

# Erneuerbare Energien – Ausbauszenarien für Deutschland<sup>1</sup>

Joachim Nitsch, DLR Stuttgart

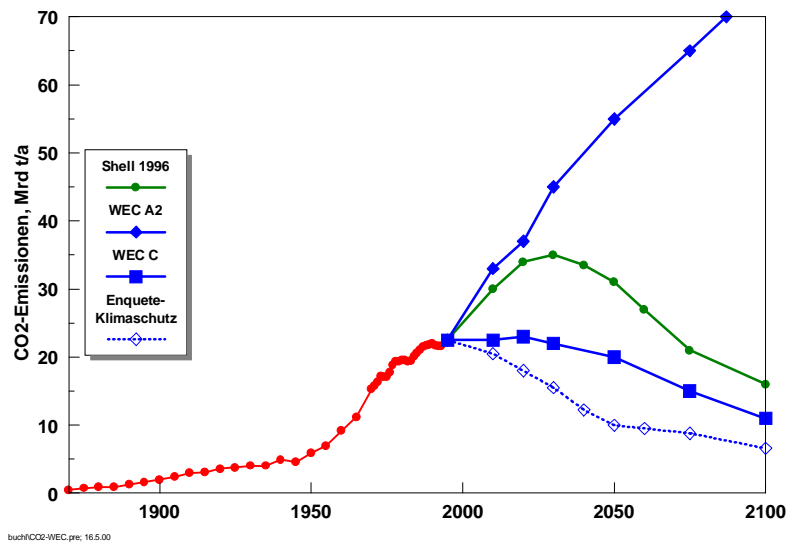
## 1. Bedeutung der erneuerbaren Energien für die zukünftige Energieversorgung

Nachhaltigkeit ist aus ökologischer Sicht eng mit der Endlichkeit nicht regenerierbarer Ressourcen und der begrenzten Aufnahmefähigkeit von Ökosystemen für Abfälle und Emissionen verknüpft. Beide Problemfelder treten bei der Energieversorgung in besonderem Ausmaß in Erscheinung. Seit Beginn der Industrialisierung wächst der Energieverbrauch deutlich rascher als die Anzahl der Menschen. Während die Weltbevölkerung seit 1870 um den Faktor 4 auf jetzt 6 Mrd. Menschen stieg, wuchs der kommerzielle Energieverbrauch um den Faktor 60 (!) - und damit der Verbrauch fossiler Ressourcen an Kohle, Mineralöl und Erdgas - auf derzeit 390 EJ/a. Der Durchschnittsmensch verbraucht also heute 15mal mehr Energie als 1870. Entsprechend folgte der Anstieg der globalen Kohlendioxidemissionen, die jetzt 23 Mrd. t CO<sub>2</sub>/a erreicht haben .

Da die Weltbevölkerung im Jahr 2050 bei knapp 10 Mrd. Menschen liegen wird, wäre eine ungebrochene Fortschreibung dieser Wachstumstendenzen und ihre Übertragung auf die Volkswirtschaften der Schwellen- und Entwicklungsländer mit einer weiteren, enormen Zunahme des globalen Energieverbrauchs verbunden, was aus Ressourcengründen zu einer extremen Ausbeutung der Kohle-, sowie anderer „exotischer“ fossilen Rohstoffen, wie Ölschiefer, führen würde, da Öl und Gas rasch zur Neige gingen. Aber vor allem aus Gründen des Klimaschutzes wäre diese Entwicklung völlig inakzeptabel. Am Beispiel des Szenarios A2 des World Energy Council /WEC 1995/ (**Bild 1**) wird deutlich, mit welchen Konsequenzen für die globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen eine derartiges „Laufenlassen“ der historischen Entwicklung verbunden wäre. Kurz nach 2050 hätte sich der CO<sub>2</sub>-Ausstoß gegenüber heute verdreifacht. Stattdessen muss jedoch eine Verringerung der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zur Mitte des nächsten Jahrhunderts angestrebt werden, wenn die durch menschliche Eingriffe entstehenden Klimaveränderungen in tolerierbaren Grenzen gehalten werden sollen. Deshalb lautet auch die Empfehlung der Enquete-Kommission: „Schutz der Erdatmosphäre“ aus dem Jahre 1995, die CO<sub>2</sub>-Emissionen bereits bis zum Jahr 2050 auf rund 50% des heutigen Wertes zu reduzieren (gestrichelte Linie in Bild 1). Nur sogenannte „ecologically driven scenarios“, also Zukunftsentwürfe, welche der Ressourcenschonung und der Klimastabilisierung Vorrang einräumen, wie das Szenario WEC C, zeigen in die „richtige“ Richtung. In diesen Szenarien spielen sehr effizienter Einsatz von Energie und die Modernisierung der Energieversorgungsstrukturen eine zentrale Rolle. Da aber auch die modernste Technik beim sparsamen Energieeinsatz an ihre Grenzen gerät, ist die zweite unverzichtbare Säule einer zukünftigen Energieversorgung der beschleunigte Ausbau erneuerbarer Energien im globalen Maßstab.

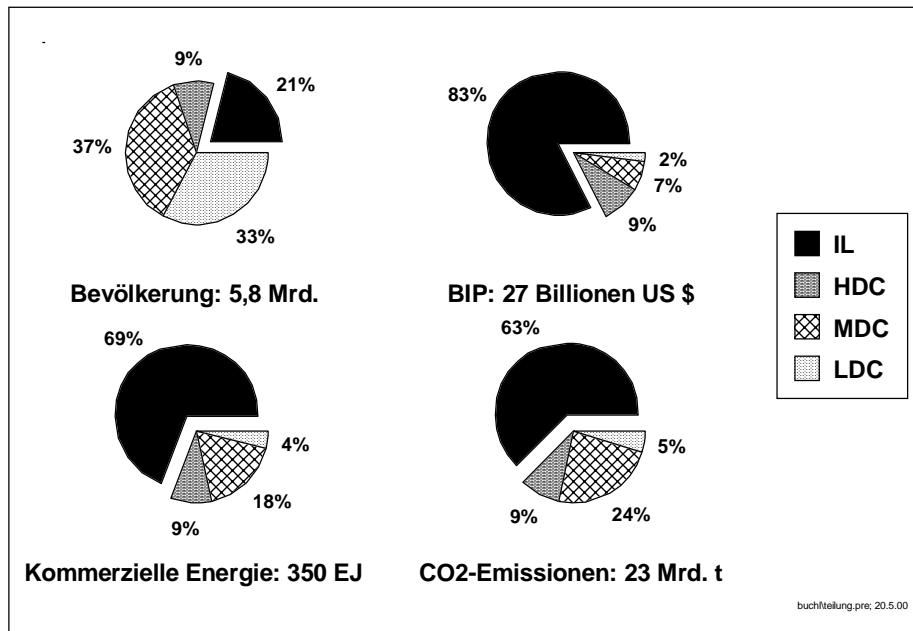
---

<sup>1</sup> Vortrag anlässlich des 5. Kasseler Symposiums "Energie-Systemtechnik", 9./10.11.2000. ISET. Kassel.



**Bild 1:** Die Entwicklung der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen in verschiedene Szenarien des World Energy Council (WEC), im „Shell – Szenario“ und die Empfehlung der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Nachhaltigkeit umfasst allerdings mehr als nur den Schutz der natürlichen Lebensgrundlagen. Gerechtigkeit, soziale Stabilität und ausreichende Bildungschancen sind von ebenso großer Bedeutung, wenn der Menschheit der Weg in eine zukunftsfähige Gemeinschaft gelingen soll. Eine wesentliche Voraussetzung dafür ist die Verringerung des starken Wohlstandsgefälle zwischen Industrieländern und Entwicklungsländern (**Bild 2**). Heute produziert und konsumiert 21% der Weltbevölkerung in den Industrieländern (IL) 83% der weltweiten Güter und Dienstleistungen (gemessen am Bruttoinlandsprodukt ihrer Volkswirtschaften), verbraucht dafür 70% der kommerziellen Primärenergie (sogar 75% der Elektrizität) und emittiert 63% der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen



**Bild 2: Kenndaten der zweigeteilten Welt im Jahr 1998 und ihre Aufteilung auf die Industrieländer und auf drei Gruppen von Entwicklungsländern**

Dagegen müssen sich 33% der Weltbevölkerung in den ärmsten Ländern (LDC) mit 2% des Wohlstands und 4% der kommerziellen Energie begnügen. Sie sind dafür auch nur für 5% der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen „verantwortlich“. Die auf Gruppen bezogenen Durchschnittswerte glätten dabei noch die extremen Spreizungen der länderspezifischen Kennwerte. So verbraucht der Durchschnittsamerikaner 25-mal mehr Energie pro Kopf als der Durchschnittsafrikaner und liegt damit um das Fünffache über dem globalen Durchschnitt. Die ärmsten Länder (Äthiopien, Niger, Bangladesh u.a.) müssen dagegen mit einem **Hunderstel** der (kommerziellen) Energie eines Amerikaners auskommen. Auch der Durchschnittsdeutsche liegt mit rund 200 GJ/Kopf, a um das Dreifache über dem Weltdurchschnitt.

Aus der Sicht der Energieversorgung werden Entwicklungsländer gewöhnlich mit „dezentralen“, d.h. mit nur wenig ausgebauten oder nicht vorhandenen Versorgungsstrukturen gleichgesetzt, also mit isolierten Verbrauchern, die keinen Zugang zu einem Stromnetz haben und die wegen schlechter Verkehrsinfrastrukturen nur in geringem Maße über Öl verfügen, das dazu für die ländliche Bevölkerung meist unerschwinglich teuer ist. Tatsächlich leben rund zwei Drittel der Bevölkerung der Entwicklungsländer, 3 Mrd. Menschen, also die Hälfte der Menschheit so. Rund 2 Mrd. Menschen verfügen über keine Stromversorgung aus überregionalen oder dezentralen Stromnetzen. Dort ist auch der Verbrauch nichtkommerzieller Energie, also hauptsächlich von Brennholz für Kochzwecke, der auf rund 10% des globalen Energieverbrauchs geschätzt wird (IEA 1999) nahezu ebenso hoch wie der Verbrauch kommerzieller Energie. Selbst in den besser gestellten Entwicklungsländern beträgt der Verbrauch dieser nicht nachhaltig „geernteten“ Biomasse immerhin noch 20 – 25% des Gesamtverbrauchs. Gleichzeitig befinden sich die Entwicklungsländer in einem unaufhaltsamen Trend der Verstädterung. Bereits in 15 Jahren werden die Hälfte ihrer Menschen (2015 nahezu 6 Mrd.) in Städten wohnen, die i. allg. deutlich größer sind, als die Weltstädte in der nördlichen Hemisphäre. Von den derzeit 15 Städten über 10 Mio. Einwohner befinden sich 11 mit zusammen 140 Mio. Menschen in den Entwicklungsländern, wobei Mexiko City, Sao Paulo und Bombay die größten sind. Im Jahr 2010 werden bereits mehr als 20 Städte dieser Größe mit dann 350 Mio. Menschen in den

Entwicklungsländern zu finden sein. Eine weitere Mrd. Menschen wird in Städten mit über 1 Mio. Einwohner leben.

