

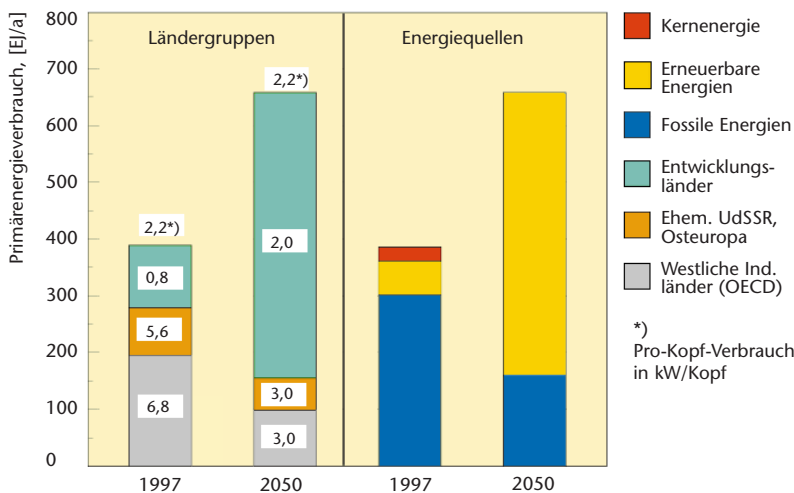
# Regenerative Energien im 21. Jahrhundert – additiv oder alternativ ?

Dr. Joachim Nitsch<sup>1</sup>  
DLR Stuttgart  
joachim.nitsch@dlr.de

## 1. Regenerative Energien im Rahmen einer nachhaltigen globalen Energiewirtschaft

Die Menschheit muss im 21. Jahrhundert eine global nachhaltige Entwicklung einleiten, wenn ihre Lebensgrundlagen nicht ernsthaft gefährdet werden sollen. Aus ökologischer Sicht bedeutet dies, die Endlichkeit nicht regenerierbarer Ressourcen und die begrenzte Aufnahmefähigkeit von Ökosystemen für Abfälle und

kerem Ausmaß die ökologische Stabilität der Erde gefährden und kann mittelfristig – im Zuge der Verknappung und Verteuerung von Ressourcen – auch die ökonomische und politische Stabilität in Frage stellen. Hinzu tritt das nach wie vor extreme Wohlstandsgefälle zwischen Industrie- und Entwicklungsländern, das seine Ursache auch in dem unausgewogenen Zugang zu erschwinglicher und ausreichend verfügbarer Energie hat und das wiederum selbst Auslöser für viele Krisen und Konflikte, sowie für umweltschädigende Entwicklungen ist.



**Abbildung 1**  
Struktur des globalen Szenarios "Solare Energiewirtschaft" für das Jahr 2050 nach Ländergruppen (links) und Primärenergien (rechts) im Vergleich zu 1997; (Zahlenwerte in den Kästchen stellen die jahresdurchschnittliche Pro-Kopf-Leistung in kW in der jeweiligen Ländergruppe dar).

Emissionen in allen Entwicklungsbereichen zu beachten und alle Lösungsansätze daran auszurichten. Nachhaltigkeit umfasst aber mehr als nur den Schutz natürlicher Lebensgrundlagen. Gerechtigkeit, soziale Stabilität und ausreichende Bildungs- und Arbeitschancen sind von ebenso großer Bedeutung, wenn der Menschheit der Weg in eine zukunftsfähige Gemeinschaft gelingen soll.

Beide Aspekte der Nachhaltigkeit treten bei der Energieversorgung in besonderem Ausmaß in Erscheinung. Ein weiterhin starkes Wachstum des globalen Energieverbrauchs und die daraus resultierenden Emissionen wird in immer stär-

Regenerative Energien (REG) können Wesentliches dazu beitragen, diese Probleme zu lösen. Sie können ein Vielfaches des zukünftigen Weltenergiebedarfs auf ökologisch nachhaltige Weise decken und damit zahlreiche Ursachen der oben benannten Gefahren und Risiken beseitigen oder zumindest mildern. Von der inzwischen weitgehend erfolgten Anerkennung der beträchtlichen technischen Potenziale der REG bis zu etablierten, energiewirtschaftlich relevanten Märkten mit ausgereiften, wettbewerbsfähigen Technologien sind allerdings noch zahlreiche Hürden zu überwinden. Dabei müssen die sich abzeichneten Rahmenbedingungen liberalisierter und globalisierter Energiemärkte konstruktiv aufgegriffen werden, damit der angestrebte Wandel ökologisch wirksam ist, einem möglichst hohen volkswirtschaftlichen Nutzen mit sich bringt und gesellschaftlich akzeptiert wird.

Eine Analyse aktueller globaler Energieszenarien zeigt, dass alle Untersuchungen von beträchtlichen Beiträgen der REG zur Mitte des nächsten Jahrhunderts ausgehen. Die Anteile liegen zwischen 25 und 75% am jeweiligen Energieverbrauch. Aber lediglich Konzepte, die gleichzeitig von einer deutlich effizienteren Energiewandlung und -nutzung ausgehen sind in der Lage, die längerfristigen Klimaschutzziele zu erreichen und die fossilen Ressourcen

<sup>1</sup> Wesentliche Beiträge zu diesem Manuskript haben geleistet: Ole Langniß, Michael Nast und Franz Trieb, DLR Stuttgart

zu schonen. Eine derartige Zielsetzung verlangt insbesondere von den Industrieländern eine drastische Erhöhung der Energieproduktivität und damit einhergehend, eine deutliche Verringerung ihrer absoluten Energieverbräuche. *Abb. 1* zeigt am Beispiel des Primärenergieverbrauchs des Szenarios "Solare Energiewirtschaft (SEE)" die prinzipielle Struktur der für das Jahr 2050 anzustrebenden globalen Energieversorgung. Mit halbiertem fossilen Energieeinsatz, einem 75%-igen REG-Anteil, "nur" noch 11 Mrd. t CO<sub>2</sub>/a Treibhausgasen und einer Angleichung der spezifischen Pro-Kopf-Verbräuche von "Nord" und "Süd" bis auf den Faktor 1,5 ist man den eingangs genannten Nachhaltigkeitszielen ein bedeutendes Stück näher gekommen.

