

# Erneuerbare Energien – Status und Potentiale

Von Antonio Pflüger\*

**Zusammenfassung:** Unter heutigen Rahmenbedingungen muss davon ausgegangen werden, dass der globale Primärenergieverbrauch sich bis 2050 mehr als verdoppeln wird und die energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen sogar um 137% steigen. Die Abhängigkeit der OECD-Staaten von Energieimporten würde weiter wachsen und der Treibhausgaseneffekt, der für die Erwärmung der Erdatmosphäre verantwortlich gemacht wird, würde weiter zunehmen. Erneuerbare Energien können und müssen im Mix mit anderen Technologien zur Lösung dieser Probleme eine Rolle spielen. Weitere wichtige Voraussetzungen sind eine gleichzeitige Verbesserung der Energieeffizienz, weitere Fortschritte bei der Reduzierung der Kosten der neuen erneuerbaren Energien und ein breiterer Einsatz in mehr Ländern als bisher. Die damit verbundenen Umstrukturierungen und die Integration der neuen erneuerbaren Energien in die bestehende Energieversorgung ist mit Herausforderungen verbunden, die – wenn ein Umbau stattfinden soll – Wirtschaft, Forschung und Politik gemeinsam angehen müssen.

**Summary:** Under today's conditions, global energy demand would double until 2050 and CO<sub>2</sub> emissions could be expected to increase even more (by 137%). This would be related to an increasing dependence of OECD member countries on energy imports, and also to a further aggravation of the global greenhouse effect, which is responsible for heating up the atmosphere. In combination with other technologies, renewable energies are going to play an important role in meeting these problems. Further preconditions are a simultaneous improvement in energy efficiency, further advances in cost reduction of renewable energies and a broad implementation of renewable energies in further countries. If such a reorganization is to take place, then industry, research institutions and policy are conjointly asked to meet the related challenges.

JEL Classification: Q41, Q42, Q48, Q55

Keywords: Renewable energy, alternative energy, innovative energy technologies, energy demand and supply, government policy

## 1 Einleitung

Unter den heute geltenden Rahmenbedingungen müssen wir davon ausgehen, dass der Gesamtenergieverbrauch global bis 2050 um 109% zunehmen wird (IEA 2006a). Europa wird in Zukunft, ebenso wie die OECD-Staaten, immer stärker von importierten Kohlewasserstoffen wie Erdöl und Erdgas abhängig werden. Bei einer „Business-as-usual“-Politik wird die Abhängigkeit der EU von Energieimporten von heute 50% bis zum Jahr 2030 auf 65% ansteigen. Die Abhängigkeit von Gasimporten wird sich bis 2030 voraussichtlich von 57% auf 84% erhöhen, die Abhängigkeit von Ölimporten von 82% auf 93%. Für Deutschland sind die Abhängigkeiten noch höher (EU-KOM 2007 und BuReg 2006).

\* Internationale Energie Agentur (IEA), Paris, E-Mail: [antonio.pflueger@iea.org](mailto:antonio.pflueger@iea.org)

Gleichzeitig würden die Emissionen des Haupttreibhausgases CO<sub>2</sub> bis 2050 um 137% zunehmen (IEA 2006a). Das International Panel on Climate Change (IPCC) hat mehrfach dargestellt, welche Folgen für das Klima damit verbunden wären, zuletzt in Februar 2007 (IPCC 2007). Dies birgt auch politische und wirtschaftliche Risiken.

Die Energiezeugung aus erneuerbaren Energien hat sich in den vergangenen drei Jahrzehnten verdoppelt. Da sich jedoch im gleichen Zeitraum der globale Primärenergieverbrauch ebenfalls verdoppelt hat, ist ihr Anteil mit heute etwas über 13% daran nahezu konstant geblieben.<sup>1</sup> Daran kann sich in den nächsten Jahren nur etwas ändern, wenn einerseits weltweit die Energieeffizienz verbessert wird und damit die Steigerung der Nachfrage reduziert wird und wenn andererseits mehr Staaten als bisher erneuerbaren Energien einen Stellenwert zuweisen, der ihnen zu einer weiteren Verbreitung hilft.

Erneuerbare Energien gibt es in den unterschiedlichsten Entwicklungsstadien. Wasserkraft und Biomasse sind etablierte Technologien. Wind, Photovoltaik, solare Warmwasserbereitstellung und Biotreibstoffe verzeichnen rasante Wachstumsraten in solchen Staaten, wo sie mit wirksamen Förderprogrammen unterstützt werden.

Da sich die Stromerzeugung seit 1973 weltweit bis 2003 beinahe verdreifacht hat, haben die erneuerbaren Energien mit dieser Entwicklung nur knapp Schritt gehalten. Obgleich deren Stromproduktion stark gestiegen ist, ist ihr Anteil in diesem Zeitraum von knapp 22% auf 18% gefallen. Dies ist hauptsächlich auf die Stagnation im Neubau von Wasserkraftwerken zurückzuführen. Biomasse, Geothermie, Wind, Photovoltaik und andere erneuerbare Energien (einschließlich Siedlungsabfälle) haben in diesem Zeitraum ihren Anteil an der globalen Stromerzeugung von 0,7% auf 2,1% gesteigert.

Die Nutzung der Biotreibstoffe ist ebenfalls gestiegen. Die Produktion von Biodiesel hat sich weltweit in den vergangenen zwei Jahren jeweils annähernd verdoppelt (IEA Statistik<sup>2</sup>). Deutschland hatte Ende 2005 etwa 3,4% seines Kraftstoffbedarfs aus Biodiesel gedeckt. Mit einer Steigerung auf 6% bis Ende 2006 liegt Deutschland in der Nutzung von Biodiesel weltweit an der Spitze (EU-KOM 2007). Andere Technologien haben längere Durststrecken durchgemacht, werden jetzt aber wieder aufgegriffen.

Windenergie, Photovoltaik und auch andere erneuerbaren Energien haben gute Chancen, mit unterschiedlichem Zeithorizont auch ohne Beihilfen wettbewerbsfähig zu werden, was jedoch sehr von den jeweiligen Umständen abhängt.

