassen werden. Bei der Verbrennung von fossilen Energieträgern entstehen Luftschadstoffe wie Schwefeldioxid und Stickoxide, die zur Bildung des sauren Regens beitragen. Findet die Verbrennung nicht vollständig statt, werden Kohlenmonoxide, unverbrannte Kohlenwasserstoffe und Rußpartikel emittiert; bei festen Brennstoffen können darüber hinaus erhebliche Mengen an Staub auftreten. Diese und noch eine Vielzahl anderer Emissionen schädigen nicht nur die Umwelt, sondern sind für den Menschen auch direkt gesundheitsschädigend.

Neben diesen klassischen Luftschadstoffen wird bei der Verbrennung von kohlenstoffhaltigen Energieträgern immer auch Kohlendioxid freigesetzt. Dieses Gas ist zwar für Organismen nicht giftig, es verstärkt aber den Treibhauseffekt und führt damit zu einer Erhöhung der globalen Temperaturen. Seit Beginn der Industrialisierung ist die Kohlendioxid-Konzentration in der Atmosphäre um ein Viertel angestiegen und hat eine Erhöhung der mittleren bodennahen

### Entwicklung der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen



Entwicklung der globalen energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen seit 1870 und ihre Hauptursachen: Bevölkerungszuwachs und Verbrennung von Kohle, Mineralöl und Erdgas (1 Gt SKE [Steinkohleeinheiten] entspricht 29,3 EJ)

Quelle: IEA 2010

**Um den globalen Temperaturanstieg zu begrenzen, müssen Industrieländer bis zur Mitte des Jahrhunderts die CO<sub>2</sub>-Emission um 80 bis 95 Prozent senken.**

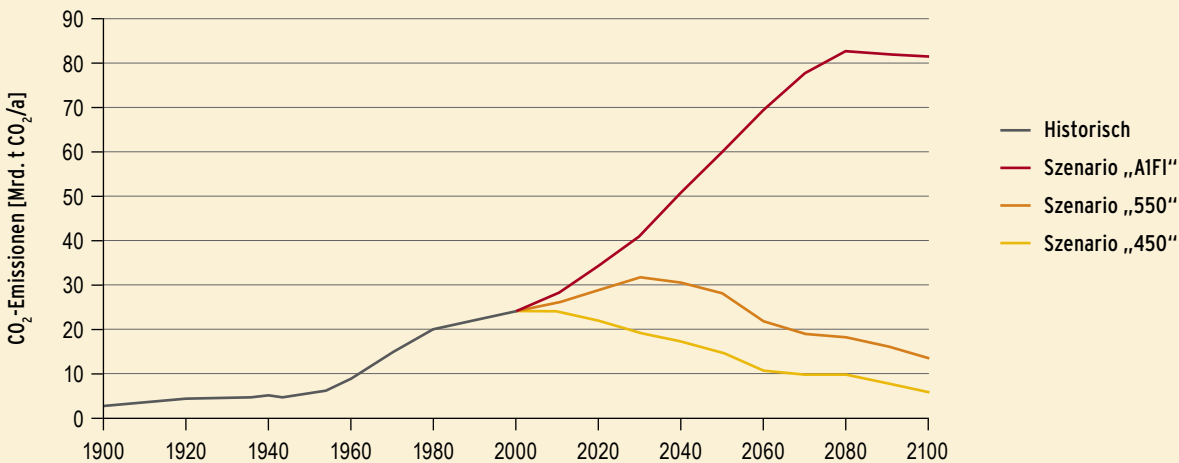
Lufttemperatur von 0,6 ± 0,2 °C bewirkt. Werden keine deutlichen Gegenmaßnahmen zur Reduktion dieser und anderer klimarelevanter Emissionen ergriffen, so wird nach Szenarien des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) mit einem weiteren Anstieg der mittleren globalen bodennahen Lufttemperatur zwischen 1,1 °C und 6,4 °C bis zum Jahr 2100 gerechnet, wobei regional die Änderungen durchaus unterschiedlich stark ausfallen können. Neben der Temperaturerhöhung sind in deutlich stärkerem Maße als bisher Änderungen der Niederschlagsverteilung, ein Anstieg extremer Wettersituationen wie Stürme und Starkregen, eine Verschiebung von Klima- und Vegetationszonen und die Verschlechterung der Böden mit fatalen Folgen für die ohnehin angespannte Welternährungssituation zu erwarten. Klimaänderungen haben in der Erdgeschichte häufig stattgefunden. Bedrohlich an den heute zu beobachtenden Veränderungen ist, dass die Änderungen mit

hoher Geschwindigkeit auftreten und weder den menschlichen Zivilisationen noch der Umwelt einen ausreichenden Zeitraum zur Anpassung lassen (zum Beispiel die Umsiedlung der Menschen aus Küstengebieten wie Dithmarschen in Schleswig-Holstein oder aus Teilen Bangladeschs).

Energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen tragen global etwa zur Hälfte zum menschlich verursachten Treibhauseffekt bei. Daher stehen sie im Mittelpunkt der Bemühungen um den Klimaschutz. Der Anstieg dieser energiebedingten globalen Kohlendioxidemissionen im Gefolge des wachsenden Weltenergieverbrauchs, die 2007 rund 30 Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub> erreicht haben, hat dazu geführt, dass seit Beginn der Industrialisierung insgesamt zusätzliche 1000 Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre emittiert wurden, davon allein 80 Prozent in den letzten 50 Jahren. Durch die Wirtschaftskrise sind die Emissionen im Jahr 2009 leicht auf 29,7 Milliarden Tonnen gefallen.

Da das Wachstum vornehmlich in den Industrieländern stattfand, sind diese für rund 90 Prozent der bis heute durch den Energieeinsatz entstandenen CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich. Deutschland hat 2010 827 Millionen Tonnen Kohlendioxid emittiert, das sind rund 3 Prozent der weltweiten Emissionen. 2009

### Szenarien der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen



Szenario:	Historisch	„A1FI“	„550“	„450“
Kumulierte CO <sub>2</sub> (Gt C):	300	2.200	1.000	700
CO <sub>2</sub> -Konzentration 2100 (ppm):	(360)	950	550	450
mittlerer Temperaturanstieg (°C):	0,4–0,8	4,5–5,0	2,5–3,0	1,5–2,0

Entwicklung der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen in verschiedenen IPCC-Szenarien im Vergleich zum historischen Verlauf und ihre Auswirkungen auf CO<sub>2</sub>-Konzentration und Temperatur in der Atmosphäre („A1FI“: Wachstumsszenario mit Deckung durch weitgehend fossile Energien; „450“ und „550“: jeweilige Mittelwerte von Szenarien, die zu einer stabilen Konzentration von CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre führen)

Quelle: IPCC 2002 und 2007



waren es wegen der Wirtschaftskrise 789 Millionen Tonnen. Jeder Bewohner Deutschlands ist damit für den Ausstoß von rund 10 Tonnen Kohlendioxid pro Jahr verantwortlich. Ein US-Amerikaner bläst pro Jahr 20 Tonnen in die Luft, ein Chinese 4,6 Tonnen und ein Inder eine Tonne. Die große Verantwortung der Industrieländer für den Treibhauseffekt wird hierdurch besonders deutlich. Allerdings steigen gerade in den Schwellenländern Energieverbrauch und Treibhausgas-Emissionen rasant.

Die globale Klimaerwärmung infolge der Verbrennung fossiler Energieträger, des Raubbaus an Wäldern und einer industriell betriebenen Landwirtschaft mit ihren Emissionen des klimawirksamen Lachgases ist heute eine gesicherte Realität. Um eine Erwärmung von mehr als 2 Grad zu vermeiden, sollte die Konzentration von CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre, die derzeit (2009) bei 387 tausendstel Promille (auch „parts per million“, ppm) liegt, bis zum Ende dieses Jahrhunderts auf deutlich unter 450 ppm begrenzt werden (Grafik „Szenarien der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen“). Will man dies erreichen, so ist eine weltweite Reduktion der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen um mehr als die Hälfte bis zum Jahr 2100 unerlässlich. Berücksichtigt man die weiter wachsende Bevölkerung, so darf jeder der dann voraussichtlich zehn Milliarden Erdenbürger durchschnittlich nur noch wenig mehr als eine Tonne CO<sub>2</sub> emittieren – etwa so viel wie ein Inder heute. Daraus abgeleitet ergibt sich für Deutschland das längerfristige Ziel, eine Senkung der

nationalen CO<sub>2</sub>-Emissionen auf höchstens ein Fünftel der Emissionen des Jahres 1990 zu erreichen.

Im Gegensatz zu den klassischen Luftschadstoffen haben die negativen Wirkungen des Kohlendioxids globalen Charakter, sie machen sich nicht sofort, sondern schleichend und regional sehr unterschiedlich bemerkbar. Eine Verminderung der Emissionen führt nicht direkt zu lokalen Vorteilen für die dortigen Energieverbraucher. Erst wenn weltweit Maßnahmen ergriffen werden, können die CO<sub>2</sub>-Emissionen in dem notwendigen Ausmaß reduziert werden. Einzelne Staaten oder Staatengruppen müssen allerdings eine wichtige Vorreiterrolle übernehmen.

Angesichts der weitreichenden Gefahren des Treibhauseffektes ist der Klimaschutz eine ganz zentrale Begründung für eine nachhaltige Energiewirtschaft. Selbstverständlich dürfen bei allen Anstrengungen zum Klimaschutz andere Ziele nicht aus den Augen geraten: die Sicherung einer ökonomisch und sozial verträglichen Energieversorgung, aber auch weitere umweltrelevante Ziele, wie die weitere Minderung anderer Schadstoffe; der Stopp der großflächigen Landschaftszerstörung bei der Förderung von Kohle, Erdöl und Uran; die Meeresverschmutzung durch Erdölförderung und bei Tankerhavarien; vermehrte Umweltbelastungen durch den Abbau unkonventioneller Kohlenwasserstoffe sowie die teilweise gravierenden Folgen großer Wasserkraftwerke, insbesondere wenn mit ihrer Errichtung die Überflutung großer Landschaften verbunden ist.

18 Prozent der Weltbevölkerung in den OECD-Ländern verfügen über 81 Prozent des weltweiten Bruttosozialprodukts und sind für mehr als die Hälfte des weltweiten Primärenergieverbrauchs und der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich.

## Atomenergie – Risiken größer als der Nutzen

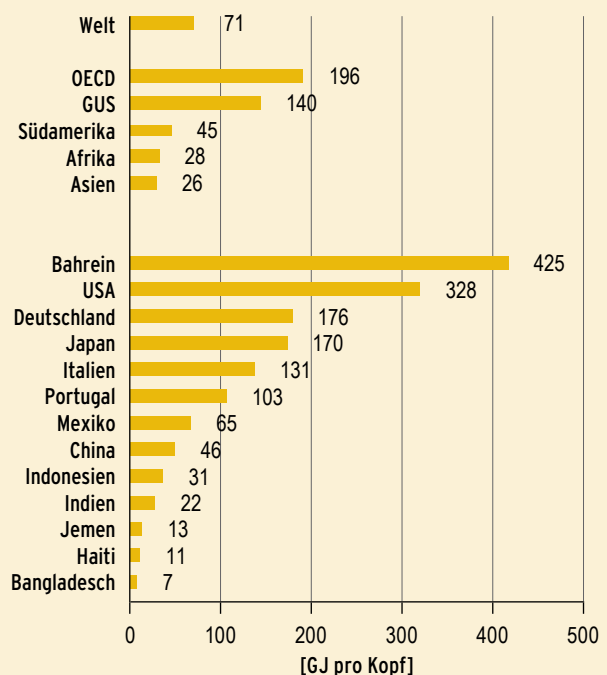
Da mit der Kernspaltung Strom CO<sub>2</sub>-arm bereitgestellt werden kann, wird Atomenergie – und in ihrem Gefolge oft auch die Kernfusion – häufig als unverzichtbar zur Erreichung der angestrebten CO<sub>2</sub>-Reduktionsziele bezeichnet. Diese These ist jedoch bei genauer Betrachtung nicht haltbar: Nur eine lang anhaltende Vermeidung sehr großer Mengen Kohlendioxid macht unter Klimaschutzgesichtspunkten Sinn. Dazu müsste der Beitrag der Atomenergie zur globalen Energieversorgung um mehr als das Zehnfache gesteigert und über Jahrhunderte aufrechterhalten werden. Abgesehen von der Zunahme des Risikos mit jedem neuen Atomkraftwerk kann dies die Atomenergie schon aus Ressourcengründen nicht leisten. Preiswertes Uran für Leichtwasserreaktoren reicht bereits bei heutiger Nutzung für nur ungefähr 30 Jahre.

Der Unfall in Fukushima hat gezeigt: In Atomreaktoren können Kernschmelzunfälle mit unvermeidbar hohen Gefahren für die menschliche Gesundheit und extremen Folgeschäden nicht ausgeschlossen werden. Zudem ist ein völliger Schutz von Atomenergieanlagen gegen äußere Gewaltanwendungen und Sabotage nicht möglich.

Hinzukommen die nach wie vor ungelöste Endlagerfrage und der Missbrauch von Plutonium als Abfallprodukt der Kernspaltung.

Die Bundesregierung hat infolge der nuklearen Katastrophe in Japan die Restrisiken der Kernenergie neu bewertet und entschieden, das letzte deutsche Kernkraftwerk bis spätestens Ende 2022 vom Netz zu nehmen. Mit einer entsprechenden Änderung des Atomgesetzes wird der Atomausstieg klar und rechtsverbindlich festgelegt. Erneuerbare Energien bieten uns eine langfristige und robuste Alternative.

## Energieverbrauch pro Kopf



Energieverbrauch pro Kopf im internationalen Vergleich

Quelle: UN 2007

## Energieverschwender und Energiehabeichtse – ein brisanter Zustand

Ein weiteres gravierendes Nachhaltigkeitsdefizit besteht in dem sehr starken Gefälle des Energieverbrauchs zwischen Industrie- und Entwicklungsländern, das sich in den letzten Jahren eher vergrößert als verringert hat. Derzeit verfügen die 18 Prozent der Weltbevölkerung in den OECD-Ländern über 81 Prozent des weltweiten Bruttosozialprodukts und sind für mehr als die Hälfte des weltweiten Primärenergieverbrauchs und der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich. So verbraucht im Durchschnitt ein Bürger der USA nahezu zwölfmal mehr Energie pro Kopf als ein Afrikaner und liegt damit um fast das Fünffache über dem globalen Durchschnitt. Die ärmsten Länder wie Jemen, Haiti oder Bangladesch müssen dagegen mit einem Dreißigstel der Energie eines Nordamerikaners auskommen. Die Europäer und Japaner verbrauchen etwa halb so viel Energie pro Kopf wie die Nordamerikaner und zeigen damit, dass hoher Energieverbrauch nur in Grenzen etwas mit Wohlstand zu tun hat. Trotzdem liegen sie mit rund 175 GJ pro Kopf und Jahr (entsprechend dem Energiegehalt von 6 Tonnen Steinkohle) noch um das Zweieinhalbfache über dem Weltdurchschnitt.



Geradezu gegensätzlich zum Energieverbrauch sind die Folgen dieses Konsums verteilt. Modellrechnungen zeigen, dass die voraussichtlich am stärksten von den Folgen möglicher Klimaänderungen betroffenen Regionen solche sein werden, die am wenigsten zu ihrer Verursachung beigetragen haben und die diesen Folgen am wenigsten mit technischen und finanziellen Mitteln entgegenwirken können. Das verschärft die sozialen und wirtschaftlichen Konflikte weiter.

Ein auch nur tendenzieller Ausgleich der gravierenden Unterschiede im Energieeinsatz, der wegen der Forderung nach sozialer Nachhaltigkeit unbedingt notwendig ist, führt in Verbindung mit dem Anwachsen der Weltbevölkerung auf neun bis zehn Milliarden Menschen bis 2050 unvermeidlich zu einem weiteren Wachstum der globalen Energienachfrage. Da Art und Höhe der Energieversorgung in den Industrieländern wegen des hier erreichten Wohlstandes ärmeren Ländern oftmals als Vorbild dient, bewegt sich derzeit die Entwicklung in diesen Staaten in die gleiche ressourcenverzehrende Richtung, wie wir sie lange Zeit eingeschlagen haben. Die schon bestehenden Nachhaltigkeitsdefizite vergrößern sich damit weiter. Nur wenn die westlichen Gesellschaften vorbildhaft zeigen, dass ein Leben in Wohlstand auch ohne hohen CO<sub>2</sub>-Ausstoß möglich ist, besteht eine Chance, die aus Klimaschutzgründen problematischen fossilen Energieträger zurückzudrängen und

den Anstieg des globalen Energieverbrauchs zu bremsen. Studien zeigen, dass sowohl in Deutschland als auch global ein solcher Weg gegangen werden kann.

## Wege zu einer nachhaltigen Energiewirtschaft

Eine völlig objektive Abwägung zwischen den Gefahren des Klimawandels, den zu erwartenden Verknappungs- und Verteuerungstendenzen der fossilen Rohstoffe, den unterschiedlichen Meinungen zu den Risiken der Atomenergie und den volkswirtschaftlichen und sozialen Schäden, die durch den extrem unausgewogenen Zugang zu Energie entstehen, erscheint aus heutiger Sicht nicht möglich. Aus den vorliegenden Erkenntnissen können jedoch prinzipielle Schlüsse gezogen werden: Die zukünftige Energieversorgung darf sich nicht weiterhin beinahe ausschließlich auf fossile und auf nukleare Energieträger stützen. Vielmehr muss ein System etabliert werden, das den acht Leitlinien einer nachhaltigen Energieversorgung möglichst nahe kommt (siehe Seite 8) und eine stetige und zügige Annäherung an sie erlaubt. Für eine Umgestaltung der Energieversorgung in diese Richtung gibt es drei zentrale Strategieelemente, die in der Nachhaltigkeitsdiskussion mit **Effizienz**, **Konsistenz** und **Suffizienz** bezeichnet werden (siehe Kasten).

### → Zentrale Strategieelemente einer nachhaltigen Energiewirtschaft

#### → Effizienz:

Gewünschte Energiedienstleistungen sind beispielsweise ein angenehmes Raumklima, warmes Wasser, ein beleuchteter Raum, funktionsfähige Maschinen oder die Möglichkeit der Fortbewegung von A nach B. Vom Energierohstoff zur Dienstleistung durchlaufen die Energieträger mit Verlusten behaftete Wandlungsschritte. Diese Verluste können nach heutiger Erkenntnis mit intelligenter Technik und gutem Energiemanagement noch erheblich reduziert werden. Neben einer wesentlich rationelleren Energiewandlung und -verwendung in allen Aggregaten und Geräten gehören auch die Vermeidung von Energieeinsatz (wie durch eine starke Verminderung von Raumheizung durch sehr gute Wärmedämmung) und der Ersatz von hochwertigen durch weniger „wertvolle“ Energieträger dazu.

#### → Konsistenz:

Hier geht es im Wesentlichen um die Substitution des mit den Nachhaltigkeitszielen unverträglichen Verbrauchs fossiler Energierohstoffe zugunsten der Nutzung der vorhandenen natürlichen, durch Sonnenenergie, Gravitation und Erdwärme angetriebenen Energiekreisläufe und um die Vermeidung des Aufbaus anderer risikoreicher Energiesysteme.

#### → Suffizienz:

Die Höhe des Energieeinsatzes hängt auch von Lebensstilen und Konsumgewohnheiten ab. Ändern sich menschliche Aktivitäten und Bedürfnisse, etwa im Freizeitverhalten, so kann dies erheblichen Einfluss auf den resultierenden Energieverbrauch haben. Die Skala des eigenverantwortlichen Handelns ist dabei sehr groß, sie kann von bewusstem Verzicht auf energieintensive Produkte, Fleischkonsum oder übertriebene Mobilität bis zur klugen Auswahl von Nahrungsmitteln oder Verkehrsmitteln reichen. Aus der Erkenntnis, dass die Gewohnheit des „Immer-weiter-immer-schneller-immer-mehr“ auf Dauer nicht nachhaltig ist, könnte in den Industrieländern ein Wertewandel einsetzen, der ein „Lieber-besser-leben-als-mehr-haben“ zum Ziel hat.

**Erneuerbare Energien sind verlässliche Garanten für eine zukunftsfähige Energieversorgung.**

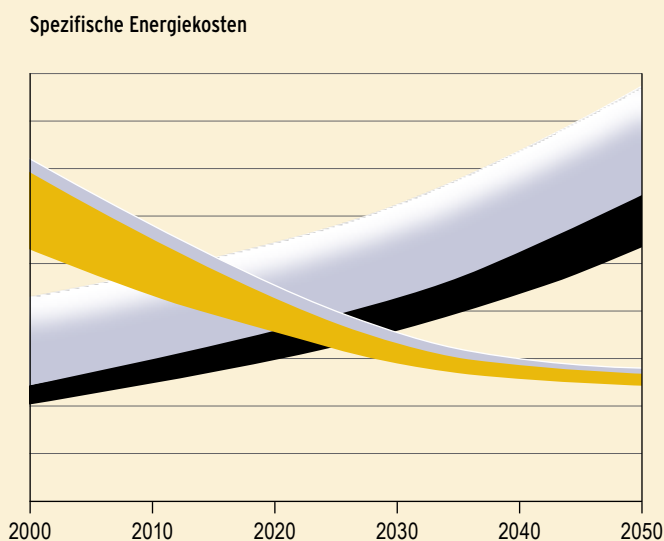
Keine dieser drei Strategien kann für sich allein in Anspruch nehmen, der erfolgversprechendste Weg zu sein. Vielmehr ergänzen sie sich und führen erst in einer engen Wechselwirkung zum Ziel. Ein deutlich verminderter Energieverbrauch ist eine wesentliche Voraussetzung, damit erneuerbare Energien rasch genug hohe Anteile des Energiebedarfs decken können. Und ohne gleichzeitig energiebewusster zu leben, kann sich kein Erfolg durch den Einsatz effizienter Technologien einstellen. Auf der anderen Seite wird es mit jeder eingesparten Einheit Energie schwieriger, den Energiebedarf weiter einzuschränken. Eine Null-Energie-Gesellschaft ist nicht vorstellbar; nachhaltig nutzbare Energieströme, also erneuerbare Energien, sind daher notwendig. Eine deutlich effizientere Energienutzung aller Energieträger und die Substitution endlicher Energieressourcen durch erneuerbare Energien sind zwei Seiten einer Medaille.

Parallel dazu sollte auch ein **Bewusstseins- und Wertewandel** stattfinden, der weg vom stetig wachsenden Güterkonsum und hin zu einem qualitativen Wachstum der Bedürfnisbefriedigung führt und die Sensibilität für die Umwelt schärft. Eine derartige Veränderung wird aber, wenn überhaupt, nur über längere Zeiträume größere Teile der Bevölkerung erfassen. Vor allem die fortschreitende Globalisierung

→ **Wie erneuerbare Energien zur Nachhaltigkeit beitragen**

- Erneuerbare Energien leisten einen erheblichen Beitrag zum Klimaschutz - im Jahr 2010 haben sie allein in Deutschland den Ausstoß von rund 115 Millionen Tonnen des Klimagases CO<sub>2</sub> verhindert: 14 Prozent der CO<sub>2</sub>-Emissionen Deutschlands.
- Erneuerbare Energien erweitern die Rohstoffvielfalt, machen unabhängig von fossilen Rohstoffen und tragen so zur Versorgungssicherheit und zur Vermeidung von Rohstoffkonflikten bei.
- Erneuerbare Energien sichern uns gegen Kostensteigerungen ab, die bei knappen fossilen und nuklearen Ressourcen unvermeidbar eintreten werden.
- Erneuerbare Energieanlagen können am Ende ihrer Lebensdauer einfach abgebaut und recycelt werden. Sie sind keine strahlende Altlast - wie Atomkraftwerke - und hinterlassen keine Kohlegruben.
- Erneuerbare Energien sind vielfach heimische Energieträger, die zur regionalen Wertschöpfung beitragen und Arbeitsplätze sichern.
- Erneuerbare Energien vereinfachen den Zugang großer Bevölkerungsteile zu Energie, beispielsweise durch ländliche Elektrifizierung in Entwicklungsländern, und können diesen Ländern Wege aus der Armut weisen.

**Kostenverlauf erneuerbarer und herkömmlicher Energien**



Erneuerbare Energiequellen liefern auf Dauer die kostengünstigste Energie.  
Quelle: DLR

**Erneuerbare Energien**

- junge Technologien; Technologiefortschritt und Kostendegression groß
- unbegrenzte, großräumige Verfügbarkeit
- global einsetzbar, nicht missbrauchsfähig, nahezu keine Gefährdungen
- externe Kosten gering (Anlagenherstellung)

**Fossile und nukleare Energien**

- begrenzte Ressourcen, regionale Ungleichverteilung
- Preise längerfristig steigend
- nukleare als Ersatz für fossile Energien verlangen teure und risikoreiche Systeme (Brüter)
- nukleare Energien kaum global einsetzbar; Gefahr von Missbrauch und Risiken ist hoch
- externe Kosten: fossile Energien langfristig prohibitiv (Klima); nukleare Energien potenziell prohibitiv

- Erneuerbare Energien
- Fossile und nukleare Energien
- Externe Kosten



des Konsumverhaltens und die starke Ausrichtung auf sehr kurzfristige wirtschaftliche Erfolge statt auf vorsorgeorientierte, längerfristig angelegte Reformen stehen solchen Tendenzen im Wege. Es sind noch eine Vielzahl von „sozialen Innovationen“ notwendig, damit ein bewussterer Umgang mit den natürlichen Ressourcen zur Selbstverständlichkeit wird.

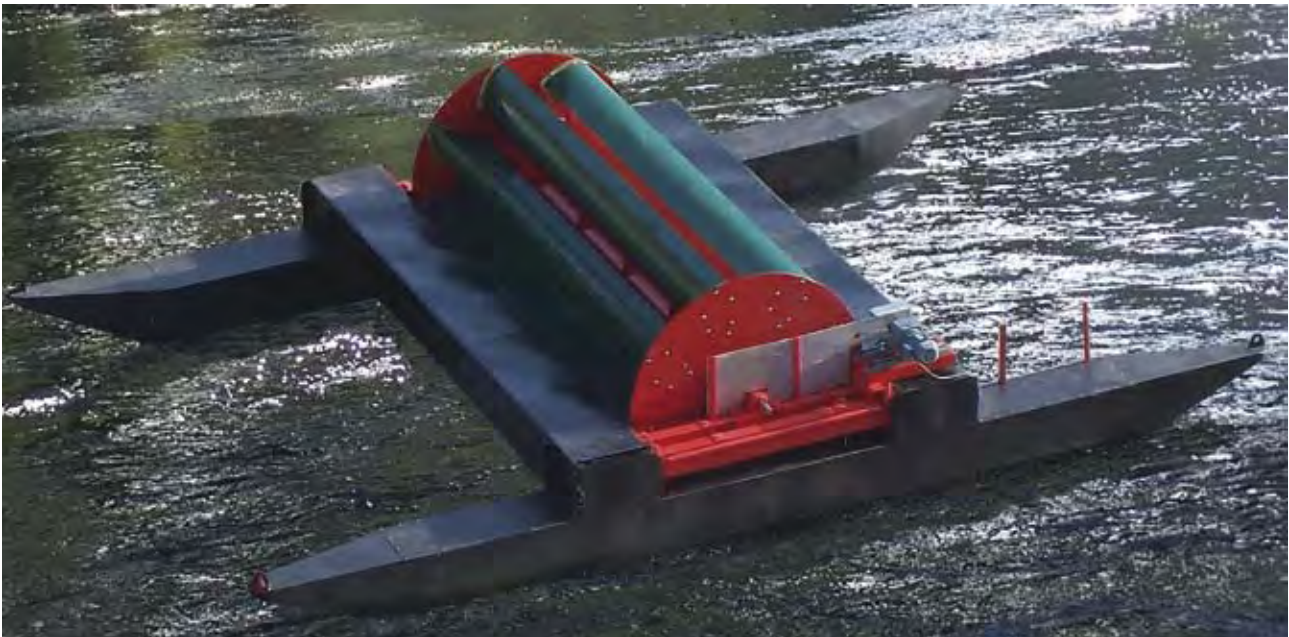
## Innovationsmotor erneuerbare Energien

Über Jahrtausende hat der Mensch ausschließlich erneuerbare Energien genutzt, allerdings auf einem sehr niedrigen Niveau und mit sehr geringen Wirkungsgraden. Heute dagegen stehen uns Technologien zur Verfügung, mit denen aus erneuerbaren Energiequellen alle erdenklichen Energiedienstleistungen angeboten werden können.

Auch die Kosten sind überschaubar und sinken kontinuierlich. Werden die Kosten in Relation zu den ökologischen und sozialen Qualitäten gesetzt, zeigt sich, dass die erneuerbaren Energien, auch bei bisher noch meist höheren Preisen pro kWh, volkswirtschaftlich gesehen schon heute günstiger sind. Eine auf fossilen und nuklearen Energiequellen verharrende Energieversorgung verursacht erhebliche Umwelt- und Folgeschäden, die in das ökonomische Kalkül einbezogen werden müssen (siehe Kasten „Externe Kosten – wie man Energiekosten richtig bestimmt“). Die meisten erneuerbaren Energieträger erfüllen alle wesentlichen Anforderungen an eine zukunftsfähige Energieversorgung.

Kennzeichnend für eine zunehmend aus erneuerbaren Energien bestehende Energieversorgung ist die wachsende Vernetzung auf dezentraler Ebene (siehe Seite 67). Zusätzlich können nationale, kontinentale und interkontinentale Netzverbände das regional unterschiedliche Angebot erneuerbarer Energien miteinander verknüpfen. Über die jeweilige regional spezifische dezentrale Nutzung von erneuerbaren Energien hinaus werden zukünftig an Orten mit sehr reichhaltigem und damit kostengünstigem Energieangebot energieindustrielle Zentren entstehen, die andere Regionen mit großer Energienachfrage mitversorgen. Diese Zentren könnten gleichzeitig zu Keimzellen wirtschaftlicher Entwicklung und damit von zunehmendem Wohlstand und einer Stabilisierung sozialer Strukturen werden. Solche zentralen Infrastrukturen ersetzen gleichwohl eine dezentrale Entwicklung erneuerbarer Energien nicht, sondern ergänzen diese zukünftig. Beispielsweise haben sich in Deutschland schon über 100 Landkreise, Gemeinden und Regionalverbände auf den Weg zur „100%-Erneuerbare-Energie-Region“ gemacht, während der Ausbau neuer zentraler Strukturen einen internationalen Politikprozess erfordert und entsprechend schwerfälliger ist – zu schwerfällig, als dass wir uns allein auf diese Versorgungsoption verlassen könnten.

Neben diesen neuen Akteuren und Strukturen entwickeln sich erneuerbare Energien, getriggert durch Forschung und Entwicklung und durch einen dynamischen Markt, aber auch technisch mit enormer Geschwindigkeit. Die Bandbreite der technischen Innovationen im Bereich der erneuerbaren Energien ist groß:



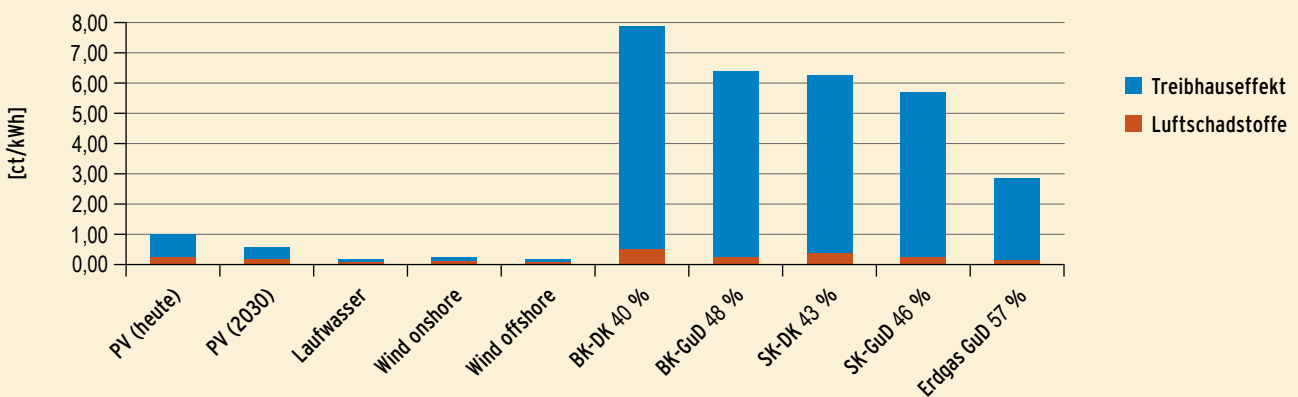
Der River Rider ist ein Laufwasserkraftwerk ohne Staustufe.

Eine typische **Windkraftanlage** aus den 1990er Jahren hatte eine Nabenhöhe von maximal 50 m und leistete etwa 250 kW. Die in den letzten Jahren aufgestellten Anlagen sind dreimal so hoch und haben mit 2 bis 3 MW rund die zehnfache Leistung, neueste Anlagen haben eine Spitzenleistung von 6 MW und mehr. Ab circa 100 m Nabenhöhe liegen optimale Windverhältnisse vor und ermöglichen einen Anlagenbetrieb mit maximaler Windausbeute am jeweiligen Standort. Zukünftige weitere Steigerungen werden nicht mehr primär aus der Größe, sondern vor allem über weitere aerodynamische Verbesserungen erwartet.

Mindestens ebenso atemberaubend ist die Lernkurve der **Photovoltaik**. 1990 lag der Systempreis noch bei 14.000 Euro pro kW. Heute liegt er bei etwa 2.500 Euro. Hier werden auf absehbare Zeit die Siliziumzellen weiter den Markt dominieren. Der Wirkungsgrad von Modulen mit polykristallinem Silizium konnte von unter 10 auf bis zu 20 Prozent und von monokristallinem Silizium auf bis zu 25 Prozent gesteigert werden.

Deutschland ist einer der führenden Forschungsstandorte, hat aber starke Konkurrenz aus Europa, Asien und Nordamerika. So wird beispielsweise

### Externe Kosten der Energiesysteme



Externe Kosten verschiedener Energiesysteme durch Luftschadstoffe und Treibhausgase.

Quelle: DLR 2006

## → Externe Kosten – Wie man Energiekosten richtig bestimmt

Die durch Energiewandlung und -nutzung verursachten Schäden können unter Umständen zu erheblichen volkswirtschaftlichen Kosten führen. Da diese Kosten nicht vom Verursacher getragen werden und sich auch nicht in den Marktpreisen für Strom, Wärme und Kraftstoffe widerspiegeln, werden sie als externe Kosten bezeichnet. Solche externen Effekte führen – in der Sprache der Ökonomen – zu einer nicht optimalen Zuteilung (Allokation) knapper Ressourcen. Die Umwelt wird über das optimale Maß hinaus in Anspruch genommen.

Eine einfache Lösung wäre die „Internalisierung“, also die Übertragung aller relevanten Folgekosten auf den Verursacher. Dies kann durch Umweltsteuern, Abgaben, handelbare Emissionsrechte oder ähnliche Instrumente erreicht werden. Problematisch sind dabei die genaue Erfassung der Umweltschäden und deren ökonomische Bewertung. Trotz zum Teil erheblicher Unsicherheiten ist es mit wissenschaftlichen Modellen möglich, die Auswirkungen von Luftschadstoffen auf Materialien, die Wirkungen auf die menschliche Gesundheit (von leichten Atemwegssymptomen bis hin zu einem erhöhten Sterblichkeitsrisiko) oder die Versauerung und Überdüngung von Ökosystemen quantitativ abzuschätzen.

Große Anstrengungen wurden in den letzten Jahren unternommen, um auch die durch den Klimawandel verursachten Schäden abzuschätzen. Dies zeigt eindrücklich, welche Schäden durch den Klimawandel auf uns zukommen. Die Unsicherheiten bei der Bestimmung der Schadenskosten durch den Treibhauseffekt sind jedoch besonders groß und lassen bis heute eine zuverlässige monetäre Bewertung der zum Teil unbekanntem Folgen nicht zu. Die Werte spannen eine Bandbreite von mehreren Größenordnungen auf. Es zeichnet sich ab, dass nach heutigem Wissen Werte um 70 Euro/t CO<sub>2</sub> eine plausible Größenordnung

für die Schadenskosten des Klimawandels sein dürften. Da die Folgen des Klimawandels noch nicht vollständig verstanden werden, können die Kosten aber auch deutlich höher sein.

Die Internalisierung der Schäden verteuert die Kosten fossiler Energieträger erheblich. So werden die externen Kosten von Gas- und Kohlekraftwerken mit 3 bis 8 Ct/kWh angegeben (siehe Grafik „Externe Kosten“). Die Berechnung externer Kosten der Atomenergienutzung ist vor allem wegen der umstrittenen Bewertung großer Unfälle und der extrem langen Belastung durch radioaktive Abfälle schwierig und führt je nach Annahmen zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen.

Im Gegensatz dazu entstehen bei den erneuerbaren Energieträgern nur Umweltschäden durch die geringen Emissionen aus dem Fertigungsprozess der Anlagen. Die externen Kosten sind dabei für Photovoltaik mit 0,8 Ct/kWh am höchsten, werden aber durch eine Verbesserung der Technologie und der bei der Anlagenherstellung eingesetzten Energieprozesse sinken. Bei Wasser- und Windkraft liegen die externen Kosten in der Größenordnung von 0,1 Ct/kWh (siehe Grafik „Externe Kosten“).

Das zeigt, dass wir heute bei der Ermittlung der „kostengünstigsten“ Energieversorgung von unzulänglichen Voraussetzungen ausgehen. Fossile und nukleare Energien sind teurer, als es die betriebswirtschaftliche Rechnung zeigt. Je effektiver die externen Kosten in das Preiskalkül einbezogen werden, desto früher wird eine Umgestaltung der Energieversorgung auch aus ökonomischer Sicht attraktiv. Das Erneuerbare-Energien-Gesetz kann als „Vorwegnahme“ der fälligen Korrektur der Energiepreise angesehen werden. Dann sind die Strompreiskorrekturen nach diesem Gesetz ein Ausgleich für nicht internalisierte externe Kosten anderer Energieträger.

an verbesserten Zellrückseiten geforscht, um den Wirkungsgrad weiter zu erhöhen. Auch wird versucht, die Fertigungstechnologien stärker zu automatisieren und – durch andere und weniger Materialien – Ressourcen und Energie bei der Produktion einzusparen. Und nicht nur die Solarzellen selber sind wichtig. Der Wechselrichter beispielsweise ist dafür zuständig, den von der Solaranlage produzierten Gleichstrom in Wechselstrom umzuwandeln. Hier wird eine Halbierung der Verluste von derzeit zwei Prozent auf zukünftig nur ein Prozent erwartet.

Auch bei scheinbar alten Technologien gibt es neue Entwicklungen. So wird seit über 1.000 Jahren aus strömendem Wasser Energie durch Wasserräder gewonnen. Ein vielversprechender Prototyp ganz neuer

Art hat 2011 seinen Betrieb in Sachsen-Anhalt aufgenommen. Der „River Rider I“ ist ein **Flusswasserkraftwerk**, das schwimmend und ohne Staustufen Strom aus Fließgewässern gewinnen kann. Die Eintauchtiefe liegt nur bei etwa einem halben Meter.

Über **moderne Informationstechnologien** ist eine intelligente Vernetzung der verschiedenen dezentralen erneuerbaren Energien und auch der Energieabnahme möglich. So können über „regenerative Kombikraftwerke“ die Schwankungen auf der Angebots- und Nachfrageseite ausgeglichen werden. Scheint die Sonne beispielsweise nicht, weht dafür der Wind oder es wird ein Biogaskraftwerk angefahren (siehe Kapitel „Neue Versorgungsstrukturen“).

# DIE ÖKOLOGISCHEN QUALITÄTEN DER ERNEUERBAREN ENERGIEN

**2010 haben erneuerbare Energieanlagen 118 Millionen Tonnen klimaschädliche Gase eingespart. Würden wir die erneuerbaren Energien nicht nutzen, so läge der Ausstoß an Treibhausgasen in Deutschland rund 12 Prozent höher.**

Wir haben gesehen: Noch weist unser Energiesystem zahlreiche Nachhaltigkeitsdefizite auf, insbesondere im ökologischen Bereich. Die Energieversorgung basiert auf Energieträgern, deren Reichweite begrenzt ist. Sie belastet Atmosphäre, Böden und Gewässer mit Schadstoffen und Treibhausgasen. Und nicht nur das: Leckagen in Ölpipelines, Tankerhavarien und flächenzehrender Kohleabbau, eine ungelöste Entsorgungsfrage des Atommülls und die Möglichkeit von Reaktorunfällen.

Neben einem vorsichtigen und sparsamen Umgang mit unseren Energieressourcen (siehe Infobox „Effizienz und Sparen – eine notwendige Voraussetzung für eine optimale Nutzung erneuerbarer Energien“) verspricht der Einsatz von erneuerbaren Energien Abhilfe in vielen Bereichen. Die erneuerbaren „Brennstoffe“ sind die natürlichen Energieströme der Sonne und des Windes, die Energie des fließenden Wassers und der Wellen, der Energieinhalt von Biomasse und Erdwärme. Ihre Nutzung verhindert, dass weiterhin fossile oder nukleare Energievorräte auf unserer Erde

verbraucht werden müssen. Gleichwohl muss auch der Ausbau erneuerbarer Energien mit den strengen Kriterien einer umweltverträglichen Energieumwandlung geprüft werden.

## Klima- und Ressourcenverträglichkeit erneuerbarer Energien

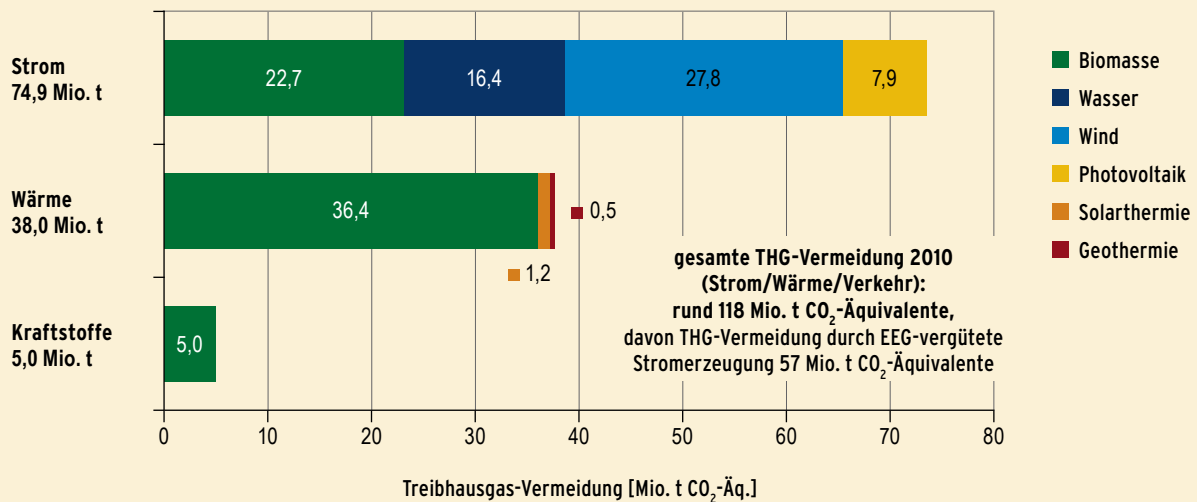
In den „Brennstoffen“ der erneuerbaren Energie aus Wind, Sonne, Wasserkraft und Erdwärme steckt kein fossiles Kohlenstoffatom, das bei der Verbrennung zu klimaschädlichem CO<sub>2</sub> oxidiert wird. Und bei der Nutzung nachhaltig angebaute Biomasse entsteht zwar Kohlendioxid, doch bei der Bildung der Biomasse wurde die gleiche Menge des Treibhausgases der Atmosphäre entzogen. Weil der Kohlenstoffkreislauf geschlossen ist, wird auch hier kein zusätzliches Treibhausgas emittiert.

Erneuerbare Energien sind daher nicht nur ressourcen-, sondern auch klimaverträglich. Allein im Jahr 2010 hat ihre Nutzung den Treibhausgas-Ausstoß um rund 118 Millionen Tonnen vermindert. Anders ausgedrückt: Würden wir erneuerbare Energien nicht nutzen, lägen die Treibhausgas-Emissionen in Deutschland rund 12 Prozent höher. Die Klimaschutzverpflichtungen der Bundesregierung lassen sich ohne einen weiterhin kräftigen Ausbau der Erneuerbaren nicht erfüllen.

Dabei fällt auf, dass der Beitrag der erneuerbaren Energien am Klimaschutz wesentlich größer ist als ihr Anteil am Energieverbrauch. Dies hängt damit zusammen, dass die Erneuerbaren vor allem zur Stromproduktion genutzt werden und hier vor allem Kohle ersetzen – einen Brennstoff, der im Vergleich mit Mineralölprodukten und Erdgas mit einem besonders hohen CO<sub>2</sub>-Faktor behaftet ist. Der Effekt im Strommarkt ist aber auch deswegen besonders hoch, weil die Wirkungsgrade von Kraftwerken deutlich geringer sind als bei Wärme erzeugenden Systemen. Von der gesamten Vermeidung von Treibhausgasen durch erneuerbare Energien entfallen deshalb trotz geringerer Energiemengen etwa 75 Millionen Tonnen auf die Stromerzeugung und „nur“ 38 Millionen Tonnen auf die Wärmebereitstellung (Abbildung „Vermeidung von Treibhausgas-Emissionen durch die Nutzung erneuerbarer Energien“). Im Kraftstoffmarkt sind es rund 5 Millionen Tonnen.



## Vermeidung von Treibhausgas-Emissionen durch die Nutzung erneuerbarer Energien



2010 wurde der Ausstoß von rund 118 Millionen Tonnen Treibhausgase durch den Ausbau erneuerbarer Energien vermieden.

Quellen: AGEE-Stat/BMU 2011

Diese Berechnungen berücksichtigen bereits die notwendigen Aufwendungen, um etwa Wind- und Solaranlagen zu errichten, zu betreiben und nach ihrer Nutzung auch wieder zu demontieren – also den gesamten Lebenszyklus der Energieanlagen. Die Treibhausgas-Emissionen, die mit dem Lebenszyklus verbunden sind, liegen für die Techniken zur Nutzung erneuerbarer Energien – sieht man von der Photovoltaik ab – deutlich unter 100 Gramm pro bereitgestellter Kilowattstunde Nutzenergie (siehe Grafik „Treibhausgas-Emissionen in der Strom- und Wärmeerzeugung“). Beim Einsatz von Biomasse in Heizkesseln, Dampfturbinen oder Blockheizkraftwerken schwanken die Werte je nach Anbau und Ernte des Holzes zwischen 20 und 75 g/kWh Nutzenergie. Gas- und Ölkessel oder Kohlekraftwerke liegen im Vergleich dazu um etwa den Faktor zehn höher.

Lediglich fossile Kraftwerke, die das entstehende Kohlendioxid auffangen und in geeigneten Speichern entsorgen, kämen auf vergleichbare Werte. Die Ausrüstung moderner Kraftwerke mit CO<sub>2</sub>-Abtrennung und -Speicherung – dies wird auch als Carbon Capture and Storage (CCS) bezeichnet – erhöht allerdings die Kosten der Kraftwerke. Die Abtrennung ist außerdem mit einem erheblichen Energiebedarf verbunden. Der Wirkungsgrad sinkt, die Stromkosten aus solchen Kraftwerken steigen signifikant an. Bei der Auswahl der geeigneten CO<sub>2</sub>-Speicher (beispielsweise ausgediente Gasfelder oder tiefe Grundwasserseen) muss außerdem eine maximale Dichtigkeit gewährleistet sein – eine zu hohe Leckage des eingespeicherten CO<sub>2</sub> würde die langfristige Klimaschutzwirkung von CCS konterkarieren.

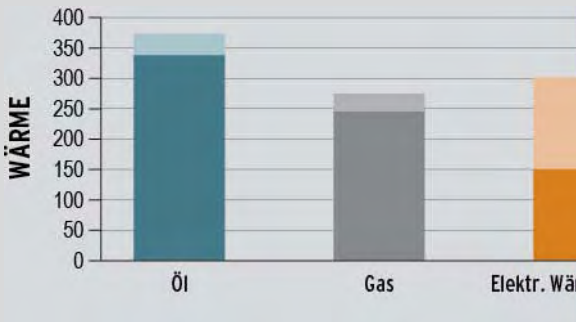
Beim Einsatz von Biogas aus nachwachsenden Rohstoffen zur Strom- und Wärmeerzeugung betragen die mit dem Lebenszyklus verbundenen Treibhausgas-Emissionen zwischen 20 und 200 g/kWh<sub>el</sub>, je nachdem, wie gut die Wärme tatsächlich genutzt wird. Außerdem werden diese Werte dann erreicht, wenn die Biogasanlagen dem Stand der Technik entsprechen. Die Treibhausgas-Emissionen fossiler Stromerzeugung sind dagegen deutlich höher und liegen bei einem modernen Steinkohlekraftwerk über 800 g/kWh. Biogasanlagen, die tierische Exkremente nutzen, bringen sogar zusätzlich zur Strom- und Wärmeerzeugung einen Klimanutzen, weil sie durch die Nutzung des Biogases Methanemissionen vermeiden, die ansonsten bei der Lagerung der Gülle entstanden wären. Daher weisen sie in der Abbildung „Treibhausgas-Emissionen in der Strom- und Wärmeerzeugung“ negative Emissionen auf.

Das Beispiel der Photovoltaik zeigt zugleich, wie wichtig es ist, nicht nur den heutigen Stand, sondern auch die Entwicklungspotenziale der Technologien zu analysieren. Während die Herstellung der Photovoltaik heute noch mit – je nach Typ und Standort – rund 100 g Treibhausgas-Emissionen pro kWh Strom zu Buche schlägt, können neue Solarzellentypen (siehe Seite 85), höhere Wirkungsgrade, verbesserte Herstellungsverfahren, neuartige Materialien und Recycling diese Emissionen drastisch senken. Wird zudem berücksichtigt, dass die Energieversorgung der Zukunft höhere Anteile erneuerbarer Energien aufweist, so sinken die Treibhausgas-Emissionen aus der Herstellung der Anlagen weiter ab, da zur Anlagenherstellung dann auch emissionsarme Energie

### Treibhausgas-Emissionen in der Strom- und Wärmeerzeugung

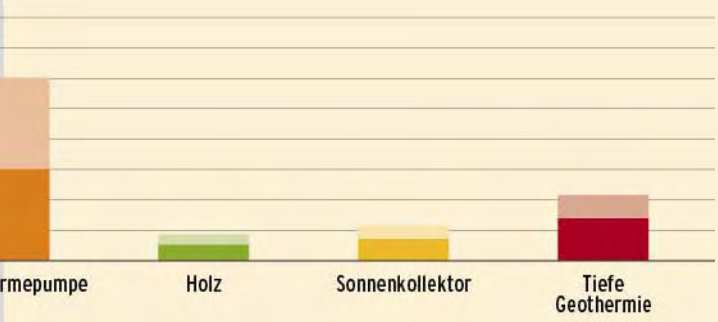
#### Fossile Energieträger

Treibhausgas-Emissionen pro kWh<sub>th</sub>

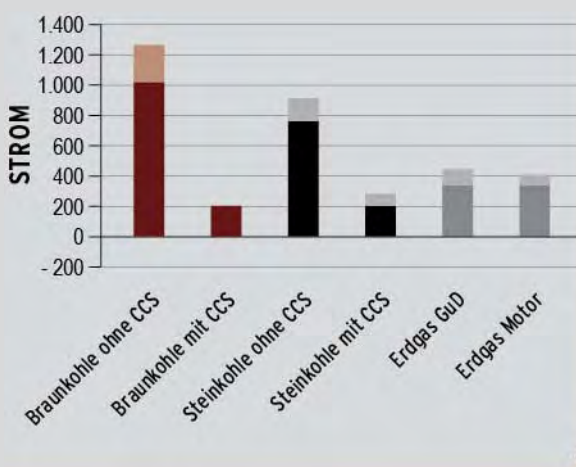


#### Erneuerbare Energieträger

Aufgehellte Bereiche zeigen Schwankungsbreite zwischen Minimal- und

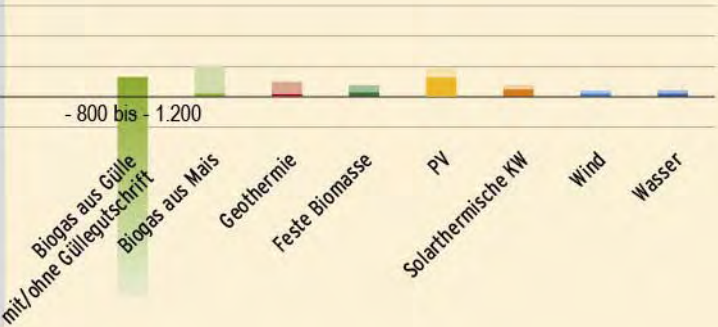


Treibhausgas-Emissionen pro kWh<sub>e</sub>



Aufgehellte Bereiche zeigen Schwankungsbreite zwischen Minimal- und Maximalwerten

Bei Geothermie: Nettoprinzip (Pumpen beziehen Strom aus Geothermie-Kraftwerk).  
Bei KWK-Technologien: Wärmegutschrift mit Gas-Brennwertkessel



Fossile Energiebereitstellung (ohne CO<sub>2</sub>-Abtrennung und Speicherung) ist eine Größenordnung klimaschädlicher als erneuerbare Energie.

Quelle: IFEU

**Erneuerbare Energieanlagen haben sich in kürzester Zeit energetisch amortisiert. Fossile Kraftwerke amortisieren sich nie.**

eingesetzt wird. Für Photovoltaik wie für andere erneuerbare Energietechnologien gilt zudem: Konzepte für möglichst materialsparende Technologien und geschlossene Stoffkreisläufe sind wichtig, um den Verbrauch an **nicht energetischen Ressourcen** (Metalle etc.) zu minimieren.

Man kann den Vergleich zwischen fossilen und erneuerbaren Energieanlagen auch mit einer anderen Kennzahl verdeutlichen: der energetischen Amortisationszeit, also der Zeit, die ein Energiesystem benötigt, um die Energie bereitzustellen, die zu seiner Herstellung, zum Betrieb und zur Entsorgung eingesetzt worden ist.

Die energetische Amortisationszeit (siehe Tabelle „Energetische Amortisationszeit“) für die reine Anlagenherstellung liegt für fossil gefeuerte Kraftwerke und für Kernkraftwerke bei zwei bis drei Monaten Betriebszeit. Aber bezogen auf den gesamten Betrieb



amortisieren sich diese Anlagen nie, denn es muss immer mehr Energie in Form von Brennstoffen hineingesteckt werden, als man hinterher als Nutzenergie erhält! Für eine Kilowattstunde Strom muss beispielsweise ein typisches Braunkohlekraftwerk Kohle mit einem Energiegehalt von rund 2,5 Kilowattstunden verbrennen.

Wasser-, Wind- und solarthermische Kraftwerke benötigen zwischen drei und dreizehn Monate, bis sie ihre Herstellungsenergie wieder eingespielt haben. Danach liefert jede Betriebsstunde den wertvollen Strom „ökologisch kostenlos“. Die Solarzellenherstellung ist energetisch aufwändiger. Heutige Anlagen mit kristallinem Silizium haben in unseren Breiten energetische Amortisationszeiten von 1,5 bis vier Jahren, ihre Lebensdauer ist jedoch um ein Vielfaches höher. Man erwartet durch weitere Fortschritte in der Fertigungs- und Solarzellentechnologie eine Verringerung dieses Wertes auf ein bis zwei Jahre innerhalb des nächsten Jahrzehnts.

Ähnliche Verhältnisse liegen bei der Wärmeerzeugung vor. Solare Kollektoranlagen brauchen zwischen 18 und 30 Monaten, Anlagen mit hydrothermalen Erdwärmenutzung nur sieben bis zehn Monate. Systeme zur Nutzung erneuerbarer Energien holen also im Lauf ihrer Betriebszeit ein Vielfaches der Energie wieder herein, die zu ihrer Herstellung erforderlich war – ganz im Gegensatz zu fossil gefeuerten Anlagen und auch Kernkraftwerken.

## CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten

Langfristiges Ziel der Klimaschutzpolitik ist es, die weltweiten Treibhausgas-Emissionen um 80 Prozent zu senken. Dieses Ziel sollte „effizient“ erreicht werden, also zu möglichst geringen Kosten. Als Maß für die Effizienz von Minderungsmaßnahmen werden oft die CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten herangezogen, das sind die Kosten, die durch den Einsatz einer bestimmten Technologie zur Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen entstehen. Eine wichtige Vereinbarung zur Berechnung von CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten ist die Festlegung eines Bezugs, gegenüber dem die jeweiligen Kosten für die Emissionsminderung ausgewiesen werden. Als Bezugsgröße zur Darstellung der CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten wird hier das Kostengerüst der „Leitstudie 2010“ zu Grunde gelegt; die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien wird verglichen mit den Erzeugungskosten (inklusive Verteilung auf Mittelspannungsebene) und CO<sub>2</sub>-Emissionen neuer fossiler Dampfkraftwerke. Für die Ermittlung der CO<sub>2</sub>-Minderungskosten durch Wärme aus erneuerbaren Energien wird die Wärmebereitstellung in Einfamilienhäusern durch einen Mix aus Öl und Gas angenommen.

Der Bandbreite der Strom- und Wärmegestehungskosten entsprechend spannen auch die CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten einen großen Kostenbereich mit zum Teil heute noch beträchtlichen Vermeidungskosten auf (siehe Grafik „CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten“). Für eine vorausschauende Politik ist es besonders wichtig, die zeitliche Dynamik zu berücksichtigen: Während die

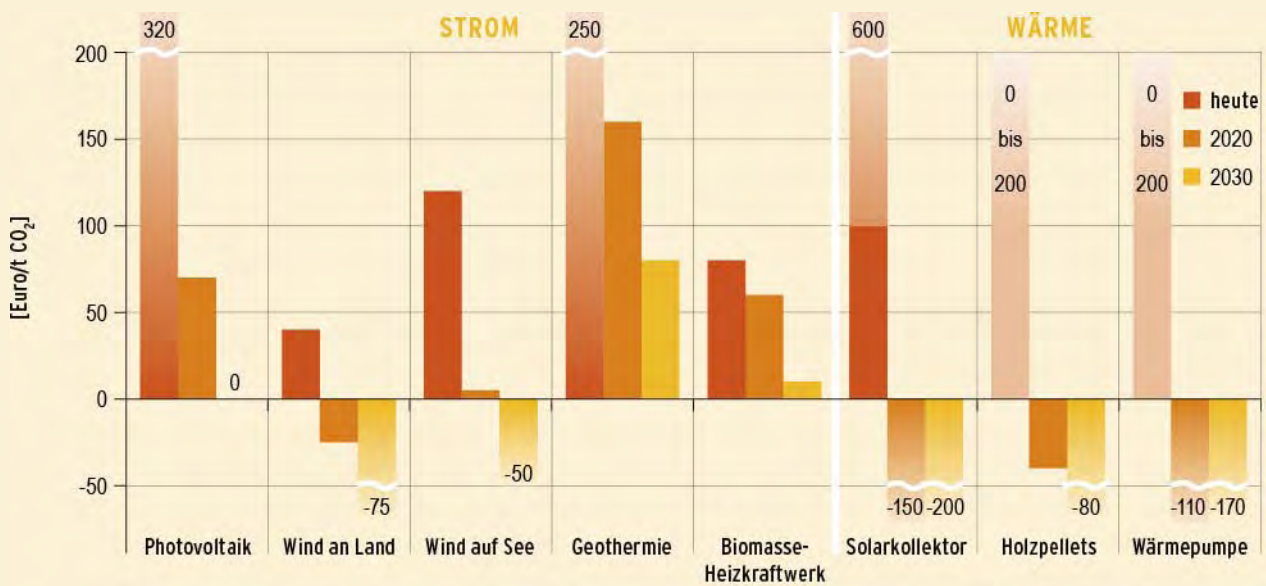
## Energetische Amortisationszeit für Herstellung, Betrieb und Entsorgung

Stromerzeugung	
Windkraft	3 bis 7 Monate
Wasserkraft	9 bis 13 Monate
Solarthermisches Kraftwerk in Marokko	3 bis 7 Monate
Photovoltaik in Mitteleuropa	
• Polykristallines Silizium, moderne Herstellungstechnologie	3 bis 5 Jahre
• Dünnschicht-Zellen	2 bis 3 Jahre
Gaskraftwerk	Nie *
Kohlekraftwerk	Nie *
Atomkraftwerk	Nie *
Wärmeerzeugung	
Sonnenkollektoren	1,5 bis 2,5 Jahre
Geothermie (hydrothermal)	7 bis 10 Monate
Gaskessel	Nie *
Ölkessel	Nie *

Die energetische Amortisationszeit beschreibt die Zeit, die die Anlage braucht, um die Energie für Herstellung, Betrieb und Entsorgung wieder hereinzuholen. (\* Kraftwerke und Kessel auf Basis erschöpflicher Energieträger amortisieren sich energetisch nie, da sie immer mehr Brennstoffe verbrauchen, als sie Nutzenergie erzeugen.)

Quelle: IFEU

## CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten



CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten durch die Strom- und Wärmeerzeugung aus erneuerbaren Energien. Bezug: Mix neuer fossiler Kondensationskraftwerke beziehungsweise Wärmeversorgung von Einfamilienhäusern mit einem Mix aus Gas-Brennwertkessel und Öl-Niedertemperaturkessel.

Quelle: IFEU, Nitsch

**Durch Kostendegression, technische Fortschritte und steigende fossile Energieträgerpreise werden die CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten erneuerbarer Energien künftig erheblich abnehmen. Bei fossilen Kraftwerken ist es genau umgekehrt.**

CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten für die Stromerzeugung aus Wind und Biomasse heute noch zwischen 40 und 120 Euro/t CO<sub>2</sub> liegen, gehen sie bis 2030 wegen der sinkenden Kosten für Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energien und steigender fossiler Brennstoffpreise deutlich zurück. Langfristig werden zum Teil sogar negative CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten erreicht. Das bedeutet: Wir sparen Klimagas und Geld zugleich.

Die Höhe der Vermeidungskosten für Strom aus einem Biomasse-Heizkraftwerk hängt von den Brennstoffkosten und der Wärmevergütung ab. Wegen der heute noch hohen Stromerzeugungskosten liegen die CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten der Photovoltaik bei knapp 320 Euro/t CO<sub>2</sub>, sinken aber langfristig auf null.

Auch die CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten der Wärmebereitstellung mit Solarkollektoren liegen für ein teilsaniertes Einfamilienhaus heute noch in der Größenordnung von rund 100 Euro/t CO<sub>2</sub> – sie hängen jedoch sehr stark vom Heizenergieverbrauch des Gebäudes und dem Vergleichssystem ab und können bis zu

600 Euro/t betragen. Vermeidungskosten sind daher sehr vorsichtig zu interpretieren. Auch hier besteht ein großes Potenzial zur Kostensenkung, so dass je nach Einsatzgebiet und Anlagenkonfiguration langfristig auch mit Solarkollektoren negative CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten erreicht werden können. Die Wärmeerzeugung in einem Holzhackschnitzel-Heizwerk führt schon heute zu negativen CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten.

Vielfach wird argumentiert, die CO<sub>2</sub>-Vermeidung durch Modernisierung von Kohlekraftwerken habe viel geringere CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten. Während durch neue Steinkohlekraftwerke zunächst noch ein gegenüber dem heutigen Bestand an Steinkohlekraftwerken bestehendes CO<sub>2</sub>-Minderungspotenzial zu sehr niedrigen Kosten erschlossen werden kann, so ist jede darüber hinaus gehende zusätzliche Minderung der CO<sub>2</sub>-Intensität mit stark steigenden CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten verbunden. So führt bereits der Sprung von einem Dampfkraftwerk mit 45 Prozent Wirkungsgrad hin zu einem verbesserten Dampfkraftwerk mit 46 Prozent Wirkungsgrad, zusammen mit einem leichten Anstieg des Kohlepreises, zu CO<sub>2</sub>-Minderungskosten von 140 Euro/t CO<sub>2</sub>. Mit anderen Worten: Ein Kohlekraftwerk kommt über ein gewisses Maß an CO<sub>2</sub>-Minderung prinzipiell nicht hinaus. Im Gegensatz dazu gehen die CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten für Wind wegen der erwarteten Kostendegression kontinuierlich zurück und liegen bereits mittelfristig deutlich unter den Minderungskosten der Steinkohle-Technologien.

## Andere Umweltwirkungen der erneuerbaren Energien

Neben den Treibhausgas-Emissionen und dem Verbrauch energetischer Ressourcen gibt es weitere Umweltwirkungen: Die Versauerung des Bodens, die Nährstoffanreicherung (Eutrophierung) von Böden und Gewässern, Sommersmog oder der Ausstoß toxischer Stoffe. Hier hängt das Ergebnis der Ökobilanz sehr stark von der spezifischen Technologie, dem verwendeten Energieträger, den Umgebungsfaktoren sowie der geografischen Lage der Anlage ab.

Die **versauernden Emissionen** fast aller erneuerbarer Stromsysteme liegen deutlich unter den durchschnittlichen Emissionen des deutschen Kraftwerks-parks. Dies gilt auch für erneuerbare Wärmesysteme – bis auf Stroh, das auf Grund seines Chlor- und Schwefelgehaltes und der Stickoxide höhere Emissionen hat als ein typischer Öl- oder Gaskessel. Eine weitere Ausnahme bildet die Erzeugung von Strom und Wärme aus Biogas: Der bei der Biogaserzeugung entstehende Gärrest bringt prozessbedingt Ammoniakemissionen aus dessen Lagerung und Ausbringung auf Felder mit sich. Allerdings können diese Emissionen gering gehalten werden, wenn Lager abgedeckt werden und der Gärrest direkt nach Ausbringung in den Boden eingearbeitet wird.

Bezüglich des **Nährstoffeintrags** („Eutrophierung“) und des Beitrags zum Sommersmog über gasförmige Schadstofffreisetzungen liegen die meisten der erneuerbaren Energieanlagen besser als die fossilen Konkurrenten – mit Ausnahme einiger der Biomasse-Systeme. Dies liegt unter anderem daran, dass Biomasse-Kraftwerke häufig kleiner sind als Gas- oder Kohlekraftwerke und deshalb weniger Aufwand zur Reduktion der Stickoxid-Emissionen betrieben werden kann. Bei der ausschließlich für die Energiegewinnung angebauten Biomasse kommen die Aufwendungen für die landwirtschaftlichen Maschinen, die Düngemittelproduktion und die Emissionen aus den Ackerböden hinzu.

Gerade bei den kleinen Biomasse-Feuerungen, die in den letzten Jahren einen deutlichen Ausbau erfahren haben, sind außerdem die **Feinstaub**-Emissionen höher als bei Gas- und Ölheizungen. Pelletheizungen weisen dabei deutlich niedrigere Emissionen auf als Hackschnitzel- oder Scheitholzanlagen. Die Hersteller von Biomasse-Feuerungen sind dabei, kostengünstige Staubfilter und eine verbesserte Feuerungstechnik zu entwickeln, so dass diese Staubemissionen künftig deutlich geringer ausfallen können. Entsprechende Pelletöfen und -heizungen im kleinen und mittleren Leistungssegment sind bereits auf dem Markt verfügbar, zum Beispiel erkennbar durch den Blauen Engel.

Bei den sehr kleinen, manuell bedienten Feuerungen wie Kaminöfen ist eine sachgerechte Bedienung wichtig für niedrige Feinstaubemissionen.

Bei auf Energieplantagen angebauten Bioenergieträgern können sich weitere Umweltwirkungen ergeben: Dazu zählen unter anderem Nährstoffeinträge in Grund- und Oberflächengewässer, eine Belastung durch Pestizide und ein Rückgang der Tier- und Pflanzenvielfalt (siehe Kapitel „Biokraftstoffe“). Bezüglich der Bodenerosion weisen mehrjährige Pflanzen aufgrund der ganzjährigen Bodenbedeckung ein deutlich geringeres Austrags- und Auswaschpotenzial auf als einjährige Pflanzen. Mehrjährige Kulturen führen auch zu deutlich geringeren pestizidbedingten Umweltschäden, denn bei ihnen werden weniger Pestizide eingesetzt als bei den einjährigen Kulturen wie Raps und Zuckerrübe. Das Risiko einer Belastung durch Pestizide könnte in der Praxis sogar gänzlich ausgeschlossen werden, wenn die Energiepflanzen nach Ökolandbaurichtlinie produziert würden.

## Erneuerbare Energien und Naturschutz

Auch der Ausbau erneuerbarer Energien ist mit Auswirkungen auf die Natur verbunden. Diese Auswirkungen hängen wesentlich vom Standort und von der Ausführung der Anlagen zur Nutzung, Speicherung und Übertragung erneuerbarer Energien sowie der Gestaltung des Anbaus von energetischer Biomasse ab. Durch die klimaschützende Wirkung der erneuerbaren Energien können diese zunächst sehr positive Wirkungen auf den Naturschutz haben. Da der Klimawandel vielfältige negative Auswirkungen auf die biologische Vielfalt hat – zum Beispiel ein drastischer Rückgang der Arten – sind erneuerbare Energien aufgrund ihrer klimaschützenden Wirkung daher grundsätzlich positiv zu sehen.

Sie dürfen aber keine anderen, unangemessenen negativen Auswirkungen auf Natur und Umwelt haben. Deshalb hat die Bundesregierung in der Nationalen Strategie zur Biologischen Vielfalt (NBS, 2007) beschlossen, dass Erzeugung und Nutzung erneuerbarer Energien nicht zulasten der biologischen Vielfalt gehen dürfen. Ein nachhaltig ausgerichteter Ausbau der erneuerbaren Energien, wie ihn die Bundesregierung fördert, muss den Erhalt der **biologischen Vielfalt**, des **Naturhaushaltes** und des **Landschaftsbildes** neben einem hohen **Luftqualitäts-, Gewässer- und Bodenschutz** sicherstellen. Wo möglich, sind Synergieeffekte mit Umwelt- und Naturschutzmaßnahmen zu nutzen. So ist in der Strategie auch das Ziel enthalten, kooperative Konzepte und Strategien zur Konfliktvermeidung und -minimierung zwischen den

verschiedenen Raumannsprüchen bei der Gewinnung erneuerbarer Energien und nachwachsender Rohstoffe umzusetzen. Mit solchen Handlungsansätzen wird auch ein Beitrag zur Akzeptanz der neuen Technologien geleistet.

**Windanlagen** werden naturgemäß an besonders windreichen und damit exponierten Standorten aufgestellt. Dadurch können sie das Landschaftsbild beeinträchtigen und zum Beispiel in Vogelflugrouten stehen. Die Anlagenplanung muss diese und andere naturschutzfachlichen Belange berücksichtigen. Die sachgemäße Standortwahl und die Konstruktion der Anlagen sind daher aus Naturschutzsicht von großer Bedeutung.

Bei den Auswirkungen von Windenergieanlagen auf die Fauna, zum Beispiel Vögel oder Fledermäuse, geht es dabei um die Beeinträchtigung von Lebensräumen bis hin zum Verlust von Rast-, Brut- und Nahrungshabitaten, um Störungen und Scheuchwirkungen und schließlich auch um direkten Verlust durch Vogelschlag oder Fledermauskollisionen. Dies gilt sowohl für Windkraftanlagen an Land als auch auf See. Neben Vögeln beeinträchtigen Windenergieanlagen auf See vor allem auch geschützte Arten wie Schweinswale; insbesondere in der häufig sehr schallintensiven Bauphase von Offshore-Parks treten Störungs- oder Vertreibungseffekte für diese Meeresäugetiere auf.

Die potenzielle Beeinträchtigung des Landschaftsbildes, speziell in den stark strukturierten Mittelgebirgsregionen, kann von den Planern dargestellt und be-

wertet werden. Anlagenzahl, Standort, Anpassung der Aufstellordnung an die landschaftlichen Gegebenheiten, Fernwirkung und die Beziehung zu Sichtachsen spielen dabei eine entscheidende Rolle.

Wichtig ist, dass die auf kommunaler Ebene vorhandenen Steuerungsinstrumente genutzt werden. So werden im konkreten Genehmigungsverfahren für Windenergieanlagen Naturschutzbelange geprüft, bewertet und auch Auflagen formuliert, um Störungen der Vogelwelt bei Zug und Rast möglichst gering zu halten oder auszuschließen. Gleiches gilt auch für Fragen des Landschaftsschutzes.

**Wasserkraftanlagen** erzeugen gegenüber fossilen Energieträgern nahezu emissionsfrei Energie, verursachen jedoch lokal bis überregional wirkende Effekte, die sich auf das ökologische Gleichgewicht des Gewässers, abhängige Landökosysteme und Feuchtgebiete negativ auswirken können. Da nur noch 21 Prozent der kartierten Gewässerstrecken in Deutschland als „mäßig verändert“ bis „unverändert“ eingestuft werden, besteht zwischen Wasserkraftnutzung, Naturschutz und Gewässerschutz ein nicht unbeträchtliches Spannungsfeld. Bei Laufwasserkraftwerken kann die Fischwanderung durch die Unterbrechung des Gewässerflusses erschwert werden. Der Bau von Wehren und Ausleitungskanälen, Aufstauungen und Verringerung der Fließgeschwindigkeit, Turbulenz und Schleppkraft des Gewässers verändern die Gewässerstruktur, den Transport von Sedimenten und den ökologischen Haushalt des Gewässers und seiner Umgebung.

Die Konflikte zwischen Klima-, Natur- und Gewässerschutz können durch gewässerbauliche Maßnahmen vermindert werden. Fischauf- und -abstiegshilfen, Umgehungsgerinnen und Lockströmungen verbessern die Durchgängigkeit der Flüsse. Ein Mindestabfluss sichert bei sogenannten Ausleitungskraftwerken ausreichende Wassermengen im ursprünglichen Flussbett. Wasserkraftanlagen erhalten bis Ende 2011 nur dann eine Vergütung nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), wenn nach der Errichtung oder Modernisierung der Anlage ein guter ökologischer Zustand erreicht oder der ökologische Zustand gegenüber dem vorherigen Zustand wesentlich verbessert worden ist. Das am 1. März 2010 in Kraft getretene neue Wasserhaushaltsgesetz konkretisiert in enger Anlehnung an die Vorgaben der europäischen Wasserrahmenrichtlinie die zur Erreichung des guten ökologischen Zustands erforderlichen Anforderungen.

Im novellierten EEG werden ab dem 1. Januar 2012 entsprechend erweiterte ökologische Anforderungen für Wasserkraftanlagen hinsichtlich der Mindestwasserführung, der Gewässerdurchgängigkeit und



## → Empfehlungen zur Vermeidung und Minderung von Konflikten zwischen Energiepflanzenanbau und Naturschutz

- **1. Verengung der Fruchtfolgen und Konzentration auf einige wenige Kulturen vermeiden**  
Bei überwiegendem Einsatz nachwachsender Rohstoffe zur Biogaserzeugung sollte eine Mindestanzahl an einzusetzenden Kulturarten erreicht werden. So wird indirekt eine größere Anbauvielfalt im Einzugsgebiet der Anlage erzeugt. Die Begrenzung des Maisanteils auf 60 Masseprozent im EEG (2012) zielt in diese Richtung.
- **2. Standortangepasste Anbaukulturen und -verfahren nutzen**  
Insbesondere erosionsgefährdete (zum Beispiel Hanglagen), gegenüber Stickstoffdüngung sensible oder tendenziell humus-unterversorgte Standorte gilt es zu schützen. Auf Hanglagen sollte daher auf Maisanbau verzichtet werden beziehungsweise grundsätzlich auf besonders erosionsmindernde Anbauverfahren zurückgegriffen werden. Die Begrenzung der Stickstoffgaben und die Nachweispflicht einer ausgeglichenen Humusbilanz sind weitere Merkmale eines standortangepassten Energiepflanzenanbaus.
- **3. Ökologisch wertvolle Brachen oder Grenzertragsflächen für den Naturschutz erhalten**  
Nicht oder nur extensiv genutzte Flächen haben in der Agrarlandschaft eine besondere ökologische Bedeutung. Daher sollte ein Anteil von Flächen mit ökologischen Ausgleichsfunktionen in einer Größenordnung von mindestens 10 Prozent erhalten werden. Diese Flächen sollten extensiv bewirtschaftet werden, wenn es für die Aufrechterhaltung der ökologischen Funktionen erforderlich ist.
- **4. Grünlandbestand erhalten**  
Die Umwandlung von Grünland zu Acker ist in den meisten Fällen mit gravierenden Auswirkungen auf den Naturhaushalt verbunden. Auch wirkt sich der Umbruch nachteilig auf den Klimaschutz aus. Die Instrumente zum Erhalt von Grünland werden angesichts des zunehmenden Flächendrucks laufend überprüft.
- **5. Extensive Grünlandnutzung fördern**  
Auch extensiv erzeugter Grasschnitt kann zur Biogaserzeugung genutzt werden. Durch die extensive Nutzung können Lebensraumqualität und Artenvielfalt sowie die Vielfalt und Eigenart des Landschaftsbildes erhalten werden.
- **6. Bei vorgezogenen Ernteterminen keine vollständige Aberntung durchführen**  
In Gebieten mit besonderem Vorkommen von Bodenbrütern (zum Beispiel Feldlerchen) können vorgezogene Erntetermine, zum Beispiel in Verbindung mit Zweikulturnutzung, den Bruterfolg gravierend stören. In diesen Gebieten sollte entweder auf vorgezogene Erntetermine verzichtet werden oder es sollten Streifen oder Inseln als Rückzugsräume auf der Ackerfläche eingerichtet werden, die nicht eingesät und beerntet werden.
- **7. Auf standortangepassten Anbau von wasserzehrenden Kulturen achten**  
Auf Standorten mit beschränktem Wasserdargebot wirkt sich der Anbau wasserzehrender Kulturen besonders nachteilig auf den Wasserhaushalt aus. Das hat sowohl nachteilige Auswirkungen auf die nachhaltige Nutzbarkeit des Standortes als auch auf angrenzende Lebensräume.

des Schutzes der Fischpopulationen an die Zahlung der EEG-Vergütung geknüpft. Dabei sind die Funktions- und Leistungsfähigkeit des jeweiligen Gewässers als Bestandteil des Naturhaushalts und Lebensraums für Tiere und Pflanzen, wie zum Beispiel Auen oder Flachwasserzonen, zu erhalten und zu verbessern. Außerdem sind Beeinträchtigungen der direkt von den Gewässern abhängigen Landökosysteme und Feuchtgebiete zu vermeiden.