## 2. Beispiel: Globale Stromversorgung – was können regenerative Energien leisten ?

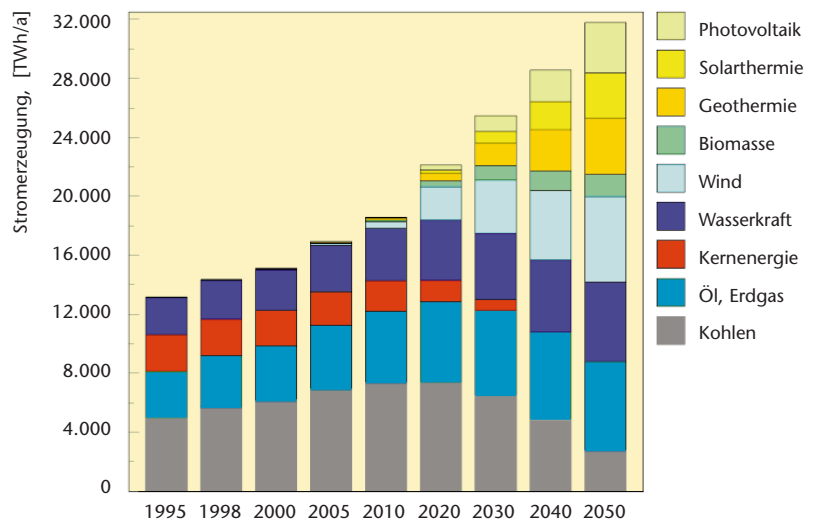
Die zukünftige Rolle der REG im globalen Energiesystem kann besonders gut am Beispiel der Deckung des Stromverbrauchs gezeigt werden. Strom ist ein stark nachgefragter Energieträger, weil er in vielen Anwendungsbereichen unverzichtbar ist und universell genutzt werden kann. Entsprechend hoch ist der Verbrauch in den Industrieländern. Sie verbrauchen 75% des weltweiten Stroms - die USA allein 26%, die EU 17%, die übrigen westlichen Industrieländer (OECD) 19% und die östlichen Industrieländer 12%. Wegen des großen Nachholbedarfs der Entwicklungsländer muss deshalb gerade hier mit einem besonders starken Wachstum gerechnet werden.

Aus den Zielvorgaben des Szenarios ergeben sich die Anforderungen für den notwendigen Beitrag der REG an der zukünftigen globalen Stromversorgung. Die resultierenden Wachstumsraten sind sehr anspruchsvoll. Für eine rechtzeitige und angemessene Mobilisierung müssen sie bis zum Jahr 2020, also 20 Jahre lang, mit jährlichen Wachstumsraten von durchschnittlich 16 bis 17%/a wachsen. Sie decken dann ein Drittel des Strombedarfs. Danach genügen Wachstumsraten unter 10%/a damit mit rund 70% Anteil im Jahr 2050 regenerative

Energien zur dominierenden Energiequelle des nächsten Jahrhunderts werden. Solche Wachstumsraten sind bei günstigen Rahmenbedingungen durchaus möglich. So ist der Weltmarkt für Windkraftanlagen in den letzten 10 Jahren durchschnittlich um über 30%/a gewachsen.

Der Ausbau von REG im Szenario "SEE" kann die in *Abb. 2* dargestellte Struktur annehmen [1]. Der Ausbau der Wasserkraft orientiert sich bis 2020 an den Vorstellungen der Internationalen Energieagentur. Bis 2050 kann sich ihr Beitrag gegenüber dem derzeitigen Beitrag von 2635 TWh/a verdoppeln. Die Wasserkraft bleibt damit die nächsten 40 Jahre die bedeutendste regenerative Quelle für die Stromerzeugung. Eine sich äußerst dynamisch entwickelnde Energietechnologie ist die Windenergie mit jährlichen weltweiten Zuwachsraten von rund 3700 MW/a (1999). Im Szenario orientiert sich ihr Zuwachs am Ziel eines 10% igen Anteils an der globalen Stromversorgung des Jahres 2020, wie es die Europäische Windenergie Vereinigung (EWEA) vorrechnet. Einschließlich Offshore-Anlagen entspricht dies dann einer installierten Leistung von 900 GW.

*Abbildung 2*  
Wachstum des Beitrags regenerativer Energien an der globalen Stromversorgung im Szenario "Solare Energiewirtschaft" bis zum Jahr 2050



In Weiterführung dieser Wachstumsdynamik schließt die Windenergie mit abklingenden Zuwachsraten bis zum Jahr 2040 zur Wasserkraft auf und übertrifft sie im Jahr 2050 mit einem Beitrag von 5800 TWh/a bzw. 2200 GW. Die weitere und verstärkte Etablierung von Biomasse und Erdwärme verlangt bis 2010

Wachstumsraten um 10%/a, was sich angesichts ihrer günstigen ökonomischen Daten und ihrer technologischen Reife relativ leicht bewerkstelligen lässt, wenn entsprechende energiepolitische Prioritäten gesetzt werden. Der Ausbau der Erdwärme erfordert neben der weiteren Erschließung günstiger geologischer Vorkommen, wie z.B. in Island, Italien und den USA, den zügigen Einstieg in die Stromerzeugung auf der Basis der "Hot-Dry-Rock"-Technik. Die Stromerzeugung aus Biomasse und Erdwärme ist wegen ihrer gesicherten Verfügbarkeit, ihrer hohen jährlichen Ausnutzungsdauern und ihrer relativ geringen Kosten von großer Bedeutung für eine wirksame Erschließung des Strommarktes durch REG.

Der Beitrag der solaren Strahlungsenergie ist mit derzeit 2 TWh/a noch nahezu vernachlässigbar. Langfristig muss sie jedoch aufgrund der praktisch "unbegrenzten" Potenziale die Hauptlast einer globalen Energieversorgung tragen. Die Technologien zu ihrer Nutzung müssen daher mit sehr großer Intensität erschlossen werden, um innerhalb der nächsten Jahrzehnte eine angemessene Rolle im "Konzert" der REG einnehmen zu können. Dabei werden beide Technologien – die solarthermische und die photovoltaische Stromerzeugung – benötigt. Für die solarthermische Stromerzeugung sprechen die bereits heute sehr günstigen Stromgestehungskosten im rein solaren Betrieb von unter 20 Pf/kWh und die Möglichkeit der günstigen Einpassung in bestehende Kraftwerks- und Verbundnetzstrukturen, da sie auch mit fossiler Zuführung betrieben werden können. Längerfristig ist die gesicherte Verfügbarkeit des (thermisch gespeicherten) Stroms von großer Bedeutung. Die Photovoltaik profitiert von ihrer enormen Flexibilität hinsichtlich Leistungsgröße sowie von ihrer Robustheit, ihrer langen Lebensdauer und Wartungsarmut. In Teilmärkten wie der netzfernen Stromversorgung ist sie schon heute wettbewerbsfähig. Längerfristig treten die beachtlichen Kostensenkungspotenziale aufgrund wachsender Märkte und technologischer Fortschritte hinzu. Beide Technologien ergänzen sich daher in sehr günstiger Weise bei der notwendigen intensi-