Insgesamt ist jedoch anerkannt, dass erneuerbare Energien nicht die einzige, aber doch eine wichtige, wenn nicht sogar unverzichtbare Option zur Verbesserung der Versorgungssicherheit sind. Langfristig werden sie die einzige verbleibende Energiequelle sein. Wie lange es bis dahin sein wird, kann heute niemand mit Sicherheit beantworten. Einstweilen kann davon ausgegangen werden, dass fossile Energieträger und Kernenergie grundsätz-

<sup>1</sup> Diese Angabe erfolgt nach der international benutzten *Physical-Content*-Methode. Nach der Substitutionsmethode, wie von REN21 benutzt, ergäben sich höhere Anteile.

<sup>2</sup> Die Statistischen Daten der Internationale Energie Agentur werden auf Basis unterschiedlicher Arrangements erstellt und kontinuierlich verbessert und erweitert. Die Energiedaten der 26 IEA-Mitgliedsländer beruhen auf deren offiziellen staatlichen Quellen. Der Autor hat auf diese Daten unmittelbar zurückgegriffen.

lich noch für Jahrzehnte oder sogar mehrere hundert Jahre in ausreichender Menge verfügbar sind (IEA 2005a).

Die Hauptfragen sind heute aber auch vielmehr, in welche Energien und Nutzungstechniken investiert wird, welche allgemein akzeptiert werden, welcher Energiemix zur Optimierung der Energieversorgungssicherheit nötig ist und welche Anforderungen und politischen Notwendigkeiten sich aus den nationalen und internationalen Bemühungen um die Begrenzung der Treibhausgasemissionen ergeben.

Für die erneuerbaren Energien stellen sich heute insbesondere folgende Fragen:

- Wie hoch kann der Beitrag erneuerbarer Energien sein?
- Welche erneuerbaren Energien haben die größten Potentiale, und wo?
- Was muss in Forschung und Entwicklung getan werden, damit erneuerbare Energien möglichst effizient genutzt werden?
- Welche Markteinführungsstrategien sind sinnvoll?
- Was muss getan werden, um sie in bestehende Strukturen einzugliedern, und was muss möglicherweise geändert werden?

Die Staats- und Regierungschefs der acht führenden Wirtschaftsnationen (G8) haben im Juli 2005 in Gleneagles zusammen mit ihren Kollegen aus den großen Entwicklungsländern ein umfassendes Arbeitsprogramm angestoßen, das sich mit einer intelligenteren Organisation der Energieversorgung insbesondere im Hinblick auf den Klimaschutz befasst. Die Förderung erneuerbarer Energien und die Integration der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in bestehende Stromversorgungsstrukturen spielt darin eine prominente Rolle. Die Regierungschefs haben die Unvereinbarkeit der gegenwärtigen Entwicklungen mit einer nachhaltigen Entwicklung unterstrichen und auf die Dringlichkeit raschen Handelns hingewiesen.

Zusätzlich zu erneuerbaren Energien müssen die vielfach wirtschaftlichen Potenziale zur Verbesserung von Energieeffizienz und Energieeinsparung, aber auch die CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus Kraftwerken, anderen Verbrennungs- oder chemischen Prozessen und dessen dauerhafte Speicherung in unterschiedlicher Ausprägung eine bedeutende Rolle übernehmen. Die Kernenergie, wenn auch nicht überall akzeptiert, wird voraussichtlich steigende Beiträge zur Energieversorgung und zur Minderung der Treibhausgasemissionen leisten.

Im Verkehrssektor gibt es Ansätze zur Minderung des Energieverbrauchs und des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes. Obgleich auch hierfür zahlreiche praktizierte oder erst im Ansatz erkennbare Optionen bestehen, zeichnet sich noch kein so deutliches Bild für die Zukunft ab wie etwa im Gebäudebereich, in der Stromerzeugung oder in der Industrie.

Die weltweit höchsten Beiträge erneuerbare Energien zur nationalen Energieversorgung (ohne traditionelle Biomasse) sehen wir heute in Paraguay (112%) und Island (73%) gefolgt von einer Reihe von Staaten, in denen erneuerbaren Energien zwischen einem Viertel und der Hälfte der Primärenergieversorgung ausmachen. Diese Länder haben in der Regel große Ressourcen an Wasserkraft. Zahlreiche afrikanische Staaten decken ihre Energieversorgung zu mehr als zwei Drittel aus traditioneller Biomasse; zur Verbesserung der Le-

bensqualität und Gesundheit gilt es, diese Art der Energienutzung durch moderne Formen zu ersetzen.

## 2 Erneuerbare Energien: Ein Überblick

Erneuerbare Energien können grob in drei Kategorien unterteilt werden (IEA 2006b):

- Die erste Generation erneuerbarer Energien entstand während der Zeit der industriellen Revolution gegen Ende des 19. Jahrhunderts und umfasst Wasserkraft, die Verbrennung von Biomasse sowie Geothermie zur Wärme- und Stromerzeugung.
- Die zweite Generation umfasst Solarwärme und solare Kühlung, Windenergie, moderne Formen der Bioenergie und solare Stromerzeugung (Photovoltaik). Diese Technologien sind dabei, wettbewerbsfähig zu werden, was ein Ergebnis der erheblichen Forschungs- und Entwicklungsbemühungen in den IEA-Staaten seit den 1970er und 1980er Jahren ist. Die Anstöße dazu gaben die Ölpreisschocks in den 1970er Jahren. Die öffentlichen Fördermittel sanken seit Beginn der 1980er Jahre jedoch wieder deutlich. Erst mit zunehmender Diskussion um den globalen Klimawandel und den Sorgen um die Versorgungssicherheit erhalten diese oft praktisch CO<sub>2</sub>-freien Technologien erneutes Interesse und damit vielfach wieder verstärkte Unterstützung.
- Technologien der dritten Generation sind solche, die noch in der Entwicklungsphase sind oder noch nicht kommerzielle Marktvolumina erreicht haben. Dazu gehören solarthermische Kraftwerke, Meeresenergie, moderne Geothermiesysteme und integrierte Bioenergiesysteme.