Ziel beim weiteren Ausbau der Wasserkraft ist eine Leistungssteigerung der Anlagen bei gleichzeitiger Verbesserung der gewässerökologischen Situation. Die Potenziale liegen also im Ersatz und der Modernisierung vorhandener Anlagen.

Auch bei der Errichtung und dem Betrieb von **Solaranlagen** sind die Naturschutzbelange zu berücksichtigen, sofern es sich um Freilandanlagen handelt. Einer der wichtigsten Ansätze zur Vermeidung von Konflikten ist die Auswahl des „richtigen“ Standorts. Der Aufwand für weitere Ausgleichsmaßnahmen wird dadurch deutlich reduziert.

Der überwiegende Teil der Photovoltaik ist auf Gebäuden installiert. Von diesen Anlagen gehen keine negativen Umweltauswirkungen aus und es ist gerade dieser Aspekt, der zur Faszination und hohen Akzeptanz der Photovoltaik führt. Dagegen können auf Wiesen, Feldern und Brachen installierte Anlagen durchaus die Umwelt beeinträchtigen, weil sie Böden

## → Synergien zwischen Naturschutz und Bioenergie

Die verschiedenen Naturschutzmaßnahmen können nicht nur zu Restriktionen in der Biomassennutzung führen; es können sich auch eine Reihe von Synergieeffekten ergeben. Beispielsweise entstehen zusätzliche Biomassepotenziale, wenn Biotope bei Kompensationsmaßnahmen und bei der Pflege von Offenland und Waldsäumen verbunden werden. Diese Potenziale belaufen sich auf etwa 150 PJ pro Jahr; das ist viel – soviel, wie die gesamten Biogaspotenziale ausmachen. Insofern gilt es zukünftig, besonders die Potenziale zu realisieren, bei denen Klimaschutz und Naturschutz Hand in Hand gehen.

Zudem entwickeln sich neue, innovative Anbausysteme wie der Mischfruchtanbau, bei dem verschiedene Energiepflanzen gleichzeitig angebaut werden. Der Mischfruchtanbau dient der Auflockerung einseitiger Fruchtfolgen und kann je nach Zusammenstellung der Saatmischung hinsichtlich der Nährstoffversorgung der Folgekultur, der Unterbrechung von Krankheitsketten oder aber auch hinsichtlich der Bodenansäuerung zur Optimierung des gesamten Systems beitragen. Aus ökologi-

scher Sicht ist neben dem Blütenangebot von beispielsweise Winterwicke, Saflor, Leinendotter und anderen Kulturen auch die Erhöhung der Biodiversität in der Kulturlandschaft von Vorteil. Zudem kann der Mischfruchtanbau durch die Einsparung von energieintensiven Produktionsmitteln (zum Beispiel Pflanzenschutz- und Stickstoffdüngemittel) einen weiteren Beitrag zum Klimaschutz leisten. Bei Zweikultursystemen werden unterschiedliche Winter- und Sommerkulturen kombiniert und die Pflanzen der ersten Ernte noch vor der Ausreife vom Feld geholt. Dadurch können die Felder zweimal im Jahr abgeerntet werden. Gleichzeitig wird das Feld ganzjährig gegen Erosion geschützt und der Einsatz von Pestiziden und Herbiziden entfällt, weil Wildpflanzen mitgeerntet werden und ein eventueller Pilzbefall den Ertrag kaum mindert. Bei Zweikultursystemen besteht Forschungsbedarf hinsichtlich der Auswirkungen auf die Fauna. Beispielsweise kann nicht ausgeschlossen werden, dass sich die frühen Schnitt- und Bearbeitungszeitpunkte insbesondere auf im Acker brütende Vogelarten negativ auswirken (Verlust der Gelege und Jungvögel).

**Durch geeignete Standortwahl, die auf die standörtlichen Empfindlichkeiten Rücksicht nimmt, durch den Verzicht auf Grünlandumbruch oder Nutzungsintensivierungen und durch einen sinnvollen Mix an erneuerbaren Energien können Auswirkungen auf Natur und Landschaft minimiert und Synergien gefunden werden.**

verdichten und versiegeln, Lebensräume zerschneiden und Vegetations- und Biotopstrukturen zerstören. Allerdings sind diese Eingriffe gering – maximal 4 Prozent der Fläche einer Freilandanlage werden mit Fundamenten versiegelt – oder sie lassen sich durch technische Maßnahmen minimieren. So kann man zum Teil auf Zäune ganz verzichten oder sie zumindest so planen, dass sie durchlässig für Kleinlebewesen sind. Weiterhin besteht die Möglichkeit, sogenannte Konversionsflächen (Deponien, industrielle und militärische Brachen) zu belegen, die aufgrund einer Vornutzung bereits eine geringe ökologische Qualität aufweisen. Ab 1. Januar 2012 wird daher mit dem EEG Strom aus Solaranlagen auf Konversionsflächen nur noch dann vergütet, wenn diese nicht als Naturschutzgebiet oder Nationalpark ausgewiesen sind.

Innerhalb der erneuerbaren Energien kommt der **Biomasse** eine besondere Bedeutung zu. Während bei der Stromerzeugung Wind- und Wasserkraft eindeutig dominieren, wird regenerative Wärme der-

zeit zu über 90 Prozent aus Biomasse bereitgestellt. Zudem ist Biomasse in absehbarer Zeit die einzige regenerative Quelle für biogene Kraftstoffe. In der Vergangenheit wurden organische Reststoffe aus der Landwirtschaft (Stroh, Rübenblatt, Gülle, Jauche und Mist), der Grünland-, Landschafts- und Waldpflege (Mähgut, Heckenschnitt und Waldrestholz) sowie der Industrie (Altholz) schon in begrenztem Umfang zur Strom- und/oder Wärmeproduktion eingesetzt. Diese ökologisch vorteilhaften Reststoffpotenziale gilt es so weit wie möglich zu nutzen, insbesondere da unter der wichtigen Prämisse einer nachhaltigen Forstwirtschaft auch die Ressource Holz begrenzt verfügbar ist und in vielen Regionen bereits umfassend stofflich und energetisch genutzt wird.

Begünstigt durch die ökonomischen und politischen Rahmenbedingungen ist die Nachfrage nach Bioenergieträgern in den letzten Jahren rapide angestiegen und hat zu einer starken Zunahme des Energiepflanzenanbaus geführt.

Bei der Strom- und Wärmeproduktion kam es insbesondere durch das EEG zu einem **Biogasanlagen-Boom**. Die neu gebauten Anlagen werden vor allem mit Mais, Getreideganzpflanzen und Gras betrieben. Daraus resultieren inzwischen erhebliche Auswirkungen auf Landwirtschaft, Umwelt, Naturschutz und Landschaftspflege. Als Folge des EEG (2009) kam es zu einer starken Zunahme des Anbaus von Mais zur energetischen Nutzung (Problematik der „Vermaisung“), häufig verbunden mit dem Umbruch wertvollen Grünlands. Die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) schätzt zur Ernte 2011 den wachsenden

Flächenverbrauch für den Anbau von Energie- und Industriepflanzen auf 2,3 Millionen ha und damit einen Anstieg des Flächenverbrauchs gegenüber dem Vorjahr um 150.000 ha (davon Maisanbau für Biogaseinsatz circa 120.000 ha). Ein großflächiger Maisanbau in Monokultur kann zur Beeinträchtigung der Grundwasserqualität und zu Bodenerosionen führen. Die Verdrängung wertvoller Lebensräume schädigt darüber hinaus die Biodiversität. Um diese Auswirkungen beim weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien zu verhindern, wurde mit dem novellierten EEG 2012 gegengesteuert und der förderfähige Anteil von Mais als Gärsubstrat wie auch Getreidekorn in Biogasanlagen auf maximal 60 Prozent der Gesamtmasse begrenzt. Mit Positivlisten für förderfähige Substrate und neuen Vergütungsstrukturen setzt das EEG 2012 auf eine verstärkte Nutzung von weniger umweltbelastenden Substraten wie Gülle und Landschaftspflegematerial sowie Alt- und Reststoffen. Höhere Rohstoffvergütungen erhalten ökologisch vorteilhafte Substrate oder Einsatzstoffe, die ökologische Mindestanforderungen einhalten (zum Beispiel Holz aus Kurzumtriebsplantagen). Da die Rest- und Abfallstoffe – selbst wenn ihr Potenzial vollständig erschlossen würde – den Bedarf in Deutschland nicht decken können, ist auch für die Bioenergieproduktion mit einer weiteren Ausweitung der Anbauflächen zu rechnen.

Unter Naturschutzaspekten stellen sich zwei Fragen: Wie ist dieser boomende Biomasseanbau für die energetische Nutzung aus Naturschutzsicht zu bewerten und wie ist der notwendige Flächenbedarf in Konkurrenz zu anderen Zielen der nationalen Nachhaltigkeits- und Biodiversitätsstrategie, die ebenfalls mit Flächenansprüchen verbunden ist, zu sehen?

Die starke Zunahme des Energiepflanzenanbaus der letzten Jahre hatte zwar positive Folgen für das Klima, aber auch negative Auswirkungen auf Natur und Landschaft, weil die Fruchtfolgen verengt, Energiepflanzen teilweise auf ungeeigneten Standorten angebaut und Grünland umgebrochen wurde. Wie jede intensive landwirtschaftliche Bodennutzung generell kann auch der Anbau von Energiepflanzen zu problematischen Belastungen von Natur und Umwelt führen. Dazu gehört die Verringerung der Biodiversität in der Landwirtschaft, das Risiko einer verstärkten Erosion oder eines erhöhten Stickstoffeintrags. Um solche Konflikte zwischen Energiepflanzenanbau und Naturschutz zu vermeiden beziehungsweise zu mindern, gibt es eine Reihe von möglichen Handlungsfeldern (siehe Kasten). Daneben bedingt eine erhöhte Nachfrage nach Energiepflanzen auch eine zunehmende Flächennutzungskonkurrenz. Sie kann dazu führen, dass ehemals extensiv oder nicht genutzte Flächen – wie etwa Flächen aus dem Vertragsnaturschutz, Säume oder Brachen – in Nutzung



genommen werden, ihre wichtigen ökologischen Funktionen nicht mehr voll erfüllen oder ganz verlieren können. Darüber hinaus sind viele dieser Flächen für den in der „Nationalen Strategie zur Biologischen Vielfalt“ angestrebten Biotopverbund von erheblicher Bedeutung.

Auch andere Nachhaltigkeitsziele beanspruchen flächenbezogene Komponenten. Beispielsweise fordert das Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG 2002, § 3) die Schaffung eines länderübergreifenden Biotopverbundes, welcher der Arten- und Lebensraumerhaltung dient und 10 Prozent der Landesfläche umfassen soll. Aus Gründen des Boden- und Gewässerschutzes ist zudem der Anbau von Grünland oder mehrjährigen Kulturen auf erosionsgefährdeten Flächen einem Anbau von einjährigen Kulturen vorzuziehen.

Fläche ist in Deutschland ein knappes Gut, an das aufgrund unterschiedlicher Sichtweisen unterschiedliche Anforderungen gestellt werden. Es existieren vielfältige Nutzungskonkurrenzen um diese Flächen. Dem steuern zwar einzelne Entwicklungen entgegen, wie beispielsweise Ertragssteigerungen in der Landwirtschaft und zunehmende Nutzung von Synergien. Insgesamt werden diese Effekte die Konkurrenzen entschärfen, aber nicht aufheben. Die aufgezeigten potenziellen Konflikte zwischen Naturschutz und Klimaschutz sind nicht unlösbar – im Gegenteil: Durch geeignete Standortwahl, einen natur- und umweltverträglichen Anbau von Biomasse zur energetischen Nutzung und einen sinnvollen Mix an erneuerbaren Energien können negative Auswirkungen auf Natur und Landschaft minimiert und Synergien gefunden werden. Auf diese Weise lässt sich sowohl dem Ziel des nachhaltigen Ausbaus der erneuerbaren Energien als auch der Erhaltung der biologischen Vielfalt Rechnung tragen.

Infos: Bundesamt für Naturschutz ([www.bfn.de](http://www.bfn.de))

# STAND UND PERSPEKTIVEN ERNEUERBARER ENERGIEN

## Heutige Energienutzung in Deutschland

Sechs Tonnen Steinkohle oder rund 47.000 Kilowattstunden – so viel Energie verbrauchte 2010 im Schnitt jeder Deutsche: pro Bürger ein LKW voll Kohle. Technisch ausgedrückt sind dies insgesamt 14.012 Petajoule (PJ) Energierohstoffe. Von dieser Primärenergie kommen wegen Eigenbedarf und Verlusten im Energiesektor nur zwei Drittel als sogenannte Endenergie beim Verbraucher an. Bei der Stromerzeugung sind die Verluste noch höher: Lediglich ein Drittel der Primärenergie erreicht den Endkunden. Knapp ein Drittel dieser Endenergie nutzen wir für die Beheizung von Wohnungen, zum Kochen, für Beleuchtung und andere private Stromanwendungen. Ein weiteres Drittel geht in den Verkehrssektor, der Rest wird von Industrie und Gewerbe für die Produktion und Bereitstellung von Waren und Dienstleistungen eingesetzt.

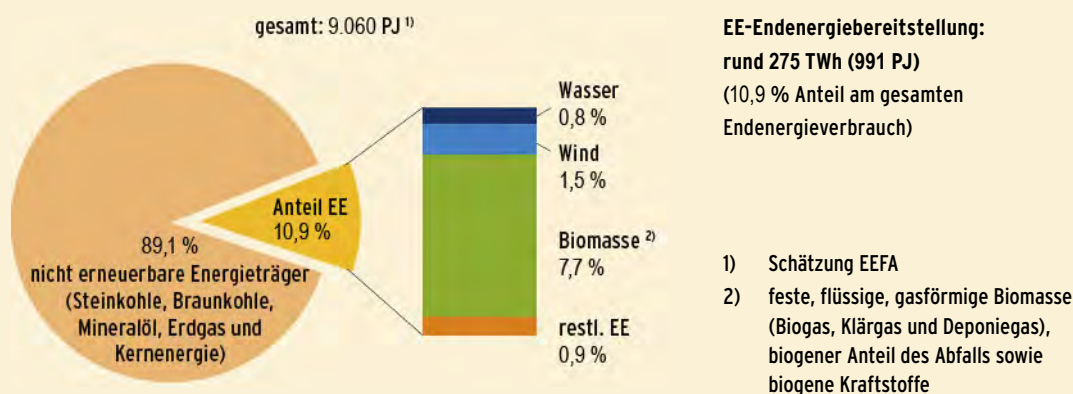
Seit zehn Jahren ist der Primärenergieverbrauch nicht signifikant gefallen – mit Ausnahme des Einbruchs 2009, bedingt durch die Wirtschaftskrise. Betrachtet man einen längeren Zeitraum, erkennt man eine steigende Effizienz in der Industrie und den privaten Haushalten, die mit immer effizienterer Technik, mit dem industriellen Strukturwandel und der Tendenz zu mehr Dienstleistungen zusammenhängt. Heute benötigt die Wirtschaft für eine vergleichbare Leistung nur noch die Hälfte der Energie wie vor 50 Jahren. Dass der Energieverbrauch seitdem trotz-

Der Beitrag erneuerbarer Energien zur Versorgung Deutschlands ist in den vergangenen zwölf Jahren von 3,2 auf fast 11 Prozent gestiegen.

dem nicht gefallen ist, liegt daran, dass wir gegenüber den 1950er Jahren ein Vielfaches konsumieren. Kühlschränke, Fernseher, Waschmaschinen, Fernreisen – was damals nur einer begrenzten Gruppe zur Verfügung stand, nehmen heute fast alle Deutschen in Anspruch. Und es wird immer mehr.

Die Entkopplung von Wirtschaftsleistung und Energieverbrauch ist darum eine zentrale Voraussetzung für eine nachhaltige Entwicklung. Anders als in den ersten Jahrzehnten der Bundesrepublik muss auch bei steigender Wirtschaftsleistung der Energieverbrauch sinken, während sich parallel der Energiemix wandelt. Unsere Energieversorgung stützt sich nach wie vor zum größten Teil auf fossile Energieträger. Der Wärmemarkt ist geprägt durch Gas und Heizöl, im Verkehrsbereich kommen nahezu ausschließlich Mineralölprodukte zum Einsatz. Elektrizität wird überwiegend aus Braun- und Steinkohle erzeugt und mit steigender Tendenz aus Erdgas. Der Anteil der nuklearen Stromerzeugung betrug 2010 etwa 23 Prozent. Dieser Anteil wird durch den Beschluss zum Atomausstieg bis Anfang der 2020er Jahre auf null zurückgehen.

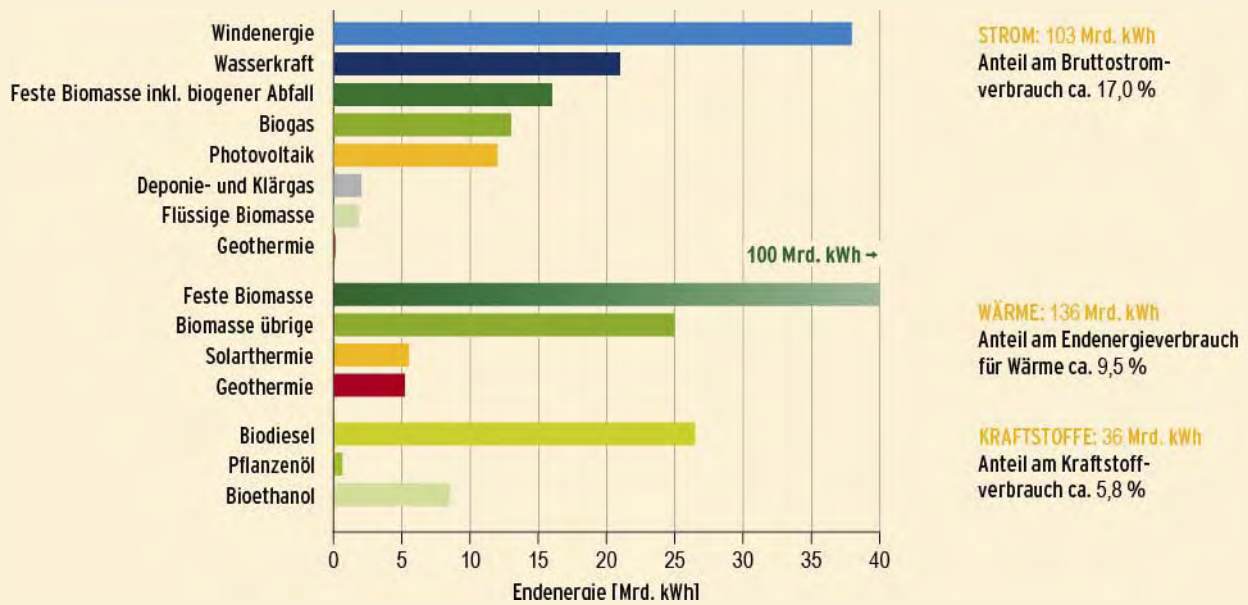
## Anteile der erneuerbaren Energien am gesamten Endenergieverbrauch in Deutschland 2010



Quelle: BMU auf Basis AGEE-Stat



### Beiträge zur Energieversorgung 2010



Beiträge erneuerbarer Energien zur Strom-, Wärme- und Kraftstoffversorgung 2010. Anteil am gesamten Endenergieverbrauch 10,9 %.

Quelle: AGEE-Stat (vorläufige Angaben)

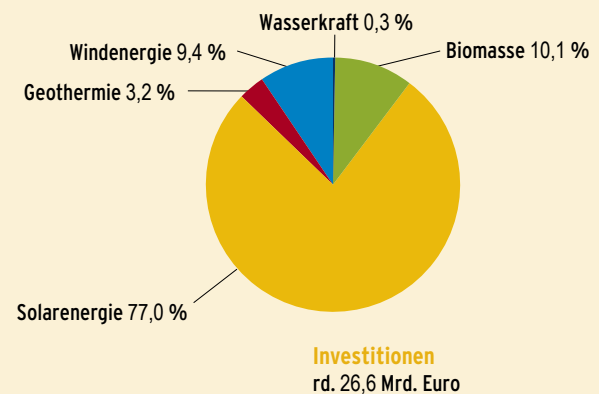
Erneuerbare Energien sind eine Alternative zu fossilen und nuklearen Energieträgern. Biomasse, Wasserkraft, Windenergie, Geothermie und die thermische sowie elektrische Nutzung von Sonnenenergie deckten im Jahr 2010 rund 11 Prozent des Endenergieverbrauchs. Auf den ersten Blick scheint dies wenig zu sein, bemerkenswert sind jedoch die hohen Wachstumsraten: Noch vor zwölf Jahren lag der Anteil bei 3,2 Prozent.

Im Wärmemarkt legen die erneuerbaren Energien ebenfalls zu: Der starke Preisanstieg für Heizöl und Erdgas hat zu einer Renaissance des Holzes beigetragen. Heute werden moderne, effiziente und umweltfreundliche Holzcentralheizungen angeboten, die meist Pellets – kleine Presslinge aus Holz- und Hackschnitzel – einsetzen (siehe Kapitel „Biomasse als Brennstoff“). Weil sie sich sehr gut regeln und automatisch mit Brennstoff beschicken lassen, bieten sie den Komfort, den Nutzer erwarten und von Öl- oder Gasheizungen gewohnt sind. Die Erschließung von Geothermie und Sonnenenergie wird immer populärer. Allerdings hat sich das Wachstum gerade bei den Sonnenkollektoren verlangsamt. Inzwischen sind in Deutschland über 14 Millionen Quadratmeter Kollektorfläche installiert, um Energie für die Warmwasserbereitung und Heizungsunterstützung bereitzustellen. Auch im Verkehrsbereich stieg der Anteil erneuerbarer Energien am Kraftstoffverbrauch: von 0,4 Prozent im Jahr 2000 auf 5,8 Prozent 2010.

### Erneuerbare Energien als Wirtschaftsfaktor

Erneuerbare Energien haben sich zu einem bedeutenden Wirtschaftsfaktor mit attraktiven Zuwachsraten entwickelt. Im Jahr 2010 wurden allein in Deutschland knapp 27 Milliarden Euro in erneuerbare Energieanlagen investiert. Aufgrund der hohen Ausbaudynamik entfielen davon fast drei Viertel auf

#### Investitionen in erneuerbare Energien



Investitionen in erneuerbare Energien in Deutschland 2010

Quelle: BMU nach ZSW

den Bau von Photovoltaikanlagen zur solaren Stromerzeugung. Weitere große Bereiche stellen die energetische Nutzung von Biomasse und die Windenergie dar. Darüber hinaus werden Erlöse von insgesamt rund 11 Milliarden Euro (2010) aus dem Anlagenbetrieb erzielt.

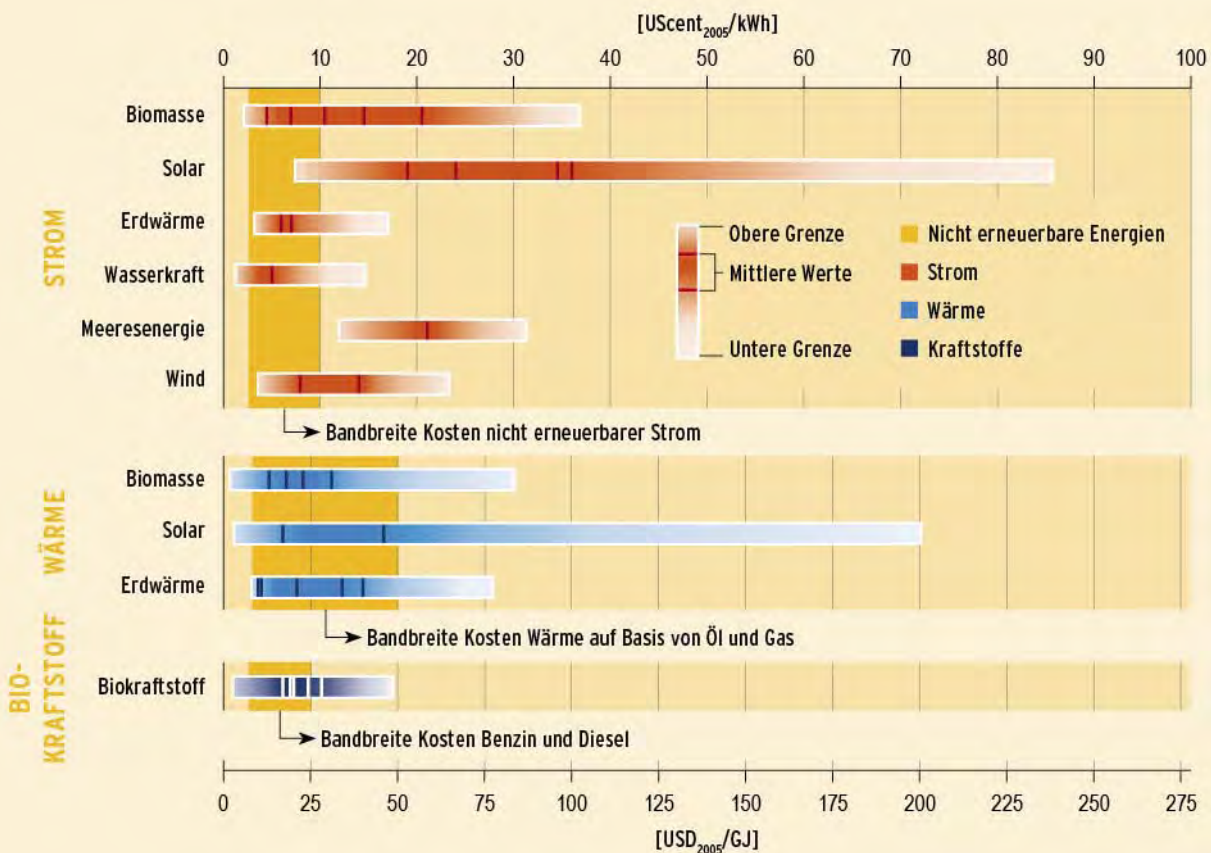
Erneuerbare Energien schaffen **Beschäftigung**. 2010 waren es in Deutschland rund 370.000 Stellen, mit steigender Tendenz. Nach wissenschaftlichen Untersuchungen kann die Zahl bis 2030 auf bis zu 600.000 anwachsen. Dabei haben erneuerbare Energien einen wichtigen strukturpolitischen Nebeneffekt. Arbeitsplätze entstehen oft dort, wo sie besonders gebraucht werden: Die Windenergie wächst besonders in den Küstenregionen, in denen Werften im Bau von Windkraftanlagen ein neues Arbeitsfeld gefunden haben. In Ostdeutschland und der ehemaligen Kohleregion in Nordrhein-Westfalen haben sich ebenfalls neue Unternehmen der erneuerbaren Energien angesiedelt und treiben den Strukturwandel voran. Drei Viertel der deutschen Führungskräfte, von einer großen

Wirtschaftszeitung nach der Branche mit dem größten Zukunftspotenzial befragt, nennen die erneuerbaren Energien an erster Stelle.

Weil erneuerbare Energien in der Regel heimische Energieträger sind, verbleibt ein Großteil der **Wertschöpfung** vor Ort. Durch Gewinne der Anlagenbetreiber, zusätzliches Einkommen durch Beschäftigung, Steuer- und Pachteinnahmen flossen 2010 rund 9 Milliarden Euro in kommunale Kassen. Insbesondere mit der Nutzung von Biomasse werden neue lokale Wirtschaftskreisläufe und damit Arbeitsplätze im Land geschaffen. Dies gilt ebenso für die Bauwirtschaft und das Handwerk. Schrittweise fließen so die finanziellen Mittel, die bislang Öl, Gas und Kohle exportierenden Ländern zu Gute kamen, in nationale Wertschöpfung.

Allerdings ist die Bereitstellung von Strom, Wärme und Kraftstoffen aus erneuerbaren Energien heute noch zum Teil teurer als herkömmliche Energie. Die sogenannten Differenzkosten werden von den Ener-

### Weltweite Kostenbandbreiten erneuerbarer Energieträger



Weltweite Kostenbandbreiten erneuerbarer Energiesysteme im Vergleich zu konventionellen Energiesystemen.

Quelle: IPCC 2011

gieverbrauchern getragen. Dies hat auch zur Folge, dass diesen Haushalten der entsprechende Betrag nicht zur Verfügung steht, um andere Güter zu konsumieren. Dieser sogenannte Budgeteffekt führt zu negativen Beschäftigungswirkungen in anderen Branchen. Umweltpolitische Maßnahmen sollten deshalb auch den Nettobeschäftigungseffekt im Auge behalten. Neuere wissenschaftliche Studien haben gezeigt, dass unter dem Strich bisher nicht nur der Bruttobeschäftigungseffekt, sondern auch der Nettobeschäftigungseffekt der Nutzung erneuerbarer Energien positiv ist. Dies liegt maßgeblich am Außenhandel im Bereich der erneuerbaren Energien, der die Beschäftigungsbilanz bereits jetzt positiv beeinflusst und weiter zunehmen soll. Viele Unternehmen exportieren deutlich mehr als sie aus dem Ausland beziehen. So stieg die Exportquote der deutschen Windanlagenhersteller im Jahr 2010 auf rund 75 Prozent.

Wichtig für einen starken Export ist auch ein funktionierender heimischer Markt. In der Vergangenheit hat sich immer wieder gezeigt, dass eine reale Chance für eine gute Positionierung am internationalen Markt nur durch die Existenz eines nationalen Marktes besteht. Ein bekanntes Beispiel dafür ist die Mobilfunktechnologie, die in Japan und Südkorea frühzeitig stark war und deren Unternehmen bis heute den Weltmarkt dominieren. Ähnliches gilt im Hinblick auf die erneuerbaren Energien für Deutschland; diese Stellung gilt es, zu behaupten und möglichst auszubauen.

## Die Förderung der erneuerbaren Energien

Der Ausbau erneuerbarer Energien geschieht nicht von selbst. Neben den technischen, rechtlichen und organisatorischen Voraussetzungen müssen auch günstige ökonomische Rahmenbedingungen gegeben sein. Eine Reihe von erneuerbaren Energieträgern werden in einigen Jahren billiger sein als viele herkömmliche Rohstoffe. Aber bis es so weit ist, muss der Staat unterstützende Rahmenbedingungen schaffen. Dann werden durch das sogenannte „Lernen am Markt“ Kostensenkungspotenziale rasch ausgeschöpft und der Förderbedarf sinkt sukzessive, bis die erneuerbaren Energien in der Breite die Wettbewerbsfähigkeit erreicht haben.

Die Bundesregierung unterstützt die Marktentwicklung erneuerbarer Energien durch verschiedene Maßnahmen. Im Zusammenhang mit dem Ausstieg aus

**2010 arbeiteten in Deutschland schon fast 370.000 Menschen in der Branche der erneuerbaren Energien. Tendenz weiter steigend.**

der Atomenergie wurden verschiedene Maßnahmen verabschiedet, die das bereits vorhandene energiepolitische Regelwerk ergänzen. Die wichtigsten Instrumente sind

- im Strommarkt das **Erneuerbare-Energien-Gesetz**, das feste, vom Netzbetreiber an die Betreiber von erneuerbaren Energieanlagen zu zahlende Tarife für umweltfreundlichen Strom garantiert;
- im Wärmemarkt das **Marktanreizprogramm** des Bundes sowie das **Erneuerbare-Energien-Wärme-Gesetz**,
- im Kraftstoffmarkt das **Biokraftstoffquotengesetz**.

## Strom

Besonders erfolgreich ist das im Jahr 2000 in Kraft getretene Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), mit dem das 1991 eingeführte Stromeinspeisungsgesetz (StrEG) mit einem erweiterten Ansatz fortgeschrieben wurde. Durch das EEG hat sich die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien seit 1999 von 30 Milliarden kWh auf über 100 Milliarden kWh im Jahr 2010 mehr als verdreifacht. Das EEG ist damit in Deutschland das wichtigste Instrument des Klimaschutzes.

Die staatliche Förderung der erneuerbaren Energien lehnt sich inzwischen in mehr als 60 Ländern der Erde an das deutsche EEG an – das damit neben der Wind- und Solartechnik selbst zu einem Exportschlag geworden ist. Drei Komponenten machen das Erfolgsrezept dieses Gesetzes aus:

- der garantierte Anschluss aller erneuerbaren Energieanlagen an das Stromnetz,
- die garantierte Abnahme und Verteilung des in diesen Anlagen erzeugten Stroms und
- feste, in der Regel für zwanzig Jahre garantierte Einspeisevergütungen für die verschiedenen Arten erneuerbarer Energien.

**Das Erneuerbare-Energien-Gesetz hat einen Boom bei der erneuerbaren Stromproduktion ausgelöst.**

Das EEG verpflichtet die Stromversorger, den zurzeit noch etwas teureren erneuerbaren Strom in das Portfolio aufzunehmen. Diese Mehrkosten werden auf alle Stromverbraucher umgelegt und erhöhen den Strompreis rechnerisch derzeit um rund 3,5 Ct/kWh. Für einen typischen deutschen Haushalt bedeutet dies Mehrkosten in einer Höhe von rund zehn Euro pro Monat. Dieser Beitrag verringert nicht nur unsere Importabhängigkeit und Treibhausgas-Emissionen, sondern schützt uns auch vor zukünftigen Preissteigerungen fossiler Energieträger. Strom aus erneuerbaren Energien dämpft die Strompreise an der Börse.

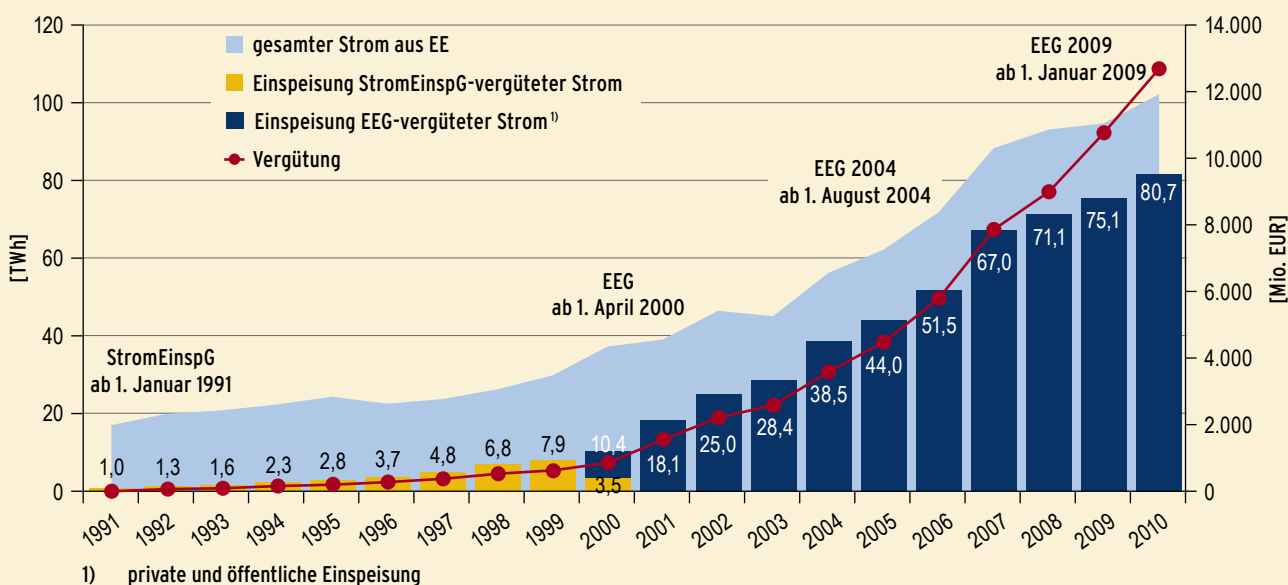
Beim Erneuerbare-Energien-Gesetz erhält der Anlagenbetreiber für jede in das Netz eingespeiste Kilowattstunde Strom vom Netzbetreiber eine festgelegte Vergütung.

Die Planungs- und Investitionssicherheit, die durch das EEG geschaffen wird, ist wesentlich für den Erfolg des Gesetzes – gerade beim Mittelstand. Beispiele aus vielen Ländern weltweit zeigen, dass die festen Einspeisevergütungen die Markteinführung erneuer-

barer Energien in der Regel zu geringeren Kosten voranbringen als Mengenregelungen mit Auktionierung oder Zertifikatehandel. Diese Sicherheit ist gerade auch für Banken und Kreditinstitute entscheidend, die über die Vergabe von Krediten für Investitionen in Anlagen zur erneuerbaren Stromerzeugung zu entscheiden haben.

Die Auswirkungen des EEG werden regelmäßig umfassend überprüft, zuletzt mit dem EEG-Erfahrungsbericht im Juni 2011. Mit den Daten dieser Erfolgskontrolle wurde bereits im Juni 2011 eine Novelle des Gesetzes vom Deutschen Bundestag verabschiedet. Das EEG bleibt dabei in seiner Grundstruktur erhalten, es wurde aber, wie es der Intention der regelmäßigen Überprüfung entspricht, in einzelnen Bereichen an die veränderten Rahmenbedingungen angepasst. Dies betrifft einzelne Vergütungssätze, aber auch Regelungen zur besseren Integration des erneuerbar erzeugten Stroms ins Netz. Im Zuge der Novellierung wurden auch die Ausbauziele deutlich erhöht. Anstelle von bislang „mindestens 30 Prozent“ soll der Anteil des erneuerbar erzeugten Stroms an der deutschen Stromversorgung bis spätestens 2020 mindestens auf 35 Prozent – und danach kontinuierlich weiter steigen. Dies entspricht im Jahr 2030 einem Anteil der Erneuerbaren von mindestens 50 Prozent und im Jahr 2050 von mindestens 80 Prozent des deutschen Strombedarfs.

**Einspeisungen und Vergütungszahlen**



EEG-vergütete Strommenge und Vergütungszahlungen nach dem Stromeinspeisungsgesetz (StromEinspG) und dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)

Quellen: BMU-Publikation „Erneuerbare Energien in Zahlen – nationale und internationale Entwicklung“, Stand 2011

## → Kosten und Nutzen des EEG

Strom aus erneuerbaren Energien ist derzeit aus betriebswirtschaftlicher Sicht – also ohne Betrachtung der eingesparten externen Kosten – teurer als Strom aus nicht erneuerbaren Energiequellen. Wegen der im EEG festgeschriebenen Abnahmepflicht entstehen für die Stromversorger höhere Beschaffungskosten. Sie betragen 2010 etwa 9,4 Milliarden Euro. Für den durch erneuerbare Energien verursachten zusätzlichen Bedarf an Regel- und Ausgleichsenergie, Transaktionskosten der Übertragungsnetzbetreiber sowie mögliche Mehrkosten durch Teillastbetrieb bei Kraftwerken wurden als Obergrenze weitere rund 0,5 Milliarden Euro ermittelt.

Zu den Nutzen des EEG zählt sein positiver Einfluss auf Innovation, Umsatz und Wertschöpfung in Deutschland, verbunden mit der Schaffung neuer Arbeitsplätze. 2010 waren rund 70 Prozent der insgesamt fast 370.000 Arbeitsplätze und rund 27 Milliarden Euro Investitionen im Bereich der erneuerbaren Energien direkt auf die Wirkung des EEG zurückzuführen.

Im gleichen Kontext sind auch die Einsparungen beim Import von Steinkohle und Erdgas zu sehen. Insgesamt konnten 2010 durch erneuerbare Energien Kosten für fossile Energieimporte in Höhe von 6,7 Milliarden Euro gespart werden. Durch die

Vermeidung externer Umweltschäden hat die erneuerbare Stromerzeugung zudem externe Kosten vermieden, die in Studien mit 5 bis 6 Milliarden Euro für das Jahr 2010 beziffert wurden (siehe Seite 20).

Außerdem fielen durch das zusätzliche Stromangebot aus erneuerbaren Energien die Kosten der Strombeschaffung über den kurzfristigen Spotmarkt 2009 um rund 6,1 Euro/MWh (Merit-Order-Effekt). Dies hat mit der Funktionsweise der Strombörse zu tun: Der zusätzliche Strom stellt der Nachfrage mehr Angebot gegenüber und senkt damit den Preis. Das kommt allen Stromkunden zugute. Rechnet man den Effekt auf den gesamten Strommarkt mit seinen langfristigen Liefervereinbarungen hoch, entspräche dies einem Wert von rund 3 Milliarden Euro.

Die verschiedenen Auswirkungen des EEG auf Umwelt, Arbeitsplätze und Strompreise lassen sich nicht in einer Zahl zusammenfassen. Doch es wird sehr deutlich, dass es viel zu kurz greift, die Auswirkungen des EEG auf die Mehrkosten zu reduzieren, die durch das Gesetz den Betrieben und Privatkunden auf der Stromrechnung entstehen.

## Wärme

Zum 1.1.2009 ist mit dem „Erneuerbare-Energien-WärmeGesetz“ (EEWärmeG) ein neues Gesetz in Kraft getreten, mit dem das Ziel verfolgt wird, den Anteil erneuerbarer Energien im Wärmebereich bis zum Jahr 2020 auf 14 Prozent zu erhöhen. Es verpflichtet Eigentümer von Neubauten, ihren Wärmebedarf anteilig mit erneuerbaren Energien zu decken. Diese Nutzungspflicht gilt für alle Eigentümer: Privatpersonen, Unternehmen oder staatliche Einrichtungen, auch wenn die Immobilie vermietet wird. Mit welchen erneuerbaren Energien diese Pflicht erfüllt wird, ist den Eigentümern überlassen. Wer keine erneuerbaren Energien einsetzen will, kann andere klimaschonende Maßnahmen ergreifen: Eigentümer können ihr Haus stärker dämmen, Wärme aus Fernwärmenetzen beziehen oder Wärme aus der so genannten Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) nutzen.

Gleichzeitig werden Heizungen in Altbauten, die erneuerbare Energieträger nutzen, im Marktanreizprogramm zusätzlich gefördert. Das Marktanreizprogramm stellt jedes Jahr rund 350 Millionen Euro

zur Verfügung. Es ist damit das größte Programm seiner Art in Europa. Unterstützt werden Biomassekessel, Sonnenkollektoren, Wärmepumpen, aber auch Nahwärme- und Biogasnetze, Anlagen der tiefen Geothermienutzung, Biogasaufbereitung und innovative Technologien wie große Wärmespeicher und Abgasnachbehandlung bei Biomassekesseln. Seit 2008 werden zusätzliche Anreize für besonders effiziente Anwendungen gegeben.

## Verkehr

Beim Kraftstoff hat die Bundesregierung ihre ursprünglich anvisierten Ziele überarbeitet. Grund dafür war die intensive Diskussion über die Nachhaltigkeit des Anbaus von Rohstoffen für Biokraftstoffe (siehe Kapitel „Biokraftstoffe“). Die EU schreibt im Rahmen der Richtlinie zur Förderung erneuerbarer Energien einen verbindlichen Anteil von Biokraftstoffen und anderen erneuerbaren Energieträgern im Verkehr von 10 Prozent für 2020 vor. Außerdem gelten europaweit Nachhaltigkeitsstandards für eingesetzte Biokraftstoffe.

## → Was macht die Bundesregierung? Ausgewählte Maßnahmen zur Marktentwicklung erneuerbarer Energien

- Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) hat sich – auch im internationalen Vergleich – als überaus erfolgreiches Instrument zum Ausbau der erneuerbaren Energien im Strommarkt erwiesen. Dadurch werden nicht nur die nationalen Ziele erreicht, sondern auch die Umsetzung der Europäischen Richtlinie zur Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien aus dem Jahr 2001 umgesetzt. Strom aus erneuerbaren Energien ist nach dem EEG vorrangig abzunehmen und mit fixen Vergütungssätzen über eine feste Laufzeit (in der Regel 20 Jahre) zu vergüten. Dadurch besteht Investitionssicherheit. Die Vergütungszahlungen werden über einen bundesweiten Ausgleichsmechanismus auf alle Stromverbraucher umgelegt. Dabei werden stromintensive Unternehmen entlastet, damit ihnen keine Wettbewerbsnachteile entstehen. Die Degression der Vergütungssätze für künftig in Betrieb gehende Anlagen führt zur Umsetzung von Innovationen und Kostensenkungen. Erneuerbare Energien werden somit zügig in die Wettbewerbsfähigkeit geführt. Mit dem EEG 2012 wurden zudem Anreize für eine marktorientierte Vermarktung und eine bedarfsorientierte Stromerzeugung geschaffen (siehe Kapitel „Neue Versorgungsstrukturen“).
- Neben dem Erneuerbare-Energien-Gesetz hat die Bundesregierung zahlreiche andere Maßnahmen zur Steigerung des Ausbaus erneuerbarer Energieträger veranlasst, unter anderem Änderungen im Bereich der Planung von Stromnetzen, der Raumplanung, im Energiewirtschaftsgesetz und in verschiedenen Verordnungen.
- Das Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz verpflichtet Eigentümer von neu errichteten Gebäuden, ihren Wärmebedarf zu einem gewissen Anteil aus erneuerbaren Energieträgern zu decken. Ersatzweise kann das Haus auch besonders gut gedämmt, an Wärmenetze angeschlossen oder mit Kraft-Wärme-Kopplung versorgt werden.
- Das Marktanzreizprogramm zur Förderung erneuerbarer Energien unterstützt vorrangig die Errichtung von Anlagen zur Erzeugung von Wärme aus erneuerbaren Energien. Mit einem Volumen von etwa 350 Millionen Euro pro Jahr ist es das größte Förderprogramm seiner Art in Europa. Kleinere Anlagen werden durch einen Zuschuss vom Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle ([www.bafa.de](http://www.bafa.de)) gefördert. Größere Anlagen werden durch verschiedene Darlehensprogramme unterstützt, welche die Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) abwickelt.
- Es gibt eine Biokraftstoffquote, der zufolge gewisse Mindestanteile an Biokraftstoffen in Verkehr gebracht werden müssen. Seit 2010 müssen 6,25 Prozent des Energiegehaltes der Kraftstoffe aus Biokraftstoffen stammen. Ab 2015 wird diese Beimischungspflicht von einer Quote auf einen Nettobeitrag zur Treibhausgas-Verminderung umgestellt. Hierbei werden auch die Treibhausgas-Emissionen berücksichtigt, die bei der Herstellung der Biokraftstoffe entstehen. Je besser die Treibhausbilanz der Biokraftstoffe, desto stärker werden sie auf die Quote angerechnet.
- Im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit und Fachinformation stellt die Bundesregierung zahlreiche Publikationen zu allen Themen der erneuerbaren Energien zur Verfügung. Ein Überblick dazu findet sich auf der Themenseite des Bundesumweltministeriums [www.erneuerbare-energien.de](http://www.erneuerbare-energien.de).

Reines Pflanzenöl oder reiner Biodiesel sind bei der Energiesteuer bis 2012 begünstigt. Außerdem gibt es eine Biokraftstoffquote, der zufolge gewisse Mindestanteile an Biokraftstoffen in Verkehr gebracht werden müssen. Seit 2010 müssen 6,25 Prozent des Energiegehaltes der Kraftstoffe aus Biokraftstoffen stammen. 2015 wird diese Quote auf einen Nettobeitrag zur Treibhausgas-Verminderung umgestellt. Die auf die Quote angerechneten Biokraftstoffmengen sind in der Regel nicht mehr von der Energiesteuer befreit.

Einziges Ausnahmen sind BtL-Kraftstoffe (Biomass-to-Liquid) und Bioethanol aus Zellulose, die bis 2015 zusätzlich steuerlich vergünstigt sind. Momentan sind sie steuerbefreit.

Zu bedenken ist, dass die Möglichkeiten zur Einsparung von Kraftstoff im Verkehrsbereich deutlich höher sind als im Stromsektor. Die optimale Strategie besteht darin, die Effizienz zusammen mit der Biokraftstoffquote zu steigern.

### Ziele der Bundesregierung (Auswahl)

	Anteile erneuerbarer Energien					Senkung			
	am Stromverbrauch		am Bruttoendenergieverbrauch	an der Wärmebereitstellung	am Endenergieverbrauch Verkehr	Stromverbrauch*	Primärenergieverbrauch*	Wärmebedarf Gebäude*	Endenergieverbrauch Verkehr**
bis spätestens	[%]	bis	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
2020	mind. 35	2020	18	14	10	10	20	20	10
2030	mind. 50	2030	30						
2040	mind. 65	2040	45						
2050	mind. 80	2050	60			25	50	80***	40

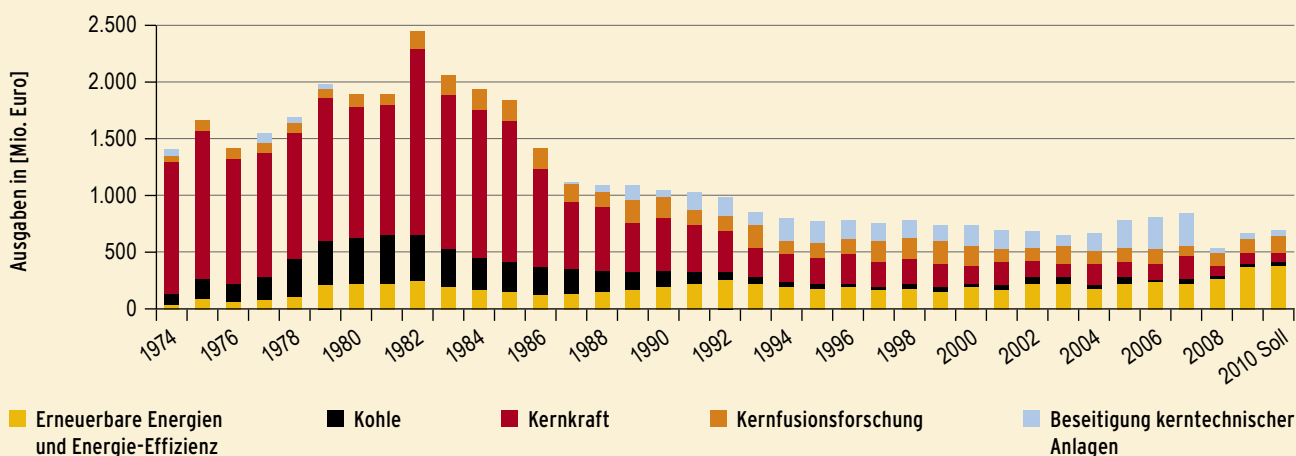
EE: erneuerbare Energien: \* gegenüber 2008; \*\* gegenüber 2005; \*\*\* bezogen auf Primärenergie

### Forschung und Entwicklung

Forschung und Entwicklung sind ein Schlüsselement für die weitere Erschließung erneuerbarer Energien. Fast drei Viertel der im Rahmen des im August 2011 verabschiedeten „6. Energieforschungsprogramms der Bundesregierung“ bereitgestellten Mittel wurden für erneuerbare Energien und Energieeffizienz eingeplant. Zwischen 2011 und 2014 sind dies rund 2,5 Milliarden Euro.

Forschungsförderung trägt dazu bei, die Spitzenposition deutscher Unternehmen auf den international rasch wachsenden Märkten zu sichern und damit Arbeitsplätze zu schaffen. Insofern ist die Forschungsstrategie Deutschlands so ausgerichtet, dass auch Technologien entwickelt werden, deren Anwendungspotenzial vorrangig im Ausland liegt. Dazu zählt unter anderem die solarthermische Stromerzeugung.

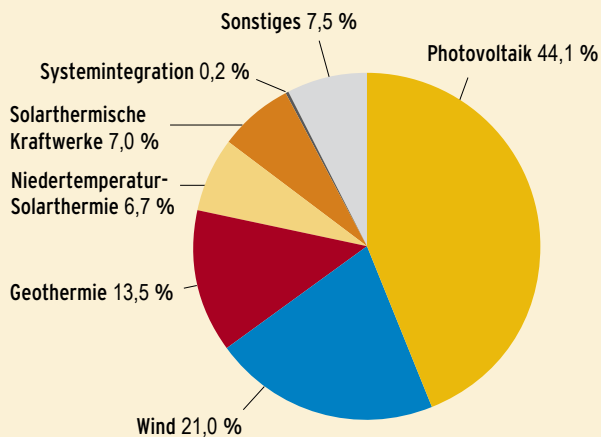
### Forschungsausgaben des Bundes für Energie



Ausgaben des Bundes für Wissenschaft, Forschung und Entwicklung nach Förderbereichen und Förderschwerpunkten

Quelle: BMU

## Forschungsförderung



Anteil am durchschnittlichen Abfluss der Fördermittel der Bundesregierung im Durchschnitt der Jahre 2005 bis 2008

Bei den Forschungsausgaben für erneuerbare Energien liegt Deutschland weltweit an der Spitze: Im Jahr 2010 hat das Bundesumweltministerium im Bereich der erneuerbaren Energien neue Forschungsprojekte mit einem Gesamtvolumen von rund 120 Millionen Euro bewilligt. Insgesamt wurden 184 neue Projekte auf den Weg gebracht. Die Schwerpunkte liegen bei der Photovoltaik (PV) und der Windenergie mit jeweils rund 40 Millionen Euro. Bei der Photovoltaik, weil hier die Vergütungssätze des EEG die höchste Degression aufweisen und entsprechende Kostensenkungen erreicht werden müssen. Zudem besteht hier das größte Innovationspotenzial. Die hohe Bedeutung der Windenergieforschung ergibt sich daraus, dass vor allem im Offshore-Bereich große technische Herausforderungen zu bewältigen sind. Neben PV und Windenergie hat auch der neu geschaffene Förderschwerpunkt Systemintegration mit knapp 30 Millionen Euro starkes Gewicht. Er zielt auf die Optimierung der Stromversorgung für einen hohen Anteil erneuerbarer Energien ab.

Aber auch in den anderen Bereichen der erneuerbaren Energien wird die Forschungsförderung auf hohem Niveau fortgesetzt. Um die ambitionierten Ausbauziele der Bundesregierung zu erreichen, werden alle erneuerbaren Energien gebraucht. Eine Übersicht über sämtliche geförderten Projekte findet sich unter: [www.erneuerbare-energien.de](http://www.erneuerbare-energien.de).

## Potenziale erneuerbarer Energien

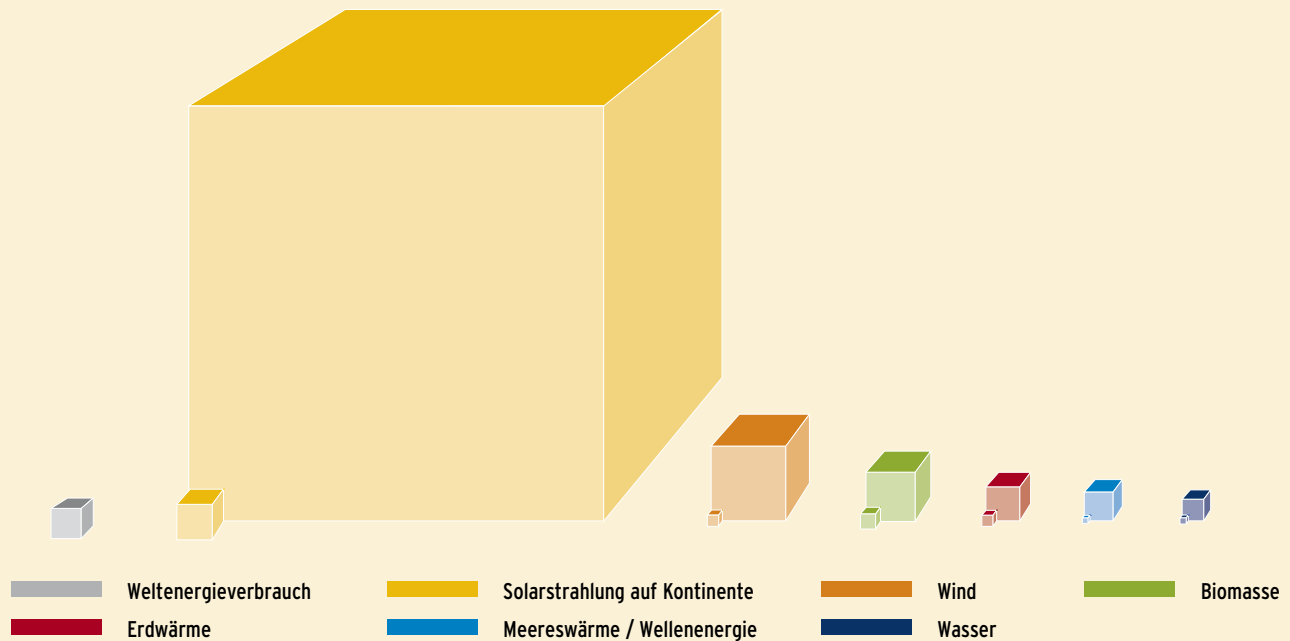
Auf unserer Erde sorgt ein außerordentlich großes Angebot an unerschöpflichen Energieströmen dafür, dass prinzipiell ein Vielfaches unseres Energiebedarfs mit erneuerbaren Energien und ohne Rückgriff auf endliche Ressourcen gedeckt werden kann. Zur Verfügung stehen die eingestrahlte Solarenergie, die kinetische Energie des Windes, der Meereswellen und der Meeresströmungen, die jährlich nachwachsende Biomasse, die potenzielle Energie des Wassers in Flüssen und Seen, die geothermische Energie und die Wärmeenergie der Meere. Diese **Energieströme entsprechen etwa dem 3.000-Fachen des jährlichen Weltenergieverbrauchs**. Aus diesem theoretischen Potenzial erneuerbarer Energien (Grafik „Natürliches Angebot erneuerbarer Energien“; große Würfel im Hintergrund) lassen sich die **Nutzungspotenziale** ableiten, welche die möglichen Energieerträge in einer für den Endverbraucher nutzbaren Form – also Wärme verschiedener Temperatur, Elektrizität und Brenn- oder Treibstoffe – bereitstellen. Bei der Ermittlung dieser sogenannten „technischen Potenziale“ sind verschiedene Kriterien zu beachten:

- **Grenzen für Wirkungsgrade, Anlagengrößen und technische Entwicklungspotenziale** der derzeit vorhandenen oder in absehbarer Zeit verfügbaren Nutzungstechniken;
- **Strukturelle Restriktionen** wie Nutzungseinschränkungen infolge der Ortsgebundenheit (Erdwärme), ein begrenzter Transportradius (Biomasse), die Verfügbarkeit von Flächen oder Konkurrenznutzungen (Kollektoren, Solarzellen, Energiepflanzenanbau), eine nicht vorhandene Infrastruktur (wie noch nicht ausgebaute Wärmenetze), begrenzte Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit der Energiedarbietung (bei Strom aus fluktuierenden Quellen wie Wind oder Solarstrahlung) und weitere nicht technische Restriktionen wie beispielsweise die Akzeptanz der Bevölkerung;
- **Ökologische Restriktionen** hinsichtlich der Flächenbeanspruchung (Wind- und Solarenergie), die Beeinträchtigung von Fließgewässern (Wasserkraft) und Landschaftsbildern (Windenergie) sowie eingeschränkte Nutzungsmöglichkeiten von Biomasse (etwa Reststoffe aus Forst- und Landwirtschaft; Energiepflanzenanbau).

Diese technischen Potenziale erneuerbarer Energien sind somit keine für alle Zeiten unverrückbare Größe. Sie liefern einen Orientierungsrahmen für das innerhalb eines längeren Zeitraums Machbare und zeigen, welche Bedeutung die einzelnen Energiequellen und Nutzungstechnologien für die betrachteten Länder oder Regionen haben können. Vom technischen



## Natürliches Angebot erneuerbarer Energien



Hintere Würfel: Das natürliche Angebot der erneuerbaren Energien ist außerordentlich groß.

Vordere Würfel: Die daraus technisch gewinnbaren Energiemengen in Form von Strom, Wärme und chemischen Energieträgern übertreffen den derzeitigen Weltenergieverbrauch (grauer Würfel, links) um etwa das Sechsfache.

Quelle: DLR

Potenzial ist das **realisierbare** oder **erschließbare Potenzial** abzugrenzen. Es beschreibt den Beitrag der erneuerbaren Energien, der in einem langfristigen Zeitraum (beispielsweise 50 Jahre) tatsächlich zu erwarten ist.

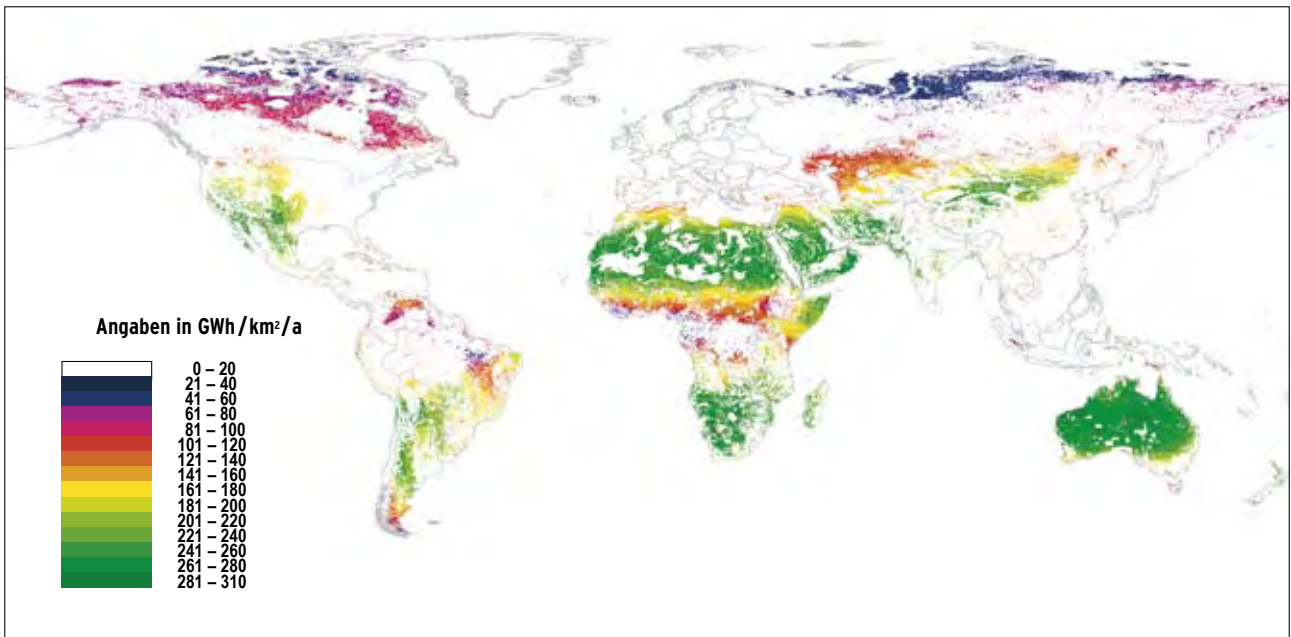
Unter Beachtung dieser einschränkenden Kriterien sind von den natürlichen Energieströmen nur wenige Promille (Solarstrahlung, Wind) bis Prozente (Biomasse, Erdwärme) energetisch nutzbar (Würfel im Vordergrund). Lediglich bei der bereits konzentrierten Wasserkraft ist eine technische Nutzung im Bereich von 10 Prozent möglich.

Das global realisierbare Potenzial der erneuerbaren Energien liegt aber selbst bei strengen Restriktionen in der Größenordnung des Sechsfachen des derzeitigen weltweiten Bedarfs an Endenergie. Die Flächen zur Nutzung von Solarstrahlung sind bei dieser beispielhaften Abschätzung auf 2 Prozent der globalen Landfläche begrenzt worden, was rund 10 Prozent der nicht für Siedlungen, Wald und Landwirtschaft derzeit genutzten Fläche entspricht. Die potenziellen Anbauflächen für Energiepflanzen beanspruchen rund 5 Prozent der landwirtschaftlich genutzten Flächen. Etwa zwei Drittel dieses realisierbaren Potenzials stellt die Strahlungsenergie der Sonne. Erneuerbare Energien können also im Prinzip auch einen

**Das realisierbare Potenzial der erneuerbaren Energien liegt bei einem Mehrfachen des derzeitigen weltweiten Bedarfs an Endenergie.**

weiter steigenden Energiebedarf der Menschheit vollständig und auf Dauer decken. Beiträge erneuerbarer Energiequellen im Bereich von 50 Prozent und mehr am Weltenergieverbrauch werden darum in verschiedenen Zukunftsentwürfen bereits bis Mitte dieses Jahrhunderts für möglich gehalten (siehe Kapitel „Perspektiven erneuerbarer Energien“).

Allerdings variiert das Angebot an erneuerbaren Energien räumlich sehr stark. Dies zeigt das Beispiel solarthermischer Kraftwerke (siehe Seite 89). Für diese Technologie, die die Solarstrahlung in konzentrierter Form verwendet, liegen die Regionen mit dem größten Potenzial alle im sogenannten „Sonnen-gürtel“ der Erde, also zwischen dem 20. und 40. Breitengrad der südlichen und nördlichen Hemisphäre (siehe Grafik „Globales technisches Potenzial“). Dafür sind vor allem die tropische Bewölkung im Bereich des Äquators und die Tiefdruckgebiete in den Westwindzonen verantwortlich. Ein ähnliches Muster ergibt sich auch für photovoltaische Systeme. Allerdings hat hier die Bewölkung einen weniger starken

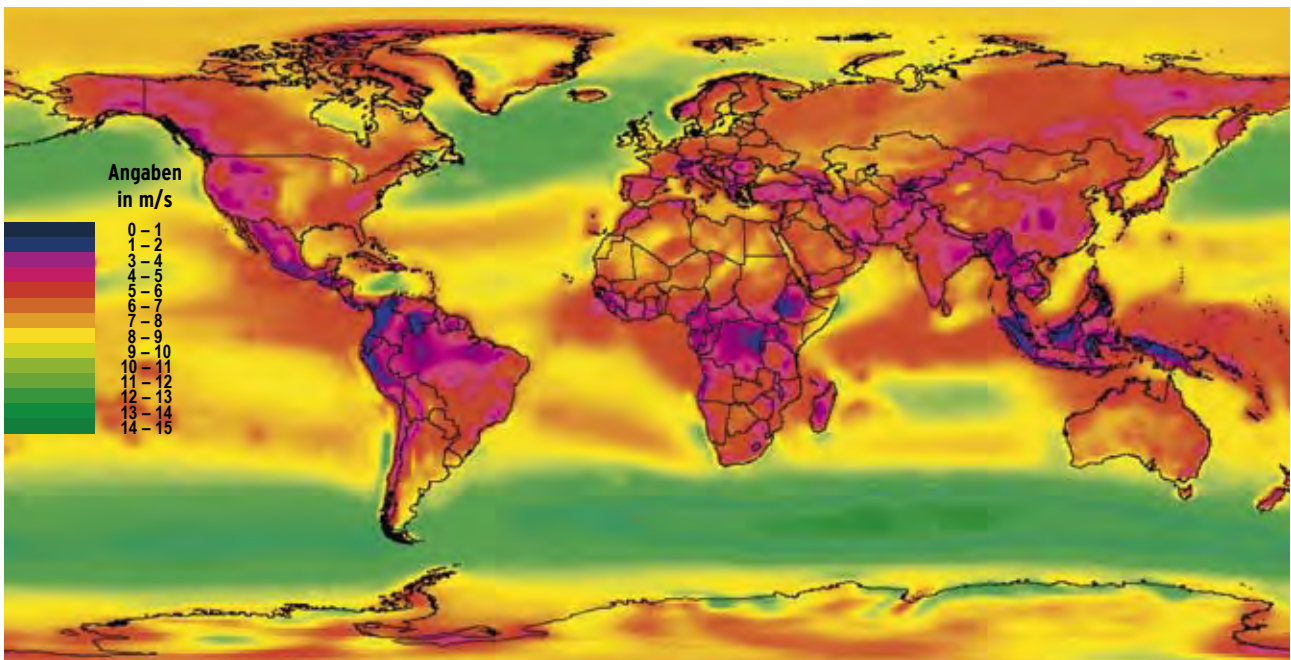


Globales technisches Potenzial der Stromerzeugung aus solarthermischen Kraftwerken. Angegeben ist der elektrische Energieertrag in einem Jahr bezogen auf einen Quadratkilometer verfügbarer Landfläche.

Quelle: DLR

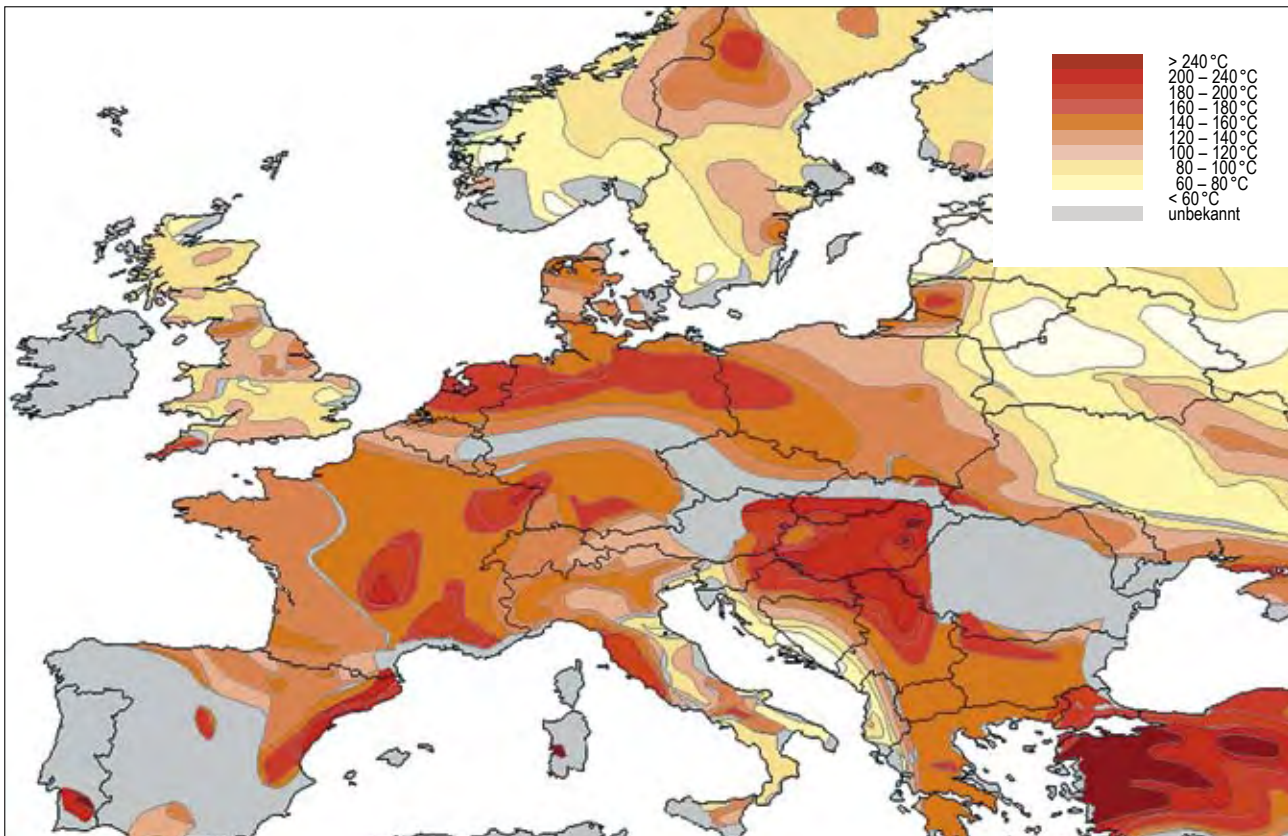
Einfluss, da die Photovoltaik auch diffuse Strahlung nutzt. Verstärkt werden die räumlichen Potenzialunterschiede, wenn technische Einschränkungen und Abzüge für nicht nutzbare oder anderweitig genutzte Flächen berücksichtigt werden. Dies sind beispielsweise Siedlungsflächen, Wald und landwirtschaftliche Flächen, Gewässer und Sümpfe, Dünen, Schutzgebiete oder Flächen, die auf Grund zu hoher Geländeneigung nicht für die Energiebereitstellung geeignet sind. Wie die Weltkarte zeigt, haben Nordafrika,

die arabische Halbinsel und Australien ein enorm hohes Potenzial für die solarthermische Stromerzeugung. Allein in Nordafrika könnte mehr als das Hundertfache des Weltstrombedarfs mittels solarer Kraftwerke bereitgestellt werden. Nordafrikanische Standorte liefern mit 200 bis 300 GWh/km²/a auf jedem Quadratkilometer Landfläche genau so viel Energie wie ein konventionelles Kraftwerk mit 50 MW Leistung und 6.000 Volllastbetriebsstunden pro Jahr. Auch der Mittelmeerraum eignet sich als



Langfristige Mittelwerte der Windgeschwindigkeit in 80 m Höhe über Grund in m/s.

Quelle: DLR



Temperaturen der Gesteinsschichten in 5.000 m Tiefe in Europa als Indikator für die vorhandenen geothermischen Stromerzeugungspotenziale.

Quelle: Bestec 2004

Lieferant von Solarstrom. Die in Spanien prinzipiell verfügbaren Flächen- und Einstrahlungspotenziale reichen rechnerisch sogar aus, um so viel Strom zu produzieren, wie Europa heute verbraucht.

Das technische Potenzial der Windenergie hängt wieder von anderen Faktoren ab: Über den Landmassen der Kontinente, wo die raue Geländestruktur den Wind abbremst, ist die mittlere Windgeschwindigkeit deutlich niedriger als über den Weltmeeren, wo der Wind nahezu ungebremst weht. Eine der stürmischsten Regionen der Welt ist die Nordsee. Aber auch an Land gibt es Lagen, an denen durch besondere Geländeformen hervorragende Windverhältnisse zu finden sind. Durch die höheren Masten heutiger Generationen von Windenergieanlagen steigt die Energieausbeute gegenüber alten Anlagen deutlich.

Insgesamt variiert das technische Potenzial der einzelnen erneuerbaren Energiequellen räumlich stark. Je breiter also die Vielfalt der genutzten Energiequellen und Technologien ist – Sonnenenergie, Wind, Geothermie, Biomasse, Wasserkraft –, desto eher können regionale Defizite bei einer Energiequelle durch Potenziale anderer Energiequellen ausgeglichen werden. In praktisch jedem Land harren attraktive Segmente erneuerbarer Energien auf ihre Nutzung.

Bestimmte Regionen mit sehr großen Potenzialen erneuerbarer Energien können darüber hinaus längerfristig zu Lieferanten kostengünstiger Sekundärenergien werden. So kann der heutige Welthandel mit fossilen Energien langfristig durch einen entsprechenden Handel mit erneuerbaren Energien in Form von Elektrizität und Wasserstoff abgelöst werden.

## Potenziale für Europa

Europa verfügt über eine große Vielfalt erneuerbarer Energieressourcen, die bisher sehr unterschiedlich ausgeschöpft werden. Das realisierbare Wasserkraftpotenzial ist mit 80 Prozent bereits weitgehend erschlossen, wenn man die Errichtung neuer Kraftwerke an naturbelassenen Flüssen ausschließt. Auch die Biomasse wird bereits in größerem Umfang genutzt. Allerdings liegen gerade im Bereich Biomasse auch noch große Potenziale brach. Die anderen Möglichkeiten erneuerbarer Energiebereitstellung werden bisher nur zu Bruchteilen ausgenutzt. Insgesamt steht in Westeuropa ein gesichertes technisches Potenzial erneuerbarer Energien von mindestens 40.000 PJ pro Jahr zur Verfügung, dies entspricht etwa 60 Prozent des gegenwärtigen Primärenergieverbrauchs der EU-27-Länder.