ven Erschließung der Potenziale der solaren Strahlungsenergie speziell in den vielfach einstrahlungsreichen Entwicklungsländern. Sie wachsen daher im Szenario SEE mit vergleichbaren Wachstumsraten. Für solarthermische Kraftwerke werden konkrete Zubaukonzepte bis zum Jahr 2010 als Grundlage benutzt. Demnach wird bei durchschnittlichen Marktwachstumsraten um 25%/a mit 250 TWh/a (bzw. 70 GW) die 1%-Marke im Jahr 2020 überschritten. Ein weiteres kontinuierliches Wachstum von ca. 10%/a führt zu einem Beitrag dieser Technologie von 3100 TWh/a bzw. 600 GW im Jahr 2050. Solarthermische Kraftwerke tragen dann mit 10% zur globalen Stromversorgung bei. Vergleichbare Ziele – also Überschreiten der 1%-Marke im Jahr 2020 und der 10%-Marke im Jahr 2050 – können im Rahmen dieses Szenarios für die Marktentwicklung der Photovoltaik gesetzt werden. Dies erfordert ein mittleres globales Marktwachstum bis 2010 von 30%/a, von 15%/a zwischen 2010 und 2020 und von weiteren 4%/a auf hohem Niveau in den darauffolgenden 30 Jahren. Der Beitrag der Photovoltaik an der globalen Stromversorgung erreicht auf diese Weise bis 2010 eine Leistung von 26 GW (1999 waren es etwas mehr als 1 GW), im Jahr 2020 bereits von 240 GW und im Jahr 2050 von 2400 GW und deckt dann ebenfalls 10% des globalen Strombedarfs. Die in jüngster Zeit aufgetretenen Wachstumsraten des globalen Photovoltaikmarktes von rund 30%/a unterstützen diese Wachstumsvorstellungen und zeigen, dass sie aus technologischer und logistischer Sicht möglich sind, wenn entsprechende günstige energiepolitische Rahmenbedingungen geschaffen werden.

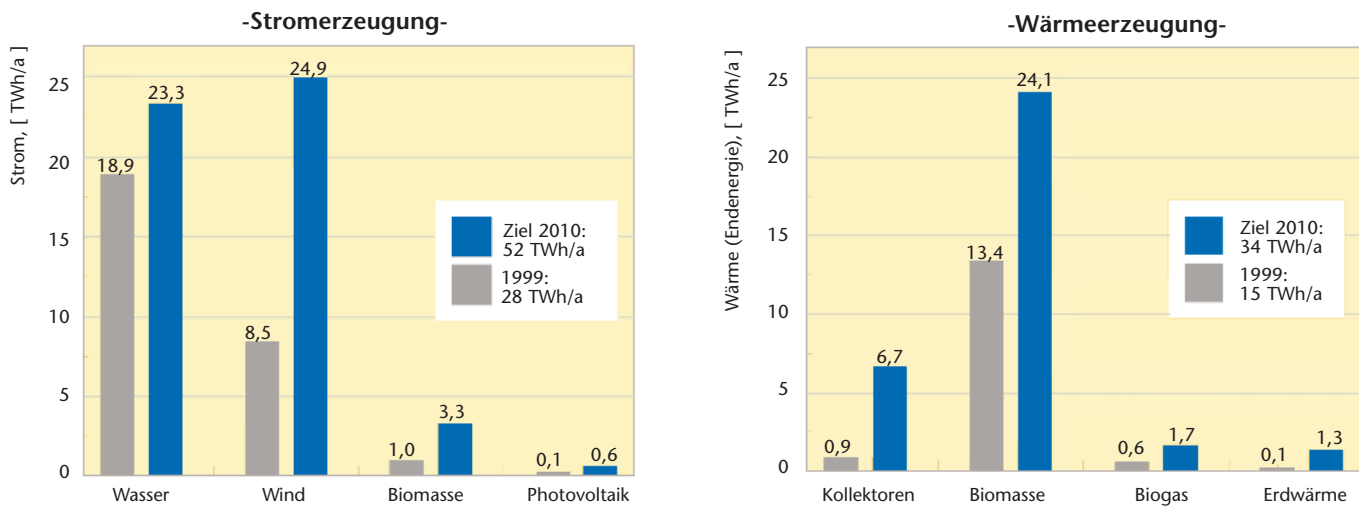
### 3. Verdopplung regenerativer Energien in Deutschland bis 2010 – die "Eintrittskarte" für eine breite Nutzung.<sup>2</sup>

Das Ziel einer Verdopplung des Beitrags von REG bis 2010 ist nur ein Teilziel einer umfassenderen energiepolitischen Strategie, die über

<sup>2</sup> In diesem Abschnitt wird ein Teil der Ergebnisse der Untersuchung: "Klimaschutz durch Nutzung erneuerbarer Energien", DLR/WI/ZSW/IWR/Forum im Auftrag des BMU und des UBA, Stuttgart, Wuppertal, Berlin, Oktober 1999 wiedergegeben.

Jahrzehnte durchgehalten werden muss und die im Erfolgsfall zu einem sehr weitgehenden Umbau der bestehenden Energieversorgungsstrukturen führen wird. Das Verdopplungsziel ist die "Eintrittskarte" für eine relevante und rechtzeitige Teilnahme aller REG-Technologien an der zukünftigen Energieversorgung.

25 TWh/a bereits die Wasserkraft. Die größten Steigerungsraten entfallen jedoch auf die Photovoltaik, die ihren Beitrag verzehnfacht und dann 700 MW Leistung besitzt und auf Strom aus Biomasse und Biogas, die ihren Beitrag mehr als verdreifachen. Die Wärmeerzeugung aus REG ist mit 34 TWh/a zu 2,3% an der



Was für die Windenergie bereits heute gilt, nämlich eine attraktive Wachstumsbranche zu sein, die man sich aus unserer Energie- und Industrielandschaft nicht mehr wegdenken kann, soll dann für alle Technologien bzw. Energiearten zutreffen. Das Verdopplungsziel muss daher so strukturiert sein, dass eine Abwägung zwischen einer möglichst kräftigen Erschließung kostengünstiger Technologien, wie der Biomasse und der Windenergie, und einer ausreichenden Mobilisierung der Technologien mit noch kleinen Marktvolumina, wie Solarkollektoren, Photovoltaik und Erdwärme stattfindet. Außerdem soll erreicht werden, dass der noch geringe Beitrag zur Wärmeversorgung deutlicher wächst als der Beitrag zur Stromversorgung mit ihrem hohen Sockel an Wasserkraft. Potenzialgrenzen sind bis zu diesem Zeitpunkt nur für die Wasserkraftnutzung von Bedeutung. Berücksichtigt man diese Kriterien, so entsteht die in *Abb. 3* dargestellte Struktur der REG im Jahr 2010 [2], [3].