In den **Industrieländern** setzt bereits heute eine Umgestaltung der Energieversorgungsstrukturen in Richtung von mehr „Dezentralität“ ein, hervorgerufen durch technologische Entwicklungen, wie Gasturbinen und Motoren für Kleinkraftwerke mit hohem Wirkungsgrad, Brennstoffzellen, Windkraftanlagen, neuen Verfahren der Nutzung von Biomasse, wie z.B. Vergasung u.a. Unterstützt wird diese Entwicklung durch die rasante Entwicklung der Informationstechnologien und damit der vielfältigen Möglichkeiten der Regelung, Überwachung und Steuerung von vielen kleineren und vernetzten Energieanlagen. Auch die fortschreitende Liberalisierung der Energiemärkte schiebt in dieselbe Richtung. Sie verlangt nämlich geringere Kapitalbindung, kürzere Planungs- und Bauzeiten, höhere Flexibilität und Reaktionsfähigkeit.

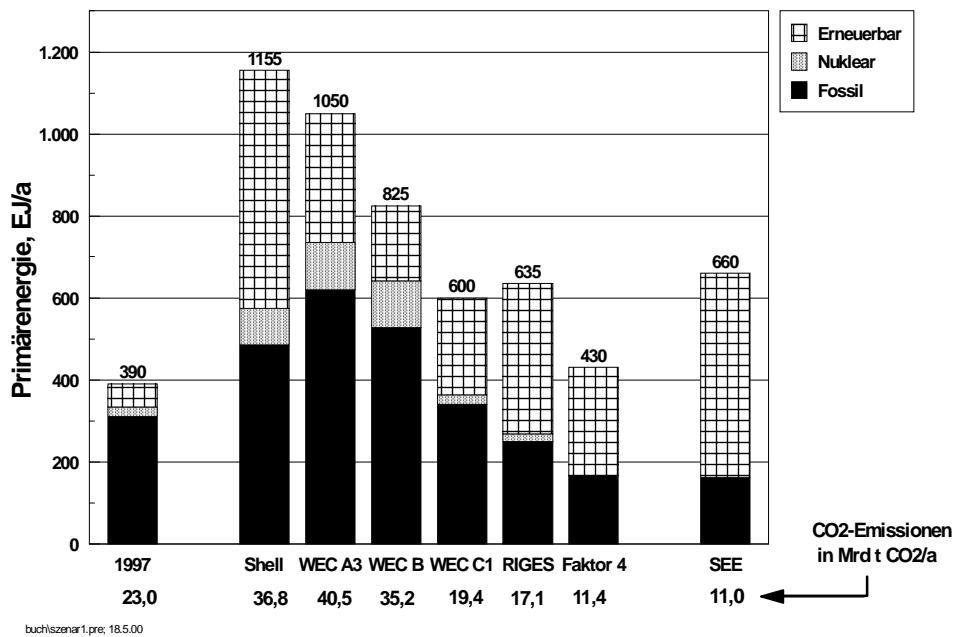
Für die **Entwicklungsländern** lautet die Alternative nicht „zentral“ oder „dezentral“, sondern die richtige Strategie besteht in der zweckmäßigsten Vernetzung von Anlagen unterschiedlicher Größe und Leistung. Es muss von vornherein eine möglichst optimale Kombination von dezentralen und zentralen Energieversorgungstechniken und -strukturen aufgebaut werden. Die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten erneuerbarer Energien fügen sich sehr gut in diese Strategie. Die Entwicklungsländer besitzen die Chance, mit Unterstützung der Industrieländer den Weg zu einer nachhaltigen und zukunftsfähigen Energieversorgung „abzukürzen“ und damit auch Entwicklungsdefizite aufzuholen.

## 2. Der Entwurf einer nachhaltigen globalen „solaren“ Energiewirtschaft

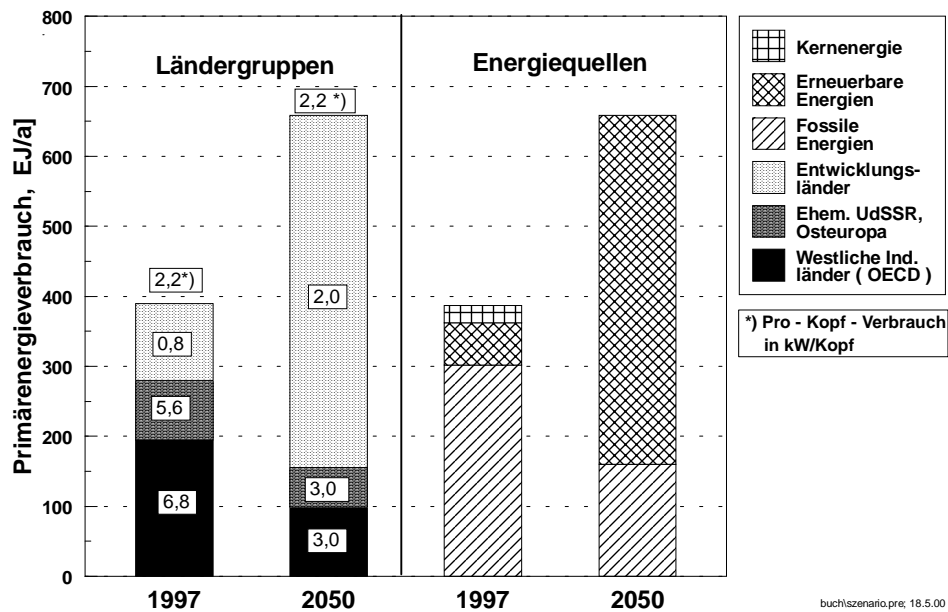
Derartige Überlegungen sind der Grund dafür, dass inzwischen die überragende Bedeutung erneuerbarer Energien für die zukünftige Energieversorgung erkannt worden ist. Aktuellere Untersuchungen zum zukünftigen Weltenergieverbrauch gehen stets von beträchtlichen Beiträgen erneuerbarer Energien, zwischen 25 und 75%, am jeweiligen Energieverbrauchs zur Mitte des nächsten Jahrhunderts aus. Dieses Ergebnis ist unabhängig davon, welches Ausmaß an effizienterem Umgang mit Energie angenommen und mit welchem zukünftigen Beitrag der Kernenergie gerechnet wird, (**Bild 3**). Die wohl umfassendsten Analysen sind dabei durch den World Energy Council (WEC) durchgeführt worden. Die Szenarien A beschreiben einen stark wachstums- und angebotsorientierten Prozess mit reichlich und preiswerten Energien. Szenario B wird als Trendszenario bezeichnet („so weiter wie bisher“), während die Szenarien der C-Gruppe Energiezukünfte beschreiben, die der Ressourcenschonung und dem Klimaschutz Vorrang geben. Sie machen sich damit Überlegungen zu eigen, die auch in den anderen Szenarien mit intensiver rationeller Energienutzung, wie sie im rechten Teil des Bildes dargestellt sind (RIGES, Faktor 4; SEE), angestellt wurden. Wichtig ist die Erkenntnis, dass all diese Zukünfte aus technischer und struktureller Sicht möglich sind, aber ein unterschiedliches Maß an politischem Handeln und gesellschaftlicher Einsicht erfordern. Trotz des langen Zeithorizonts sind allerdings die wesentlichen Richtungsentscheidungen für den einzuschlagenden Zukunftspfad schon heute zu treffen, weil sich die in den Szenarien abgebildeten Strategien in wenigen Jahrzehnten wechselseitig ausschließen.

An den sich einstellenden CO<sub>2</sub>-Emissionen des Jahres 2050 wird sichtbar, dass Zukunftsentwürfe, welche die Wachstumsdynamik der Vergangenheit in den Industrieländern fortschreiben und diese auch auf die Entwicklungsländer übertragen (Shell, WEC A, WEC B), trotz hoher Beiträge der erneuerbaren Energien das Klimaschutzziel verfehlen. Ihre CO<sub>2</sub>-Emissionen liegen im Jahr 2050 um 60 bis 80% über den heutigen Werten. Diese Tatsache unterstreicht die enorme Bedeutung eines weltweit wesentlich sparsameren Umgangs mit Energie - speziell in

den Industrieländern mit ihrem hohen Pro-Kopf-Verbrauch - wie ihn die Szenarien WEC C, RIGES und Faktor 4 annehmen. Die Beiträge erneuerbarer Energien im Jahr 2050 reichen bis zu 580 EJ/a (Shell-Szenario), was deutlich mehr als der gesamte derzeitige Weltenergieverbrauch



**Bild 3:** Aktuelle Szenarien des Weltenergieverbrauchs für das Jahr 2050 und Vergleich mit dem derzeitigen Verbrauch (Weltbevölkerung 2050: 9,5 Mrd; Shell = Szenario „Nachhaltige Entwicklung“ /Shell 1995/; WEC = World Energy Council 1995 und 1998 /WEC 1995, 1998/; RIGES = „Renewable intensive Global Energy Scenario“ /Johansson et.al 1993/; Faktor 4 = Szenario aus /Lovins, Hennicke 1999/; SEE = „Solar Energy Economy“, eigene Berechnungen, 1999)



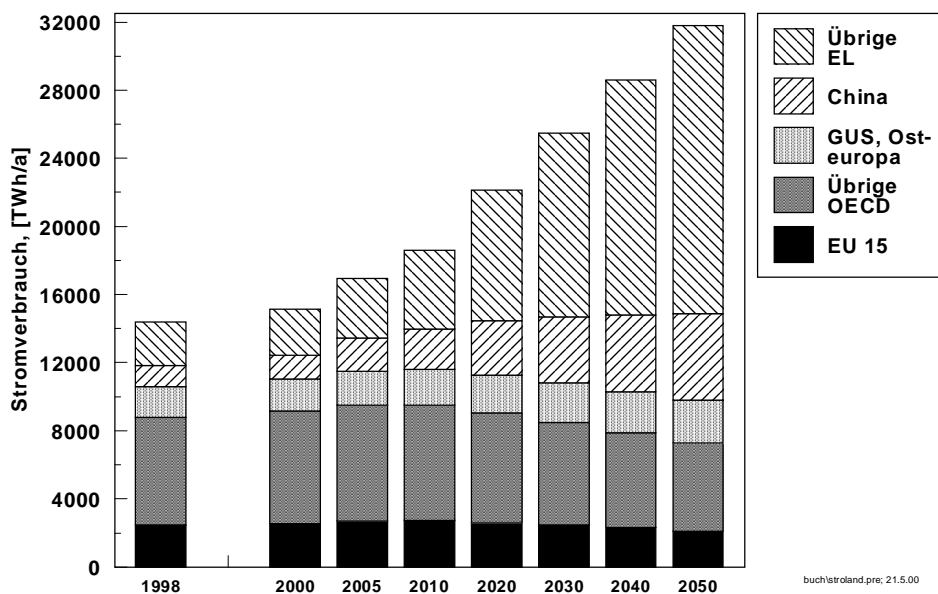
**Bild 4:** Struktur des globalen Primärenergieverbrauchs 1997 und des Szenarios „Solare Energiewirtschaft (SEE)“ für das Jahr 2050 nach Ländergruppen (links) und Energiequellen (rechts). Die Zahlenwerte in den Kästen der linken Seite stellen die jahresdurchschnittliche Pro-Kopf-Leistung in kW in der jeweiligen Ländergruppe dar.