Sind alle erneuerbaren Energien erst einmal in der zukünftigen Energieversorgung etabliert, können in den nächsten Dekaden weitere Potenziale erschlossen werden. Einige Beispiele dafür sind:

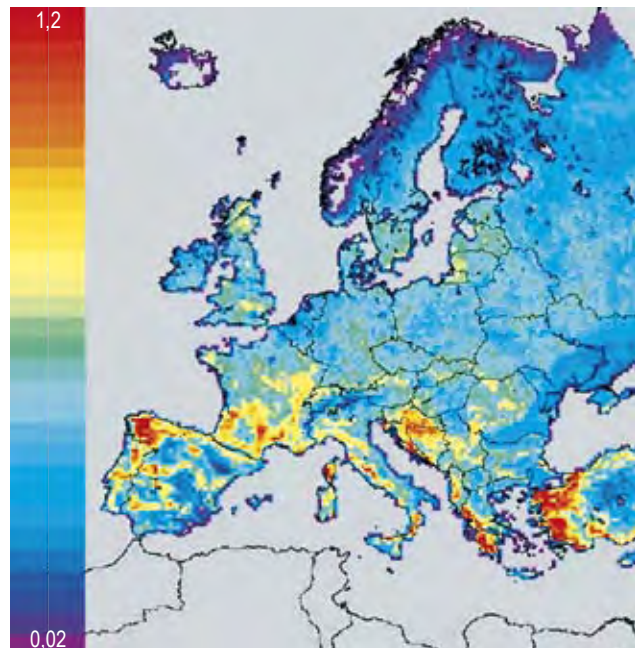
- eine ausgedehntere Nutzung von Windenergie auf See an europäischen Küsten mit rund 2.000 TWh/a zusätzlicher Stromerzeugung;
- Energiepflanzenanbau auf zusätzlichen landwirtschaftlichen Stilllegungsflächen von insgesamt 30 Millionen Hektar mit zusätzlich 3.500 PJ/a Primärenergie;
- Nutzung weiterer Geothermieressourcen mit Stromerzeugungspotenzialen in Westeuropa bis zu 1.700 TWh/a;
- Strom aus solarthermischen Kraftwerken mit Standorten in Nordafrika im Rahmen eines mediterranen Stromverbunds in der Größenordnung einiger 10.000 TWh/a.

Zusammen ergibt dies ein zusätzliches Primärenergiepotenzial von mehr als 80.000 PJ pro Jahr, mit dem prinzipiell auch ein steigender Energiebedarf Westeuropas langfristig mit erneuerbaren Energien gedeckt werden kann.

## Potenziale für Deutschland

Deutschland ist ein gutes Beispiel dafür, wie ein Land mit gemäßigttem Klima auf eine Vielfalt von erneuerbaren Energien zurückgreifen und damit beträchtliche Anteile seines Energiebedarfs decken kann. Entscheidend ist dabei nicht nur das theoretische Potenzial, das die Natur zur Verfügung stellt, sondern auch das tatsächlich **realisierbare Potenzial**, das die technischen Einschränkungen, die Kapazitätsgrenzen der Hersteller, die Akzeptanz der Bevölkerung, die Anliegen des Umwelt- und Naturschutzes und andere Faktoren berücksichtigt.

Das kostengünstigste Potenzialsegment für Strom liegt bei der restlichen Wasserkraft, der Biomasse und der Windenergie an günstigen Standorten. Auch wenn das rein technische Potenzial der **Wasserkraftnutzung** in Deutschland mit bis zu 40 TWh/a angegeben wird, schätzen verschiedene Studien das auch unter ökologischen Vorbehalten heute noch verfügbare realisierbare Ausbaupotenzial übereinstimmend auf 25 TWh/a – also ein Ausbau um weitere rund 5 TWh/a. Dabei kann gleichzeitig eine Verbesserung der gewässerökologischen Situation erzielt werden.



Durch Photosynthese erzeugte Biomasse in Millionen Tonnen Kohlenstoffeinheiten pro Jahr

Quelle: DLR

Das technische Potenzial der **Windenergienutzung** auf dem deutschen Festland für Standorte mit mittleren bis guten Windgeschwindigkeiten wird auf 175 bis circa 240 TWh/a geschätzt.

Über die Hälfte davon entfällt auf Regionen mit einer mittleren jährlichen Windgeschwindigkeit zwischen 5,5 und 6 m/s. Ein Teil der Gebiete mit gutem beziehungsweise sehr gutem Potenzial wird allerdings bereits zur Windstromerzeugung genutzt. Eine Möglichkeit für den weiteren Ausbau ist daher das Repowering, also der Austausch von veralteten kleineren Windenergieanlagen durch moderne Großanlagen.

Die im Rahmen des Repowerings auf der verfügbaren Fläche zu installierende Kapazität dürfte wesentlich von der in den Flächennutzungsplänen festgelegten zulässigen maximalen Höhe der Anlagen abhängen. Das realisierbare Ausbaupotenzial der Windenergienutzung an Land kann damit, je nach Anlagengröße, rund 70.000 MW betragen. Es handelt sich dabei ausdrücklich um eine „weiche“ Potenzialangabe, die nicht primär aus naturschutzfachlichen Belangen abgeleitet ist und vor allem auch langfristig die soziale Akzeptanz der Windenergienutzung sicherstellen soll. Wird eine sorgfältige Standortplanung vorausgesetzt, so stehen einem solchen Ausbau Naturschutzkriterien nicht als limitierender Faktor gegenüber.

Da es sich bei der **Windenergienutzung auf See** um einen großflächigen und langfristigen Eingriff in die

Meeresumwelt handelt und die anlagenbezogenen Auswirkungen von Offshore-Windparks mangels praktischer Erfahrung nur mit Unsicherheit prognostiziert werden können, kommt der Beachtung des Vorsorgeprinzips eine besondere Bedeutung zu. Nach einem Abgleich verschiedener Nutzungsinteressen sind von der Bundesregierung erste konfliktarme Flächen identifiziert worden, die unter den gegenwärtigen Bedingungen für die Startphase und die erste Ausbauphase als besondere Eignungsgebiete für Offshore-Windparks in Betracht kommen. 70.000 MW Windleistung sind auch hier möglich.

Das realisierbare Potenzial der **Photovoltaik** wird durch das Strahlungsangebot an der Modulfläche, die verfügbaren Flächen für die Aufstellung der Anlagen und deren in Zukunft erreichbaren Jahresnutzungsgrad bestimmt. Überlegungen zu einer praktikablen und ökonomisch sinnvollen Einbindung von PV-Anlagen in bestehende Siedlungsstrukturen, also unter Nutzung von Dachflächen, Fassaden, Überdachungen, Lärmschutzwänden etc., sowie die Beachtung der konkurrierenden Nutzungsmöglichkeiten durch thermische Kollektoren für Warmwasser und Raumheizung legen einen verfügbaren Flächenanteil von rund 700 km<sup>2</sup> nahe. Daraus leitet sich ein Stromerzeugungspotenzial von 150 TWh/a ab, was einer Leistung von 165 GW entspricht. Durch die vorsichtige Nutzung geeigneter Freiflächen kann das technische Potenzial noch weiter gesteigert werden.

Um eine nachhaltige Nutzung der Ressource **Erdwärme** zu gewährleisten, sollte das technische Potenzial wegen des geringen natürlichen Wärmestroms nur innerhalb eines sehr langen Zeitraums sukzessive erschlossen werden. Das theoretische Potenzial der Erdwärme ist immens und liegt bei rund 300.000 TWh. Dieses Potenzial kann allerdings nur über einen langen Zeitraum hinweg erschlossen werden, da eine einmal abgekühlte Gesteinsformation Jahrhunderte benötigt, um wieder die ursprüngliche Temperatur zu erreichen. Studien gehen deshalb davon aus, dass nur etwa ein Tausendstel davon realisierbar ist.

Wird diese geothermische Ressource mittels der ökologisch und ökonomisch wünschenswerten Kraft-Wärme-Kopplung genutzt, schränkt sich das Potenzial weiter ein, weil Geothermiekraftwerke vor allem an Standorten sinnvoll sind, wo Kunden die Wärme abnehmen. Unter dieser Annahme ergibt sich ein realisierbares Potenzial von rund 90 TWh/a.

Das Potenzial der **Biomasse** (siehe Seite 112) setzt sich aus Reststoffen und Anbaubiomasse zusammen. Ausgehend von 2,5 Millionen ha Anbaufläche für nach-

wachsende Rohstoffe und den Möglichkeiten der Nutzung von Rest- und Abfallstoffen könnte unter günstigen Randbedingungen insgesamt ein Anteil von rund 9 Prozent des derzeitigen Primärenergieverbrauchs durch Biomasse gedeckt werden. Wie sich diese auf die einzelnen Segmente Stromerzeugung, Wärme und Verkehr verteilen, ist nicht zuletzt eine politische Entscheidung, die sich an der ökonomischen und ökologischen Sinnhaftigkeit orientieren sollte.

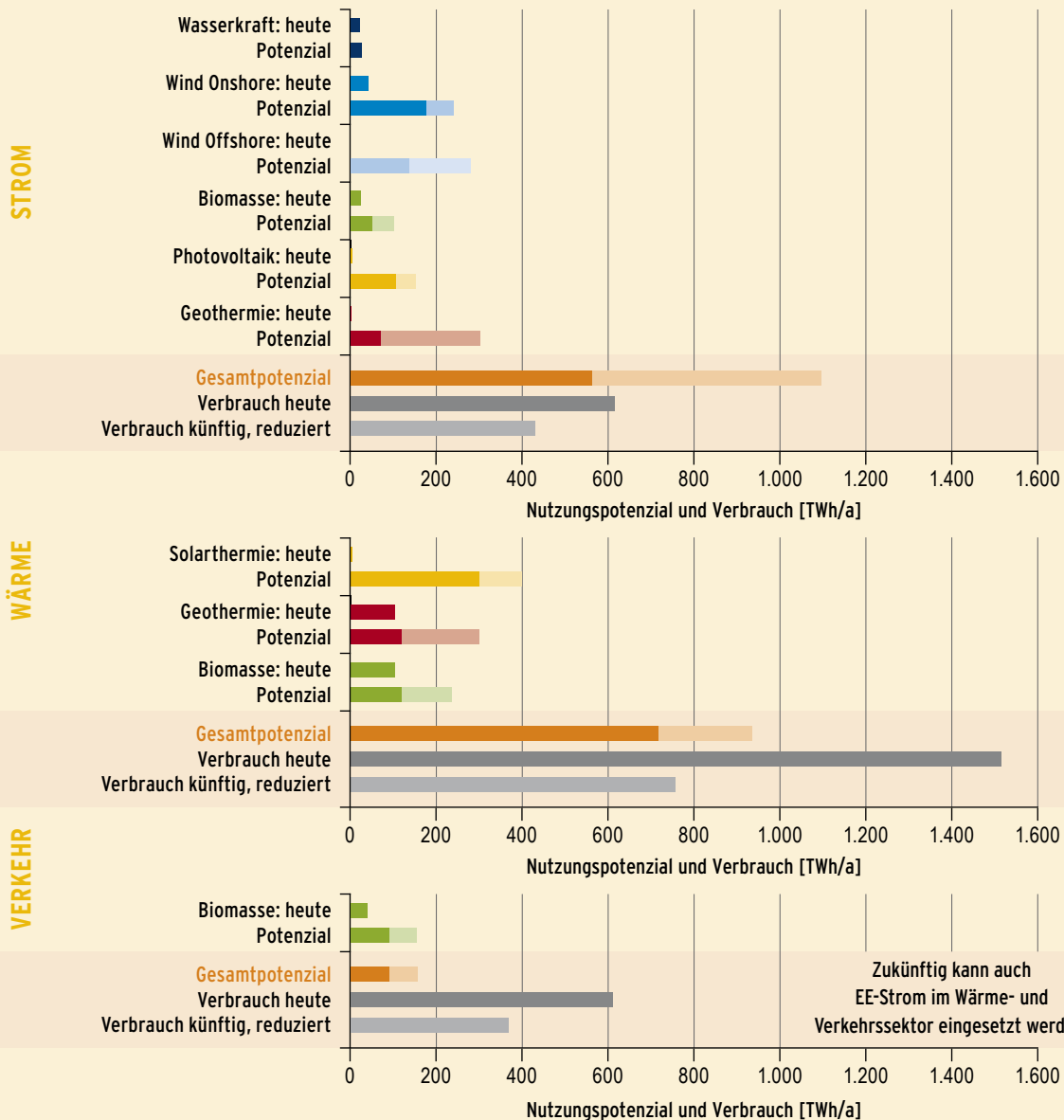
Das Gesamtpotenzial der Stromerzeugung liegt damit zwischen rund 500 und 1.000 TWh/a und damit in der Größenordnung heutiger Stromerzeugung (siehe Grafik „Potenziale erneuerbarer Energien“). Hinzu kommt der dann mögliche Stromimport aus erneuerbaren Energien aus anderen Ländern.

In ähnlicher Weise wie das Stromerzeugungspotenzial lässt sich auch das Potenzial zur **Nutzwärme** strukturieren. Das theoretische Potenzial zur Nutzung von hydrothermalen **Erdwärme** liegt etwa bei dem 300-Fachen des deutschen Wärmebedarfs. Berücksichtigt man technische Restriktionen und die begrenzten Möglichkeiten, diese Wärme über weite Strecken zu transportieren, reduziert sich dieses Potenzial auf etwa ein Viertel der deutschen Wärmenachfrage. Für diese Anwendungen werden vor allem hydrogeothermale Ressourcen im Norddeutschen Becken, im Oberrheingraben und im süddeutschen Molassebecken genutzt werden.

Für die **solarthermische Wärmeerzeugung** werden geeignete Stellflächen für Kollektoren benötigt. Hierfür kommen in erster Linie Dächer sowie die Mehrfachnutzung geeigneter Siedlungsflächen wie beispielsweise Lärmschutzwälle oder Parkplatzüberdachungen in Frage. Nach Abzug des von Photovoltaikanlagen genutzten Anteils steht in Deutschland eine Fläche von knapp einer Milliarde Quadratmeter zur Verfügung, entsprechend einem jährlichen solaren Ertrag von rund 300 bis 400 TWh/a.

Insgesamt ergibt sich für den Bereich der Wärmeerzeugung ein Nutzungspotenzial von mindestens rund 700 bis 900 TWh pro Jahr (Endenergie), was gut der Hälfte der heute zur Wärmeerzeugung eingesetzten Brennstoffmenge entspricht – je nach Annahmen für die Verteilung der Biomasse und die Entwicklung der Geothermie auch deutlich mehr. Zukünftig wird der Raumwärmebedarf wegen besserer Gebäudestandards und der Sanierung des Gebäudebestandes außerdem deutlich sinken: Der Anteil erneuerbarer Energien kann auch dadurch kräftig gesteigert werden.

### Potenziale erneuerbarer Energien



Zukünftig kann auch EE-Strom im Wärme- und Verkehrssektor eingesetzt werden.

Das vorsichtig abgeschätzte langfristig realisierbare Ausbaupotenzial erneuerbarer Energien im Vergleich zur heutigen Nutzung (die Aufhellung der Potenzialbalken steht für die mögliche Bandbreite).

Quelle: IFEU; DLR

Das Potenzial erneuerbarer Energien im **Verkehrsbereich** hängt davon ab, in welchen Anwendungen die Biomasse eingesetzt wird. Allein mit deutschen Reststoffen und Flächen ist im Prinzip mindestens ein Viertel des heutigen Kraftstoffbedarfs zu decken. Verschiedene Studien weisen nach, dass ein Einsatz der Biomasse in der Strom- und Wärmeerzeugung Vorteile bezüglich der Einsparung von Klimagasen und Ressourcen aufweist. Hinzukommen allerdings die sorgfältig ausgewählten Importmöglichkeiten von nachhaltig im Ausland erzeugter Biomasse, Einsparpotenziale bei den Fahrzeugen und die Möglichkeit,

elektrischen Strom in Elektroautos einzusetzen (siehe Seite 71).

Auch andere erneuerbare Energieträger wie feste Holzpellets oder Strom aus Ländern im Sonnengürtel können nach Deutschland importiert werden – sie sind in dieser Potenzialabschätzung nicht enthalten.

Aus der bisher geringen Ausschöpfung des Potenzials der erneuerbaren Energien sollte nicht der Schluss gezogen werden, dass allein wirtschaftliche Erwägungen eine schnelle Ausweitung erneuerbarer Energien

beeinträchtigen. Von ebenso großer Bedeutung für ihre kontinuierliche, möglichst ungestörte Erschließung ist die Berücksichtigung der Investitionszyklen im Gebäude- und Kraftwerksbereich. Ein beschleunigter Ausbau erfordert daher die rechtzeitige und vorrangige Einbeziehung erneuerbarer Energien in alle Planungen und Investitionsentscheidungen, welche die Energieversorgung und insbesondere den Siedlungsbereich betreffen.

## Die längerfristige Perspektive

Die Potenziale für erneuerbare Energien sind also da. Die Bundesregierung setzt daher auf einen dynamischen Ausbau der erneuerbaren Energien und hat sich dazu konkrete Ziele gesetzt (Tabelle Seite 39):

- Erhöhung des Anteils der erneuerbaren Energien an der Stromversorgung spätestens bis zum Jahr 2020 auf mindestens 35 Prozent und anschließend ein weiterer kontinuierlicher Ausbau auf mindestens 80 Prozent spätestens bis zum Jahr 2050.
- Erhöhung des Anteils der erneuerbaren Energien an der Wärmeversorgung auf mindestens 14 Prozent bis zum Jahr 2020.
- Erhöhung des Anteils von erneuerbaren Energien am Endenergieverbrauch des Verkehrs auf 10 Prozent im Jahr 2020.

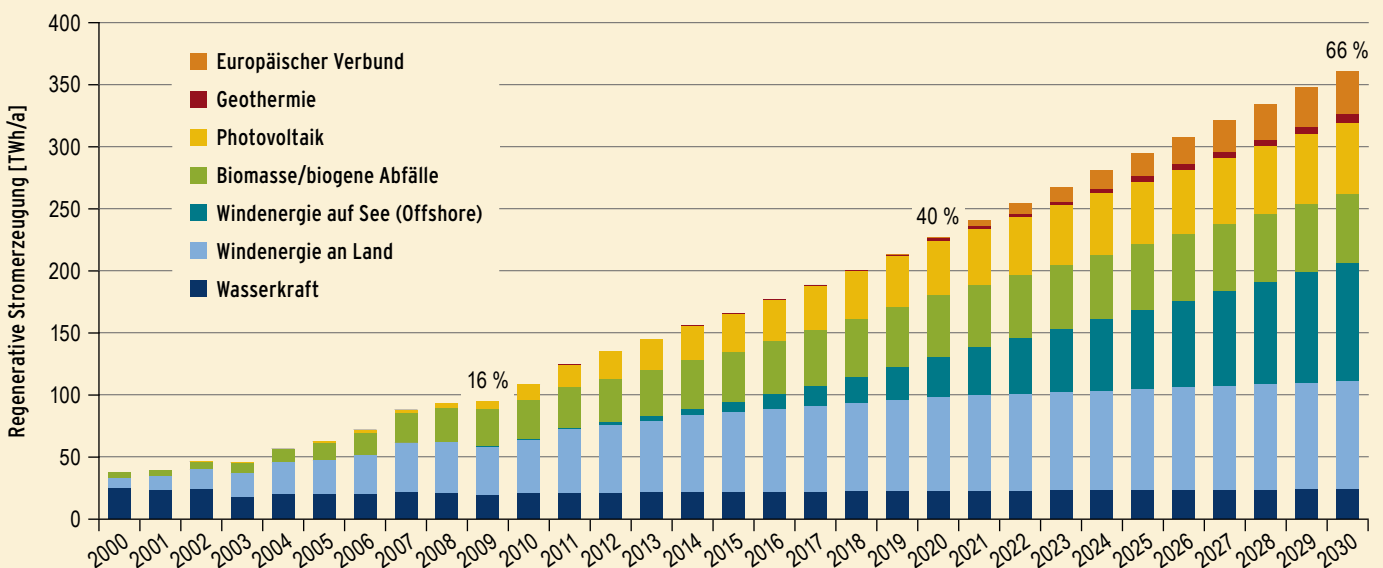
**Derzeit wird weniger als ein Zehntel des langfristig realisierbaren Potenzials an erneuerbaren Energien in Deutschland genutzt.**

- Bis 2020 soll der Anteil der erneuerbaren Energien am (Brutto-)Endenergieverbrauch 18 Prozent betragen und danach kontinuierlich auf 60 Prozent bis zum Jahr 2050 steigen.

Ergänzend wird die Strategie mit dem Ziel verfolgt, den Energiebedarf unserer Volkswirtschaft bis 2020 deutlich zu senken: Der Wärmebedarf soll im Vergleich zu 2008 um 20 Prozent, der Strom- und Kraftstoffverbrauch um 10 Prozent sinken. Bis 2050 soll der gesamte Primärenergiebedarf Deutschlands um 50 Prozent geringer sein als im Jahr 2008.

Die Ziele sind ambitioniert, aber realistisch. Bemerkenswert ist, dass viele ältere Szenarien bereits nach wenigen Jahren von der Wirklichkeit deutlich überholt wurden. Während die Prognose der Enquete-Kommission im Jahr 2002 noch sehr pessimistisch war, steigt der Anteil der erneuerbaren Energien in aktuelleren Studien zum Energiekonzept der Bundesregierung von 2010 deutlich stärker (siehe Grafik „Mögliche Entwicklung der Stromerzeugung“).

## Mögliche Entwicklung der Stromerzeugung



Entwicklung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien nach der „Leitstudie 2010“ bis 2030

Quelle: DLR, Fraunhofer IWES

Im Bereich der Wärmebereitstellung ist der Anteil der erneuerbaren Energien in den letzten Jahren ebenfalls merklich gestiegen. Mit dem Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz und dem im Mittelvolumen deutlich aufgestockten Marktanzreizprogramm ist ein Ausbau auf 14 Prozent bis 2020 und auf knapp 50 Prozent bis 2050 realistisch. Im Sinne einer Gesamtstrategie sind parallel zusätzliche Maßnahmen im Bereich der Wärmedämmung und bei der Wärmeversorgung mit Nahwärmenetzen sowie der Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung erforderlich.

Erneuerbare Energien decken also zunehmend den Energiebedarf in Deutschland. Die angestrebte Steigerung der erneuerbaren Energien bis 2020 wird sich deutlich auf die Emissionsbilanz Deutschlands auswirken. Bereits 2010 hat ihr Einsatz rund 118 Millionen Tonnen Treibhausgase vermieden (siehe Seite 22), bis zum Jahr 2020 wird es knapp das Doppelte sein. Bis zur Mitte dieses Jahrhunderts sollte jedoch eine Reduktion des gesamten energiebedingten CO<sub>2</sub>-Ausstoßes um 80 bis 95 Prozent gegenüber dem Niveau des Jahres 1990 erreicht werden.

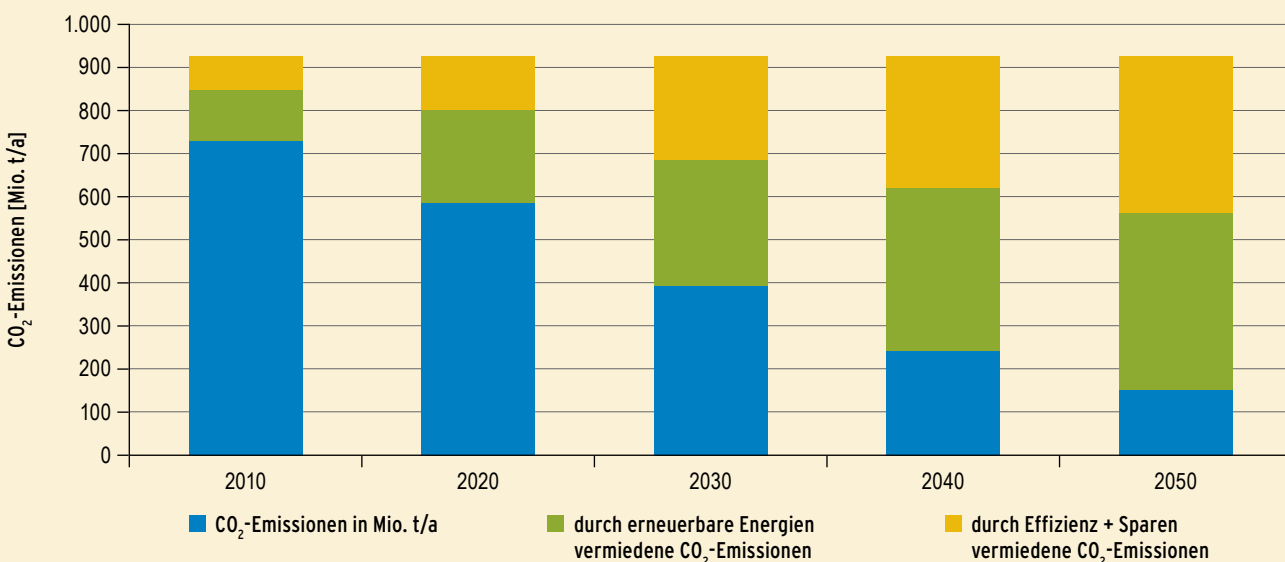
Orientiert man ein Szenario an diesem Ziel, so müssen erneuerbare Energien, Energieeffizienz und Einsparung weiter an Bedeutung gewinnen. Mit der Leitstudie 2010 hat das Bundesumweltministerium

dazu die derzeit aktuellste Untersuchung vorgelegt. In dieser Studie wird gezeigt, wie es möglich ist, den Primärenergieverbrauch deutlicher zu senken als bei der unter den derzeitigen Rahmenbedingungen absehbaren Entwicklung.

Die Effizienzstrategie bewirkt bis zum Jahr 2050 eine Reduktion des Primärenergieverbrauchs um etwa 45 Prozent gegenüber 2007 und ermöglicht es dadurch, den Beitrag der erneuerbaren Energien bis dahin auf 56 Prozent des verbleibenden Verbrauchs zu steigern, ohne dass es zu einer extremen Ausschöpfung von Einzelpotenzialen kommen müsste. Da jede Art der Energienutzung auch Wirkungen auf unsere natürliche Umwelt hat – bei fossilen und nuklearen Energien ungleich größere als bei erneuerbaren Energien –, gewährleistet diese Strategie auch einen weitgehenden Schutz natürlicher Lebensräume.

Im Kraftwerksektor ergibt sich in den nächsten Jahrzehnten aufgrund der Altersstruktur der fossilen Kraftwerke und des Abschaltens von Kernkraftwerken ein umfangreicher Erneuerungs- und Ertüchtigungsbedarf von einigen zehn Gigawatt Leistung. Im Jahr 2020 sind voraussichtlich weniger als die Hälfte der Kraftwerke des Jahres 2000 in Betrieb. Zur Deckung des bis dahin gesunkenen Strombedarfs werden in der Leitstudie knapp 106 GW neue Kraftwerksleis-

### Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland seit 1990 durch erneuerbare Energien und Energieeinsparung (Leitstudie 2010)



Quelle: DLR, Fraunhofer IWES, IfnE 2011



## → Effizienz und Sparen - wichtige Voraussetzungen für die optimale Nutzung erneuerbarer Energien

Die Potenziale zur Erhöhung der Energieeffizienz werden heute bei weitem nicht ausgeschöpft. Selbst dann nicht, wenn sie mittel- bis langfristig wirtschaftlich sind. In einer Wirtschaft, die sich vorrangig an den Bedingungen eines liberalisierten und globalisierten Marktes orientiert, werden Amortisationszeiten von nur wenigen Jahren gefordert. So schnell machen sich Energiesparinvestitionen oft nicht bezahlt.

Sowohl in privaten Haushalten als auch in den meisten Betrieben stellen die Energiekosten nur einen kleinen Kostenfaktor dar. Die möglichen Kostensenkungen sind also im Vergleich zu anderen Ausgabenbereichen, wie den Arbeitskosten, oftmals gering. Aber selbst wenn Sparmaßnahmen unter den heutigen Bedingungen steigender Energiepreise wirtschaftlich und mit entsprechend kurzer Amortisationsdauer durchgeführt werden können, unterbleiben sie in der Realität häufig. Es gibt eine Vielzahl von Hemmnissen oder Trägheiten – beispielsweise unzureichende Informationen über technische Verbesserungsmöglichkeiten oder ein zu sorgloser Konsum.

Beispiel Mietwohnung: Die Bewohner eines Gebäudes sind nicht an Erdgas oder Heizöl interessiert, sondern an einer warmen, behaglichen Wohnung. Diese Dienstleistung kann man nicht nur mit einer entsprechenden Heizung, sondern genauso gut auch durch eine verbesserte Dämmung und angepasste Bauweise erbringen. Die dazu erforderlichen Anfangsinvestitionen müssen der langjährigen Energieeinsparung gegengerechnet werden. Obwohl sich das über die Lebenszeit der Maßnahmen häufig rechnet, unterbleibt die energetische Sanierung. Gründe hierfür sind eine geringe Kapitalverfügbarkeit und die aus der unklaren Entwicklung der Energiepreise resultierenden Unsicherheiten. Hinzu tritt vielfach das Vermieter-Mieter-Dilemma – die Mehrkosten infolge der Investitionen muss zunächst der Vermieter tragen.

Im Umwandlungsbereich kann der Wirkungsgrad beispielsweise durch den Einsatz moderner Gas-Dampf-(GuD)-Kraftwerke und weiterentwickelter Kraftwerkstechnologien noch erheblich gesteigert werden. Vor allem aber die verstärkte Nutzung der Abwärme von Kraftwerken mittels Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) über Nah- und Fernwärmenetze sowie in dezentralen Einzelanlagen senkt die hohen Umwandlungsverluste bei der Stromerzeugung deutlich.

Die Potenziale zur Energieeinsparung sind beträchtlich. Analysen gehen von bis zu 50 Prozent des derzeitigen Energieverbrauchs aus, ohne dass an Energiedienstleistungen Abstriche gemacht werden müssten. Ein großer Anteil wäre durch eine beschleunigte energetische Modernisierung von Altbauten, ein weiterer beträchtlicher Anteil durch die rasche Einführung sparsamerer Fahrzeuge mobilisierbar. Aber auch in anderen Bereichen wie den elektrischen Haushaltsgeräten und der Industrie sind noch erhebliche Einsparungen möglich. In der Summe wird eine Reduktion der Energieintensität um 3 Prozent pro Jahr über einen längeren Zeitraum für möglich gehalten. Damit könnte der Energieverbrauch – auch bei einem vergleichbaren Wirtschaftswachstum wie in der Vergangenheit – absolut zurückgehen.

Die Szenarien der Leitstudie 2010 stellen dar, wie die nationalen Klimaschutzziele durch eine Kombination von Effizienzsteigerung, Einsparung und Ausbau erneuerbarer Energien erreicht werden können.

Moderne und effiziente Technologien, die in Deutschland zum Einsatz kommen, wären auch ein hervorragendes Exportgut in Volkswirtschaften mit hohem Nachholbedarf an Energiedienstleistungen – etwa China oder Indien. So könnte Deutschland eine Vorreiterrolle wie bei den erneuerbaren Energien einnehmen und davon in einigen Jahren auch wirtschaftlich profitieren.

tung installiert. Davon sind im Leitszenario fast 81 GW erneuerbare Energieanlagen. Im Jahr 2030 werden bereits mehr als 70 Prozent des Strombedarfs aus erneuerbaren Energien bereitgestellt, im Jahr 2050 sind es gut 90 Prozent. Die seit 2000 installierten Kraftwerke auf Basis erneuerbarer Energieträger erzeugen in diesem Szenario in jedem Jahr mehr Strom, als durch den Kernenergieausstieg wegfällt. Von den übrigen 25 GW fossiler Kraftwerksleistung dürfen – der Szenariophilosophie eines strengen Klimaschutzszenarios folgend – maximal 10 GW Kohlekraftwerke bis 2020 installiert werden, inklusive der Kraftwerke, die derzeit im Bau und in Planung sind. Die übrigen 15 GW sind zentrale und dezentrale Kraftwerke mit Kraft-Wärme-Kopplung auf Gasbasis.

Für diesen Ausbau der effizienten Kraft-Wärme-Kopplung spielen kleine und dezentrale Anlagen eine besondere Rolle. Sie eröffnen der Kraft-Wärme-Kopplung neue Anwendungsgebiete im unteren Leistungsbereich durch die verstärkte Versorgung auch von kleineren Einzelobjekten. Langfristig kann die Leistung dieser dezentralen Kraftwerke im Leitszenario auf insgesamt 17 GW wachsen.

Im Jahr 2050 ist praktisch der gesamte Kraftwerkspark erneuert. Den größten Teil der installierten Leistung tragen dann Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien bei. Durch die verschiedenen Maßnahmen reduzieren sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen allein im Umwandlungssektor bis 2020 um 40 Prozent und

bis 2050 um 85 Prozent gegenüber dem Jahr 2000. Dies zeigt, dass die Atomenergie zur Erreichung des Klimaschutzziels nicht benötigt wird. Im Gegenteil: Die Leitstudie zeigt, dass ein konsequenter Ausstieg notwendig ist, um den Umbau hin zu einer regenerativen Energiewirtschaft nicht zu blockieren.

Das Szenario geht davon aus, dass ähnliche Kombinationen aus Effizienzsteigerungen und dem Ausbau erneuerbarer Energien auch in der Wärmeversorgung und im Verkehr umgesetzt werden. Kurz- bis mittelfristig dominieren hier verstärkte Effizienzbemühungen, mittel- bis langfristig wächst die Bedeutung des Beitrags der erneuerbaren Energien.

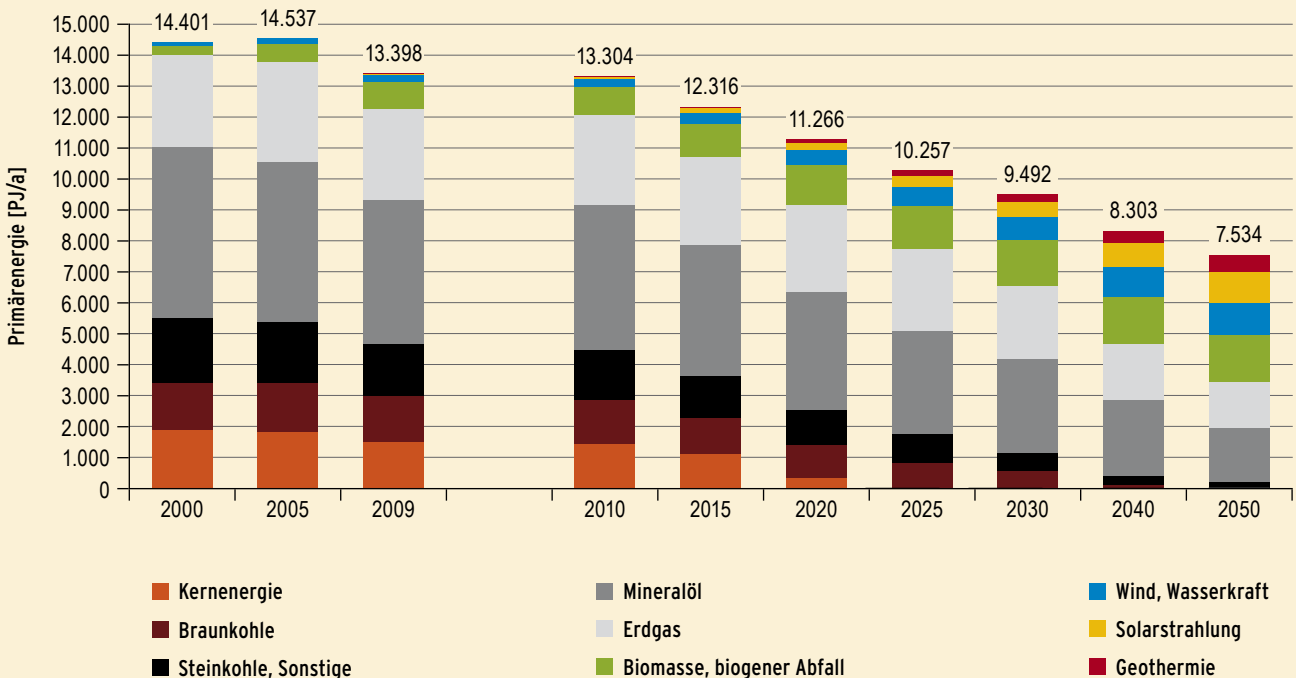
Folgen andere Länder dieser oder einer ähnlichen Strategie – was angesichts der zusammenwachsenden Märkte eine wesentliche Voraussetzung für einen erfolgreichen Umbau der Energieversorgung in Deutschland ist – können neben den heimischen erneuerbaren Energiequellen auch ausländische Ressourcen kostengünstig genutzt werden. Dies kann mittelfristig der Import von Windenergiestrom von ertragreichen europäischen Küstenregionen sein, längerfristig aber ebenso der Import von Strom aus Solarkraftwerken im Mittelmeerraum über ein verstärktes europäisches Verbundnetz (siehe Seite 60).

In der Leitstudie liegt der Beitrag dieses Importstroms im Jahr 2050 bei gut einem Fünftel der gesamten Stromerzeugung. Wegen der beträchtlich reduzierten Anteile von Uran, Erdgas, Steinkohle und Mineralöl am Primärenergieverbrauch ist dennoch die Abhängigkeit von Energieimporten wesentlich geringer als heute.

Es wurden auch verschiedene Varianten gerechnet; sowohl solche, in denen energiepolitische Defizite auftreten und die Klimaschutzziele nicht erfüllt werden, als auch Szenarien, in denen Effizienz und erneuerbare Energien noch dynamischer verfolgt werden. In diesen ehrgeizigen Szenarien führt die Kombination von Effizienz- und erneuerbaren Energiemaßnahmen zu einem Anteil von erneuerbaren Energien an der gesamten Energieversorgung von fast zwei Dritteln.

Entscheidend für die ökonomischen Auswirkungen sind die kommenden Energiepreise und die Kosten des Emissionshandels. Geht man in einer eher zurückhaltenden Analyse davon aus, dass der Rohölpreis auf real rund 110 US-Dollar je Barrel im Jahr 2030 steigt, so steigen die Kosten einer forcierten Effizienzstrategie gegenüber einer Weiter-so-Entwicklung einige Jahre leicht an, fallen dann aber zu Beginn der

### Primärenergie in der Leitstudie 2010



Entwicklung des Primärenergieverbrauchs nach Energieträgern in einem Langfristszenario für Deutschland

Quelle: DLR



nächsten Dekade deutlich ab: Schon ab 2020 fallen keine Differenzkosten mehr an; in den Jahren danach ist der Entwicklungspfad des Szenarios volks- und betriebswirtschaftlich kostengünstiger als die Trendentwicklung – selbst ohne Berücksichtigung externer Kosten. Der Ausbaupfad von erneuerbaren Energien und Energieeffizienz entfaltet also eine preisstabilisierende Wirkung, die dazu führt, dass die Energieversorgung insgesamt überhaupt bezahlbar bleibt. Die bis 2020 noch zu erbringenden zusätzlichen Aufwendungen erweisen sich damit als vorausschauende Investition in eine dauerhaft tragfähige Energieversorgung.

Berücksichtigt man zusätzlich die externen Kosten der Energieversorgung (siehe Seite 22), beispielsweise die Klimaschadenskosten, so weist der Beitrag erneuerbarer Energien bereits heute eine volkswirtschaftlich positive Bilanz auf.

## Erneuerbare Energien europäisch und global

Das Europäische Parlament und die Europäische Kommission haben bereits in der Vergangenheit wichtige Ziele für den Ausbau erneuerbarer Energien in Europa gesetzt. Beispielhaft dafür ist das Ziel von 1997, den Beitrag erneuerbarer Energien bis zum Jahr 2010 zu verdoppeln. Ausschlaggebend für die Aktivitäten der EU ist auch, dass mehr als die Hälfte des europäischen Energiebedarfs aus Importen gedeckt wird.

Strukturveränderungen in der Energieversorgung brauchen Zeit. Deshalb müssen heute die Weichen für die Zukunft gestellt werden. Angesichts der Herausforderungen, denen sich Europa in den nächsten Jahren und Jahrzehnten gegenüber sieht und ange-

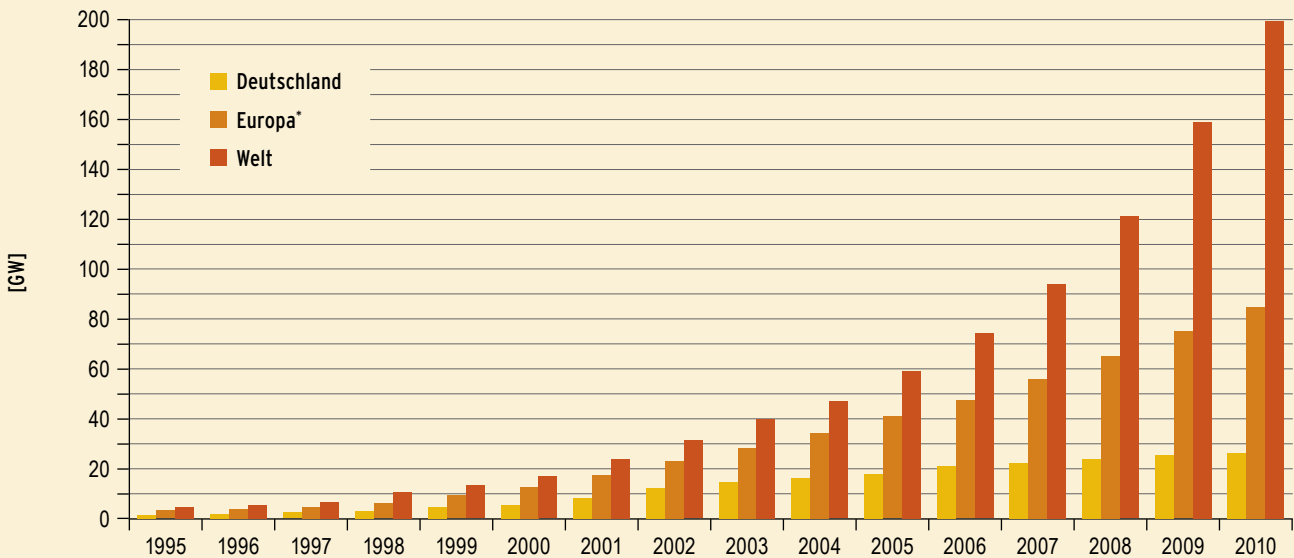
**Die Struktur der Energieversorgung ändert sich nur langsam. Die Weichen müssen heute gestellt werden.**

sichts der jüngsten Entwicklungen an den internationalen Energiemärkten haben die europäischen Institutionen Ende 2008 im Rahmen des europäischen Klimapakets eine neue Richtlinie verabschiedet, die verbindliche Ziele für Europa und die einzelnen Mitgliedstaaten festschreibt. Mit der neuen Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (2009/28/EG) ist für 2020 ein verbindlicher Anteil erneuerbarer Energien an der europäischen Endenergieversorgung von 20 Prozent und am Energiebedarf im Transportsektor von 10 Prozent für jeden Mitgliedstaat festgelegt. Daraus ergeben sich Verpflichtungen für die einzelnen Mitgliedstaaten. Deutschland muss nach dieser Richtlinie einen Anteil von 18 Prozent am (Brutto-)Endenergieverbrauch erreichen.

Den größten Beitrag zur Energieversorgung aus erneuerbaren Energien in Europa leistet die Biomasse, die vor allem zum Heizen verwendet wird. Der Beitrag der Windenergie steigt kontinuierlich mit 25 Prozent jährlichem Zuwachs.

Das Beispiel der Windenergie zeigt allerdings auch, dass die Erfolge bei der Erschließung erneuerbarer Energien in den EU-Staaten sehr unterschiedlich sind und man noch weit von einem erfolgreichen Gleichschritt entfernt ist. Dies liegt weniger an den natürlichen Potenzialen als vielmehr an den jeweiligen energiepolitischen Rahmenbedingungen der einzelnen Mitgliedstaaten.

## Installierte Windleistung



Entwicklung der installierten Windleistung in Deutschland (bis 2010), der EU und weltweit in den Jahren 1995 bis 2010.

\* Ab 2003 einschließlich installierter Leistungen der neuen Mitgliedstaaten.

Quellen: EWEA, BWE, GWEC, Ren21

Im internationalen Maßstab spielen erneuerbare Energien je nach Region eine ganz unterschiedliche Rolle. Besonders hoch ist ihre Bedeutung in den weniger entwickelten Regionen, insbesondere in Afrika, wo sie oft in Form von Feuerholz fast die Hälfte des Energiebedarfs decken. Diese „traditionelle Nutzung von Biomasse“ ist jedoch meist nicht nachhaltig. Einfache Formen des Kochens und Heizens haben Gesundheitsschäden durch offenes Feuer sowie den Raubbau der Wälder zur Folge. Nachhaltige Biomasse-Anwendungen sowie andere erneuerbare Energiequellen wie etwa Solarenergie können, gerade in weniger entwickelten Regionen, häufig Alternativen zur dezentralen Energieversorgung ohne schädliche Gesundheitswirkungen liefern. Diese sind vielfach fossilen Alternativen (wie etwa Dieselgeneratoren) in ihren langfristigen Kosten überlegen. Die Nutzung der Wasserkraft durch große Staudämme ist oft nicht nachhaltig, da sie mit gravierenden sozialen und ökologischen Folgen einhergehen kann.

Die erfolgreiche Bekämpfung der Armut ist eine Grundvoraussetzung für den Aufbau einer nachhaltigen Energieversorgung in Entwicklungs- und Schwellenländern.

Viele dieser Länder laufen im Zuge einer nachholenden Industrialisierung Gefahr, sich die Energieversorgung nicht mehr leisten zu können, da ihr Energie-

verbrauch steigt und die Öl- und Gas-Ressourcen immer knapper werden. Auch wenn bereits in der Vergangenheit versucht wurde, dieser Entwicklung durch eine intensivere und nachhaltige Nutzung erneuerbarer Energien vorzubeugen, sind die Ergebnisse bisher eher ernüchternd. Zwar hat sich die Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energien in den letzten etwa 30 Jahren annähernd verdoppelt, gleichzeitig stieg aber auch die Nutzung von Kohle, Öl, Erdgas und Atomenergie. Der Anteil der erneuerbaren Energien am Weltenergieverbrauch von gut 16 Prozent ist deshalb nicht angewachsen. Gleichzeitig wachsen die Investitionen in erneuerbare Energien, gerade auch in Entwicklungs- und Schwellenländern, weiter an. Im Jahr 2010 wurden etwa mehr Investitionen in erneuerbare Energien-Kapazitäten als in fossile Kapazitäten getätigt (REN21 Global Status Report 2010).

Im Gegensatz zu Deutschland und Europa, wo durch die Effizienzpotenziale ein kurz- bis mittelfristiger Rückgang des Energiebedarfs möglich ist, wird der Weltenergiebedarf weiter deutlich ansteigen. Wesentliche Ursachen hierfür sind das Bevölkerungswachstum und der weitere Anstieg des Weltbruttosozialprodukts. Die absolute Höhe des Energieverbrauchs hängt aber auch stark von der Entwicklung der Energieintensität ab. Der „Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderung“



Das weltgrößte Solarturmkraftwerk steht in Spanien und produziert 20 Megawatt elektrische Leistung. 1.255 Spiegel reflektieren die Sonnenstrahlung auf den Receiver des 160 m hohen Solarturms.

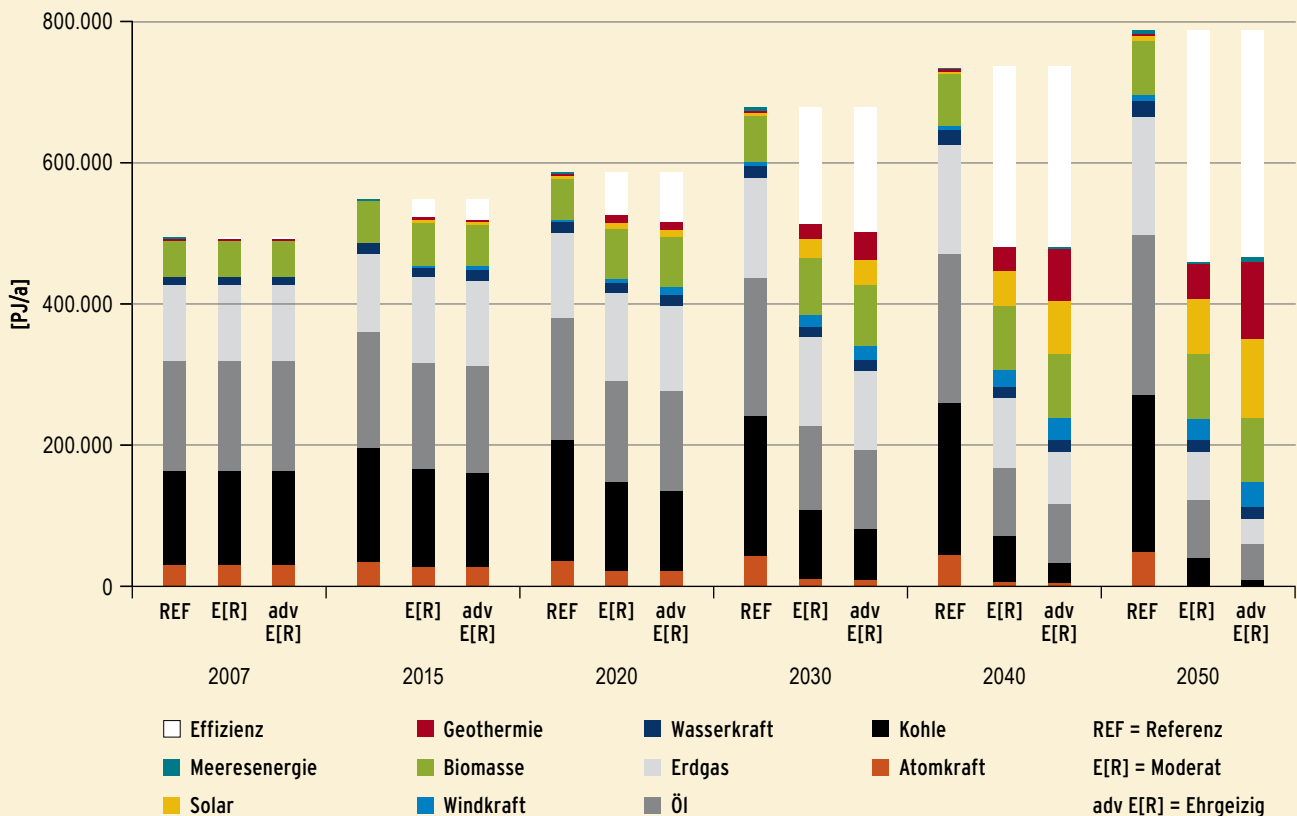
hat in seinem Gutachten „Welt im Wandel – Energiewende zur Nachhaltigkeit“ ein Szenario mit sehr dynamisch wachsender Weltwirtschaft entwickelt. Der darin unterstellten Versechsfachung des Weltbruttosozialprodukts bis 2050 steht eine jährliche Abnahme der Energieintensität von 1,5 Prozent pro Jahr gegenüber, so dass sich der Primärenergiebedarf – ähnlich wie in anderen Szenarien mit deutlichem Wachstum – knapp verdreifacht. Die zentrale Bedeutung der erneuerbaren Energien zeigt sich daran, dass sie 2050 den größten Beitrag zur Energiebedarfsdeckung bereitstellen.

Was passiert, wenn die Regierungen dieser Welt in der Energiepolitik nicht gründlich umsteuern, beschreibt aktuell eine der wichtigsten Energieprognosen, der „World Energy Outlook 2010“ der Internationalen Energieagentur ([www.iea.org](http://www.iea.org)). In einem Referenzszenario mit einer Politik des Weiter-so prognostiziert der Bericht bis 2030 eine Zunahme des weltweiten Primärenergieverbrauchs von 45 Prozent, also einem jährlichen Wachstum um 1,6 Prozent. Mehr als die Hälfte dieses Zuwachses geht dabei auf

das Konto der „nachholenden Industrialisierung“ Chinas und Indiens. Die globale Dominanz der fossilen Energieträger Kohle, Öl und Erdgas bleibt in dem Weiter-so-Szenario der IEA bestehen, sie werden dann im weltweiten Energiemix 2030 mit 80 Prozent nur geringfügig weniger wichtig sein als heute. Der Ölverbrauch soll um jährlich 1 Prozent von derzeit 85 Millionen Barrel täglich weiter auf 105 Millionen Barrel zulegen.

Die Konsequenzen einer solchen Entwicklung beschreibt die IEA allerdings auch. „Ohne einen Politikwandel steuert die Welt auf eine Temperaturzunahme von sechs Grad Celsius zu.“ In den internationalen Klimaverhandlungen haben sich die Regierungen inzwischen darauf geeinigt, dass eine Zunahme von mehr als zwei Grad vermieden werden muss. Deshalb werden im World Energy Outlook 2010 zwei weitere Entwicklungsmöglichkeiten vorgestellt: die Szenarien „New Policies“ und „450 Szenario“. Letzteres zeigt auf, wie das Zwei-Grad-Ziel vor allem durch verstärkten Ausbau der erneuerbaren Energien und Energieeinsparung erreicht werden kann.

## Energy[R]evolution-Szenario



Entwicklung des Primärenergieverbrauchs in einem Referenzszenario und mit moderatem (E[R]) beziehungsweise sehr ehrgeizigem (advE[R]) Umsteuern unseres derzeitigen Energiesystems.

Quelle: Greenpeace

Wesentlich ist es also, dass wir umsteuern. In Szenarien wie dem Energy [R]evolution-Szenario wird dargestellt, wie die weltweite Energieversorgung verändert werden kann, um die Pro-Kopf-Emissionen an CO<sub>2</sub> im Jahr 2050 auf 1,3 Tonnen zu begrenzen; dies entspricht einer Reduktion der absoluten CO<sub>2</sub>-Emissionen um 50 Prozent gegenüber 1990. Das Energy [R]evolution-Szenario setzt auf verschiedene Maßnahmen: eine drastische Steigerung der Energieeffizienz in allen Ländern, einen konsequenten Einsatz von Kraft-Wärme-Kopplung sowie erneuerbarer Energien, die im Jahr 2050 fast 80 Prozent der weltweiten Stromversorgung und 70 Prozent des Wärmebedarfs abdecken (siehe Grafik „Energy [R]evolution-Szenarios“).

Das Szenario einer „Energy [R]evolution“ geht von einem konstanten Pro-Kopf-Energieverbrauch aus, so dass weiteres Wirtschaftswachstum mit deutlich sinkender Energieintensität einhergeht. Die modernen Industriestaaten halbieren ihren Energieeinsatz als Beitrag zur Milderung der krassen Ungleichverteilung

des weltweiten Energieverbrauchs. Dies erlaubt eine gute Verdopplung des Pro-Kopf-Verbrauchs der heutigen Entwicklungsländer und sichert ihrer wachsenden Bevölkerung im Jahr 2050 einen Anteil von 75 Prozent am Primärenergieverbrauch. Die Verringerung weiterer Nachhaltigkeitsdefizite verlangt eine Halbierung des fossilen Energieeinsatzes bis 2050, ein Auslaufen der Atomenergienutzung und eine Umstellung der häufig umweltschädlichen „traditionellen“ Biomassennutzung (Brennholzbeschaffung) auf eine umweltverträgliche, „moderne“ Biomassennutzung. Der Einsatz moderner Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energien müsste demnach bis 2050 über 50 Prozent des Gesamtenergiebedarfs decken. Die Herausforderungen eines ambitionierten Klimaschutzszenarios sind gewaltig. Ein solcher Strukturwandel hat nur Aussicht auf Erfolg, wenn sich die internationale Staatengemeinschaft zu einem gemeinsamen raschen und wirksamen Handeln entschließt.

Die Potenziale dazu sind vorhanden (siehe Seite 41). So konstatiert etwa der im Frühjahr 2011 veröffent-

lichte Sonderbericht zu erneuerbaren Energien des Weltklimarats (Intergovernmental Panel on Climate Change-IPCC), dass das technische Potenzial der erneuerbaren Energien, also ihre technisch nutzbaren Möglichkeiten, kein limitierender Faktor des Ausbaus der erneuerbaren Energien ist und diese die derzeitige und künftige weltweite Energienachfrage decken können (IPCC-SRREN). Aus struktureller Sicht ist die Herausforderung gewaltig, da die rechtzeitige Mobilisierung dieser Technologien etwa alle zehn Jahre eine Verdopplung ihres derzeitigen Beitrags verlangt, die derzeitigen Energiesysteme auf die spezifischen Eigenschaften der erneuerbaren Energien eingestellt werden müssen (Netze, Speicher) und gleichzeitig die Energienutzung weltweit deutlich effizienter werden muss. Der erforderliche Umbau der globalen Energieversorgung innerhalb eines halben Jahrhunderts zur Integration eines wachsenden Anteils erneuerbarer Energien ist eine anspruchsvolle Aufgabe, für die jedoch kaum fundamentale technologische Hürden bestehen (IPCC-SRREN). Ihr Erfolg wird jedoch maßgeblich davon abhängen, ob sich die große Mehrheit der internationalen Staatengemeinschaft zu einem gemeinsamen raschen und wirksamen Handeln entschließt.

## „Nord“ und „Süd“- Nutznießer einer gemeinsamen Energiestrategie

Wegen der hohen Sonneneinstrahlung haben gerade südliche Länder so hohe Potenziale an erneuerbaren Energien, dass diese selbst ihren zukünftig denkbaren Verbrauch bei Weitem übersteigen. So ließe sich etwa allein in Marokko mit Hilfe solarer Kraftwerke eine Strommenge erzeugen, die dem heutigen Weltstromverbrauch entspricht. Die Nutzung erneuerbarer Quellen für den nationalen Verbrauch ist also nicht die einzige Perspektive für die heutigen Entwicklungsländer. Da längerfristig über Stromleitungen zwischen Nordafrika und Europa ein transkontinentaler Energieaustausch technisch möglich ist, können die heutigen Entwicklungsländer mittelfristig „Exportregionen“ für erneuerbare Energie werden. Energie ist nicht das einzige knappe Gut. In vielen Ländern zeichnet sich in den kommenden Jahrzehnten auch für die landwirtschaftliche Nutzung ein erheblicher Mangel an sauberem Wasser ab. Ein wichtiger Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung der Länder in den Trockengebieten der Erde ist deshalb die kombinierte Bereitstellung von Elektrizität und Trinkwasser. Dazu können solarthermische Kraftwerke in Kraft-Wärme-Kopplung eingesetzt werden. Die ausgekoppelte Wärme dient zur thermischen Meerwasserentsalzung, die Wasser mit einem für die landwirtschaftliche Bewässerung ausreichend nied-

**Mit erneuerbaren Energien könnten viele Länder im Sonnengürtel zu Energielieferländern werden. Von einer solchen Energiepartnerschaft würden Nord und Süd gleichermaßen profitieren.**

rigen Salzgehalt liefert. Die Herstellung von entsalztem Wasser wäre dabei sogar vorrangiges Ziel: Strom fällt quasi als Nebenprodukt an und kann sowohl im Erzeugerland genutzt oder mittels der verlustarmen Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) nach Mitteleuropa exportiert werden. Die Übertragungskosten zum Beispiel von Marokko nach Europa liegen im Bereich weniger Cents pro Kilowattstunde, so dass laut einer von dem Deutschen Institut für Luft- und Raumfahrt (DLR) durchgeführten Studie in Mitteleuropa die Kosten für importierten Solarstrom langfristig konkurrenzfähig sind. Für diesen Zweck werden leistungsfähige Leitungen benötigt, wie sie bisher weltweit mit knapp 60 GW Leistung und Übertragungslängen von bis zu 2.500 km je Leitung betrieben werden.

Auf Initiative des Club of Rome wurde im Jahr 2003 die Trans-Mediterranean Energy Cooperation (TREC) gegründet, in deren Auftrag Potenzial- und Machbarkeitsstudien zur Nutzung von Sonnen- und Windenergiepotenzialen im südlichen Mittelmeerraum erarbeitet wurden. Diese Studien wurden mit Mitteln des Bundesumweltministeriums gefördert.

Auf dieser Grundlage wurde 2008 der Solarplan für die Mittelmeerregion als herausragendes Projekt der Union für den Mittelmeerraum ins Leben gerufen. Teilnehmer sind neben der EU-Kommission und den EU-Mitgliedstaaten sämtliche Mittelmeeranrainer außer Libyen.

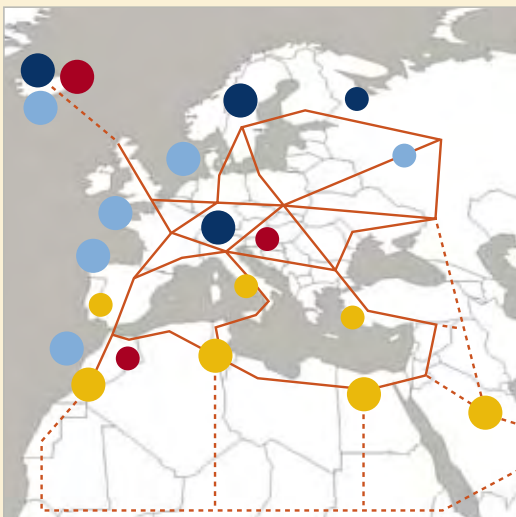
Der Solarplan für die Mittelmeerregion hat zum Ziel, die enormen Potenziale der erneuerbaren Energien rund um das Mittelmeer zu erschließen und die notwendigen Rahmenbedingungen dafür zu entwickeln und umzusetzen. Konkret sollen 20 GW neue Kraftwerkskapazität bis zum Jahr 2020 in der Region installiert werden mit der Perspektive, solaren Strom aus Nordafrika nach Europa zu exportieren. Die neue Erneuerbare-Energien-Richtlinie (2009/28/EG) bietet mit den Kooperationsmechanismen über gemeinsame Projekte mit Nicht-EU-Mitgliedstaaten die geeigneten Anknüpfungspunkte zur Entwicklung der Rahmenbedingungen. Bis Ende 2012 soll ein Solarplan-Masterplan erarbeitet werden, der diese Rahmenbedingungen ausbuchstabiert.

Das gleiche Konzept wird auch unter dem Begriff „Desertec“ durch eine Industrieinitiative (Desertec Industrial Initiative, DII) erfolgreich vermarktet und unterstützt. Die DII wurde 2009 durch mehrere namhafte deutsche Unternehmen, wie Siemens, RWE und die Deutsche Bank, ins Leben gerufen und hat sich seither zu einem Zusammenschluss deutscher, europäischer und nordafrikanischer Unternehmen weiterentwickelt.

Die Bundesregierung unterstützt die Vision des Imports von Solarstrom aus Nordafrika als eine mögliche Ergänzung zum nationalen Ausbau. Insbesondere die Technologie solarthermischer Kraftwerke kann aufgrund ihrer Speicherung steuerbaren Strom nach Deutschland liefern, der hier zur Versorgungssicherheit und zur Integration der fluktuierenden Stromerzeugung beitragen kann (siehe Kapitel Solarthermische Kraftwerke). Das Bundesumweltministerium finanziert konkrete Projekte und Aktivitäten, die zum Ausbau der Kooperation mit den Ländern Nordafrikas und der Schaffung der notwendigen Rahmenbedingungen für den Import von Solarstrom in die EU und bis nach Deutschland beitragen.

In Algerien, Tunesien und besonders in Marokko sind die Vorbereitungen für eine gemeinsame Solarstromkooperation am weitesten fortgeschritten. Diese Länder sind besonders stark an einer Nutzung erneuerbarer Energien interessiert. Bundeskanzlerin Merkel und Algeriens Präsident Bouteflika vereinbarten im Dezember 2010 eine konkrete Zusammenarbeit zur Umsetzung der Solarstromvision. Tunesien und Marokko verfügen kaum über eigene fossile Energieträger und haben deshalb ambitionierte nationale Solarpläne verabschiedet. Das Königreich Marokko ist mit seinem 2-GW-Solarprogramm, der Gründung von spezialisierten Agenturen, Finanzierungslinien und laufenden Ausschreibungen für Solarkraftwerke am weitesten fortgeschritten. Deshalb hat das Bundesumweltministerium mit der marokkanischen Energieministerin eine gemeinsame Kooperationserklärung unterzeichnet. Ziel ist, die Kooperation im Bereich erneuerbare Energien auszubauen, eine vertrauensvolle Zusammenarbeit zu befördern und die Rahmenbedingungen so zu setzen, dass Deutschland und Marokko von dieser neuen Energiekooperation gleichermaßen profitieren. Konkret wird es in einem ersten Schritt um ein oder mehrere Pilotprojekte gehen, die zusammen mit weiteren interessierten EU-Mitgliedstaaten wie Frankreich, Spanien oder Italien realisiert werden können.

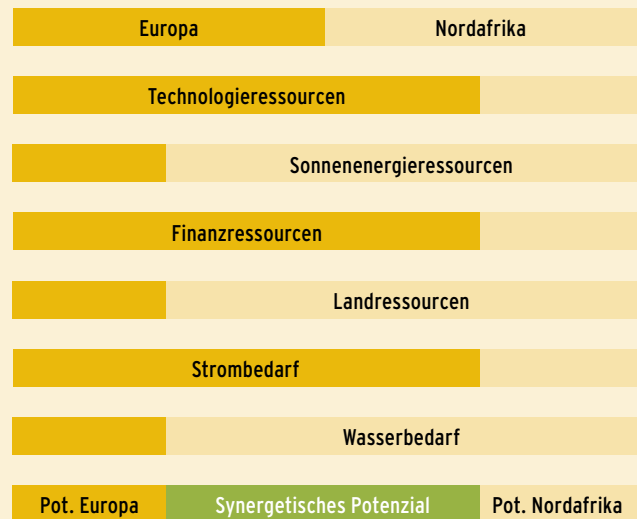
### Synergetische Potenziale



■ Solarthermische Stromerzeugung, Wasserentsalzung  
 ■ Geothermie

■ Windkraft  
 — HGÜ-Verbundnetz

■ Wasserkraft  
 ..... erweitertes Verbundnetz



Synergetische Potenziale Europas und Nordafrikas zur gemeinsamen nachhaltigen Entwicklung einer Energieversorgung. Mittels eines transkontinentalen Stromverbunds zur gemeinsamen Nutzung der ergiebigsten erneuerbaren Energiequellen dieser Region können diese Potenziale erschlossen werden.

Quelle: DLR



## Die Bedeutung der Entwicklungsländer

Aus der Sicht der Energieversorgung werden Entwicklungsländer gewöhnlich mit „dezentralen“, nicht oder nur wenig vernetzten Versorgungsstrukturen gleichgesetzt. Die Verbraucher dort haben also keinen Zugang zum Stromnetz und verfügen wegen ihrer geringen Einkommen kaum über fossile Energien. Dies trifft heute für knapp drei Milliarden Menschen in Entwicklungsländern und damit die Hälfte der Menschheit insgesamt zu.

Gleichzeitig befinden sich die Entwicklungsländer in einem unaufhaltsamen Urbanisierungsprozess. Bereits in 15 Jahren wird die Hälfte ihrer Bevölkerung (2015 insgesamt sechs Milliarden Menschen) in Städten wohnen, die oftmals deutlich größer sind als in der nördlichen Hemisphäre. Von den derzeit über 20 Städten mit mehr als zehn Millionen Einwohnern liegen mehr als die Hälfte in Entwicklungs- und Schwellenländern. Mexico City, Sao Paulo und Mumbai sind dabei die größten.

Diese Entwicklung ist für die zukünftige Energieversorgung in diesen Ländern von großer Bedeutung. Sie stehen vor einer weit größeren Herausforderung als die Industrieländer, wenn es um die Annäherung

an eine nachhaltige Energieversorgung geht. Diese Länder müssen nämlich gleichermaßen für beide Bereiche – stark wachsende Ballungsräume und ländliche Regionen – nachhaltige Lösungsansätze finden. Für die erneuerbaren Energien gibt es hier zwar ein reiches Potenzial, es kann aber nur mit technischer und vor allem finanzieller Hilfe der Industrieländer erschlossen werden. Auch Effizienzsteigerungen bei der Erzeugung (Kraft-Wärme-Kopplung im industriellen und gewerblichen Bereich, hocheffiziente Gas-Kraftwerke) und erst recht bei der Nutzung von Energie sind von enormer Bedeutung; ebenso eine Erneuerung und Verbesserung der bestehenden Infrastruktur.

In den ländlichen Gebieten weniger entwickelter Länder sind bereits heute die vor Ort befindlichen erneuerbaren Energien die einzig sinnvolle Versorgungsmöglichkeit, da schlechte Verkehrsinfrastrukturen die ohnehin knappen fossilen Energieträger noch mehr verteuern. Es gilt daher, mit angepassten dezentralen Technologien wie der Kleinwasserkraft, Photovoltaik, Windenergie sowie effizienter Biogas- und Biomassenutzung möglichst rasch die Grundbedürfnisse nach Energie für die Landbevölkerung

### → Ländliche Energieversorgung in Entwicklungsländern mit erneuerbaren Energien

Rund zwei Milliarden Menschen verfügen nicht über eine Stromversorgung aus Stromnetzen. Dort ist auch der Verbrauch nichtkommerzieller Energie, also Brennholz für Kochzwecke, am höchsten. Vielen Menschen in diesen Ländern gelingt ein Überleben nur dank des zeitaufwendigen, körperlich anstrengenden, aber dennoch unproduktiven und ökologisch bedenklichen Sammelns von Brennholz. Gerade in diesen ländlichen Regionen von Entwicklungsländern kann der Einsatz von erneuerbaren Energien einen wichtigen Entwicklungsimpuls liefern. Unterschiedliche Technologien werden zu diesem Zweck weiterentwickelt, beispielsweise:

**Verbesserte Holzherde** erhöhen die Effizienz der Biomasse-Verbrennung und tragen zu einer erheblichen Verbesserung der Luftqualität im Wohnbereich bei: Vorsichtige Schätzungen gehen davon aus, dass bis zu zwei Millionen Tote pro Jahr auf die Folgen der Luftverschmutzungen in Innenräumen zurückzuführen sind.

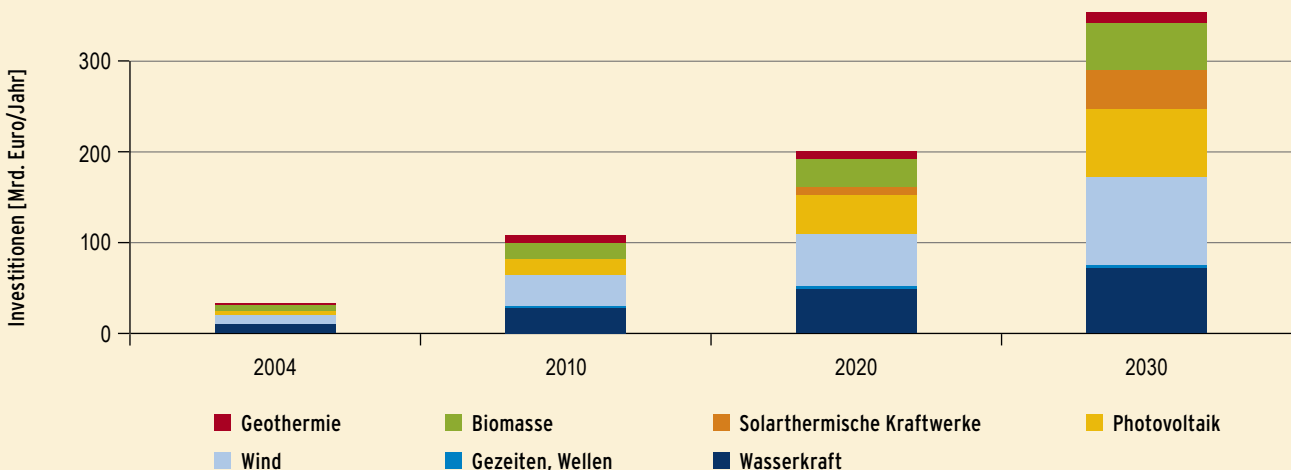
Es sind einfache konstruktive Änderungen, die zu der Verbesserung der Herde führen: Wärmeisolierte Behälter um die Feuerroste, erhöhte Brennkammern und optimierte Luftführung sorgen für eine möglichst vollständige Verbrennung. Durch die hohe Effizienz der Holznutzung muss wesentlich weniger Brennholz gesammelt werden – die Bevölkerung spart Zeit für andere Tätigkeiten, die Holzvorräte werden geschont.

**Einfache Biogasanlagen** nutzen die Rückstände der Landwirtschaft, Fäkalien oder Tierdung, um ein brennbares Gas für Koch- und Beleuchtungszwecke zu erzeugen. Ballons aus Kunststoffplanen, einfach konstruierte Betontanks oder Metalltonnen wurden in China und Indien bereits in großen Stückzahlen eingesetzt. Insgesamt sind rund 25 Millionen solcher kleinen Biogasanlagen in Betrieb.

**Solarkocher** bündeln die Solarstrahlung und sind zum Kochen, aber auch für gewerbliche Zwecke geeignet. Windbetriebene mechanische Wasserpumpen verbessern die Wasserversorgung in Argentinien, aber auch in vielen afrikanischen Ländern.

Mit „**Solar Home Systems**“ oder größeren photovoltaischen Anlagen können einzelne Hütten, aber auch Dörfer mit Elektrizität versorgt werden. In dörflichen Stromnetzen (sogenannten Mini Grids) werden die Solarmodule mit Batteriespeichern und gegebenenfalls kleinen Windenergieanlagen und Dieselaggregaten gekoppelt. Die ländliche Elektrifizierung ist ein wichtiger Entwicklungsbeitrag: Der Betrieb von gewerblichen Anlagen (Mühlen, Kühlanlagen etc.) erhöht die Wirtschaftskraft, Kommunikationsmittel und Beleuchtung ermöglichen neue Bildungschancen, der Anschluss von Krankenstationen an eine Stromversorgung erlaubt die Kühlung von Medikamenten und die Aufbereitung von Trinkwasser.

## Szenario der weltweiten Investitionsvolumina



Szenario der Investitionsvolumina in erneuerbare Energien im Strommarkt weltweit bis zum Jahr 2030

Quelle: ZSW, DLR

**Die globalen Herausforderungen der Energieversorgung für die nächsten Jahre und Jahrzehnte können nur in einer gemeinsamen Anstrengung bewältigt werden. Die Erschließung erneuerbarer Energien ist dafür ein Schlüsselfaktor.**

auf der Basis erneuerbarer Energien sicherzustellen. Damit könnte möglicherweise auch der Urbanisierungstrend verlangsamt werden.

Der Realisierung einer solchen Strategie stehen derzeit jedoch zahlreiche Hemmnisse gegenüber. Von besonderer Bedeutung sind die fehlenden Investitionsmittel für erneuerbare Energiesysteme. Daher werden bereits unterschiedliche Finanzierungsmechanismen ausprobiert: Kleine Solarsysteme können von Firmen vorfinanziert und dann durch Eingabe eines Passwortes freigeschaltet werden, das man gegen monatliche Bezahlung erhält.

Doch damit ist es bei weitem nicht getan. Teil einer Entwicklungsstrategie im Energiebereich müssen auch große, zentrale erneuerbare Energieanlagen sein. Also größere netzgekoppelte Windparks, Wasserkraftwerke in angemessener Größe und solarthermische Kraftwerke, welche die bestehenden und sich rasch ausdehnenden städtischen Regionen in ausreichendem Maß versorgen. Dabei muss auch eine erneuerbare Energieversorgung auf die jeweiligen Bedürfnisse ausgerichtet sein und wird zumeist aus einer Vielzahl von unterschiedlichen Anlagen bestehen.

Im Sinne der internationalen Arbeitsteilung, aber auch der entwicklungspolitischen Ziele der Bundesregierung ist der globale Ausbau erneuerbarer Energien so zu gestalten, dass alle Beteiligten profitieren. Gleichzeitig resultieren aus dem internationalen Wachstumsmarkt erneuerbarer Energien attraktive Chancen für die deutsche Wirtschaft. Was dies bedeutet, lässt sich gut für die Stromerzeugung zeigen. Die Investitionen in erneuerbare Energieanlagen lagen im Jahr 2010 bei etwa 211 Milliarden US-Dollar pro Jahr – mit deutlich steigender Tendenz. Die Investitions- und Exportchancen sind also groß. Gleichzeitig tragen erneuerbare Energien zu lokaler Wertschöpfung bei und bewirken die Ansiedlung neuer Industrien und die Schaffung von Arbeitsplätzen. Global gab es 2010 etwa 3,5 Millionen direkter Jobs in der Erneuerbaren-Branche.

Ein erfolgreicher Export ist jedoch kein Selbstläufer, denn der internationale Wettbewerb wird zunehmen. Die Vorleistungen, die in Deutschland bei Forschung und Entwicklung erbracht wurden, sowie die Erfahrungen bei der Markteinführung und -erschließung haben der Branche allerdings eine hervorragende Ausgangslage verschafft.

### Infos

Die Leitstudie des BMU:  
[www.erneuerbare-energien.de](http://www.erneuerbare-energien.de)  
 World Energy Outlook: [www.iea.org](http://www.iea.org)  
 Internationales Politiknetzwerk für erneuerbare Energien: [www.ren21.net](http://www.ren21.net)  
 Desertec: [www.desertec.org](http://www.desertec.org)



Solarkocher in Indien

### → Internationale Agentur für Erneuerbare Energien IRENA

Die bisherigen Kapitel zeigen: Erneuerbare Energien ermöglichen - und erfordern - internationale Zusammenarbeit. Mit der International Renewable Energy Agency wurde eine neue Einrichtung gegründet, die die nachhaltige Nutzung aller Formen der erneuerbaren Energien weltweit beschleunigen soll. IRENA wird dazu beitragen, dass die Lücke zwischen dem großen Potenzial und dem noch zu geringen Marktanteil so schnell wie möglich geschlossen wird. Sie wird ihre Mitgliedstaaten bei der Schaffung effektiver politischer und rechtlicher Rahmenbedingungen für erneuerbare Energien beraten, sie bei dem Auf- und Ausbau des notwendigen technischen oder administrativen Know-hows unterstützen und den Technologie- und Wissenstransfer zwischen den Staaten fördern.