Die Stromerzeugung aus REG steigt mit 52TWh/a auf einen Anteil von 10,2%. Der größte Anteil am Zuwachs kommt mit 70% von der Windenergie. Sie übertrifft 2010 mit

Deckung des entsprechenden Bedarfs beteiligt. Sie stützt sich stark auf die Biomasse einschließlich Biogas, die 60% des gesamten Zuwachses decken. Auch hier haben aber die Technologien mit noch "kleinen" Märkten, nämlich solarthermische Kollektoren mit 19 Mio. m<sup>2</sup> Kollektorfläche und die Erdwärme mit 1,3 TWh/a die größten Steigerungsraten. Der Beitrag der Kollektoren steigt um das Siebenfache, derjenige der Erdwärme um das Zwölffache. Die angestrebte Ausweitung der Wärmeversorgung verlangt einen deutlichen Einstieg in Nahwärmeversorgungen, die heute erst sehr geringe Anteile haben. Sie stellen im Jahr 2010 rund 30% der gesamten Wärme (10 TWh/a) und damit etwa fünfzehnmal mehr heute. Insbesondere ist es erforderlich, solare Wärme in wachsendem Umfang über Nahwärmeversorgungen bereitzustellen, weil sich nur so ihr Beitrag zur Deckung der Raumwärme deutlich steigern lässt.

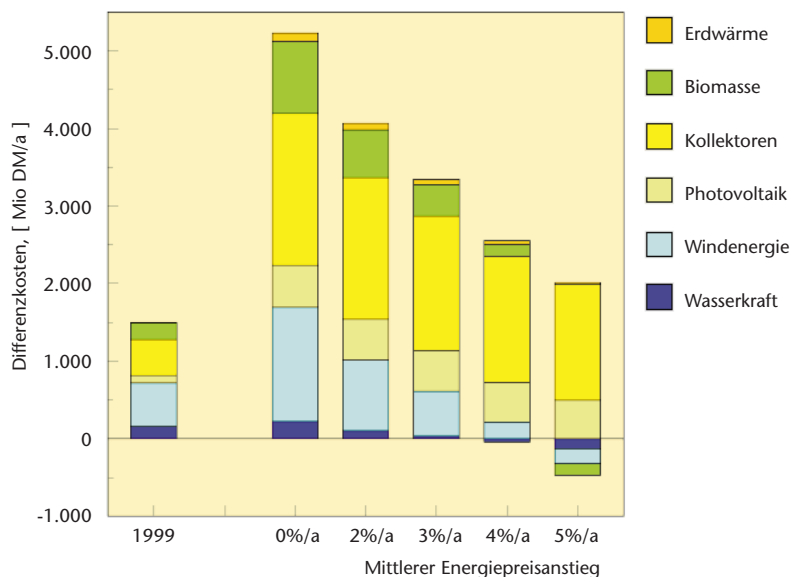
Der Gesamtbeitrag der REG mit 4,4% am Primärenergieverbrauch im Jahr 2010 und entsprechend an der Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen mag manchem als relativ gering erscheinen. Trotzdem erfordert es noch außerordentliche Anstrengungen, dieses Ziel für alle Techno-

*Abbildung 3*  
Struktur des Beitrags regenerativer Energien im Jahr 2010 bei einer ungefähren Verdopplung ihres Anteils an der Energieversorgung

logien zeitgerecht umzusetzen. Die Windenergie dürfte zwar ihren Beitrag ohne Schwierigkeiten erreichen und aus heutiger Sicht sogar überschreiten. Auch die Photovoltaik hat dank der beträchtlichen Unterstützung durch das 100 000-Dächer-Programm und die 99 Pf/kWh-Regelung des neuen Erneuerbare Energie Gesetz (EEG) sehr günstige Ausgangsbedingungen das Ziel von 700 MW Leistung im Jahr 2010 zu erreichen (Ende 1999: 65 MW). Ebenfalls ist Bewegung in den Bau von Biogasanlagen gekommen. Die erforderlichen starken Marktzuwächse bei den Kollektoren, bei der Erdwärme und auch bei der Biomasse, dort speziell im Bereich der Kraft-Wärme-Kopplung, sind dagegen noch keinesfalls gesichert. Auch die Steigerung der Wasserkraftleistung bis 2010 um 900 MW ist keine einfache Aufgabe.

Die Verwirklichung des Verdopplungsziels führt zu deutlich wachsenden Investitionen in REG. Die kumulierte Investitionssumme zwischen 2000 und 2010 beläuft sich auf rund 60 Mrd. DM. Dabei erhält der Wärmemarkt ein annähernd gleiches Gewicht wie der Strommarkt.

**Abbildung 4**  
Differenzkosten des Ausbaus regenerativer Energien im Jahr 2010 in Abhängigkeit des Anstiegs der anlegbaren Preise der herkömmlichen Energieversorgung; Vergleich mit Status 1999.



Je rund 20 Mrd. DM werden in die Windenergie und in Kollektoranlagen investiert, etwa 10 Mrd. DM in Biomasseanlagen. Vergleicht man die aus diesen Investitionen resultierenden Energiekosten der REG im zeitlichen Ablauf mit "anlegbaren" Preisen der konventionellen Ener-