Im Folgenden wird ein grober Überblick über den heutigen Entwicklungsstand gegeben. Er kann in dem gegebenen Umfang nicht auf alle interessanten Entwicklungen eingehen, soll aber die generellen Trends darstellen.

### 2.1 Bioenergie

Bioenergie ist mit einem Anteil von 10,9% am weltweiten Primärenergieverbrauch die bedeutendste erneuerbare Energieform. Zwei Drittel davon macht noch immer die Verwendung traditioneller Biomasse in Entwicklungsländern aus. Dort wird in großem Umfang mit Holz, Stroh, Dung und anderen Stoffen gekocht, was eine erhebliche Belastung der Gesundheit vor allem der Frauen darstellt. In vielen afrikanischen Staaten ist dies die Hauptenergiequelle.

Die kommerzielle Nutzung von Biomasse und Siedlungsabfällen trägt heute 2,3% zur weltweiten Primärenergieversorgung bei. Auch zur Stromerzeugung ist deren Nutzung in entwickelten Ländern seit mehr als zehn Jahren eine etablierte Technologie. Ihr weltweiter Anteil an der Stromzeugung beträgt heute etwa 1%. Der Umgang mit den damit verbundenen Emissionen ist zum Teil geklärt, bedarf jedoch in einigen Bereichen noch der Forschung und Entwicklung, woran auch im internationalen Rahmen weiter gearbeitet wird.

Biomasse kann entweder als alleiniger Brennstoff oder als Zusatzfeuerung verwendet werden. Zusatzfeuerung ist oft eine kostengünstige Lösung, die zudem mit geringem Risiko verbunden ist. Investitionen in Zusatzfeuerung können sich in weniger als zwei Jahren amortisieren. In bestehenden Kraftwerken können mit nur geringfügigen Änderungen bis zu 15% Biomasse zum Brennstoff hinzugefügt werden. Die Stromerzeugungskosten sind sehr unterschiedlich und liegen typischerweise zwischen 2 und 5 Euro-Cent/kWh und darüber. Bei der Verwendung von neuartigen Biogasanlagen liegen die Stromerzeugungskosten derzeit bei 10 bis 13 Euro-Cent/kWh, jedoch mit einem erheblichen Kostenminderungspotenzial (IEA 2007).

In Deutschland wurden in 2005 13 TWh Strom aus Biomasse erzeugt. Es ist geplant, die Erzeugung bis 2020 auf 30 TWh auszubauen. Das langfristige Potenzial wird auf etwa 60 TWh pro Jahr geschätzt (BuReg 2006).

Biotreibstoffe, vor allem Äthanol und Biodiesel, gewinnen als Alternative zu herkömmlichem Benzin- und Dieseltreibstoff zunehmend Bedeutung. In den letzten drei Jahren nahm der Ölverbrauch, hauptsächlich getrieben durch das Wachstum im Verkehr, im Mittel um 2,7% pro Jahr zu. Es ist kein Ende dieses Trends in Sicht. Gleichzeitig wird die Abhängigkeit von geopolitisch unsicheren Regionen voraussichtlich zunehmen, da dort nach wie vor die preisgünstigsten Ressourcen verfügbar sind. Der Anteil von Biotreibstoffen am Kraftstoffmarkt ist von Anfang der 70er Jahre bis heute von unter 0,1% auf knapp 1% gestiegen. Brasilien hat die Nutzung von Biotreibstoffen bis Mitte der 1980er Jahre auf sein heutiges Niveau ausgebaut. In 2005 wurden dort 15 Milliarden Liter Äthanol produziert (IEA Statistik). Bei den gegenwärtigen Ölpreisen ist Bioäthanol in Brasilien voll wettbewerbsfähig.

In den USA wird heute ebenso viel Äthanol erzeugt wie in Brasilien. Das größte Wachstum ist dort seit Mitte der 1990er Jahre zu verzeichnen. Weitere 3 Milliarden Liter stammen aus China, Europa und Kanada.

In der EU begann im Jahre 2000 der Ausbau der Nutzung von Biodiesel. Im Jahr 2003 beschlossen die EU-Mitgliedstaaten, den Anteil an Biokraftstoffen in Benzin und Diesel bis 2010 auf 5,75% zu steigern. Alleine im Jahr 2005 hat die Biodieselproduktion um 85% zugenommen.

Biotreibstoffe haben – richtig ausgewählt – gleichzeitig den Vorteil, weniger CO<sub>2</sub> zu emittieren und damit einen positiven Beitrag zum Klimaschutz zu leisten. In Brasilien, wo Äthanol aus Zuckerrohr zu rund 14% den gesamten Treibstoffmarkt versorgt, werden pro eingesetzter Energieeinheit etwa acht Energieeinheiten gewonnen. Fast alle ausgelieferten Fahrzeuge sind dort derart ausgerüstet, dass sie herkömmliches Benzin oder Äthanol gleichermaßen verwenden können. Zusätzlich wird durch Bioäthanol Einkommen im Landwirtschaftssektor geschaffen. Es muss aber weiter untersucht werden, inwieweit ein Ausbau der Verwendung von Biotreibstoffen künftig mit der Lebensmittelproduktion in Wettbewerb tritt oder Auswirkungen auf die Umwelt hat.

Die Äthanolproduktion in den USA verwendet, anders als in Brasilien, hauptsächlich Mais. Die Energieausbeute ist dort bezogen auf die Anbaufläche deutlich geringer. Pro eingesetzter Energieeinheit werden etwa 1,4 bis 1,8 Energieeinheiten erzeugt. Es wird da-

her mit Nachdruck angestrebt, mittels des Lignozelluloseverfahrens die Energieausbeute erheblich zu erhöhen und um das Spektrum der verwendbaren Rohstoffe zu erweitern. Lignozellulose hat das Potenzial, praktisch alle Arten biologischer Kohlenwasserstoffe in verwertbare Treibstoffe umzuwandeln. Allerdings sind weitere technologische Fortschritte Voraussetzung für eine wirtschaftliche Anwendung.