Als prioritäre Aufgaben von IRENA wurden daher die konkrete Beratung ihrer Mitglieder beim Auf- und Ausbau der erneuerbaren Energien und beim Kompetenzaufbau identifiziert.

Gegründet wurde die IRENA am 26. Januar 2009 in Bonn mit dem Ziel, ein weltweit anerkanntes Wissenszentrum für erneuer-

bare Energien zu schaffen. 149 Staaten und die EU haben das IRENA-Statut gezeichnet,

80 Staaten und die EU sind Mitglieder der Organisation, deren Hauptsitz sich in Abu Dhabi befindet. Seit der ersten Sitzung der Vollversammlung (Assembly) am 4./5. April 2011 in Abu Dhabi ist der Gründungsprozess abgeschlossen und IRENA völkerrechtlich etabliert. Mit der Wahl des IRENA-Rates (Council) haben sich nun alle drei IRENA-Organen - das Sekretariat, die Versammlung und der Rat - konstituiert.

Das IRENA-Innovations- und Technologiezentrum als Teil des Sekretariats befindet sich in Bonn. Es hat seine Arbeit Anfang 2011 aufgenommen. Das IITC ist in den Bereichen der Szenario-, Strategie- und Technologieanalyse tätig und arbeitet zu den Kosten erneuerbarer Energien (Markt- und Technologieentwicklung). Ein Schwerpunkt der Arbeit liegt auf den Rahmenbedingungen zur Förderung von Innovationen im Bereich erneuerbare Energien.



## NEUE VERSORGUNGSSTRUKTUREN

In den vergangenen Jahren hat sich die Struktur unserer Energieversorgung rapide verändert. Der Anteil erneuerbarer Energieträger in Deutschland ist innerhalb weniger Jahre 2010 auf rund 17 Prozent in der Stromerzeugung gestiegen (siehe Seite 33). Durch den Ausstieg aus der Atomenergie werden große Kraftwerksblöcke vom Netz gehen. Flexiblere, hocheffiziente Gaskraftwerke werden an Bedeutung gewinnen. Kleine Blockheizkraftwerke zur gleichzeitigen Strom- und Wärmeversorgung kommen auf den Markt. Unsere Erzeugungsstruktur ist dezentraler geworden. Dieser Umstrukturierungsprozess wird weitergehen, da sich der Ausbau erneuerbarer Energien fortsetzt.

Fragen der Integration erneuerbarer Energien in das Stromnetz werden zukünftig immer wichtiger werden. Zwar produzieren Windparks und Solarzellen bei Windflaute oder nächtlicher Dunkelheit keinen Strom und auch die Betriebsstunden kleiner Blockheizkraftwerke orientieren sich am Wärmebedarf der Betreiber und nicht an den Erfordernissen des Strommarktes. Aber die erneuerbaren Energieträger glei-

chen sich teilweise bereits untereinander aus: Selbst wenn an einem Standort Windstille herrscht, erzeugt der Verbund der deutschen Windräder immer noch Strom. Außerdem ist die Windstromerzeugung mittlerweile gut vorhersagbar. Holz, Gülle und andere Biomasse sowie die Wärme der Erde können zudem rund um die Uhr verstromt werden. Im Fachjargon heißt dies: bedarfsgerechte Erzeugung.

In Deutschland ermöglicht das elektrische Verbundnetz infolge der zahlreichen angeschlossenen Erzeuger, Verbraucher und Speicher bereits einen gewissen Ausgleich von Leistungsüberschüssen und -defiziten. Wenn die erzeugte elektrische Leistung und der Verbrauch dennoch nicht übereinstimmen, muss die Diskrepanz ausgeglichen werden. Diese „Lücke“ entsteht nicht nur durch erneuerbare Energien. Ausfälle konventioneller Kraftwerke, revisionsbedingte Abschaltungen und die Schwankungen in der Stromnachfrage tragen genauso dazu bei. Zum Ausgleich zwischen Erzeugung und Verbrauch sind Regelkraftwerke erforderlich.



In einer modernen Leitwarte werden Kraftwerke und Verbraucher aufeinander abgestimmt.

## Stromsystem mit hohen Anteilen erneuerbarer Energien



Quelle: IFEU

## Energiesysteme mit hohen Anteilen erneuerbarer Energien

Das Energiesystem wird sich gemeinsam mit dem Ausbau der erneuerbaren Energien wandeln. Ein solcher Anpassungsprozess war übrigens auch in den 1970er und 80er Jahren erforderlich, als die meisten Atomkraftwerke (AKW) errichtet wurden. Damals wurden in erheblichem Umfang neue Höchstspannungsleitungen verlegt, Nachtspeicher-Heizungen vermarktet und große elektrische Warmwasserboiler installiert, um den nachts in den AKW produzierten Strom verkaufen und verbrauchen zu können.

Dass eine Integration hoher Anteile dezentraler Energieträger möglich ist, zeigen Beispiele aus anderen Ländern. Die Stromerzeugung Dänemarks beispielsweise ist gekennzeichnet durch die höchsten prozentualen Anteile an Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) und Windenergie in Europa. Durch eine konsequente politische Forcierung des Ausbaus der KWK werden heute 50 Prozent des Stromes und 80 Prozent der Fernwärme durch KWK bereitgestellt. Der Beitrag des Windstromes an der Gesamtstromversorgung liegt in Dänemark bei über 20 Prozent des Strombedarfs. Unter bestimmten Bedingungen – vor allem in stürmischen Winternächten – übertrifft die Stromerzeugung aus KWK und Windenergie sogar die Nachfrage. Der für die Netzstabilität erforderliche Lastausgleich erfolgt dort sowohl durch Leistungsregelung der wenigen großen Stromerzeuger als auch durch Stromausgleich mit Deutschland und Norwegen.

Wichtig ist, dass das gesamte Energiesystem durch ein intelligentes Management auf Erzeuger- und Verbraucherseite optimiert wird. Langfristig müssen die Strukturen des Kraftwerksparks und der Netze an die Anforderungen der erneuerbaren Energien angepasst und erweiterte Speichermöglichkeiten für Strom erschlossen werden:

Die **Prognose** der erneuerbaren Stromerzeugung verbessert sich kontinuierlich. Je besser die Erzeugung prognostiziert werden kann, umso geringer ist der Regelbedarf. Regelenenergie und -leistung sind besonders teuer, weil sie unvorhergesehen und kurzfristig bezogen werden müssen.

Die Prognosegüte für die Windstromerzeugung hat sich in den vergangenen Jahren deutlich erhöht und die Prognoseverfahren werden immer weiterentwickelt. Der spezifische Regelbedarf wird daher künftig abnehmen.

**Lastmanagement** ist die gezielte Beeinflussung der Höhe und zeitlichen Struktur der Stromnachfrage. Wenn der Strom knapp oder die Nachfrage groß sind, wird geprüft, ob bestimmte Verbraucher, Geräte und Anlagen abgeschaltet werden können. Diese Stromkunden werden für ihre Flexibilität finanziell belohnt. Beispielsweise kann zwischen Versorger und Kunde vereinbart werden, dass Verbraucher mit Hilfe entsprechender Kontrolltechnologien abgeschaltet werden. Bei Industriekunden wird dies vielfach schon praktiziert.



Diese Familie nimmt an einem Testversuch teil: Ihr Stromtarif, der per SMS übermittelt wird, variiert täglich - je nach Windangebot, Stromnachfrage und anderen Randbedingungen.

Auch in Deutschland laufen zahlreiche Versuche mit zeitvariablen Tarifen. Waschen in der Nacht, automatisch gesteuerte Kühlschränke und große Kühlhäuser, die in Zeiten hoher Nachfrage kurzzeitig ausschalten – mit solchen technischen Feinheiten wird der Bedarf an Regelkraftwerken reduziert, die auf der Erzeugungsseite die Fluktuationen erneuerbarer Energien ausgleichen müssen.

Es entstehen neue Geschäftsmodelle auf Basis **intelligenter Stromzähler**. Der Fortschritt bei den Kommunikationstechnologien vereinfacht diese Art von Lastmanagement erheblich. Sie verfügen über verschiedene Schnittstellen, erlauben eine Fernablesung und auch die Fernsteuerung von Verbrauchern. In Deutschland müssen seit 2010 intelligente Zähler in Neubauten oder totalsanierten Gebäuden kostenneutral angeboten werden.

In der Industrie gibt es eine Vielzahl von elektrisch betriebenen Maschinen und Anlagen, die problemlos für einige Zeit abgeschaltet werden können, beispielsweise Kühlmaschinen, Wasserpumpen oder Metallschmelzen. In Deutschland wird etwa neun Prozent des Stroms für Kühlung, Lüftung oder Klimatisierung benötigt. Diese Anwendungen sind oftmals zeitlich gut verschiebbar. Weitere Potenziale bieten Umwälzpumpen in Heizungen. Diese könnten sich frequenzabhängig abschalten und somit als Sofortreserve dienen. In Haushalten sind auch die Verbrauchssegmente Waschen, Spülen und elektrische Warmwasserbereitung für Lastmanagement geeignet.

Doch nicht nur Verbraucher sollten in die Optimierung des Energiesystems einbezogen werden. Auch die erneuerbaren Stromerzeuger können mit

moderner Kommunikationstechnologie in die Kraftwerkseinsatzplanung integriert werden („**Erzeugungsmanagement**“). Bei Überlastsituationen lassen sich die Rotorblätter von Windrädern sehr schnell aus dem Wind drehen und damit ganze Windparks bei Bedarf vom Netz schalten. Dabei muss vertraglich sichergestellt sein, dass dies nur unter bestimmten Bedingungen und für eine begrenzte Zeit geschieht. Denn in diesen Zeiten wird kein Windstrom erzeugt – wertvolle erneuerbare Elektrizität geht verloren. Vor allem sollten daher Biomasse-Anlagen zur Regelung herangezogen werden, die bedarfsgerecht steuerbar sind. Mit dem speicherbaren Biogas steht ein Energieträger zur Verfügung, der im Prinzip genauso flexibel ist wie Erdgas. Damit möglichst wenig wertvoller erneuerbarer Strom verloren geht, werden derzeit im Rahmen von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben Lösungen entwickelt, um überschüssige Strommengen vorübergehend speichern zu können.

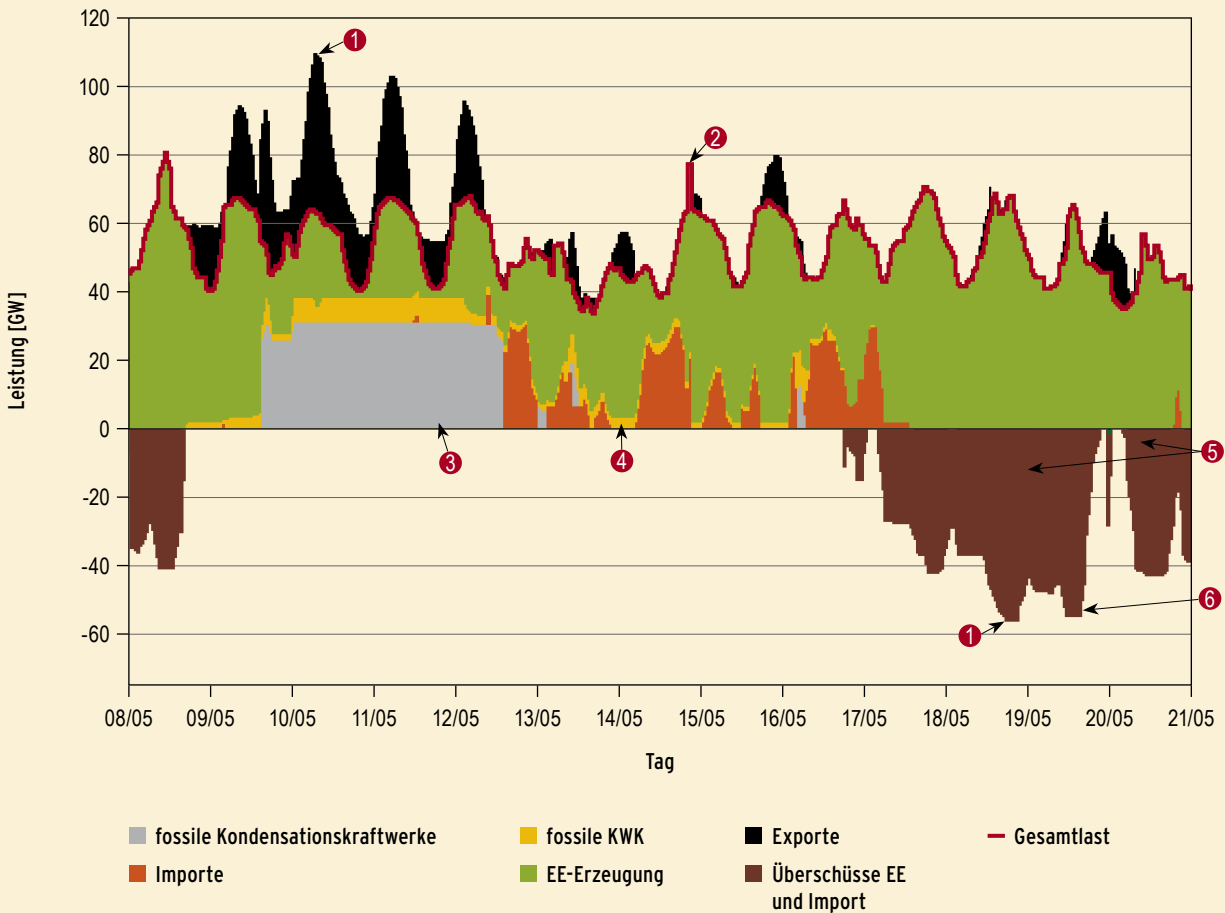
Das ab 2012 gültige Erneuerbare-Energien-Gesetz führt aus diesem Grund beispielsweise eine „**Flexibilitätsprämie**“ ein, die eine strommarktorientierte Betriebsweise von Biogasanlagen zulassen soll, in dem sie Investitionen in größere Gasspeicher und Generatoren ermöglicht.

Auch unser heutiger **Kraftwerkspark**, der noch zu einem großen Teil auf langsamer regelbaren Kohle- und – in den nächsten zehn Jahren schrittweise abzuschaltenden – Atomkraftwerken beruht, sind Veränderungen erforderlich. Moderne Gaskraftwerke sind nicht nur hoch effizient, sondern zugleich auch leichter und schneller regelbar und können damit besser an den fluktuierenden Last- und Erzeugungsverlauf angepasst werden.

Nicht nur die schnelle Regelbarkeit spricht für die Kombination von Gaskraftwerken und erneuerbaren Energien. Auch die geringen Investitionskosten zeichnen diesen Kraftwerkstyp aus. Braunkohle- oder Kernkraftwerke weisen bei geringen Brennstoff- und Betriebskosten vergleichsweise hohe Investitionskosten auf. Daher müssen sie möglichst rund um die Uhr (Grundlastkraftwerke) betrieben werden, um ihre Investitionskosten wieder „einzuspielen“. Moderne Gaskraftwerke hingegen sind auch schon bei niedrigeren Betriebsstunden wirtschaftlich und eignen sich daher technisch und wirtschaftlich gut, die Schwankungen der erneuerbaren Energien auszugleichen.

Mittelfristig lassen sich Ausgleichseffekte einer verteilten erneuerbaren Stromerzeugung im europäischen **Stromnetz** durch einen verstärkten Stromtransfer über die deutschen Grenzkuppelstellen erreichen.

## Zwei Wochen im Jahr 2050: Ein Blick in die Zukunft der Stromerzeugung mit zukünftigen Strategieelementen (Leitstudie 2010)



- ① **Netze**  
 - Optimierung  
 - Ausbau  
 - Interkontinentale Netze
- ② **Lastmanagement**

- ③ **Veränderung des Kraftwerksparks**  
 - Bau hocheffizienter Gaskraftwerke
- ④ **Intelligent geregelte KWK**

- ⑤ **Speicherung elektrischer Energie**
- ⑥ **Erzeugungsmanagement EE**  
 - Abschaltung  
 - Kurzfristspeicherung

Quelle: Darstellung IFEU, Lastgang FhG IWES 2011

Langfristig können diese Ausgleichseffekte durch einen interkontinentalen Stromverbund (Import von Wind- und Solarstrom aus Ländern des südlichen Mittelmeerraumes) noch erheblich ausgeweitet werden (siehe Seite 56).

Auch **administrative Maßnahmen** können dazu beitragen, das Gesamtenergiesystem zu verbessern. Mit einer Anordnung verpflichtet die Bundesnetz-

agentur die vier Übertragungsnetzbetreiber seit Juni 2010 zu einer intensiveren Zusammenarbeit bei der Ausregelung der deutschen Stromnetze. Dadurch wird ausgeschlossen, dass die vier Regelzonen gegeneinander geregelt werden. So lässt sich der Regelbedarf reduzieren. Die Bundesnetzagentur rechnet mit Kosteneinsparungen von bis zu 16 Millionen Euro pro Monat.

## → Kühlen, wenn der Wind weht

Kühlung hoch drehen, wenn der Wind weht. Und möglichst sparsam mit dem Strom umgehen, solange man auf das Kohlekraftwerk angewiesen ist. Dann kommt man als Kühlhaus-Besitzer mit seinem virtuellen Kohleberg auf [www.etelligence.de](http://www.etelligence.de) noch mindestens 60 Jahre aus. Andernfalls ist nach 30 Jahren Schluss.

Dieses nette und lehrreiche Spiel hat der regionale Stromversorger EWE ins Netz gestellt. Es hat einen seriösen Hintergrund: An der Nordseeküste stehen schon heute jede Menge Windräder. In Zukunft kommen noch die Anlagen auf hoher See dazu. Doch was passiert, wenn der Wind kräftig bläst und die Maschinen mehr Strom produzieren als die Küstenbewohner wirklich brauchen? Bisher fließt die Energie dann über die

großen Energieautobahnen Richtung Ruhrgebiet. Das ist auch mit Leitungsverlusten verbunden. Darum versuchen Wissenschaftler, den Stromverbrauch in der Nähe der Küste in Zeiten zu verschieben, in denen die Windenergie viel Strom liefert. Kühlhäuser und andere Großverbraucher sollen helfen, den Stromverbrauch zu optimieren.

In Bremerhaven machen bereits zwei große Kühlhäuser für Frischfisch mit. Die Kühlfirmen werden künftig ihre Hallen dann besonders stark abkühlen, wenn der Wind weht. Weht der Wind nicht, lassen sie die Temperaturen in ihren Hallen bis zu einem für das Kühlgut unbedenklichen Wert ansteigen. Für die Kühlhäuser ist der Strom in den windstarken Zeiten billiger – genau wie an der Strombörse.

## Stromnetze der Zukunft

Eine Stromversorgung in Deutschland mit steigenden Anteilen erneuerbarer Energien erfordert eine Anpassung der Stromnetze, sowohl auf Übertragungs- als auch auf Verteilnetzebene. Während die heutige Netzstruktur dafür konzipiert ist, Strom aus den zentralen Kraftwerken zum Verbraucher zu bringen, wird es in Zukunft vielfältiger zugehen: Großkraftwerke speisen weiterhin Strom in das Übertragungsnetz (Höchstspannungsebene) ein. Um die Elektrizität von Windanlagen in Norddeutschland und von den Offshore-Anlagen in unsere Verbrauchszentren im Westen und Süden zu bringen, ist eine Anpassung des Übertragungsnetzes erforderlich. Diese Leitungen stehen auch für den Stromhandel zur Verfügung. Eine zunehmende Anzahl kleiner, dezentraler Anla-



gen – Solaranlagen, Blockheizkraftwerke, einzelne Windräder oder kleinere Windparks – liefern ihren Strom an das Nieder- oder Mittelspannungsnetz, Steuerungen regeln den optimalen Betrieb des Systems. Die Deutsche Energie-Agentur (dena) hat mit den dena-Netzstudien I und II Anpassungsbedarf im deutschen Übertragungsnetz bis 2025 aufgezeigt. Der Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) hat mit einem Gutachten den Ausbaubedarf des Verteilungsnetzes bis 2020 abschätzen lassen.

Diese und weitere Untersuchungen zeigen, dass ein schneller Um- und Ausbau des Stromnetzes auf allen Netzebenen für die Erreichung der Energie- und Klimaziele elementar ist, auch wenn sich der Netzausbaubedarf durch Einspeise-, Erzeugungs- und Lastmanagement, Temperaturmonitoring und intelligente Steuerung (smart grids) sowie durch zusätzliche Speicherkapazitäten optimieren und bei einigen Trassen noch etwas hinauszögern lässt. Deshalb hat der Bundestag im Juni 2011 das „Gesetz über Maßnahmen zur Beschleunigung des Netzausbaus Elektrizitätsnetze“ (NABEG) beschlossen. Dieses Gesetz sieht unter anderem eine Prüfung wichtiger Höchstspannungsleitungen durch die Bundesnetzagentur vor und fordert die Verlegung von Kabeln der Hochspannungsebene (110 Kilovolt) in der Regel als Erdkabel. Eine starke Öffentlichkeitsbeteiligung und eine frühzeitige Transparenz sollen die Akzeptanz für Leitungstrassen stärken.

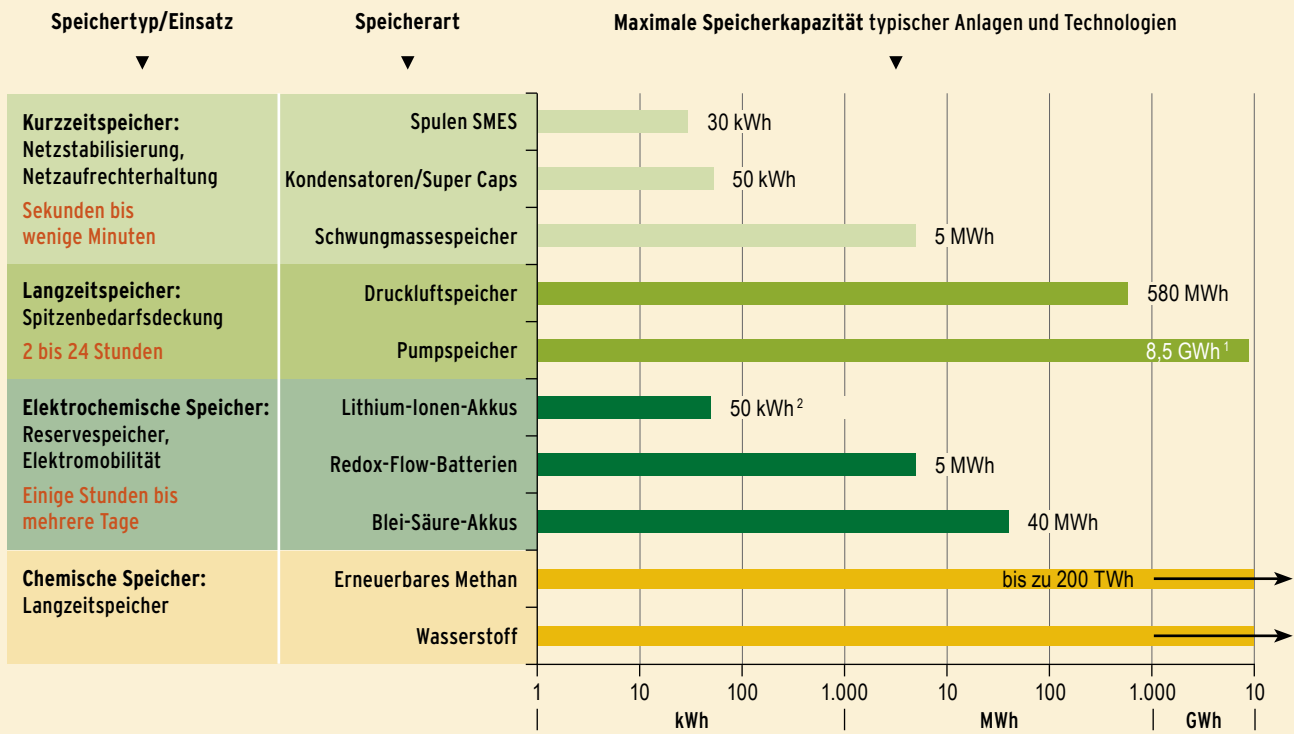


## Energiespeicher

Eine zentrale Maßnahme zum Abgleich zwischen Stromeinspeisung und Stromnachfrage besteht in der Zwischenspeicherung elektrischer Energie. Die Speichermöglichkeiten reichen von kleinen, dezentral einsetzbaren Speichern wie Batterien über große, zentrale Pump- oder Druckluftspeicherkraftwerke bis hin zu Infrastrukturen für speicherbare Energieträger wie Methan oder Wasserstoff, die aus erneuerbarem Strom erzeugt werden. Auch wirtschaftlich werden Speicher zunehmend interessant, wenn auf Grund fluktuierender Stromeinspeisung hohe Preisdifferenzen zwischen Hoch- und Niederlastzeiten auftreten.

Stromspeicher werden meist nach ihrem Einsatz – Kurzzeit- oder Langzeitspeicher – und gemäß ihrem physikalischen Prinzip unterteilt, je nachdem, ob sie Energie mechanisch (kinetische oder potenzielle Energie), in elektrischen Feldern oder in Form von chemischer Bindungsenergie speichern. Zu den mechanischen Speichern zählen Schwungradspeicher sowie Pump- und Druckluftspeicherkraftwerke. Kondensatoren sind Speicher, die elektrische Felder nutzen. Akkumulatoren, Wasserstoff und synthetisches Methan sind Beispiele für chemische Speicherung.

### Kapazitäten verschiedener Stromspeicher



- 1 Pumpspeicherkraftwerk Goldisthal
- 2 Batterie für Elektrofahrzeug

Verschiedene Typen von Stromspeichern

Quellen: AEE, IFEU, TAB, RWTH Aachen



Pumpspeicherkraftwerk Hohenwarte an der Saale

Bisher wurden für die Speicherung größerer Mengen elektrischer Energie vor allem **Pumpspeicherkraftwerke** genutzt. Sie nutzen den Höhenunterschied zwischen einem oberen und einem unteren Speichersee aus (siehe Seite 126). Große Pumpen befördern Wasser in den oberen Speichersee. Später fließt das Wasser zurück in den unteren Speichersee und treibt dabei Stromturbinen an. Weltweit gibt es 280 dieser Pumpspeicherkraftwerke. Der Gigant unter den deutschen Anlagen, das Pumpspeicherkraftwerk Goldisthal im Thüringischen Schiefergebirge mit über 1.000 Megawatt elektrischer Leistung, ging Ende 2003 ans Netz, vier Jahrzehnte nachdem die ersten Planungen begonnen hatten.

Schon heute leisten Pumpspeicherkraftwerke wie Goldisthal einen wichtigen Beitrag für die Stabilität des Stromnetzes: Sie können ihre Pumpen mit einem großen Stromverbrauch anlaufen lassen, wenn zu viel Strom im Netz (und dieser damit besonders günstig) ist. Und sie lassen das Wasser aus den oberen Speicherbecken wieder ab, wenn Strom knapp ist. Insgesamt geht dabei zwar etwa ein Fünftel der eingesetzten Energie verloren, für die Effizienz des gesamten Systems entsteht aber ein Vorteil, der diesen direkten Verlust mehr als ausgleicht. Und die Betreiber solcher Kraftwerke verdienen ihr Geld an dem Unterschied zwischen den Stromeinkaufs- und -verkaufspreisen. Der Betrieb von Pumpspeicherkraftwerken könnte in Zukunft noch stärker an die Erfordernisse erneuerbarer Energien angepasst werden.

Die Speicherseen von Pumpspeicherkraftwerken brauchen allerdings fast so viel Fläche wie Stauseen und noch dazu ausreichende Höhenunterschiede. Ihr Bau ist deshalb hinsichtlich der Umweltwirkungen ge-



Seit dreißig Jahren erzeugt dieses Druckluft-Speicherkraftwerk in Huntorf Strom.

nauestens zu untersuchen und benötigt eine lange Vorlaufzeit. Derzeit werden in Süddeutschland, aber auch in der Schweiz und Österreich mehrere neue Standorte für Pumpspeicherkraftwerke geprüft, aber das Potenzial eines Ausbaus dieser eleganten Speichertechnologie ist in Deutschland auf Grund der Umwelt- und Landschaftsrestriktionen stark begrenzt. Deshalb werden auch Potenziale und Möglichkeiten der Errichtung von unterirdischen Pumpspeicherkraftwerken, zum Beispiel in stillgelegten Bergwerken, untersucht.

Besonders groß ist das Potenzial für Pumpspeicherkraftwerke in Norwegen. Norwegen wird deshalb oft auch als „Batterie Europas“ bezeichnet. Die Herausforderung in Norwegen besteht darin, die Kraftwerke auf Pumpbetrieb umzurüsten. Bislang verstromten die Kraftwerke nämlich die großen natürlichen Wasserzuflüsse, sind aber nicht in der Lage, Wasser in den oberen Speichersee zurückzupumpen.

Langfristig scheinen die noch in der Entwicklung befindlichen **Druckluftspeicherkraftwerke** eine interessante Alternative zu bieten. In diesen Kraftwerken wird Luft mit einem elektrisch angetriebenen Verdichter komprimiert und mit bis zu 70 bar in tiefe Salzstöcke 600 Meter unter der Erdoberfläche gepresst. In Spitzenzeiten, wenn der Strombedarf groß ist, strömt diese Luft aus den Kavernen zurück und treibt eine Turbine an. CAES, Compressed Air Energy Storage, lautet der englische Fachterminus dieser Art der Stromspeicherung. Mit der Kombination einer solchen Druckluftspeicherung mit einem Gas- und Dampfturbinenkraftwerk lässt sich ein Gesamtwirkungsgrad von 55 Prozent erreichen.

## → Wie die Erneuerbare-Energie-Branche zeigt, dass sie bei jedem Wetter zuverlässig Strom liefert

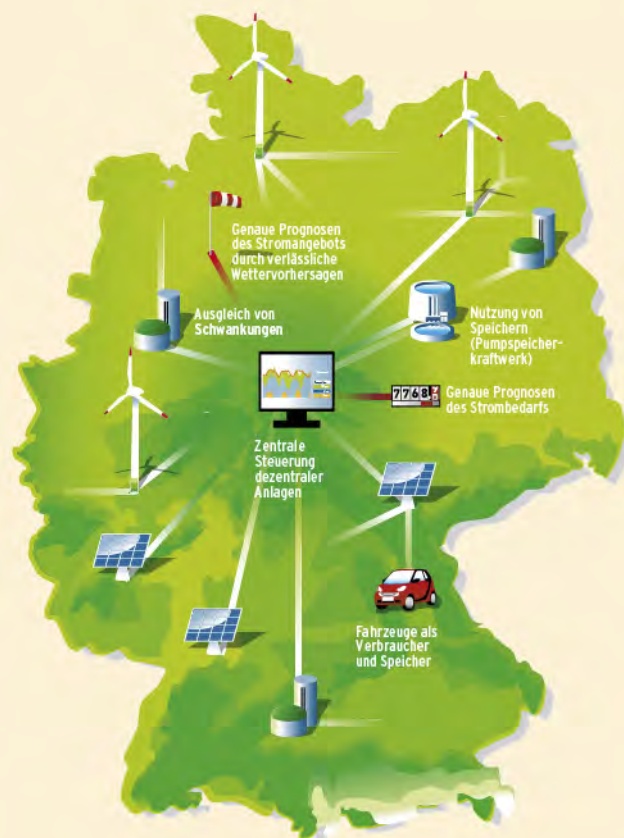
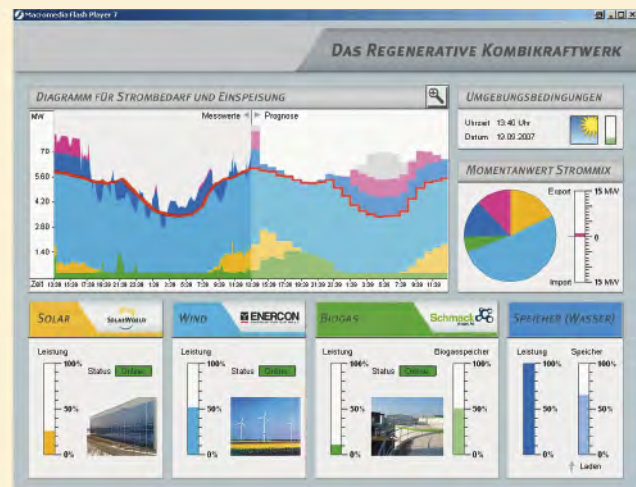
Kurt Rohrig beobachtet gespannt die langsam vorwärts kriechende rote Linie. Der Strich auf dem Bildschirm im Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES) in Kassel symbolisiert den Verbrauch von 11.740 Menschen. 5,5 MW brauchen diese Leute jetzt am Vormittag. Früh um sechs lag der Verbrauch noch bei schläfrigen 3,6 MW. Am Nachmittag soll er mit 6 MW das Maximum erreichen. Der Bedarf schwankt ständig.

Rohrig, Leiter „Energiewirtschaft und Netzbetrieb“ am IWES, sorgt dafür, dass Stromverbrauch und Stromproduktion immer dasselbe Level haben. Dazu regelt er einen **Verbund aus Erneuerbare-Energie-Anlagen**, die über ganz Deutschland verteilt sind. Ein Windpark steht kurz hinter den Nordseedeichen an der holländischen Grenze, ein Park bei Berlin, weitere Anlagen in Aachen. Die 18 Solaranlagen finden sich bei Freiberg in Sachsen, in Bayern und Baden-Württemberg. Die Biogaskraftwerke sind in Bayern, Nordrhein-Westfalen und Hessen. Und als Energiedepot fungiert ein Pumpspeicherkraftwerk, das nach den technischen Eckdaten einer Anlage in Thüringen konzipiert ist. In Kassel laufen die Steuer-Leitungen zusammen.

Gefördert wird dieser Versuch vom Bundesumweltministerium. „Man sieht hier, dass es für die Erneuerbaren keine Grenze nach oben gibt. Wir können Deutschland zu 100 Prozent mit erneuerbaren Energien versorgen“, verspricht Rohrig. Wenn der Wind sehr stark weht, lässt er mit dem überschüssigen Strom die Wasserspeicher des Pumpspeicherkraftwerkes füllen. Weht der Wind nicht, schultern Solar- und Biogasanlagen die Hauptlast der Energieversorgung. Und wenn auch das nicht reicht, lässt Rohrig das Wasser in die Turbinen des Wasserkraftwerkes donnern. Die erneuerbaren Energien mögen jede für sich genommen unstat sein. Zusammen können sie ihre Schwächen jedoch kompensieren. „Wir halten fast jeden beliebigen Fahrplan ein“, sagt Rohrig zufrieden.

Das **kombinierte Kraftwerk**, das vom IWES aus gesteuert wird, ist dabei nicht vollständig autark. Ein geringer **Im- und Export von Strom** über die Systemgrenzen hinaus ist erlaubt. Denn auch über die Grenzen Deutschlands hinweg findet ein ständiger Stromhandel statt. In Zukunft sollen auch die **Stromverbraucher helfen, die Stromschwankungen auszugleichen**. Dafür ist sogar die Integration von Elektrofahrzeugen mit ihren Speicherkapazitäten vorgesehen.

[www.kombikraftwerk.de](http://www.kombikraftwerk.de)



Das „Regenerative Kombikraftwerk“ vernetzt Windenergieanlagen, Biogas- und PV-Kraftwerke zu einem Gesamtverband

Während die heutigen Druckluftspeicherkraftwerke fossile Zusatzenergie benötigen, um eine Vereisung der Turbinen bei der Dekomprimierung zu verhindern, wird ein sogenanntes adiabates Druckluftspeicherkraftwerk entwickelt, das ohne fossile Befeuerung auskommt. Dazu wird die Wärme, die beim Verdichten der Luft entsteht, in einem gigantischen Wärmespeicher zwischengelagert. Ein solches Kraftwerk kommt auf einen Speicherwirkungsgrad von 70 Prozent. Die Energiedichten, die bei Druckluftspeichern erreichbar sind, erfordern große Speichervolumina, so dass beispielsweise ausgehöhlte Salzstöcke oder stillgelegte Bergwerke als Speicher genutzt werden. Bei der adiabaten Druckluftspeicherung wird zusätzliches Volumen für den thermischen Speicher benötigt.

Schon Ende der 1970er Jahre wurde in Huntorf in Niedersachsen das erste Druckluftspeicherkraftwerk mit einer Leistung von 290 MW in Betrieb genommen. Die in zwei Salzkavernen gespeicherte Druckluft nimmt unter 50 bis 70 bar ein Volumen von 150.000 m<sup>3</sup> ein. Eine zweite Anlage, die in den 1990er Jahren in Betrieb genommen wurde, befindet sich in den USA. Bisher sind dies die weltweit einzigen Anlagen für diese Art der Stromspeicherung. Für 2013 ist der Bau einer Versuchsanlage zur adiabaten Druckluftspeicherung in Staßfurt, Sachsen-Anhalt, geplant.

Elektrochemische Stromspeicher (**Batterien oder Akkumulatoren**) gibt es auf Grund zahlreicher Möglichkeiten der Materialkombination in verschiedensten Ausführungen. Lange Zeit waren Bleibatterien und Nickel-Cadmium(NiCd)-Batterien am weitesten verbreitet. Letztere sind jedoch seit 2004 wegen der umweltschädlichen Wirkung von Cadmium per Gesetz in ihrem Anwendungsfeld beschränkt oder je nach Cadmium-Anteil ganz verboten worden. Vor allem Lithium-Ionen-Batterien, aber auch Nickelmetallhydrid- und Hochtemperaturbatterien werden als Alternative immer häufiger verwendet.

Als stationäre Stromspeicher werden auch **Redox-Flow-Batterien** entwickelt. Bei diesem Batterietyp durchströmen zwei Elektrolyte (in Lösungsmittel gelöste Salze) eine elektrochemische Zelle, die durch eine Membran in zwei Halbzellen geteilt wird, und geben Elektronen ab beziehungsweise nehmen Elektronen auf. Die Elektrolyte werden in Tanks außerhalb der elektrochemischen Zelle gespeichert.

Durch die dynamische Entwicklung im Bereich der Elektromobilität sind die technischen Fortschritte bei modernen Batterietypen rasch; neue Fertigungsverfahren und große Stückzahlen drücken die Preise dieser Speicher.

Ein weiteres Speichermedium ist Wasserstoff. **Wasserstoff** aus Sonnenenergie und Wasser: Diese verlockende Vision einer ganz neuen Versorgungsinfrastruktur hat Jules Verne schon 1874 formuliert. Am einfachsten kann Wasserstoff durch Elektrolyse hergestellt werden. Wasser wird mit Strom in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt. Dabei entsteht in einer Elektrolysezelle unter Gleichspannung an der Kathode Wasserstoff und an der Anode Sauerstoff. Fortschrittliche Elektrolyseure haben heute einen Wirkungsgrad von etwa 70 Prozent (bezogen auf den Heizwert des Wasserstoffes), langfristig gesehen werden Wirkungsgrade nahe 80 Prozent erwartet. Im Zusammenhang mit der Stromproduktion aus erneuerbaren Energieträgern kommt Wasserstoff vor allem als Langzeitspeicher in Frage. Er kann beispielsweise in großen Druckgasbehältern oder unterirdischen Gaskavernen gespeichert werden oder – in begrenzten Mengen – in das Erdgasnetz eingespeist werden.

Der Wasserstoff aus erneuerbaren Energien wäre zudem nahezu unbegrenzt verfügbar. Mittel- und langfristig ist daher nur eine Wasserstoffwirtschaft auf Basis erneuerbarer Energien sinnvoll. Gelingt es allerdings, das Elektroauto mit attraktiven Reichweiten und Kosten zu realisieren, so ist der verkehrliche Einsatz von Wasserstoff zumindest im Stadtverkehr weniger vorteilhaft, weil der Wirkungsgrad der Wandlungskette Strom – Wasserstoff – Strom – Kraft deutlich niedriger ist als der Wirkungsgrad des Elektroautos. Daher ist der Einsatz von Wasserstoff insbesondere für Langstrecken-PKW oder Busse zu prüfen, die schwerer oder gar nicht batterieelektrisch betrieben werden können.

Wasserstoff kann zum einen in Verbrennungsmotoren, Gasturbinen oder speziellen Brennern verbrannt werden. Für die zukünftige Nutzung von Wasserstoff ist jedoch insbesondere die elektrochemische Umwandlung von Wasserstoff mit Brennstoffzellen von Bedeutung. Mit diesem Energiewandler wird die chemische Energie der Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff unmittelbar, effizient und emissionsfrei in elektrische Energie und Nutzwärme umgewandelt. Prinzipiell ist sie damit – als Umkehrung der Elektrolysetechnologie – eine ideal geeignete Wandlungstechnologie in einer sich auf Wasserstoff stützenden Energiewirtschaft.

## → Klimaschutz kommunal: Gutes Gewissen und feste Energiepreise



Die Gemeinde Trendelburg baut konsequent auf eine erneuerbare Energieversorgung.

Es gibt heute rund 120 Regionen und Kommunen in Deutschland, die ihre Energieversorgung zu **hundert Prozent aus erneuerbaren Energien** bestreiten möchten.

**Ihr Ziel: Neben ihrem Beitrag zum Klimaschutz wollen sie die Wertschöpfung bei der Energiebereitstellung in der Region steigern und neue Arbeitsplätze schaffen.** Ein Großteil dieser Kommunen hat sich als „100%-Erneuerbare-Energie-Regionen“-Netzwerk zusammengeschlossen. Ziel ist es, engagierte Akteure in den Regionen und interessierte Kommunen durch Kommunikations-, Transfer- und Vernetzungsleistungen zu unterstützen.

Das Netzwerk definiert „100%-EE-Regionen“ als Regionen oder Kommunen, die sich das Ziel gesetzt haben, ihr Energiesystem mittel- bis langfristig komplett auf erneuerbare Energien umzustellen und dieses auch in Form von politischen Beschlüssen oder Zielkonzepten festgelegt und Aktivitäten, Maßnahmen und Programme zur Realisierung dieses Ziels umgesetzt haben.

Eine der Kommunen ist **Trendelburg**, ein kleines Städtchen in der Nähe von Kassel mit knapp 5.700 Einwohnern. Bei einem Gesamtstromverbrauch von rund 19 GWh hat es sich zum Ziel gemacht hat, eine 100-Prozent-Erneuerbare-Energie-Kommune zu werden und sich so auch gegen steigende Energiekosten abzusichern. Und der Ort will noch mehr. Denn Selbstversorger ist die Stadt theoretisch schon. Zwei Biogasanlagen, vier Wasserkraftwerke, 23 Windräder und zahlreiche Photovoltaikanlagen erzeugen mittlerweile 30 GWh pro Jahr und damit mehr Strom, als die Stadt verbraucht.

Neben der Stromversorgung will die Stadt auch Teile der Wärmeversorgung in die eigene Hand nehmen. Für die örtliche Schule, den Bauhof, das Freibad und andere Liegenschaften soll ein neues Nahwärmenetz gebaut werden.

Zur Vorbildstadt konnte Trendelburg nur werden, weil Bürgermeister, städtische Gremien und andere Initiatoren von Anfang an versucht haben, möglichst viele Bürger der Kommune auf dem Weg zur 100-Prozent-Erneuerbare-Stadt mitzunehmen. Etwa als es um den Bau der ersten Windkraftanlagen ging. Bedenken hinsichtlich einer „Verspargelung der Landschaft“ wurden durch ausreichende Abstände von den Wohnhäusern und den Ausweis zweier Vorranggebiete im Regionalplan berücksichtigt, außerhalb der nun keine weiteren Windkraftanlagen mehr genehmigt werden dürfen.

Die Finanzierung für das ambitionierte Vorhaben kommt überwiegend aus der Region und bleibt in der Region.

Von den Erträgen der Solaranlage auf dem Dach des Kindergartens konnten neue Spielgeräte gekauft werden. „Damit können wir auch unseren Kleinsten spielend verständlich machen, dass sich der Einsatz für die erneuerbaren Energien und damit den Klimaschutz lohnt“, meint Bernhard Klug, Bürgermeister von Trendelburg.

[www.kommunal-erneuerbar.de](http://www.kommunal-erneuerbar.de)  
[www.100-ee.de](http://www.100-ee.de)  
[www.trendelburg.de](http://www.trendelburg.de)



Diese Brennstoffzelle wird mit Erdgas betrieben. In der Anlage wird daraus Wasserstoff produziert und dann in den Zellen in Strom und Wärme umgewandelt.

Brennstoffzellen werden nach der Art des verwendeten Elektrolyten und der Betriebstemperatur unterschieden. Die verschiedenen Brennstoffzellensysteme werden für sehr unterschiedliche Bereiche entwickelt: Membran-Brennstoffzellen für portable und stationäre Stromversorgung und für wasserstoffbetriebene Elektrofahrzeuge; dezentrale Stromerzeugungsaggregate und Kraft-Wärme-Kopplung im Bereich bis zu einigen hundert kW elektrischer Leistung und Hochtemperatur-Brennstoffzellen im MW-Bereich zur effizienten Stromerzeugung. Solange noch kein Wasserstoff zur Verfügung steht, kann auch Erdgas oder Biogas verwendet werden. Dafür müssen diese Gase zunächst zu einem wasserstoffreichen Brenngas „reformiert“ werden, bevor sie in der Brennstoffzelle mit Luftsauerstoff direkt in Strom umgewandelt werden.

Das bestehende Erdgasnetz stellt einen riesigen Energiespeicher dar, den man zukünftig auch für die Stromversorgung nutzbar machen könnte. Da Wasserstoff nur begrenzt in das Erdgasnetz eingespeist werden darf, wird derzeit die Idee verfolgt, aus dem erneuerbaren Wasserstoff Methan herzustellen, das problemlos vom Erdgasnetz aufgenommen werden kann („erneuerbares Methan“). Der Wasserstoff aus Wind- und Solarstrom wird dazu mit  $\text{CO}_2$  in einer thermochemischen Synthese (Methanisierung) zu Methan konvertiert. Das  $\text{CO}_2$  kann beispielsweise aus einer Biogasanlage oder einem anderen  $\text{CO}_2$  freisetzenden Prozess entnommen werden. Das so gewonnene erneuerbare Methan kann in der bestehenden Erdgasinfrastruktur gespeichert, transportiert, im Verkehrs- und Wärmesektor eingesetzt oder



Mit diesem Elektrolyseur wird Wasser in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff gespalten.

in Gaskraftwerken wieder zur Stromerzeugung eingesetzt werden. Erneuerbarer Strom wird so in einen speicherbaren Energieträger mit hoher Energiedichte umgewandelt, für den es bereits eine flächendeckende Infrastruktur gibt. Das bei der Verbrennung dieses Methans freigesetzte  $\text{CO}_2$  ist nicht klimawirksam, da es vorher dem Kreislauf entzogen wurde.

## Erneuerbare Energien im Elektro-Auto

Viele Fahrzeughersteller verfolgen heute eine allmähliche Elektrifizierung des Antriebsstranges, die vor allem innerorts zu einer deutlichen Verbrauchsreduzierung führt. Die bekannten „Hybrid-Fahrzeuge“ setzen dabei noch auf einen konventionellen Verbrennungsmotor als Energiequelle, teilweise kann der Elektromotor das Fahrzeug allerdings auch bereits selbständig antreiben. Die geringe Batteriekapazität ermöglicht jedoch nur kurze Strecken. Durch eine weitere Vergrößerung der Batterie bietet sich die Möglichkeit, diese über das externe Stromnetz zu laden und auch größere Strecken rein elektrisch, also mit „Strom aus der Steckdose“, zurückzulegen. Solche Fahrzeuge werden derzeit unter dem Begriff „Plug-In-Hybrid“ diskutiert. Bei reinen Elektrofahrzeugen geht man noch einen Schritt weiter. Sie verfügen nur noch über einen elektromotorischen Antrieb mit entsprechend leistungsfähiger Batterie.

Neben herkömmlichen Fahrzeugen entwickeln sich zudem neue Fahrzeugkonzepte – kleine Stadtfahrzeuge, Zwei- und Dreiräder.

Die Elektrifizierung des Antriebsstranges in Form von Plug-In-Hybriden und Elektrofahrzeugen erlaubt die Verwendung von elektrischem Strom im Straßenverkehr im großen Maßstab. Dies bewirkt eine erhebliche Verbreiterung der Energiebasis im Straßenverkehr, die heute nahezu vollständig von fossilen Energieträgern abhängig ist. Für Elektrofahrzeuge stünde ein überall erhältlicher und quasi genormter Energieträger zur Verfügung, der zahlreiche neue Energiequellen für den Verkehrsbereich nutzbar machen kann. Hierzu gehören auch die erneuerbaren Energien wie Windkraft, Wasserkraft oder Photovoltaik. Die Umweltbilanz des Betriebs von Elektro-PKW ist dann vor allem von der ökologischen Qualität der Stromerzeugung abhängig. Zusätzlich verringert sich die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern. Verkehrspolitisch besonders sinnvoll ist der Einsatz von Elektrofahrzeugen in Zusammenhang mit neuen Mobilitätskonzepten, beispielsweise Car-Sharing und öffentlicher Verkehr oder in Fuhrparks.

Die Verwendung von regenerativ erzeugtem Strom im Straßenverkehr ist dabei in ihrer CO<sub>2</sub>-Vermeidungswirkung durchaus vergleichbar mit dem Einsatz im Stromsektor. Klimapolitisch spricht also nichts dagegen, regenerativ erzeugten Strom in Elektroautos einzusetzen, wenn dieser aus zusätzlichen, für Elektromobilität gebauten Anlagen stammt. Außerdem werden durch elektrisch betriebene Fahrzeuge auch noch verschiedene lokale Umweltvorteile realisiert. Dazu gehört insbesondere der am Fahrzeug emissionsfreie und auch lärmarme Betrieb. So kann die derzeit durch Verbrennungsmotoren verursachte, hohe Luftbelastung mit Feinstaub und Stickstoffdioxid in den Innenstädten reduziert werden.



Elektroautos können mit Strom aus erneuerbaren Energien betankt werden.

Langfristig kann die Vielzahl der Batteriespeicher im Elektroauto nicht nur als Verbraucher genutzt werden, sondern auch als Speicher und Quelle für sogenannte Regelleistung. Wenn die Batterien der Elektroautos Strom bei Bedarf in das Stromnetz zurückladen können, könnten die Fahrzeuge helfen, die fluktuierenden erneuerbaren Energieanlagen in die Stromversorgung besser zu integrieren. Bereits relativ wenige, netzgekoppelte Elektro-PKW können zur lokalen Verbesserung der Netz- und Spannungsqualität herangezogen werden, indem sie bei Bedarf als Senke oder Quelle zu- oder abgeschaltet werden. Dies wird besonders vor dem Hintergrund steigender Anteile von erneuerbaren Energieanlagen im Niederspannungs- und Mittelspannungsnetz relevant.

Sehr viele Elektro-PKW können prinzipiell zu einem virtuellen Regelkraftwerk zusammengeschaltet werden. Ein Ersatz konventioneller Regelkraftwerkskapazitäten ist also denkbar. Erforderlich für diese system-integrativen Eigenschaften von Elektroautos ist eine Anpassung der Architektur des Verteilnetzes und eine technische Fortentwicklung der Elektrotankstellen.

## Dezentrales Energiemanagement

Auf dem Weg in eine dezentralere Energieversorgung mit Blockheizkraftwerken, erneuerbaren Energien und konventionellen Kraftwerken hilft die rapide Entwicklung der Informationstechnologien. Schon heute bieten Hersteller kleiner Blockheizkraftwerke (BHKW) Internet-Schnittstellen an, die die Fernkontrolle der Systeme ermöglichen. Auch selbst lernende Systeme werden eingesetzt. Die Steuerung des BHKWs merkt sich beispielsweise, wann der Haushalt bevorzugt Strom nachfragt. Zu diesen Zeiten wird dann auch der Wärmespeicher aufgefüllt. Damit kann der kostspielige Bezug von Strom aus dem Stromnetz minimiert werden – das Stromnachfrage-Profil wird geglättet. Ein solches klug gesteuertes Kleinkraftwerk fügt sich ein in den Trend zum „smarten Haus“. Das Mini-BHKW wird zur Energiemanagement-Zentrale.

Im Rahmen des Forschungsprogramms „E-Energy“ wird die Vernetzung von zeitlich variablem Verbrauch und Erzeugung derzeit in mehreren Pilotprojekten erprobt. „Modellstadt Mannheim“ heißt eines dieser Projekte, in dem intelligentes Energiemanagement im Haushalt getestet wird. In der „Modellstadt Mannheim“ ist die Steuerzentrale in der Lage, einzelne Lasten wie Kühlschrank, Wasch- oder Spülmaschine und kleine Erzeuger wie beispielsweise Blockheizkraftwerke entsprechend der aktuellen Stromnachfrage und Netzsituation ein- oder abzuschalten. Als Grundlage hierfür dient ein Preissignal, das dem Gerät den aktuellen Strompreis übermittelt.

Der Preis hängt dabei in erster Linie von der im Netz zu erwartenden Strommenge ab. Ist zu viel Strom vorhanden, beispielsweise durch viel Windeinspeisung, sinkt der an der Börse gehandelte Strompreis. In einem solchen Fall werden Verbraucher im Haushalt zugeschaltet und der Kunde profitiert von den günstigen Strompreisen. Bei hohen Strompreisen werden Verbraucher abgeschaltet, stromerzeugende Einheiten dagegen speisen ein. Auch die Integration von Elektroautos mit der Nutzung der Speicherkapazitäten der Fahrzeugbatterien ist zur Bereitstellung von negativer und positiver Regelleistung denkbar und wird in zwei E-Energy-Vorhaben untersucht. Der Eigentümer von Auto oder Waschmaschine kann dabei weiterhin entscheiden, dass seine Waschmaschine nachts nicht laufen oder sein Elektroauto wochentags aus dem Management herausgenommen werden soll. Bei diesem System ist das Lastmanagement für den Kunden ohne aufwendige Kommunikationssysteme möglich. Allein die Übertragung des Preissignals und die Benutzerpräferenzen tragen zur Optimierung des gesamten Systems bei. Das Gerät selbst ist klein und wird im Zählerschrank installiert.

Man kann noch einen Schritt weitergehen: Das „virtuelle Kraftwerk“ vernetzt eine Vielzahl kleiner Kraftwerke durch Datenleitungen mittels ISDN, GPRS, Mobilfunk oder Powerline so, dass die Systeme wie ein einziges Kraftwerk betrieben werden können. Virtuell – laut Oxford-Lexikon „to be in effect, but not in appearance“, also etwa „wirksam, aber nicht sichtbar“ sein – heißt das Kraftwerk nicht, weil es keinen echten Strom produziert, sondern weil es keine große, örtlich lokalisierbare Maschinenhalle mit Turbine und Generator mehr gibt. Mittelpunkt des virtuellen Kraftwerks ist eine Steuereinheit, die die Daten der dezentralen Kraftwerke verarbeitet und in Verbindung setzt und sie mit Prognosen zum Strombedarf, Erzeugung und Wetter vergleicht, die aktuellen Strom-Börsenkonditionen abfragt und insgesamt den Kraftwerkseinsatz klug optimiert.

Einige Stadtwerke setzen bereits heute solche Systeme ein. Sie verbinden Blockheizkraftwerke, Windkraftparks, Photovoltaikanlagen und andere Kraftwerke zu einem System. Das virtuelle Kraftwerk kann jedoch nicht nur Erzeuger vernetzen, sondern auch die Verbraucher in das Management integrieren.

Bislang sind es nur Pilotversuche, in denen ein virtuelles Kraftwerk realisiert wurde. Deshalb müssen neue Geschäftsmodelle entwickelt und kostengüns-

tige Wege der Kommunikation gefunden werden. Das virtuelle Kraftwerk ist zwar nicht per se eine klimaschonende Technologie. Es kann aber den energiewirtschaftlichen Nutzen dezentraler und erneuerbarer Energiequellen erhöhen und bei ihrer Integration in das Stromnetz helfen. Das virtuelle Kraftwerk bietet somit reelle Vorteile. Es ersetzt konventionelle Kraftwerke und deren Stromproduktion – und nicht nur dann, wenn der Wind gerade weht oder die Sonne scheint. Damit sind völlig neue Konstellationen denkbar: private Energiegenossenschaften, Städteverbände, die ihre Energieversorgung gemeinsam optimieren oder Windpark-Betreiber, die ihren Strom besser vermarkten wollen.

## Kraft-Wärme-Kopplung - erneuerbare Energien effizient genutzt

Wenn ein Großkraftwerk Strom erzeugt, werden große Dampfmen gen produziert und mit Turbinen in Strom umgewandelt. Bei der Umwandlung entstehen hohe Verluste. Trotz stetiger Verbesserungen hat der Mix der deutschen Großkraftwerke einen durchschnittlichen Nutzungsgrad von nur 36 Prozent. Mit anderen Worten: Fast zwei Drittel der im Brennstoff vorhandenen Energie wird sinnlos in großen Kühltürmen an die Umgebungsluft abgegeben oder erwärmt die Flüsse.

Bei der Kraft-Wärme-Kopplung macht man aus der Not eine Tugend und nutzt auch die Abwärme der Stromerzeugung, um Häuser zu heizen, Schwimmbäder zu erwärmen oder industrielle Prozesswärme bereitzustellen. Im Prinzip kann man jedes Kraftwerk in ein „Heiz-Kraftwerk“ umwandeln. Besonders geeignet sind dafür aber dezentrale, kleinere Kraftwerke. Denn dann muss die Wärme nicht so weit transportiert werden. In Deutschland werden derzeit 14 Prozent des Strombedarfs mit Kraft-Wärme-Kopplung gedeckt. In Dänemark sind es über 50 Prozent.

Ein Großteil davon stammt aus großen Kraftwerken, die ihre Wärme an Fernwärmenetze abgeben und aus industrieller Kraft-Wärme-Kopplung. Aber auch Blockheizkraftwerke – kompakte und kleinere Anlagen zur gleichzeitigen Strom- und Wärmeversorgung – tragen dazu bei.

Blockheizkraftwerke (BHKWs) gibt es in allen möglichen Größenordnungen, von einem Kilowatt bis hin zu einigen Megawatt.





Kleine Blockheizkraftwerke können mit moderner Kommunikationstechnik zu „virtuellen Kraftwerken“ vernetzt werden - und damit auch zur Integration erneuerbarer Energieträger geregelt werden.

Verschiedene Technologien eignen sich als BHKW – Ottomotoren, Brennstoffzellen, Gasturbinen, Stirling- oder Dampfmaschinen. Kommerziell verfügbar ist bislang allerdings nur der Ottomotor und in höheren Leistungsbereichen die Turbine. Der Stirling-Motor steht als Technologie für Blockheizkraftwerke, die klein genug für ein einzelnes Haus sind, nach jahrelanger Erprobung jetzt endlich an der Schwelle zur Marktreife, während die anderen Typen noch weiterentwickelt werden müssen.

Motor-Blockheizkraftwerke, kurz Motor-BHKWs, sind nichts anderes als Otto- oder Dieselmotoren, wie wir sie vom Auto kennen. Im Ottomotor wird ein Brennstoff wie zum Beispiel Erdgas mit Luft gemischt und in einem Zylinder verdichtet. Diese Mischung wird dann mit einer Zündkerze zur Explosion gebracht. Die bei dieser Explosion freigesetzte Bewegungsenergie wird – anders als beim Auto – nicht genutzt, um ein Fahrzeug anzutreiben, sondern einen Stromgenerator. Die Wärme des Abgases, des Schmieröls und des Kühlkreislaufes wird mit Wärmetauschern als Heizwasser abgegeben.

Der elektrische Nutzungsgrad liegt zwischen 25 Prozent bei kleinen und über 40 Prozent bei großen BHKWs. Hinzu kommt die Nutzung der Wärme, so dass insgesamt zwischen 80 und 90 Prozent der Energie des Brennstoffes genutzt werden. Durch diese hohen Wirkungsgrade sind BHKWs schon bei Betrieb mit Erdgas im Vergleich zu fossilen Kraftwerken ohne Kraft-Wärme-Kopplung klimaschonend. BHKWs können aber auch mit erneuerbaren Brennstoffen betrieben werden, beispielsweise mit Biogas, Klär- und Deponiegas, mit Pflanzenöl oder Holzgas.

Ein kleines BHKW wird im Heizungsraum aufgestellt. Größere verwendet man nicht für ein einzelnes Haus, sondern für größere Objekte wie Altenheime, Schwimmbäder oder Krankenhäuser. Oder man speist die Wärme in ein Nah- oder Fernwärmenetz ein, mit dem viele Einzelhäuser versorgt werden können.



In Neckarsulm versorgt ein großes Sonnenkollektorfeld ein Nahwärmenetz.

## Eintrittskarte in den Wärmemarkt: Nahwärme

Auch im Wärmemarkt sind neue Versorgungs- und Vertriebsstrukturen notwendig. Ein besonders wichtiges Beispiel für neue Wärmeversorgungsstrukturen sind Nahwärmenetze.

Sie sind eine „Eintrittskarte“ für umweltverträgliche Energietechniken und können beispielsweise Holz-hackschnitzelkessel, Strohheizwerke, Sonnenkollektoren mit Langzeitspeichern, Biogas-Anlagen oder Blockheizkraftwerke mit Biomasse-Vergasern untereinander sowie mit fossilen Heizungssystemen vernetzen. Nahwärmenetze sind damit sowohl der „Missing Link“ zwischen zentraler und dezentraler Energieversorgung wie auch zwischen der heute fossil basierten und einer zukünftigen Wärmeversorgung auf Basis erneuerbarer Energien. Sie bieten nicht nur einen höheren Komfort für die Kunden, sondern vereinfachen auch die Integration erneuerbarer Energien, da

- Umwandlungstechnologien eingesetzt werden können, die aus technischen Gründen erst oder bevorzugt bei höheren Leistungen realisierbar sind, beispielsweise Vergaser oder Tiefengeothermie;

- in größeren Anlagen kostengünstigere Brennstoffe einsetzbar sind (halmgutartige Biomasse, inhomogene Brennstoffe wie Stückholz anstelle von Pellets);
- Speichertechnologien sich eher rechnen und mit ihnen am besten eine saisonale Speicherung – Sommerwärme für winterliche Monate – oder eine Langzeitspeicherung möglich ist;
- durch die Kopplung verschiedenartiger erneuerbarer Energieträger ein Ausgleich für fluktuierende Wärmebereitstellung geschaffen werden kann, etwa durch Sonnenkollektoren mit Holz-Stützfeuerung;
- größere Aggregate eingesetzt werden können, die günstigere spezifische Investitionskosten aufweisen als kleinere. Beispielsweise liegen die Wärmekosten einer solaren Großanlage um den Faktor 2 unter denen einer Kleinanlage.

### Infos zu Systemintegration und Systemanalyse

- Forschungsprojekt E-Energy: [www.e-energie.info/](http://www.e-energie.info/)
- Fraunhofer-Institut: [www.ise.fraunhofer.de](http://www.ise.fraunhofer.de), [www.iwes.fraunhofer.de](http://www.iwes.fraunhofer.de)
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt: [www.dlr.de/tt](http://www.dlr.de/tt)
- Institut für Energie- und Umweltforschung: [www.ifeu.de](http://www.ifeu.de)
- Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoffforschung: [www.zsw-bw.de](http://www.zsw-bw.de)

### Infos zu KWK, Wasserstoff und Brennstoffzellen

- Broschüre „Energie dreifach nutzen: Strom, Wärme und Klimaschutz. Ein Leitfaden für kleine Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen“, [www.bmu.de](http://www.bmu.de)
- BHKW-Infozentrum: [www.bhkw-info.de](http://www.bhkw-info.de)
- Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung: [www.bkww.de](http://www.bkww.de)
- Das Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Informationssystem HyWeb: [www.hyweb.de](http://www.hyweb.de)

### Infos zu Elektroautos

- Bundesverband Solare Mobilität e. V.: [www.solarmobil.net](http://www.solarmobil.net)
- Elektromobilität bei der Deutschen Gesellschaft für Sonnenenergie: [www.dgs.de](http://www.dgs.de)

# WINDENERGIE - STARK IM AUFWIND

## → Die Fakten

- Zwischen 2000 und 2010 hat sich die Stromerzeugung aus Windkraft mehr als verfünffacht und trägt in einem durchschnittlichen Windjahr mit derzeit ca. 38 TWh zu rund 6 Prozent der Stromerzeugung in Deutschland bei.
- Bei Ausschöpfung des Potenzials an Land und auf See kann die Windenergie perspektivisch bis zu 60 Prozent der heutigen Bruttostromerzeugung in Deutschland decken.
- Der erste Windpark auf See in Deutschland „alpha ventus“ speist seit Herbst 2009 mit zwölf Offshore-Windenergieanlagen der 5-Megawatt-Klasse Energie in das Stromnetz ein. Derzeit sind in Deutschland drei Hochsee-Offshore-Windparks in Betrieb.
- Windvorranggebiete an Land werden vor allem an der Küste inzwischen größtenteils genutzt – auch im Binnenland stehen weitere Potenziale durch weiterentwickelte Anlagentechnik und zusätzliche Flächen zur Verfügung. Besonders an Küstenstandorten wird das Repowering zukünftig eine erhebliche Rolle spielen.
- Die Erzeugungskosten für Windstrom betragen je nach Standort zwischen 6 und 11 Ct/kWh (Wind an Land) und zwischen 12 und 15 Ct/kWh (Wind auf See).



On- und Offshore-Windpark, Montage einer Windkraftanlage

Wind wird von alters her vom Menschen genutzt. Der Handel über die Weltmeere wurde vor Erfindung der Dampfmaschine ausschließlich mit Segelschiffen durchgeführt; Windräder trieben Wasserpumpen zur Be- oder Entwässerung an und Windmühlen mahlen das Korn in Europa und der ganzen Welt. Noch um 1900 standen 30.000 Windmühlen allein in Norddeutschland. Erst als Elektrizität überall in Deutschland ausreichend und billig zur Verfügung stand, verschwanden die Windmühlen aus dem Alltag.

Seit den fünfziger Jahren des 20. Jahrhunderts haben deutsche Pioniere versucht, diese klimafreundliche und ressourcenschonende Technologie wieder zu beleben. Aber erst die Ölkrise der siebziger Jahre und das verstärkte Umweltbewusstsein seit den achtziger Jahren haben der Windenergienutzung in jüngerer Zeit zur Wiedergeburt verholfen.



Generatorenproduktion und ...

Moderne Windenergieanlagen nutzen das **Auftriebsprinzip** anstatt des Widerstandsprinzips. Dem Wind wird also nicht ein Widerstand entgegengesetzt, sondern der Wind erzeugt beim Vorbeiströmen an den Flügeln einen Auftrieb, ähnlich wie beim Flugzeug. Dieser Auftrieb versetzt den Flügel in Rotation. Kann mit dem Widerstandsprinzip dem Wind maximal 12 Prozent der Energie entzogen werden, so sind es beim Auftrieb immerhin 59 Prozent. Im besten Fall erreichen moderne Windenergieanlagen heute schon einen Wirkungsgrad von 50 Prozent, damit sind sie also schon sehr nahe an der maximal möglichen Energieausbeute angelangt.

Man kann in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit **vier unterschiedliche Betriebsphasen** einer Windenergieanlage unterscheiden. Weht der Wind zu schwach, so reicht die in ihm enthaltene Energie nicht aus, die Reibungs- und Trägheitsmomente der Anlage zu überwinden, die Anlage steht still. Ab einer gewissen Windgeschwindigkeit – je nach Anlagentyp bei rund 3 m/s – beginnt die Anlage zu arbeiten. Dabei nimmt die Leistung mit der dritten Potenz der Windgeschwindigkeit zu. Eine Verdoppelung der Windgeschwindigkeit verachtfacht also die Leistung. Steigt nun die Windgeschwindigkeit weiter an, wird die maximale Nennleistung des Generators erreicht. Bei weiter wachsender Windgeschwindigkeit muss der Leistungsüberschuss weggeregelt werden. Bei modernen Anlagen werden dazu die Rotorblätter aus dem Wind gedreht. Die maximale Leistung der Anlage wird bestimmt von der durchströmten Rotorfläche und ist im Prinzip unabhängig von der Anzahl der Flügel.



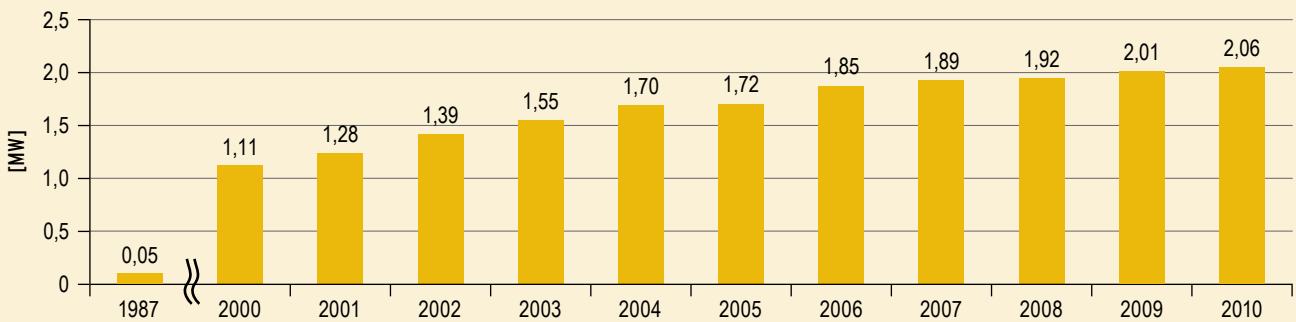
Stahlturnfertigung für Windkraftanlagen

## Technik der Windenergienutzung

Während in anderen Regionen der Welt die Windenergie auch zum Antrieb von Pumpen eingesetzt wird, dienen Windenergieanlagen in Deutschland heute ausschließlich der **netzgekoppelten Erzeugung von Elektrizität**. Die **technische Entwicklung** der Windenergieanlagen hat sich in den letzten 20 Jahren hauptsächlich auf die Konstruktion immer größerer Anlagen konzentriert, um so die Standorte mit guten Windverhältnissen optimal auszunutzen. Damit ist eine rasante technische Entwicklung angestoßen worden. Lag die durchschnittliche Größe der installierten Windenergieanlagen 1987 bei weniger als 50 kW, so betrug sie 2010 mit rund 2,1 MW mehr als das Vierzigfache (Grafik „Windenergieleistungen“). Es ist gegenwärtig noch nicht abzusehen, bei welcher Anlagengröße das technische und wirtschaftliche Optimum erreicht ist. Heute verfügen die größten Anlagen über eine Leistung von 7,5 MW. Der Ertrag einer solchen Anlage entspricht dem jährlichen Stromverbrauch von bis zu 6.000 Haushalten.

Der weitaus größte Teil der heute installierten Windenergieanlagen hat **drei Rotorblätter**, da so die mechanischen Belastungen am besten in den Griff zu bekommen sind. Drehende Dreiflügler werden von den meisten Menschen als optisch ausgeglichener empfunden als Ein- oder Zweiflügler. Die Flügel selbst bestehen meist aus Kunststoff und sind bei großen Anlagen über 60 m lang. Die vom Rotor überstrichene Fläche beträgt bei den größten am Markt verfügbaren Anlagen inzwischen mehr als 12.000 m<sup>2</sup>, das entspricht etwa der Fläche von zwei Fußballfeldern.

## Windenergieleistungen



Entwicklung der durchschnittlichen Leistung neuer Windenergieanlagen

Quelle: DEWI

Zur Leistungsregelung werden drei unterschiedliche Konzepte angeboten. Bei **stallgeregelten Anlagen** führen die starre Befestigung und die feste Drehzahl der Flügel zu einem Abriss der Strömung ab einer bestimmten Windgeschwindigkeit. Der Rotor nimmt dann auch bei weiter wachsenden Windgeschwindigkeiten nur eine nahezu konstante Leistung auf. Bei Anlagen im Megawattbereich dominiert die aktive Blattregelung (sogenannte **Pitchregelung**), bei der die Rotorblätter mechanisch um ihre Längsachse verdreht werden können. Solche Anlagen verlangen gegenüber stallgeregelten Anlagen einen höheren konstruktiven Aufwand, führen aber zu einer höheren Energieausbeute und zu einer geringeren Belastung der Rotoren. Ein Kompromiss zwischen beiden Konzepten ist die **Active-Stall-Regelung**, bei der die Rotorblätter ab ihrer Nenn- oder Maximalleistung der Windgeschwindigkeit leicht nachgeregelt werden können.

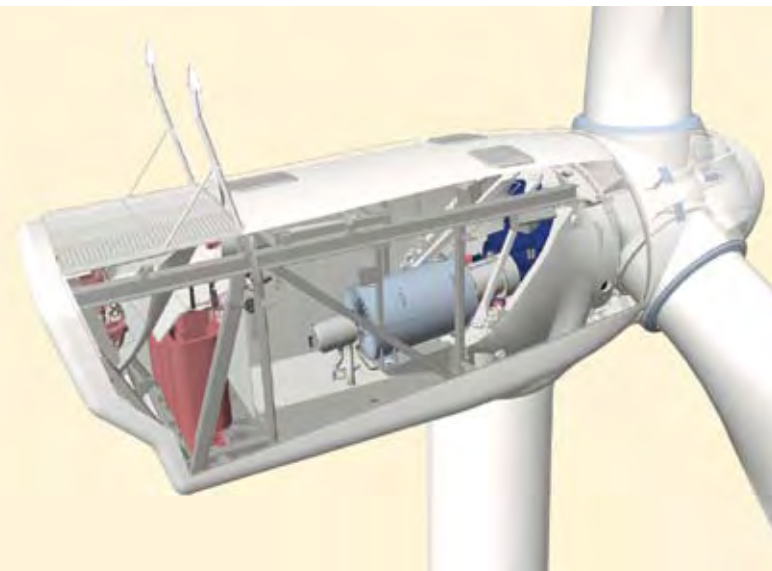
Durch die **Anpassung der Drehzahl** an die Aerodynamik des Rotors lässt sich das Windrad über einen großen Bereich der Windgeschwindigkeit mit einem optimalen Wirkungsgrad betreiben. Da vor allem für Großanlagen die Regelbarkeit und Gleichmäßigkeit der Leistungsabgabe von großer Bedeutung sind, haben die Anlagen mit variabler Drehzahl in den vergangenen Jahren deutlich zugenommen.

Bei Sturm werden die Lasten auf den Rotor zu groß. Pitchgeregelte Anlagen und Anlagen mit Active-Stall-Regelung werden dann vom Netz getrennt und die Rotorblätter in Fahnenstellung gestellt, der Rotor trudelt im Leerlauf. Stallgeregelte Anlagen werden

aerodynamisch mit Blattspitzenbremsen angehalten. Bei modernen Anlagen erfolgt eine langsame Abschaltung der Anlagen ab Windgeschwindigkeiten von 25 m/s, so dass beim Durchzug von Sturmfronten nur eine Drosselung der Anlagen und keine vollständige Abschaltung erfolgt.

Große Rotoren moderner Bauart drehen sich abhängig von der Nennleistung 10 bis 30 mal pro Minute. Die im Vergleich zu kleineren Windenergieanlagen geringere Drehzahl führt dazu, dass die Windräder in der Landschaft als „ruhiger“ wahrgenommen werden.





Blick in die Gondel einer Windenergieanlage

Die Rotation wird über eine Welle in einem Generator in Strom umgewandelt. In vielen Anlagen ist ein Getriebe dazwischengeschaltet. Das Getriebe übersetzt die niedrigen Drehzahlen des Rotors auf die erforderliche Generatordrehzahl von 1.500 Umdrehungen pro Minute. Durch das Getriebe entstehen allerdings Verluste, außerdem ist das **Getriebe** eine potenzielle Quelle der Geräuschentwicklung. **Getriebelose Anlagen** umgehen diese Probleme, allerdings sind hier aufwändig gefertigte, große vielpolige Generatoren notwendig.

Durch die bis Mitte der neunziger Jahre dominierenden Asynchrongeneratoren wird die Drehzahl der Rotoren an die Frequenz des elektrischen Netzes „gefesselt“. Dieses System ist regeltechnisch relativ einfach und robust, erlaubt aber keine kontinuierliche Drehzahlregelung des Rotors. Durch den Einsatz eines sogenannten „doppeltgespeisten Asynchrongenerators“ lässt sich die Betriebsdrehzahl in Grenzen variieren. Ein Synchrongenerator erlaubt dagegen eine variable Drehzahl, da der gesamte erzeugte Strom durch einen Frequenzumrichter auf die Netzfrequenz von 50 Hz gebracht wird.

Die **Türme** der größten Windenergieanlagen sind inzwischen bis zu 135 m hoch, so dass neue Windräder zusammen mit dem Rotor eine Höhe von bis zu 200 m erreichen. Dabei gilt: Je höher der Turm, desto weniger stören Verwirbelungen des Windes über dem Boden und desto höher sind die durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten am Rotor. Diese Windgeschwindigkeiten sind sehr wichtig für die Leistung des Windrades. Bei doppelter Windgeschwindigkeit verachtfacht sich der Stromertrag. Als Faustregel gilt: Mit jedem Meter höherer Nabe steigt der Ertrag der Windanlage um ein Prozent.