giebereitstellung so erhält man Hinweise darauf, wie die Differenzkosten sich bis zum Jahr 2010 entwickeln. Derzeit betragen diese Differenzkosten rund 1,5 Mrd. DM/a (Abb. 4; linker Balken). Etwa 1,1 Mrd. DM wurden 1999 über öffentliche Mittel und das StrEG aufgebracht, der Rest sind Eigenleistungen der Investoren. Die zukünftige Entwicklung dieser Differenzkosten ist stark vom Verlauf der Energiepreise abhängig. Setzt man eher vorsichtig einen mittleren realen Preisanstieg von 2%/a für die nächsten 10 Jahre voraus [4], so erhöhen sich die Differenzkosten infolge der zusätzlichen Investitionen bis 2010 auf etwa 4 Mrd. DM/a (vgl. Abb. 4; dritter Balken). Dabei ist schon berücksichtigt, dass sich viele Anlagen mit steigenden Stückzahlen verbilligen. Steigen die anlegbaren Preise stärker, verringern sich die ermittelten Differenzkosten entsprechend. Bei einem durchschnittlichen jährlichen Preisanstieg von 4%/a, der im Jahr 2010 zu mittleren Stromkosten von 15 Pf/kWh und zu mittleren Wärmekosten von 12,7 Pf/kWh führen würde, verursachen die kostengünstigen Technologien der Windenergie- und Biomassenutzung so gut wie keine Differenzkosten mehr. Das Förderziel der Konkurrenzfähigkeit im Energiemarkt wäre dann also für diese Technologien erreicht. Bei noch stärkeren Preisanstiegen sind sie sogar kostengünstiger als die herkömmliche Energieversorgung. Teurere Technologien, wie Photovoltaik und Kollektoren benötigen aber auch dann noch eine zusätzliche Unterstützung. Verharren dagegen die Energiepreise auf dem niedrigen Niveau des Jahres 1999, so erhöhen sich die Differenzkosten des Verdopplungsziels im Jahr 2010 auf über 5 Mrd. DM/a und würden bei jedem weiteren Zubau nach 2010 ständig weiter steigen. Ein kräftiger Ausbau der REG wäre also in diesem Fall nicht möglich.

Die Modellrechnungen auf der Basis des Verdopplungsziels machen deutlich, dass der Ausbau von REG die Kombination von zwei energiepolitischen Maßnahmenpaketen verlangt:

- Zum einen erfordert der weitere Ausbau den Einsatz effektiver Instrumente, die geeignet sind, für eine begrenzte Zeit die noch steigenden Differenzkosten zu mobilisieren. Ausgehend vom derzeit niedrigen

Energiekostenniveau konventioneller Energien erfordert die angestrebte Verdopplung deutlich steigende Anreize in Form von weiteren Förderprogrammen des Bundes und der Länder über das bisherige Maß hinaus. Das aus dem bisherigen Stromeinspeisungsgesetz (StrEG) hervorgegangene EEG ist hierfür ein gutes Beispiel. Es kann nicht erwartet werden, bis REG "von selbst" wirtschaftlich werden; der Zeitverlust wäre zu groß und bloßes Abwarten kann dazu führen, dass aussichtsreiche technologische Entwicklungen und sich gerade entwickelnde Märkte zusammenbrechen.

- Auf Dauer können jedoch diese Differenzkosten bei real konstanten oder nur schwach steigenden Energiepreisen mittels Förderprogrammen nicht aufgebracht werden. Auch ihre indirekte Mobilisierung durch die "Umlenkung" der erforderlichen Investitionen mittels Vorrangregelungen, wie Einspeisegesetze oder Quoten, kann in liberalisierten Energiemärkten nur für einen begrenzten Zeitraum erfolgen. Die Differenzkosten verlieren dann den Charakter einer "Anschubfinanzierung" und rücken in die Nähe von "Dauersubventionen". Ein anhaltender Einstieg in eine nachhaltigere Energieversorgung mittels REG verlangt mittelfristig zwingend die Korrektur heutiger Energiepreise, welche die externen Kosten der herkömmlichen Energieversorgung nicht enthalten. Es ist also wesentlich, die ökologische Steuerreform konsequent weiterzuführen und die "Subventionierung" der fossilen und nuklearen Energieversorgung in absehbarer zu beenden, damit erneuerbare Energien in liberalisierten Energiemärkten faire Wettbewerbschancen erhalten.

Geht man in der Basisvariante von einer jährlichen 2%igen Energiepreiserhöhung aus, also von Differenzkosten, die im Verlauf eines Jahrzehnts von 1,5 auf 4 Mrd. DM/a steigen, so entspricht diese Entwicklung einem mittleren Aufschlag von 0,25 Pf/kWh<sub>el</sub> für Strom und von 0,10 Pf/kWh<sup>th</sup> für Brennstoffe. Diese Erhöhungen sind im Vergleich zu den steuerli-

chen Belastungen dieser Energieträger und zu den üblichen Preisschwankungen sehr gering. Wesentlich ist allerdings, dass das entsprechende Maßnahmenbündel in der Lage ist, diese Differenzkosten zu mobilisieren und effizient einzusetzen, um damit die noch fehlende Wirtschaftlichkeit bei den meisten Technologien zur Nutzung von REG auszugleichen. Das monetäre Äquivalent der vorgeschlagenen Förderinstrumente steigt von 1050 Mio. DM/a im Jahr 1999 auf 2600 Mio. DM/a im Jahr 2010, was als Mittelwert über das gesamte Jahrzehnt einer Verdopplung des derzeitigen Wertes gleichkommt. Wesentlich ist, dass sich die Gewichtung von der Dominanz budgetwirksamer Mittel mit 370 Mio. DM/a noch im Jahr 1997 deutlich zu den Instrumenten "Modifiziertes StrEG"<sup>3</sup> und "Quote im Wärmemarkt" verlagert, die unmittelbar auf die Energieverbraucher einwirken. Sie stellen im Jahr 2010 mit 1800 Mio. DM/a rund 70% der Fördermittel bereit im Gegensatz zu 1997 mit lediglich 40%. Der Bedarf an budgetwirksamen Mitteln, also von direkten Förderprogrammen des Bundes, der Länder und der Kommunen, erhöht sich auf maximal 745 Mio. DM/a (2010) und liegt damit im Mittel des Jahrzehnts lediglich um ein Drittel über dem derzeitigen Wert von 440 Mio. DM/a. Die freiwilligen Eigenleistungen, die auch den geschätzten Markt für Grünen Strom und die Eigenleistungen der Energieversorger einschließen, haben mit rund 37% einen etwa gleichbleibenden, bemerkenswert hohen Anteil.

Mit dem gesamten Maßnahmenbündel werden im Zeitraum 2000 bis 2010 rund 21 Mrd. DM an Fördermitteln zum verstärkten Ausbau von REG mobilisiert. Dem stehen in demselben Zeitraum etwa das Dreifache, nämlich insgesamt 60 Mrd. DM, an getätigten Investitionen gegenüber. Bezogen auf die budgetwirksam eingesetzten Mittel ist es sogar das Neunfache. Dies ist ein günstiges Verhältnis für eine gezielte Anschubfinanzierung. In dem Maße, wie über Energiepreissteigerungen oder Maßnahmen der ökologischen Steuerreform die Differenzkosten zwischen Energiesystemen auf der Basis von REG und herkömmlichen

<sup>3</sup> Das seit dem 1. April 2000 geltende EEG entspricht in seinen monetären Auswirkungen weitgehend dem hier behandelten modifizierten StrEG.