ist. In den Effizienzzenarien werden dagegen „nur“ 400 bis 500 EJ/a benötigt, im Szenario Faktor 4 mit rigorosen Verbrauchsreduktionen sogar nur 270 EJ/a. Solche Beiträge der erneuerbaren Energien sind aus technischer und struktureller Sicht durchaus bereitstellbar. Da allerdings derzeit nur etwa 30 EJ/a erneuerbare Energien in nachhaltiger Form erzeugt werden – ein Teil der heutigen, nicht nachhaltigen Biomassenutzung muss ebenfalls ersetzt werden – gehen alle Szenarien von enormen und lang anhaltenden Wachstumsraten erneuerbarer Energien aus, damit auch tatsächlich ihr Beitrag innerhalb eines halben Jahrhunderts auf das gewünschte Niveau gesteigert werden kann.

Am Beispiel des in **Bild 4** mit SEE („Solar Energy Economy“) bezeichneten Zukunftsentwurfs kann gezeigt werden, welche Anstrengungen und Strukturveränderungen auf globaler Ebene erforderlich sind um der zweifachen Zielsetzung nach ökologischer und sozialer Verträglichkeit gerecht zu werden. Es gilt gleichzeitig, den „Überfluss“ an Energie in den meisten Industrieländern, als auch ihren „Mangel“ in den Entwicklungsländern zu bekämpfen. Diese Strategie geht davon aus, dass eine Angleichung der Lebensverhältnisse – ausgedrückt im Bild 5 durch den Pro-Kopf-Verbrauch an Primärenergie – zwischen Industrie- und Entwicklungsländern stattfinden wird. Insgesamt steigt so die globale Nachfrage nach Primärenergie proportional zur wachsenden Zahl der Menschen, also um rund 70%, (linke Seite in Bild 5) auf dann 660 EJ/a bis zum Jahr 2050. Davon entfallen dann auf die Entwicklungsländer 75%. Auch sie durchlaufen bei diesem Auf- und Umbau ihrer Energieversorgung einen Übergang zu wesentlich effizienteren Energiewandlungs- und Nutzungsstrukturen. Gleichzeitig sollen die globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen halbiert werden ohne dass die risikoreiche und missbrauchsfähige Technologie Kernenergie an die Stelle fossiler Energien tritt. Dies erfordert, dass der Beitrag umweltverträglich genutzter erneuerbarer Energien gegenüber heute um das Fünfzehnfache auf rund 500 EJ/a wächst. Das sind 30% mehr als der gesamte derzeitige Weltenergieverbrauch und macht deutlich, vor welch großen Herausforderungen die Menschheit steht.

### 3. Die Rolle erneuerbarer Energien in der globalen Stromversorgung

Die zukünftige Rolle der erneuerbaren Energien im globalen Energiesystem kann besonders gut am Beispiel der Deckung der Stromnachfrage 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% (**Bild 5**), im Durchschnitt jährlich 9 000 kWh/Kopf. Erst in den letzten Jahren ist eine gewisse Dämpfung der Zuwachsraten eingetreten. Wegen des großen Nachholbedarfs der Entwicklungsländer – ein Mensch in diesen Ländern muss jährlich mit durchschnittlich 780 kWh/Kopf auskommen - muss deshalb gerade hier, trotz großer spezifischer Einsparmöglichkeiten, mit einem besonders starken Wachstum gerechnet werden. Viele Szenarien gehen daher bereits bis zum Jahr 2020 von einer Verdopplung des weltweiten Stromverbrauchs aus. Die Annahmen im



**Bild 5: Globale Stromerzeugung nach Ländergruppen 1998 und von 2000 bis 2050 im Rahmen des Szenarios: „SEE“.**

Szenario „SEE“ zur globalen Stromversorgung setzen deshalb folgerichtig bei einem sehr effizienten Stromeinsatz in den Industrieländern an mit einer Reduzierung des Pro-Kopf-Stromverbrauchs um 30% bis 2050 sowie von einem beträchtlichen Zuwachs in den Schwellen- und Entwicklungsländern. Sie erreichen so eine reichliche Verdreifachung ihres jährlichen Pro-Kopf-Verbrauchs bis 2050, trotzdem verbrauchen sie auch dann noch mit durchschnittlich 2 800 kWh pro Jahr nur knapp die Hälfte an Strom wie ein Mensch aus den Industrieländern. Der gesamte globale Stromverbrauch steigt so bis 2050 „nur“ auf das 2,2-fache des heutigen Wertes, nämlich auf 31 800 TWh/a.

Bedeutendster Energieträger bei der Stromversorgung ist heute mit 40% Anteil die Kohle. Diese Rolle wird die Kohle selbst bei großen Anstrengungen zur Mobilisierung von erneuerbaren Energien auch für die nächsten 30 Jahre beibehalten (**Tabelle 1**), da in einigen Regionen Kohle reichhaltig und preiswert zur Verfügung steht und dort ihre verstärkte Nutzung Vorrang vor ökologischen Erwägungen hat. Eines dieser Länder ist China, dessen Stromverbrauch bereits heute beträchtlich wächst; er wird sich im Szenario SEE bis 2050 vervierfachen. Aber auch die Stromerzeugung aus Gas, die sehr effizient erfolgen kann, wird an Bedeutung gewin-

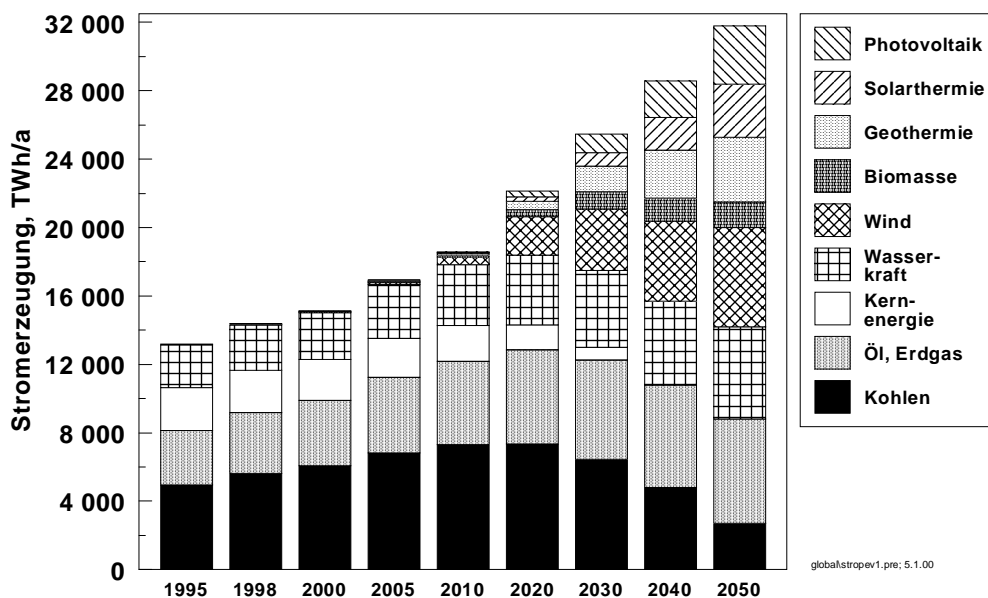
nen und kann längerfristig die Kohle vom ersten Platz der fossilen Energieträger verdrängen. Entsprechend der Zielsetzung des Szenarios geht der Beitrag der Kernenergie kontinuierlich bis zum Jahr 2040 auf Null zurück, da keine neuen Kraftwerke mehr errichtet werden. Aus diesen Zielvorgaben des Szenarios ergeben sich die Anforderungen für den notwendigen Beitrag der erneuerbaren Energien an der zukünftigen globalen Stromversorgung. Die erforderlichen Wachstumsraten sind sehr anspruchsvoll. Für eine rechtzeitige und angemessene Mobilisierung erneuerbarer Energien müssen diese 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, die zwischen 2040 und 2050 auf 3 %/a bei allerdings hohem absolutem Niveau sinken können, damit mit rund 70% Anteil im Jahr 2050 erneuerbare 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.

**Tabelle 1: Beitrag einzelner Energiequellen an der globalen Stromerzeugung im Rahmen des Szenarios. „SEE“ zwischen 2010 und 2050**

Energiequelle in TWh/a)	1998	2010	2020	2030	2040	2050
Kohlen	5 621	7 310	7 350	6 450	4 800	2 700
Öl und Erdgas	3 570	4 883	5 500	5 800	6 000	6 100
Kernenergie	2 480	2 100	1 460	770	0	0
<b>Wasserkraft</b>	<b>2 635</b>	<b>3 555</b>	<b>4 100</b>	<b>4 500</b>	<b>4 900</b>	<b>5 400</b>
<b>Andere REG</b>	<b>94</b>	<b>752</b>	<b>3 740</b>	<b>7 980</b>	<b>12 900</b>	<b>17 600</b>
Gesamterzeugung	14 400	18 600	22 150	25 500	28 600	31 800
<b>Gesamt REG</b>	<b>2 729</b>	<b>4 307</b>	<b>7 840</b>	<b>12 480</b>	<b>17 800</b>	<b>23 000</b>
Anteil REG %	<b>19</b>	<b>23</b>	<b>35</b>	<b>49</b>	<b>62</b>	<b>72</b>
<b>Durchschnittliche Wachstumsrate , %/a</b>		<b>17</b>	<b>16</b>	<b>8</b>	<b>5</b>	<b>3</b>

Von wesentlicher Bedeutung für eine erfolgreiche Erschließung der Stromerzeugungskapazitäten erneuerbarer Energien ist eine zeitlich und ökonomisch aufeinander abgestimmte Mobilisierung **aller Technologien**. Energiewirtschaftlich bedeutsame Beiträge können kurzfristig (d.h. bis 2010) nur von Technologien erbracht werden, die nahezu wettbewerbsfähig sind und bereits heute merkliche Beiträge leisten. Neben der Wasserkraft sind dies im nationalen wie im globalen Maßstab insbesondere die Windenergie und die Biomasse. Notwendig ist es aber auch, alle anderen Technologien in dem Ausmaß in den Markt einzuführen, dass sie nach 2010 mit energiewirtschaftlich relevanten Beiträgen an der zukünftigen Strombedarfsdeckung teilnehmen können. Für die Stromerzeugung aus Erdwärme und Solarwärme verlangt dies den Bau einer größeren Anzahl von Kraftwerken innerhalb des nächsten Jahrzehnts und spätestens ab 2010 die selbstverständliche Teilnahme am weltweiten Kraftwerkmarkt. Der Markt für Photovoltaik muss derart wachsen, dass bis 2020 ein Anteil von 1% an der globalen Stromerzeugung erreicht werden kann. Nur dann ist sichergestellt, dass die Potenzialerschließung zügig genug abläuft, um die obigen Wachstumsraten der erneuerbare Energien über mehrere Jahrzehnte aufrechterhalten zu können.