Für einen typischen Windstandort bedeutet beispielsweise eine Verdopplung der Nabenhöhe von 65 m auf 130 m eine Erhöhung der nutzbaren durchschnittlichen Windgeschwindigkeit von 5,8 auf 6,8 m/s. Mit der gleichen Nennleistung der Windanlage wird eine Steigerung der Stromproduktion von 45 Prozent erreicht.

Mit einem höherem Turm kann man darüber hinaus auch Windanlagen mit deutlich höheren Nennleistungen installieren: Gegenüber einer 2-MW-Anlage mit 65 m Nabenhöhe und einem durchschnittlichen Jahresertrag von 5,5 Millionen kWh erzielt eine 6-MW-Anlage mit 130 m Nabenhöhe am selben Standort durchschnittlich einen knapp viermal so hohen Jahresstromertrag.

Die Türme werden meist als Stahlmantel-Türme ausgeführt, die durch ihre schlanke Konstruktion den geringsten Einfluss auf das Landschaftsbild haben. Neben Stahltürmen kommen auch Betontürme zum Einsatz, die aufgrund ihrer Dämpfung die Schallemissionen mindern.



alpha ventus: Das fertige Offshore-Umspannwerk aus der Hubschrauberperspektive

## Vor der Küste neue Potenziale erschließen

Da aus ökonomischen und ökologischen Gründen die Standorte an Land begrenzt sind, hat man damit begonnen, die großen **Potenziale auf See** zu erschließen. Offshore – also vor der Küste – sind die Windgeschwindigkeit im Vergleich zu Standorten an Land deutlich höher und erlauben, bis zu 40 Prozent mehr Strom zu erzeugen.

Die größte wirtschaftliche Herausforderung der **Offshore-Windenergietechnik** ist es, die standortbedingten Zusatzkosten bei Errichtung und Betrieb zu minimieren. Technische Schwierigkeiten, wie Meerestiefen von bis zu 40 m, starke Belastungen durch Wind und Wellen sowie ein hoher Salzgehalt der Luft müssen beherrscht werden. Die **Seeverkabelung** und die speziellen **Gründungstechniken** machen den Windpark auf See teurer als an Land. Bei den kommenden Windparks in Gebieten mit moderaten Wassertiefen kommen Tragekonstruktionen zum Einsatz, die im Boden verankert werden.

Für noch größere Wassertiefen werden heute auch schwimmende Tragekonstruktionen entwickelt. Die Türme werden auf hoher See dagegen weniger hoch gebaut als bei vergleichbar leistungsstarken Anlagen an Land. Denn wegen der geringeren Verwirbelungen des Windes über der Meeresoberfläche erreicht man die für einen wirtschaftlichen und sicheren Betrieb nötigen Windgeschwindigkeiten schon in geringerer Höhe.

Die technische Umsetzung der **Netzanbindung** von Offshore-Windanlagen hängt von der Größe des Windparks und der Entfernung zur Küste ab. Innerhalb eines Offshore-Windparks werden die einzelnen Anlagen mit einem Mittelspannungskabel miteinander verbunden – wie bei einem Windpark an Land. Bei kleinen Offshore-Windparks nahe der Küste kann die Verbindung zum Netz durch eine Mittelspannungsleitung erfolgen. Für höhere Leistungen und größere Küstenentfernungen kann eine Hochspannungs-Drehstromanbindung wegen der hohen Blindleistung zu technischen Problemen bei der Anbindung an das Landnetz führen. Bei Entfernungen von mehr als 50 km ist die Hochspannungsgleichstromübertragung eine technisch und wirtschaftlich sinnvolle Alternative zur Wechselstromverbindung.

Das Infrastrukturplanungsbeschleunigungsgesetz, das Ende 2006 in Kraft trat, verpflichtet Stromnetzbetreiber, die Netzanbindung von Offshoroparks, deren Bau vor dem 31.12.2011 begonnen wurde, zu



Mit 21 Windkraftanlagen auf einem Areal von 7 km<sup>2</sup> speist Baltic 1 in der Ostsee seit 2011 Strom ins Netz

übernehmen. Damit wird die konzentrierte und effiziente Anbindung der Parks durch wenige leistungsfähige Trassen möglich. Das vermindert auch die **Auswirkungen der Trassen auf Natur und Umwelt**.

Große Offshore-Windparks müssen als Kraftwerke im nationalen oder internationalen Strom-Verbundnetz betrieben werden. Schnelle Regelbarkeit der einzelnen Anlagen und des gesamten Parks, sehr gute Netzverträglichkeit und die Fähigkeit zur Netzstabilisierung sind wichtige Anforderungen, die zusätzliche technische Ausstattungen bedingen. Die optimale Auslegung eines Offshore-Windparks ist aufgrund der höheren Kosten für Gründung und Netzanbindung wichtiger als für einen Windpark an Land.

Da der erschwerte Zugang bei Störungen zu längeren Stillstandzeiten führt, muss die Zuverlässigkeit der Anlagen auf See besonders hoch sein. Systeme, die Fehler früh erkennen, und spezielle Betriebs- und Wartungsstrategien müssen eine hohe Zahl der Betriebsstunden im Jahr garantieren.

Das Potenzial für die Offshore-Windenergienutzung ist beträchtlich: Bis 2030 ist es das Ziel der Bundesregierung, Windparks mit einer Leistung von 25.000 MW vor der deutschen Küste und in der weiter entfernten „Ausschließlichen Wirtschaftszone“ zu errichten. Der jährliche Stromertrag wird auf 85 bis 100 TWh geschätzt und entspräche damit rund 15 Prozent des heutigen Stromverbrauchs in Deutschland. Langfristig scheint es heute möglich, 70.000 MW Windleistung auf See zu installieren.



Montagearbeiten auf der Gondel einer 2,5-MW-Anlage

Bei der Standortwahl werden aber nicht nur wirtschaftliche und energietechnische Aspekte berücksichtigt. Die **Belange des Natur- und Umweltschutzes**, aber auch die der Schifffahrt, der wirtschaftlichen (Fischerei, Bodenschätze) und militärischen Nutzung müssen genauso abgewogen werden (siehe Abschnitt „Windenergie, Natur- und Umweltschutz“). So sind inzwischen in Zusammenarbeit verschiedener Bundesministerien die Meeresflächen identifiziert worden, die als Eignungsgebiete der Offshore-Windenergienutzung in Betracht kommen. Vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie wurden Ende 2005 erstmals **besondere Eignungsgebiete für Windenergieanlagen in Nord- und Ostsee** ausgewiesen. In einer strategischen Umweltpflichtprüfung und einer Natura-2000-Verträglichkeitsprüfung wurden unter Beteiligung zahlreicher Umwelt- und Naturschutzverbände knapp 700 km<sup>2</sup> in der Ausschließlichen Wirtschaftszone der Ost- und Nordsee als Eignungsgebiete ausgewählt.

Derzeit sind in Deutschland drei Hochsee-Offshore-Windparks in Betrieb: Das Testfeld „alpha ventus“ und „Bard Offshore 1“ in der Nordsee sowie „EnBW-Baltic 1“ in der Ostsee. Nach Abschluss der ersten Ausbauphase werden diese Windparks zusammen eine Leistung von rund 500 MW haben. Darüber hinaus sind 22 Windparkprojekte in der Nordsee und vier Projekte in der Ostsee genehmigt. Diese Projekte ergeben in der Summe eine installierte Leistung von 9.250 MW. Für weitere 69 Offshore-Windprojekte mit einer Gesamtleistung von fast 26.000 MW laufen Genehmigungsverfahren.

Der erste Offshore Windpark in Deutschland, alpha-ventus, – 45 km vor der Insel Borkum – läuft seit Herbst 2009. Die zwölf 5-MW-Anlagen haben im ersten Betriebsjahr bereits 170 GWh Strom ins Netz

eingespeist. Mit durchschnittlich 3.800 Volllaststunden pro Jahr liefert der Windpark Strom für rund 50.000 Haushalte. Mit der Forschungsinitiative „Research at alpha ventus“ (RAVE), für die bis zu 50 Millionen Euro an Forschungsmitteln zur Verfügung stehen, unterstützt das BMU seit 2008 eine umfassende technologische und ökologische Begleitforschung, deren Ergebnisse zeitnah der Weiterentwicklung der Offshore-Windenergienutzung zur Verfügung stehen.

Während die Offshore-Nutzung in Deutschland erst beginnt, gibt es in Dänemark, Schweden, Finnland, den Niederlanden, Irland und Großbritannien bereits rund 1.500 MW an installierter Offshore-Leistung.

## Die Kosten sind gesunken

Die **Kosten für Windenergieanlagen an Land** sind von knapp 4000 Euro/kW Anfang der 1980er Jahre zwischenzeitlich auf 800 bis 900 Euro/kW gesunken. Die weltweit zunehmende Nachfrage, höhere Anforderungen an Windenergieanlagen hinsichtlich der Systemintegration und steigende Rohstoffkosten bewirkten in den vergangenen Jahren jedoch einen leichten Anstieg der Anlagenpreise. Zu den reinen Kosten von Turm, Rotoren und Maschinenhaus kommen **Ausgaben für Fundament, Netzanbindung, Anfahrtswege, Grundstück und Planung** hinzu. Sie liegen bei etwa 30 Prozent der reinen Anlagenkosten. Für die gesamten Projektkosten einer 2-MW-Anlage mit 100 m Nabenhöhe sind somit etwa 3 Millionen Euro zu veranschlagen. Da der Energieertrag einer Anlage nicht nur von der Generatorgröße, sondern vor allem von der Rotorfläche, der Nabenhöhe, der Steuerungstechnik und von aerodynamischen Faktoren abhängt, bietet es sich an, die Investitionskosten auf den erwarteten jährlichen Stromertrag zu beziehen. Seit 1990 haben sich die spezifischen Kosten je kWh Jahresenergieertrag halbiert. Unter Berücksichtigung der Betriebs- und Wartungskosten werden bei den in Deutschland typischen Jahreswindgeschwindigkeiten von durchschnittlich 5 bis 6 m/s an der Küste und 4 bis 5 m/s (50 m über Grund) an guten Binnenlandstandorten **Stromgestehungskosten** zwischen 6 und 11 Ct/kWh erreicht.

Für Offshore- Windenergieanlagen liegen die **Zusatzinvestitionen** für die Netzanbindung und Gründung eines Offshore-Windparks – je nach Entfernung zur Küste und Wassertiefe – etwa in der gleichen Höhe wie der Preis der Windenergieanlagen. Da die Höhe der Zusatzkosten in erster Linie von der Wassertiefe und der Entfernung von der Küste und weniger von der Größe der Windenergieanlage abhängt, werden aus wirtschaftlichen Gründen möglichst große





Positive Veränderung des Landschaftsbildes durch Repowering: Weniger Windräder erzeugen mehr Leistung.

Anlagen geplant. Wegen der hohen Kosten des Netzanschlusses wird ein Offshore-Windpark sehr viel größer sein als sein Gegenstück auf dem Festland. In Deutschland werden die ersten Windparks Stromgestehungskosten zwischen 12 und 15 Ct/kWh erreichen. Ähnlich wie auf dem Land wird bei einer großtechnischen Offshore-Windenergienutzung auch ein großes Kosteneinsparpotenzial erwartet. Langfristig werden darum auch die Kosten der Stromerzeugung Offshore deutlich sinken.

## Natur- und Umweltschutz

Je mehr Windräder gebaut werden, desto genauer muss auch ihre Natur- und Umweltverträglichkeit hinterfragt werden. Neben einer konkreten Betrachtung der Einzelfälle und -standorte muss man auch die Vor- und Nachteile der Windenergie abwägen. Dabei ist insbesondere zu berücksichtigen, welche Schädigungen der Umwelt durch die Windenergieanlage an anderen Stellen vermieden werden können.

Die Windenergie kann die Umwelt durch Geräuschemissionen, Störung der Tierwelt (hiervon betroffen sind insbesondere Vögel und Fledermäuse) und ihrer Lebensräume sowie durch die Beeinträchtigung des Landschaftsbildes belasten.

Die **Geräuschemissionen** moderner Windenergieanlagen konnten gegenüber den Anfangsjahren der Windnutzung durch aerodynamische Verbesserungen, Geräuschisolierung der Maschinengondel und den Verzicht auf bestimmte Baugruppen erheblich gemindert werden. Während direkt an der Anlage häufig Schalleistungspegel in der Größenordnung von 100 Dezibel gemessen werden, beträgt der Pegel in 50 m Entfernung nur noch 55 Dezibel, was einem

Radio in Zimmerlautstärke entspricht. In 500 m Entfernung, dem Mindestabstand, den Windenergieanlagen im Allgemeinen von Wohngebieten einhalten müssen, ist eine moderne Anlage praktisch nicht mehr zu hören. Häufig ist auch das natürliche Rauschen des Windes lauter als die Anlagengeräusche. Generell gelten die strengen immissionsschutzrechtlichen Anforderungen der Technischen Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm).

Langjährige Beobachtungen haben gezeigt, dass **Vögel** im Flug tagsüber Windenergieanlagen ausweichen, allerdings vereinzelt Greifvogelarten je nach Standort in die Rotoren oder vor die Türme fliegen. Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass Zugvögel in Nächten und bei Nebel auch gegen Windenergieanlagen prallen. Drehende Rotoren werden von Vögeln durch die Änderung von Luftströmungen vor den Anlagen in der Regel erkannt und können so auch bei schlechter Sicht umfliegen werden. Dennoch sind einzelne Vogel- und Fledermausarten – vor allem der Rotmilan oder der Große Abendsegler – besonders vom Schlag an Windenergieanlagen betroffen. Anlagen sollten daher weder in den Hauptzugrouten von Vögeln noch in Vogelschutzgebieten aufgestellt werden. Da für die Errichtung einer Windenergieanlage immer eine Baugenehmigung einzuholen ist, werden diese Belange jeweils geprüft. Seit 2001 ist für Windparks ab drei Anlagen auch eine Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) gesetzlich vorgeschrieben. Mit der Novelle des Bundesnaturschutzgesetzes (BNatSchG 2010), die am 1.3.2010 in Kraft getreten ist, wurden Artenschutzbestimmungen auf die Ausschließliche Wirtschaftszone (AWZ) ausgeweitet. Dies führte zu einer Verschärfung der Umweltverträglichkeitsprüfung für Offshore-Windprojekte in der AWZ, die sich noch im Genehmigungsverfahren befinden.

Der Einfluss von Windenergieanlagen auf das **Landschaftsbild** wird subjektiv unterschiedlich bewertet. Sehen die einen darin eine negative Veränderung der Landschaft, so verbinden andere mit ihrem Anblick eine positive Neuausrichtung der Energiepolitik und fühlen sich nicht gestört. Der Konflikt um die unterschiedlichen subjektiven Wahrnehmungen lässt sich letztlich nicht auflösen. Aus naturschutzfachlicher Sicht ist das Landschaftsbild jedoch nicht ausschließlich eine Frage subjektiver Wahrnehmung, sondern auch die Beschreibung eines Gesamtkontextes eines bestimmten Lebensraumes. Insofern spielen auch Argumente des Landschaftsbildes eine Rolle bei der Standortwahl.

Neben den standortspezifischen Abwägungen müssen auch die **ökologischen Vorteile** der Windkraft betrachtet werden. So können durch eine Windenergieanlage mit einer Leistung von 1,5 MW im Laufe ihrer Lebensdauer von 20 Jahren rund 64.000 t CO<sub>2</sub>-Emissionen vermieden werden. Auch der Beitrag zum Ressourcenschutz ist beachtlich: Eine einzelne 1,5-MW-Windenergieanlage vermeidet den Einsatz von über 80.000 t Braunkohle in konventionellen Kraftwerken. Aufgeschüttet bildet diese Menge Braunkohle einen Hügel, dessen Höhe mit der Höhe der Windenergieanlage vergleichbar ist. Es ist daher eine Aufgabe der Raumplanung der Bundesländer, unter Beachtung der lokalen Gegebenheiten, in Abwägung der verschiedenen Aspekte des Umwelt- und Naturschutzes und unter Berücksichtigung der Optimierungsmöglichkeiten Vorrang- und Eignungsflächen auszuweisen, die für die Nutzung der Windenergie zur Verfügung stehen und auch Gebiete festzulegen, die für die Windkraft nicht in Frage kommen.

Auch wenn **Offshore-Windparks** zukünftig außer Sichtweite Strom erzeugen und damit die Betroffenheit der Küstenanwohner minimiert werden, bleibt ihr Betrieb mit Auswirkungen auf die Natur verbunden, die sich durch technische Maßnahmen nicht vollständig vermeiden lassen (siehe Abschnitt „Vor

der Küste neue Potenziale erschließen“). Durch die Inanspruchnahme großer Meeresflächen werden sensible Arten, wie zum Beispiel Seetaucher, aus ihren angestammten Rast- und Überwinterungsgebieten verdrängt. Beeinträchtigungen des Vogelzugs sind nicht auszuschließen und werden im Rahmen der ökologischen Begleitforschung untersucht. Insbesondere in der Bauphase der Offshore-Parks ist mit Störungs- oder Vertreibungseffekten für Meeressäugtiere und eine Beeinträchtigung von Fischen und Lebensgemeinschaften am Meeresboden zu rechnen; daher verweist die nationale Meeresstrategie aus dem Jahr 2008 auf die Bedeutung von Maßnahmen zur Minimierung des Unterwasserlärms beim Bau, Betrieb und Rückbau, aber auch von Maßnahmen zur Minimierung der Wirkungen auf die Meeresumwelt und den Vogelzug.

Das an den ersten Offshore-Pilotanlagen durchgeführte ökologische Mess- und Kontrollprogramm wird helfen, den Einfluss auf den Vogelflug oder die Auswirkungen niederfrequenter Lärmemissionen auf die Meeresfauna besser zu verstehen. Unter Beteiligung des Bundesamtes für Naturschutz (BfN) und vieler Umwelt- und Naturschutzverbände sind inzwischen die ersten besonderen Eignungsgebiete für Windenergieanlagen in der Nord- und Ostsee ausgewiesen worden. Flächen innerhalb von Schutzgebieten sind für die Errichtung von Windparks grundsätzlich nicht geeignet und eine Förderung nach dem EEG ausgeschlossen. Dennoch bleibt es auch weiterhin eine wichtige Aufgabe, die berechtigten Interessen des Klimaschutzes mit denen des Meeresnaturschutzes zu vereinbaren.

## Windenergie in Deutschland

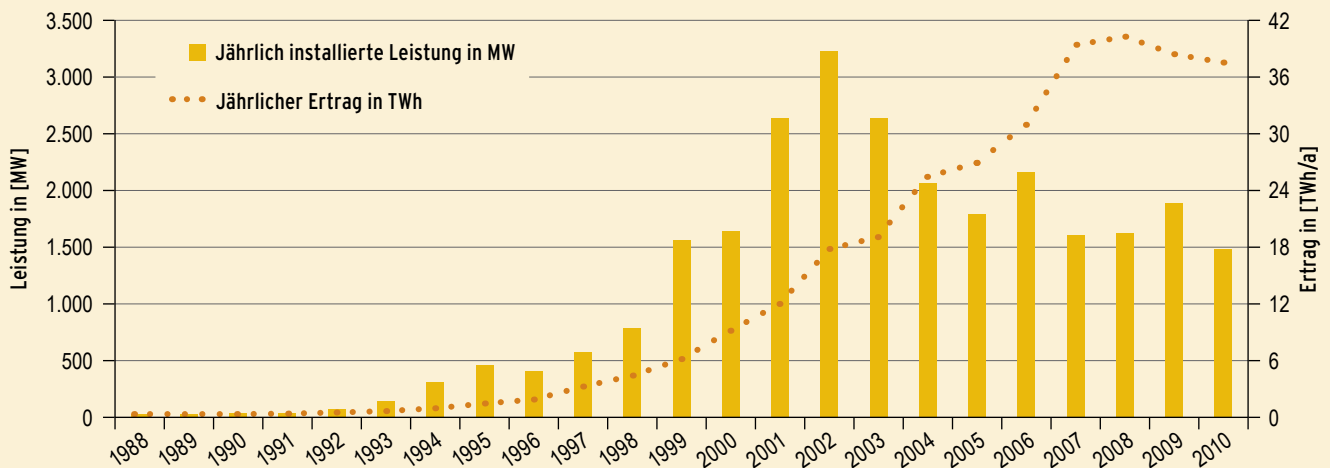
Die in Deutschland installierte Windenergieleistung wächst seit Jahren beträchtlich. Insgesamt wuchs die Zahl der Windenergieanlagen bis Ende 2010 auf 21.585 Anlagen mit einer installierten Leistung von 27.204 MW an. Mit einem Stromertrag von rund 38 TWh in einem durchschnittlichen Windjahr trägt die Windkraft zu 6,2 Prozent der Stromerzeugung in Deutschland bei. Dies entspricht einer Einsparung an Treibhausgasen von etwa 28 Millionen Tonnen. 2010 war ein windschwaches Jahr. In einem durchschnittlichen Windjahr hätten die Turbinen 5 TWh mehr Strom produziert.

Seit 2002 verringert sich allerdings der jährliche Zubau, so dass 2010 mit 1.551 MW nur noch halb so viel Leistung ans Netz gebracht werden konnte wie im Rekordjahr 2002. Begründet ist dieser Rückgang mit dem immer geringeren Flächenangebot für die Windenergienutzung an Land. Die von den Landkrei-



Rotorblattfertigung für Windenergieanlagen in Magdeburg; Vorbereitung für den Transport zur Montagestelle

## Windenergieleistung und Stromertrag



Windenergie in Deutschland - eine stürmische Entwicklung

Quelle: BMU

sen ausgewiesenen Eignungsgebiete sind mittlerweile zu einem beträchtlichen Teil bebaut. Hinzukommen neue Abstandsempfehlungen zur Wohnbebauung sowie Höhenbegrenzungen, welche die Umsetzung neuer Anlagen erschweren.

Aktuell ist zu erkennen, dass Länder und Kommunen, insbesondere in Nordrhein-Westfalen, Baden-Württemberg, Niedersachsen, Schleswig-Holstein und Brandenburg den weiteren Ausbau der Windenergie mit neuen Flächenausweisungen unterstützen.

Obwohl die Geschwindigkeit des Windenergieausbaus seit 2003 zurückgegangen ist, gehört Deutschland nach China und den USA zu den Ländern mit der höchsten installierten Windenergieleistung. (siehe Grafik „Windenergieleistung“ Seite 52). Knapp die Hälfte der insgesamt installierten Leistung findet sich dabei in den windreichen Küstenländern.

Doch die Technikentwicklung macht die Windenergie auch im Binnenland immer attraktiver. Gerade an guten Standorten stehen heute allerdings oft noch alte Anlagen aus den 1980er und 1990er Jahren. Wenn man sie durch neue Anlagen ersetzt – das sogenannte Repowering – können viele alte Windenergieanlagen durch eine geringere Anzahl neuer Windenergieanlagen ersetzt werden. Das führt insgesamt zu einer Erhöhung des Stromertrages und zugleich zu einer Entlastung des Landschaftsbildes. Unter wirtschaftlichen Aspekten kommen hierfür Altanlagen mit mindestens zehn Betriebsjahren in Frage. Das sind vor allem die knapp 5.200 Anlagen, die bis 1997 errichtet wurden. Bis 2010 wurden davon

erst 800 Windenergieanlagen mit einer Leistung von rund 322 MW durch 440 Anlagen mit einer Leistung von rund 916 MW ersetzt. Seit 2009 gibt das EEG zusätzliche wirtschaftliche Anreize für das Repowering.

Potenziell könnten in Deutschland Windenergieanlagen an Land und auf See große Teile der Stromproduktion abdecken. Die Leitstudie 2010 (siehe Seite 47) geht im „Basisszenario 2010 A“, in dem ein ambitionierter Ausbau von Windkraft zu Grunde gelegt wird, von mehr als 260 TWh im Jahr 2050 aus, davon 160 TWh von Windenergie auf See. Das entspricht knapp einem Drittel der gegenwärtigen Bruttostromerzeugung.

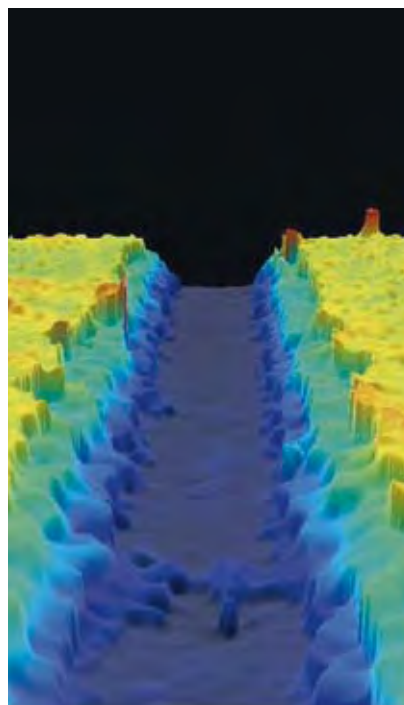
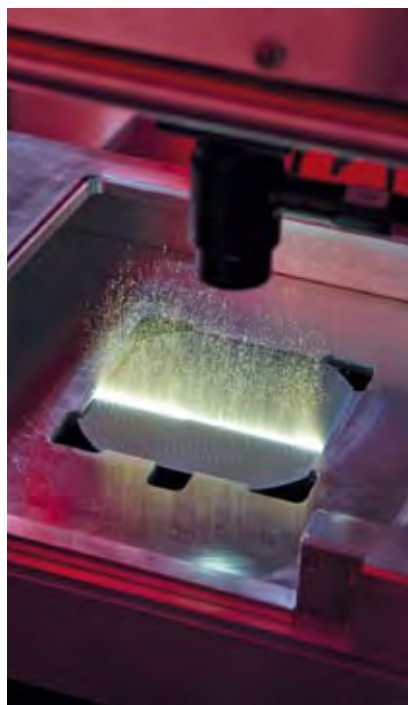
### → Infos zur Windenergienutzung

- Aktuelles zur Windenergienutzung: [www.erneuerbare-energien.de](http://www.erneuerbare-energien.de)
- Bundesverband WindEnergie e. V.: [www.wind-energie.de](http://www.wind-energie.de)
- Offshore Forum Windenergie: [www.Ofw-online.de](http://www.Ofw-online.de)
- Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena): [www.offshore-wind.de](http://www.offshore-wind.de)
- European Wind Energy Association: [www.ewea.org](http://www.ewea.org)
- Deutsches Windenergie-Institut (DEWI): [www.dewi.de](http://www.dewi.de)
- Fraunhofer-Institut: [www.iwes.fraunhofer.de](http://www.iwes.fraunhofer.de)

# PHOTOVOLTAIK - SONNENSTROM ÜBERALL

## → Die Fakten

- Solarzellen erzeugten in Deutschland 2010 rund 12 TWh Strom. Das sind fast 2 Prozent des bundesdeutschen Stromverbrauchs. Rund 8 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> sparen Solarzellen damit ein.
- Die Kosten des solar erzeugten Stroms sind in den vergangenen zwei Jahren dramatisch gesunken.
- Durch das EEG entwickelte sich Deutschland zum derzeit größten Markt für Solarenergie weltweit. Deutsche Solarfirmen gehören zu den führenden auf dem globalen Markt.



Photovoltaik-Kraftwerk, Herstellung einer Rückseitenkontaktzelle im Laserverfahren, mikroskopische Aufnahme einer laserstrukturierten CIS-Solarzelle

Solarzellen wandeln Sonnenlicht direkt in elektrischen Strom um. Herzstück jeder Solarzelle ist ein Halbleiter, der meist aus Silizium besteht und den „photovoltaischen Effekt“ nutzt: Bei bestimmten übereinander angeordneten Halbleiterschichten entstehen unter dem Einfluss von Licht (Photonen) freie Ladungen, die als Elektronen über einen elektrischen Leiter abfließen können. Der so entstehende Gleichstrom kann direkt zum Betrieb elektrischer Geräte genutzt oder in Batterien gespeichert werden. Wird er in Wechselstrom umgewandelt, kann er auch in das öffentliche Stromnetz eingespeist werden. Das ist heute die häufigste Art, den Solarstrom zu nutzen.

## Von Milliwatt bis Megawatt: Ein dynamischer Markt

Solarzellen gibt es in allen denkbaren Größenordnungen. Kleinstzellen gelangen in Taschenrechnern und Uhren zum Einsatz. Im Kilowatt-Bereich können sie, in Modulen zusammengefasst, Häuser mit Strom versorgen. Zu großen Solarfeldern zusammengestellt, dringen Solarzellen aber auch in den Megawatt-Bereich vor.

Zwar ist die Sonnenstrahlung in Deutschland nicht so üppig wie in südlichen Ländern. Da Solarzellen aber auch den diffusen Anteil der Strahlung energetisch umsetzen, lohnt sich Photovoltaik auch in unseren Breiten. Die Strahlungsenergie der Sonne ist in den südlichen Bundesländern im Jahresmittel höher als im Norden (siehe Grafik „Globalstrahlung in Deutschland“). Auf einen Quadratmeter fallen jährlich zwischen 1.200 und 900 kWh Strahlungsenergie; eine moderne Solaranlage setzt im Schnitt ein Zehntel davon in Wechselstrom um.

An Fläche besteht kein Mangel: In Deutschland stehen insgesamt 2.300 km<sup>2</sup> auf Dächern, an Gebäudefassaden und an anderen Stellen innerhalb von Siedlungsflächen für eine solartechnische Nutzung zur Verfügung. Würden Photovoltaik (Strom) und Solar Kollektoren (Warmwasser) diese Fläche je zur Hälfte ausnutzen, könnten Solarzellen 135 TWh Strom pro Jahr erzeugen. Das entspricht etwa einem Viertel des gegenwärtigen Stromverbrauchs.

Zu den Solaranlagen auf Gebäuden kamen in den letzten Jahren zunehmend Anlagen auf freien Flächen hinzu. 2009 waren circa 20 Prozent oder 768 MW der installierten Solarzellen-Leistung in sogenannten Freiflächen-Anlagen oder Solarparks errichtet. Um den Verbrauch wertvoller Flächen zu vermeiden, werden nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz nur Anlagen auf Flächen mit bestimmter Vornutzung vergütet, beispielsweise bereits versiegelte Flächen oder Konversionsflächen, die keine Naturschutzgebiete oder Nationalparks sind. Ackerflächen werden seit Mitte 2010 grundsätzlich nicht mehr über das EEG vergütet (siehe Abschnitt „Erneuerbare Energien und Naturschutz“). Die derzeit größte Freiflächen-PV-Anlage Deutschlands mit einer Leistung von 80,7 MW steht auf dem Gelände eines ehemaligen Tagebaus bei Finsterwalde in Brandenburg.

Im Jahr 2010 wurden weltweit Solarzellen mit einer potenziellen Leistung von 17 GW installiert – verglichen mit 7,3 GW 2009 ein starkes Wachstum. Insgesamt waren damit 40 GW installiert – siebenmal so viel wie noch vor fünf Jahren. Fast die Hälfte dieser Leistung ist in Deutschland installiert. Die weltweite Produktion stieg von 2005 bis 2010 jährlich durchschnittlich um 50 Prozent. Auch 2010 blieb Deutschland mit einem weiteren Zubau von 7.250 MW der mit Abstand größte PV-Markt der Welt.

Die Photovoltaik hat in den vergangenen Jahren nicht nur **drastische Nachfragesteigerungen** verbucht, sondern auch eine **deutliche Kostenreduktion** durchlaufen. Seit Anfang 2006 konnten die Systemkosten – also die Kosten der fertig montierten Solarmodule – um 50 Prozent reduziert werden;

## Globalstrahlung in Deutschland



Durchschnittliche jährliche Sonneneinstrahlung in kWh/m<sup>2</sup>

Quelle: Deutscher Wetterdienst

25 Prozent davon allein zwischen Anfang 2009 und Ende 2010. Auch in den folgenden Jahren werden hohe Effizienzsteigerungen erwartet. Seit der Überwindung weltweiter Produktionsengpässe hochreinen Siliziums – dem Grundstoff für die meisten Solarzellen – spiegelt sich dieser Effizienzgewinn in deutlich günstigeren Preisen wider. Die Investitionskosten für eine Hausdachanlage liegen heute deutlich unter 3.000 Euro pro Kilowatt installierter Leistung. Während Strom aus PV-Anlagen 1985 noch etwa 1,50 Euro/kWh kostete, lagen die Stromgestehungskosten 2010 in Deutschland je nach Anwendungsfall und Technologie zwischen durchschnittlich 0,27 Euro/kWh bei Freiflächen-Anlagen und 0,32 Euro/kWh bei kleineren Anlagen auf Einfamilienhäusern. An Orten mit hoher Sonneneinstrahlung und bei relativ hohen allgemeinen Strompreisen, wie in Süditalien, konnte bereits Parität mit den Endkundenpreisen erreicht werden.



Netzunabhängige PV-Anlagen produzieren Solarstrom ausschließlich für den Eigenverbrauch.

In Zukunft sollen die Stromgestehungskosten weiter sinken. Bis Mitte des Jahrzehnts erwartet die Branche einen Wert von 0,20 Euro/kWh für kleine PV-Anlagen in Deutschland. Damit wird PV-Strom günstiger sein als der Strompreis für private Endkunden. Neben einer Steigerung des Produktionsvolumens wird auch die Verbesserung der Materialausbeute – heute geht ein Großteil des Halbleitermaterials beim Schneiden der Wafer und anderer Verarbeitungsschritte verloren – und eine Steigerung des Wirkungsgrades der fertigen Zellen die Kosten dieser innovativen Technologie weiter senken.

## Neue Technologien für die Zukunft

Inzwischen steht eine große Zahl von Halbleitermaterialien für die Herstellung von Solarzellen zur Verfügung. Das wichtigste Element ist nach wie vor das Silizium. Es wird in drei Varianten hergestellt:

- Das teure, aber sehr reine **monokristalline Silizium** ist in der Herstellung besonders aufwändig, weist aber die besten Wirkungsgrade für die Umwandlung der Strahlungsenergie auf. Monokristalline Silizium-Zellen haben einen Wirkungsgrad von 15 bis 18 Prozent, im Labor bis zu 25 Prozent.
- **Polykristallines Silizium** lässt sich einfacher, schneller und damit kostengünstiger herstellen. Die Korngrenzen zwischen den Kristalliten der Siliziumzelle bremsen jedoch den Strom der Elektronen und führen zu etwas schlechteren Wirkungsgraden. Sie liegen heute bei 13 bis 16 Prozent, im Labor bis zu 20 Prozent. Dies schlägt sich in einem Bedarf an größeren Solarflächen und größeren Gestellen nieder.



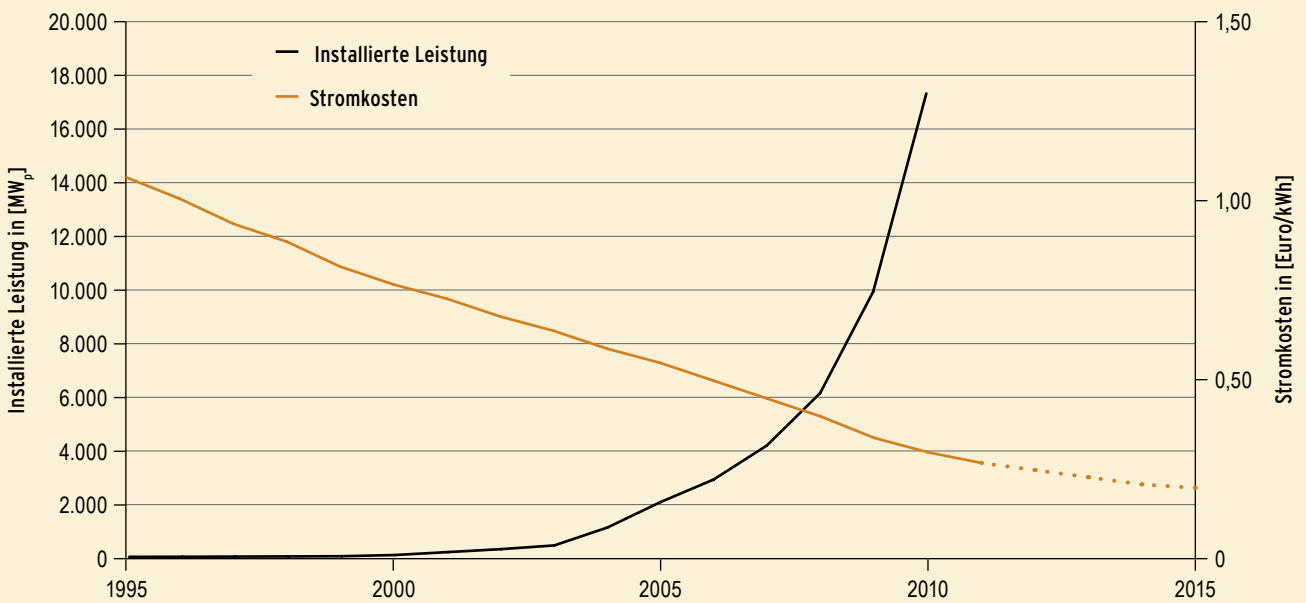
Netzgekoppelte Anlagen speisen den überschüssigen Strom in das Stromnetz ein, wobei diese Einspeisung zu festen Tarifen vergütet wird.

- Noch billiger in der Herstellung sind **Dünnschichtzellen** aus amorphem Silizium. Allerdings haben sie einen deutlich niedrigeren Wirkungsgrad von unter 10 Prozent und die Langzeitstabilität gegenüber den kristallinen Zellen ist geringer, was die Kostenvorteile weitgehend wieder ausgleicht.

Neben dem heutigen Standard-Material Silizium wird eine Vielzahl weiterer Stoffe und Materialkombinationen eingesetzt. Auch von der **Dünnschichttechnologie**, die mit deutlich weniger Material als die kristallinen Silizium-Zellen auskommt, werden starke Kostensenkungen erwartet. Die wichtigsten Materialien für Solarzellen sind neben dem amorphen Silizium das Gallium-Arsenid (GaAs), Germanium (Ge), Cadmium-Tellurid (CdTe) und Kupfer-Indium-Diselenid (CIS). Die Dünnschichttechnologie hat weltweit mit 20 Prozent der neu installierten Leistung besonders bei Freiflächenanlagen schon einen wichtigen Markt erschlossen. Durch den starken Preisverfall der dickeren Siliziumzellen ist ihr schneller Aufstieg aber gestoppt. Gerade auf kleineren Hausdächern, wo der Platz an der Sonne knapp ist, wird sich meistens für den höheren Wirkungsgrad von mono- oder polykristallinem Silizium entschieden.

Als vielversprechende Konzepte gelten die konzentrierende Photovoltaik und die sogenannten **Tandemzellen**. Bei der konzentrierenden Photovoltaik wird optisch das Licht gebündelt und somit teure Halbleiterfläche eingespart. Dies ist vor allem für Orte mit hoher Direkteinstrahlung vielversprechend. Bei Tandemzellen werden mehrere Halbleitermaterialien so kombiniert, dass sie einen größeren Bereich des Spektrums des Sonnenlichtes ausnutzen können. Der derzeit höchste Wirkungsgrad einer Solarzelle wurde im Labor an einer Tandemzelle unter konzentriertem Licht gemessen und betrug knapp über 41 Prozent.

## Marktentwicklung



Marktentwicklung in Deutschland, Verlauf der Stromgestehungskosten von PV-Anlagen und die mögliche zukünftige Entwicklung

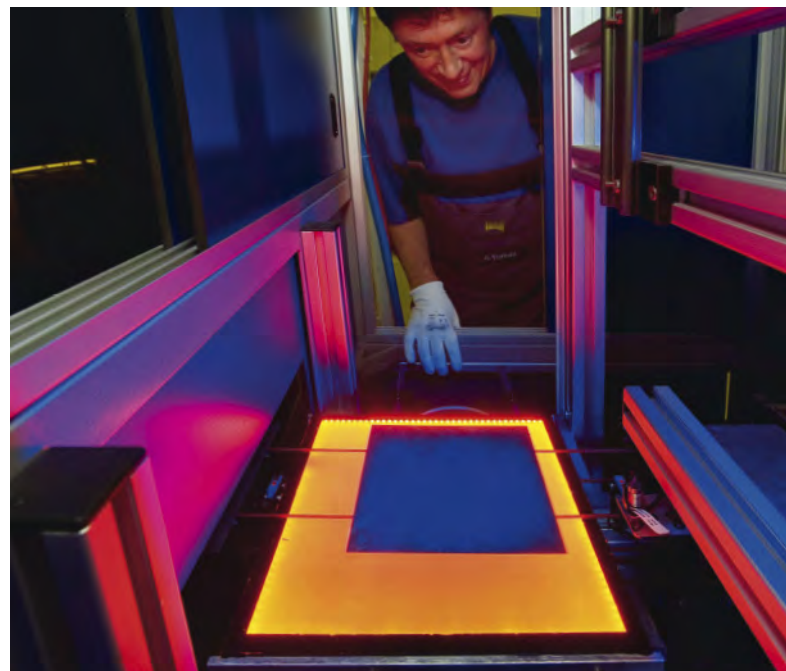
Quelle: BMU

## Anwendungen

**Netzgekoppelte Anlagen** bestehen aus der Solaranlage auf dem Dach oder an der Fassade, die bei direkter oder indirekter Einstrahlung Gleichstrom liefert. Über einen Wechselrichter wird der Gleichstrom in Wechselstrom umgewandelt und kann dann direkt von Haushaltsgeräten genutzt oder ins Netz eingespeist werden. Die Leistung typischer Anlagen auf Gebäuden liegt zwischen 2 und 5 kW. Die größte Aufdach-Anlage Deutschlands wurde Ende 2010 auf einem Logistikzentrum in Philippsburg (Baden-Württemberg) installiert. Sie ist so groß wie zwölf Fußballfelder und hat eine Leistung von 7,4 MW. Weltweit ist es die drittgrößte Dach-Anlage – die größte wurde 2010 mit 13 MW in Kallo (Belgien) installiert. Noch größere Anlagen gibt es auf Freiflächen. Große Solarparks „auf der grünen Wiese“ sind allerdings umstritten, da sie zu einem zusätzlichen Flächenverbrauch führen. Die gesetzliche Förderpraxis zielt darauf ab, den Bau großer Solaranlagen auf bereits versiegelte Siedlungsflächen oder auf sogenannte Konversionsflächen zu beschränken.

Die Vergütung von Solarstrom wird durch das EEG geregelt. Für Anlagen, die in der zweiten Hälfte des Jahres 2011 auf Gebäuden installiert werden, beträgt sie bei kleinen Anlagen unter 30 kW elektrischer Leistung 28,74 Ct/kWh und bleibt über 20 Jahre konstant. Je nach zukünftiger Marktentwicklung wird diese Vergütung für in folgenden Jahren installierte

Anlagen unterschiedlich stark absinken. Beispielsweise liegt die Vergütung bei einem Photovoltaik-Zubau von 3 Gigawatt im Folgejahr 9 Prozent niedriger. Diese Absenkungen sind im Verhältnis zu denen im vergangenen Jahrzehnt sehr stark, weil die Effizienzsteigerungen und Kostensenkungen in der PV-Branche schneller durchgreifen als prognostiziert.



Herstellung von Solarzellen: Beschichtung von Siliziumwafern mit einer blauen Antireflexionsschicht



Montage einer Solarstromanlage mit einer Leistung von 4,6 MW

Eine wichtige Anwendung der Photovoltaik sind **netz-unabhängige Kleinanlagen** zur Versorgung von entlegenen Funk- und Messstationen, Notrufsäulen, Garten- und Wochenendhäusern. Je nachdem, ob die Geräte mit Gleich- oder Wechselstrom arbeiten, ist ein Wechselrichter notwendig. In der Regel werden eine Batterie und ein Laderegler gebraucht, um Schwankungen der Einstrahlung zu überbrücken oder um auch nachts Solarstrom zur Verfügung zu stellen.

In Entwicklungsländern, in denen die Versorgungsnetze kaum ausgebaut sind, wird die Photovoltaik für die Versorgung einzelner Häuser (**Solar-Home-Systems**), für Dörfer oder für Pumpen eingesetzt. In vielen Fällen der dezentralen Klein- und Kleinstanwendungen sind die brennstoffunabhängigen und wartungsarmen Systeme die beste und oft auch wirtschaftlichste Lösung für eine netzferne Stromversorgung.

## Ökologisch zahlt es sich aus

Solarzellen haben keinen Schornstein: Luftschadstoffe, Brennstoffverbrauch und Lärm sind mit der Stromerzeugung nicht verbunden. Zwar ist die Herstellung der Solarzellen energieintensiv. Durch starke technologische Fortschritte brauchen die Zellen je nach Verfahren hierzulande allerdings nur noch zwischen 1,5 und vier Jahren, um die Energie zu produzieren, die ihre Herstellung gekostet hat. Nach dieser sogenannten energetischen Amortisationszeit ist jede weitere Kilowattstunde dann ökologisch „kostenlos“ (siehe Kapitel „Ökologische Qualitäten erneuerbarer Energien“).

Setzt man voraus, dass für die Herstellungenergie der konventionelle Kraftwerkspark eingesetzt wird, so sind folgerichtig indirekte Umwelteinwirkungen zu verzeichnen. Dabei ist aber zweierlei zu beachten: Diese Emissionen sind ein Problem des jetzigen und nicht eines zukünftigen Energiesystems. Würde die Energie zur Herstellung von Solarzellen mit Solarzellen selber erzeugt, so gäbe es diese Emissionen nicht. Außerdem ist das Minderungspotenzial der Solarenergie immens. Durch fortschrittliche Technologien und Massenfertigung, aber auch durch den Übergang auf weniger materialintensive Prozesse lassen sich die „ökologischen Rucksäcke“ der Solarzellen noch weiter verkleinern.

### → Infos zur Photovoltaik

- Allgemein zu Solarenergie: [www.solarserver.de](http://www.solarserver.de)
- Bundesverband Solarwirtschaft: [www.solarwirtschaft.de](http://www.solarwirtschaft.de)
- Internationale Energieagentur (IEA): [www.iea-pvps.org](http://www.iea-pvps.org)
- ForschungsVerbund Erneuerbare Energien: [www.fvee.de](http://www.fvee.de)
- Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie: [www.dgs.de](http://www.dgs.de)
- BINE Informationsdienst: [www.bine.info](http://www.bine.info)
- Fraunhofer-Institut: [www.ise.fraunhofer.de](http://www.ise.fraunhofer.de)



# SOLARTHERMISCHE KRAFTWERKE – SAUBERE ENERGIE AUS DEM SONNENGÜRTEL DER ERDE

## → Die Fakten

- Seit über 20 Jahren beweisen solarthermische Kraftwerke ihre Einsatzfähigkeit und sind in Regionen mit ausreichend hoher direkter Sonneneinstrahlung eine erprobte Alternative zu fossilen Kraftwerken.
- Seit 2006 wird auch in Europa Strom mit solarthermischen Kraftwerken erzeugt. Allein in Spanien sind knapp 1.000 MW im Bau oder bereits in Betrieb; mehr als 2.000 MW Leistung sind darüber hinaus in Planung.
- Heute liegen die Stromgestehungskosten zwischen 9 und 22 Ct/kWh. Künftig können sie auf deutlich unter 10 Ct/kWh sinken.
- Die Verwendung von Wärmespeichern erlaubt eine höhere Auslastung der Kraftwerke und macht einen Grundlastbetrieb möglich. So verringern solarthermische Kraftwerke die Abhängigkeit von fossiler und atomarer Stromversorgung.



Dish-Stirling-System, Solarturm und Parabolrinnenkraftwerk

In solarthermischen Kraftwerken werden die Sonnenstrahlen mit Brennsiegeln, sogenannten konzentrierenden Spiegelsystemen, gebündelt. Sie erhitzen eine Flüssigkeit, die dann eine konventionelle Turbine antreibt. Diese Kraftwerke bestehen also aus einem innovativen Teil zur solaren Wärmeerzeugung und einem konventionellen Teil zur Stromerzeugung. Die Anlagen können zur reinen Stromerzeugung oder zur Kraft-Wärme-Kopplung eingesetzt werden, also zur Erzeugung von Strom und Prozesswärme. So kann ein solarthermisches Kraftwerk gleichzeitig Elektrizität, Kälte (über eine Absorptionskältemaschine), industriellen Prozessdampf und sogar Trinkwasser (über eine Meerwasserentsalzungsanlage) erzeugen und dabei bis zu 85 Prozent der geernteten Solarwärme in Nutzenergie verwandeln.

Um rund um die Uhr Energie bereitzustellen, kann die Turbine von solarthermischen Kraftwerken dann, wenn die Sonne nicht scheint, auch mit fossilen oder erneuerbaren Brennstoffen betrieben werden. Das gewährleistet nicht nur eine Stromqualität, wie man sie von konventionellen Kraftwerken gewohnt ist. Diese doppelte Nutzung – tagsüber als Solar-, nachts als konventionelles Kraftwerk – macht auch den Bau von Reservekraftwerken unnötig und ermöglicht eine Halbierung der Stromkosten gegenüber dem reinen Solarbetrieb. Thermische Speicher, welche die Solarwärme des Tages für den Betrieb in der Nacht aufsparen, sind in Spanien in Parabolrinnen- und Solarturmkraftwerken im Einsatz. Das 19,9-MW-Solarturmkraftwerk Gemasolar in der Provinz Andalusien, das über einen Salzspeicher verfügt, konnte im Sommer 2011 aufgrund der sehr hohen Sonneneinstrahlung gar einen 24-Stunden-Betrieb sicherstellen.



Europäischer Parabolrinnenkollektor SKALET im Testbetrieb



Fresnelkollektor auf der „Plataforma Solar de Almería“, Spanien

Als Standorte für solarthermische Kraftwerke kommen hauptsächlich die sonnenreichen Zonen der Erde südlich des 40. Breitengrads in Frage, da lediglich der direkte Anteil der Sonnenstrahlung gebündelt werden kann. Der hohe Anteil diffuser Strahlung und die insgesamt niedrigere Einstrahlung erschweren den wirtschaftlichen Einsatz in Ländern wie Deutschland. Deshalb verstärkt Deutschland die Kooperation mit den nordafrikanischen Ländern und unterstützt Initiativen, die den Bau von solarthermischen Anlagen in Nordafrika zur Deckung des eigenen nationalen Strombedarfs sowie zum Export nach Europa anstreben.

### Parabolrinnenkraftwerke

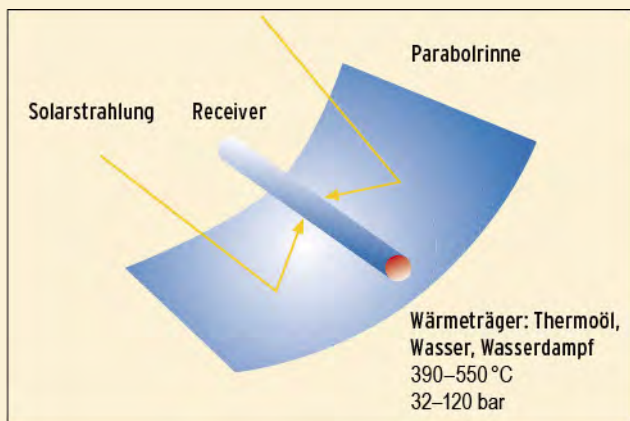
Bei diesem Konzept wird das Sonnenlicht durch parabolisch gekrümmte, bis zu 6 Meter breite und 150 Meter lange Spiegel auf ein Absorberrohr konzentriert. Das Öl in dem Absorberrohr wird dabei auf etwa 400 °C erhitzt. Die absorbierte Wärme wird mit

dem Thermoöl abgeführt und über einen Wärmeübertrager zur Dampferzeugung genutzt. Der so erzeugte Dampf dient zum Antrieb eines konventionellen Dampfturbinen-Generators. Auch die Integration in den Dampfteil eines modernen Gas- und Dampfturbinenkraftwerks ist möglich.

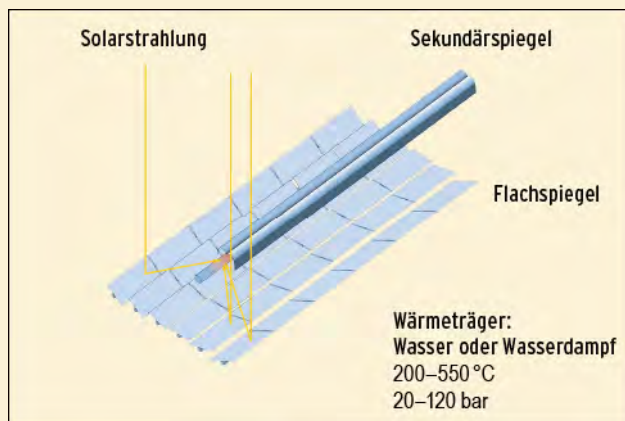
Parabolrinnenkraftwerke werden seit Mitte der achtziger Jahre in Kalifornien betrieben. Insgesamt ist weltweit eine Kapazität von 930 MW installiert, die einzelnen Anlagen haben eine Nennleistung von bis zu 80 MW. Heutige Anlagen erreichen einen Spitzenwirkungsgrad von fast 30 Prozent für die Umwandlung der Solarstrahlung in Wechselstrom. Im Jahresmittel beträgt der Wirkungsgrad rund 15 Prozent. Die Anlagen in Kalifornien versorgen seit ihrer Inbetriebnahme jährlich etwa 150.000 Haushalte mit Strom und haben inzwischen über eine Milliarde US\$ an Stromerlösen erwirtschaftet.

2008 wurde das erste kommerzielle Parabolrinnenkraftwerk Europas namens Andasol I (50 MW) in

### Grundprinzipien konzentrierender Solarsysteme



Parabolrinnenkollektor



Fresnelkollektor



Receiver und Anlagentechnik auf der Turmspitze im Betrieb



Solarturm kraftwerk Jülich

Betrieb genommen. Zwei baugleiche Kraftwerke werden derzeit errichtet und sollen den Strombedarf von 600.000 Menschen decken. Durch die Einspeisung der Solarwärme in einen auf 390 °C erhitzten Salzspeicher soll hier auch über die Sonnenscheindauer hinaus Solarstrom produziert werden. Eine verbesserte Struktur der Kollektoren, die Optimierung des Betriebs und die direkte Dampferzeugung anstelle des zwischengeschalteten Thermoölkreislaufs werden die Kosten künftig senken. Außerdem wird an höheren Betriebstemperaturen und der Integration von Gasturbinen geforscht.

Absorberrohr wird direkt Wasser verdampft. Das System zeichnet sich durch einfache und kostengünstige Bauweise aus und kann zu Anlagen von mehreren hundert Megawatt ausgebaut werden. Nachdem ein Prototyp zur Dampferzeugung über mehrere Jahre betrieben und getestet wurde, wird derzeit in Spanien eine 30-MW-Anlage gebaut, die nach ihrer Fertigstellung ab 2013 20.000 Haushalte mit Strom versorgen soll.

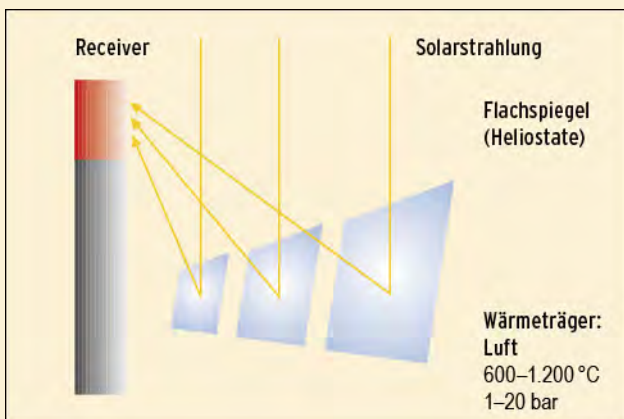
## Fresnel-Rinnenkraftwerke

Anfang 2001 wurde ein Rinnenkollektor vorgestellt, bei dem der Konzentrador aus einzelnen Facetten gerader Spiegel besteht. Da die Lichtbündelung dieses Systems schwächer ist als bei Parabolrinnen, hat man über dem Absorberrohr einen Konzentrador angebracht, der das Licht ein zweites Mal bündelt. Im

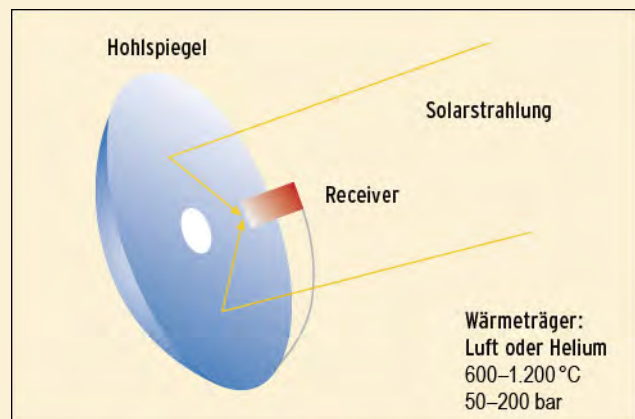
## Solarturm kraftwerke

Beim Solarturm kraftwerk wird die Sonnenstrahlung durch ein Feld einzeln nachgeführter Spiegel, sogenannter Heliostaten, auf die Spitze eines Turmes konzentriert. Bei diesem Konzept werden Temperaturen über 1.000 °C erreicht. In der Turmspitze befindet sich ein Absorber, der die Strahlung in Wärme umwandelt und an einen Wärmeträger abgibt. Dieser treibt dann eine Turbine an.

## Grundprinzipien konzentrierender Solarsysteme



Solarturmanlage



Dish-Anlage



Paraboloidkraftwerk („Dish-Anlage“) mit Stirlingmotor-Generator im Test- und Demonstrationsbetrieb: Der solar-elektrische Wirkungsgrad solcher Anlagen beträgt bis zu 30 Prozent.

Das erste kommerzielle europäische Solarkraftwerk Planta Solar 10 wurde 2006 fertiggestellt. Auf der Spitze des Turmes der „PS-10-Anlage“ wird Wasser in einem Rohrbündelwärmetauscher direkt verdampft. Der Dampf erzeugt in einer Turbine 11 MW elektrische Leistung und 24 GWh Solarstrom pro Jahr.

Beim offenen Luftreceiver – einer deutschen Entwicklung – wird anstelle des Rohrbündelabsorbers ein metallischer oder keramischer Schwamm benutzt. Er wird auch als volumetrischer Absorber bezeichnet, da die Strahlung sowohl an der Oberfläche als auch im Inneren des porösen Körpers absorbiert und in Wärme umgewandelt wird. Außenluft, die durch den Schwamm nach innen gesaugt wird, erhitzt sich auf über 800 °C und dient anschließend der Dampferzeugung in einem konventionellen Dampfkraftwerk. Der Vorteil gegenüber Rohrbündelabsorbern besteht darin, dass die Wärme nicht durch eine Wand hindurch übertragen werden muss. Dadurch sind höhere Energieflussdichten, Betriebstemperaturen und Wirkungsgrade möglich. Eine solche 49 Meter hohe Pilotanlage wurde 2008 in Jülich fertiggestellt. Mit einer Leistung von 1,5 MW und einer Stromproduktion von etwa 1 GWh pro Jahr sollen Erfahrungen über das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten wie Speicher, Kollektor, Spiegel und zusätzlicher Biomasseverbrennung gesammelt werden.

Eine weitere deutsche Neuentwicklung ist der geschlossene oder druckbeladene volumetrische Receiver (REFOS Konzept). Die Druckluft aus der Kompressorstufe einer Gasturbine wird in diesem Absorber solar erhitzt und treibt dann die Turbine an. Das Prinzip wurde erstmals Ende 2002 auf der Plataforma Solar in Spanien erfolgreich zur Stromerzeugung eingesetzt. Damit wird erstmals der Betrieb solar ge-



Turm des geplanten 200-MW-Aufwindkraftwerks (Höhe 1.000 m, mit speziellen Speichenrädern zur Stütze), unten das Kollektordach (Durchmesser 6 km)

feuerter Gasturbinen möglich. Mit dieser Technologie wird es auch möglich sein, Sonnenenergie direkt in ein modernes, hocheffizientes Gas- und Dampfturbinenkraftwerk einzukoppeln und dort mit hohen Wirkungsgraden von über 50 Prozent in Strom umzuwandeln.

## Paraboloidkraftwerke/Dish-Anlagen

Mit typischen Leistungen ab wenigen bis einigen 10 kW sind Paraboloidkraftwerke – auch Dish-Anlagen genannt – besonders für den dezentralen Einsatz geeignet. Bei diesem Konzept konzentriert ein zweiachsig der Sonne nachgeführter Parabolspiegel (englisch Dish) die Sonnenenergie direkt auf einen im Brennpunkt des Spiegels aufgehängten Absorber. In diesem wird ein Arbeitsgas (Helium oder Luft) zum Antrieb eines Stirling-Motors oder einer Gasturbine, die unmittelbar neben dem Absorber angeordnet sind, auf etwa 900 °C erhitzt.

Dish-Anlagen haben ihre technische Reife in mehreren Jahren Testbetrieb demonstriert und dabei mit bis zu 30 Prozent die besten Wirkungsgrade erreicht, die bei Solaranlagen überhaupt nachgewiesen wurden. In einem nächsten Schritt gilt es, eine Serienfertigung aufzubauen und so das Kostensenkungspotenzial dieser Technologie zu erschließen.

Dieser Kraftwerkstyp eignet sich vor allem für die Dorfversorgung in Entwicklungsländern. Mehrere Systeme lassen sich dabei zu einem kleineren Kraftwerkspark zusammenschalten. In Kombination mit einer Biomasse-Feuerung oder einem speziell für diese Technik entwickelten Speicher ist auch ein Betrieb rund um die Uhr möglich.

## Aufwindkraftwerke

Anders als bei den bisher beschriebenen, konzentrierenden Systemen wird die Sonnenstrahlung nicht über ein Spiegelsystem umgelenkt oder gebündelt. Beim Aufwindkraftwerk wird Luft unter einem riesigen Kollektordach aus Glas oder Kunststoffolie durch die Sonne erwärmt. Diese Luft strömt zu einem in der Mitte des Kollektordachs stehenden Kamin und steigt durch den Kamin auf. Durch die Luftströmung werden am Fuß des Kamins eingebaute Turbinen angetrieben, die Strom erzeugen. Auf diese Weise werden drei physikalische Effekte miteinander kombiniert:

- Der Treibhauseffekt, der zur Erwärmung der Luft unter dem Glasdach führt.
- Der Kaminzug, der für das Aufsteigen der unter dem Glasdach erwärmten Luft im Kamin sorgt.
- Die Turbine, die der Luftströmung im Kamin Energie entzieht und über einen Generator in elektrische Energie umwandelt.

Aufwindkraftwerke arbeiten ausschließlich mit Luft, sie benötigen kein Kühlwasser. In vielen sonnenreichen Ländern, die bereits große Wasserversorgungsprobleme haben, ist dies ein großer Vorteil. Da die Solarstrahlung im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Anlagen nicht konzentriert wird, kann auch die diffuse Strahlung zur Lufterwärmung unter dem Glasdach genutzt werden. Dadurch ist ein Kraftwerksbetrieb auch bei ganz oder teilweise bedecktem Himmel möglich. Der Erdboden unter dem Kollektor kann zusätzlich als natürlicher Wärmespeicher dienen und so für eine gleichmäßige Stromerzeugung

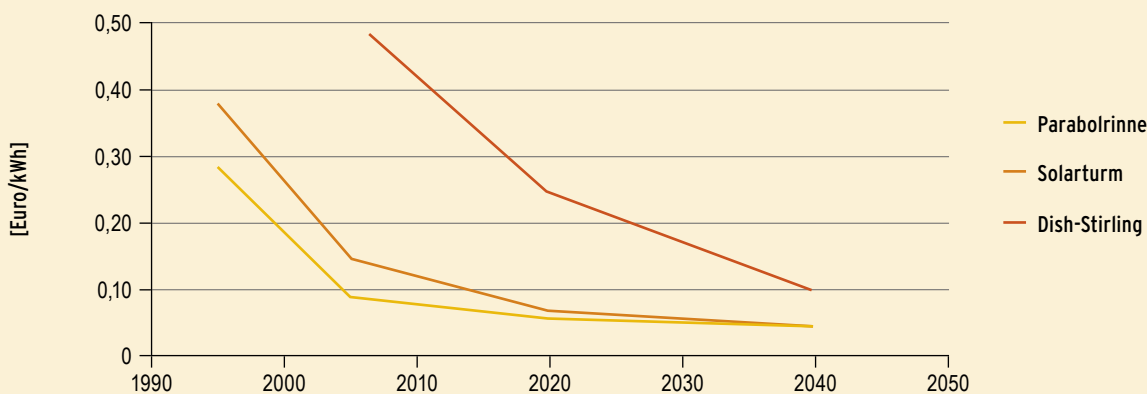
sorgen. Mit der auf diese Weise am Tag gespeicherten Wärme lässt sich daher auch nach Sonnenuntergang Strom erzeugen.

Die technische Machbarkeit dieses Konzeptes wurde in mehrjährigem Betrieb in einem spanischen Versuchskraftwerk nachgewiesen. Derzeit werden mehrere Projekte für große Aufwindkraftwerke mit Leistungen von 50 bis 400 MW in Namibia, China, Spanien und den USA entwickelt. Ein in der Planung bereits weit fortgeschrittenes Projekt einer 200-MW-Anlage mit 1.000 m Kaminhöhe in Australien ist bisher an der fehlenden Finanzierung gescheitert.

## Speichertechnologien

Ein besonderer Vorteil solarthermischer Kraftwerke ist die Möglichkeit, die absorbierte Sonnenenergie als Wärme zu speichern. Dies ist wesentlich einfacher und kostengünstiger als die Speicherung von Elektrizität. Im einfachsten Fall wird dafür ein Medium wie Beton oder geschmolzenes Mineralsalz tagsüber durch den Wärmeträger des Sonnenkollektors aufgeheizt und nachts oder bei Wolkendurchgang zur Dampferzeugung in einem Kraftwerksblock genutzt. Wenn das Speichermedium zudem seinen Zustand von fest zu flüssig ändern kann, lässt sich Wärme noch effizienter speichern. Daher werden auch Speicherkonzepte entwickelt, die auf solchen sogenannten Phasenübergängen beruhen. Mit fortschrittlichen Speichertechnologien werden solarthermische Kraftwerke in Zukunft sowohl die elektrische Grundlast als auch Spitzenlast frei regelbar und kostengünstig bereitstellen können, ohne Brennstoffe für die Zufeuerung zu verbrauchen.

## Stromkostenentwicklung



Schätzung der Kostenentwicklung solarthermischer Kraftwerke im reinen Solarbetrieb bei 8 Prozent Zinsen, einer wirtschaftlichen Lebensdauer von 25 Jahren und einer angenommenen Einstrahlung von 2.300 kWh/m<sup>2</sup>a

Quelle: DLR

## Solare Kraft-Wärme-Kopplung

Wie alle konventionellen Wärme-Kraft-Maschinen können auch die Turbinen solarthermischer Kraftwerke zur Kraft-Wärme-Kopplung benutzt werden (siehe Kapitel „Neue Versorgungsstrukturen“). Dazu wird bei der Dampfturbine ein Teil des Dampfes oder bei der Gasturbine die Abwärme nach der Stromerzeugung abgezweigt und weiter genutzt. Die noch in der Wärme gespeicherte Energie kann als Wärmequelle für industrielle Verfahren dienen, zur Erzeugung von Kälte über Absorptionskälteanlagen oder auch zur Entsalzung von Meerwasser. Mit solchen Anlagen wird die solar erzeugte Wärme mit einem Wirkungsgrad von über 80 Prozent in Nutzenergie umgewandelt.

## Kosten solarthermischer Kraftwerke

Solarthermische Kraftwerke können an guten Standorten ohne Energiespeicher etwa 2.000 bis 3.000 Stunden pro Jahr im reinen Solarbetrieb arbeiten. Daraus ergeben sich heute je nach Standort und veranschlagtem Zinssatz Kosten der Stromerzeugung von 9 bis 22 Ct/kWh. Wenn die vorhandenen Möglichkeiten, die Kosten weiter zu senken, durch die anstehende globale Markteinführung erschlossen werden, könnten die Kosten binnen zehn Jahren etwa halbiert werden. Für die Mittelmeeranrainerstaaten rechnen Experten mit Stromgestehungskosten von rund 5 Ct/kWh.

Ein Hybridbetrieb, also die Zufeuerung von Brennstoffen, führt zu einer besseren Auslastung des Kraftwerkteils der Anlagen, da auf diese Art mehr Betriebsstunden erreicht werden können. Damit wird die Konkurrenzfähigkeit gegenüber konventionell betriebenen Kraftwerken deutlich verbessert. Je nach Anteil der Zufeuerung und abhängig von den Brennstoffpreisen können die Stromgestehungskosten gegenüber dem reinen Solarbetrieb um etwa die Hälfte niedriger liegen (Grafik „Stromkostenentwicklung“). So erreicht man Stromkosten, die im Bereich ölgefeuerter Kraftwerke liegen, sofern deren Brennstoff nicht subventioniert wird.

Energiespeicher erhöhen den Solaranteil des Kraftwerks, verbessern das Betriebsverhalten, bewirken eine höhere Ausnutzung des Kraftwerkblocks und verbessern die Erlössituation. Das Zusammenwirken aller genannten Faktoren führt dazu, dass die solaren Stromkosten eines solarthermischen Kraftwerks mit integrierter Speichertechnik gegenüber dem Betrieb ohne Speicher sinken. Zu diesem Zweck werden zurzeit kommerzielle solarthermische Speicherkonzepte entwickelt und erste Anlagen gebaut.

## Die weltweite Markteinführung solarthermischer Kraftwerke steht bevor

Im Februar 2006 erfolgte der erste Spatenstich für ein neues 64-MW-Parabolrinnenkraftwerk in Nevada, USA. Nach Einführung eines Einspeisegesetzes für Solarstrom in Spanien gibt es auch dort eine ganze Reihe interessanter solarthermischer Kraftwerksprojekte. Über 600 MW sind dort mittlerweile an Kraftwerkskapazität installiert – 60 Prozent des globalen Marktes. Weltweit waren allein im Jahr 2011 2,6 Gigawatt an Kraftwerksleistung in Bau – vor allem in Spanien und den Vereinigten Staaten, wo weitere 6 GW in Planung sind. Aber auch in Nordafrika und dem Mittleren Osten beschleunigt sich die Entwicklung. Solarthermische Kraftwerke stellen ein wichtiges Bindeglied zwischen der heutigen fossilen und der zukünftigen „solaren“ Energieversorgung dar, da sie wesentliche Elemente beider vereinen. Sie nutzen herkömmliche Kraftwerksprozesse und kombinieren sie mit solaren Technologien. Durch die Kraft-Wärme-Kopplung (insbesondere zum Zwecke der Trinkwasserbereitung aus Meerwasser) erlauben sie eine äußerst effiziente Nutzung der solaren Primärenergie.

Unter Einbindung der Mittelmeeranrainerstaaten Europas, des Mittleren Ostens und Nordafrikas (EU-MENA) in ein transnationales Energieversorgungsnetz könnte die Stromversorgung Europas weiter diversifiziert und die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen erheblich reduziert werden. Demnach wäre es 2050 möglich, bis zu 15 Prozent (700 TWh) des europäischen Strombedarfs aus solarthermischen Kraftwerken der MENA-Regionen abzudecken (siehe Desertec Seite 56). Insgesamt würden 0,3 Prozent der Wüstenfläche ausreichen, um die MENA-Staaten und Europa komplett mit Strom und entsalztem Wasser zu versorgen. Voraussetzung ist die Installation von verlustarmen Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungsnetzen, um die enormen Entfernungen von bis zu 3.000 Kilometern zu überbrücken.

### → Infos zu solarthermischen Kraftwerken

- Desertec: [www.desertec.org](http://www.desertec.org)
- Solarforschung und Studien zu Solarthermischen Kraftwerken: [www.dlr.de/tt](http://www.dlr.de/tt)
- Solarthermische Kraftwerksprojekte: <http://www.solarpaces.org/>
- Solare Strahlungsressourcen: [www.solemi.de](http://www.solemi.de)

# SONNENKOLLEKTOREN UND PASSIVE SOLARNUTZUNG – DIE SONNE INS HAUS GEHOLT

## → Die Fakten

- Sonnenkollektoren eignen sich zur Erwärmung von Trinkwasser und zur Aufbereitung von heißem Wasser für die Heizungsanlage.
- Mehr als 1,5 Millionen Solarthermieanlagen mit 14 Millionen Quadratmetern Fläche in Deutschland versorgen Haushalte, Wohnsiedlungen, Gewerbe- und Industriebetriebe mit Wärme und Kälte. Gegenüber fossilen Wärme- und Kälteanlagen sparen sie jährlich 1,2 Millionen Tonnen Treibhausgase ein.
- Großes Potenzial liegt in der Speicherung von Solarwärme im Sommer für den Winter und der Verteilung von heißem Wasser über Nahwärmenetze.
- Mit Solarthermieanlagen lässt sich auch Kälte erzeugen. Das lastet die Solaranlagen optimal aus und erlaubt eine klimafreundliche und effiziente Kühlung von Gebäuden.
- Durch eine sorgfältige architektonische Gebäudeplanung – gute Dämmung, Passivhaus-Fenster, Gebäudeausrichtung – kann auch die „passive Solarnutzung“ den Heizwärmebedarf wesentlich senken.



Flachkollektoren, transparente Wärmedämmung und Vakuumröhrenkollektoren

Mit Solarkollektoren wird die Strahlung der Sonne in Wärme umgesetzt, um Wasser für den täglichen Bedarf zu erwärmen oder Gebäude zu heizen. Das Prinzip ist ähnlich der Erwärmung eines Gartenschlauchs in der Sonne: Nach kurzer Zeit erhitzt sich in seinen Windungen das Wasser. Auch zum Kühlen und Entfeuchten der Raumluft kann die Wärme eines Sonnenkollektors verwendet werden. Einige Verfahren nutzen dabei die Kälte, die bei der Verdunstung von Wasser entsteht. Dieses Prinzip machten sich schon die alten Römer bei der Kühlung von Früchten in feuchten Tongefäßen zu Nutze, und noch heute sind offenporige Weinkühler aus Ton verbreitet.

Um Wärme zu erzeugen, fließt in der einfachsten technischen Variante ein Wärmeträgermedium durch nicht abgedeckte schwarze Kunststoffmatten, die **Absorber** genannt werden. Solche Anlagen erreichen keine hohen Temperaturen. Dafür sind sie günstig und werden beispielsweise für die Erwärmung des Badewassers in Freibädern eingesetzt. Da sie kostengünstiger sind als fossil gefeuerte Heizkessel, können sie die Betriebskosten eines Bades deutlich reduzieren.

Technisch ausgefeilter sind **Flachkollektoren**. Um die Wärmeverluste des Kollektors zu vermindern, ist der



Kollektoranlage zur Warmwasserbereitung

Absorber, der aus Metall besteht, auf den sonnenabgewandten Seiten gut isoliert und zur Sonne hin mit einer Glasscheibe abgedeckt. Diese Scheibe ist mit einer speziellen Antireflexschicht versehen, um Reflexionen zu minimieren. Eine weitere Verminderung der Abstrahlungsverluste lässt sich durch Aufbringung von schwarzem Solarlack oder noch wirksameren selektiven Schichten wie Schwarznickel oder Schwarzchrom erreichen. Bei gleicher Sonnenstrahlung kann ein solcher Flachkollektor höhere Wassertemperaturen erzielen als die schwarzen Kunststoffmatten.

In **Vakuumröhrenkollektoren** liegen die Wärmeabsorber in gläsernen, beinahe luftleeren Röhren. Dadurch geht weniger Wärme als beim Flachkollektor an die umgebende Luft verloren (konvektiver Verlust).

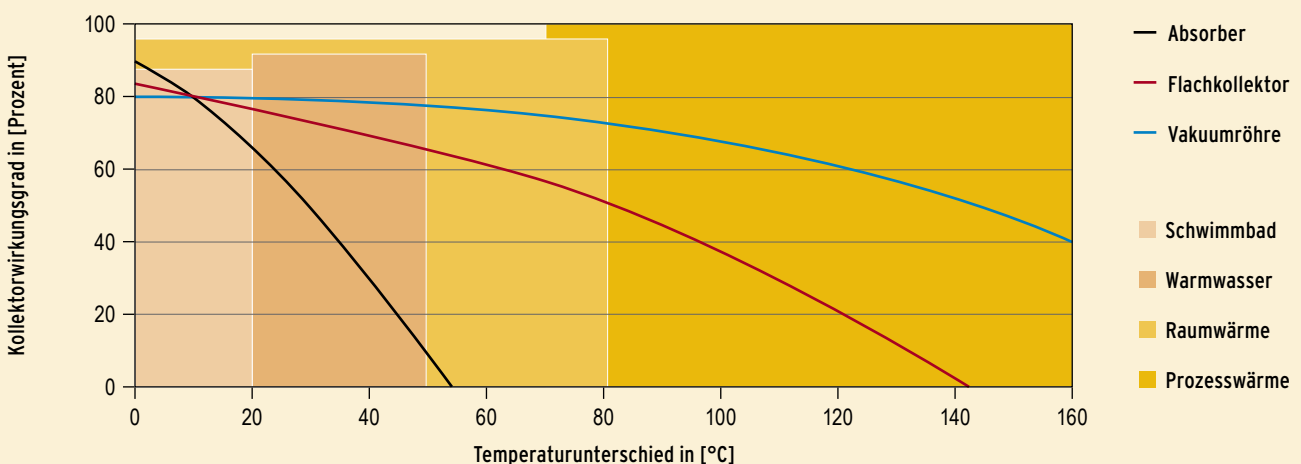
Dieser Kollektortyp wird mit einem durchlaufenden Wärmeträgerrohr gebaut, sogenannte „heat pipes“, in denen ein wärmeempfindliches Medium beim Erwärmen verdampft, aufsteigt, seine Wärme an einen Kondensator außerhalb des Rohres abgibt und wieder zum Anfang des Kreislaufs fließt, um erneut Wärme aufzunehmen.