Bis 2020 besteht bei Fortschreibung der gegenwärtigen Trends die Möglichkeit, weltweit einen Anteil von Biotreibstoffen von 6% zu erreichen.

Deutschland hat 2005 etwa 3,4% seines Kraftstoffbedarfs aus Biomasse bereitgestellt (20,7 TWh von 610 TWh). Das langfristige Potenzial wird auf etwa das Dreifache geschätzt, wovon bis 2020 eine Steigerung auf 30,1 TWh als möglich erachtet wird (BuReg 2006).

## 2.2 Wasserkraft

Wasserkraft ist die zweitwichtigste erneuerbare Energiequelle. Sie ist seit mehr als hundert Jahren erfolgreich im Einsatz und trägt heute mit 2,2% zur weltweiten Primärenergieversorgung bei. Nach der Substitutionsmethode würde dies etwa das Dreifache bedeuten. Zur Stromerzeugung trägt die Wasserkraft heute mit rund 16% bei. 1973 war der Anteil mit 21% noch höher, was daran liegt, dass gerade große Wasserkraftwerke zunehmend Akzeptanzprobleme zu verzeichnen haben und der globale Stromverbrauch schneller wuchs als ein Zubau neuer Wasserkraftwerke möglich war. Brasilien und China haben das technisch-wirtschaftliche Potenzial, ihre Stromerzeugung aus Wasserkraft zu vervielfachen.

Wasserkraft ist technisch ausgereift und sehr flexibel im Einsatz, vor allem auch als Energiespeicher. Sie ist jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen und kann in anhaltenden Trockenperioden Versorgungsengpässe verursachen. Dann allerdings können auch thermische Kraftwerke Kühlungsprobleme bekommen. Kleinere Wasserkraftanwendungen haben noch deutliche Kostenreduktionspotenziale, die vor allem auch in der Standardisierung und Modularisierung liegen.

In Deutschland sind die möglichen Kapazitäten für Wasserkraft mit 21,5 TWh jährlicher Erzeugung weitgehend ausgeschöpft. Sie sollen bis 2020 noch um 14% auf 24,5 TWh erweitert werden (BuReg 2006).

## 2.3 Windenergie

Windenergie hat seit 1971 mit durchschnittlich 48% jährlicher Steigerungsrate das wohl spektakulärste Wachstum in der Energiebranche zu verzeichnen. Das Jahr 2005 brachte einen weiteren Kapazitätsausbau um 24%. Da aber der Ausbau dieser „neuen“ erneuerbaren Energie von einem sehr niedrigen Niveau begann, wird es noch einige Zeit dauern, bis Windenergie ein- oder zweistellige Anteile an der globalen Primärenergieversorgung erreichen wird. Ende 2005 waren weltweit annähernd 60 GW Leistung installiert, was etwa einer Leistung von 15 GW konventioneller Kraftwerksleistung entspricht. Ende 2006 dürfte die 0,1-Prozentmarke erreicht worden sein.

Seit den Anfängen haben sich die Anlagen erheblich fortentwickelt. Während Mitte der Achtzigerjahre die typische Anlagengröße um 50 kW lag, haben heute installierte Anlagen eine Leistung um 2,5 MW, also etwa das Fünfzigfache von dem, was vor 20 Jahren üblich war.

Erste große Windfarmen entstanden vor allem in den USA und Dänemark. 1989 wurde in Deutschland der erste 100 MW-Breitentest aufgelegt, der zu etwa 800 Anlagen führte. Das Programm wurde bald darauf auf 250 MW erweitert. Das damit verbundene Mess- und Evaluierungsprogramm liefert immer noch wichtige Daten.

Heute wird die Weiterentwicklung der Anlagen vor allem durch die von den Förderprogrammen ausgelösten Marktkräfte vorangetrieben. Es sind weiterhin deutliche Lerneffekte zu beobachten, das heißt, eine Reduzierung der Kosten um 18 bis 20% bei jeder Verdoppelung des Absatzes.

80% der weltweit installierten Kapazität ist in nur fünf Staaten konzentriert: Deutschland, Spanien, USA, Indien und Dänemark. Dort haben die Fördermaßnahmen spürbare Konsequenzen gehabt. Deutschland hat im Jahr 2005 mehr als 4% seines Stromes aus Windenergie erzeugt (BuReg 2006). Wenn die Windenergie den Anteil an neuen erneuerbaren Energien weltweit steigern soll, reicht es aber nicht aus, dass spürbares Wachstum nur in diesen fünf Staaten stattfindet. Andere müssten sich anschließen.

Mit zunehmenden Anteilen der Windstromerzeugung in regionalen Netzen steigen dort und auch in der Umgebung die technischen Herausforderungen. Die Ergebnisse der dena-Netzstudie I zeigen für Deutschland, dass das von der Bundesregierung geplante Ziel eines Anteils von mindestens 20% erneuerbare Energien an der Stromerzeugung in Deutschland zwischen 2015 und 2020 erreichbar ist. Voraussetzung dafür ist allerdings die Umsetzung der in der Studie aufgezeigten Maßnahmen in Hinblick auf die Weiterentwicklung des Stromversorgungssystems (DENA 2005).

In Deutschland wurden in 2005 26,5 TWh Strom aus Windenergie erzeugt; das entspricht 4,3% des Stromverbrauchs in Deutschland. Es wird erwartet, dass die jährliche Stromerzeugung aus Windenergie in Deutschland bis 2020 auf 81,8 TWh ansteigt. Das langfristige Potenzial wird auf 165 TWh pro Jahr geschätzt, Offshore-Anlagen vor der Küste eingeschlossen (BuReg 2006).

## 2.4 Geothermie

Die Nutzung der Geothermie zur Wärme- oder Stromerzeugung beruht auf grundsätzlich bekannten Technologien. Erdwärme ist in solchen Regionen besonders interessant, wo nah an der Erdoberfläche höhere Temperaturen herrschen, vor allem in den USA, Zentralamerika, Indonesien, Ostafrika und auf den Philippinen. Aber auch in Europa gibt es zahlreiche Gegenden, wo sehr gute Nutzungsbedingungen bestehen, wie z.B. in Island. Aber auch geothermische Anlagen, die mit niedrigen Temperaturen arbeiten, kommen zunehmend zum Einsatz.