Energiesystemen sinken, verringern sich auch die zu mobilisierenden Fördermittel. Treten mittelfristig "ökologisch korrekte" Energiepreise an die Stelle der heutigen Preisgestaltung an den Energiemärkten, kann auf andere Unterstützungsmaßnahmen zur Markteinführung von REG verzichtet werden. Dies ist für den Zeitraum nach 2010 bis auf wenige Ausnahmen (z. B. Photovoltaik) unbedingt anzustreben.

#### 4. Perspektiven regenerativer Energien in Deutschland bis 2050

Mit dem Einsatz des genannten Maßnahmenbündels kann eine Verdopplung des Beitrags von REG innerhalb eines Jahrzehnts erreicht werden; die Marktvolumina der Technologien – bis auf diejenigen der Wasserkraft und der Windenergie – vergrößern sich um das Fünf- bis Zehnfache. Dabei wird vorausgesetzt, dass in demselben Zeitraum der liberalisierte Energiemarkt aus seiner derzeitigen Umbruchphase herausgetreten, hinreichend ökologisch flankiert ist und ausgewogene Marktbedingungen für die hier behandelten Technologien, aber auch für andere umweltschonende und effiziente Energietechnologien, herrschen. Ebenfalls wird unterstellt, dass der Ausbau von REG in eine insgesamt nachhaltigere Energiepolitik eingebunden ist. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass die politischen Bemühungen, die Klimaschutzziele gemäß den Kyoto - Vereinbarungen umzusetzen, erste Erfolge zeitigen und die längerfristigen Zielsetzungen dann konkreter Bestandteil einer nachhaltigen Energiepolitik sind. Unter diesen Voraussetzungen kann sich die durch das Verdopplungsziel 2010 eingeleitete Wachstumsdynamik für REG fortsetzen. Hinzu kommt, dass zu diesem Zeitpunkt ein ausreichend hoher Bedarf an neuen Anlagen in der Energieversorgung bestehen wird, da heutige Überkapazitäten abgebaut sein werden. In Kombination mit einer zeitlich vorrangigen Mobilisierung von Energieeffizienzpotentialen bei Umwandlung und Nutzung können Klimaschutz und Ressourcenschonung mit Aussicht auf Erfolg erreicht werden.

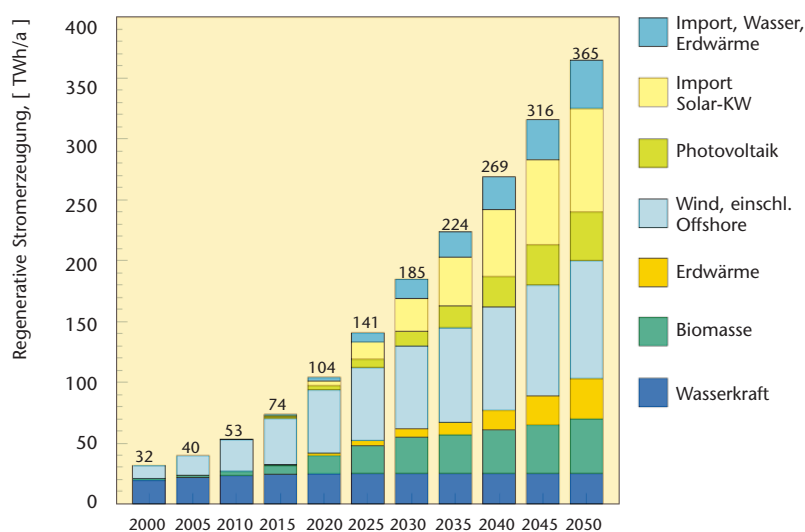
Das Szenario "Solare Energiewirtschaft" greift diese Rahmenbedingungen für die deutsche Energieversorgung auf und beschreibt den für REG erforderlichen Wachstumspfad und die zu ihrer sinnvollen Einbettung erforderlichen "Vorleistungen" im Bereich von REN und KWK. Selbst unter der Annahme einer im Vergleich zu heute zweifachen Wirtschaftsleistung im Jahr 2050 kann durch konsequente Mobilisierung technischer Einsparpotenziale der Verbrauch an Endenergie auf rund 60% des derzeitigen Verbrauchs reduziert werden. Bei einer mit heute vergleichbaren Qualität der Energiebereitstellung decken zu diesem Zeitpunkt REG 60% des Energiebedarfs; die gesamten CO<sub>2</sub> - Emissionen erreichen mit 200 Mill. t/a bzw. 20% des Wertes von 1995, die Zielmarke der Enquete-Kommission. Bereits im Jahr 2010 wird 20% weniger Energie verbraucht, die CO<sub>2</sub>-Emissionen liegen, trotz Halbierung des Kernenergiebeitrags, mit 660 Mill. t/a bei 75% des Wertes von 1995. Im Jahr 2030 beträgt das Energieverbrauchs-niveau noch zwei Drittel des heutigen Wertes (bei annähernd konstantem Stromverbrauch), die CO<sub>2</sub>-Emissionen sind auf 460 Mill. t/a gesunken [5].

Das Szenario zeigt auch, wie die Umstrukturierung der Stromversorgung verlaufen sollte, wenn Klimaschutz und Risikominimierung durch Verzicht auf die Kernenergie als gleichgewichtige Ziele angesehen werden. Beim Umbau der Stromversorgung in Richtung Nachhaltigkeit können zwei Etappen unterschieden werden. Der erste, fünfzehn- bis zwanzigjährige Abschnitt ist – neben verstärkten Stromeinsparanstrengungen – im wesentlichen durch den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) gekennzeichnet, deren Beitrag an der Brutto-Stromerzeugung von 9% auf 25 bis 30% wächst. Im Szenario werden diese Zubauziele durch einen Rückgang der Erzeugung aus Kondensationskraftwerken um 15% (Kernenergie, Braunkohle bei gleichzeitiger Zunahme von Erdgas) erreicht. Vom Zuwachs bei der Kraft-Wärme-Kopplung profitiert neben Steinkohle vor allem das Erdgas, so dass der gesamte Steinkohleeinsatz zur Stromerzeugung konstant bleibt und derjenige des Erdgases auf das 2,5-fache wächst. Der Braunkohleeinsatz sinkt dagegen bis 2010 auf 75% des heutigen Wertes. Trotz Halbierung des

Beitrags der Kernenergie sinken die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Stromerzeugung von derzeit 320 Mio. t/a auf 295 Mio. t/a infolge des Ausbaus der Kraft-Wärme-Kopplung, des Anstiegs der REG-Stromerzeugung und der Verschiebung des Brennstoffeinsatzes zum Erdgas. Diese Etappe des Umbaus der Stromversorgung kann nur eingeleitet werden, wenn in den kommenden Jahren Kraftwerksneubauten vorrangig auf der Basis von Kraft-Wärme-Kopplung und REG vorgenommen werden und dadurch Kondensationsleistung zurückgedrängt wird. Dies macht deutlich, dass es unter den derzeitigen Bedingungen des liberalisierten Strommarktes auch bei der Kraft-Wärme-Kopplung nicht nur um einen Bestandsschutz gehen kann, sondern wirksame Maßnahmen ergriffen werden müssen, welche eine nennenswerte Ausweitung ihres Anteils innerhalb eines Jahrzehnts erlauben (z. B. mittels der derzeit diskutierten Quotenregelung). Auch die inzwischen für die Kernenergie vereinbarten Restlaufzeiten und der entsprechende Rückbau der Kraftwerke sind eine wesentliche Erleichterung für den relevanten Ausbau von KWK und REG in der Stromerzeugung.