Eine weitere Kollektortechnik lässt auf zukünftig erschließbare Potenziale hoffen: **Luftkollektoren**, mit einem Marktanteil von erst 1 Prozent, werden seit vielen Jahren im gewerblichen Bereich zur Beheizung von Hallen eingesetzt. Um die spezifischen Vorteile des Mediums Luft voll ausnutzen zu können, wird derzeit weiter an dieser Technologie geforscht.

## Wärme für industrielle Prozesse

Durch die hohen erreichbaren Temperaturen eignen sich Vakuumröhrenkollektoren auch für die Bereitstellung von Wärme für industrielle Prozesse, die sogenannte Prozesswärme. Die für höhere Temperaturen notwendige Systemtechnik ist heute noch relativ teuer. Das Potenzial ist allerdings groß. Prozesswärme zwischen 20 und 100 °C kann kurzfristig stark ausgebaut werden. In der nahen Zukunft werden Temperaturen bis 250 °C erreichbar sein. Eine der weltweit knapp 100 Pilotanlagen versorgt eine Brauerei im bayerischen Eichstätt mit sonnenerhitztem Wasser. Um eine optimale Energieausbeute zu erzielen, wird hier auch die Produktionsauslastung der Sonnenscheinintensität angepasst. Die Anlage arbeitet mit knapp 900 m<sup>2</sup> Vakuumröhrenkollektoren und zwei 60 m<sup>3</sup> Solarspeichern.

## Wirkungsgradkennlinien

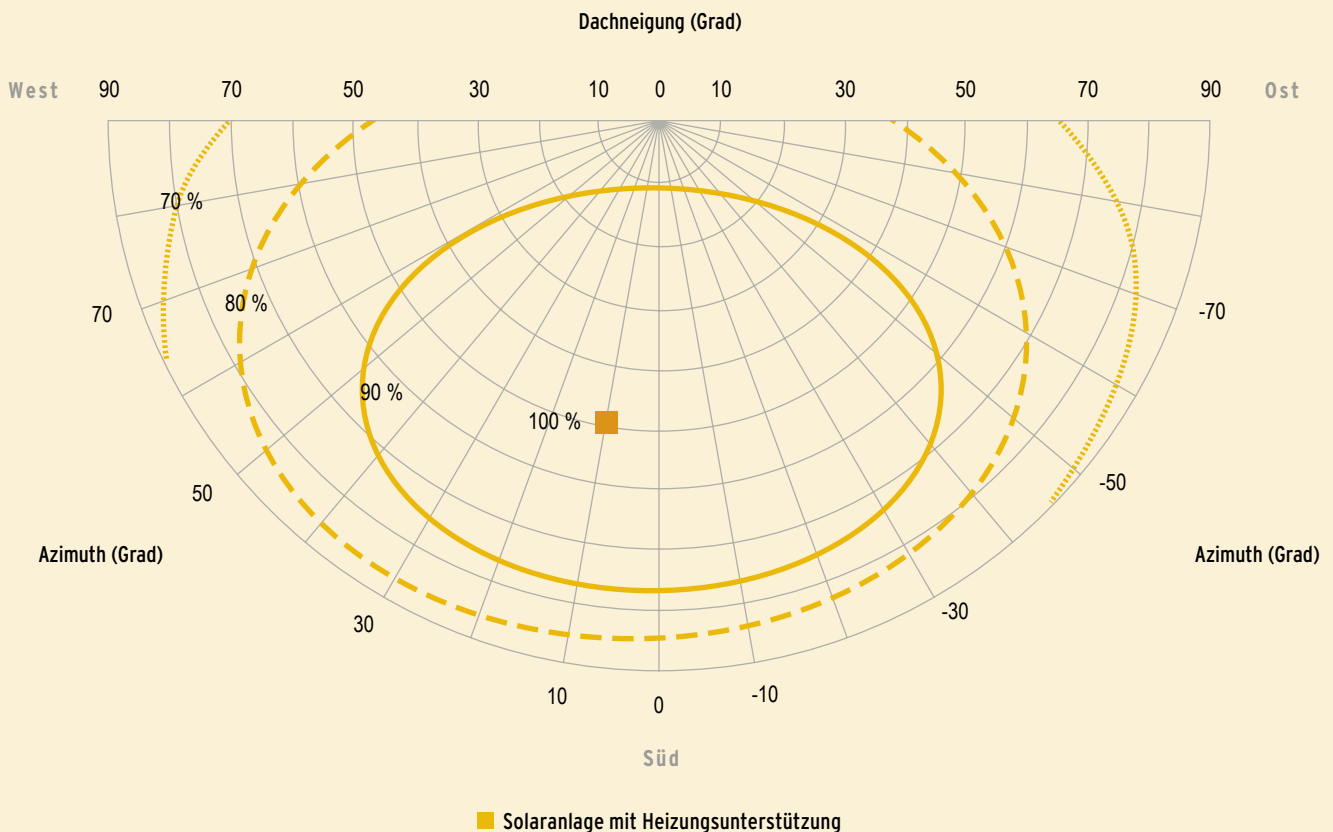


Je besser der Kollektor isoliert ist, desto höher ist die Temperatur der erzeugten Wärme. Wirkungsgradkennlinien unterschiedlicher Kollektortypen bei 500 W/m<sup>2</sup> Einstrahlung und die sich daraus ergebenden Einsatzfelder.

Quelle: DLR



## Wärmeertrag und Südausrichtung



Linien gleichen Wärmeertrags: Die Ausbeute (maximal 100 %) nimmt nur relativ geringfügig ab, wenn der Kollektor nicht genau nach Süden ausgerichtet ist.

Quelle: DLR

## Solare Wärme für Gebäude

Ein typisches kleines Warmwassersystem für ein Einfamilienhaus nimmt dagegen nur eine Dachfläche von  $6 \text{ m}^2$  ein. Dennoch kann sie bis zu 60 Prozent des jährlichen Brauchwasserbedarfs bereitstellen. Eine solche Anlage deckt im Sommer den Bedarf vollständig ab, in den anderen Jahreszeiten muss ein konventioneller Kessel das vom Kollektor vorgewärmte Wasser nachheizen. Um einen hohen Wirkungsgrad des Kollektors, egal welcher Bauart, zu erreichen, sollte das erforderliche Temperaturniveau der genutzten Wärme niedrig sein. Soll mit einer Anlage auch Raumwärme bereitgestellt werden, bieten sich daher Fußboden- oder Wandflächenheizungen an. Mit einer Anlage von  $11 \text{ m}^2$  (Vakuumröhrenkollektor) bis  $14 \text{ m}^2$  (Flachkollektor) lassen sich bei einem gut gedämmten Haus etwa 20 bis 30 Prozent des gesamten Wärmebedarfs solar abdecken. Insbesondere in den Übergangszeiten im Frühling und Herbst leisten die Kollektoren gute Dienste.



In Neckarsulm werden die Parkplatzflächen zur Wärmeerzeugung genutzt.

Die Ausrichtung des Kollektors nach Süden und seine Neigung spielen dabei eine weit geringere Rolle als gemeinhin angenommen (Grafik „Wärmeertrag und Südausrichtung“).



Montage einer Kollektoranlage zur Warmwasserbereitung



Die thermische Solaranlage auf dem Dach versorgt zwei 800-Liter-Warmwasserspeicher im Keller.

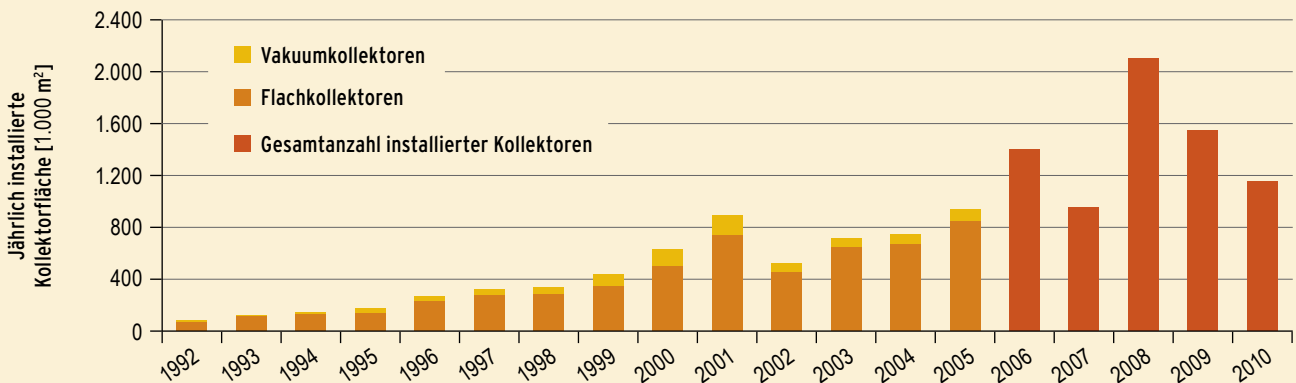
Modellrechnungen zeigen, dass Abweichungen von +/- 60° von der genauen Südausrichtung eine Einbuße der Sonnenernte von nur 10 Prozent zur Folge haben. Weicht die Neigung um 20° von der in unseren Breiten optimalen Neigung von 50° ab, so geht der Energieertrag um etwa 5 Prozent zurück.

Für eine Solarkollektoranlage ist ein Speicher unerlässlich. Er nimmt die vom Kollektor bereitgestellte Wärme auf und gibt sie ab, sobald Bedarf besteht. Solarkollektoranlagen zur Brauchwassererwärmung benötigen im Einfamilienhaus einen Speicher von rund 350 Liter Inhalt. Wird der Sonnenkollektor auch zur Raumheizung eingesetzt, werden größere Speicher mit einem Volumen von rund 70 Liter je Quadratmeter Kollektorfläche benötigt. Daraus ergeben sich Speichergrößen um die 1.000 Liter. Sie können Wärme für einige Tage speichern.

## Saisonale Speicher

Um die im Sommer gespeicherte Wärme im Winter nutzen zu können, sind erheblich größere Reservoirs und Kollektorflächen notwendig. Hierzu gibt es in Europa eine Vielzahl von Demonstrationsprojekten. Die derzeit größte deutsche Anlage in Neckarsulm wird im Endausbau 1.200 Wohnungen auch im Winter mit solarer Wärme aus 15.000 m<sup>2</sup> Kollektoren und einem 150.000 m<sup>3</sup> großen Speicher versorgen. Die Kollektoren befinden sich auf den Dächern einer Schule, einer Sporthalle und einigen Wohngebäuden. Zudem wurden sie auch über Parkplätzen aufgeständert und entlang eines Lärmschutzwalls installiert. Ein ähnliches Projekt wird auch in Crailsheim realisiert. Für die saisonalen Speicher müssen schon wegen ihrer schieren Größe kostengünstige Lösungen gefunden werden. Dann lassen sich mit ihnen solare Deckungsanteile für Raumwärme und Warmwasser von 60 Prozent erreichen.

## Jährlich installierte Kollektorfläche



Seit 1992 ist der Kollektorabsatz ungefähr auf das Zwanzigfache gestiegen.

Quelle: BMU/BSW-Solar

In Neckarsulm wird die Wärme gespeichert, indem der vorhandene Lehmboden mit Erdsonden aufgewärmt wird und so als billiges Speichermedium dient. Andere Projekte speisen das warme Wasser im Sommer in unterirdische, wasserführende Schichten (Aquifere) ein, nutzen Schüttungen aus grobkörnigem Kies und Wasser oder teilweise ins Erdreich versenkte wassergefüllte Betonbehälter. Jedes dieser Speicherkonzepte hat seine Vor- und Nachteile. Eine erfolgreiche Entwicklung kostengünstiger Langzeitspeicher wird der Solarenergie Anwendungsfelder erschließen, die weit über die heute noch vorherrschende sommerliche Brauchwassererwärmung hinausgehen.

## Technische Trends

Solarkollektoranlagen garantieren heute einen zuverlässigen Betrieb über 20 Jahre. Zuletzt gab es weitere Verbesserungen der Technik durch den Einsatz neuer selektiver Schichten auf der Absorberoberfläche, welche die Abstrahlung verringert und damit den Wirkungsgrad erhöht. Zudem sind diese Schichten umweltfreundlicher als die bisher eingesetzten galvanischen Oberflächen und auch unempfindlicher gegenüber Regen, Hagel und hohen Temperaturen. Bei Flachkollektoren konnten die Reflexionsverluste an der Abdeckungsverglasung durch eine besondere Oberflächenbehandlung reduziert werden. Niedrigere Durchflussraten durch den Kollektor erlauben den Einsatz von Zu- und Ableitungen mit geringerem Durchmesser. Dadurch können dünnere Rohrisolierungen eingesetzt und der Materialaufwand erheblich reduziert werden. Speziell für den Solarbetrieb angepasste Umwälzpumpen reduzieren zudem den Stromverbrauch. Geforscht wird in Deutschland unter anderem auch an einem hocheffizienten Flachkollektor mit deutlich reduziertem Gewicht und geringerer Dicke bei gleichem oder besserem Wirkungsgrad sowie an der Integration von Vakuumröhrenkollektoren in Glasfassaden.

Um die Kosten weiter zu mindern, werden Einzelmodule immer größer und die Montagetechnik auf dem Dach wird vereinfacht. Dies geht soweit, dass die Kollektoren die konventionelle Dachhaut ersetzen, so dass der Bauherr die Kosten für Teile des Dachstuhls einspart. Die Regelung des Systems und seine Pumpen werden in vormontierten, integrierten Baugruppen geliefert. Auch werden lötfreie Rohrverbindungen angeboten, die die Montage erheblich vereinfachen und es begabten Laien ermöglichen, die Anlagen selber aufzubauen.

## Kosten

Durch technische Fortentwicklung und Marktausweitung konnten die Preise für das Gesamtsystem binnen einiger Jahre gesenkt werden. Heute rechnet man mit spezifischen Investitionskosten für eine komplette Anlage inklusive Speicher, Verrohrung und Montage von 700 bis 900 Euro pro m<sup>2</sup> Kollektorfläche; größere Anlagen sind deutlich günstiger. Solarkollektoren stehen an der Schwelle der Wirtschaftlichkeit und schützen die Bauherren gegen die Risiken zukünftiger Energiepreiserhöhungen.

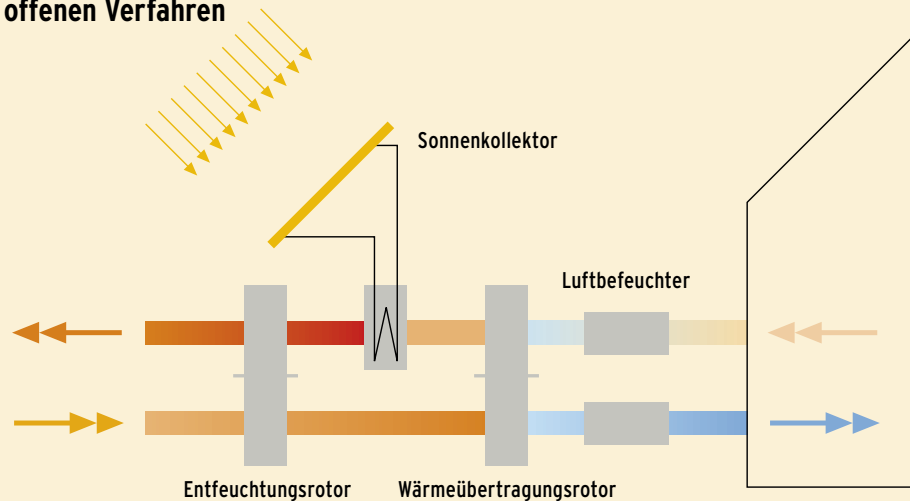
## Marktentwicklung

Ende 2010 waren etwa 14 Millionen m<sup>2</sup> Kollektoren auf deutschen Dächern installiert. Ihre Wärme ersetzt deutlich über 5 Milliarden kWh an fossilen Brennstoffen, was einer Menge von mehr als 500 Millionen Liter Heizöl entspricht. Nachdem 2008 mit 1,9 Millionen m<sup>2</sup> installierter Kollektorfläche mehr Solarwärme neu erschlossen wurde als je zuvor in Deutschland, wurden in den zwei folgenden Jahren weniger Anlagen neu installiert. Bis 2010 sank der jährliche Zubau auf 1,15 Millionen m<sup>2</sup> neu installierter Fläche (Grafik „Installierte Kollektorfläche“). Anfang 2011 zeichneten sich, angetrieben von wieder steigenden Öl- und Gaspreisen, steigende Zubauraten ab. Die Marktpotenziale erneuerbarer Energie im Wärmebereich sollen durch den Ausbau des Marktanzreizprogramms und durch weitere Instrumente, wie die 2009 eingeführte Pflicht zum Einsatz von erneuerbaren Energien im Neubau durch das Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz, noch besser erschlossen werden.

Anders als bei der Photovoltaik ist Deutschland bei der Nutzung solarer Wärme bei weitem nicht der weltweite Spitzenreiter. Das Nachbarland Österreich hat pro Kopf die vierfache Menge an Solarkollektoren installiert. Dort sind die Kollektoren auch bereits zu einem lukrativen Exportschlager geworden. Österreich hält einen Anteil von 25 Prozent am EU-Export von Sonnenkollektoren. Andere EU-Länder, wie Frankreich, Italien oder England, hinken dagegen der Entwicklung noch weit hinterher. Der weltweit mit Abstand größte Markt für Solarkollektoren ist China.

Einen weiteren Schub für die Marktausweitung erhofft man sich durch größere Anlagen. Noch wird der ganz überwiegende Teil der Sonnenkollektoranlagen auf Dächern von Einfamilienhäusern installiert.

## Kühlung nach dem offenen Verfahren



Bei diesem Verfahren wird Luft gekühlt und entfeuchtet (auch „Desiccant“-Verfahren genannt). Das technische Kernstück bildet die Entfeuchtungsanlage.

Quelle: DLR

Auf Mehrfamilienhäusern oder anderen großen Gebäuden finden sich bisher kaum Anlagen. Dabei können die Kosten für solare Wärme gerade bei Großanlagen deutlich gesenkt werden. Das Interesse an solchen Anlagen ist aber noch immer gering, da die Einsparungen dem Mieter zugutekommen, die (Investitions-)Kosten jedoch größtenteils vom Vermieter getragen werden müssen. Für den Vermieter rentieren sich die Anlagen vor allem langfristig, weil niedrigere und vorhersagbare Nebenkosten die Vermietbarkeit verbessern und höhere Kaltmieteinnahmen ermöglichen.

## Kühlen mit Wärme aus Sonnenkollektoren

Die von einem Sonnenkollektor bereitgestellte Wärme, lässt sich auch zum Antrieb einer Klimaanlage nutzen. Da der Bedarf an Raumkühlung vor allem dann groß ist, wenn die Sonne am stärksten scheint, wird der Kollektor in Kombination mit einer Kältemaschine besonders gut ausgenutzt. Damit lassen sich fossile Energieträger einsparen – konventionelle Klimaanlagen arbeiten in der Regel mit Strom, selten auch mit Gas. Der Wunsch nach höherem Wohnkomfort und veränderte Bauweisen mit größeren Glasfassaden führen auch in Deutschland zu einer steigenden Nachfrage nach Klimatisierung. In südlichen Ländern, in denen der Stromverbrauch durch elektrische Kompressionskältemaschinen zu Spitzenlastzeiten die Netze schon heute an ihre Leistungsgrenzen zwingt, stellen diese umweltverträglichen Systeme eine besonders sinnvolle Alternative dar.

Bei der solaren Kühlung wird zwischen zwei Klassen unterschieden. In beiden werden sogenannte Sorptionsprozesse genutzt. Bei der ersten treibt solare Wärme einen Absorptionskälteprozess an. Da die am Kälteprozess teilhabenden Flüssigkeiten nicht mit der Atmosphäre in Kontakt treten, spricht man vom **geschlossenen Verfahren**.

Im Gegensatz dazu steht im **offenen Verfahren** das Kältemittel Wasser direkt mit der Atmosphäre im Kontakt. Beim sogenannten Desiccant-Verfahren wird dem Zuluftstrom einer Lüftungsanlage durch ein Trockenmittel Luftfeuchtigkeit entzogen. Hierbei handelt es sich beispielsweise um Kiesel-Gel, wie es auch in Verpackungen feuchteempfindlicher Produkte zu finden ist. Dies ist in der Regel auf einer porösen Walze aufgebracht, die Feuchtigkeit aufnimmt (adsorbiert). Durch Rotation wird ein Teil der Walze ständig mit einem solarerwärmten Abluftstrom aufgeheizt, wodurch die Feuchtigkeit wieder an die Umgebung abgegeben wird (siehe Grafik „Kühlung nach dem offenen Verfahren“).

Während der Trocknung steigt die Temperatur der Zuluft zunächst an, bevor die Zuluft über eine zweite Walze wieder auf Umgebungstemperatur abgekühlt wird. Durch die Verdunstung von Wasser im Zuluftstrom wird dann eine weitere Abkühlung auf das gewünschte Niveau erzielt. Aktuelle Forschungen konzentrieren sich auf neuartige feste, aber auch flüssige Trockenmittel und Evaporationstechniken, bei denen der Zuluftstrom nicht mehr direkt befeuchtet werden muss.

Beim geschlossenen Verfahren werden Temperaturen von über 60 °C benötigt, beim offenen Verfahren müssen es über 50 °C sein.

Die Technologien zur thermischen Klimatisierung kleiner Gebäude stecken noch in den Kinderschuhen. Neben großen Anlagen mit Kälteleistungen von 50 bis 100 kW, die zur Klimatisierung von Kaufhäusern, Bürogebäuden oder Kongresszentren geeignet sind, werden seit wenigen Jahren aber zunehmend auch kleinere Anlagen von unter 20 kW angeboten. Diese Anlagen erschließen ein ganz neues Marktsegment. Zurzeit werden standardisierte Kompaktsysteme entwickelt, welche schon bald wirtschaftlich konkurrenzfähig zu konventionellen Lösungen sein sollen. Sonnenkollektoren zur Warmwassererzeugung und Heizungsunterstützung auf kleineren Gebäuden liefern im Sommer oft zu viel Wärme. Diese Wärme zur Klimatisierung und damit zur Steigerung des Wohnkomforts zu nutzen, stellt eine viel versprechende Zukunftsanwendung dar.

In den meisten Fällen muss der Betreiber einer solar unterstützten Klimaanlage gegenwärtig noch draufzahlen. Betrachtet man alle anfallenden Kosten, ist die solare Variante momentan etwa 10 bis 40 Prozent teurer als eine konventionelle Anlage. Doch bei solar unterstützten Klimaanlagen gibt es ein großes Potenzial für technische Verbesserungen und Kostensenkungen. Dies hat sich auch bei den bisher umgesetzten, größeren und noch nicht für den Einzelhaushalt ausgelegten Anlagen gezeigt. Vor allem bei der komplexen, aufeinander abgestimmten Steuerung von Sonnenkollektor und Kälteanlage bestehen große Verbesserungschancen. Damit könnte die solare Kühlung in den nächsten Jahren auch bei kleineren Häusern oder Dachgeschossen eine größere Verbreitung erlangen.

Der größte Teil des Marktes wird dabei jedoch nicht in Deutschland, sondern im Mittelmeerraum und

weltweit in südlichen, sonnenreichen Ländern mit hohem Klimatisierungsbedarf liegen.

## Perspektiven

Langfristig kann solare Wärme in erheblichem Maße zu einer nachhaltigen Energieversorgung Deutschlands beitragen. Auf den Dächern von Gebäuden ist Platz für 800 km<sup>2</sup> Kollektorfläche – bisher sind 14 km<sup>2</sup> installiert. Weitere Installationsflächen gibt es an Südfassaden, über Parkplätzen oder an Straßenböschungen. Insgesamt können Kollektoren auf bis zu 1.300 km<sup>2</sup> installiert werden. Hierbei ist schon berücksichtigt, dass ein Teil der Dachflächen für die Nutzung von Solarzellen zur Stromerzeugung (Photovoltaik) reserviert bleiben muss. Mit dieser Kollektorfläche könnte rechnerisch etwa die Hälfte des momentanen Wärmebedarfs für Heizung und Warmwasser gedeckt werden. Heute liegt der Beitrag solarer Wärme am gesamten Wärmebedarf Deutschlands noch bei 0,4 Prozent.

Um solare Wärme zu einem wichtigen Standbein der Energieversorgung zu machen, muss das Ziel sein, schrittweise jedes Dach mit Kollektoren zu belegen und einen Solarspeicher in jeden Keller zu stellen. Darüber hinaus ist es aber für ganzjährige solare Wärme entscheidend, viele Gebäude über ein Nahwärmenetz miteinander zu verbinden und an einen großen gemeinsamen Speicher anzuschließen. Nur so kann zu vertretbaren Kosten Sommersonnenwärme bis in den Winter gespeichert werden.

Der **Aufbau von Nahwärmenetzen** ist eine entscheidende Voraussetzung für die umfassende Nutzung solarer Wärme (siehe Seite 74). Auch zur kostengünstigen Nutzung von Holzhackschnitzeln, Stroh oder Geothermie kann Nahwärme in erheblichem Maße beitragen.



Im Leuchtturmprojekt „Solare Nahwärmeversorgung mit Langzeitspeicher“ der Stadtwerke Crailsheim wurden insgesamt 5.000 m<sup>2</sup> Kollektorfläche auf einem ökologischen Lärmschutzwall installiert.

## Passive Solarnutzung – die Architektur macht's möglich

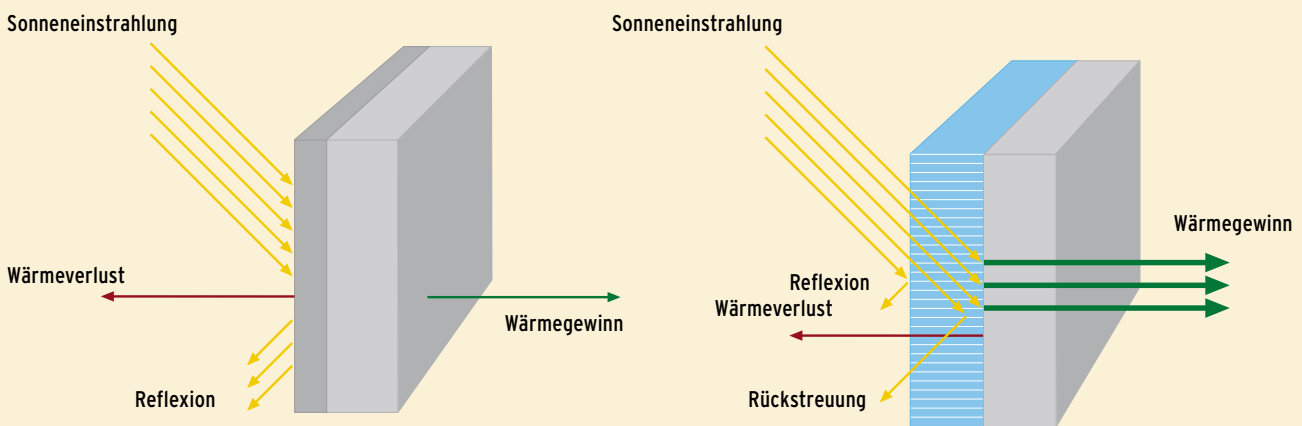
Im Gegensatz zu Solarkollektoren, bei denen die eingefangene Wärme durch Pumpen zum gewünschten Ort transportiert wird, arbeitet die passive Nutzung von Sonnenenergie ohne aktive Technik wie Pumpen. Das Paradebeispiel hierfür sind unverschattete Südfenster, durch die im Winter die Strahlen der tiefstehenden Sonne in das Haus eindringen und es erwärmen: Das Gebäude selbst wird zu einer Art Sonnenkollektor. Dabei dringt Licht als energiereiche, kurzwellige Strahlung durch die Fenster und wird im Inneren des Gebäudes in langwellige Wärmestrahlung umgewandelt. Für diese ist Glas jedoch kaum durchlässig – der Raum heizt sich auf. Um einer Überhitzung im Sommer vorzubeugen, sollten die Fenster daher von außen verschattet werden können.

Tagsüber kann Solarstrahlung erheblich zur Beheizung eines Hauses beitragen. Je besser das Haus bereits wärmedämmend ist, desto stärker sind die Auswirkungen. Während der Nachtstunden geht dagegen auch durch die besten Fenster mehr Wärme verloren als durch eine gut gedämmte Wand. Ob sich bei einer Vergrößerung der Fensterfläche insgesamt eine positive oder eine negative Energiebilanz ergibt, hängt stark von der Qualität der Verglasung ab. Eine Vergrößerung der Südfensterfläche wirkt sich nicht immer günstig auf den Heizwärmebedarf aus. Insbesondere bei Passivhäusern können weitere Verbesserungen nur mit erstklassiger Verglasung mit Dreifachwärmeschutzfenstern erreicht werden.

Zur passiven Nutzung zählen aber auch lichtdurchlässige Teile der äußeren Gebäudehülle wie Wintergärten oder die transparente Wärmedämmung (TWD). Transparente Wärmedämmung kann an den Fassaden von Alt- oder Neubauten angebracht werden. Sie besteht aus einer lichtdurchlässigen, aber gut wärmedämmenden Schicht – beispielsweise aus feinen Glas- oder Kunststoffröhrchen (Grafik „Transparente Wärmedämmung“). Das einfallende Licht durchquert die transparente Dämmschicht und wird auf der tragenden Wand absorbiert. Dabei erwärmt sich die Wand. Da sich diese Wärme bereits hinter der Dämmschicht der Hauswand befindet, kann sie nicht mehr nach außen entweichen und heizt so – mit zeitlicher Verzögerung – den dahinter liegenden Wohnraum auf. Im Sommer kann als Schutz gegen Überhitzung ein Verschattungssystem notwendig werden.

Der Nutzen einer transparenten Wärmedämmung hängt von der Himmelsrichtung der TWD-Wand, von der Qualität und Ausrichtung der übrigen transparenten Bauteile (Fenster) sowie dem Aufbau der Wand hinter der TWD ab. Dementsprechend darf auf eine sorgfältige Planung keinesfalls verzichtet werden. Aufgabe des Architekten ist es, die Gebäude so zu konstruieren, dass die passiven solaren Gewinne möglichst hoch sind, keine sommerliche Überhitzung eintritt und nachts die zusätzlichen Verluste durch vergrößerte Fensterflächen in vertretbaren Grenzen gehalten werden. Passive Solarnutzung ist wie keine andere Technologie auf die ganzheitliche Betrachtung der Gebäudestruktur und Energieversorgung angewiesen (Grafik „Gebäudeenergiekennwerte“).

### Transparente Wärmedämmung



Konventionelle Wärmedämmung

Lichtdurchlässige Wärmedämmung

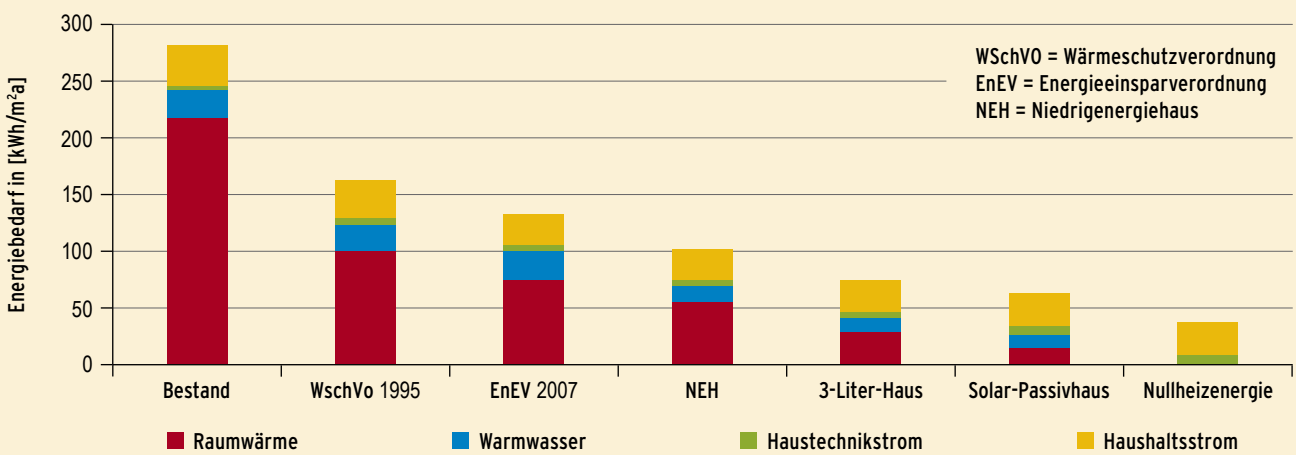
Funktionsweise der lichtdurchlässigen, transparenten Wärmedämmung

Quelle: FhG-ISE



Netto-Plusenergiehäuser sind so konstruiert, dass sie im Jahresverlauf mehr Energie produzieren als verbrauchen.

### Gebäudeenergiekennwerte



Energiekennwerte für verschiedene Wärmedämmstandards am Beispiel eines Einfamilienhauses

Quelle: aktualisiert nach Luther 2001

## Mehrkosten des Wärmeschutzes

Je geringer der Heizwärmebedarf eines Neubaus ist, desto geringer ist die jährliche Heizkostenrechnung. Dem stehen Mehrkosten beim Neubau des Gebäudes gegenüber. Für Passivhäuser rechnet man mit maximal 10 Prozent zusätzlichen Investitionskosten gegenüber einem Standardhaus nach EnEV 2009. Bei guter Planung können die zusätzlichen Kosten aber deutlich geringer ausfallen und bei Verwendung von Förderprogrammen auf das Niveau von Standardgebäuden sinken. Dafür bieten sie einen zuverlässigen Schutz gegenüber zukünftigen Energiepreissprüngen und können selbst im Winter notfalls ganz ohne Heizung auskommen.

Wenn die Wärmedämmung weiter verstärkt und eine Solaranlage mit großem Speicher im Inneren des Hauses installiert wird, braucht das Gebäude überhaupt keinen Brennstoff oder Heizstrom von außen mehr (**Nullenergiehaus**) beziehungsweise kann über regenerative Energien sogar als kleines „Kraftwerk“ in der Jahresbilanz einen Energieüberschuss erwirtschaften (**Plusenergiehaus**).

Noch wichtiger als hohe Standards bei Neubauten sind Verbesserungen im **Altbaubestand**. Der Grund: Weniger als 1 Prozent des Wohnungsbestandes wird jedes Jahr erneuert. Darum sollte bei ohnehin fälligen Sanierungsarbeiten an den Fassaden ein zusätz-

licher Wärmeschutz aufgebracht werden. Dann sind die Mehrkosten gering und amortisieren sich nach kurzer Zeit. Eine ähnlich günstige Gelegenheit ergibt sich sonst erst beim nächsten Renovierungszyklus nach einigen Jahrzehnten.

### Infos zu Sonnenkollektoren

- Bundesverband Solarwirtschaft: [www.solarwirtschaft.de](http://www.solarwirtschaft.de)
- European Solar Thermal Industry: [www.estif.org](http://www.estif.org)
- Deutsche Solarthermie-Technologieplattform (DSTTP): [www.dsttp.org](http://www.dsttp.org)

### Informationsportal zur Solarwärme für Mehrfamilienhäuser

- [www.solarwaerme-info.de](http://www.solarwaerme-info.de)
- Solar Heating and Cooling Programm der Internationalen Energieagentur (IEA): [www.iea-shc.org](http://www.iea-shc.org)

### Infos zu passiver Solarnutzung

- Passivhaus Institut: [www.passiv.de](http://www.passiv.de)
- BINE-Informationdienst zu Energietechnologien: [www.bine.info](http://www.bine.info)
- Institut Wohnen und Umwelt: [www.iwu.de](http://www.iwu.de)
- Fraunhofer-Institut für Bauphysik: [www.ibp.fhg.de](http://www.ibp.fhg.de)





# BIOMASSE - DER DAUERBRENNER FÜR WÄRME UND STROM

## → Die Fakten

- 7,7 Prozent des deutschen Endenergieverbrauchs im Jahr 2010 stammen aus Biomasse, also aus Festbrennstoffen, Biogas, Flüssigbrennstoffen, aber auch dem biogenen Anteil des Abfalls. 255 Holzheizkraftwerke, knapp 5.900 Biogasanlagen und viele Millionen kleine Biomasseheizungen stellen klimafreundlich Strom und Wärme bereit.
- Die Wärmebereitstellung aus Holz und anderen festen Bioenergieträgern gewinnt angesichts steigender Öl- und Gaspreise deutlich an Bedeutung.
- Biogasanlagen sind ein neues wirtschaftliches Standbein für die Landwirtschaft. Besonders die Güllenutzung leistet einen erheblichen Beitrag zum Klimaschutz. Biogas-Mikronetze und die Aufbereitung des Biogases auf Erdgasqualität schaffen neue Optionen für den Betrieb von Biogasanlagen.
- Das Ausbaupotenzial der Biomasse in Deutschland liegt bei rund 10 Prozent des heutigen Energierohstoffbedarfs.



Holz-Heizkraftwerk, Biogas-Anlage und Holzfeuerung

Die Nutzung von Biomasse zur Erzeugung von Strom und Wärme ist eine besonders unter Klimagesichtspunkten attraktive Form der Energiewandlung. Denn für die Bildung von Biomasse wird der Atmosphäre zunächst das Treibhausgas CO<sub>2</sub> entzogen; der Kohlenstoff wird in der Biomasse gebunden. Später wird er wieder in die Atmosphäre abgegeben – etwa bei der Verbrennung oder der Verrottung der Biomasse. Wird die Biomasse daher energetisch genutzt, wird nur das CO<sub>2</sub> freigesetzt, das zuvor beim Wachstum der Pflanzen aus der Atmosphäre entnommen wurde. Unter dem Strich nützt die Biomassenutzung dem Klima allerdings nur dann, wenn die jährlich genutzte Menge die im gleichen Zeitraum nachwachsende Menge nicht übersteigt. Daher sind nachhaltige Bewirtschaftungsstrategien, zum Beispiel für Wälder, erforderlich.

Biomasse ist nicht gleich Biomasse. Organische Abfälle, Holz, Gülle, auch Getreide, Mais oder andere Stoffe pflanzlichen und tierischen Ursprungs und deren Neben- und Folgeprodukte können für eine klimaverträgliche Energiebereitstellung herangezogen werden.

Zu den wichtigsten biogenen Brennstoffen zählen sicherlich Holz und Holzreste, die als Reststoff aus Walddurchforstungen, Sägereien oder als Altholz vorliegen. Schnellwachsende Hölzer, wie Pappeln oder Weiden, können in sogenannten Kurzumtriebsplantagen angebaut und nach wenigen Jahren geerntet werden. Schilfgras (*Miscanthus*) ist ein potenziell sehr ertragreicher nachwachsender Rohstoff, setzt aber Ackerböden von hoher Qualität mit guter Wasserversorgung voraus. Reststroh, aber auch spezielle

Getreideganzpflanzen wie der Weizen-Roggen-Hybrid Triticale eignen sich ebenfalls zur Energiebereitstellung. Zucker- und Stärkepflanzen, beispielsweise Mais oder Zuckerrüben, können zur Herstellung von Bioalkohol verwendet werden. Zur Biomasse zählen auch ölhaltige Pflanzen, die durch Pressung und nachfolgende Verarbeitung in flüssige Energieträger umgewandelt werden (siehe Kapitel „Biokraftstoffe“).

Organische Reststoffe eignen sich ebenfalls als Energielieferant. Gülle, Bioabfall, Klärschlamm und kommunale Abwässer oder Speisereste können in ein energiereiches Biogas verwandelt werden. Auch aus mittlerweile stillgelegten Mülldeponien tritt noch Bio- beziehungsweise Deponiegas aus, das genutzt werden kann.

## Die älteste Nutzungsart: Feuerungen

Die älteste und einfachste Art der energetischen Nutzung ist die Verfeuerung der Biomasse. Um eine vollständige und emissionsarme Verbrennung zu gewährleisten und Rücksicht auf den Aschegehalt, die Brennstoffzusammensetzung, Form und Partikelgröße der Brennstoffe zu nehmen, wurden für die verschiedenen Größenklassen der Anlagen unterschiedliche Feuerungstypen entwickelt, die sich im Wesentlichen durch die Art der Brennstoffaufbereitung und -zufuhr unterscheiden.

Die heutige Nutzung biogener Feststoffe in Deutschland geschieht überwiegend in Kleinanlagen unter 15 Kilowatt oder Kleinanlagen. Eine automatische Brennstoffbeschickung und Feuerungsregelungen

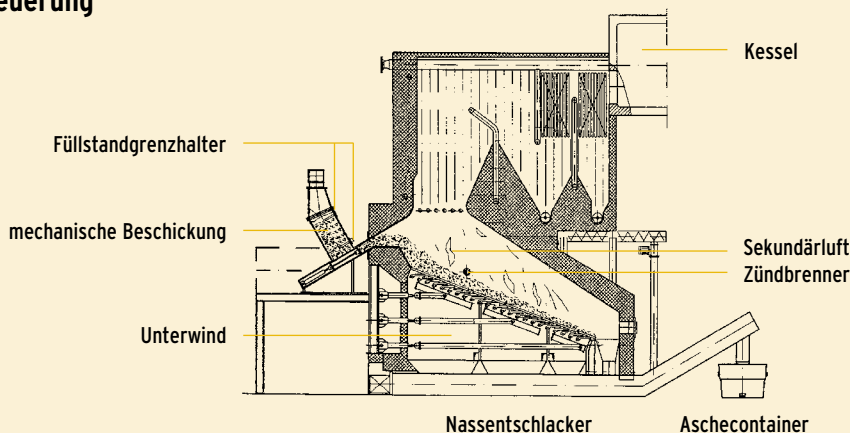


Biomasse-Kraftwerke verstromen Holz und andere feste Bioenergieträger

haben den Bedienungskomfort erhöht. Kleinanlagen unterliegen dabei auch den Grenzwerten des Bundesimmissionsschutzgesetzes, die 2010 nochmals verschärft wurden.

Einen besonderen Aufschwung erleben Heizungen auf Basis von Holzpellets. Holzpellets sind kleine Presslinge aus naturbelassenem Holz, meist aus Säge- oder Hobelspänen. Sie können genau wie Heizöl im Tankwagen angeliefert oder in Säcken gekauft werden. Pellets können in Kaminöfen genauso wie in großen, vollautomatischen und emissionsarmen Zentralheizungen verfeuert werden. Mit Förderschnecken oder Saugvorrichtungen werden die Pellets automatisch aus einem Speicherbehälter geholt und in die Brennkammer eingebracht. Der notwendige Lagerraum für den Brennstoff ist bei Pellets kaum größer als bei einer Ölzentralheizung.

## Biomassefeuerung



Die Rostfeuerung ist ein Beispiel für eine flexibel einsetzbare Biomassefeuerung. Durch die Fortbewegungsgeschwindigkeit des Brenngutes und die Luftmenge kann die Feuerung präzise gesteuert werden.

Quelle: Flaig 1998



„Energjestäbchen“ - Pellets aus Biomasse

Für mittlere Anlagen, zum Beispiel in Mehrfamilienhäusern, werden zunehmend auch Hackschnitzel interessant. Hackschnitzel müssen nicht verpresst werden und sind in der Regel günstiger als Pellets. Auch stammen sie meist aus der Region, verursachen also nur geringe Transportemissionen. Insbesondere wenn Hackschnitzel effizient getrocknet wurden und bestimmte Qualitätsanforderungen erfüllen, wird in Kombination mit modernen Feuerungsanlagen eine emissionsarme und effiziente Nutzung erreicht.

Wärmeerzeugung ist aber nicht nur auf kleine und mittlere Anlagen begrenzt. Mit Holzfeuerungen können auch Nah- und Fernwärmenetze mit Wärme versorgt werden (siehe Seite 74). In Österreich, das seit langem Biomasse systematisch fördert, gibt es viele hundert mit Biomasse befeuerte Fernheizwerke. In diesen größeren Feuerungen lohnt auch ein höherer technischer Optimierungsaufwand.

Verbessert wurden die heutigen modernen Feuerungen sowohl im Bereich der Wirkungsgrade wie auch der Emissionen. Die Wirkungsgrade lassen sich durch die Kondensation der Rauchgase – dabei wird die Energie der Umwandlung von Wasserdampf in flüssiges Wasser genutzt – und durch die Vortrocknung der Biomasse erheblich steigern. Die Abgaswerte werden durch einen kontinuierlichen Verbrennungsvorgang und durch eine effiziente Staubabscheidung verbessert.

Gerade bei den kleinen Anlagen konnten die Emissionen von Kohlenmonoxid und unverbrannten Kohlenwasserstoffen in den vergangenen Jahren deutlich gesenkt werden. Bei kleinen, nicht automatischen Feuerungsanlagen wie offenen Kaminen oder Kaminöfen ist darauf zu achten, dass die Geräte eine optimierte Brennkammer haben; hier ist auch die Bedienung von großer Bedeutung. Bei sorgfältiger Befeuerung mit trockenem Holz lassen sich die Staubemissionen um ein Vielfaches senken.



Sichtprüfung des Brennvorgangs in einem Biomasse-Heizkraftwerk

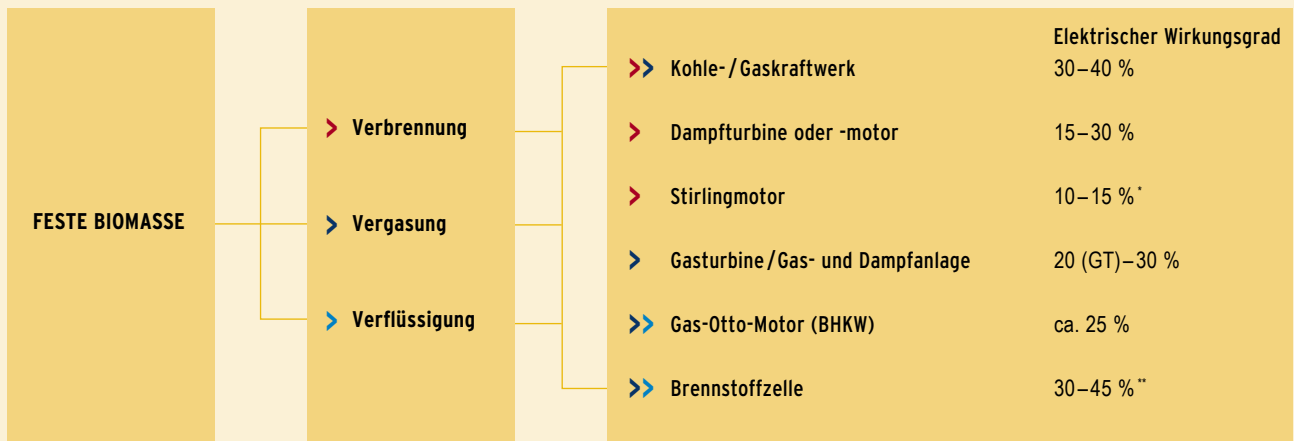
## Strom aus Biomasse

Das Interesse an der Verstromung von Biomasse ist seit der Verabschiedung der Biomasse-Verordnung und dem novellierten Erneuerbare-Energien-Gesetz von 2004 sprunghaft angestiegen. Allein die Stromerzeugung aus fester Biomasse und anderen biogenen Festbrennstoffen hat sich in den letzten Jahren auf 11,8 Milliarden kWh (ohne biogenen Anteil des Abfalls) vervielfacht. 255 solcher Biomasse-Kraftwerke und Heizkraftwerke sind in Deutschland in Betrieb. Als Brennstoff werden in den Kraftwerken vor allem Altholz, aber auch Industrieresthölzer, Sägenebenprodukte und Waldrestholz eingesetzt.

In heutigen Holz-Kraftwerken wird die Biomasse verbrannt und in der Regel mit der Hitze Dampf erzeugt. Dieser Dampf treibt dann eine Turbine oder einen Motor an (siehe Grafik „Möglichkeiten der Verstromung von Biomasse“). Besonders effizient ist es, die verbleibende Wärme nicht ungenutzt an die Umgebung abzugeben, sondern zur Beheizung von Gebäuden oder für Trocknungsprozesse zu verwenden. Das nennt man Kraft-Wärme-Kopplung (siehe Seite 72). Diese Form der hocheffizienten Biomasse-nutzung wird durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz besonders gefördert.

Da die Stromwirkungsgrade der heutigen Kraftwerkstechnologien besonders in kleinen Anlagen noch unbefriedigend sind, werden neue Technologien entwickelt. Hierzu gehört der Stirlingmotor, der im Unterschied zu Dampfturbinen auch im Leistungsbereich unter 1 MW noch hohe Strom- und Wärmeausbeuten aufweist. Die Kommerzialisierung beginnt allerdings erst allmählich (Grafik „Möglichkeiten der Verstromung von Biomasse“). Weiter ist da schon die ORC-Technik („Organic-Rankine-Cycle“), die sich besonders für Wärmequellen auf niedrigem Temperaturniveau eignet. Bei diesem Prozess wird die Wärme der Feuerung – oder auch jeder anderen Wärmequel-

## Möglichkeiten der Verstromung von Biomasse



\* kleinere Leistungsklasse als Dampfturbine; \*\* je nach Brennstoffzellentyp

Verschiedene Technologien stehen zur Stromerzeugung aus Biomasse bereit.

le, beispielsweise Erdwärme – nicht zur Erzeugung von Wasserdampf für eine Dampfturbine genutzt. Stattdessen wird ein organisches Lösungsmittel, wie Toluol, Pentan oder Ammoniak, verdampft, um damit eine Turbine anzutreiben. Die erste biomassebefeuerte ORC-Anlage in Deutschland wurde 2002 errichtet.

Eine vielversprechende Alternative zur Verbrennung ist die **Vergasung** von Biomasse. Dazu wird sie bei hohen Temperaturen zersetzt und in ein Gas umgewandelt. Dieses Gas wird dann abgekühlt, gereinigt und in einem Motor-Blockheizkraftwerk (BHKW) oder einer Turbine verbrannt. Auch die zukünftige Nutzung von Biomasse in Brennstoffzellen, von welchen auch bei kleinen Leistungseinheiten noch hohe Stromausbeuten erwartet werden, wird mit vergastem Holz möglich. Holzvergaser sind prinzipiell nichts Neues. Sie wurden schon nach dem Krieg mangels motorschonender Kraftstoffe zum Antrieb von LKW verwendet. Das besondere Kunststück ist, auch bei wechselnden Brennstoffqualitäten ein hochwertiges und teearmes Gas herzustellen, das die Motoren dauerhaft vertragen. Neu entwickelte Holzvergaser-Pilotanlagen mit angeschlossenem BHKW werden derzeit im Dauerbetrieb erprobt.

## Biogas - Bakterien am Werk

Auch Biogas kann zur Stromerzeugung oder Kraft-Wärme-Kopplung eingesetzt werden. Biogas entsteht bei der Zersetzung von organischer Materie durch spezielle Methanbakterien. Dieser Prozess heißt Vergärung. Zwei wesentliche Voraussetzungen müssen für die Bildung eines energiereichen Gases erfüllt sein: Es müssen „anaerobe Bedingungen“ herrschen, Sauerstoff muss also ausgeschlossen sein. Außerdem müssen die Temperaturen im Biogasreaktor den vorhandenen Bakterien angepasst sein. Die meisten Biogasanlagen arbeiten bei Temperaturen zwischen 30 und 37 °C.

Die Bakterien zersetzen die organische Materie in mehreren Stufen. Endpunkte der Zersetzungskette sind die Gase Methan ( $\text{CH}_4$ ) und Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ). Hundert Kubikmeter Biogas entstehen aus etwa einer Tonne Bioabfall, den täglichen Exkrementen von 110 Rindern, 13.000 Hühnern oder aus etwa einer halben Tonne Silomais. Der energetisch nutzbare Methananteil im Biogas ist beim Silomais am niedrigsten, da er vorwiegend Kohlenhydrate enthält. Die Fettanteile in den Exkrementen oder im Bioabfall ergeben höhere Methangehalte, die um die 60 Prozent liegen.

Bereits 1948 entstand die erste deutsche Biogasanlage im Odenwald. Seitdem hat sich die Verfahrenstechnik stetig verbessert. Die Kernkomponenten sind jedoch gleichgeblieben (Grafik „Biogasanlage“): Bei organischen Abfällen beginnt der Prozess mit einer Aufbereitungsstufe, in der die organische Masse zerkleinert und von Störstoffen befreit wird. Das Herzstück jeder Biogasanlage ist der Methanreaktor, in dem die eigentliche bakterielle Zersetzung stattfindet. Je nach Größe der Anlage kann dieser Reaktor aus Beton, Kunststoff oder Stahl gefertigt werden. Für landwirtschaftliche Kleinanlagen in Entwicklungsländern werden die Faulräume oft im Boden versenkt gemauert. Das organische Substrat verweilt je nach Konzept und Substratart zwischen zehn und über 100 Tagen im Reaktor, bevor der Gärrest ausgeschleust und beispielsweise als Düngemittel oder Kompost weiterverarbeitet wird. Anschließend wird das erzeugte Biogas gegebenenfalls gereinigt und entschwefelt.

Mit einem Heizwert von circa 6 kWh entspricht ein Kubikmeter Biogas 0,6 Litern Heizöl oder 0,6 m<sup>3</sup> Erdgas. In Deutschland wird das im Reaktor entstandene Biogas nahezu ausschließlich in Blockheizkraftwerken (BHKW) genutzt. Das BHKW deckt zunächst den Eigenbedarf der Anlage an Strom für Rührwerke und Steuerungen und den Eigenbedarf an Wärme für die Beheizung des Reaktors.

Das Biogas kann aber auch gereinigt, aufbereitet und dann in ein Erdgasnetz eingespeist werden. Dazu muss das im Biogas enthaltene Kohlendioxid abgetrennt und das Gas mit einem Kompressor auf das Druckniveau des Erdgasnetzes gebracht werden. Diese Aufbereitung kostet zusätzliche Energie. Der Vorteil liegt aber darin, dass das Biogas an anderer Stelle aus dem Gasnetz entnommen werden kann, wo ein kontinuierlicher Wärmebedarf gegeben ist und das Gas daher mit hohen Wirkungsgraden genutzt werden kann. Mit der 2010 novellierten Gasnetzanschlussverordnung wurden die gesetzlichen Voraussetzungen für eine solche Einspeisung weiter optimiert. Zudem werden schärfere Anforderungen an die maximal erlaubte, bei der Aufbereitung in die Atmosphäre entweichende Methanmenge gestellt.

Wenn es potenzielle Wärmeverbraucher in der Nähe einer Biogasanlage gibt, kann eine Gasleitung gebaut werden, durch die das Biogas unaufbereitet weitergeleitet wird.

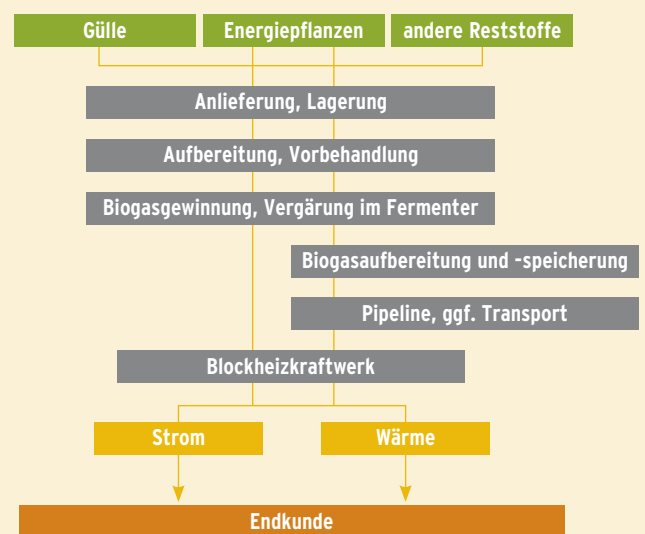
Biogasanlagen haben für Landwirte einen mehrfachen Nutzen: Der größte wirtschaftliche Vorteil entsteht durch den im BHKW erzeugten Strom, der in das öffentliche Stromnetz eingespeist und gemäß dem Erneuerbare-Energien-Gesetz vergütet wird. Die

Wärme wird zur Beheizung von Gebäuden und Ställen verwendet. Bei größeren Anlagen ist auch die Verteilung der Wärme mit einem Nahwärmenetz möglich (siehe Seite 74). Außerdem wird die Gülle als Düngemittel aufgewertet und die Geruchsbelästigung bei der Ausbringung reduziert.

Die Vergärung der Gülle hat einen mehrfachen Klimanutzen: Die vergorene Gülle emittiert bei der Lagerung weniger Methan – ein hochpotentes Treibhausgas – als die unvergorene. Strom und Wärme aus Biogasanlagen vermeiden zudem die Verbrennung fossiler Energieträger.

Heute werden in Biogasanlagen vor allem tierische Exkremente und nachwachsende Rohstoffe (insbesondere Mais, aber auch Grassilage und Getreide) sowie Bioabfälle eingesetzt. Beim Einsatz nachwachsender Rohstoffe, insbesondere Mais, sind allerdings ökologische Anforderungen an den Anbau wesentlich; auch einer zu einseitigen Rohstoffbeschaffung muss entgegengewirkt werden. Regional sind durch den Anstieg des Energiepflanzenanbaus und durch die Zunahme des Maisanbaus auch Einbußen an Biodiversität sowie große Bodenpreissteigerungen aufgetreten, wie der Deutsche Agrarbericht feststellt. Das Erneuerbare-Energien-Gesetz setzt für eine vielfältige und vor allem auf Reststoffen beruhenden Rohstoffeinsatz besondere Anreize (siehe Kapitel „Erneuerbare Energien und Naturschutz“).

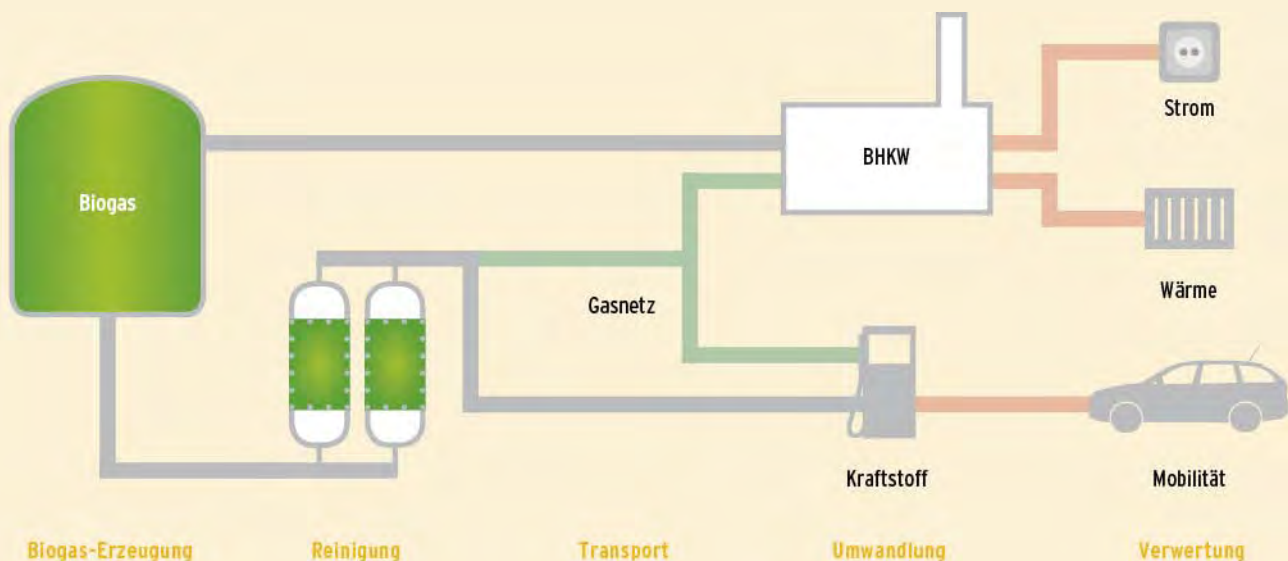
## Biogasanlage



Von der Gülle zur nutzbaren Energie - schematische Darstellung der Verfahrensschritte

Quelle: IFEU

## Biogasaufbereitung



Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz

## Kosten

Die Vielfältigkeit der biogenen Einsatzstoffe spiegelt sich auch in den Kosten der Energiebereitstellung wider. Ausschlaggebend für die Wirtschaftlichkeit der Anlagen sind in der Regel die Bereitstellungskosten des Brennstoffs. Diese Kosten können „negativ“ sein, wenn zum Beispiel Landwirte oder Lebensmittel-fabriken Kosten für die Entsorgung von Reststoffen vermeiden. Dann kann der Anlagenbetreiber für die Annahme der Reststoffe eine Gebühr verlangen. Die Beschaffungskosten können aber auch hoch sein; sie erreichen beim Einkauf von Getreideganzpflanzen bis zu 160 Euro/t. Gestiegene Weltmarktpreise für Getreide und Preissteigerungen bei den landwirtschaftlichen Rohstoffen haben auch die Einsatzstoffe für Biogasanlagen verteuert. Viele Biogasanlagen werden heute sowohl mit Reststoffen als auch landwirtschaftlichen Rohstoffen betrieben.

Die biogene Wärmebereitstellung kann unter günstigen Rahmenbedingungen niedrigere Wärmegestehungskosten aufweisen als Öl- oder Gaskessel. Dies hängt vor allem mit den rapide gestiegenen Gas- und Ölpreisen zusammen. Während beispielsweise Holzpellets zwischen 3,5 und 5 Ct/kWh kosten, liegen die Gas- und Ölpreise zwischen 6 und 8 Ct/kWh; zwischenzeitlich lagen sie sogar bei bis zu 9 Ct/kWh (Stand Anfang 2011). Rechnet man die Investitions- und Wartungskosten hinzu – die bei Holzheizungen deutlich über fossilen Kesseln liegen –, sind Holz-

pellets – und erst recht Scheitholz oder Hackschnitzel – dennoch günstiger als Gas oder Öl.

Die Kosten der Strom- und Wärmeerzeugung von Biogasanlagen hängen in starkem Maße von der Anlagengröße, dem Kofermentationsanteil und den eventuellen Entsorgungsgutschriften, der Gasausbeute, dem Stromeigenbedarf, dem externen Wärmebedarf und anderen Neben-Nutzen wie einer möglichen Düngewertverbesserung ab. Die Bandbreite liegt zwischen 12 und 28 Ct/kWh. Durch die Vergütungssätze des Erneuerbare-Energien-Gesetzes sind viele landwirtschaftliche Anlagen wirtschaftlich. Zudem können Landwirte durch Eigenleistung viel Geld beim Bau der Anlage sparen.

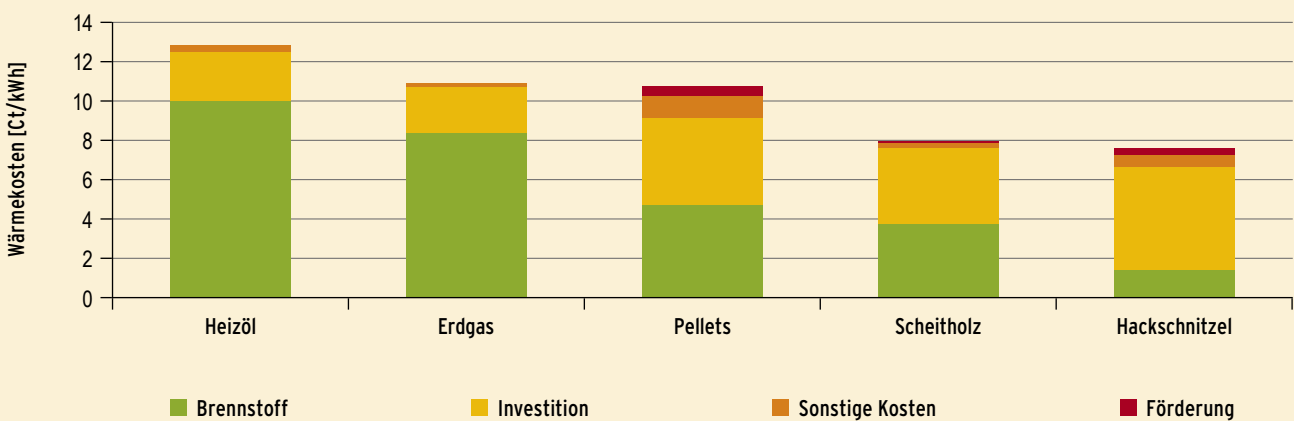
Auch die Stromerzeugungskosten aus fester Biomasse schwanken stark in Abhängigkeit vom Brennstoff. Während ein großes Altholzkraftwerk auf rund 8 Ct/kWh Strom kommt, kostet die Elektrizitätsbereitstellung aus einem kleinen Kraftwerk mit naturbelasstem Holz rund 20 Ct/kWh.

Deponiegas fällt kontinuierlich und vorhersagbar an. Es muss ohnehin durch ein Leitungssystem erfasst werden. Bei ordnungsgemäßer Auslegung der Anlage ist daher ein wirtschaftlicher Betrieb gewährleistet. Klärgasanlagen sind wirtschaftlich, wenn ohnehin ein Faultrum (Biogasreaktor für den Klärschlamm) vorhanden ist.



In dieser Biogasaufbereitungsanlage in Merzig wird Biogas gereinigt und in das Erdgasnetz eingespeist.

## Wirtschaftlichkeit



Kostenvergleich verschiedener kleinerer Heizungssysteme. Annahme für Öl- und Gaspreis: 8,5 beziehungsweise 7,5 Ct/kWh

Quelle: verändert nach CARMEN/ZSW 2008

## Potenziale

Holz leistet heute den mit Abstand größten Beitrag zur energetischen Nutzung von Biomasse. Dies wird auch in Zukunft so bleiben. Restholz im Wald, das nicht zur stofflichen Verwertung an die Industrie verkauft werden kann, fällt in Form dünner Stämme bei der Durchforstung junger Bestände und dicker Äste sowie anderer Erntereste beim Fällen von schlagreifen Bäumen an. Zu beachten ist hier, dass nur der Teil an kleinstückigem Restholz entnommen wird, den die Wälder entbehren können. Denn einen Teil dieses Holzes, an dem üblicherweise hohe Anteile an Rinden, Nadeln oder Blätter hängen, brauchen die Bäume wiederum selbst als Nährstoffquelle. Ferner sollte pro Jahr nicht mehr Holz entnommen werden, als im gleichen Zeitraum nachwächst. Mit der Entwicklung einer Deutschen Waldstrategie 2020 verfolgt die Bundesregierung das Ziel, eine umwelt- und naturverträgliche Rohstoffversorgung aus deutschen Wäldern bei gleichzeitiger Erhaltung der biologischen Vielfalt und des Erholungswertes des Waldes optimal in Einklang zu bringen.

Weiteres naturbelassenes Holz entsteht als Verschnitt in Sägewerken und in der übrigen Holzverarbeitenden Industrie. Hiervon wird allerdings ein großer Teil in der Papier- und Spanplattenindustrie stofflich verwertet, so dass nur der überschüssige Rest energetisch genutzt werden kann. Des Weiteren stehen Holzprodukte am Ende ihrer Nutzungsdauer als meist kontaminiertes Altholz zur Verfügung. Auch dieses wird teilweise noch stofflich verwertet. Die Grenze zwischen der stofflichen und energetischen Nutzung

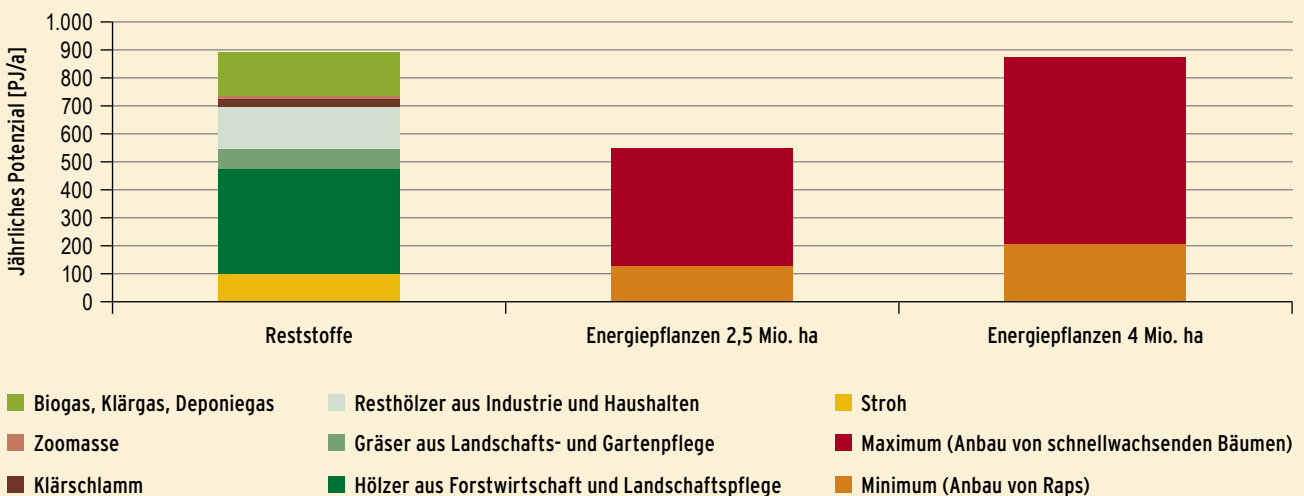


Biogasanlage: Auf der Basis von Rindergülle, Mais-Silage und Roggen wird eine Leistung von 500 kWel erzeugt.

ist gleitend und von den jeweils erzielbaren Verkaufspreisen abhängig. Weitere Potenziale können durch die Nutzung von Stroh, durch Biogasanlagen und durch den gezielten Anbau von Energiepflanzen erschlossen werden.

Stroh wird als Einstreu für die Tierhaltung benötigt und muss außerdem in vielen Gegenden zur Erhaltung der Bodenqualität auf den Acker zurückgeführt werden. Für die energetische Nutzung verbleibt aber immer noch ein Anteil von rund einem Drittel des gesamten Strohaufkommens. Stroh ist jedoch ein problematischer Brennstoff und wird daher – im Unterschied zu Dänemark – in Deutschland heute kaum genutzt. Für eine zukünftige Nutzung bietet sich die kostengünstige und effiziente Mitverbrennung in Kohlekraftwerken an.

### Potenzial biogener Brenn- und Kraftstoffe



Biomasse kann in vielfältiger Form zur Energiegewinnung genutzt werden.

Quelle: IFEU



Das größte Potenzial für die Gewinnung von Biogas ist in der Landwirtschaft zu finden. Derzeit (Ende 2010) werden 2,2 Prozent des deutschen Stromverbrauchs durch Biogas gedeckt, das in rund 5.900 Anlagen produziert wird (Grafik „Biogasanlagen in Deutschland“).

Neben Reststoffen bietet sich auch der gezielte Anbau von Biomasse an. Das Potenzial der Energiepflanzen hängt sehr stark davon ab, wie viel Ackerfläche zur Verfügung steht – also davon, wie viel landwirtschaftliche Flächen wir als naturschutzrelevante Brachen belassen, wie wir uns ernähren, wie hoch die Erträge sind, wie viel Ökolandbau wir haben wollen, wie viel Nahrungs- oder Energiepflanzen wir importieren und welche Pflanzen wir anbauen. Insgesamt ist darauf zu achten, dass der Anbau von Biomasse nicht zu einem erheblichen Anstieg der Nahrungs- und Futtermittelimporte führt, der wiederum negative soziale und ökologische Folgewirkungen im Ausland haben kann. Allerdings ist es keineswegs selbstverständlich, dass frei werdende Flächen für den Anbau von Energiepflanzen eingesetzt werden. Eine dringend gebotene Extensivierung der Landwirtschaft wäre ebenfalls auf große zusätzliche Flächen angewiesen. Flächen werden auch für die Schaffung von Biotopflächen und andere Erfordernisse des Natur-, Boden- und Gewässerschutzes benötigt.

Ausgehend von 2,5 Millionen ha Anbaufläche, die unter bestimmten Randbedingungen zukünftig für einen Nichtnahrungsmittelanbau zur Verfügung stehen könnten, und den Möglichkeiten der Nutzung von Rest- und Abfallstoffen könnte unter günstigen Randbedingungen insgesamt ein Anteil von rund 9 Prozent des derzeitigen Primärenergieverbrauchs durch Biomasse gedeckt werden (siehe Grafik „Potenzial biogener Brenn-/Kraftstoffe“). Bei einem Anbau auf 4 Millionen ha steigt dieser Anteil auf 11 Prozent.

## Heutige Nutzung

Ob 9 Prozent oder 11 Prozent – von solchen Zielen sind wir derzeit noch entfernt. Nur beim Deponie- und Klärgas sowie in naher Zukunft auch beim Altholz wird ein Großteil des Potenzials schon genutzt. Während die Nutzung von Biomasse in Ländern wie Österreich und Finnland schon lange weit verbreitet ist, setzt sie sich hierzulande erst allmählich durch. Immerhin 5,5 Prozent des Stromverbrauchs wurden in Deutschland im Jahr 2010 aus Biomasse, Klär- und Deponiegas gedeckt. Im Wärmebereich werden 8,7 Prozent des Energiebedarfs aus Biomasse gedeckt, davon allein gut 5 Prozent durch Holzheizungen in privaten Haushalten.

## Biogasanlagen in Deutschland



Kleine landwirtschaftliche Biogasanlagen gibt es im Süden, die meisten größeren Anlagen im Norden Deutschlands.

Quelle: IE Leipzig

Zwei Millionen Hektar – das sind 17 Prozent der deutschen Ackerflächen – werden für den Anbau von Energie- und Industriepflanzen verwendet. Bei der Herstellung von Biodiesel aus Raps ist Deutschland sogar Weltmeister (siehe Kapitel „Biokraftstoffe“).

Insgesamt trägt Biomasse 7,7 Prozent zum deutschen Endenergieverbrauch bei (inklusive Klärgas, Biokraftstoffe und biogenen Anteils des Abfalls). Dieser Anteil ist deutlichen Schwankungen unterworfen, da etwa jede fünfte Wohnung in Deutschland neben der Zentralheizung auch über einen Kaminofen oder eine vergleichbare Holzfeuerung verfügt. Wie intensiv diese Feuerungen genutzt werden, hängt unter anderem von den Preissprüngen auf dem Heizölmarkt ab. Der jüngste Preisschub auf dem Ölmarkt und die Debatte um die Gasversorgung haben zu einem spürbaren Marktwachstum geführt. Innerhalb weniger Jahre wurden beispielsweise in Deutschland rund 165.000 Holzpellettheizungen (Prognose für 2011) installiert.

## Ökobilanz Biomasse

Biobrennstoffe bei Substitution von Kohle	Ressourcenverbrauch	Treibhauseffekt	Stratosphärischer Ozonabbau	Versauerung	Toxizität (Beispiel NO <sub>x</sub> )
Winterweizen	+	+	-	+ / -	-
Chinaschilf	+	+	-	+	+
Pappel (nachwachsend)	+	+	-	+	+
Weizenstroh	+	+	+ / -	+	+
Fichten-Waldrestholz	+	+	+ / -	+	+
<b>Biobrennstoffe bei Substitution von Erdgas</b>					
Winterweizen	+	+	-	-	-
Chinaschilf	+	+	-	-	-
Pappel (nachwachsend)	+	+	-	-	-
Weizenstroh	+	+	-	-	-
Fichten-Waldrestholz	+	+	-	-	-

Umwelteinwirkungen der Biomasse-Nutzung im Vergleich zu fossilen Brennstoffen: + Vorteile des Bioenergieträgers; +/- ausgeglichen beziehungsweise abhängig von der Bewertungsmethode; - Nachteile des Bioenergieträgers

Quelle: Kaltschmitt/Reinhardt 1997

## Umweltnutzen biogener Brennstoffe

Allen Nutzungsformen biogener Brennstoffe gemeinsam ist der erhebliche Beitrag zum Klima- und Ressourcenschutz. Zur Bereitstellung von Biomasse müssen nur Bruchteile des Energiegehaltes in Form von fossiler Energie aufgewendet werden (siehe auch Seite 24). Das gilt für Rest- und Abfallstoffe, die gesammelt, transportiert und aufbereitet werden müssen, aber auch für Energiepflanzen, bei denen zusätzlich der Anbau und die Herstellung von Betriebsstoffen (je nach Anbauform, Düngemittel, Pestizide etc.) bilanziert werden müssen. Diese positive Energiebilanz schont nicht nur die Reserven der endlichen Energieträger, sondern verringert auch die klimawirksamen CO<sub>2</sub>-Emissionen erheblich. Denn durch die Biomasse werden fossile Energieträger ersetzt und durch den geschlossenen CO<sub>2</sub>-Kreislauf keine treibhauswirksamen CO<sub>2</sub>-Emissionen ausgestoßen. Auch unter Berücksichtigung der Treibhausgase Methan und Lachgas –

letzteres wird bei angebaute Biomasse durch die Herstellung von Düngemitteln und durch stoffliche Vorgänge im Boden freigesetzt – bleibt die Bilanz bei guter Betriebsführung deutlich positiv.