Geothermische Anlagen stehen rund um die Uhr zur Verfügung und können daher Grundlastkapazität bereitstellen.

Die Kosten für Anlagen zur Stromerzeugung sind seit den 1970er Jahren drastisch gesunken. Stromgestehungspreise bestehender Anlagen in den USA liegen zwischen 1,5 und 2,5 US-Cent pro Kilowattstunde. Neue Anlagen können Strom zu Preisen, je nach Standort, zwischen 5 und 8 US-Cent/kWh bereitstellen.

Geothermie deckt zurzeit nur 0,4% des Primärenergiebedarfs weltweit. In den kommenden 30 Jahren könnten die Kapazitäten geothermischer Anlagen weltweit auf etwa 85 GW ausgebaut werden. Das identifizierte Potenzial weltweit liegt bei etwa 200 GW.

In Deutschland spielt Geothermie in der Stromversorgung praktisch keine Rolle (0,0002 TWh in 2005). Das langfristige Potenzial wird allerdings auf 200 TWh, also etwa ein Drittel des heutigen Stromverbrauchs, geschätzt. Davon erscheinen bis 2020 etwa 3,5 TWh nutzbar zu sein (BuReg 2006).

Auch die thermische Nutzung der Geothermie ist in Deutschland heute noch marginal. Sie trägt gerade einmal zu 0,1% zur Wärmebereitstellung bei. Ihr langfristiges Potenzial wird dagegen auf etwa ein Fünftel des derzeitigen Wärmebedarfs geschätzt (330 TWh von 1500 TWh) (BuReg 2006).

## 2.5 Solarthermie

Ein Drittel des weltweiten Energiebedarfs liegt in der Wärmeerzeugung. Solarthermische Systeme können zum Heizen, aber auch zum Kühlen eingesetzt werden. Sie werden bislang hauptsächlich zur Warmwassererzeugung verwendet. Ein ehrgeiziges Forschungs- und Entwicklungsprogramm ist weiterhin nötig, um solarthermische Systeme wettbewerbsfähig zu machen. Architektur und Integration in die Gebäudehülle spielen dabei eine ebenso wichtige Rolle wie der Fortschritt bei Komponenten, Steuerung und Systemintegration. Gegenwärtig ist weltweit mehr als 95 GW thermische Leistung installiert. Diese Kapazität deckt den weltweiten Energieverbrauch zu 0,04%. Der Zuwachs in 2005 betrug 13 GW, also etwa 16%, wovon gut 10 GW alleine in China neu installiert wurden (REN21 2006).

Solarthermische Systeme zeigen ebenfalls die üblichen Kostenreduktionen von etwa 20% bei einer Verdoppelung der Märkte, sodass bei Fortsetzung des Wachstums auch eine weitere spürbare Verbesserung der Wirtschaftlichkeit in Aussicht steht.

In Deutschland trug die Solarthermie mit 3 TWh etwa 0,2% zur Wärmebereitstellung bei. Das langfristige Potenzial wird auf 820 TWh, also mehr als die Hälfte des gegenwärtigen Bedarfs, geschätzt (BuReg 2006).

## 2.6 Photovoltaik

Signifikante F&E Programme zusammen mit Markteinführungsprogrammen haben zu eindrucksvollen Kostenreduktionen in der Photovoltaik geführt. Jede Verdoppelung der Produktion hat auch bei dieser Technologie zu 20% geringeren Kosten geführt. Es ist absehbar, dass die Kosten halbiert werden können. Weitere Unterstützung für die Weiterentwicklung dieser Technologie sind nötig, wenn Photovoltaik in den nächsten Jahren zu-



nächst gegenüber Haushaltsstrompreisen wettbewerbsfähig werden soll. In zahlreichen Nischenanwendungen ist Photovoltaik bereits heute wettbewerbsfähig und die Anzahl der Anwendungen wächst.

Die solare Stromerzeugung hat seit 1992 durchgängig spektakuläre Wachstumsraten zu verzeichnen. 2005 stieg die Stromerzeugung durch Photovoltaik um 55% netzgebunden und 15% *off-grid*. 2005 hat die Kapazität der mit dem Netz verbundenen Systeme die der „Stand-alone“-Systeme überholt. Ende 2005 waren weltweit 5,5 GW<sub>peak</sub> installiert. Damit wird allerdings noch kein spürbarer Beitrag zur globalen Energieversorgung geleistet.

Wenn sich das Wachstum im bisherigen Umfang fortsetzt, wird sich auch die Photovoltaik mehr und mehr mit dem Thema der Vorhersagbarkeit und den Einspeiseschwankungen auseinandersetzen müssen. Auf der anderen Seite ist bekannt, dass die unterschiedlichen Schwankungszyklen verschiedener erneuerbarer Energien sich bis zu einem gewissen Grad ausgleichen, die Wasserkraft durch ihre Speicherfähigkeit eine zusätzlich ausgleichende Wirkung hat und Photovoltaik dort Spitzenlasten decken kann, wo in großem Umfang Klimaanlage zur Kühlung eingesetzt werden (IEA 2005b).

Die Märkte für photovoltaische Systeme sind im Wesentlichen auf nur drei Staaten konzentriert: Japan, Deutschland und USA. 85% der weltweit installierten Kapazitäten befinden sich dort. Für im globalen Maßstab spürbare Beiträge zur Stromversorgung wäre es notwendig, dass diese Technologie künftig in mehr Ländern zum Einsatz kommt.

Zwei Technologien dominieren derzeit die Photovoltaik: Kristalline Siliziumzellen und Dünnschichttechnologien. Kristallines Silizium macht immer noch 90% des Marktvolumens aus. Dünnschichttechnologien haben bei anhaltender Forschung und Entwicklung nicht nur ein erhebliches Wachstumspotenzial, sondern durchaus die Chance, nicht nur mit der Entwicklung der Märkte Schritt zu halten, sondern auch ihren Marktanteil an Solarzellen etwa ab 2010 zu erhöhen.