Die zweite Etappe des Umbaus der Stromversorgung in Richtung Nachhaltigkeit ist durch einen deutlichen Zuwachs von REG-Anlagen gekennzeichnet, der nach 2010 mit sich beschleunigender Marktdynamik bei allen Technologien einsetzt. Der Gesamtbeitrag fossil gefeuerter Kraftwerke wird in diesem Zeitabschnitt stark durch sehr effiziente erdgasgefeuerte Kraftwerke und Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen geprägt, darunter auch Brennstoffzellen. Erstere übernehmen in zunehmendem Maße auch den Ausgleich zwischen dem fluktuierendem Stromangebot aus Wind und Sonnen und der Stromnachfrage. Hinzu tritt ab 2015 importierter Strom aus solarthermischen Kraftwerken, Wasser- und Erdwärmekraftwerken. Im Jahr 2030 deckt die Windenergie einschließlich Offshore-Anlagen bereits 70 TWh/a, Biomassekraftwerke 30 TWh/a (Abb. 5). Auch die Photovoltaik leistet mit 12 TWh/a bereits einen beachtlichen Anteil. Etwa 40 TWh/a REG-Strom wird importiert. REG haben die 30%-Marke bei der Stromerzeugung überschritten.

Nach 2030 werden REG zur Hauptquelle der Stromerzeugung; im Jahr 2050 decken sie 60% der Stromnachfrage. Es dominiert die Windenergie mit 105 TWh/a (42 GW Leistung einschließlich Offshore-Anlagen), gefolgt von der Photovoltaik mit 40 TWh/a (45 GW Leistung), der Biomasse und der Erdwärme mit je 35 TWh/a und der Wasserkraft mit 25 TWh/a. Der Importanteil an der Bruttostromerzeugung beträgt 21 %, die Nutzung von REG ist innerhalb eines europäischen Stromverbundnetzes optimiert.



Weitere 25 % des Stroms kommen aus mit Erdgas, Biomasse und Kohle betriebenen Anlagen der Kraft-Wärme-Kopplung. Der restliche Beitrag fossiler Energien bei Kondensationskraftwerken stützt sich weitgehend auf gasgefeuerte Gas-Dampf- und Gasturbinenanlagen. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Stromerzeugung, welche bereits im Jahr 2030 auf 230 Mio. t/a gesunken waren, betragen im Jahr 2050 nur noch 90 Mio. t/a. Die Nutzung der Kernenergie ist gegen 2020 eingestellt worden; die Braunkohle wird spätestens im Jahr 2040 nicht mehr benötigt.

Damit ist das Potenzial der REG bei weitem noch nicht ausgeschöpft. Wasserkraft- und Biomasse stoßen zwar zwischen 2020 und 2030 an ihre Nutzungsgrenzen, die anderen inländischen Potenziale sind aber erst zu 30 – 35% erschlossen. Importpotenziale stehen noch in großem Ausmaß zur Verfügung. Auch nach 2050 sind daher beträchtliche Spielräume für

Abbildung 5  
Struktur der Stromerzeugung aus regenerativen Quellen in Deutschland im Szenario "Solare Energiewirtschaft" bis 2050.



eine weitgehende Deckung des Strombedarfs durch REG vorhanden, wenn eine Strategie der ausgewogenen Erschließung aller REG-Quellen innerhalb eines europäischen Stromverbundes verfolgt wird. Im Szenario "SEE" liegen die Anteile einzelner Energiearten im Jahr 2050 zwischen 5 und 15% bzw. erreichen bei massiver Erschließung maximal 20% (Beispiel Wind) und ergänzen sich daher in ihren Erzeugungscharakteristiken. Der Anteil deutlich fluktuierender REG, wie Wind und Photovoltaik wird einen Wert von 30% nicht wesentlich überschreiten, was bei entsprechender Anpassung der übrigen (fossilen) Kraftwerke beherrschbar ist. Importstrom ist wegen der Speichermöglichkeiten in solarthermischen Kraftwerken keinen kurzzeitigen Fluktuationen unterworfen; Wasserkraft hat lediglich saisonale Schwankungen, Geothermie ist einer fossilen Grundlastversorgung gleichwertig.

Das angestrebte REG-Wachstum ist auch mit der Alterstruktur der bestehenden Kraftwerke und den daraus resultierenden Bedarf an Ersatzinvestitionen kompatibel. Bei Annahme einer einheitlichen Nutzungsdauer aller Kraftwerke von 35 Jahren sind im Jahr 2010 noch 65% der bestehenden Kraftwerke in Betrieb, im Jahr 2020 sind es nur noch 25%. Ab 2002 entsteht eine Deckungslücke, die durch Stromimport, Verlängerung der Nutzungsdauer bestehender Kraftwerke oder durch Neubau gedeckt werden kann. Diese "Deckungslücke" entspricht bereits im Jahr 2010 einer Kraftwerksleistung von 20–25 GW. Infolge des zunächst nur langsam wachsenden REG-Beitrags besteht also ab diesem Zeitpunkt ausreichender Spielraum, bei anstehenden Neuinvestitionen auch die Erfordernisse einer wachsenden Einspeisung von Strom aus diesen Energien zu berücksichtigen. Auch für den angestrebten verstärkten Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung besteht genügend Spielraum. Die für eine Stromversorgung mit hohem REG-Anteil wenig geeignete Grundlastkapazität kann bis 2030 abgebaut werden, wenn Neuinvestitionen in derartige Kraftwerke, also in Kernkraftwerke, Braunkohle- und große Steinkohlekraftwerke unterbleiben.