Die gute Betriebsführung ist dabei auch unter dem Blickwinkel der Ökonomie ein sehr wichtiger Punkt. Hier gehen Ökologie und Ökonomie Hand in Hand. Je weniger Biogas verloren geht (zum Beispiel aus dem Gärrestlager), desto geringer sind nicht nur die ökologischen Auswirkungen, sondern desto höher ist auch der erzielbare Erlös aus der Stromerzeugung. Deswegen liegt es im ökonomischen Interesse der Betreiber, möglichst wenig Biogas an die Atmosphäre zu verlieren.

Doch nicht für alle Umweltprobleme ist die Umweltbilanz eindeutig positiv (Tabelle „Ökobilanz Biomasse“). Bei nachwachsenden Rohstoffen haben beispielsweise die Anbauweise, der Standort und die Düngung einen großen Einfluss auf die Schadstoffemissionen. Aspekte der umwelt- und naturverträglichen Flächen- und Rohstoffnutzung müssen darum genauso beachtet werden wie bei den Biokraftstoffen (siehe Seite 122).

Der Zielkonflikt zwischen der Schonung der Rohstoffvorräte und des Klimas einerseits und anderen ökologischen Problembereichen andererseits kann nicht allein wissenschaftlich gelöst werden. Hier ist eine Abwägung bezüglich der ökologischen Bedeutung der einzelnen Vor- und Nachteile vorzunehmen.

### → Infos zur Biomasse

- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe: [www.fnr.de](http://www.fnr.de)
- Verband der Biogas-Industrie: [www.fachverband-biogas.de](http://www.fachverband-biogas.de)
- Informationsdienst zu Biomasse und Nachwachsende Rohstoffe: [www.carmen-ev.de](http://www.carmen-ev.de)

# BIOKRAFTSTOFFE - MOBILITÄT AUS PFLANZEN UND ABFÄLLEN

## → Die Fakten

- Im Jahr 2010 deckten Biokraftstoffe 5,8 Prozent des deutschen Kraftstoffbedarfs; den größten Anteil hatte dabei der Biodiesel. Der Absatz an Pflanzenöl und Biodiesel ist gegenüber 2007 gefallen, die Bioethanolproduktion gestiegen.
- Gesetzlich vorgeschriebene Quoten verlangen von Mineralölkonzernen, gewisse Anteile an Biokraftstoffen in den Verkehr zu bringen. Außerdem sind einige Biokraftstoffe in unterschiedlichem Ausmaß steuervergünstigt.
- Zunehmend werden auch Biokraftstoffe und -rohstoffe, vor allem Palm- und Sojaöl, aus dem Ausland importiert. Strenge Kriterien an die Nachhaltigkeit müssen künftig ökologische Fehlentwicklungen vermeiden.
- Neue Kraftstoffe, wie BtL (Biomass-to-Liquid), Holz- oder Biogas, werden zukünftig die Energiebilanz und -ausbeute steigern.



Zuckerrübenverarbeitung, Fermenter und Biodiesel an der Zapfsäule

Der Verkehr braucht sehr viel Energie. 29 Prozent des deutschen Energieverbrauchs werden im Verkehrssektor benötigt. Damit ist der Verkehr der energieintensivste Verbrauchssektor, gefolgt von privaten Haushalten und Industrie.

Drei Probleme machen Veränderungen dringend notwendig: Die **Importabhängigkeit** von Erdölprodukten, die **Endlichkeit fossiler Rohstoffe** und der **Klimawandel**. Zwar sind die klimaschädlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Straßenverkehr seit 1999 leicht rückläufig, aber das wachsende Verkehrsaufkommen und eine Zunahme der Emissionen aus dem Luftverkehr mindern die Reduktionserfolge. Auch der Anteil der umweltfreundlicheren Verkehrsmittel Bahn, Bus und Binnenschiff sinkt. Problematisch ist auch der Güterverkehr.

Die erwünschte Entkopplung von Transportleistung und Wirtschaftswachstum hat noch nicht stattgefunden.

Biokraftstoffe sind eine Möglichkeit, Mineralöl als Energieträger im Verkehr teilweise zu ersetzen, denn damit werden die drei oben genannten Probleme gemeinsam angegangen. Die Ausgangsstoffe können im Land produziert werden: damit sinkt die Importabhängigkeit. Die Rohstoffe für Bioenergieträger wachsen wieder nach – sie sind also erneuerbar. Und schließlich ist ein Vorteil der Biokraftstoffe ihr Beitrag zum Klimaschutz – wenn die Rohstoffe nachhaltig angebaut werden. Denn das CO<sub>2</sub>, das bei ihrer Verbrennung entsteht, haben sie beim Anbau auf dem Feld der Atmosphäre entnommen (siehe Kapitel „Biomasse als Brennstoff“).



Kraftstoff vom Acker - Raps als Rohstoff ...



... und in der Verarbeitung zu Biodiesel (Rapsölmethylester)

## Eine Fülle an Möglichkeiten

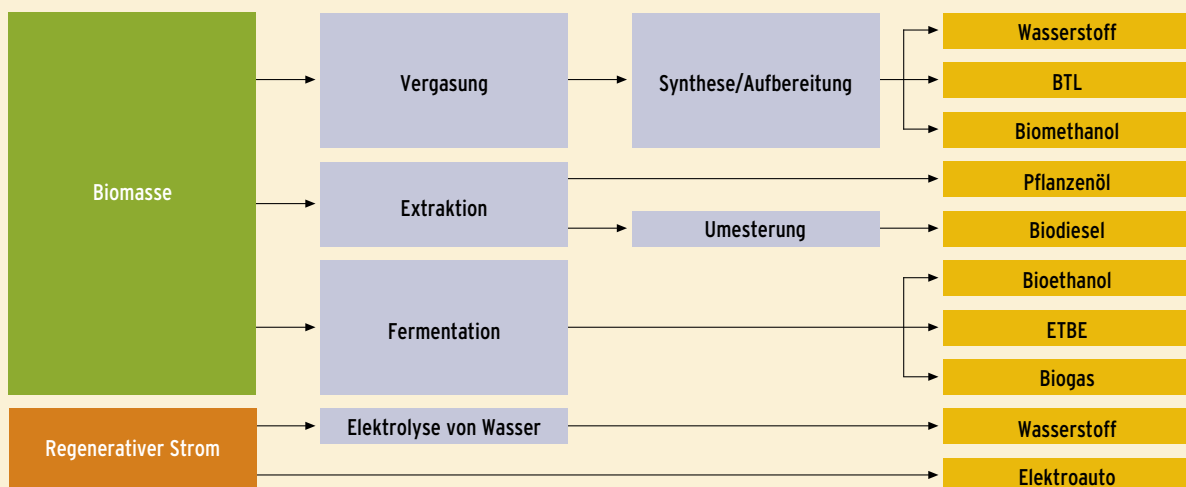
Es gibt nicht den einen Biokraftstoff im Verkehr, sondern eine ganze Reihe flüssiger und gasförmiger Bioenergieträger, die zum Einsatz kommen können (siehe Grafik „Kraftstoffpfade“). Bei den flüssigen Biokraftstoffen sind hierzulande die Pflanzenöle aus heimischem Raps und Sonnenblumen und die verarbeitete Form von Pflanzenölen als Biodiesel (Rapsölmethylester) am bekanntesten. Bioethanol aus Zuckerrüben, Getreide oder Zuckerrohr wird dem Ottokraftstoff beigemischt. Kraftstoffe aus holzartiger Biomasse, wie die sogenannten BTL-Kraftstoffe (Biomass-to-Liquid), sind wichtige zukünftige Flüssigkraftstoffe.

Daneben werden auch gasförmige Kraftstoffe diskutiert, wie etwa Bio-, Klär- und Deponiegas sowie Bio-

wasserstoff und Holzgas, die mehr oder weniger für den Einsatz im Verkehr geeignet sind. Die Ausgangsstoffe sind ebenso vielfältig, denn sie stammen aus der Land-, Forst- und Fischwirtschaft, aus Rest- und Abfallstoffen oder aus thermochemischen Prozessen.

Derzeit hat die Biomasse als einziger erneuerbarer Energieträger im Verkehr größere Bedeutung. Der Sektor der biogenen Kraftstoffe verzeichnete seit 1990 ein beachtliches Wachstum. Im Jahr 2010 deckten Biokraftstoffe 5,8 Prozent des Gesamtverbrauchs an Kraftstoffen in Deutschland ab, ein Großteil davon durch Biodiesel (4,3 Prozent), außerdem spielt Bioethanol (1,4 Prozent) eine Rolle, während Pflanzenöle mit 0,1 Prozent Beitrag nur von geringer Bedeutung sind. Andere erneuerbare Energien kommen höchstens in Nischenanwendungen und im leitungsgebundenen (Bahn-)Verkehr zum Einsatz.

## Kraftstoffpfade aus erneuerbaren Energien



Einige der möglichen Pfade, um Kraftstoffe aus erneuerbaren Energien zu produzieren.

Quelle: IFEU



Biodiesel als Endprodukt an der Tankstelle

## Rohstoff Raps

Der Erfinder des Dieselmotors setzte für seinen Motor von Anfang an auf Biokraftstoffe. „Der Gebrauch von Pflanzenöl als Kraftstoff mag heute unbedeutend sein. Aber derartige Produkte können im Laufe der Zeit ebenso wichtig werden wie Petroleum und diese Kohle-Teer-Produkte von heute“, schrieb Rudolf Diesel 1912 in seiner Patentschrift. Raps-Biodiesel, RME oder auch Rapsölfettsäuremethylester genannt, ist der in Deutschland am weitesten verbreitete Biokraftstoff – jetzt allerdings mit stagnierender bis rückläufiger Tendenz. Der Biodieselabsatz stieg von rund 1,3 TWh im Jahr 1999 auf rund 26 TWh im Jahr 2010.

Auf Grund der gesetzlichen Rahmenbedingungen wird der größte Teil des Biodiesels derzeit dem konventionellen Diesel beigemischt. Nur ein sehr kleiner Teil wird, beispielsweise in LKW von Fuhrunternehmen, als Reinkraftstoff getankt.

Reines Rapsöl kann in konventionellen Dieselfahrzeugen nicht ohne weiteres eingesetzt werden. Spezielle Motoren, etwa die sogenannten Elsbett-Motoren, sind technisch jedoch machbar. Aber im normalen PKW aus der Großserie wird sich der Einsatz von Rapsöl kaum durchsetzen. Ungelöste Probleme sind die Kaltstarteigenschaften des kalteempfindlichen Öls und die Einhaltung strengerer Abgasvorschriften. Der Einsatz wird darum auf Nischenanwendungen beschränkt bleiben.

## Soja- und Palmöl

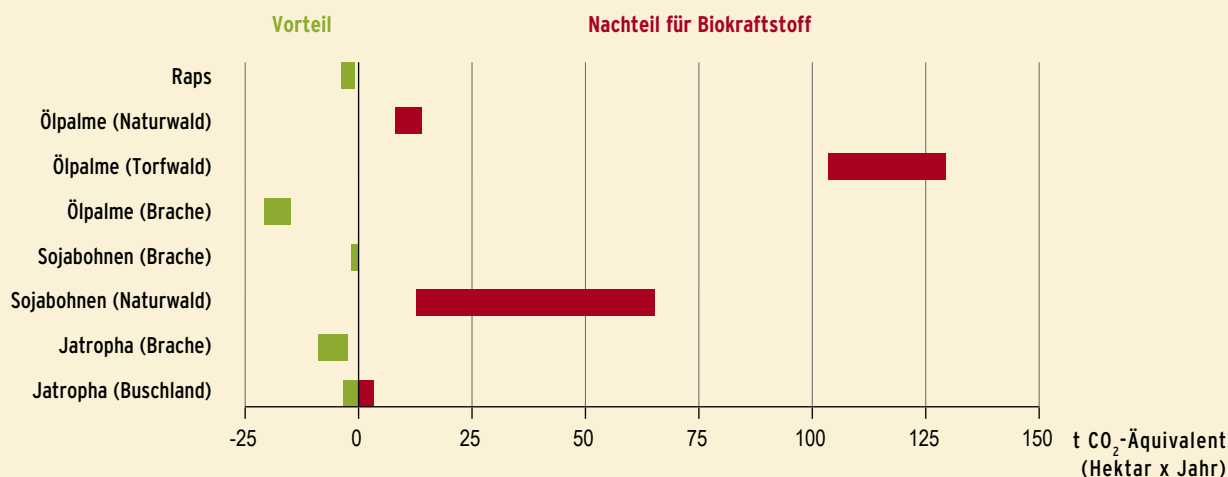
Neben Raps gibt es andere Ölsaaten wie Jatropha-, Soja- oder Palmöl. Da die heimische Produktion von Rapsbiodiesel nicht ausreicht, um die zur Erfüllung der Biodieselquote erforderlichen Mengen bereitzustellen, werden fertige Biokraftstoffe oder auch Agrarrohstoffe zur Produktion von Biokraftstoffen

in Deutschland importiert. Biokraftstoffe aus tropischen Regionen können oft kostengünstiger als in Europa produziert werden und weisen aufgrund der klimatischen Bedingungen eine hohe Flächenproduktivität auf.

**Jatrophaöl** wird in Europa bislang kaum eingesetzt, da der kommerzielle Anbau der Pflanze noch zu neu ist. Ölpalmen wachsen in allen tropischen Regionen rund um den Äquator. Über 85 Prozent des weltweit vorhandenen Palmöls werden derzeit von Malaysia und Indonesien produziert. Zunehmend legen aber auch Farmer in Brasilien und Kolumbien Ölpalmenplantagen an. Ein großer Vorteil von Palmöl ist seine hohe Flächenproduktivität. Dadurch trägt Palmöl in effizienter Weise zu Ressourcenschonung und Klimaschutz bei – wenn es nachhaltig produziert wird. Um genau solche Nachhaltigkeitsaspekte drehen sich, ähnlich wie bei Soja, die derzeitigen Diskussionen um Zertifizierungskriterien. Denn da Ölpalmen nur in Äquatornähe gedeihen, können Ausweitungen der Produktion nur dort stattfinden. Dadurch entsteht zwangsläufig eine Flächenkonkurrenz zu tropischen Regenwaldgebieten.

**Sojaöl** wird vor allem in den USA, Brasilien, Argentinien und China produziert. Es fällt überwiegend als Nebenprodukt in der Futtermittelherstellung an: Aus Sojabohnen wird das eiweißhaltige Sojaextraktionsschrot gewonnen und gleichzeitig das Öl mit abgepresst. Zur reinen Ölgewinnung wäre Soja nicht das Produkt erster Wahl, da der Flächenertrag im Vergleich zu anderen Ölsaaten niedrig ist. Da aber große Landflächen zur Futtermittelgewinnung mit Soja bepflanzt werden, fällt auch eine große Menge an Sojaöl an, das nach der Umesterung als Biodiesel eingesetzt wird. Der hohe Flächenbedarf für Soja führt teilweise zur Vernichtung von Savannengebieten, wie beispielsweise der Cerrado-Region in Brasilien, die eine große Artenvielfalt aufweist.

## Erdöl oder Pflanzen?



Durch die Produktion von Biodiesel aus Raps, Ölpalme, Soja und Jatropha eingesparte (oder zusätzlich emittierte) Treibhausgase pro Jahr und Hektar an verschiedenen Standorten.

Quelle: IFEU 2008

## Bioalkohol im Tank

Die Alkohole Ethanol und Methanol eignen sich sehr gut als Kraftstoffe im Verkehr, da mit ihnen schon seit langem Erfahrungen gesammelt wurden. Schon Nikolaus August Otto, nach dem der Ottomotor benannt ist, verwendete für seine Entwicklungen Ethanol als Kraftstoff. Und auch Henry Ford hatte sein berühmtes T-Modell für diesen Kraftstoff entworfen.

Reines Ethanol erfordert allerdings besondere Motoren, wie sie schon in den 1980er Jahren in Brasilien verbreitet waren oder die in sogenannten „Flexible Fuel Vehicles“ eingebaut sind. Es geht jedoch auch einfacher: Als Zumischung zu Ottokraftstoff ist Bioethanol bereits heute im Markt. Dabei kann reines Bioethanol oder nach einer weiteren chemischen Umwandlung sein Ester ETBE (Ethyl-Tertiär-Butyl-Ether) verwendet werden. Dieses kann zusätzlich den gesundheitlich umstrittenen Oktanzahlverbesserer MTBE (Methyl-Tertiär-Butyl-Ether) ersetzen und so zu einer Minderung der Luftschadstoffemissionen beitragen.

In Deutschland können alle Ottokraftstoffe bis zu fünf Volumenprozent Ethanol enthalten. Die mit „E10“ gekennzeichneten Ottokraftstoffe dürfen bis zu 10 Volumenprozent Ethanol enthalten.

Während der weltweite Biodieselmärkte in den vergangenen Jahren nur langsam gewachsen ist (beziehungsweise in Deutschland stagniert), hat Bioethanol kräftig zugelegt: von 31 Milliarden Litern im Jahr

2005 auf 86 Milliarden Liter 2010. Die USA und Brasilien decken 88 Prozent des globalen Marktes ab. In Deutschland hat sich der Bioethanolabsatz gegenüber 2008 nahezu verdoppelt. In den USA wird das Bioethanol überwiegend dem Benzin beigemischt, während in Brasilien Flex-Fuel-Fahrzeuge verbreitet sind, die man mit reinem Bioethanol oder beliebigen Gemischen aus Ethanol und Benzin betanken kann.

## Biokraftstoffe der zweiten Generation

Neben Biodiesel und Bioethanol werden heute die sogenannten „Biokraftstoffe der zweiten Generation“ entwickelt. Ziel ist es, die Bandbreite möglicher Einsatzstoffe zu erweitern, effiziente Verfahren zu entwickeln und die Produktionskosten zu senken.

Einige der Verfahren beruhen auf der Vergasung von Biomasse. Werden Holz, Stroh oder andere Biomassen nach der Vergasung in Flüssigkraftstoff umgewandelt, lässt sich die Energie der ganzen Pflanze nutzen – anders als bei der Produktion von Biodiesel aus Raps, bei der nur die Samen zu Treibstoff werden. BTL heißt der Kraftstoff in Fachkreisen, „Biomass-to-Liquid“ oder „Flüssiger Treibstoff aus Biomasse“.

Diese maßgeschneiderten Kraftstoffe haben hervorragende Verbrennungseigenschaften. Darum wartet insbesondere die Automobilindustrie auf eine Produktion in Industriemaßstäben. Leider sind die verschiedenen Herstellungsverfahren noch nicht vollständig ausgereift – und auch die Kosten sind noch



Diese Anlage vergast Biomasse und produziert daraus einen synthetischen Biokraftstoff.

nicht konkurrenzfähig. Derzeit laufen verschiedene Forschungs- und Pilotvorhaben und man muss abwarten, ob und welche Verfahren sich als praxistauglich erweisen.

Die unter Hitze und Luftabschluss vergaste Biomasse muss nicht zwangsläufig in einen Flüssigkraftstoff verwandelt werden. Man kann dieses erdgasähnliche Gas auch aufbereiten und in das Erdgas-Netz einspeisen. Außerdem lässt sich der Wasserstoff aus diesem Gas abtrennen und als Kraftstoff für Brennstoffzellen-Autos oder spezielle Wasserstoff-Verbrennungsmotoren nutzen.

Wasserstoff kann nicht nur aus Biomasse, sondern auch durch die elektrolytische Zerlegung von Wasser produziert werden (siehe Seite 68). Dies wird wegen der erforderlichen hohen Investitionen in Anlagentechnik und Infrastruktur aber erst langfristig angedacht.

Biogas, das nicht aus der Vergasung von Biomasse entsteht, sondern durch die bakterielle Vergärung von Gülle oder Mais (siehe Kapitel „Biomasse“), kann wie Erdgas in Fahrzeugen eingesetzt werden. Dazu muss es allerdings so aufbereitet werden, dass es Erdgasqualität besitzt.

Auch die Produktionsverfahren für Bioethanol werden verfeinert. Unter anderen ist ein Verfahren in der Entwicklung, das auch die Nutzung von Zellulose aus Holz und Stroh zur Kraftstoffherstellung erlaubt. Dazu werden Enzyme eingesetzt, die die Zellulosemoleküle aufbrechen. Anschließend kann die behandelte Zellulose dann vergärt werden. Dieses Verfahren ist derzeit großtechnisch noch nicht verfügbar.



Laborkontrolle von Biodiesel

An erster Stelle der Energiepflanzen-Nutzung steht ihr Anbau. Auf einem Hektar Acker können pro Jahr beispielsweise zwischen 3 bis 4 Tonnen Rapsaat geerntet werden, woraus sich etwa 1.300 bis 1.700 Liter Biodiesel gewinnen lassen. Die Fläche eines Fußballfeldes reicht also aus, um Kraftstoff für die durchschnittliche Jahresfahrleistung eines Pkws bereitzustellen. Die Rapssaat wird gepresst, raffiniert – unerwünschte Nebenprodukte werden entfernt – und bei Biodiesel auch noch chemisch verändert. Bei der Umesterung zu Biodiesel wird das große Raps-ölmolekül durch Zugabe von Methanol in jeweils drei Bruchstücke zerlegt. Dadurch entstehen nicht nur dem Dieselkraftstoff ähnliche Moleküle, sondern gleichzeitig auch der Chemierohstoff Glycerin.

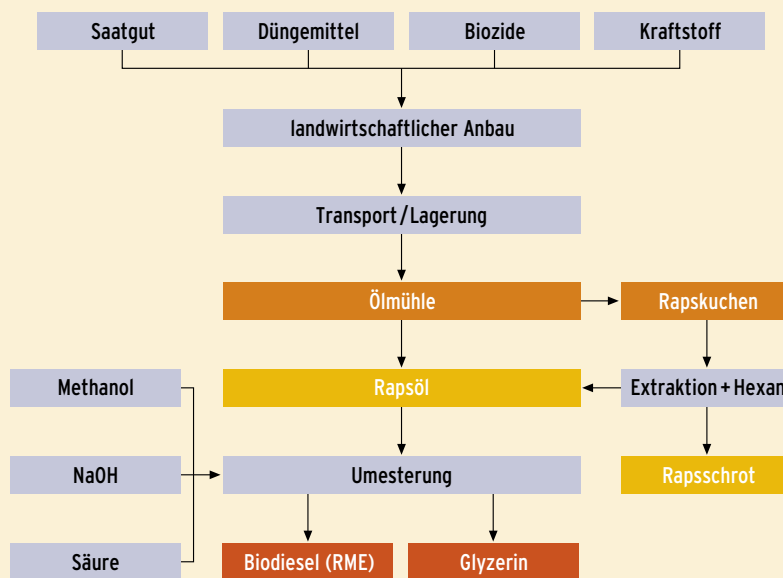
### Ökobilanz von Biokraftstoffen

Umwelt- und Ressourcenschonung sind wesentliche Bestandteile einer nachhaltigen Entwicklung. Daher muss auch für jeden neuen Kraftstoff geprüft werden, ob sein Einsatz ökologisch überhaupt sinnvoll ist. Die Ökobilanz ist eine Methode, um mögliche Umweltwirkungen im Verlauf des Lebensweges eines Produktes zu erfassen. Möglichst alle wichtigen Prozesse, die mit der Herstellung, Nutzung und Entsorgung in Verbindung stehen, müssen dabei betrachtet werden. Erstellt man Ökobilanzen der Biokraftstoffe, so sind Anbau und Aufbereitung, Verteilung und Nutzung, sowie möglicherweise entstehende Abgase bei der Verbrennung wichtige Aspekte.

Ethanol wird in Deutschland bevorzugt aus Zuckerrüben, Weizen oder Roggen gewonnen, wobei die Zuckerrübe den höchsten Flächenertrag liefert. Die Zuckerrüben werden zerkleinert und aus den Wurzelkörpern wird eine Zuckerlösung extrahiert. Bei stärkehaltigen Pflanzen muss die Stärke aus den Pflanzen gelöst und verzuckert werden. Die gewonnene zuckerhaltige Lösung wird dann mit Hefen vergoren. Schließlich wird der energiehaltige Alkohol abgetrennt.

In Deutschland beträgt die durchschnittliche Rüben-ernte etwa 62 t Rüben pro Hektar, woraus etwa 6.600 Liter Bioethanol gewonnen werden können. Betrachtet man den Energieinhalt des geernteten

### Herstellungsprozess von Biodiesel



Vom Feld zur Tankstelle: Herstellung von Biodiesel

Quelle: IFEU





Wartungsarbeiten an einer Anlage zur Herstellung von synthetischem Biokraftstoff der zweiten Generation. Beim Herstellungsverfahren wird durch das Vergasen einer Biomasse aus Holzhackschnitzeln unter Hochdruck Biodiesel gewonnen.

Ethanol, so ist der Flächenertrag fast doppelt so hoch wie bei RME.

Für den Prozess der Kraftstoffherstellung werden jedoch selber Energie und Einsatzstoffe benötigt – und hier kommt die Ökobilanz zum Zug. Ein großer Teil des Energiebedarfs beim Energiepflanzenanbau entfällt auf die Düngemittelproduktion. Auch bei der Feldarbeit mit den Landmaschinen wird Energie verbraucht. Bei der Produktion von Biodiesel hat die Umesterung vor allem durch den hohen Methanolbedarf den größten Anteil am Energiebedarf. Dennoch: Insgesamt fällt die Energie- und Klimabilanz des Biodiesels deutlich positiv aus (Grafik „Klimabilanz Bioenergieträger“). Das Ergebnis hängt allerdings davon ab, wie die Nebenprodukte, vor allem Rapsschrot und das wertvolle Glycerin, genutzt werden. Rapsschrot kann anstatt Sojaschrot als Futtermittel verwendet werden. Glycerin wird vor allem als Rohstoff in der Chemie eingesetzt, etwa zur Produktion von Kosmetik-Artikeln. Wird das heute fossil hergestellte Glycerin durch das nachwachsende ersetzt, so ergibt sich eine CO<sub>2</sub>-Gutschrift für den Biodiesel, die den Mehraufwand der Umesterung aufwiegt. Aber auch bei einer anderen Nutzung der Nebenprodukte wird durch Biodiesel unter dem Strich fossile Energie eingespart. Für Bioethanol aus Zuckerrüben, Weizen und Roggen aus Deutschland ist die errechnete Energiebilanz ebenfalls gut.

Während alle Bioenergieträger deutlich zur Schonung fossiler Ressourcen und zur Minderung von Treibhausgasen beitragen – letzteres zumindest dann,

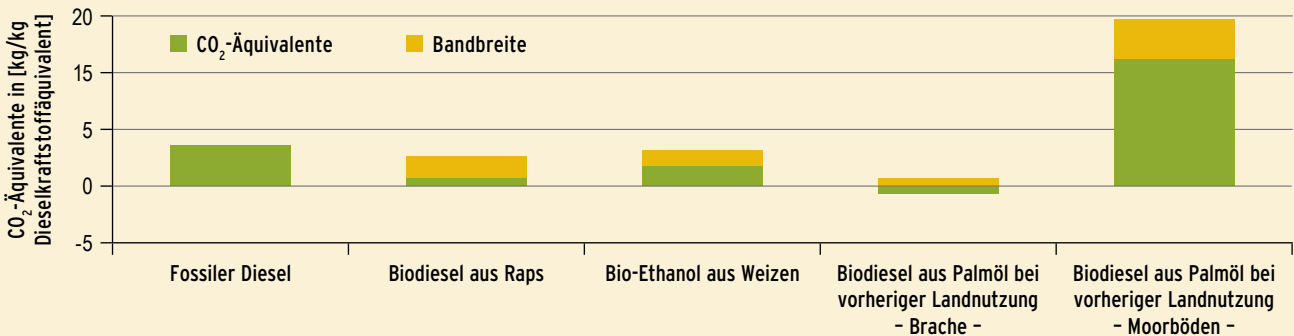
wenn keine biomassereichen Ökosysteme für den Anbau von Energiepflanzen gerodet werden – gibt es durchaus auch ökologische Nachteile von Biokraftstoffen (Tabelle „Ökobilanz Bioenergieträger“). So führt der Einsatz von Biokraftstoffen zu einer höheren Versauerung der Böden und Gewässer und zu höheren Emissionen von stickstoffhaltigen Substanzen. Wie bei der Nutzung von Biomasse als Brennstoff (Kapitel „Biomasse als Brennstoff“) ist eine Abwägung bezüglich der ökologischen Bedeutung der einzelnen Vor- und Nachteile vorzunehmen.

## Biokraftstoffe - nachhaltig genutzt

Besonders bei den importierten Biokraftstoffen und deren Rohstoffen ist eine intensive Debatte über die Nachhaltigkeit dieser Nutzung entbrannt. Mit der Erneuerbare-Energien-Richtlinie (2009/28/EG) hat die EU-Kommission rechtsverbindliche Maßstäbe für nachhaltig erzeugte Biokraftstoffe und flüssige Bioenergieträger gesetzt (siehe Kasten). Damit sind die Eckpunkte gesetzt, mit denen eine nachhaltige Produktion für den europäischen Markt definiert und gewährleistet werden soll.

Deutschland hat diese als erster EU-Mitgliedstaat mit zwei Nachhaltigkeitsverordnungen, der Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung (BioSt-NachV) und der Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung (Biokraft-NachV), umgesetzt. Darüber hinaus wurde die Umsetzung finanziell unterstützt, zum Beispiel durch Förderung begleitender Forschungsprojekte.

### Klimabilanz Biokraftstoffe



Klimabilanz ausgewählter Biokraftstoffe. Ob und um wie viel ein Biotreibstoff besser ist als fossiler Diesel, hängt stark davon ab, wie er angebaut wird und wie die Flächen vorher genutzt wurden.

Quelle: IFEU 2007

Ambitionierte Anforderungen sind gerechtfertigt. Schließlich sind gerade bei den importierten Biokraftstoffen und deren Rohstoffen die Risiken hinsichtlich Nachhaltigkeit erheblich: Wird für den Ölpalmenanbau tropischer Regenwald gerodet, werden dadurch so viele Treibhausgase freigesetzt, dass dieser Palmölbiodiesel insgesamt zu mehr Treibhausgasen führt als der Einsatz von fossilem Diesel (siehe Grafik „Klimabilanz“). Ein richtiger „Klimakiller“ ist Palmöl-Biodiesel, der von ehemaligen Torfwaldgebieten stammt, denn in den Torfböden ist viel CO<sub>2</sub> gespeichert, das durch die Entwässerung und landwirtschaftliche Nutzung freigesetzt wird. Pflanzenplantagen auf solchen Böden

führen daher zu einem Vielfachen der Treibhausgasemissionen fossiler Kraftstoffe und verschärfen so den Klimawandel. Gemäß EE-Richtlinie dürfen daher zum Anbau der Pflanzen für die Biokraftstoffherstellung ökologisch wertvolle Flächen wie Feuchtgebiete, Torfmoore oder Regenwälder nicht genutzt werden, um die biologische Vielfalt zu schützen. Biokraftstoffe können durchaus zu erheblichen Einsparungen an Treibhausgasemissionen führen, zum Beispiel wenn degradierte Flächen für einen Ölpalmenanbau nutzbar gemacht werden. Die Rekultivierung solcher unproduktiver Flächen bedarf allerdings hoher Anfangsinvestitionen. Auch muss mit geprüft werden, ob

### Ökobilanz Biokraftstoffe im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen

Vergleichsparameter	Vorteile für Bioenergieträger	Nachteile für Bioenergieträger
Ressourcenverbrauch	<ul style="list-style-type: none"> <li>Einsparung fossiler Energien</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verbrauch mineralischer Ressourcen</li> </ul>
Treibhauseffekt	<ul style="list-style-type: none"> <li>geringere Emission von Treibhausgasen</li> </ul>	
Stratosphärischer Ozonabbau		<ul style="list-style-type: none"> <li>höhere Lachgas-Emissionen</li> </ul>
Versauerung		<ul style="list-style-type: none"> <li>stärkere Versauerung</li> </ul>
Photosmog		<ul style="list-style-type: none"> <li>höheres Ozonbildungspotenzial</li> </ul>
Eutrophierung		<ul style="list-style-type: none"> <li>höhere NO<sub>x</sub>- und NH<sub>3</sub>-Emissionen</li> <li>mögliche Gefährdung der Oberflächengewässer</li> </ul>
Human- und Ökotoxizität	<ul style="list-style-type: none"> <li>geringere SO<sub>2</sub>-Emissionen</li> <li>geringere Meeresverschmutzung durch Exploration und Transport von Rohöl</li> <li>geringere Verschmutzung durch Leckagen nach Unfällen</li> <li>geringere Toxizität und bessere Bioabbaubarkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>mögliche Belastung von Oberflächengewässern durch Pestizide</li> <li>mögliche Belastung des Grundwassers durch Nitrat</li> </ul>

Quelle: IFEU

diese keine negativen Auswirkungen auf besonders wertvolle biodiverse Flächen haben. Zudem muss untersucht werden, ob diese Flächen sich tatsächlich für Energiepflanzen eignen und ob nicht andere kritische Nutzungskonkurrenzen bestehen. Es zeigt sich insgesamt: Palmölbiodiesel, aber auch Zuckerrohr-Ethanol und andere Biokraftstoffe, können ökologisch nur bewertet werden, wenn man die Bedingungen kennt, unter denen sie produziert wurden. Darum ist es notwendig, Kriterien für einen nachhaltigen Anbau von Energiepflanzen aufzustellen. Ohne sie läuft man Gefahr, das Gegenteil der angestrebten Ziele zu erreichen. Dabei müssen sich die Kriterien auf den Anbau der Nutzpflanzen beziehen, ohne deren spätere Verwendung zu beachten. Denn auch Palm- oder Sojaöl, das im Nahrungsmittel- oder Konsumbereich eingesetzt wird, sollte nachhaltig angebaut werden, sonst verlagern sich die negativen Effekte lediglich von der Biotreibstoffproduktion in den Nahrungsmittelsektor. Diese Problematik wird in der Fachwelt unter dem Begriff der indirekten Landnutzungsänderung (iLUC) diskutiert. Der Nahrungsmittelsektor wird bei Palmöl auf Dauer die dominierende Nutzung sein. Aktuell nimmt er drei Viertel

ein, nur etwa 5 Prozent des Palmöls werden energetisch genutzt, der Rest als Grundstoff für Detergentien (zum Beispiel zur Herstellung von Reinigungs- und Waschmitteln) und Kosmetika.

Werden strenge Nachhaltigkeitskriterien erfüllt und indirekte Effekte vermieden, dann können Biokraftstoffe nicht nur das Klima entlasten, sondern sind – gerade in Entwicklungsländern – auch eine Einkommenschance für den ländlichen Raum.

Die anfangs auf Biokraftstoffe konzentrierte Diskussion hat sich inzwischen auch auf die festen und gasförmigen Bioenergieträger zur Strom- und Wärmeerzeugung erweitert. Mit der zunehmenden Nutzung von Holz im Energiesektor stellt sich dort in gleicher Weise die Frage nach der nachhaltigen Erzeugung, gerade auch, weil sich hier ähnlich wie bei Pflanzenölen eine Globalisierung des Marktes abzeichnet. Bei Biogas tritt zunehmend die unter Biodiversitätsgründen problematische Ausbreitung von Maismonokulturen in manchen Regionen Deutschlands in den Fokus. Grundsätzlich gilt es, hier die gleichen Maßstäbe anzusetzen wie für die flüssigen Bioenergieträger.

### → Nachhaltigkeitskriterien in der Erneuerbare-Energien-Richtlinie

Mit der Erneuerbare-Energien-Richtlinie (2009/28/EG) müssen Biokraftstoffe und sonstige flüssige Bioenergieträger bestimmte Nachhaltigkeitskriterien erfüllen, um für Quoten- und andere Fördersysteme anrechenbar zu sein. Verbindliche Kriterien sind dabei:

- Mindestens 35 Prozent Einsparung an Treibhausgasemissionen über den Lebensweg verglichen mit fossilen Kraftstoffen (ab 2017 müssen mind. 50 Prozent eingespart werden, Neuanlagen ab 2018 sogar 60 Prozent)
- Kein Anbau der Biomasse auf Flächen, die vor 2008
  - Primärwald,
  - sonstiger Wald, biodiverses Grünland, Feuchtgebiete oder
  - Torfmoor waren
- Nachweis der guten fachlichen Praxis (gemäß Cross Compliance, für Erzeugung innerhalb der EU)
- Der Nachweis über die Herstellungskette muss über ein Massenbilanzverfahren erbracht werden (anerkanntes Zertifizierungssystem)

Ferner muss berichtet werden,

- ob und wenn ja, welche Maßnahmen zum Schutz von Boden, Wasser und Luft sowie zur Vermeidung von übermäßigem Wasserverbrauch in Gebieten mit Wasserknappheit ergriffen werden.
- ob die Erzeugerländer die ILO-Kernarbeitsnormen sowie das CITES-Abkommen und das Carthagena-Protokoll ratifiziert und umgesetzt haben.

Um die Umweltverträglichkeit von Biokraftstoffen zu gewährleisten, hat die Bundesregierung eine Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung erlassen, die seit dem 1. Januar 2011 wirksam ist. Deutschland ist europaweit damit Vorreiter bei der nationalen Umsetzung der europäischen Anforderungen. Das ist ein großer Erfolg.

Auf der globalen Ebene stellen die Global Bioenergy Partnership (GBEP) und das ISO-Projekt-Komitee 248 wichtige Foren dar, um im internationalen Kontext eine Verständigung über Klimabilanzmethodik und Nachhaltigkeitskriterien zu erzielen. Deutschland bringt sich in diese Prozesse intensiv ein.



Junge Ölpalmenplantage: Neupflanzung nach der Rodung von Naturwald

## Ein Blick in die Zukunft der Biokraftstoffe

Im Jahr 2003 hat die Europäische Kommission die Verwendung von Biokraftstoffen per Richtlinie europaweit gesetzlich verankert. Die Mitgliedstaaten wurden verpflichtet, in zwei Stufen für Mindestanteile an Biokraftstoffen im Verkehrssektor zu sorgen. Mit der neuen Erneuerbare-Energien-Richtlinie, die im Juni 2009 in Kraft getreten ist, wird das Ziel festgeschrieben, dass in den Mitgliedstaaten im Jahr 2020 10 Prozent des Energiebedarfs des Verkehrssektors aus erneuerbaren Energien stammen soll. Dies sind im Wesentlichen Biokraftstoffe, aber auch aus erneuerbaren Energieträgern erzeugter Strom für Elektroautos.

Die Bundesregierung hat angesichts der intensiven Debatte über Flächenkonkurrenzen des Biokraftstoffanbaus die ursprünglichen, äußerst ambitionierten Ziele für Biokraftstoffe zurückgenommen. Die vorrangige Ausschöpfung der Effizienzpotenziale insbesondere im Straßenverkehr – sowohl durch sparsame Fahrzeuge wie auch durch Verkehrsvermeidung und -verlagerung – ist eine unabdingbare, robuste und kosteneffiziente Voraussetzung für das Erreichen hoher Anteile alternativer Kraftstoffe am Gesamtkraftstoffbedarf wie auch für die Erreichung der Klimaschutzziele insgesamt.

Nicht nur ökologisch müssen Bioenergieträger konkurrenzfähig sein. Auch die Kosten müssen sich – zumindest auf lange Sicht – mit denen der fossilen Kraftstoffe vergleichen lassen. Es ist nicht verwunderlich, dass Biokraftstoffe derzeit teurer sind als herkömmliche Kraftstoffe. Bei Raps, Weizen oder Zuckerrüben muss die gesamte landwirtschaftliche Produktion finanziert werden – und natürlich auch alle weiterverarbeitenden Schritte. Das kann auch durch den

Erlös aus dem Verkauf der Nebenprodukte, etwa des als Futtermittel verkauften Rapsextraktionsschrotes und des Glycerins bei der Biodieselproduktion, nicht kompensiert werden.

Heute sind die Herstellungskosten daher deutlich höher als die Kosten der konventionellen Dieselherstellung. Erst durch eine Mineralöl- und Ökostuerbefreiung konnte Biodiesel auf dem Markt gegenüber dem normalen Diesel bestehen. Von Anfang 2004 bis Ende 2006 waren in Deutschland alle Biokraftstoffe – ob als Reinkraftstoffe oder als Beimischung zu fossilen Kraftstoffen – steuerbefreit, so dass auch Bioethanol, das höhere Produktionskosten als Biodiesel hat, wirtschaftlich attraktiv wurde.

Seit 2007 hat sich die Gesetzeslage geändert. Mit dem Biokraftstoffquotengesetz wurde die Mineralölwirtschaft verpflichtet, einen jährlich ansteigenden Mindestanteil an Biokraftstoffen in den Verkehr zu bringen. Diese beigemischten Biokraftstoffmengen sind in der Regel nicht mehr von der Energiesteuer befreit. Bestimmte Biokraftstoffe, beispielsweise E 85 oder BtL (Biomass-to-Liquid), sind auch weiterhin steuerbefreit, während reiner Biodiesel einem reduzierten, allmählich ansteigenden Steuersatz unterliegt.

Die Gründe für die Förderung von Biokraftstoffen sind vielfältig. Eine lebensfähige Landwirtschaft, ein Beitrag zur Sicherheit der Versorgung, die Schaffung von Arbeitsplätzen und nicht zuletzt ihr Beitrag, um unsere Verpflichtungen zur Senkung der Treibhausgasemissionen zu erfüllen. Das Potenzial allein durch eine Bewirtschaftung der stillgelegten Flächen liegt bei 1,2 Prozent bis 5 Prozent des Gesamtverbrauchs an Erdölprodukten. Jedoch sind Biokraftstoffe nicht unbedingt an die landwirtschaftliche Fläche gekoppelt. Organische Reststoffe und Abfälle wie Öle und Fette sowie holzartige Rohstoffe können ebenfalls herangezogen werden. Betrachtet man im Vergleich

## → Auf den Teller oder in den Tank?

Biomasse wird derzeit in erster Linie zur Nahrungs- und Futtermittelproduktion angebaut: Die Herstellung von Biokraftstoffen nimmt 6,4 Prozent der weltweiten Getreideproduktion in Anspruch. Trotz des vergleichsweise geringen Anteils werden Biokraftstoffe in der jüngsten Vergangenheit für steigende Nahrungsmittelpreise und die zunehmende Anzahl der Hungernden (mit)verantwortlich gemacht.

Dabei ist die Tatsache, dass weltweit mehr als 900 Millionen Menschen nicht genügend zu essen haben, in erster Linie ein Verteilungsproblem, denn eigentlich werden global betrachtet genügend Nahrungsmittel produziert. Abgesehen von den Hungernden, die tatsächlich mit Nahrungsmittelknappheit zu kämpfen haben, leiden viele Menschen in Entwicklungs- und Schwellenländern unter steigenden Nahrungsmittelpreisen, da sie einen immer größeren Teil ihres Einkommens für die Ernährung aufwenden müssen.

Die Ursachen für die steigenden Nahrungsmittelpreise wiederum sind sehr vielschichtig und nicht alleine auf die steigende Nachfrage bei Biokraftstoffen zurückzuführen. Vielmehr scheint es sich um ein Zusammenspiel aus niedrigen weltweiten Lagerbeständen, unvorhersehbar auftretenden Ernteauffällen in unterschiedlichen Regionen der Erde, vernachlässigter Entwicklung der Landwirtschaft in einigen Regionen, erhöhtem Konsum von Fleisch- und Milchprodukten in aufstrebenden Volkswirtschaften wie insbesondere in Indien und China, hohem Ölpreis und vor allem Marktspekulation zu handeln. Wie groß der Einfluss der Biokraftstoffe auf die Marktverhältnisse der Agrarprodukte letztendlich sein kann, wurde mit verschiedenen Modellen analysiert. Diese führen jedoch nicht zu eindeutigen Ergebnissen, so dass eine präzise Aussage nicht möglich ist.

dazu das prognostizierte Wachstum des Verkehrs in den nächsten Jahren, so könnten Biokraftstoffe auf jeden Fall die Mehr-Emissionen des Zuwachses auffangen, würden alle derartigen vorhandenen Rohstoffe zur Biokraftstoffproduktion herangezogen werden. Biogene Reststoffe und Energiepflanzen werden auch in anderen Sektoren und Anwendungen nachgefragt, in denen sie erheblich zur Reduktion von Treibhausgasemissionen beitragen können.

Drei Einflussfaktoren bestimmen die Wirtschaftlichkeit in hohem Maße: die Rohstoffkosten, die erzielbaren Preise für Nebenprodukte und der Erdölpreis. Einerseits lässt sich über die Zeit durch Züchtungserfolge der Ertrag von Energiepflanzen steigern und dadurch die Rohstoffkosten senken. Andererseits ist es in der Vergangenheit zu einer drastischen Verteuerung des Energieträgers Rohöl gekommen. Dieser Trend wird sich aufgrund der begrenzten Ressourcen langfristig fortsetzen. Beide Effekte, zusammen mit der wachsenden Erfahrung bei der Herstellung von Biokraftstoffen, tragen dazu bei, die Wirtschaftlichkeit für die Bereitstellung von Biokraftstoffen zu erhöhen.

Andererseits können hohe politische Zielvorgaben, wie etwa das Ziel der EU, im Jahr 2020 einen 10%igen Anteil erneuerbarer Energieträger im Verkehr zu erreichen, zu einer unmittelbaren Verbindung zwischen Energiepreisen und Preisen für Agrarrohstoffe führen. In diesem Fall ist zu erwarten, dass sich der oben skizzierte langfristige Trend hin zu günstigeren

Preisen für Agrarrohstoffe abschwächt oder sogar umgekehrt. Verbraucher müssten dann eventuell auf lange Sicht mit steigenden Preisen für Nahrungsmittel rechnen.

Langfristig könnte sich auf nationaler Ebene die Flächensituation in Deutschland aufgrund steigender spezifischer Erträge in der Landwirtschaft und sinkender Bevölkerungszahlen entspannen. Weltweit wächst die Bevölkerung jedoch jährlich um rund 80 Millionen Menschen. Der Deutsche Agrarbericht weist daher darauf hin, dass „weltweit in erheblichem Umfang nutzbare Flächen für die Erzeugung von Nahrungsmitteln und Agrarrohstoffen verloren gehen. Die Ursachen dafür sind unter anderem Bebauung, Versiegelung, Erosion und Versalzung, nicht angepasste Bodennutzungsformen und Ausdehnung der Wüsten.“

### → Infos zu Biokraftstoffen und Nachhaltigkeitskriterien

- Bundesumweltministerium: [www.bmu.de/biokraftstoffe](http://www.bmu.de/biokraftstoffe)
- Bio-Kraftstoff-Portal der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe: [www.bio-kraftstoffe.info](http://www.bio-kraftstoffe.info)
- Bundesverband Biogene und Regenerative Kraft- und Treibstoffe e. V.: [www.biokraftstoffe.org](http://www.biokraftstoffe.org)

# WASSERKRAFT - BEWÄHRT UND AKTUELL

## → Die Fakten

- Seit Jahrtausenden wird die Wasserkraft zur Energiegewinnung genutzt.
- In Deutschland sind 7.700 Anlagen in Betrieb und haben einen Anteil von 3,4 Prozent an der gesamten Stromerzeugung. Weltweit beläuft sich der Anteil auf 16 Prozent.
- Die Stromgestehungskosten betragen heute bei großen Anlagen 3 bis 10 Ct/kWh, bei Kleinwasserkraftwerken 11 bis 27 Ct/kWh.
- Mit der Förderung der Wasserkraft durch das EEG können bestehende Anlagen saniert und ausgebaut sowie an bestehenden Querbauwerken Neubauten umgesetzt werden. Für Neuanlagen setzt die EEG-Förderung künftig voraus, dass die Anforderungen des Wasserhaushaltsgesetzes an die Mindestwasserführung, die Gewässerdurchgängigkeit und den Fischschutz erfüllt werden.



Pumpspeicherkraftwerk Goldisthal, Laufwasserkraftwerk, Kraftübertragung von der Turbine auf den Generator

Etwa ein Viertel der von der Sonne eingestrahelten Energie treibt durch Verdunstung den globalen Wasserkreislauf an. Nach dem Aufsteigen der feuchten und warmen Luft bilden sich Wolken, die über Land und Meer abregnen. Wasserkraftwerke nutzen die Bewegungs- und Lageenergie des Wassers, das ins Meer abfließt.

Wasserkraft wurde schon in vorindustrieller Zeit zum Antrieb von Mühlen, Säge- und Hammerwerken genutzt. Die Energie des Wassers wird über ein Turbinenrad in Rotationsenergie umgewandelt und zum Antrieb von Maschinen oder Generatoren genutzt. Heute wird mit Wasserkraft in Deutschland fast ausschließlich elektrischer Strom erzeugt.

Wasserkraftanlagen sind eine ausgereifte Technologie, mit der weltweit nach der traditionellen Nutzung von Biomasse der höchste Anteil der erneuerbaren Energie erzeugt wird. Aus Wasserkraftwerken

stammen 16 Prozent des global erzeugten Stroms. In Deutschland liegt die Wasserkraft hinter der Windenergie auf Rang zwei und stellte 2010 mit 20,6 TWh Strom 3,4 Prozent des Stroms bereit.

Fast 90 Prozent des Wasserkraftstroms wird in Bayern und Baden-Württemberg erzeugt, da hier ergiebige Niederschläge und ein hohes Gefälle in den Mittelgebirgen und im Alpenvorland für günstige Verhältnisse sorgen. In Deutschland werden heute rund 7.300 Kleinanlagen mit einer Leistung unter 1 MW betrieben, die sich vor allem in der Hand von kleinen Unternehmen und Privatpersonen befinden. Der Beitrag dieser Anlagen zur Stromerzeugung ist relativ gering. Mehr als 90 Prozent des Stroms aus Wasserkraft wird in den etwa 350 Wasserkraftanlagen mit einer Leistung von mehr als 1 MW erzeugt, die in erster Linie von Energieunternehmen betrieben werden. Insgesamt beträgt die installierte Leistung an Wasserkraftwerken in Deutschland 4.780 Megawatt.

## Turbinen

Für die Nutzung der Wasserkraft gibt es unterschiedliche Turbinen, die je nach durchfließender Wassermenge und Fallhöhe verschiedene Einsatzbereiche haben.

Die **Kaplanturbine** funktioniert ähnlich wie eine Schiffsschraube, bei der die Achse vertikal gelagert ist. Die Laufradflügel und der sogenannte Leitapparat sind verstellbar und können optimal an die Strömungsverhältnisse angepasst werden. Das Wasser strömt entlang der Achse durch das Laufrad. Eine Sonderform der Kaplanturbine ist die **Rohrturbine**, bei der die Drehachse horizontal gelagert ist. Kaplan- und Rohrturbinen werden bei geringen Fallhöhen und großen Volumenströmen eingesetzt und sind gut für schwankende Wassermengen geeignet. Bei den großen Laufwasserkraftwerken in Deutschland mit geringen Fallhöhen von sechs bis 15 Metern sind sie die häufigste Turbinenart.

Die konventionelle **Francisturbine** ist eine der ältesten Turbinenarten und wird nach wie vor hauptsächlich im Bereich der Kleinwasserkraftwerke angewendet. Typisch ist das schneckenförmige Gehäuse. Sie



Prüfung einer im Bau befindlichen Turbinenanlage. Durch dieses Schneckenrohr drückt das Wasser später auf die Turbinenschaufeln.

wird bei geringen Fallhöhen und mittleren Wassermengen eingesetzt. Bei dieser Turbine ist nur der Leitapparat verstellbar. Das Wasser strömt radial in das Laufrad hinein und verlässt es entlang der Drehachse.

Die **Peltonurbine** ist für große Fallhöhen und kleine Wassermengen geeignet. Das Wasser wird hinter einer Druckleitung mit hoher Geschwindigkeit über Düsen auf die Schaufeln der Turbine gespritzt.

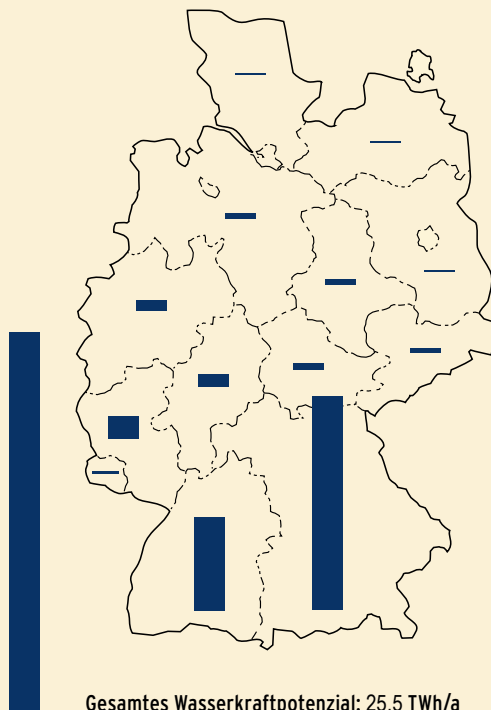
**Durchströmturbinen** werden für kleine Fallhöhen und Wassermengen genutzt. Das Wasser strömt tangential durch das Laufrad hindurch.

Für geringe Fallhöhen und kleine Leistungen können auch **Wasserkraftschnecken** eingesetzt werden. Diese arbeiten nach dem Prinzip der Archimedischen Schraube und erreichen im Vergleich zu den anderen Turbinen auch bei niedrigem Wasserstand hohe Wirkungsgrade selbst dann, wenn sie nicht voll ausgelastet sind. Die Wasserkraftschnecke zeichnet sich durch geringe Bauwerkskosten und hohe Fischverträglichkeit in Abstiegsrichtung aus. Sie stellt eine Ersatzmöglichkeit für kleine sanierungsbedürftige Turbinen- oder Wasserradanlagen dar.

## Kraftwerke

**Speicherkraftwerke** nutzen die hohe Lage des Wassers und die Speicherkapazität von Talsperren und Bergseen zur Stromerzeugung. Beim Talsperrenkraftwerk werden üblicherweise Kaplan- oder Francisturbinen eingesetzt, die sich am Fuß der Staumauer befinden. Beim Bergspeicherkraftwerk wird ein in

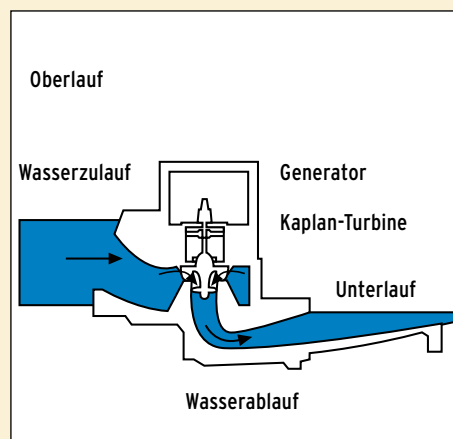
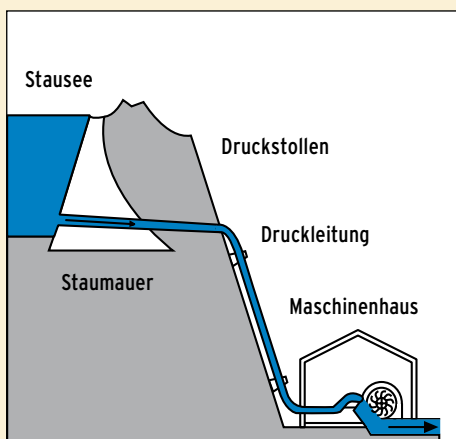
### Wasserkraftpotenziale



Wasserkraftpotenziale in der Bundesrepublik Deutschland

Quelle: Universität Stuttgart

## Speicherkraftwerk und Laufwasserkraftwerk



Prinzip eines Talsperren-Speicherkraftwerks und eines Laufwasserkraftwerks

der Höhe liegender See über Druckrohrleitungen mit dem Kraftwerk im Tal verbunden. Wegen der großen Fallhöhe werden meistens Pelton-turbinen eingesetzt. Speicherkraftwerke können sowohl zur Deckung der elektrischen Grundlast als auch im Spitzenlastbetrieb eingesetzt werden. Pumpspeicherkraftwerke werden nicht durch natürliche Wasservorkommen, sondern durch aus dem Tal heraufgepumptes Wasser aufgefüllt. Damit wird in Schwachlastzeiten – etwa nachts – erzeugter elektrischer Strom zwischengespeichert und kann in Spitzenlastzeiten tagsüber wieder über eine Turbine abgerufen werden (siehe Seite 65).

**Laufwasserkraftwerke** nutzen die Strömung eines Flusses oder Kanals zur Stromerzeugung. Charakteristisch ist eine niedrige Fallhöhe bei relativ großer, oft jahreszeitlich schwankender Wassermenge. Die Anlagen werden aus wirtschaftlichen Gründen oft in Verbindung mit Schleusen gebaut. Bei Laufwasserkraftwerken kommen hauptsächlich Kaplan-, Rohr-, und Durchströmturbinen zum Einsatz.

## Potenziale und Kosten

Die Potenziale der Wasserkraft sind in Deutschland weitgehend erschlossen. Darum liegt der Fokus heute auf der Modernisierung großer Laufwasserkraftwerke, auf der Modernisierung und Reaktivierung bestehender Anlagen und dem Neubau an bestehenden Querbauwerken. Verschiedene Studien schätzen das auch unter ökologischen Vorbehalten heute verfügbare Ausbaupotenzial übereinstimmend auf rund 5 TWh/a. Die Vergütung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) ermöglicht für einen Großteil der



Turbinenhalle in einem Wasserkraftwerk in Bergisch-Gladbach

Vorhaben einen wirtschaftlich sinnvollen Betrieb und bei Modernisierung oder Erweiterung bestehender Anlagen zugleich eine Verbesserung der gewässer-ökologischen Situation.

Wasserkraftanlagen gelten als technisch ausgereift und lassen keine große Kostensenkung mehr erwarten. Die Kosten einer Wasserkraftanlage werden ganz wesentlich von der installierten Leistung und den örtlichen Randbedingungen wie der Fallhöhe bestimmt. Neue Kleinwasserkraftanlagen zwischen 70 und 1.000 kW Leistung kosten zwischen 8.500 und 10.000 Euro je Kilowatt installierter Leistung. Bei einer typischen Auslastung von 4.000 bis 5.000 Volllaststunden pro Jahr liegen die Stromgestehungskosten einer solchen Anlage zwischen 10 und



20 Ct/kWh. Bei Kleinanlagen unter 100 kW können die für einen wirtschaftlichen Betrieb erforderlichen Stromgestehungskosten teilweise deutlich darüber liegen. Aufgrund der Kostendegression liegen die spezifischen Investitionskosten bei Großanlagen (10 bis 100 MW) zwischen 2.000 und 4.000 Euro/kW, so dass Stromerzeugungskosten in Höhe von 4,5 bis 10 Ct/kWh realisiert werden können. Bei Reaktivierung oder Modernisierung bestehender Anlagen können Stromerzeugungskosten von 2,5 bis 7 Ct/kWh erreicht werden.

## Ökologisch verträglicher Ausbau und Modernisierung

Die Nutzung der Wasserkraft kann mit erheblichen Eingriffen in Natur und Landschaft verbunden sein. Will man die noch vorhandenen Potenziale erschließen, muss man vor allem auch den Natur- und Gewässerschutz berücksichtigen. Das bedeutet auch, dass nicht nur geringfügige Auswirkungen so weit wie möglich auszugleichen sind. Für neue Wasserkraftanlagen setzt die EEG-Vergütung künftig voraus, dass die Anforderungen des Wasserhaushaltsgesetzes an die Mindestwasserführung, die Gewässerdurchgängigkeit und den Fischschutz eingehalten werden. Neue Laufwasserkraftwerke erhalten nur eine Ver-

gütung, wenn sie an einer bereits bestehenden Stau- oder Wehrstufe oder ohne durchgehende Querverbauung errichtet werden.

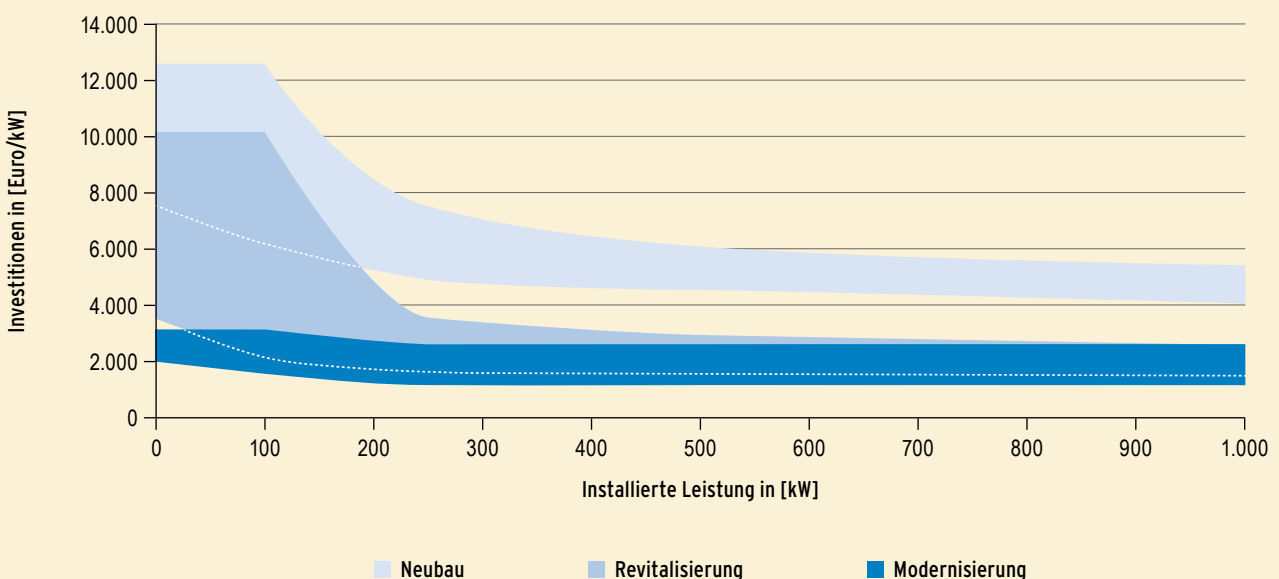
Diese Vorgabe steht der Erschließung neuer Wasserkraftpotenziale nicht entgegen. Durch ökologisch wirksame Gestaltungs- und Kompensationsmaßnahmen wie Fischauf- und -abstiegshilfen, die Verbesserung der Strukturvielfalt im Stauraum des Kraftwerks etwa durch Schotterbänke, die Umgestaltung der Flussufer oder eine angepasste Mindestwasserregulierung kann der ökologische Zustand des Gewässers gezielt verbessert werden. Natürliche Lösungen wie Bäche, welche die Wasserkraftanlage umlaufen, erleichtern dabei die Wanderung von Fischen und anderen Kleinlebewesen. Die Strömungsgeschwindigkeiten können von Steinen oder Büscheln aus Plastikborsten vermindert werden und geben den Fischen Ruhe und Versteckmöglichkeiten.

### → Infos zur Wasserkraft

→ Bundesverband Wasserkraft: [www.wasserkraft.org](http://www.wasserkraft.org)

→ Leitfaden des Bundesumweltministeriums für Errichtung und Betrieb von Wasserkraftanlagen unter [www.erneuerbare-energien.de](http://www.erneuerbare-energien.de)

## Investitionskosten für Kleinwasserkraftwerke



Investitionskosten von neuen, revitalisierten und modernisierten Kleinwasserkraftwerken als Funktion der installierten Leistung

Quelle: IÖW/ISET

# STROM AUS DEM MEER

## → Die Fakten

- Wellen, Brandung, Gezeitenströmungen, Tidenhub und Temperaturunterschiede der Ozeane lassen sich zur Stromerzeugung nutzen.
- Während in Deutschland Meeresenergie absehbar eine Nischenposition einnehmen wird, können strömungs-, gezeiten- und wellenreiche Regionen langfristig große Potenziale erschließen. Das technische Potenzial allein für ozeanthermische Energie wird auf 44.000 TWh pro Jahr geschätzt. Zum Vergleich: Der deutsche Stromverbrauch lag 2010 bei 604 TWh.
- Die Nutzung der Meeresenergie ist technisch anspruchsvoll, besonders hinsichtlich der Anbindung der Anlagen an das Stromnetz, der mechanischen Beanspruchung der Kraftwerke und der Wartung der Anlagen unter erschwerten Bedingungen. Das Spektrum der heute zahlreichen verschiedenen Projekte ist groß, denn größtenteils haben sich noch keine Leittechnologien durchgesetzt.



Gezeitenkraftwerk, Strömungskraftwerk SeaFlow und Wells-Turbine für OWC-Kraftwerke

Das Meer ist eine riesige und unerschöpfliche Energiequelle, und der Mensch kann Wellen, Tidenhub und Strömung zur Stromerzeugung nutzen. Denn die Ozeane sind unser globaler Wärmepuffer und nehmen Sonnenenergie auf, speichern und transportieren die Wärme mit der Meeresströmung quer über den Globus, um sie in kühleren Regionen wieder abzugeben. Das Potenzial der Bewegungsenergie, Lageenergie und Wärmeenergie ist gewaltig: Allein die Wellen und Gezeitenströmungen könnten theoretisch den weltweiten Strombedarf decken.

So unterschiedlich wie die Energiequellen des Meeres und ihre Ursachen sind, so unterschiedlich sind auch die Methoden der Nutzung. Der momentane Entwicklungsstand bei den verschiedenen Techniken reicht von der reinen Forschung und Entwicklung über die Prototypen-Reife bis hin zur Demonstration erster kommerziell genutzter Anlagen. Eine Ausnahme sind die Tidenhubkraftwerke. Sie sind bereits technisch voll ausgereift.

## Wellenkraftwerke

Meereswellen entstehen vor allem durch den Einfluss des Windes, sie sind also eine Art gespeicherte Windenergie. Eine Welle besteht aus kinetischer Energie, also bewegten Wasserteilchen, und aus Lageenergie, sichtbar an der Hebung und Senkung des Wassers von Wellenkamm zu Wellental. Die Leistung, die in einer großen Welle steckt, kann bis zu 50 Kilowatt pro Meter Wellenfront betragen.

So wie sich global die Windverhältnisse stark unterscheiden, ist auch die Wellenenergie rund um die Welt sehr unterschiedlich hoch und ungleichmäßig nutzbar. Gute Bedingungen finden sich vor allem in den sogenannten Westwindgürteln zwischen 40 und 60 Grad nördlicher und südlicher Breite, in denen der Wind über lange Strecken ungestört über das Meer weht. Deshalb eignen sich in Europa die Westküsten des Atlantiks und der Nordsee am besten zur Nutzung der Wellenenergie. Die kinetische Energie



OWC-Kraftwerk mit Wells-Turbine

und die Lageenergie der Welle lassen sich gleichermaßen zur Stromerzeugung nutzen. Dazu gibt es eine Vielzahl methodisch unterschiedlicher Projekte. Zwar sind die meisten Meeresenergie-Kraftwerke direkt an der Küste oder in Küstennähe angesiedelt, Strom lässt sich aber auch im offenen Meer erzeugen.

### OWC (Oscillating Water Column)

In einem teilweise getauchten Hohlkörper führt die Hebebewegung des Wassers zu einem abwechselnden Zusammenpressen und Entspannen der Luft und damit zu einer sich hin und her bewegenden Luftströmung. Diese wird mit Hilfe von speziellen Turbinen, sogenannten Wellsturbinen, zur Stromerzeugung genutzt. Im Sommer 2011 ging im spanischen Mutriku ein OWC-Kraftwerk mit 16 Wellsturbinen und einer Gesamtleistung von 300 kW in den kommerziellen Betrieb. Es liefert Strom für 250 Haushalte.

### Überflutungsapparate (Overtopping Devices)

Der obere Teil der Wellen fließt in ein erhöhtes Reservoir. Die Lageenergie des Wassers wird dann mit Hilfe von Turbinen zur Stromerzeugung genutzt. Ein Beispiel: Der Wave Dragon, dessen Prototyp als Modell



Überflutungs-Kraftwerk

in Dänemark seit 2003 Strom produziert, wird eine elektrische Leistung von 7 MW haben – und damit ähnlich viel wie die geplanten Offshore-Windräder.

### Hebeapparate (Heaving Devices)

Die vertikale Wasserbewegung der Welle wird über eine Boje mit Hilfe von mechanischen oder hydraulischen Systemen übertragen und durch einen am Meeresgrund befestigten Lineargenerator in elektrische Energie umgewandelt. Eine Anlage leistet zwischen 10 und 50 kW. Seit 2009 werden zwei Prototypen in den Gewässern Norwegens betrieben.

### Schwimmkörper (Pitching Devices)

Mehrere miteinander verbundene Schwimmkörper werden durch die Wellenbewegung gegeneinander bewegt. Diese Bewegung wird mit speziellen, flüssigkeitsgetriebenen Generatoren zur Stromgewinnung genutzt. Diese Anlagen werden zum Teil schon seit Ende der 1990er Jahre optimiert. Erste Anlagenparks mit einer Gesamtleistung von mehreren MW wurden bereits in Schottland und Portugal installiert. Brandungskraftwerke (Surging Devices) nutzen die horizontale Bewegung der Welle, um einen Pumpeffekt zu erhalten. Dieser wird mit Hilfe von Generatoren zur Stromerzeugung genutzt.



Schwimmkörper-Kraftwerk



Strömungskraftwerk „SeaGen“ an der schottischen Küste

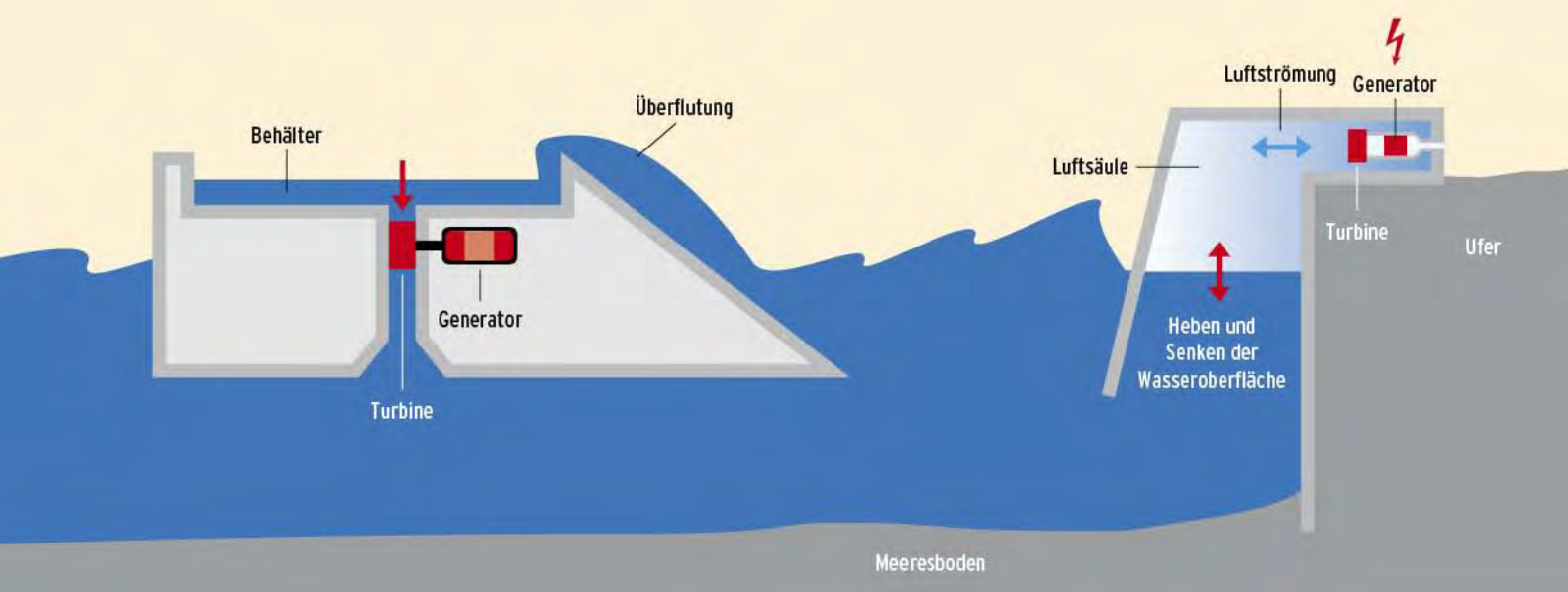
## Strömungskraftwerke

Ähnlich wie bei Wellen gibt es auch für die Entstehung von Meeresströmungen ganz verschiedene Ursachen: Wind, Gezeiten oder wie beim Golfstrom ein Dichteunterschied aufgrund unterschiedlicher Wassertemperatur und verschiedenem Salzgehalt. Mit Strömungskraftwerken wird aus der Wasserbewegung mit Rotoren Strom erzeugt, sie ähneln Windkraftanlagen, stehen aber unter Wasser. Die intensiven Bemühungen im Bereich der Windkraft kommen auch der Entwicklung von Strömungskraftwerken zugute.

Strömungskraftwerke funktionieren schon bei sehr langsamen Strömungsgeschwindigkeiten, denn Wasser hat eine viel höhere Dichte als Luft und transportiert dementsprechend mehr Bewegungsenergie. In Küstengebieten ist die Morphologie der Küste und des Meeresbodens von großer Bedeutung. Gerade bei trichterähnlichen Geländeformen wie Meerengen oder Bereichen zwischen Inseln sind oft sehr hohe Strömungsgeschwindigkeiten anzutreffen.

Die unter Wasser liegenden Strömungskraftwerke brauchen wenig Fläche und haben nur geringe

## Wellenkraftwerke (1)



Links Überflutungskraftwerk, rechts OWC-Kraftwerk

Umweltauswirkungen. Durch die langsame Rotation mit rund 15 Umdrehungen pro Minute dürften die Effekte auf Lebewesen und den Meeresboden (Sedimenttransport) begrenzt sein. Die Langzeitwirkungen werden derzeit erforscht.

Mit dem vom Bundesumweltministerium geförderten Projekt „Seaflo“ hat 2003 ein internationaler Verbund aus Wirtschafts- und Forschungsunternehmen die weltweit erste Meeresströmungsturbine in Betrieb genommen. Seitdem wird an dem Prototyp mit 300 kW Leistung geforscht. Mit „SeaGen“ startete 2008 eine Folgeanlage den kommerziellen Betrieb. Diese Doppelrotorturbine mit einer Leistung von 1,2 MW wird zurzeit weiter erforscht. Auch eine Open-Centre-Turbine mit 1 MW Leistung läuft seit 2009 im kommerziellen Betrieb. Insgesamt wird momentan weltweit an etwa 50 verschiedenen technologischen Ansätzen gearbeitet.

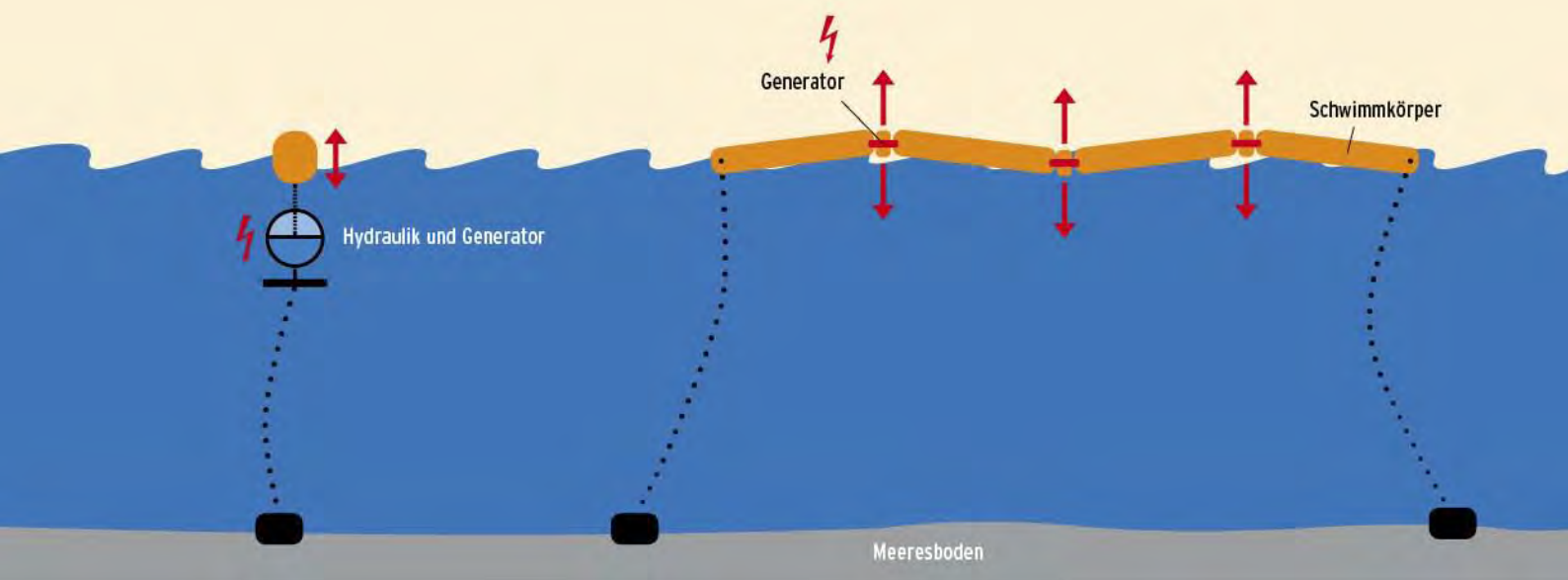
## Tidenhub-Kraftwerke

Die unterschiedlichen Wasserstände der Tiden werden durch die wechselnden Anziehungskräfte von Sonne und Mond erzeugt. Den Wechsel zwischen Hoch- und Niedrigwasser kann man zur Stromerzeugung nutzen. Die Technik ist vergleichbar mit traditionellen Wasserkraftwerken in Staudämmen: An

geeigneter Stelle wird ein Damm zwischen Land und Meer gebaut, in den Tore mit Turbinen eingesetzt werden. Bei einem ausreichenden Unterschied der Wasserhöhe des Meeres und dem Bereich innerhalb des Damms werden die Tore geöffnet. Das zum niedrigeren Punkt fließende Wasser treibt die Turbinen an.