In Deutschland wurden 2005 1 TWh Strom aus Photovoltaik erzeugt. Das langfristige Potenzial wird auf 105 TWh (17% des heutigen Stromverbrauchs) geschätzt. Das mittelfristige Potential bis 2020 wird auf etwa 9,3 TWh geschätzt (BuReg 2006).

## 2.7 Solarthermische Kraftwerke

Für solarthermische Kraftwerke existieren grundsätzlich drei unterschiedliche Konzepte: Parabolrinnenkollektoren, Parabolspiegel und solare Turmkraftwerke. Die Stromgestehungskosten liegen derzeit zwischen 10 und 25 US-Cent pro Kilowattstunde. Für beinahe zwei Jahrzehnte waren die 354 MW installierter Leistung in Kalifornien die einzigen Projekte in kommerzieller Größenordnung. Ein neues Solarturmkraftwerk mit 11 MW Leistung ist im Herbst 2006 in Spanien ans Netz gegangen (IEA 2006c). Durch ein entsprechendes Förderprogramm in Spanien sind dort jetzt 45 weitere solarthermische Kraftwerke in Planung.

Vor allem in ariden Zonen besteht ein erhebliches Wachstumspotenzial für derartige Kraftwerke. Entsprechende Förderpolitiken könnten bis 2025 zu einer jährlichen Stromerzeugung von 95 TWh und bis 2040 von 16000 TWh führen.

## 2.8 Meeresenergie

Während der letzten 20 Jahre erhielt Meeresenergie relativ geringe Aufmerksamkeit in Forschung und Entwicklung und auch nur geringe Förderung. Sie steht daher noch am Anfang ihrer Entwicklung. Im Wesentlichen müssen gegenwärtig zwei Fragen beantwortet werden. Erstens muss der Nachweis erbracht werden, dass die geschätzten Potenziale realistisch sind und zweitens, dass die hohen technischen Risiken in einer extrem rauen Umgebung beherrschbar sind (IEA 2006b).

Weitere Fragen sind unter anderem die Identifizierung konkreter Ressourcen, Vorhersage der Energieerzeugung, Entwicklung von Test- und Messstandards, Auswirkungen auf die Umwelt, sowie die Errichtung von Mehrfachinstallationen von Meeresenergieanlagen und die Kombination mit anderen maritimen Einrichtungen.

Testprototypen, Modelltests und Konzeptstudien existieren. Aber es ist noch nicht klar, ob und inwieweit das theoretisch enorme Potenzial von 8000 bis über 80000 TWh pro Jahr sinnvoll erschlossen werden kann. Im Vergleich dazu: 2004 betrug die globale Stromerzeugung 17450 TWh (OES 2006 und IEA Statistik).

## 3 Energieszenarien bis 2050

Der erst kürzlich erschienene World Energy Outlook 2006 (WEO 2006) der IEA hat bestätigt, dass mit den gegenwärtigen Politiken die gegenwärtige Energieversorgung unsicher und mit Blick auf die Umwelt nicht nachhaltig ist. Politiken können einen erheblichen Einfluss haben, das haben praktisch alle Studien und die Praxis immer wieder demonstriert.

Die IEA-Studie „Energy Technology Perspectives – Scenarios and Strategies to 2050“ kommt zu dem Schluss, dass die energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen mit einem nicht unerheblichen, aber vertretbaren Aufwand drastisch gesenkt werden können und damit gleichzeitig mehr Versorgungssicherheit geschaffen werden kann (IEA 2006a). Ohne weitere politische Maßnahmen würde sich der Energieverbrauch bis 2050 ansonsten mehr als verdoppeln (Abbildung 1).

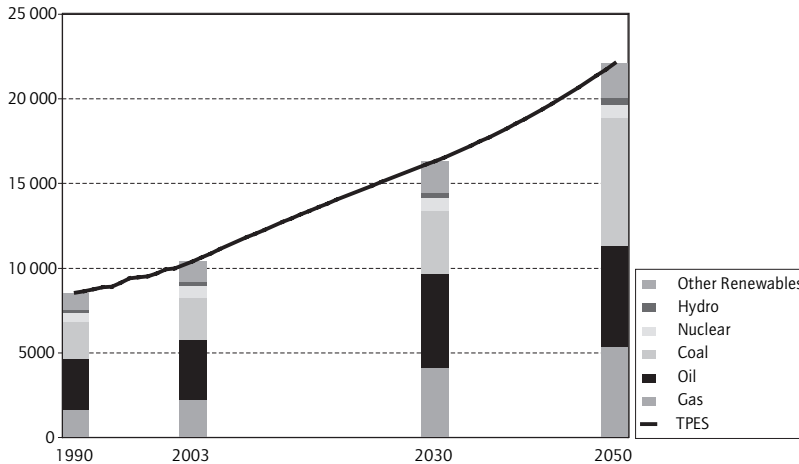
Energiepreise würden tendenziell deutlich verteuert, da insbesondere in der Ölförderung zunehmend auf nichtkonventionelle Ressourcen zurückgegriffen werden müsste. Der Kohleverbrauch würde sich, hauptsächlich angetrieben durch die Nachfrage in den großen Entwicklungsländern, verdreifachen. Der Verbrauch von Erdgas würde um 138% zunehmen. Der Zuwachs des Ölverbrauchs wäre mit 65% im Vergleich zu Kohle und Gas relativ schwach, da, durch steigende Preise bedingt, Öl im Verkehrsbereich zunehmend durch Treibstoffe aus Kohle, Erdgas und Biomasse ersetzt wird.

Die Energieerzeugung durch Wasserkraft würde sich weltweit gerade einmal um 67% steigern und die übrigen erneuerbaren Energien um 42%. Damit würde der Anteil der Wasserkraft an der globalen Energieversorgung von heute 2,1% auf 1,7% in 2050 fallen. Der Anteil der übrigen erneuerbaren Energien würde von 11,3% auf 9,3% ebenfalls sinken. Gleichzeitig würde die Importabhängigkeit von Ländern mit geringer Eigenproduktion weiter steigen. Deutschland hängt bereits heute zu 62% von Energieimporten ab, was

Abbildung 1

**Globaler Primärenergieverbrauch nach Basisszenario**

In Mill. t oe



Quelle: IEA (2006a).

sich bis 2020 auf 70 % steigern könnte. Parallel dazu würden in einem solchen Basisszenario die weltweiten energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen von 24,5 Gigatonnen (2003) auf rund 58 Gigatonnen (2050) steigen, sich also verzweieinhalbfachen (Abbildung 2).