Eine aufeinander abgestimmte Erschließung aller Technologien ist auch erforderlich, um die ständige Verfügbarkeit von Strom bei hohen Anteilen erneuerbarer Energien an der Stromversorgung möglichst ökonomisch sicherstellen und den Aufwand für Reserve- und Ausgleichsleistung möglichst gering halten zu können. Auch nicht verwertbare Überschussleistungen aus Wind- und Solarstrom bzw. größere Speichermaßnahmen sollten vermieden werden. Dies gelingt durch die Kombination aller Technologien mit ihren sehr unterschiedlichen Angebotscharakteristika und durch eine möglichst großräumige Vernetzung der zahlreichen Anlagen, etwa innerhalb eines europäischen Stromverbundes, der neben der dezentralen Einspeisung auch den Stromtransport aus Gebieten hohen und sehr gleichmäßigen Angebots an erneuerbaren Energien enthält. Beachtet man dieser Kriterien und berücksichtigt die Überlegungen anderer globaler Szenarien, so kann der Ausbau erneuerbarer Energien in obigem Szenario SEE die in **Bild 6** dargestellte Struktur annehmen. Der weitere Ausbau der Wasserkraft orientiert sich bis 2020 an den Vorstellungen der Internationalen Energieagentur /IEA 1998/. Danach verlangsamt sich ihr Zubau aus Potenzialgründen; insgesamt verdoppelt sich ihr Beitrag bis 2050 gegenüber dem derzeitigen Beitrag von 2 635 TWh/a. Die Wasserkraft bleibt damit die nächsten 40 Jahre die bedeutendste Quelle erneuerbarer Energien für die Stromerzeugung und liefert dann immer noch 17% der globalen Stromerzeugung.



**Bild 6: Wachstum des Beitrags der erneuerbare Energien an der globalen Stromerzeugung im Szenario: „Solare Energiewirtschaft“ bis 2050**

Eine sich äußerst dynamisch entwickelnde Energietechnologie ist die Windenergie mit jährlichen weltweiten Zuwachsraten von rund 3 700 MW/a (1999). Im Szenario SEE 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 /Wind 1999/. Einschließlich Offshore - Anlagen entspricht dies zu diesem Zeitpunkt einer installierten Leistung von 900 GW. 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 5 800 TWh/a bzw. 2 200 GW. Ihr Beitrag zur globalen Stromerzeugung beläuft sich dann auf 18%.

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. 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 erneuerbare Energien. Für die Biomasse klingt nach 2030 aus Potenzialgründen der Zuwachs ab, was zu einem maximalen Anteil der Stromversorgung aus Biomasse von 1 500 TWh/a (knapp 5%) bzw. 375 GW im Jahr 2050 führt. Im Gegensatz dazu kann aufgrund des beträchtlichen Potenzials der HDR-Stromerzeugung bei einmal etablierter Technologie von einem weiteren Wachstum ausgegangen werden, was sie mit 3 800 TWh/a (600 GW) im Jahr 2050 zu einer wichtigen Säule einer auf erneuerbare Energien basierenden Stromversorgung macht. Sie stellt dann 12% der globalen Stromerzeugung.

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 einen angemessene Rolle im „Konzert“ der erneuerbare Energien 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 Zufeuerung 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 Kostensenkungspotentiale aufgrund wachsender Märkte und technologischer Fortschritte hinzu.

Beide Technologien ergänzen sich daher in sehr günstiger Weise bei der notwendigen intensiven Erschließung der Potenziale der solaren Strahlungsenergie, speziell in den vielfach einstrahlungsreichen Entwicklungsländern /TAB 1999/. Sie wachsen daher im Szenario SEE mit vergleichbaren Wachstumsraten. Für solarthermische Kraftwerke liegen konkrete Zubaukonzepte bis zum Jahr 2010 vor /Trieb 1998/, die als Grundlage benutzt werden. 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 3 100 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 PV an der globalen Stromversorgung erreicht auf diese Weise bis 2010 eine Leistung von 26,5 GW (1999 waren es etwas mehr als 1 GW), im Jahr 2020 bereits von 240 GW und im Jahr 2050 von 2 400 GW und deckt dann 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.

#### 4. Heutiger Beitrag erneuerbarer Energien in Deutschland und die Förderung ihrer Markteinführung.

Strom aus Wasserkraft und Windenergie sowie Wärme aus der Biomasse kennzeichnen heute die Energieversorgung aus erneuerbaren Energien in Deutschland (**Tabelle 2**). Die Beiträge der übrigen Technologien sind noch sehr gering. Mehr als diese Momentaufnahme zeigen jedoch die wachsenden Märkte, wie viel Bewegung in die Nutzung erneuerbarer Energien gekommen ist. Die Windenergie wächst zur Zeit mit atemberaubenden 50%/a, an Solarzellen werden jedes Jahr 30% mehr verkauft, bei Kollektoren sind es immerhin noch 20% je Jahr. Ursache für diese Wachstumsdynamik sind vor allem die in den letzten zwei Jahren deutlich verbesserten Rahmenbedingungen für die Markteinführung dieser Energieformen.

**Tabelle 2: Beiträge der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung und am Verbrauch von Brennstoffen im Jahr 1999**

Energietechnologie, Energiequelle	Elektrizität [GWh]	Wärme [GWh]
Wasserkraft	18 900	
Windenergie	8 500	
Photovoltaik	52	
Feste Biomasse (Holz, Stroh)	213	13 460
Bio-, Klär-, Deponiegas, Rapsöl	800	600
Solarthermische Kollektoren		900
Erdwärme		110
<b>Summe</b>	<b>28 465</b>	<b>15 070</b>
<b>Anteile an gesamter Erzeugung [%]</b>	<b>5,6</b>	<b>1,1</b>

Damit überhaupt nennenswerte Investitionen in erneuerbare Energien getätigt werden, müssen die gegenüber der bestehenden Energieversorgung bestehenden Differenzkosten entweder durch öffentliche Förderprogramme oder gesetzlich festgelegte Vergütungen aufgebracht werden. Im Jahr 1997 betrug die Förderung der Markteinführung erneuerbarer Energien insgesamt 750 Mio. DM/a. Im Jahr 1999 bewirkten das 100 000 Dächer-Programm für die Photovoltaik und das 200 Mio. Förderprogramm einen weiteren deutlichen Unterstützungsschub. Die für die Markteinführung aufgewandten Mittel stiegen in diesem Jahr auf insgesamt **1 050 Mio. DM/a** mit einem Beitrag des StrEG in Höhe von 500 Mio. DM/a. Umgelegt auf die jeweils im Strom- und Wärmemarkt abgesetzten Energiemengen, entsprechen diese „Fördermittel“ Aufschlägen von stromseitig 0,15 Pf/kWh<sub>el</sub> und wärmeseitig 0,03 Pf/kWh<sub>th</sub>.

Der weitere Ausbau der erneuerbaren Energien hängt im wesentlichen von zwei Einflussgrößen ab, der Entwicklung der zukünftigen Energiepreise und der Art und Wirksamkeit der Maßnahmen, die ergriffen werden, um die noch bestehenden Kostendifferenzen zur bestehenden Energieversorgung auszugleichen. Dabei wirken viele Faktoren mit, u.a. die Steuerpolitik in Form der ökologischen Steuerreform, die Entwicklung des Ölpreises, die Investitionspolitik im Strombereich oder die durch technischen Fortschritt und größere Umsätze noch erzielbaren Kostensenkungen bei den neuen „solaren“ Technologien. Das Ziel der Förderung der erneuerbaren Energien muss sein, sie so in den Energiemarkt zu integrieren, dass sie sich dort in absehbarer Zeit ohne Unterstützung behaupten können..

## 5. Ziel 2010: Verdopplung des Beitrags erneuerbarer Energien

Energieszenarien, die davon ausgehen, dass eine ausreichende CO<sub>2</sub>-Minderung zeitgerecht erreicht wird, zeigen übereinstimmend, dass dazu gleichrangig und parallel drei strategischen Klimaschutzelemente, nämlich „Rationellere Energienutzung“, „Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung“ und „Ausbau erneuerbarer Energien“ eingesetzt werden müssen. In richtiger zeitlicher Staffelung können die beiden ersten Strategieelemente die kurz- bis mittelfristigen Klimaschutzziele verwirklichen, während der Ausbau der erneuerbaren Energien sicherstellt, dass auch die längerfristigen, sehr ehrgeizigen Ziele erreichbar sind. Dies gilt insbesondere für Deutschland mit seiner Selbstverpflichtung von -25 % CO<sub>2</sub> bis 2005 bzw. -21 % im Zeitraum 2008 bis 2012 gemäß der Kyoto-Vereinbarung. Hinzu kommen die Empfehlungen der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre.“ von -50% bis 2020 und -80% bis 2050.