## 6. Schlußfolgerungen

Als Fazit der Betrachtungen im Rahmen des Szenarios "Solare Energiewirtschaft" kann festgehalten werden, dass ein konsequenter Ausbau einer Stromversorgung auf der Basis von REG bis in hohe Anteile über 50% nicht auf eine festgefügte Struktur konventioneller Kraftwerke trifft. Die Ausgestaltung einer derartigen Stromversorgung wird nicht durch die heutige Kraftwerksstruktur und deren Erfordernisse eingengt. Im Zuge von Ersatz- und Neuinvestitionen wandelt sich auch der konventionelle Kraftwerkspark und kann in einem weiten Bereich so gestaltet werden, dass zusammen mit den solaren Anlagen eine jederzeit sichere, effiziente und auch ökonomisch günstige Systemlösung entstehen kann. Kurzfristig ist wesentlich, dass anstehende Neuinvestitionen in ausreichendem Maße bei gasgefeuerten Anlagen vorgenommen werden. Dies wird aber im liberalisierten Energiemarkt zur Zeit sowieso verfolgt. Weniger gesichert ist dagegen die ebenfalls erforderliche Ausweitung von Anlagen zur Kraft-Wärme-Kopplung. Langfristig wird der Bedarf an reinen Grundlastkraftwerken im Zuge des Ausbaus von REG stark zurückgehen und es werden flexible Anlagen mit geringen Fixkosten und kleineren Leistungen favorisiert. Diese aus der Sicht einer verstärkten Nutzung von REG wünschenswerten Strukturänderungen sind auch weitgehend mit den durch den liberalisierten Strommarkt gesetzten Rahmenbedingungen kompatibel.

Mit einer zeitlichen Verzögerung zum Strombereich wird auch der Wärmemarkt von den Umstrukturierungen ergriffen. Hier liegt der Schwerpunkt zunächst eindeutig bei der Mobilisierung der großen Einsparpotenziale im Altbaubestand. Das Verdopplungsziel für REG schafft jedoch auch hier die Voraussetzungen für einen Übergang zu einer Wärmeversorgung auf REG-Basis. Im Szenario hat daher der Aufbau von Nahwärmeversorgungen, die aus Biomasse-Heizzentralen und Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen sowie aus Solar- und Erdwärmeanlagen versorgt werden, einen hohen Stellenwert. Auch in diesem Bereich zeigt sich, dass Effizienzsteigerungen in bestehenden Einrichtungen und Anlagen und der Umbau des Energiesystems Hand in Hand gehen müssen,

um langfristig tragfähige Versorgungsstrukturen zu schaffen.

Die hier am Beispiel des Szenarios "Solare Energiewirtschaft" skizzierten Wechselwirkungen bei der erforderlichen Umstrukturierung der Energieversorgung machen deutlich, dass ein substantieller Ausbau der Nutzung von REG innerhalb des nächsten Jahrzehnts eine unverzichtbare Voraussetzung darstellt, wenn die längerfristigen Ziele einer deutlichen Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen fristgerecht erreicht werden sollen. Dabei ist sowohl das Zeitfenster als auch die Höhe der mobilisierbaren Beiträge von Bedeutung. Die ersten "Etappenziele" beim Klimaschutz könnten zwar auch ohne den Ausbau von REG erreicht werden. Nach einer weitgehenden Ausschöpfung dieser kostengünstigen CO<sub>2</sub>-Reduktionspotentiale in den Bereichen "Energieeinsparung und Kraft-Wärme-Kopplung" würde der weitere Reduktionsprozess jedoch ins Stocken geraten.

Für zwei weitere Handlungsfelder in der Energiepolitik ist die substantielle Nutzung von REG ebenfalls unerlässlich und muss in absehbarer Zeit mit sichtbaren Erfolgen vorangebracht werden. Der eine Bereich stellt die Reduktion bzw. der gewünschte Verzicht auf die Nutzung der Kernenergie mit der Zielsetzung der Risikominimierung dar, der auch äquivalenten Einsatz von REG verlangt, wenn das Klimaschutzziel nicht verletzt werden soll.

Das zweite Handlungsfeld betrifft die Befriedigung der rasch wachsenden Energienachfrage in den weniger entwickelten Ländern.

Die globalen Ziele des Klimaschutzes und der Ressourcenschonung können nur erreicht werden, wenn diesen Ländern rechtzeitig und in ausreichendem Maße ausgereifte und kostengünstige, dezentrale und zentrale REG-Technologien angeboten werden können. Der selbstverständliche kommerzielle Einsatz dieser Technologien in den Industrieländern innerhalb des nächsten Jahrzehnts ist dafür eine entscheidende Voraussetzung. Zeitgleich müssen aber die schwierigen Probleme der Finanzierung und der Integration dieser Technologien in eine teilweise noch wenig entwickelte Infrastruktur der Entwicklungsländer gelöst werden.

## Literatur

- [1] J. Nitsch: "Entwicklungsperspektiven erneuerbarer Energien und ihre Bedeutung für die Energieversorgung von Entwicklungsländern." In Tagungsband: "Märkte der Zukunft – Erneuerbare Energien für Entwicklungsländer." Tagung des Wirtschaftsministeriums Baden-Württemberg, Friedrichshafen, 17.11.1999
- [2] G. Altner; H.-P. Dürr, G. Michelsen, J. Nitsch: Zukünftige Energiepolitik – Vorrang für rationelle Energienutzung und regenerative Quellen, Bonn 1995.
- [3] J. Nitsch, M. Fishedick, N. Allnoch, F. Staiß u.a.: Klimaschutz durch Nutzung erneuerbarer Energien. Studie im Auftrag des BM für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit und des Umweltbundesamtes, Stuttgart, Berlin, Nov. 1999.
- [4] Prognos AG (Hrsg): Energiereport III – Die längerfristige Entwicklung der Energiemärkte im Zeichen von Wettbewerb und Umwelt. Schäffer-Poeschel Verlag Stuttgart, 2000
- [5] J. Nitsch, F. Trieb: Potenziale und Perspektiven regenerativer Energieträger. Gutachten im Auftrag des Büros für Technikenfolgen-Abschätzung am Dt. Bundestag Stuttgart, März 2000.

## weiterführende Literatur:

Dt. Bundestag (Hrsg.): Mehr Zukunft für die Erde. Schlußbericht der Enquete-Kommission "Schutz der Erdatmosphäre". Economica Verlag, Bonn 1995

J. Nitsch, J. Luther u.a.: "Strategien für eine nachhaltige Energieversorgung – ein solares Langfristszenario für Deutschland." In: Strategien für eine nachhaltige Energieversorgung. Workshop des Forschungsverbunds Sonnenenergie. Hrsg: H. Hertlein, Köln 1998