Dieser alarmierende Trend kann geändert werden. Die ETP-Studie der IEA demonstriert, wie mit dem Einsatz existierender Technologien und solcher, deren Entwicklung eine sinnvolle Markteinführung erkennen lässt, die CO<sub>2</sub>-Emissionen zumindest auf das Niveau von 2003 zurückgeführt werden können. Voraussetzungen dafür sind ein verstärkter Einsatz von Forschung und Entwicklung sowie Programme zur Markteinführung solcher Technologien. Ab 2030 müsste ein Preis für CO<sub>2</sub>-Emissionen weltweit wirksam sein. Ein solcher CO<sub>2</sub>-Preis ist Voraussetzung für alle diejenigen Technologien, deren Abstand zur Wirtschaftlichkeit vorübergehend noch zu groß ist, um von alleine den Zugang zum Markt zu finden, wie für die meisten neuen erneuerbaren Energien und für solche Technologien, für die ein CO<sub>2</sub>-Preis inhärente Voraussetzung für einen Markt ist. Die CO<sub>2</sub>-Abscheidung und Speicherung ist dafür das wahrscheinlich wichtigste Beispiel.

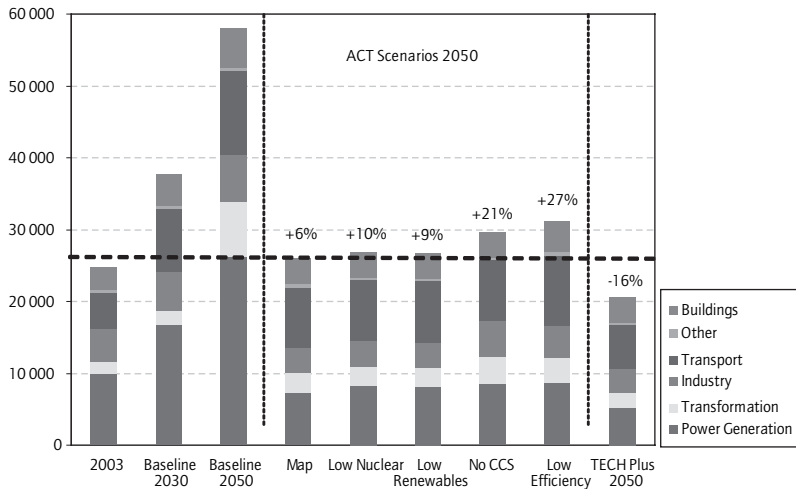
Ein solcher Preis kann durch Anreize verschiedener Art, wie etwa durch ein Emissionshandelssystem mit Emissionsbeschränkungen oder auch durch Auflagen geschaffen werden. Der für die Szenarien angenommene maximale Preis liegt bei 25 US-Dollar pro Tonne CO<sub>2</sub>. Es ist auch wichtig, dass ein solcher Preis weltweit eingeführt wird, um das gesamte Potenzial zu mobilisieren und Wettbewerbsverzerrungen zu vermeiden. Die größten Veränderungen würden durch

- Effizienzgewinne im Transport, in der Industrie und im Gebäudebereich,

Abbildung 2

## Energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen weltweit 2003 und 2050

In Mill. t CO<sub>2</sub>



Quelle: IEA (2006a).

- eine weit gehende Dekarbonisierung der Stromerzeugung (mehr erneuerbare Energien, CO<sub>2</sub>-Abscheidung und Speicherung, mehr Kernenergie und mehr Erdgas) und
- eine größere Nutzung von Biotreibstoffen im Verkehr bewirkt.

Die Kosten eines erhöhten F&E-Aufwands während einer Übergangsperiode wären zwar beträchtlich. Durch am Ende niedrigere Primärenergiekosten und reduzierte Investitionen im Stromversorgungsbereich würden sich die volkswirtschaftlichen Kosten langfristig aber etwa in dem Maße reduzieren, in dem anfängliche Aufwendungen erbracht werden müssten.

Das „Map-Szenario“<sup>3</sup> (Abbildung 2, vierte Säule) bildet die Entwicklung ab, die zu erwarten wäre, wenn in allen Sektoren *Best Practice* umgesetzt würde. *Best Practice* heißt in diesem Zusammenhang, dass alle Staaten ähnlich ambitionierte Bemühungen, wie die heute aktivsten unternehmen müssten. Im „Map-Szenario“ würde dies für die Wasserkraft bis 2050 eine Steigerung um 85% bedeuten, für die übrigen erneuerbaren Energien eine Steigerung um 193% – also rund eine Verdreifachung.

Die Szenarien „Low Nuclear“, „Low Renewables“, „No CCS“ (CO<sub>2</sub>-Abscheidung und Speicherung) und „Low Efficiency“ demonstrieren, was bei einem verminderten Engage-

**3** „Map“ steht für das englische Wort für eine „Abbildung“ dessen, was unter den beschriebenen Bedingungen nach den kostenoptimierenden Szenariorechnungen künftig möglich ist.

ment in einzelnen Bereichen zu erwarten wäre. Eine Strategie ohne ausreichende Maßnahmen für eine Verbesserung der Energieeffizienz hätte die weitreichendsten Folgen.

Vor allem im Strombereich würden sich gemäß dem „Map-Szenario“ durch die Dekarbonisierung erhebliche Umschichtungen ergeben (Abbildung 2). Demnach würde der Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung von 18% (2003) auf 32% (2050) steigen. Der Anteil der Wasserkraft würde bei rund 16% konstant bleiben. Die Windenergie würde von heute unter 0,7% auf 8% steigen. Auch die Biomasse würde unter diesen Voraussetzungen ihren Anteil an der Stromerzeugung von heute 1,3% auf etwa 5% bis 2050 ausbauen. Dagegen würde der Anteil der Kohle von heute 40% auf 27% (ohne CCS) bzw. 30% (mit CCS) fallen.