Die Bundesregierung hat aber noch ein weiteres energiepolitisches Ziel beschlossen, nämlich den Verzicht auf die Kernenergie. Dieses Ziel ist dann mit der gewünschten CO<sub>2</sub>-Reduktion vereinbar, wenn die Einsatzintensität der obigen Strategieelemente gegenüber der Trendentwicklung deutlich erhöht wird. Die vorliegenden Szenarien und Modellrechnungen legen es nahe, folgende energiepolitischen Ziele bis zum Jahr 2010 zu vereinbaren, um den Klimaschutzziele gerecht zu werden und um die Handlungsspielräume für die Neugestaltung der Energieversorgung in den nächsten Jahrzehnten substantiell zu erweitern:

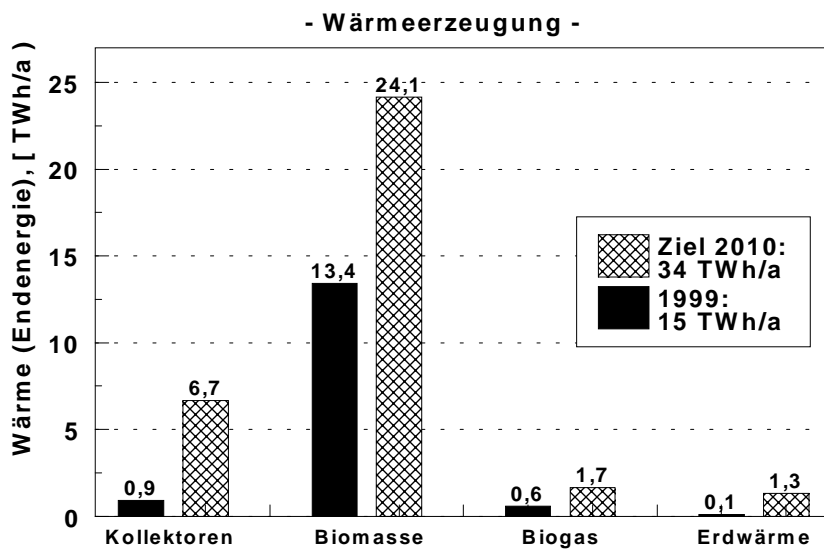
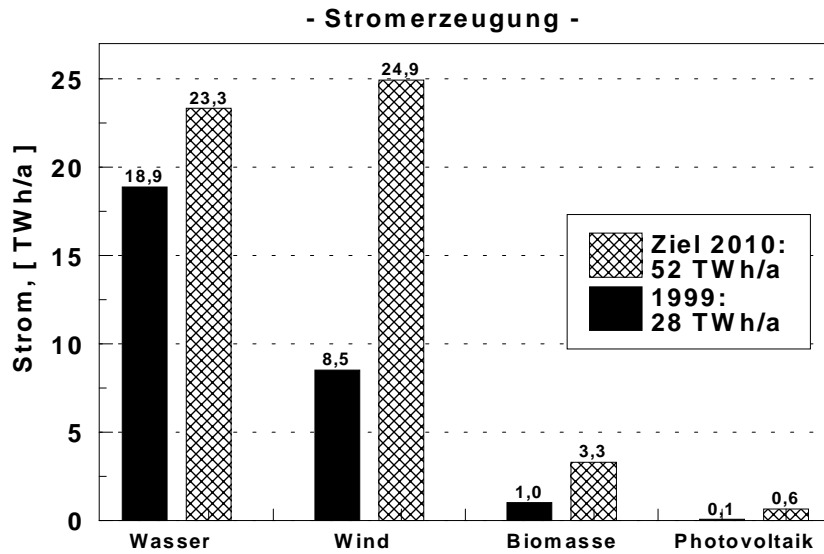
- **Wachstum der Energieproduktivität (dem Verhältnis von Bruttoinlandsprodukt zu Primärenergieeinsatz) pro Jahr um etwa 3 % ( im Trend etwa 1,9 % p.a.);**
- **Mindestens Verdopplung des Beitrags der industriellen und kommunalen Kraft-Wärme/Kälte-Kopplung;**
- **Mindestens Verdopplung, besser Verdreifachung der Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energien.**

Das Ziel einer Verdopplung des Beitrags erneuerbarer Energien bis 2010 ist also nur **ein Teilziel** einer umfassenderen energiepolitischen Strategie, die über 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 Technologien der Nutzung erneuerbarer Energien an der zukünftigen Energieversorgung. 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. erneuerbaren 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 anwächst 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 folgende Struktur der erneuerbaren Energien im Jahr 2010 (**Bild 7**)

Die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien steigt mit 52 TWh/a auf einen Anteil von 10,2 %. Der größte Anteil am Zuwachs kommt mit 70% von der Windenergie. Sie übertrifft 2010 mit 25 TWh/a bzw. 12 500 MW bereits die Wasserkraft. Die größten Steigerungsraten entfallen jedoch auf die Photovoltaik, die ihren Beitrag mit dann 700 MW auf das Zwölfwache steigert und

auf Strom aus Biomasse und Biogas, die ihren Beitrag mehr als verdreifachen. Die Wärmezeugung aus erneuerbaren Energien ist mit 34 TWh/a zu 2,3% an der 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 erneuerbaren Energien 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 Technologien 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 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.



buchzie2010\_pre8.6.00

**Bild 7: Struktur des Beitrags erneuerbarer Energien im Jahr 2010 bei einer ungefähren Verdopplung ihres Anteils an der Energieversorgung.**

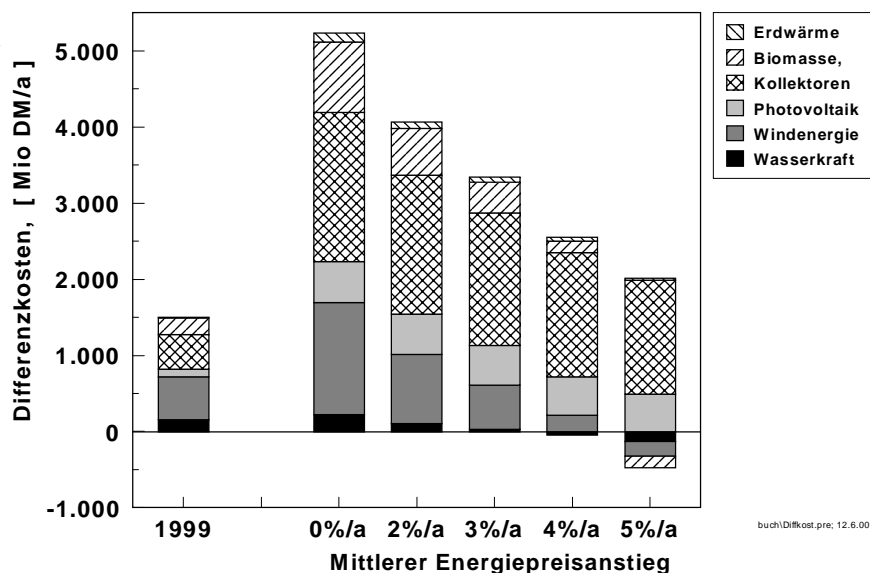
## 6. Ökonomische Eckdaten des Ausbaus erneuerbarer Energien bis 2010.

Die Verwirklichung des Verdopplungsziels führt zu deutlich wachsenden Investitionen in erneuerbare Energien. Das jährliche Marktvolumen für Neuanlagen (ohne Ersatzbedarf, ohne Exportmarkt) steigt bis zum Jahr 2010 auf 7 Mrd. DM/a, die kumulierte Investitionssumme zwischen 2000 und 2010 beläuft sich auf rund 60 Mrd. DM. Die zu tätigen Investitionen teilen sich etwa je zur Hälfte auf stromerzeugende und wärmeerzeugende Anlagen auf, wenn man die Nahwärmenetze, die insgesamt ein Investitionsvolumen von 5 Mrd. DM erfordern, ebenfalls berücksichtigt. Der Wärmemarkt erhält also im Szenario „Verdopplung“ ein annähernd gleiches Gewicht wie der Strommarkt. Je rund 20 Mrd. DM werden in die Windenergie und in Kollektoranlagen investiert, etwa 10 Mrd. DM in Biomasseanlagen.

Aus diesen Investitionen resultieren die Energiekosten der erneuerbaren Energien. Sie setzen sich zusammen aus dem Kapitaldienst, den Wartungs- und Betriebskosten, sonstigen Kosten,

wie Planungskosten, Versicherungen u.ä. und einer angemessenen Rendite für das eingesetzte Kapital. Vergleicht man sie im zeitlichen Ablauf mit „anlegbaren“ Preisen der konventionellen Energiebereitstellung so erhält man Hinweise darauf wie die Differenzkosten sich bis zum Jahr 2010 entwickeln. Derzeit betragen diese Differenzkosten rund 1,5 Mrd. DM/a (**Bild 8**; 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 z.B. eher vorsichtig einen mittleren realen Preisanstieg von 2%/a für die nächsten 10 Jahre voraus, was bei Strom einen Anstieg der mittleren anlegbaren Preise von 10 Pf/kWh auf 12,7 Pf/kWh im Jahr 2010 und bei Wärme von 8,5 Pf/kWh auf 10,6 Pf/kWh bedeutet, so erhöhen sich die Differenzkosten infolge der zusätzlichen Investitionen bis 2010 auf etwa 4 Mrd. DM/a (vgl. Bild 8; 3. Balken). Dabei ist schon berücksichtigt, dass sich viele Anlagen mit steigenden Stückzahlen verbilligen. Die einzelnen Technologien sind sehr unterschiedlich an den Differenzkosten beteiligt. Kollektoren und Photovoltaik verursachen auf Grund ihrer noch relativ hohen Energiekosten überproportional hohe Differenzkosten. Wind und Biomasse, die hohe Energiebeiträge liefern, sind im Verhältnis dazu geringer beteiligt. 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 führt, 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. Die aufsummierten Differenzkosten aller Technologien betragen in dieser Preisvariante im Jahr 2010 nur noch 2,5 Mrd.



**Bild 8:** Differenzkosten erneuerbarer Energien im Jahr 2010 im Vergleich zu anlegbaren Preisen der herkömmlichen Energieversorgung bei unterschiedlichem Anstieg der Energiepreise und Vergleich mit den Differenzkosten des Jahres 1999.

DM/a (Bild 8; 5. Balken). 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 erneuerbaren Energien wäre also in diesem Fall stark erschwert..

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

- ◆ Zum einen erfordert der weitere Ausbau den Einsatz von Instrumenten, 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, den Einsatz eines erweiterten StrEG und weiterer flankierender Maßnahmen. Das aus dem bisherigen StrEG hervorgegangene EEG ist hierfür ein gutes Beispiel. Auch bei Preisanstiegen fossiler Energien kann nicht gewartet werden, bis erneuerbare Energien „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 lediglich 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 erneuerbarer Energien 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<sub>th</sub> für Brennstoffe**. Diese Erhöhungen sind im Vergleich zu den steuerlichen 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 erneuerbarer Energien auszugleichen.

Die quantitativen Auswirkungen der vorgeschlagenen Instrumente und Maßnahmen und ihr zeitlicher Verlauf sind in **Tab.3** zusammengestellt und nach strom- und wärmeseitigen Werten unterschieden. Das monetäre Äquivalent der Förderinstrumente steigt von 1 050 Mio. DM/a im Jahr 1999 auf 2 600 Mio. DM/a im Jahr 2010, was als Mittelwert über das gesamte Jahrzehnt einer Verdopplung des derzeitigen Wertes gleichkommt. Der Wärmemarkt wird relativ stärker gefördert, so dass im Jahr 2010 nur noch 55 % des Gesamtvolumens auf den Strombereich entfallen. Wesentlich ist, dass sich die Gewichtung von der Dominanz budgetwirksamer Mittel

deutlich zu den Instrumenten „Modifiziertes StrEG“<sup>2</sup> und „Quote im Wärmemarkt“ verlagert, die unmittelbar auf die Energieverbraucher einwirken. Sie stellen im Jahr 2010 mit 1 800 Mio. DM/a rund 70 % der Fördermittel bereit im Gegensatz zu 1999 mit 50 %. Der Bedarf an budgetwirksamen Mitteln, also von direkten Förderprogrammen des Bundes, der Länder und der Kommunen, erhöht sich auf **maximal 750 Mio. DM/a (2010)** und liegt damit im Mittel des Jahrzehnts lediglich **um ein Drittel über dem derzeitigen Wert von 440 Mio. DM/a**. Für die Förderprogramme des Bundes wird von einer reichlichen Verdopplung des derzeitigen Wertes bis 2010 ausgegangen, eine 50 %ige Erhöhung wird von den verschiedenen Kreditprogrammen erwartet. Auch die Förderprogramme der Länder sollten in der Summe tendenziell wieder steigen um den Rückgang der letzten Jahre auszugleichen. Der freiwillige Beitrag der Energieversorgungsunternehmen dürfte dagegen wettbewerbsbedingt und wegen der Ausweitung des EEG Strom abnehmen.