In La Rance (Frankreich) arbeitet ein Gezeitenkraftwerk mit 240 MW seit 1966 erfolgreich, andere günstige Standorte mit einem Tidenhub von bis zu zehn Metern finden sich in Großbritannien. An der deutschen Nordseeküste beträgt der Tidenhub lediglich drei Meter. Weltweit gibt es schätzungsweise rund 100 geeignete Standorte. Problematisch für deren Nutzung sind die Beeinträchtigungen der Flora und Fauna, aber auch der Schifffahrt, die sich durch die Absperrung von Meeresarmen oder Flüssen ergeben. Dass auch unter Berücksichtigung dieser Aspekte neue Tidenhub-Kraftwerke sinnvoll sein können, zeigt das Shiwa-Lake-Kraftwerk (Korea). 2011 nimmt es seinen Betrieb mit 254 MW Leistung auf. Der in den 1990er Jahren vom Meer fast vollständig künstlich abgetrennte See leidet seither an sich im Wasser konzentrierenden Umweltgiften und der „Versüßung“ des Salzwassers zu sogenanntem Brackwasser. Das Kraftwerk, welches hier Abhilfe schaffen soll, wird unter anderem aus ökologischen Gründen nur bei in den See einströmender Tide aktiv sein.

## Wellenkraftwerke (2)



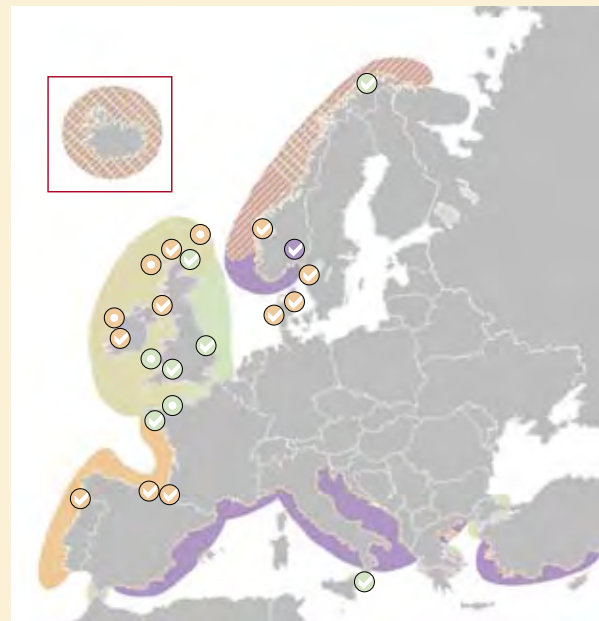
Links Hebeapparat, rechts Schwimmkörper-Kraftwerk

## Thermische Nutzung (OTEC)

Die Ozeanoberfläche erwärmt sich durch Sonneneinstrahlung, in größeren Tiefen bleibt die Wassertemperatur jedoch ganzjährig und unabhängig vom Wetter konstant. Wenn der Temperaturunterschied mindestens 18 bis 20 Grad Celsius beträgt, kann diese Differenz mit Hilfe von Wärmetauschern zur Stromerzeugung genutzt werden, indem geeignete Flüssigkeiten verdampft werden und dieser Dampf dann Turbinen antreibt. Insbesondere die USA forschen an solchen OTEC-Kraftwerken (Ocean Thermal Energy Conversion). Die OTEC-Kraftwerke sind noch in einem relativ frühen Entwicklungsstadium. Zurzeit wird an Lösungen für verschiedene technische Probleme gearbeitet.

In den Tropen und Subtropen ist der Wärmeunterschied zwischen Oberflächen- und Tiefenwasser am größten. OTEC könnte daher in Zukunft rund um den Äquator, zwischen dem südlichen und dem nördlichen 35. Breitengrad, zur Geltung kommen. Vor allem für die Energieversorgung von äquatornahen Inseln bieten sich Meeresthermoelektrische Kraftwerke an. In Deutschland besteht kein Potenzial, da sich auch im Sommer kein ausreichender Temperaturunterschied aufbaut.

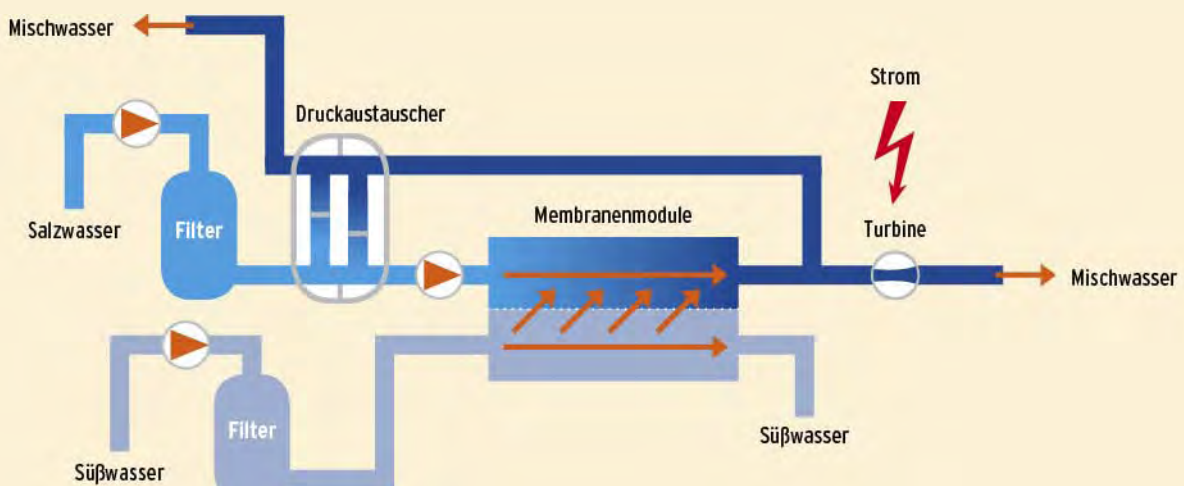
## Potenzialkarte: Meeresenergie in Europa



- |   |  |
|---|--|
| ○ Wellenkraftwerke realisierte Anlagen    | ○ Wellenkraftwerke geplante Anlagen    |
| ○ Strömungskraftwerke realisierte Anlagen | ○ Strömungskraftwerke geplante Anlagen |
| ○ Osmose-Kraftwerke realisierte Anlagen   | ○ Osmose-Kraftwerke geplante Anlagen   |

Quelle: Zentrum für Innovative Energiesysteme

## Prinzip eines Osmose-Kraftwerks



Osmose-Kraftwerke nutzen Konzentrationsunterschiede zwischen Salz- und Süßwasser zur Stromerzeugung.



## Osmose-Kraftwerke

Wird Süßwasser mit Salzwasser über eine halbdurchlässige Membran in Kontakt gebracht, strömt Wasser von der Süßwasserseite auf die Salzwasserseite, um den Konzentrationsunterschied an Salz auszugleichen. Dadurch wird ein Druckunterschied aufgebaut. Diese Druckdifferenz kann man beispielsweise mittels Turbinen nutzen. Damit ist ein solches Osmose-Kraftwerk gewissermaßen die Umkehrung einer Meerwasser-Entsalzung, bei der Energie aufgewendet wird, um Salz- und Süßwasser voneinander zu trennen. In einem weiteren Verfahren wird nicht der osmotische Druck, sondern das unterschiedliche chemische Potenzial von Salz- und Süßwasser genutzt.

Osmose-Kraftwerke sind noch in einem frühen Entwicklungsstadium. Ende 2009 wurde in Norwegen das erste Pilot-Kraftwerk eingeweiht – mit zwei bis vier kW Leistung. Die große technische Herausforderung liegt darin, Membranen zu entwickeln, die kostengünstig und langlebig sind und zugleich gut durchlässig für Wasser und undurchlässig für Salze.

## Stand und Potenziale

Die Nutzung der Meeresenergie hat das Potenzial, mittel- bis langfristig einen bedeutenden Beitrag zur globalen Energieversorgung zu leisten und die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern zu reduzieren. Als in weiten Teilen sehr junger Technologie-Zweig unter den erneuerbaren Energien besteht zum einen ein hohes Lern- und Entwicklungspotenzial. Zum an-

deren existieren naturgemäß große Unsicherheiten, wie bald die verschiedenen Technologien zu wettbewerbsfähigen Preisen zur Verfügung stehen können. Die schon heute voll ausgereifte Technologie der Tidenhub-Kraftwerke produziert dabei schon heute kostendeckend mit Gestehungskosten zwischen 9 und 23 Ct/kWh. Die verschiedenen Langzeitprognosen erwarten im Jahr 2050 eine Stromproduktion aus Meeresenergie zwischen 25 und bis zu 1.943 TWh pro Jahr.

Aktuell sind insgesamt über 100 verschiedene Technologie-Ansätze in über 30 Ländern in der Entwicklung. Die Entwicklungskosten werden zurzeit vor allem von staatlichen Trägern und teilweise auch von großen Energieunternehmen und Kapitalgesellschaften getragen. Forschung und Entwicklung wird zunehmend in gebündelten Meeresenergie-Testzentren durchgeführt. Das „European Marine Energy Centre“ beispielsweise liegt nördlich von Schottland. Langfristig werden Stromgestehungskosten zwischen 5 und 10 Cent pro kWh angestrebt. Das größte Innovationspotenzial liegt dabei derzeit bei den Strömungs- und Wellenkraftwerken.

Die Nutzung der Meeresenergie birgt große technische Herausforderungen. Ein Problem ist die Anbindung von Anlagen vor der Küste oder im offenen Meer an das Stromnetz. Darüber hinaus unterliegen die Anlagen starker mechanischer Beanspruchung und Korrosion. Die Wartung insbesondere der sich unter Wasser befindenden Teile ist schwierig. Es kann hier allerdings auch stark auf technische Lösungen aus anderen marinen Industrien, neben der jungen Offshore-Windkraft vor allem aus der marinen Öl- und Gasförderung, zurückgegriffen werden.

In deutschen Gewässern kann für Wellenkraftwerke und Strömungskraftwerke zwar in Zukunft durchaus ein Markt entstehen. Meeresenergie wird dabei aber, bezogen auf den Strommix, absehbar auch langfristig eine Nischenposition einnehmen. Die Exportchancen für deutsche Unternehmen des Anlagen- und Maschinenbaus sind allerdings hervorragend.

### → Infos zu Meeresenergie

- Das „European Marine Energy Centre“:  
<http://www.emec.org.uk/>
- Meeresenergie-Seite des Fraunhofer Instituts für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES):  
<http://www.iset.uni-kassel.de/oceanenergy/>

# GEOTHERMIE UND WÄRMEPUMPE – DIE ENERGIE AUS DEM ERDINNEREN UND AUS DER UMWELT

## → Die Fakten

- Erdwärme ist eine nach menschlichen Maßstäben unerschöpfliche Energiequelle.
- Die Entwicklung von Kraft- und Heizwerken auf Erdwärmebasis nimmt nur zögernd an Fahrt auf.
- Die erste Tiefengeothermieanlage Europas zur Stromerzeugung nach dem Hot-Dry-Rock-Verfahren ging 2008 in Betrieb und soll eine Leistung von drei Megawatt erreichen. Hierzu waren bis zu 5.000 Meter tiefe Bohrungen erforderlich.
- Wärmepumpen nutzen das geringe Temperaturniveau oberflächennaher Geothermie und Umweltwärme. Effizient und gut geplant können sie Wärme umweltschonender bereitstellen als herkömmliche Heiztechnik.
- Das Temperaturniveau von Erdwärmeanlagen eignet sich neben der Stromproduktion in erster Linie zur Gebäude- und Wassererwärmung. Die Wärme muss über Nahwärmenetze verteilt werden.



Wärmepumpe, Turbinenanlage in einem Geothermiekraftwerk, hydrothermale Geothermie

Geothermie – auch Erdwärme genannt – ist die Wärme, die vom schmelzflüssigen Kern im Erdinneren an die Erdoberfläche dringt. Die Energie aus dem Erdkern erhitzt auf ihrem Weg nach oben sowohl Gesteins- und Erdschichten als auch unterirdische Wasserreservoirs. An manchen Stellen dringen heißes Wasser und Dampf als heiße Quelle oder Geysir bis an die Erdoberfläche.

Je tiefer man in das Innere der Erde vordringt, umso wärmer wird es. In Mitteleuropa nimmt die Temperatur im Mittel um 3 °C pro 100 m Tiefe zu. Im obersten Erdmantel – 40 bis 400 Kilometer unter der Oberfläche – herrschen Temperaturen von etwa 1.300 °C. Im Erdkern – etwa 5.100 bis 6.370 km tief – sind es wahrscheinlich 5.000 °C.

Aus den Tiefen unseres Planeten steigt täglich ein Mehrfaches des weltweiten Energiebedarfs auf und macht sich ungenutzt in den Weltraum davon. Der größte Teil dieses Wärmestroms stammt vom ständigen Zerfall radioaktiver Elemente im Erdmantel und in der Erdkruste, ein Vorgang, der noch Milliarden Jahre anhalten wird. Ein kleinerer Teil ist gespeicherte Restwärme, die bei der Erdentstehung freigesetzt wurde. Diese Energieressource lässt sich praktisch überall nutzen.

Um die Wärme aus dem Untergrund zu gewinnen, braucht man eine Flüssigkeit für den Wärmetransport. Das grundlegende Prinzip ist einfach: Entweder ist dieses Transportmittel in Form von Dampf oder heißem Wasser bereits im Untergrund vorhanden –



dann wird es an die Oberfläche befördert, abgekühlt und normalerweise wieder in den Untergrund zurückgeschickt – oder die Flüssigkeit muss erst in die Tiefe gepumpt und erhitzt wieder nach oben gebracht werden.

Die gewonnene Wärme lässt sich unmittelbar zur Beheizung von Gebäuden oder anderer Wärmeverbraucher einsetzen. Attraktiv ist aber auch die Verwendung der Erdwärme zur Stromerzeugung, da die Erdwärme rund um die Uhr zur Verfügung steht. Erdwärmekraftwerke könnten also einen wichtigen Beitrag zur Grundversorgung mit erneuerbarem Strom leisten.

Auch bei der geothermischen Stromerzeugung fallen große Mengen von Wärme an. Diese kann meist nur dann genutzt werden, wenn die Gebäude in der Umgebung über ein Nahwärmenetz beheizt werden. Eine stark zunehmende Verbreitung von Nahwärmenetzen ist daher eine entscheidende Voraussetzung für die technische Erschließung des großen Potenzials der Geothermie. Dafür gibt es fünf verschiedene Verfahren.

## Hot-Dry-Rock-Verfahren

Heiße, trockene Gesteinsschichten (Hot dry rock, HDR) in bis zu fünf Kilometer Tiefe lassen sich zur geothermischen Strom- und Wärmeerzeugung nutzen. Um die Wärme der meist kristallinen Gesteine wie Marmor oder Granit an die Erdoberfläche zu bringen, müssen sie von einem Wärmeträger durchspült werden. Würde man Wasser ohne weitere Maßnahmen durch die Schichten pressen, wären die Wärmeaustauschfläche und die Durchlässigkeit der Steinschichten viel zu gering. Daher wird zuerst eine Tiefbohrung angelegt, durch die sehr viel Wasser unter sehr hohem Druck durch das Gestein gepresst wird. Dabei werden natürlich vorhandene Risse und Spalten aufgeweitet, geschert und neue Risse erzeugt („hydraulische Stimulation“). Das Resultat: Die Durchlässigkeit des Gesteins steigt und man erzeugt einen „natürlichen Wärmetauscher“.

Zum Betrieb einer HDR-Anlage wird dann kaltes Wasser in die Injektionsbohrung gepumpt und über eine zweite (Produktions-)Bohrung wieder an die Oberfläche geführt. Das in den heißen Tiefengesteinen erhitzte Wasser kann zur Speisung von Nah- und Fernwärmenetzen und zur Bereitstellung von Industriedampf genutzt werden. Attraktiv ist es auch, aus dem Geothermalwasser Strom zu erzeugen. Dazu werden sogenannte ORC-Turbinen (Organic Rankine Cycle, ORC) eingesetzt, die im Wesentlichen wie Dampfturbinen arbeiten. Allerdings ist es bei den vergleichsweise geringen Temperaturen des Wärmeträgers (100 bis maximal 180 °C) notwendig, anstelle von Wasser im Dampfturbinenkreislauf eine organische Flüssigkeit mit niedrigem Siedepunkt wie Propan oder Iso-Butan einzusetzen. Der elektrische Wirkungsgrad des Verfahrens liegt bei 8 bis 12 Prozent.

Kristalline Gesteinsschichten gibt es in Deutschland nahezu überall. 95 Prozent des geothermischen Potenzials wird daher der HDR-Technik zugeordnet. Es ist ausreichend, um die gesamte Grundlast des deutschen Strombedarfs zu decken.

Dass dieses Potenzial nicht erschlossen wird, liegt bisher an den hohen Kosten der HDR-Technik. Allein für eine Bohrung bis 5.000 m Tiefe veranschlagt man mehrere Millionen Euro. Wegen der hohen Bohrkosten werden Standorte bevorzugt, an denen in vergleichsweise geringer Tiefe kristallines Gestein und hohe Temperaturen zu finden sind. Dies ist insbesondere im Oberrheingraben der Fall. Insgesamt belaufen sich die Investitionskosten für eine HDR-Anlage dort auf etwa 2.500 bis 5.000 Euro pro Kilowatt. HDR-beziehungswise petrothermale Systeme, die tiefliegende Wärmereservoirs nutzen, die keine oder



nur eine geringe Wasserführung aufweisen, werden daher im Erneuerbare-Energien-Gesetz mit einem Bonus gefördert.

In einem Forschungsprojekt im elsässischen Soultz-sous-Forêts (Oberrheingraben) wurden drei Bohrungen bis auf 5.000 m abgeteuft, bei denen die Wissenschaftler auf Temperaturen von über 200 °C stießen. Im Juni 2008 nahm eine ORC-Anlage den Probebetrieb auf, die künftig mit einer elektrischen Leistung von 1,5 MW rund 1.500 Haushalte mit Strom versorgen wird. Ob eine zweite Anlage in Betrieb genommen werden kann, hängt von der förderfähigen Wassermenge und der Temperatur ab. Das Kraftwerk ist die erste Anlage in Europa, die Strom mittels der HDR-Technik erzeugt. Ziel der Arbeiten ist, standardisierte und kostengünstige HDR-Anlagen zu entwickeln.

## Hydrothermale Systeme

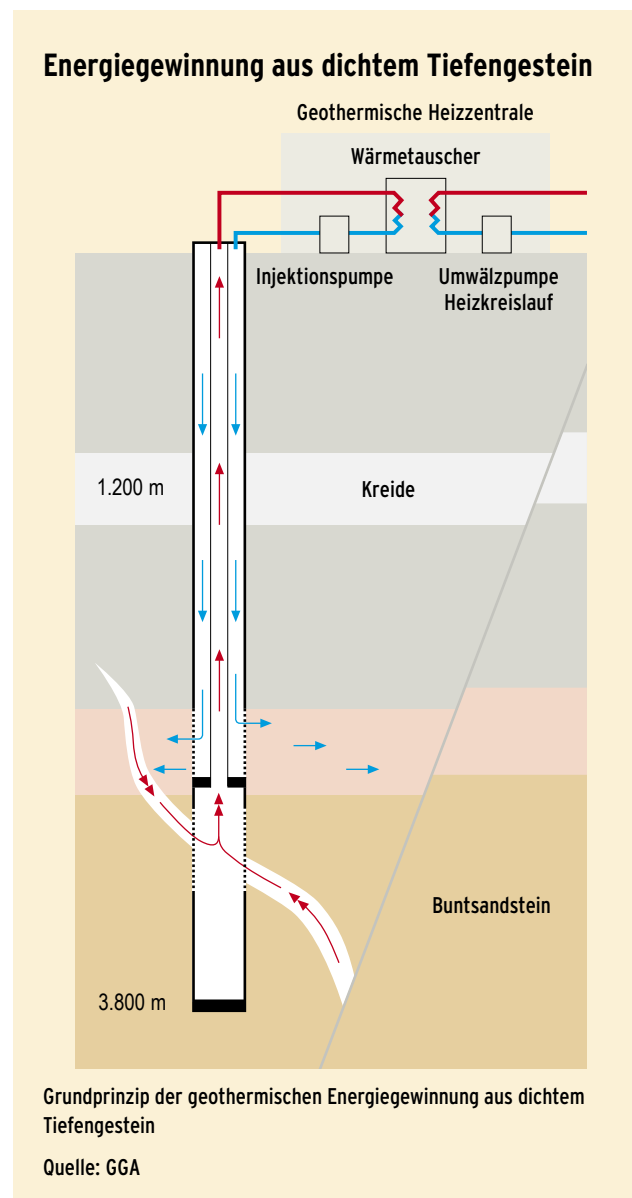
Zur Strom- und Wärmeerzeugung kann auch heißes Wasser aus unterirdischen „Aquiferen“ genutzt werden, wenn die geologischen Bedingungen stimmen. Für die Stromproduktion muss die Wassertemperatur 100 °C überschreiten und es müssen ausreichende Thermalwassermengen zur Verfügung stehen. In einigen europäischen Ländern wie Island und Italien finden sich solche Wasservorkommen schon in moderaten Tiefen. In Deutschland muss man hingegen 4.000 Meter tief bohren, um auf ausreichende Temperaturen und Wassermengen zu stoßen. Und auch das nur an ausgesuchten Standorten des Oberrheintalgrabens und im bayerischen Voralpenraum. In Deutschland entfallen 5 Prozent des geothermisch nutzbaren Potenzials auf solche hydrothermalen Systeme. Das heiße Wasser treibt dabei eine Dampfturbine an und wird nach Möglichkeit für weitere Wärmeverbraucher wie Haushalte oder Industriebetriebe genutzt. Das abgekühlte Wasser wird anschließend über eine zweite Bohrung wieder in die Tiefe gebracht. Andernfalls würde die unterirdische Wärmequelle schneller versiegen und das hochmineralisierte Thermalwasser müsste aus Gründen des Umweltschutzes in anderen unterirdischen Lagern entsorgt werden.

Das erste deutsche Geothermiekraftwerk ist seit November 2003 in Neustadt-Glewe bei Schwerin in Betrieb. Dort wurde eine schon seit 1995 bestehende hydrothermale Wärmeerzeugung durch die Stromerzeugung mit einer 210-kW-ORC-Turbine ergänzt.

In Deutschland sind geothermische Kraftwerke auf den nördlichen Oberrheingraben und das Molassebecken um München konzentriert. Im pfälzischen Landau produziert seit Ende 2007 eine 3-MW-ORC-



Geothermie-Kraftwerk Landau – ein hydrothermales System mit hohem Temperaturangebot





Die Abschlüsse der Bohrungen im Geothermiekraftwerk Landau

Turbine für 6.000 Haushalte Strom. Durch den hier zu findenden Temperaturgradient von knapp  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  pro 100 m Tiefe findet man schon in 2.500 Meter Tiefe Wassertemperaturen von  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Überschüssige Wärme versorgt vorerst 300 Haushalte mit warmem Wasser für die Heizung.

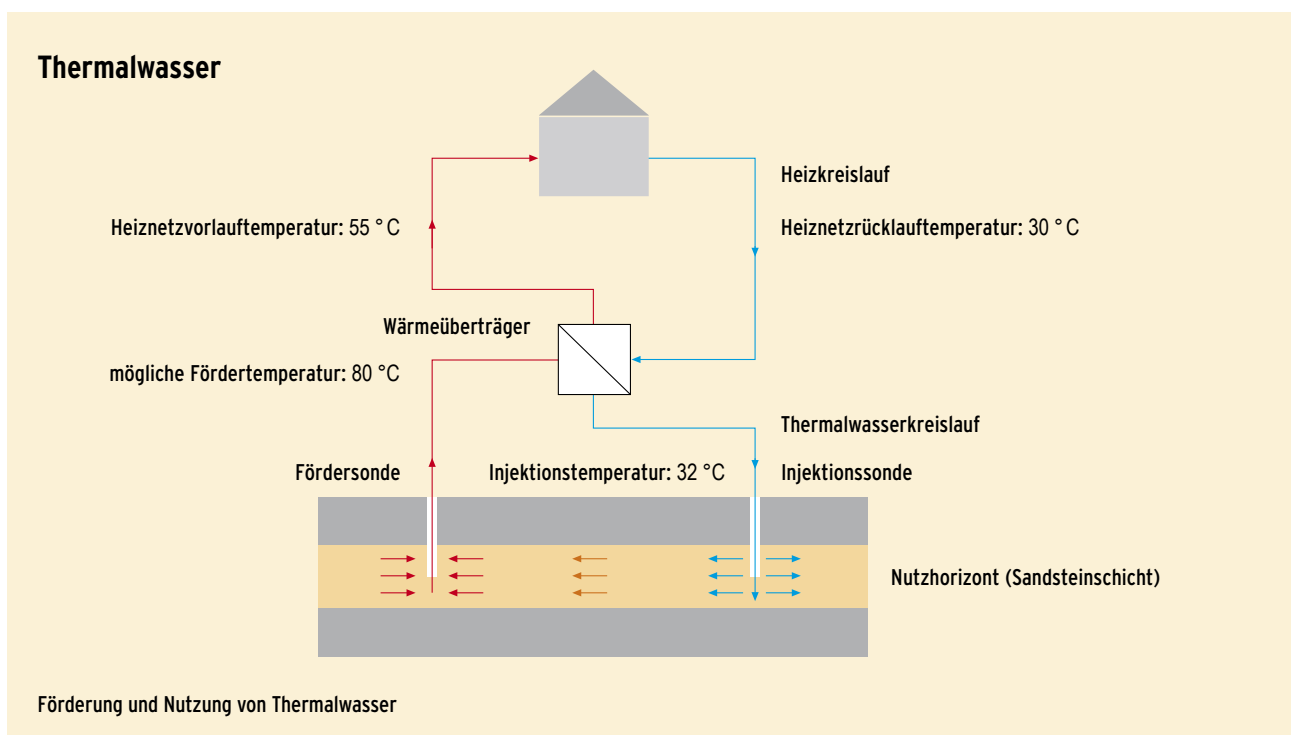
Ein weiteres Kraftwerk mit einer Leistung von 3,4 MW ging Mitte 2008 in Unterhaching, Bayern, in Betrieb. Anders als bei den genannten Kraftwerken arbeitet dieses mit der sogenannten Kalinatechnik, die als Arbeitsmedium ein Ammoniak-Wasser-

Gemisch verwendet. Die Bohrung liefert pro Sekunde 150 Liter Thermalwasser bei einer Temperatur von über  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$  und versorgt 2.000 Wohnungen mit Wärme.

Insgesamt sind in Deutschland Kraftwerke mit 7,5 MW elektrischer Leistung in Betrieb. Die Finanzkrise verhinderte einige weitere Projekte, da die Anlagen mit einem hohen Eigenkapitalanteil finanziert werden müssen.

In anderen Regionen Deutschlands, vor allem im sogenannten süddeutschen Molassebecken (Malmkarst), im Oberrheintalgraben, auf der Schwäbischen Alb und in Teilen der norddeutschen Tiefebene, liegt das erschließbare Temperaturniveau der Tiefengewässer zwischen  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  und  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Das reicht nicht immer zur Stromerzeugung. Diese Erdwärme wird stattdessen zur Gebäude- und Wasserheizung, in Thermalbädern und zu gewerblichen Zwecken wie der Beheizung von Gewächshäusern genutzt. In Süddeutschland, vor allem in dem Landstrich zwischen der Donau und den Alpen, kann das Thermalwasser nach dem Abkühlen auch als Trinkwasser verwendet werden. Hier fließt unterirdisch genügend Wasser nach und der Mineralgehalt ist gering.

Im bayerischen Pullach wurde nach einer Bohrzeit von nur 42 Tagen in 3.300 m Tiefe Thermalwasser mit einer Temperatur von  $94\text{ }^{\circ}\text{C}$  gefunden. Bei der zweiten Bohrung wurden  $107\text{ }^{\circ}\text{C}$  erreicht. Inzwischen versorgen die Bohrungen über 700 Wohneinheiten mit Wärme.





ORC-Anlage in einem Geothermie-Kraftwerk

Die Investitionskosten einer hydrothermalen Heizzentrale liegen bei Anlagen mit einer installierten Leistung zwischen 3 und 30 MW im Bereich von 1.500 bis 2.800 Euro pro Kilowatt. Dazu kommen meist noch Kosten für die Leitungen und Verteilstationen eines Wärmenetzes. Je nach Temperaturniveau und Ergiebigkeit der Quelle liegen die Vollkosten der Wärmebereitstellung zwischen rund 3 und 11 Ct/kWh.

In Deutschland wird die hydrothermale Geothermie schon seit langem genutzt. Im Jahr 2008 wurden insgesamt etwa 285 GWh Wärme aus tiefer Geothermie bereitgestellt.

## Tiefe Erdwärmesonden

Vorhandene Tiefbohrungen, die zur Prospektion von Erdgas, Erdwärme oder möglichen Endlagerstätten angelegt wurden, können ebenfalls zur geothermischen Energiebereitstellung verwendet werden. 5.000 bis 7.000 solcher Bohrungen soll es allein in Deutschland geben.

In die Tiefbohrungen werden sogenannte Doppelrohrsonden bis zu 4 km tief in das Bohrloch eingeführt. Durch diese Sonden zirkuliert Wasser in einem geschlossenen Kreislauf. In der Tiefe wird es erwärmt; an der Erdoberfläche wird die Wärme an einen Wärmepumpenkreislauf abgegeben (siehe „Prinzip der Wärmepumpen“).

Die Wärmeleistung je Sonde ist geringer als die einer etwa gleich teuren hydrothermalen Bohrung. Günstige wirtschaftliche Verhältnisse ergeben sich daher nur, wenn ein vorhandenes Bohrloch genutzt werden kann.

## Umweltfolgen der tiefen Geothermie

Während die Umweltauswirkungen der Bohrerstellung vergleichbar sind mit denen der Bohrungen für die Gewinnung von Erdöl und -gas, kann es im Betrieb zu einer leichten Abkühlung des Untergrundes und dadurch zu Veränderungen in der Chemie der Umgebung kommen. Jedoch besteht in der Regel keine Verbindung zur Biosphäre, weshalb keine Umwelteffekte auf Flora und Fauna zu erwarten sind.

Durch die hydraulische Stimulation und Auskühlung kann es in seismisch labilen Gebieten zu kleineren Erdbeben kommen. Studien und praktische Erfahrung zeigen jedoch, dass kaum ein praktisches Gefahrenpotenzial besteht, da die labilen Zonen vorher identifiziert und Gegenmaßnahmen getroffen werden können und da außerdem die Stärke möglicher seismischer Aktivität sehr gering ist. Die eigentliche Ursache solcher Beben sind natürliche tektonische Spannungen. Um die Umweltauswirkungen der tiefen als auch der oberflächennahen Geothermie zu minimieren, ist eine genaue Kenntnis des geologischen Untergrundes erforderlich.

## Die Wärmepumpe

Bei der sogenannten oberflächennahen Geothermie wird die Wärme der obersten Erdschichten oder des Grundwassers genutzt. Bis in Tiefen von 20 Meter haben dabei noch Umwelteinflüsse wie Sonnenstrahlung und Regenwasser einen Einfluss auf die Temperatur der Bodenschichten. Diese Wärme kann von Wärmepumpen genutzt werden.

Eine Wärmepumpe ist nicht geheimnisvoller als ein Kühlschrank. Beim Kühlschrank wird die Wärme dem Kühlfach entzogen und im Wärmetauscher auf der Rückseite des Geräts wieder abgegeben. Bei der Wärmepumpe wird der Prozess umgedreht: Die Wärme wird meist dem Erdreich im Vorgarten entzogen und an das Heizungssystem des Hauses abgegeben.

Zur Wärmeversorgung von Gebäuden werden bis zu 150 m tiefe Löcher gebohrt, in die mit Flüssigkeit (Sole) durchflossene Rohre eingebaut werden. Da diese Bohrungen sehr teuer sind und eine wasserrechtliche Genehmigung erfordern, können die Erdkollektoren auch horizontal in ein bis zwei Meter Bodentiefe in Form von Schlaufen verlegt werden. Hier sinken die Temperaturen auch im Winter kaum unter 5 °C. Dass sie nicht so hohe Temperaturen wie Tiefbohrungen erreichen, wird durch deutlich längere Leitungen kompensiert. Der Flächenbedarf eines so verlegten Erdkollektors beträgt das Ein- bis Andert-halb-fache der zu beheizenden Wohnungsfläche.

Eine weitere Wärmequelle für Wärmepumpen ist die Umgebungsluft. Der Vorteil liegt darin, dass Luft überall und jederzeit verfügbar ist und kostengünstig erschlossen werden kann. Nachteilig ist, dass die Umgebungsluft immer dann am kältesten ist, wenn der Wärmebedarf am höchsten ist – nämlich im Winter. Das mindert den Ertrag der Wärmepumpe. Bei Sonden kann der sogenannte Temperaturhub der Wärmepumpe über das Jahr relativ konstant gehalten werden, der Energieeinsatz bleibt niedrig. Die so genutzte Energie des Erdreiches stammt – auch bei den Erdsonden – weitgehend aus der Umgebung, deren mittlere Temperatur durch die jährliche Sonneneinstrahlung bestimmt wird.

Die Nutzung der Umgebungswärme mit Hilfe von Wärmepumpen unterscheidet sich in einem Punkt wesentlich von anderen erneuerbaren Energien. Die Wärmepumpe braucht zum Antrieb einen erheblichen Anteil an Fremdenergie. Je nach äußeren Bedingungen kann diese 25 bis 50 Prozent der Energie ausmachen, die als Wärme genutzt wird. Man ordnet daher diese Technologie auch dem Bereich der rationalen Energienutzung zu, sieht Wärmepumpen also eher in einer Reihe mit sparsamen Heizkesseln. Aber auch zu diesen Techniken besteht ein wesentlicher

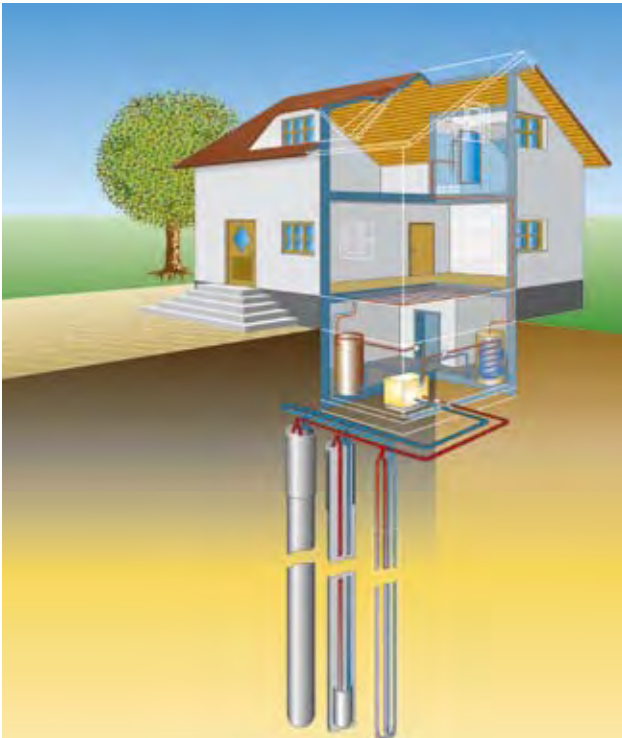


Luft als Wärmequelle für eine Wärmepumpe

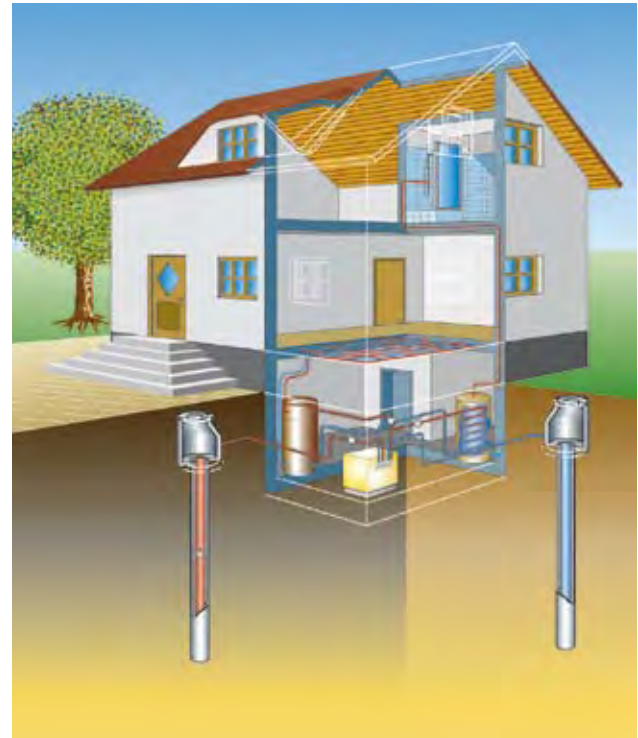
Unterschied: Denn Wärmepumpen nutzen nicht nur die ihnen zum Antrieb zugeführte Energie, sondern zusätzlich auch erneuerbare Energie aus der Umgebung. Entscheidend ist, ob der erneuerbare Anteil überwiegt. Wärmepumpen sind darum ein Zwitter aus sparsamem, konventionellem Energieeinsatz und erneuerbaren Energien. Das Verhältnis von erzeugter Wärme zu eingesetzter Fremdenergie heißt „Arbeitszahl“.

Es gibt verschiedene technische Ausführungen von Wärmepumpen. Am weitesten verbreitet sind sogenannte Kompressionswärmepumpen. Kleine Ausführungen zur Brauchwassererwärmung und Heizung von Einfamilienhäusern werden meist von Elektromotoren angetrieben, größere Anlagen auch von Gasmotoren. Daneben gibt es Wärmepumpen, bei denen keine mechanische, sondern thermische Antriebsenergie benötigt wird. Diese sogenannten Sorptionswärmepumpen können mit Gas, Öl, aber auch mit Ab- und Solarwärme betrieben werden. Sie haben den Vorteil eines hohen Wirkungsgrades in Bezug auf die eingesetzte Primärenergie. Sorptionswärmepumpen kleiner Leistung sind allerdings erst in der Entwicklungsphase.

Soll die bereitgestellte Wärme zu Heizzwecken verwendet werden, so sind niedrige Vorlauftemperaturen im Heizungssystem vorteilhaft. Kann die Vorlauftemperatur um ein Grad abgesenkt werden, so benötigt die Wärmepumpe bereits 1 Prozent weniger Antriebsenergie. Darum sollte man Wärmepumpen mit Fußboden- oder Wandheizungen kombinieren.



Erde als Wärmequelle für eine Wärmepumpe



Wasser als Wärmequelle für eine Wärmepumpe

## Kosten und Potenziale der Wärmepumpe

Beim Neubau eines gut gedämmten Einfamilienhauses liegen die Anschaffungskosten einer Wärmepumpe bei 11.000 Euro. Hinzukommen bis zu 9.000 Euro für die Erdsonden, so dass die Investitionskosten für die gesamte Wärmepumpenanlage bei etwa 20.000 Euro liegen. Im Altbau muss mit höheren Kosten gerechnet werden, da hier aufgrund des höheren Wärmebedarfs auch eine größere Wärmepumpe erforderlich ist. Daneben müssen Kosten für Umbauten einkalkuliert werden, um die Vorlauftemperatur im Heizungssystem zu senken. Wie hoch die daraus resultierenden Wärmekosten sind, hängt von den Sondertarifen des Stromversorgers für elektrische Wärmepumpen ab. Die spezifischen Kosten je Kilowattstunde Wärme bewegen sich zwischen 15 und 20 Ct/kWh.

Nach einem Boom Anfang der achtziger Jahre, als aufgrund hoher Ölpreise der Betrieb von Wärmepumpen wirtschaftlich erschien, ging die Nachfrage stark zurück. Seit Anfang der neunziger Jahre hat jedoch eine Erholung der Nachfrage eingesetzt – nicht zuletzt durch die verstärkten Vermarktungsanstrengungen der Elektrizitätsversorger. Die Wiederaufnahme besonders effizienter Wärmepumpen ins Marktanreizprogramm der Bundesregierung hat zu einer weiter steigenden Nachfrage geführt.

Mittlerweile haben Wärmepumpen einen Marktanteil von rund 16 Prozent der verkauften Heizsysteme. 2008 wurden über 60.000 Wärmepumpen in Deutschland neu installiert. In Folge der Wirtschaftskrise sank die Neuinstallationszahl auf immer noch rund 50.000 Geräte im Jahr 2010. Mehr als die Hälfte aller Wärmepumpen entziehen die Wärme dem Erdreich oder dem Grundwasser. Die verbleibenden nutzen Umweltwärme.

## Ökobilanz der Wärmepumpe

Zum Betrieb der Wärmepumpe müssen erhebliche Mengen Fremdenergie eingesetzt werden. Für die energetische Bewertung ist es darum wichtig, das Verhältnis von eingesetzter Energie zu Nutzenergie zu ermitteln und die gesamte Kette von der Energiequelle bis zur Nutzung in der Wärmepumpe zu betrachten. Wird Strom als Fremdenergie eingesetzt, ist es wegen der Verluste der Stromerzeugung (derzeit rund zwei Drittel der eingesetzten Primärenergie) erforderlich, mit der eingesetzten Antriebsenergie mindestens den dreifachen Wärmeertrag zu liefern. Andernfalls ist der Einsatz fossiler oder nuklearer Primärenergie größer als die erzeugte Wärmemenge. Dieses als Arbeitszahl bezeichnete Verhältnis bestimmt also, ob in der Gesamtbilanz erneuerbare Energie genutzt wird und die Pumpe sich energetisch rechnet. Da die Verluste in der Gasversorgung geringer als in der Stromversorgung sind, beträgt die not-

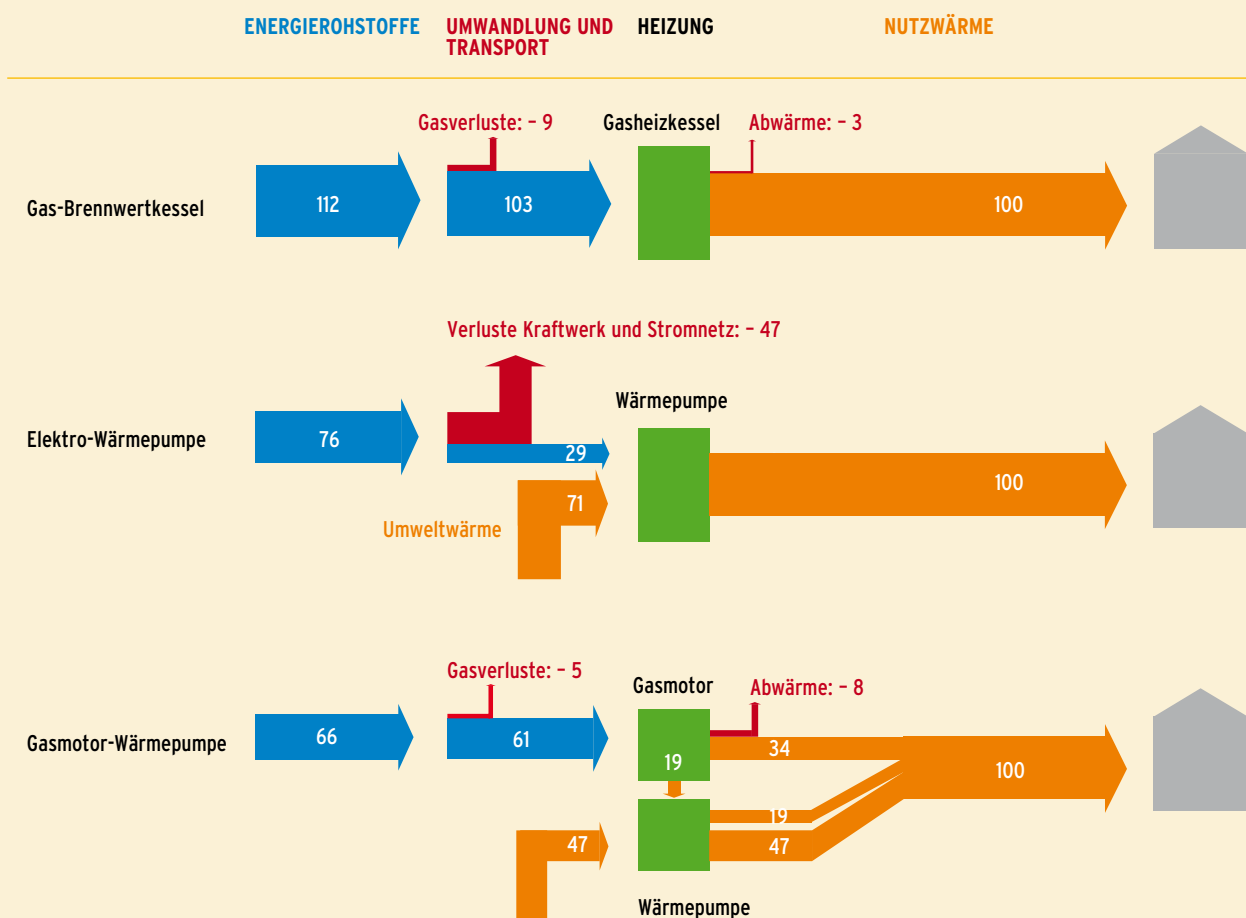
wendige Jahresarbeitszahl bei gasmotorbetriebenen Wärmepumpen nur 1,1 (Grafik „Energiebilanz Wärmepumpe“).

Die in der Praxis erzielbaren jährlichen Arbeitszahlen bei Bereitstellung von Heizenergie und Warmwasser erreichen oftmals nicht die versprochenen Werte. Feldtests zeigen, dass Luft-Luft-Wärmepumpen Jahresarbeitszahlen im Mittel um die 3,0, Grundwasser-Wärmepumpen um die rund 3,5 und Erdreich-Wärmepumpen um 3,7 erreichen. Bei nicht optimal installierten Systemen kann die Arbeitszahl auch deutlich unter 3 liegen. Entscheidend sind unter anderem die Temperaturen des Heizsystems und die Qualität der Installation.

Noch dominieren fossil-nukleare Energieträger die Stromversorgung. Mit zunehmendem Anteil von erneuerbaren Energien und Kraft-Wärme-Kopplung



### Energiebilanz Wärmepumpe



Energieflüsse und Nutzungsgrade verschiedener Wärmesysteme im Vergleich mit einem Gas-Brennwertkessel. In den Berechnungen wird von einer Elektro-Wärmepumpe mit einer Jahresarbeitszahl von rund 3,5 ausgegangen.

Quelle: IFEU



Wärmepumpen einiger Baureihen besitzen ein Design, das sich problemlos in die Inneneinrichtung eines Hauses, beispielsweise in Küchenzeilen, einfügen lässt

an der zukünftigen Stromerzeugung wird aber auch aus ökologischer Sicht die Wärmepumpe interessanter.

## Forschung erforderlich

Um die Energiebereitstellung aus Erdwärme voranzubringen, ist eine intensive Forschung und Entwicklung erforderlich. Das gilt besonders für die Stromerzeugung und die Schaffung großer wärmetauschender Flächen im Untergrund (HDR-Verfahren) sowie die Verbesserung des ORC-Verfahrens. Die Bohrtechnik muss auf die Erfordernisse der Geothermie abgeglichen werden und die hydrothermalen Reservoirs besser erfasst werden.

Das Bundesumweltministerium fördert im Rahmen des Energieforschungsprogramms der Bundesregierung mehrere Vorhaben im Bereich der tiefen Geothermie.

In den verschiedenen geothermisch geeigneten Regionen Deutschlands sollen Anlagen zur geothermischen Stromerzeugung und Kraft-Wärme-Kopplung gebaut werden. Zum Einsatz kommen je nach Standort Technologierichtungen wie das Hot-Dry-Rock-Verfahren, die Nutzung bestehender Tiefbohrungen und die Nutzung des heißen Wassers aus Aquiferen und Karstgebieten. Zusätzlich konzentriert sich die Forschung auf die Herstellung von hochfesten Materialien, Legierungen und Pumpen, welche den besonderen Eigenschaften des oft aggressiven Thermalwassers widerstehen können. Des Weiteren wird an Planungswerkzeugen gearbeitet, die das Fündigkeitsrisiko bei Bohrungen minimieren sollen.

Auch elektromotorisch angetriebene Wärmepumpen werden weiter verbessert, um sie besser an den tatsächlichen momentanen Heizungsbedarf und die momentanen Temperaturen der Wärmequelle anpassen zu können und so eine höhere Effizienz zu erreichen.

Sorptionswärmepumpen kleiner Leistung stehen kurz vor der Markteinführung. Forschungsinstitute und Hersteller arbeiten besonders an der Langzeitstabilität dieser Systeme.

### Infos zu Geothermie

- Geothermische Vereinigung: [www.geothermie.de](http://www.geothermie.de)
- GeoForschungszentrum Potsdam: [www.gfz-potsdam.de](http://www.gfz-potsdam.de)

### Infos zu Wärmepumpen

- Bundesverband Wärmepumpe: [www.waermepumpe-bwp.de](http://www.waermepumpe-bwp.de)
- Feldtest Wärmepumpe: [wp-effizienz.ise.fraunhofer.de](http://wp-effizienz.ise.fraunhofer.de)



# ERNEUERBARE ENERGIEN UND DARÜBER HINAUS: WAS JEDER EINZELNE ZUM KLIMASCHUTZ BEITRAGEN KANN

**Jeder kann erneuerbare Energien einsetzen.** Die Installation einer Solaranlage oder die Beheizung der eigenen vier Wände mit Solarenergie, Biomasse oder Erdwärme sind wichtige Schritte zur Verbesserung der Energie- und Klimabilanz. Das **Marktanreizprogramm** fördert diese Heizungen. Auskünfte über Zuschüsse im Rahmen des Marktanreizprogramms erteilt das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle ([www.bafa.de](http://www.bafa.de)), aber auch das lokale Handwerk. Fragen zur Gewährung verbilligter Darlehen für gewerbliche oder kommunale Antragsteller beantwortet das Informationszentrum der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) ([www.kfw.de](http://www.kfw.de)).

Ein erster Schritt bei dem Einbau einer erneuerbaren Heizung kann eine **umfangreiche Energieberatung** sein. Bei dieser Beratung wird geprüft, welche Heizung sich eignen würde, mit welchen Maßnahmen der Gebäudedämmung beziehungsweise -sanierung der Einbau sinnvoll gekoppelt werden kann und welche weiteren Optimierungspotenziale bestehen. Auch diese Vor-Ort-Beratung wird durch einen Zuschuss gefördert. Auskünfte erteilen die örtlichen Energieberater oder Beratungsagenturen der Landkreise, Kommunen oder Stadtwerke. Eine Liste der Energieberater ist auf der Internetseite des Bundesamts für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle [www.bafa.de](http://www.bafa.de) zu finden.

Das Bundesumweltministerium hat in Kooperation mit dem BINE Informationsdienst ([www.bine.info](http://www.bine.info)) eine ausführliche **Broschüre über alle Fördermöglichkeiten** auf der Ebene der EU, des Bundes, der Länder, der Kommunen und der Energieversorgungsunternehmen herausgegeben. Eine umfassende **Förderdatenbank** bietet das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie an (<http://db.bmwi.de>).

Die Versorgung mit erneuerbarer Energie ist die eine Seite der Medaille. Aber die Energie aus Wind, Sonne, Biomasse und Erdwärme reicht nicht aus, um unseren heutigen verschwenderischen Umgang mit

Energie aufrechtzuerhalten. **Der Energieverbrauch** muss der erneuerbaren Energieversorgung sozusagen entgegenkommen. Auf Dauer müssen Wirtschaft und Gesellschaft alte Energiefresser gegen effizientere Antriebe und Geräte eintauschen und den Maschinenpark der Vergeuder umrüsten. Der Endenergieverbrauch soll in Deutschland auf die Hälfte sinken – das wird Jahrzehnte dauern. Anfangen kann damit aber jeder heute und hier.

Was bringen Anstrengungen des Einzelnen? Viel. Das kann man mit dem **persönlichen CO<sub>2</sub>-Rechner** im Internet unter <http://ifeu.klima-aktiv.de> sehr schnell und unterhaltsam testen: Unsere Energie verbrauchen wir zu ähnlichen Teilen in den Bereichen Ernährung und Konsum, Mobilität sowie Wohnen. Der durchschnittliche Deutsche emittiert jedes Jahr etwa zehn Tonnen CO<sub>2</sub>. Das ist etwa dreimal so viel wie die Menschen im globalen Durchschnitt und schon fünfmal so viel, wie die auch von der Bundesregierung anerkannte Zielmarke von zwei Tonnen CO<sub>2</sub>, die langfristig alle Menschen auf der Welt erreichen sollen.

Wenn Sie Ihr Leben in Deutschland heute überwiegend nach Klimaschutzkriterien organisieren würden, kämen Sie schon auf einen Wert von knapp fünf Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr. Das verlangt einiges: kein eigenes Auto, keine Flugreisen, Holzpellettheizung im Keller, Ökostrom und Energiesparlampen; vegetarisch leben und Ökoprodukte aus der Region; insgesamt wenig und eher dauerhafte Güter konsumieren. Eine lange Liste. Andererseits bringt es ein konsumkräftiger, reiselustiger Autovielfahrer im eigenen Haus schnell auf 30 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr. Man sieht also, Verhalten wirkt sich aus.

Bei den **Energiespartipps** sehen Sie, dass man auch ohne große Umstellungen seine Emissionen drastisch senken kann. Fangen wir an mit der Energiediät.

## Die wichtigsten Tipps, wie Sie Energie sparen können, ohne Ihr Verhalten und ihre Gewohnheiten wesentlich zu ändern:

	Wenn das (fast) alle täten:	mögliche Gesamteinsparungen in Millionen Tonnen CO <sub>2</sub>
<b>Ökostrom bestellen</b>	Wenn zehn Millionen Haushalte den Stromanbieter wechseln und Ökostrom kaufen, senken sie ihre CO <sub>2</sub> -Emissionen von durchschnittlich 605 auf 40 Gramm CO <sub>2</sub> /kWh.	20
<b>Haus sanieren</b>	Drei Viertel aller deutschen Wohnhäuser sind älter als dreißig Jahre und haben einen Heizenergiebedarf von durchschnittlich 180 kWh/m <sup>2</sup> . Wenn man nur zehn Prozent der Wohnfläche auf Niedrigenergie-Standard bringt (50 kWh/m <sup>2</sup> ), lassen sich 31,2 Milliarden kWh einsparen.	9,4
<b>Stand-By-Schaltung abschalten</b>	Stand-by-Schaltungen verschwenden in jedem Haushalt 375 kWh pro Jahr. Das sind mindestens 60 Euro pro Jahr. Fernseh-, Video- und Audiogeräte sowie elektrische Boiler sind die Hauptquellen.	9,0
<b>Energiespar-Birnen einsetzen</b>	Die Beleuchtung macht 8 Prozent des Stromverbrauchs der Haushalte aus. Davon lassen sich 40 Prozent sparen.	3,8
<b>Moderne Umwälzpumpen einbauen</b>	Moderne Umwälzpumpen sparen bis zu 80 Prozent der Energie, die man braucht, um das warme Heizungswasser durchs Gebäude zu pumpen. In Deutschland müssten 8 Millionen Zentralheizungen erneuert werden.	1,7
<b>Energie sparenden Kühlschrank anschaffen</b>	12 Millionen Kühlschränke sind schlechter als Effizienzklasse A. Ihr Stromverbrauch (rund 350 kWh/Jahr) lässt sich mit Geräten der Energiesparklasse A++ um zwei Drittel reduzieren. Die Anschaffung rechnet sich meist nach spätestens fünf Jahren.	2,5
<b>Spritsparendes Auto fahren</b>	Der durchschnittliche CO <sub>2</sub> -Ausstoß der jährlich mehr als eine Million neu zugelassenen privaten PKW liegt bei 172,5 g/km. Sparsame Autos emittieren nur 120 Gramm CO <sub>2</sub> pro Kilometer.	0,8

**Die wichtigsten Tipps, wie Sie Energie sparen können, ohne Ihr Verhalten und ihre Gewohnheiten wesentlich zu ändern:**

	Wenn das (fast) alle täten:	mögliche Gesamteinsparungen in Millionen Tonnen CO <sub>2</sub>
<b>Weniger Auto fahren</b>	Die deutschen Pendler legen täglich 446 Millionen Kilometer zurück. Der Durchschnittsverbrauch liegt bei 8 Liter Benzin pro 100 km. Zehn Prozent weniger Pendelstrecke sparen 1,3 Milliarden Liter Benzin.	3,6
<b>Heizung zurückdrehen</b>	Die Gebäudeheizung erzeugt 162 Millionen t CO <sub>2</sub> . Ein Grad niedrigere Raumtemperatur senkt den Energieverbrauch und CO <sub>2</sub> -Emissionen im Bereich Wohnen schon um 6 Prozent.	9,7
<b>Saisonale Nahrungsmittel kaufen</b>	Mit dem Verzicht auf Gemüse, das in beheizten Treibhäusern wächst oder mit dem Flugzeug herangeschafft wird, lassen sich 7 Prozent der individuellen CO <sub>2</sub> -Emissionen einsparen.	9,5
<b>Weniger Fleisch essen</b>	Durch unsere Ernährung verursachen wir 1,65 t CO <sub>2</sub> -Ausstoß pro Person und Jahr. Fleisch ist besonders klimaschädlich. Unser Verbrauch ließe sich leicht um 20 Prozent reduzieren.	6,8
<b>Rad fahren</b>	19 Millionen Pendler fahren täglich mit dem eigenen PKW zur Arbeit. Da die Hälfte der Arbeitswege kürzer sind als 10 km, ließen sich leicht 10 Prozent der Strecken mit dem Rad zurücklegen. Das ist nicht nur gut für die CO <sub>2</sub> -Bilanz, sondern auch gegen das in Deutschland verbreitete Übergewicht.	2,3
<b>Bahn fahren statt fliegen</b>	Zuletzt haben Fluggäste 9,5 Milliarden Personenkilometer auf innerdeutschen Flügen zurückgelegt. Wenn sie die Bahn nehmen, sinkt der CO <sub>2</sub> -Ausstoß von 193 auf 56 Gramm CO <sub>2</sub> pro Personenkilometer.	1,3

# GLOSSAR

<b>Biogas</b>	Bei der Vergärung organischer Materie entstehendes Gas, das überwiegend aus Methan (CH <sub>4</sub> ) und Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> ) besteht. Biogas zählt zur Biomasse.
<b>Biomasse</b>	Die gesamte durch Pflanzen und Tiere anfallende/erzeugte organische Substanz. Beim Einsatz von Biomasse zu energetischen Zwecken ist zwischen nachwachsenden Rohstoffen (Energiepflanzen) und organischen Reststoffen und Abfällen zu unterscheiden.
<b>CO<sub>2</sub></b>	siehe Kohlendioxid
<b>Deponiegas</b>	Energereiches Gas, das bei der Verrottung von Abfällen entsteht.
<b>Demand-Side-Management</b>	siehe Lastmanagement
<b>Einheiten</b>	<p>1 Joule (J) ist die Basiseinheit für Energie. 1 J = 1 Nm (Newtonmeter) = 1 Ws (Wattsekunde). Da 1 J nur einer geringen Energiemenge entspricht, werden meist Vielfache dieser Einheit verwendet:</p> <p>kJ = 10<sup>3</sup> Joule = Tausend Joule (Kilo-)  MJ = 10<sup>6</sup> Joule = Millionen Joule (Mega-)  GJ = 10<sup>9</sup> Joule = Milliarden Joule (Giga-)  TJ = 10<sup>12</sup> Joule = Billionen Joule (Tera-)  PJ = 10<sup>15</sup> Joule = Billiarde Joule (Peta-)  EJ = 10<sup>18</sup> Joule = Trillionen Joule (Exa-)</p> <p>Eine gebräuchliche Einheit ist auch die kWh (Kilowattstunde).  1 kWh = 3.600 kJ = 3,6 MJ  1 GWh = 10<sup>6</sup> kWh = 1 Million kWh = 3.600 GJ  1 TWh = 10<sup>9</sup> kWh = 1 Milliarden kWh = 3.600 TJ</p> <p>In Statistiken vielfach verwendete Einheiten sind: 1 Mio. t SKE = 1 Millionen Tonnen Steinkohleeinheiten = 8,14 TWh</p> <p>1 Mill. t ROE = 1 Millionen Tonnen Rohöleinheiten = 11,63 TWh</p> <p>1 W ist die Basiseinheit für die Leistung von Energieanlagen. Sie entsteht durch Division der Energieeinheit durch die Zeit, also  1 W = 1 J/s</p> <p>kW = 10<sup>3</sup> Watt = Tausend Watt  MW = 10<sup>6</sup> Watt = Millionen Watt  GW = 10<sup>9</sup> Watt = Milliarden Watt</p>
<b>Emissionen</b>	Emissionen sind die von einer Anlage, einem Gebäude oder einem Verkehrsmittel in die Umwelt (Boden, Wasser, Luft) abgegebenen gasförmigen, flüssigen und festen Schadstoffe. Auch die Abgabe von Wärme, Strahlung, Geräuschen und Gerüchen gilt als Emission. Die Einwirkung von Emissionen wird als Immission bezeichnet.
<b>Energie</b>	Energie ist die Fähigkeit oder Möglichkeit eines Systems, Arbeit zu verrichten. Gemessen wird Energie in der Einheit Joule (J). Physikalisch betrachtet kann Energie weder erzeugt noch vernichtet werden, sondern nur von einer Form in die andere umgewandelt werden. Man unterscheidet folgende Energieformen: mechanische Energie (Bewegungs- oder kinetische Energie; Lageenergie), Wärmeenergie (thermische Energie), elektrische Energie, chemische Energie, Strahlungsenergie, Energie aus der Spaltung und Fusion von Atomkernen.
<b>Endenergie</b>	Vom Endverbraucher genutzte Energieträger.
<b>Energieintensität</b>	Das Verhältnis des Primärenergieverbrauchs zum Bruttonozialprodukt einer Volkswirtschaft.

<b>Energiepflanzen</b>	Pflanzen, die mit dem Ziel der Energienutzung angebaut werden, beispielsweise Getreidesorten wie etwa Mais, Weizen, Roggen oder Triticale, Gräser wie Chinaschilf ( <i>Miscanthus</i> ) und Weidegras. Als Energiepflanzen werden auch Ölsaaten, wie Raps und Sonnenblumen, schnell wachsende Hölzer, wie Pappeln und Weiden, sowie Rüben und Hanf angebaut.
<b>Energieproduktivität</b>	Verhältnis der volkswirtschaftlichen Gesamtleistung (zum Beispiel Bruttonationalprodukt) zur aufgewendeten Energie (Kehrwert der Energieintensität).
<b>Energiereserven</b>	Die in der Erde lagernden Vorräte an Brennstoffen, die nachgewiesen, sicher verfügbar und mit heutiger Technik wirtschaftlich gewinnbar sind.
<b>Energieressourcen</b>	Neben den Energiereserven gibt es nachgewiesene und vermutete Vorräte von Energieträgern (sogenannte Energieressourcen), die jedoch derzeit aus technischen und/oder wirtschaftlichen Gründen noch nicht gewinnbar sind.
<b>Erdwärme</b>	Wärmeenergie des Erdinneren
<b>Erneuerbare Energien</b>	auch regenerative Energien, sind Energiequellen, die nach den Zeitmaßstäben des Menschen unendlich lange zur Verfügung stehen. Die drei originären Quellen sind: Solarstrahlung, Erdwärme (Geothermie) und Gezeitenkraft. Diese können entweder direkt genutzt werden oder indirekt in Form von Biomasse, Wind, Wasserkraft, Wellenenergie sowie Umgebungswärme.
<b>EEG</b>	Erneuerbare-Energien-Gesetz
<b>Fernwärme</b>	Thermische Energie, die durch ein System isolierter Rohre zum Endverbraucher gelangt.
<b>Fossile Brennstoffe</b>	Aus Biomasse im Verlaufe von Jahrtausenden entstandene Energierohstoffe: Öle, Kohlen, Gase.
<b>Geothermie</b>	Erdwärme
<b>Grubengas</b>	Energiereiches Gas, das aus den Kohlegruben entweicht.
<b>Grundlast</b>	Anteil der Nachfrage nach elektrischer Energie, der rund um die Uhr nachgefragt wird.
<b>HDR-Verfahren</b>	Hot-Dry-Rock-Verfahren erlaubt die Nutzung von tiefer Erdwärme auch in Gesteinsschichten, die kein Thermalwasser führen. Dazu wird ein zerklüftetes Rissssystem als Wärmetauscher geschaffen, in den dann Wasser injiziert, erwärmt und wieder an die Oberfläche transportiert wird.
<b>Hydrothermie</b>	Nutzung von Thermalwasser zur geothermischen Strom- (Mindesttemperatur 80 bis 100 °C) oder Wärmebereitstellung.
<b>Holzpellets</b>	In Stäbchenform gepresstes Brennmaterial aus Holz.
<b>Immission</b>	Als Immissionen bezeichnet man die Einwirkung von Emissionen (Luftschadstoffen, Geräuschen, Strahlung und so weiter) auf Boden, Wasser, Menschen, Tiere, Pflanzen und Sachgüter. Messgröße ist zum Beispiel die jeweilige Konzentration eines Schadstoffes pro Quadratmeter Boden oder pro Kubikmeter Luft.
<b>Kalina-Prozess</b>	Verfahren zum Betrieb von Dampfturbinen auch bei niedrigen Temperaturen mittels eines Ammoniak-Wasser-Gemisches als Wärmeträger.
<b>KfW</b>	Kreditanstalt für Wiederaufbau, Bank des Bundes und der Länder
<b>Klärgas</b>	Energiereiches Gas, das im Faulturn von Kläranlagen entsteht.
<b>Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>)</b>	Eines der Treibhausgase mit der Eigenschaft, für langwellige Wärmestrahlung „undurchlässig“ zu sein. Verhindert damit die gleichgewichtige Abstrahlung der auf die Erde treffenden kurzwelligen Sonnenstrahlung. Gefahr einer Temperaturerhöhung auf der Erdoberfläche.
<b>kWh</b>	siehe Einheiten
<b>KWK</b>	Kraft-Wärme-Kopplung, das heißt gleichzeitige Erzeugung von Strom und Wärme.
<b>Lastmanagement</b>	Anpassung des Stromverbrauchs an das Stromangebot, zum Beispiel durch Verlagerung in Nachtzeiten oder Zeiten hohen Windstromangebots durch zeitvariable Tarife, automatische Steuerungen oder Ähnliches.
<b>MAP</b>	Marktanreizprogramm: Programm des Bundesumweltministeriums (BMU) zur Förderung von Anlagen zur Wärmegewinnung aus erneuerbaren Energien.

<b>Merit-Order-Effekt</b>	Verdrängung von Kraftwerken, die relativ teuer Strom produzieren, durch den Markteintritt von zusätzlichen Kraftwerken. Der Begriff „Merit-Order“ bezeichnet die Einsatzreihenfolge von Kraftwerken. Diese Reihenfolge bestimmt sich in der Regel über den Preis. Dies gilt nicht für Kraftwerke, die EEG-Strom einspeisen. Für diese wird der Markteintritt gesetzlich erzwungen. Dadurch werden relativ teure konventionelle Kraftwerke vom Netz genommen, wodurch der Börsenpreis sinkt.
<b>Nachwachsende Rohstoffe</b>	Auch „Nawaro“: land- und forstwirtschaftlich erzeugte Biomasse, die zur Energiebereitstellung oder als Werkstoff genutzt wird (Energiepflanzen).
<b>Niedrigenergiehaus</b>	Niedrigenergie bezeichnet einen Gebäude-Dämmstandard, der jedoch nicht genau definiert ist. In der derzeitigen Baupraxis sind meist Häuser gemeint, die gut gedämmt sind und einen spezifischen Jahres-Heizwärmebedarf bei Mehrfamilienhäusern von 50 kWh/(m <sup>2</sup> -a) und bis 70 kWh/(m <sup>2</sup> -a) bei Einfamilienhäusern aufweisen.
<b>Nutzenergie</b>	Energie, die nach der letzten Umwandlung der Energie in Geräten dem Verbraucher zur Verfügung steht.
<b>Offshore-Windenergie</b>	Stromerzeugung mit Windenergieanlagen auf See.
<b>Organic Rankine Cycle (ORC)</b>	Verfahren des Betriebs von Dampfturbinen mit einem organischen Arbeitsmittel. Als Arbeitsmittel werden organische Flüssigkeiten mit einer niedrigen Verdampfungstemperatur verwendet. Das Verfahren kommt vor allem dann zum Einsatz, wenn das zur Verfügung stehende Temperaturgefälle zwischen Wärmequelle und -senke zu niedrig für den Betrieb einer von Wasserdampf angetriebenen Turbine ist.
<b>Organische Reststoffe</b>	Organische Reststoffe und Abfälle fallen bei der Land-, Fisch- und Forstwirtschaft, der Industrie und den Haushalten an. Es zählen dazu: Abfall- und Restholz, Stroh, Gras, Laub, Dung, Gülle, Bioabfall etc. Produkte aus organischen Rest- und Abfallstoffen sind insbesondere Biogas, Deponiegas, Klärgas.
<b>Passivhaus</b>	Ein Passivhaus ist ein Gebäude, in dem eine behagliche Temperatur sowohl im Winter als auch im Sommer ohne separates Heiz- beziehungsweise Klimatisierungssystem zu erreichen ist. Der Heizwärmebedarf beträgt weniger als 15 kWh/(m <sup>2</sup> -a) und der Primärenergiebedarf einschließlich Warmwasser und Haushaltstrom liegt unter 120 kWh/(m <sup>2</sup> -a). Das Passivhaus ist eine konsequente Weiterentwicklung des Niedrigenergiehauses (NEH).
<b>Photovoltaik</b>	Unmittelbare Umwandlung von Sonnenstrahlung in elektrische Energie mittels Halbleitern, sogenannten Solarzellen.
<b>Primärenergie</b>	Primärenergie ist der Energiegehalt eines natürlich vorkommenden Energieträgers, bevor er zum Beispiel durch Verbrennung umgewandelt wird. Zu den Primärenergieträgern zählen erschöpfliche Energieträger wie Stein- und Braunkohle, Erdöl, Erdgas und Uranerz sowie erneuerbare Energien (Sonnenenergie, Windkraft, Wasserkraft, Erdwärme und Gezeitenenergie).
<b>Receiver</b>	Solarstrahlungsabsorber, der in solarthermischen Turmkraftwerken eingesetzt wird.
<b>Regelleistung</b>	Leistung, die für den kurzfristigen Ausgleich von Schwankungen in Erzeugung und Verbrauch von Strom bereitgehalten wird. Als Regelkraftwerke werden Dampfturbinen-, Speicherwasser-, Pumpspeicher- und Gasturbinenkraftwerke eingesetzt, die entweder im Teillastbetrieb operieren oder im Bedarfsfall gestartet werden.
<b>Repowering</b>	Ersatz alter Anlagen zur Stromerzeugung durch neue, leistungsstärkere Anlagen am selben Standort.
<b>Sekundärenergie</b>	Energie, die als Ergebnis eines Umwandlungsprozesses aus Primärenergie gewonnen wird. Dabei vermindert sich die nutzbare Energiemenge durch Umwandlungs- und Transportverluste. Sekundärenergieträger sind entweder leitungsgebunden wie Strom, Fernwärme und Stadtgas oder die veredelten Produkte Benzin, Heizöl, Koks, Briketts etc.
<b>Smart Meter</b>	„Intelligenter“ Stromzähler, der im Vergleich zu den herkömmlichen Stromzählern nicht nur die Verbrauchsmenge, sondern zum Beispiel auch den Zeitpunkt des Verbrauchs erfasst. Die Zählerdaten werden elektronisch an den Stromanbieter übermittelt. Die Höhe des Strombedarfs, zum Beispiel Lastspitzen, lassen sich erkennen, speichern und zu Rechnungszwecken auswerten.
<b>Solarstrahlung</b>	Man unterscheidet diffuse Solarstrahlung, die uns indirekt aus allen Richtungen nach Streuung an Wolken, atmosphärischen Molekülen und Partikeln erreicht, und direkte Solarstrahlung, unmittelbar aus Richtung der Sonne. In der Summe bilden diffuse und direkte Strahlung die Globalstrahlung.
<b>Solarthermische Kraftwerke</b>	Kraftwerke, bei denen die Solarstrahlung in Wärme umgewandelt, auf einen Wärmeträger (zum Beispiel Öl, Luft) übertragen und schließlich in Kraftmaschinen (zum Beispiel Dampfturbine, Gasturbine) in elektrische Energie umgesetzt wird.

<b>Solarzelle</b>	Solarzellen wandeln Licht direkt in elektrischen Strom um. Die Photonen des Sonnenlichts lösen in Halbleitermaterialien Elektronen zeitweise aus dem Atomverband und bewirken so einen Stromfluss. Dieses Funktionsprinzip wird als photovoltaischer Effekt bezeichnet (Photovoltaik). Als Halbleitermaterial wird in Solarzellen meist Silizium verwendet, das letztlich aus Quarzsand gewonnen wird.
<b>Sonnenkollektor</b>	Sonnenkollektoren wandeln die Strahlungsenergie der Sonne in nutzbare Wärme zur Warmwasserbereitung oder Heizungsunterstützung um. Die Wärmeverluste des Kollektors werden vermindert durch eine Glasabdeckung und durch Wärmedämmung der Rückseite. Bei einfachen Systemen kann auf das Prinzip der „Wärmefalle“ verzichtet werden; man spricht dann von Solarabsorbfern.
<b>Spitzenlast</b>	Elektrische Leistung, die nur an wenigen Tagen im Jahr oder an wenigen Stunden am Tag nachgefragt wird.
<b>Spitzenleistung</b>	Maximalleistung eines Sonnenenergiewandlers bei Standardbedingungen: Globalstrahlung der Stärke 1.000 W/m <sup>2</sup> , Umgebungstemperatur von 25 °C und Spektralverteilung der Sonne bei 1,5-facher Durchquerung der Erdatmosphäre, üblicherweise nur bei Photovoltaikanlagen als Bezugsgröße gewählt. Die Werte sind reproduzierbare Laborwerte, die aber in der Natur in unseren Breiten niemals auftreten.
<b>Steinkohleeinheit (SKE)</b>	siehe Einheiten
<b>Virtuelles Kraftwerk</b>	Eine Zusammenschaltung von kleinen, dezentralen Kraftwerken, wie zum Beispiel Photovoltaikanlagen, Kleinwasserkraftwerken und Biogasanlagen, kleinen Windenergieanlagen und Blockheizkraftwerken kleinerer Leistung, gegebenenfalls aber auch verschiedener Lasten zu einem Verbund, der gemeinsam gesteuert wird.
<b>Volllaststunden</b>	Betriebszeit einer Anlage bezogen auf volle Stunden als Maß für deren Auslastung. Das jährliche Maximum liegt bei 8.760 Stunden.
<b>Wirkungsgrad</b>	Verhältnis von Energieertrag zu Energieeinsatz.
<b>Windenergieanlagen</b>	Unter Windenergieanlagen (WEA) oder Windenergiekonvertern (WEK) werden hier im engeren Sinne Anlagen zur Umwandlung von Windenergie in elektrische Energie verstanden.
<b>Watt-Peak (W<sub>p</sub>)</b>	Spitzenleistung
<b>Wärmepumpe</b>	Technische Anlage, mit der das Temperaturniveau von verfügbarer Wärmeenergie erhöht werden kann, so dass eine technische Nutzung möglich wird.
<b>Wechselrichter</b>	Gerät zur Umwandlung von Gleichstrom in Wechselstrom.

„Der Staat schützt auch in Verantwortung für die künftigen Generationen die natürlichen Lebensgrundlagen ...“

Grundgesetz, Artikel 20 a

**BESTELLUNG VON PUBLIKATIONEN:**

Publikationsversand der Bundesregierung

Postfach 48 10 09

18132 Rostock

Tel.: 01805 / 77 80 90\*

Fax: 01805 / 77 80 94\*

E-Mail: [publikationen@bundesregierung.de](mailto:publikationen@bundesregierung.de)

Internet: [www.bmu.de/bestellformular](http://www.bmu.de/bestellformular)

(\*0,14 Euro/Minute aus dem deutschen Festnetz; abweichende Preise aus den Mobilfunknetzen möglich)

Diese Publikation ist Teil der Öffentlichkeitsarbeit des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Sie wird kostenlos abgegeben und ist nicht zum Verkauf bestimmt. Gedruckt auf Recyclingpapier.