Ohne weitere Bemühungen zur Entwicklung und Markteinführung neuer Technologien und ohne den genannten CO<sub>2</sub>-Preis ab 2030 würde im Basisszenario der Anteil erneuerbarer Energien in der Stromerzeugung von heute 18% weiter bis 2050 auf 15,4% fallen (9% Wasserkraft, 2% Biomasse, 4% andere erneuerbare Energien). Der Anteil von Kohle würde dagegen von heute 40% auf 47% bis 2050 steigen.

Insgesamt wären in den unterschiedlichen Szenarien gegenüber dem Basisszenario in 2050 folgende Beiträge zur CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung zu erwarten:

- 31–53% Energieeffizienz
- 20–28% CO<sub>2</sub>-Abtrennung und Speicherung
- 11–16% Brennstoffwechsel
- 5–16% Erneuerbare Energien (Strom)
- 2–10% Kernenergie
- ~6% Biotreibstoffe
- 1–3% Andere Technologien

Die Studie hat auch untersucht, was erreicht werden könnte, wenn es einen schnelleren Durchbruch in der Brennstoffzellenentwicklung gäbe, die Nutzung von Biotreibstoffen stärker vorangetrieben, die Kostenreduktion bei erneuerbaren Energien schneller vollzogen und die technische Entwicklung in der Kernenergie beschleunigt würde. Dann ist es denkbar, dass die CO<sub>2</sub>-Emissionen 2050 unter den oben beschriebenen Voraussetzungen 16% unter dem Niveau von 2003 liegen.

Gegenüber dem Basisszenario würde der Primärenergieverbrauch im Map-Szenario in 2050 um 24% niedriger ausfallen, läge aber immer noch 59% über dem von 2003. Wegen des Preises auf CO<sub>2</sub>-Emissionen würde vor allem der Verbrauch von Kohle stagnieren, und ein massiver Zuwachs an erneuerbaren Energien wäre zu verzeichnen.

Da diese Szenarien auf einer Kostenoptimierung beruhen, müsste zur Erreichung der gleichen Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen ein höherer CO<sub>2</sub>-Preis angesetzt werden, falls einzelne Technologien ungenutzt blieben.

## 4 Zusammenfassung

Die Politik ist sich weitestgehend einig, dass dringender Handlungsbedarf besteht, die Versorgungssicherheit und den Klimaschutz zu verbessern. Zahlreiche und teilweise umfangreiche Aktivitäten bestehen und haben auch ihre Wirksamkeit bewiesen. Die vorliegenden Studien weisen praktisch alle darauf hin, dass noch erheblicher Handlungsspielraum besteht und dieser auch sinnvoll genutzt werden kann. Erneuerbare Energien spielen dabei eine bedeutende Rolle. Es geht nun darum, dies in praktische Politik umzusetzen, wo noch nicht geschehen.

Die Steigerungsraten der Kapazitäten von Windenergie und Photovoltaik sind beeindruckend und werden am stärksten wahrgenommen. Dass die Biodieselproduktion allein in 2005 um 85% zugenommen hat, wird in der öffentlichen Diskussion kaum gewürdigt. Der Zuwachs an Warmwasserkollektoren, in der Nutzung von Geothermie und bei kleinen Wasserkraftwerken zeugt davon, dass hier mittlerweile ebenfalls dynamische Wirtschaftszweige entstanden sind. Diese Dynamik gilt es zu erhalten und in noch unerschlossenen Bereichen, wo sinnvoll, zu entwickeln.

Eine erweiterte Nutzung erneuerbarer Energien ist ein wichtiger Pfeiler für eine nachhaltigere Energieversorgung. Bei den künftigen Bemühungen dürfen die anderen Optionen jedoch nicht vernachlässigt werden. Es geht darum, einen umfassenden Ansatz zu implementieren, der sichere Energieversorgung, Wirtschaftswachstum und Klimaschutz möglichst weitgehend vereint.

## Literaturverzeichnis

- BuReg (2006): Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Energieversorgung für Deutschland – Statusbericht für den Energiegipfel am 3. April 2006. Berlin, März 2006.
- DENA (2005): *Energiewirtschaftliche Planung für die Netzintegration von Windenergie in Deutschland an Land und Offshore bis zum Jahr 2020*. Berlin. Download unter: [www.dena.de/themen/kraftwerke-und-netze/](http://www.dena.de/themen/kraftwerke-und-netze/)
- EU-KOM (2007): Mitteilung der EU-Kommission KOM(2007)1 vom 10. Januar 2007. Brüssel.
- IEA (2005a): *Resources to Reserves – Oil and Gas Technologies for the Energy Markets of the Future*. Paris.
- IEA (2005b): *Variability of Wind Power and Other Renewables – Management Options and Strategies*. Paris. Download unter: [www.iea.org](http://www.iea.org)
- IEA (2006a): *Energy Technology Perspectives – Scenarios and Strategies to 2050*. Paris.
- IEA (2006b): *Renewable Energy: RD&D Priorities – Insights from IEA Technology Programmes*. Paris.
- IEA (2007): *Energy Technology Essentials ETE03*. Paris. Download unter: [www.iea.org/Textbase/techno/essentials3.pdf](http://www.iea.org/Textbase/techno/essentials3.pdf)
- IPCC (2007): *Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Genf, Paris.

Mancini, Thomas R. und Michael Geyer (2006): *Spain Pioneers Grid-Connected Solar-Tower Thermal Power*. IEA OPEN Bulletin No. 36. Paris. Download unter: [www.iea.org](http://www.iea.org)

OES 2006: *IEA Ocean Energy Systems – End of Term Report 2001–2006 and Strategy 2007–2011*. Presentation to the IEA CERT. Paris. Download unter: [www.iea-oceans.org/presentations/index.htm](http://www.iea-oceans.org/presentations/index.htm)

REN21 (2006): *Renewables*. Global Status Report. 2006 Update. Paris. Download unter: [www.ren21.net](http://www.ren21.net)