	1999	2005	2010	Mittelwert
<b>Stromeinspeisungsgesetz *)</b>	<b>510</b>	<b>1060</b>	<b>1080</b>	<b>970</b>
<b>Quoten für Großanlagen Wärme *)</b>	<b>-</b>	<b>240</b>	<b>715</b>	<b>320</b>
<b>Bundesprogramme</b>	<b>150</b>	<b>240</b>	<b>350</b>	<b>250</b>
<b>Kreditvergünstigungen der DtA und KfW **)</b>	<b>ca.100</b>	<b>150</b>	<b>150</b>	<b>135</b>
<b>Förderprogramme der Länder und Kommunen</b>	<b>170</b>	<b>180</b>	<b>200</b>	<b>175</b>
<b>Weitere (Zulagen u.ä.)</b>	<b>20</b>	<b>40</b>	<b>50</b>	<b>35</b>
<b>Energieversorger ***)</b>	<b>100</b>	<b>60</b>	<b>60</b>	<b>65</b>
<b>Gesamt</b>	<b>1050</b>	<b>1980</b>	<b>2600</b>	<b>1950</b>
<b>davon budgetwirksam</b>	<b>440</b>	<b>610</b>	<b>750</b>	<b>595</b>
<b>dto. (%)</b>	<b>42</b>	<b>31</b>	<b>29</b>	<b>31</b>

\*) Differenzkosten bei anlegbaren Kosten von 10 Pf/kWh (Strom) und von 8,5 Pf/kWh (Wärme); 2% Anstieg  
 \*\*) Zinsvorteil 1%; Laufzeit 10 Jahre      \*\*\*) Ohne Investitionen in wirtschaftliche Wasserkraft

**Tabelle 3: Für eine Verdopplung des Beitrags erneuerbarer Energien erforderlichen Fördermittel, getrennt nach (modifiziertem) StrEG, Quote (Großanlagen Wärme) und budgetwirksamen Aufwendungen des Bundes und der Länder (in Mio. DM)**

Mit dem gesamten Maßnahmenbündel werden im Zeitraum 2000 bis 2010 rund 21 Mrd. DM an Fördermitteln zum verstärkten Ausbau von erneuerbaren Energien 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. Mit der Verdopplung des Anteils erneuerbarer Energien bis zum Jahr 2010 werden nicht nur umwelt- und klimapolitischer Ziele erreicht, sondern es sind damit auch positive volkswirtschaftliche Auswirkungen im Bereich der Beschäftigung verbunden. In /BMU/UBA 1999/ wurde abgeschätzt, dass bis zum Jahr 2010 insgesamt ca. 40 000 Arbeitsplätze für Anlagenerstellung und

<sup>2</sup> Das seit dem 1. April 2000 geltende EEG entspricht in seinen monetären Auswirkungen weitgehend dem in /BMU/UBA behandelten modifizierten StrEG.

–betrieb im Inland auf dem Sektor der erneuerbaren Energien existieren dürften. Berücksichtigt man Verdrängungseffekte, so lassen sich daraus knapp 25 000 zusätzliche Arbeitsplätze gegenüber dem Status des Jahres 1997 ableiten /Hohmeyer 1997/. Hinzu kommt weitere Arbeitsplätze durch einen verstärkten Energie- bzw. Stromhandel und durch wachsende Exportmärkte. Der arbeitsmarktpolitische Gewinn einer Ausbaustrategie für erneuerbare Energien liegt in absehbarer Zeit nicht in der absoluten Höhe der zusätzlichen Arbeitsplätze. Dies ist aber angesichts von insgesamt 400 000 Arbeitsplätzen in der gesamten deutschen Energieversorgung auch nicht zu erwarten. Günstigstenfalls kann der durch die Liberalisierung des Strommarktes bereits hervorgerufene Abbau an Arbeitsplätzen kompensiert werden, worin auch schon ein großer Nutzen der Ausbaustrategie liegt. Die großen Chancen liegen jedoch in der Qualität der neu gewonnenen Arbeitsplätze in technologieintensiven und zukunftssträchtigen Branchen, die zudem vielfach dezentral entstehen und damit zusätzlich günstige strukturelle Wirkungen haben können.

## 7. Perspektiven erneuerbarer Energien in Deutschland bis 2050

Die Untersuchungen in /BMU/UBA 1999/ haben ergeben, dass mit dem Einsatz eines aufeinander abgestimmten Maßnahmenbündels eine Verdopplung des Beitrags erneuerbarer Energien innerhalb eines Jahrzehnts erreicht werden kann und dabei die Marktvolumina der Technologien – bis auf diejenigen der Wasserkraft und der Windenergie - **um das Fünf- bis Zehnfache wachsen**. 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 erneuerbarer Energien in eine insgesamt nachhaltigere Energiepolitik eingebunden ist.

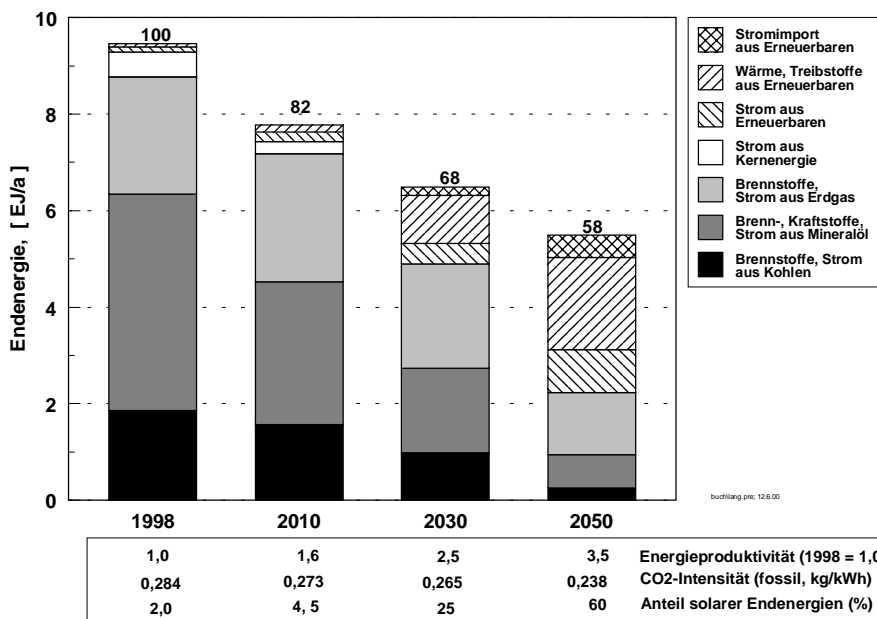
Unter diesen Voraussetzungen kann sich die durch das Verdopplungsziel 2010 eingeleitete Wachstumsdynamik für erneuerbare Energien fortsetzen. Hinzu kommt, dass zu diesem Zeitpunkt ein ausreichend hoher Bedarf an neuen Anlagen in der Energieversorgung bestehen wird, da heutige Überkapazitäten abgebaut sein werden. In Kombination mit einer zeitlich vorrangigen Mobilisierung von Energieeffizienzpotentialen bei Umwandlung und Nutzung und einer zeitlich begrenzten Substitution durch relativ stärkere Nutzung von Erdgas können Klimaschutz und Ressourcenschonung mit Aussicht auf Erfolg erreicht werden, (**Bild 9**). Von besonderer Bedeutung ist der absolute Rückgang des Energieverbrauchs um rund 40 % bis zum Jahr 2050 bei einem rund zweifachen Bruttoinlandsprodukt gegenüber 1998, was einer Steigerung der Energieproduktivität um den Faktor 3,5 entspricht. Gleichzeitig verschwindet die heutige Dominanz von Kohle und Mineralöl. Die fossilen Energien tragen im Jahr 2050 noch mit 40 % zur Bereitstellung von Brennstoffen, Kraftstoffen und Strom bei mit eindeutigem Schwerpunkt beim Erdgas. Erdgas vergrößert seinen Beitrag bis 2010 und ist bis etwa 2030 noch mit etwa derselben Absolutmenge wie heute an der Bereitstellung von Endenergie beteiligt. Es dominiert bei der Strom- und Wärmeherzeugung. Mineralöl wird aus dem Wärmemarkt verdrängt und nur noch als Treibstoff und als Rohstoff in der chemischen Industrie eingesetzt. Knapp 60 % der Endenergie stammt im Jahr 2050 aus erneuerbaren Energien. Wärme aus Strahlung, Biomasse und Geothermie stellt 35 % der Endenergie, 25 % sind Elektrizität aus erneuerbaren Quellen, wovon wiederum zwei Drittel aus Quellen im Inland stammen.

Der zeitlich aufeinander abgestimmte Einsatz der obigen Strategieelemente sorgt für stetig sinkende energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen bei gleichzeitigem Abbau der Kernenergie. Von 894 Mio. t/a im Jahr 1997 sinken sie über 657 Mio. t/a (2010) und 460 Mio. t/a (2030) auf 200 Mio. t/a im Jahr 2050 und erreichen damit die Zielmarke der Enquete-Kommission, nämlich

eine 80 %-igen Verringerung gegenüber 1995. Die Reduktion um rund 700 Mio. t/a CO<sub>2</sub> teilt sich wie folgt auf die Technologien bzw. die Strategieelemente auf:

- **Effizientere Energienutzung und -wandlung; Verringerung des Nutzenergiebedarfs über den Trend hinaus:** **290 Mio. t/a**
- **Verschiebung der Energieträgerstruktur zu Erdgas:** **34 Mio. t/a**
- **Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung:** **50 Mio. t/a**
- **Ausbau erneuerbarer Energien:** **320 Mio. t/a**

Die Reduktionsbeiträge der effizienteren Energienutzung und des Ausbaus von erneuerbaren Energien sind nahezu gleichrangig. Die CO<sub>2</sub>-Reduktionsbeiträge der Energieeinsparung und des Ausbaus der Kraft-Wärme-Kopplung sind allerdings im wesentlichen bis 2020 mobilisiert, diejenigen der erneuerbare Energien machen sich erst nach 2010 deutlich bemerkbar. Der Beitrag der erneuerbare Energien am jeweiligen Primärenergieverbrauch des Szenario beträgt aufgrund des reduzierten Energiebedarfs im Jahr 2010 bereits 5,5 %, im Jahr 2030 bereits 26 % und erreicht im Jahr 2050 rund 60 %.

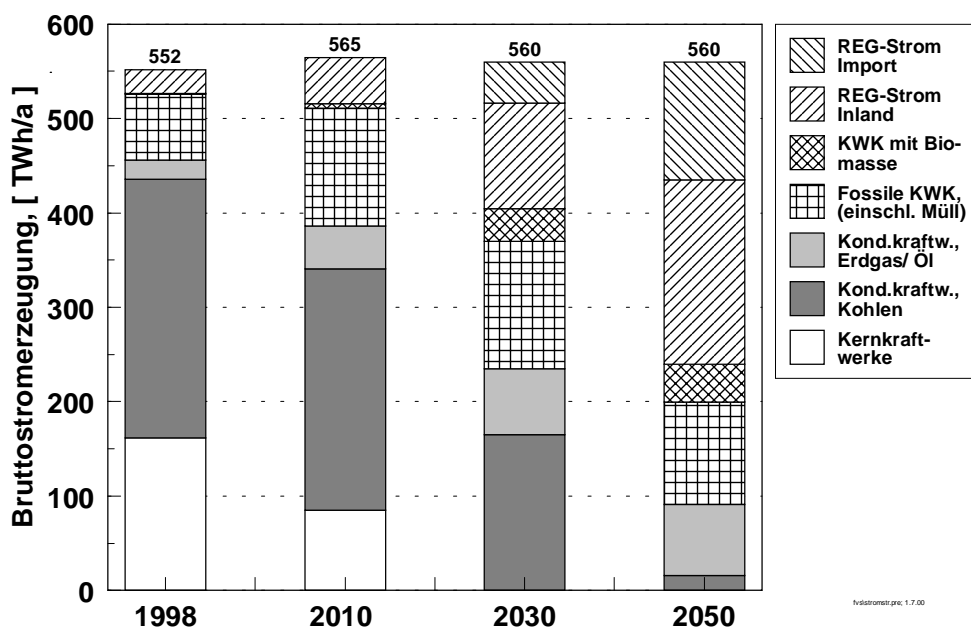


**Bild 9:** Struktur des Endenergieverbrauchs in einem Langfristszenario „Solare Energiewirtschaft“ nach den eingesetzten Primärenergiequellen und Veränderung der wesentlichen Kenngrößen Energieintensität, CO<sub>2</sub>-Intensität des fossilen Anteils, Anteil Endenergie aus erneuerbaren Quellen.

### 8. Notwendige Strukturveränderungen am Beispiel der Stromversorgung

Das Langfristszenario zeigt u.a., 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 ebenfalls zwei Etappen unterschieden werden. Der erste, fünfzehn- bis zwanzigjährige Abschnitt ist – neben verstärkten Stromeinsparanstrengungen, die zu einem im we-

sentlichen konstanten Stromverbrauch führen - durch den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung gekennzeichnet, deren Beitrag an der Bruttostromerzeugung von 9 % auf 25 bis 30 % wächst (**Bild 10**). Die Beiträge der erneuerbare Energien sind dagegen im Jahr 2010 mit 10 % noch relativ gering. 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. 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 Stromerzeugung aus erneuerbare Energien und der Verschiebung des Brennstoffeinsatzes zum Erdgas. Diese Etappe des Umbaus der Stromversorgung kann nur eingeleitet werden kann, wenn in den kommenden Jahren Kraftwerksneubauten **vorrangig** auf der Basis von Kraft-Wärme-Kopplung und erneuerbare Energien 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 Einstieg dieser beiden Optionen in die Stromerzeugung.

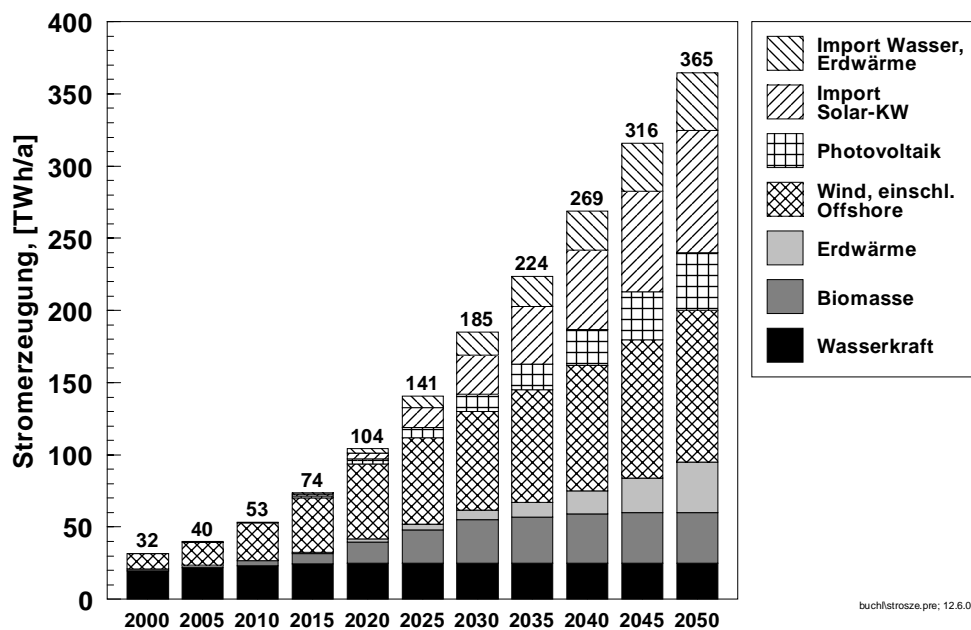


**Bild 10: Strukturveränderungen der Stromerzeugung im Szenario „Solare Energiewirtschaft“ bis 2050 nach Energiequellen und Kraftwerksarten**

Die zweite Etappe des Umbaus der Stromversorgung in Richtung Nachhaltigkeit wird durch einen deutlichen Zuwachs von Anlagen auf der Basis von erneuerbaren Energien gekennzeichnet, der nach 2010 mit sich beschleunigender Marktdynamik bei allen Technologien einsetzt. Der Gesamtbeitrag fossil gefeuerter Kraftwerke wird stark durch sehr effiziente erdgasgefeuerte Kraftwerke und Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen geprägt, darunter auch Brennstoff-

zellen. 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 (**Bild 11**). Die Photovoltaik leistet mit 12 TWh/a bereits einen beachtlichen Anteil. Etwa 40 TWh/a Strom aus erneuerbaren Quellen werden importiert.

Nach 2030 werden in diesem Szenario erneuerbare Energien zur Hauptquelle der Stromerzeugung; im Jahr 2050 decken sie 65% der Stromnachfrage. Es dominiert die Windenergie mit 95 TWh/a (40 GW Leistung einschließlich Offshore Anlagen), gefolgt von der Photovoltaik mit 40 TWh/a (41 GW Leistung), der Biomasse mit 45 TWh/a, der Erdwärme mit 30 TWh/a und der Wasserkraft mit 25 TWh/a. Der Importanteil an der gesamten Bruttostromerzeugung beträgt 22 %, die Nutzung erneuerbarer Energien ist innerhalb eines europäischen Stromverbundnetzes optimiert /TAB 2000/. Der restliche Beitrag fossiler Energien bei Kondensationskraftwerken stützt sich nun weitgehend auf gasgefeuerte Gas-Dampf- und Gasturbinenanlagen. 20 % des Stroms kommt aus mit Erdgas und Kohle betriebenen Anlagen der Kraft-Wärme-Kopplung. 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 ab 2040 nicht mehr benötigt.



**Bild 11: Entwicklung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Quellen im Szenario „Solare Energiewirtschaft“ bis 2050 mit Anteilen an der Gesamterzeugung von 10% (2010), 33% (2030) und 65% in 2050.**

Potenzialseitig sind erneuerbare Energien damit bei weitem noch nicht ausgeschöpft. Zwar sind die inländische Wasserkraft und die Biomasse zwischen 2020 und 2030 an ihre Nutzungsgrenzen gestoßen, die anderen inländischen Potentiale sind aber erst zu 30 – 35% erschlossen. Importpotenziale stehen noch in großem Ausmaß zur Verfügung und ausreichende Spielräume für eine weitgehende Deckung des Strombedarfs durch erneuerbare Energien, wenn eine Strategie der ausgewogenen Erschließung aller erneuerbarer Energiequellen innerhalb eines europäischen Stromverbundes verfolgt wird. Im Szenario „Solare Energiewirtschaft“ liegen die Anteile einzelner Energiearten zwischen 5 und 15% bzw. erreichen bei massiver

Erschließung maximal 20% (Beispiel Wind) und ergänzen sich daher in ihren Erzeugungseigenschaften. Der Anteil deutlich fluktuierender erneuerbarer Energien, 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.

Auf der Basis der technologiespezifischen Kosten-Mengen-Relationen und unter Berücksichtigung von Lernkurven lässt sich der Verlauf der mittleren Stromgestehungskosten des jeweiligen Bestandes beginnend ab dem Jahr 2000 ermitteln<sup>3</sup>. In der Basisentwicklung (vgl. Bild 13) sind 70% der bis 2010 zugebauten Anlagen Windkraftanlagen (bezogen auf die produzierte Energie). Dementsprechend dominiert die zukünftige Kostenentwicklung der Windenergie zunächst auch die mittleren Stromgestehungskosten des Gesamtausbaus. Bis 2010 sinken die mittleren Kosten von 0,178 DM/kWh (2000) auf 0,148 DM/kWh (**Bild 12**). Nach 2010 kommt die Degression zum Stillstand, obwohl bei der Windenergie auch danach noch von Kostensenkungen (Offshore-Anlagen) ausgegangen wird. Einerseits liegt die nun stärker dominierende Biomasse in einem ähnlichen Kostenband um 0,14 – 0,16 DM/kWh<sup>4</sup>, zum anderen wird von einem anhaltenden Wachstum der Photovoltaik ausgegangen, die trotz deutlicher Kostendegressionen in diesem Zeitraum immer noch mittlere Stromgestehungskosten (des Bestandes) zwischen 0,80 und 0,50 DM/kWh aufweist (Neuanlagen in 2020: 0,35 DM/kWh). Kostenstabilisierend wirkt sich die Stromerzeugung aus Geothermie aus, für die nach Ablauf der Demonstrationsphase Kosten von 0,12 DM/kWh angenommen wurden. Der Stromimport wirkt mit Kosten zwischen 0,16 DM/kWh (2015) und 0,14 DM/kWh (2020) kostenneutral. Im Jahr 2020 stellen sich danach in der Basisentwicklung mittlere Stromgestehungskosten von 0,143 DM/kWh ein. Verlängert man bei stetigem weiteren Wachstum erneuerbarer Energien den Betrachtungszeitraum bis 2050 /TAB 2000/ so erreicht man einen Deckungsanteil von 70% (bezogen auf den derzeitigen Stromverbrauch). Das Kostenniveau bleibt, mit leichten Schwankungen, stabil zwischen 0,14 und 0,15 DM/kWh. Wind-, Geothermie- und Importstrom kompensieren in diesem Szenario näherungsweise die mit dem weiteren Photovoltaikausbau verbundenen höheren Kosten (Neuanlagen in 2030: 0,29 DM/kWh; in 2050: 0,20 DM/kWh).

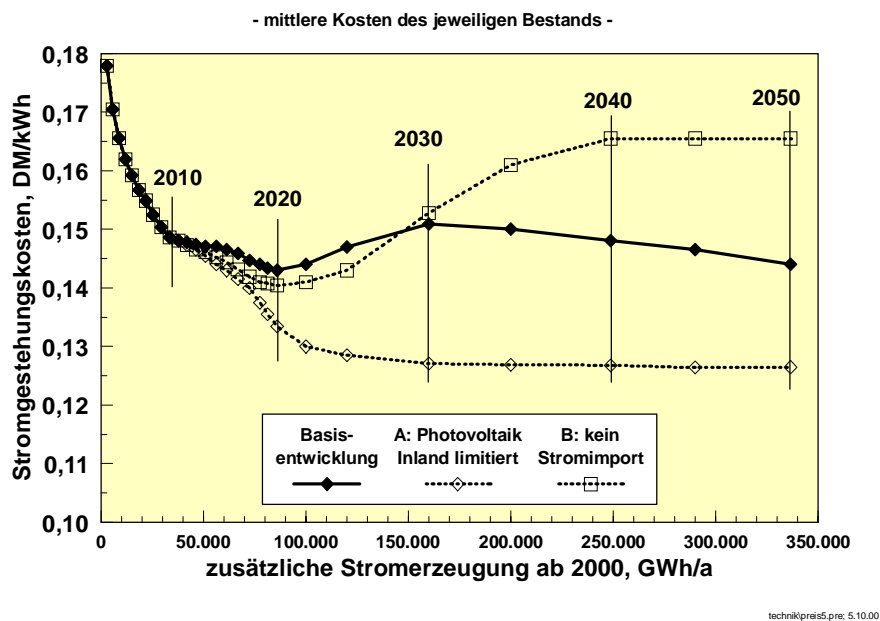
Variationen des Basispfades werden bis 2010 weitgehend durch die starke Dynamik der Windenergie überlagert. Limitiert man beispielhaft den Ausbau der Photovoltaik im Inland bei einem Beitrag von 2 TWh/a (**Ausbauvariante A: PV Inland limitiert**), was mit 2 100 MW bis ca. 2015 immerhin ein jährliches Wachstum der installierten Leistung von 21%/a voraussetzt, so setzt sich nach 2010 die (mittlere) Kostendegression fort und mündet in einem langfristig stabilen Kostenniveau für Strom aus erneuerbaren Energien um 0,130 Pf/kWh. Schließt man den Import von Strom aus erneuerbaren Energien aus, so führt dies zunächst zu einem stärkeren Ausbau der Biomasse mit etwas geringerem mittleren Kostenniveau um das Jahr 2020 mit knapp 0,140 DM/kWh (**Ausbauvariante B: kein Import**). Nachdem deren Potenziale, und die der Windenergie, aber ausgeschöpft sind, verteuert sich die Strombereitstellung wieder, da nun verstärkt auf Photovoltaik im Inland zurückgegriffen wird. Langfristig stellt sich ein Kostenniveau von 0,165 DM/kWh ein. Wenn auch die dargestellten Kostenkurven aufgrund der „Unschärfe“ der Kosten-Potential-Funktionen der Einzeltechnologien nur ein angenähertes Bild der zukünftigen Kosten vermitteln können, so kann doch daraus abgeleitet werden, dass eine zukünftige, weitgehend auf erneuerbaren Energien beruhende Stromversorgung mit einem Kos-

---

<sup>3</sup> Ältere, abgeschriebene Wasserkraftwerke und bestehende Biomasseanlagen in der Holzverarbeitenden Industrie mit niedrigen Stromgestehungskosten unter 10 Pf/kWh sind also in der Kostenbetrachtung nicht enthalten.

<sup>4</sup> Der kostengünstigere Anteil der Biomasse ist bereits bis 2010 ausgeschöpft worden.

tenniveau zwischen 0,13 und 0,15 DM/kWh verwirklicht werden kann. Dies kann für eine nachhaltige Stromversorgung als angemessener Wert bezeichnet werden.



**Bild 12: Stromkosten erneuerbarer Energien für den Zeitraum 2000 bis 2050 für den Basisausbau und zwei Varianten. Dargestellt sind die mittleren Kosten des jeweiligen Bestandes (ohne „Altanlagen“ bis 1999; DM 1999; Zinssatz 6%/a).**

Das angestrebte Wachstum der erneuerbaren Energien 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 bzw. gerade im Bau befindlichen Kraftwerke in Betrieb. Im Jahr 2020 sind es nur noch 25% /Markewitz 1999/. Ab 2002 entsteht eine Deckungslücke, die durch Stromimport, Verlängerung der Nutzungsdauer bestehender Kraftwerke oder durch Neubau gedeckt werden kann. Diese „Deckungslücke“ beträgt bei konstantem Stromverbrauch im Jahr 2010 rund 130 TWh/a und wächst bis 2030 auf maximal 280 TWh/a. Bereits im Jahr 2010 entspricht dies einer Kraftwerksleistung von 20 –25 GW. Infolge des zunächst nur langsam wachsenden Beitrags der erneuerbaren Energien an der Stromversorgung entstehen also ausreichende Spielräume, bei anstehenden Neuinvestitionen 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 Anteil erneuerbarer Energien wenig geeignete Grundlastkapazität ist bis 2030 ebenfalls abgebaut, wenn Neuinvestitionen in derartige Kraftwerke, also in Kernkraftwerke, Braunkohle- und große Steinkohlekraftwerke unterbleiben.

Als Fazit der Betrachtungen im Rahmen des Szenarios „Solare Energiewirtschaft“ kann festgehalten werden, dass ein konsequenter Ausbau einer Stromversorgung auf der Basis erneuerbarer Energien bis in hohe Anteile über 50% nicht auf eine festgefügte Struktur konventioneller Kraftwerke trifft. Die Qualitäten einer derartigen Stromversorgung sind nicht an die heutige Kraftwerksstruktur und deren Erfordernisse gekoppelt. 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

bei Neuinvestitionen keine ausschließliche Festlegung auf kohlegefeuerte Grundlastkraftwerke erfolgt, sondern anstehenden Neuinvestitionen in ausreichendem Maße auch 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 erneuerbarer Energien stark zurückgehen und es werden flexiblen Anlagen mit geringen Fixkosten und kleineren Leistungen favorisiert. Diese aus der Sicht einer verstärkten Nutzung erneuerbarer Energien wünschenswerten Strukturänderungen sind auch weitgehend mit den durch den liberalisierten Strommarkt gesetzten Rahmenbedingungen kompatibel.

Die hier am Beispiel der Stromversorgung des Szenarios „Solare Energiewirtschaft“ skizzierten Wechselwirkungen bei der erforderlichen Umstrukturierung der Energieversorgung machen deutlich, dass ein substantielle Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien innerhalb des nächsten Jahrzehnts eine zentrale Voraussetzung ist, 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 erneuerbaren Energien erreicht werden. Nach einer weitgehenden Ausschöpfung dieser kostengünstigen Reduktionspotentiale in den Bereichen „Energieeinsparung und Kraft-Wärme-Kopplung“ würde der weitere Reduktionsprozess jedoch ins Stocken geraten.

## 9. Literatur

- /BMU/UBA 1999/: 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.
- /Enquete 1995/ Dt. Bundestag (Hrsg.): Mehr Zukunft für die Erde. Schlußbericht der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“. Economica Verlag, Bonn 1995
- /Fishedick 2000/ M. Fishedick, O. Langniß, J. Nitsch: Nach dem Ausstieg – Zukunftskurs Erneuerbare Energien. Hirzel-Verlag, Stuttgart, 2000
- /IEA 1998/: F. Bird, J. Keppler: IEA – Weltenergieprognose 1998. In Energiewirtschaftl. Tagesfragen 49 (1999), Heft 10.
- /IEA 1999/: Key World Energy Statistics, Int. Energy Agency, Paris 1999
- Johansson 1993: T. B. Johansson, H.Kelly et.al.: Renewable Energy Sources for Fuels and Electricity. Island Press, Washington DC, 1993
- /Lovins 1999/: A. Lovins, P. Hennicke: „Voller Energie – Die globale Faktor Vier-Strategie für Klimaschutz und Atomausstieg“. Campus, Frankfurt, 1999
- /Nitsch, Luther 1998/ 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
- /Nitsch 1999/: 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

- /Politik 1999/: Politikszenerarien für den Klimaschutz. Untersuchungen im Auftrag des BMU. Hrsg. G.Stein, B.Strobel. Band 5: H.J. Ziesing u.a. „Szenarien und Maßnahmen zur Minderung der CO<sub>2</sub> –Emissionen in Deutschland bis 2020“. FZ Jülich, Reihe Umwelt/Environment, Bd. 20 1999
- /Prognos 2000/: Prognos AG (Hrsg): „Energierreport III – Die längerfristige Entwicklung der Energiemärkte im Zeichen von Wettbewerb und Umwelt. Schäffer-Poeschel Verlag Stuttgart, 2000
- /Shell 1995/ Energie im 21. Jahrhundert, aktuelle Wirtschaftsanalysen 5/1995, Heft 25. Studie der Shell-AG. Hamburg 1995.
- /TAB 2000/: J. Nitsch, F. Trieb: „Potenziale und Perspektiven erneuerbarer Energieträger. Gutachten im auftrag des Büros für Technikenfolgen-Abschätzung am Dt. Bundestag, Stuttgart, März 2000.
- Trieb 1998: F. Trieb u.a.: Markteinführung solarthermischer Kraftwerke – Chancen für die Arbeitsmarkt- und Klimapolitik. Energiewirtsch. Tagesfragen 48 (1998), Heft 6.
- UN 1998: Bericht über die menschliche Entwicklung . UNDP-Bericht, Dt. Ges. für die Vereinten Nationen, Bonn 1998
- WEC 1995: Global Energy Perspectives to 2050 and Beyond. Joint IIASA – World Energy Council Report, Laxemburg, London, 1995
- Wind 1999: European Wind Assoc., Forum for Energy and Development, Greenpeace Int.: Windstärke 10. Studie zum weltweiten Ausbau der Windenergie. Oktober 1999.