

# Der Ausbau erneuerbarer Energien in längerfristiger Perspektive – Möglichkeiten und Herausforderungen <sup>1</sup>

in Zeitschrift für Energiewirtschaft 27 (2003), S. 59-77.

Joachim Nitsch, Stuttgart; Manfred Fishedick, Wuppertal <sup>2</sup>

## 1. Nachhaltigkeitsdefizite der derzeitigen Energieversorgung – die globale Sichtweise

Aus den Leitlinien für eine nachhaltige Entwicklung lassen sich die wesentlichen Nachhaltigkeitsdefizite der derzeitigen Energieversorgung ableiten (Kopfmüller 2001). Das Ausmaß dieser Nachhaltigkeitsdefizite und der Dringlichkeitsgrad ihrer Beseitigung oder Verringerung werden in der energiepolitischen Diskussion zwar immer noch sehr unterschiedlich bewertet, jedoch lassen sich auch Gemeinsamkeiten und Konsensbereiche feststellen:

1. Die **globale Klimaerwärmung** wird in der wissenschaftlichen Diskussion ganz überwiegend als ein mit der Nutzung fossiler Energieträger zusammenhängendes Problem mit hoher Eintrittswahrscheinlichkeit betrachtet. Die Teile der wissenschaftlichen Gemeinschaft, welche die bisher vorliegenden Indizien für das Klimaproblem für nicht schwerwiegend genug bzw. die Anpassung an eine Klimaveränderung für eine ausreichende Reaktion halten, sind zwar in der (vor allem außereuropäischen) Diskussion wissenschaftlicher und öffentlicher Natur vernehmbar, bleiben jedoch eine deutliche Minderheit. Dennoch spiegeln sich die unterschiedlichen Positionen auch im Bereich der internationalen Energiepolitik wider, worauf im Wesentlichen der schleppende Fortgang der Rio-Folgekonferenzen zurückzuführen ist.
2. Als zweiter Problemkreis rückt seit einiger Zeit wieder die **Verknappung und Verteuerung der Reserven von Erdöl und Erdgas** in den Blickwinkel von Politik und Öffentlichkeit. Die Reichweiten dieser beiden Energieträger werden zunehmend kritischer gesehen, woran auch die unverändert stetig steigende Nachfrage nach ihnen ihren Anteil hat. Der sog. „depletion mid-point“ beim Erdöl - also der Zeitpunkt bei dem das weltweite Fördermaximum erreicht wird - wird bezogen auf die konventionellen Reserven bereits in 15-20 Jahren erwartet (GCN 2002). Über die damit einhergehenden Preissteigerungen besteht dagegen ein uneinheitliches Bild. Unbestritten ist, dass infolge der weiteren Ausschöpfung der Lagerstätten von einer zunehmenden Konzentration der verbleibenden Quellen in politisch weniger stabilen Regionen auszugehen ist. Schon bald werden sich mehr als 80% der globalen Reserven von Öl und Gas auf den Nahen und Mittleren Osten und Russland konzentrieren. Im energiepolitischen Handeln stehen die Perspektiven einer baldigen Verknappung der Erdöl- und Erdgasvorkommen und ihre regionale Konzentration derzeit (noch) nicht im Mittelpunkt des Interesses; die Bedeutung der „Res-

---

<sup>1</sup> Der Beitrag beruht im wesentlichen auf der Zusammenfassung der Untersuchung: M. Fishedick, J. Nitsch u.a. „Langfristszenarien für eine nachhaltige Energienutzung in Deutschland.“ im Auftrag des Umweltbundesamtes Berlin, Climate Change Forschungsbericht 200 97 104, Juni 2002.

<sup>2</sup> Dr. J. Nitsch, DLR-Institut für Technische Thermodynamik, Pfaffenwaldring 38-40, 70569 Stuttgart, [www.dlr.de/system](http://www.dlr.de/system); Dr. M. Fishedick, Wuppertal-Institut für Klima, Umwelt, Energie, Döppersberg 18, 42103 Wuppertal, [www.wupperinst.org](http://www.wupperinst.org).

sourcenschonung“ dürfte auch angesichts der derzeitigen Konflikte in der Golfregion allerdings in Zukunft wieder deutlich zunehmen.

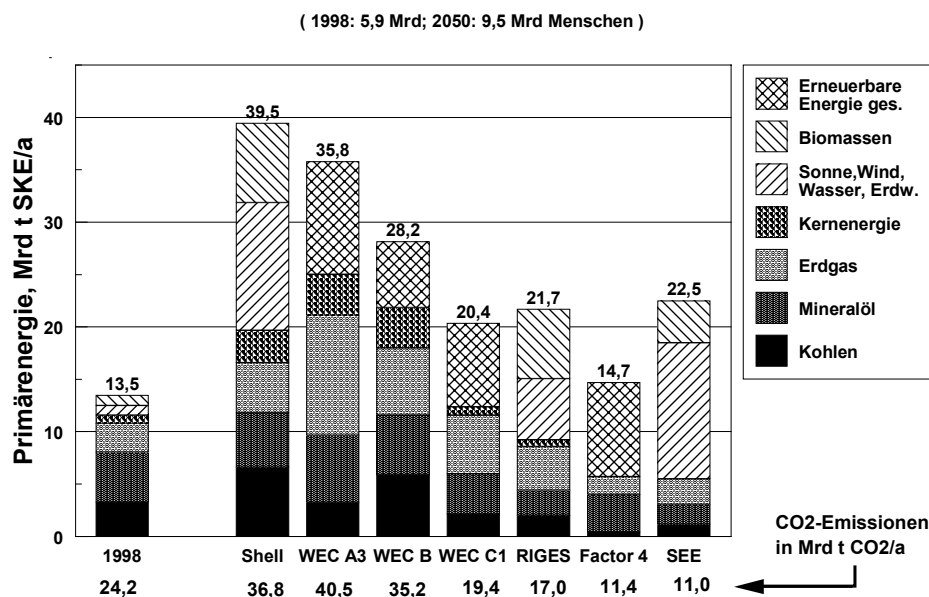
3. Deutliche Differenzen existieren in der öffentlichen und wissenschaftlichen Wahrnehmung hinsichtlich der Bewertung der **nuklearen Gefährdung**. Hier wird zwar von nahezu keiner Seite die Möglichkeit nuklearer Unfälle ausgeschlossen. Die Auseinandersetzung betrifft vor allem die Eintrittswahrscheinlichkeit und die Folgen von Katastrophenfällen sowie das Ausmaß und die Zeitdauer der radioaktiven Belastungen, auch derjenigen jenseits großer Unfälle. Die energiepolitische Situation ist ebenfalls gespalten. Zahlreiche (europäische) Länder haben auf die Nutzung der Kernenergie verzichtet, weitere haben faktisch Moratorien und wieder andere bereiten die Stilllegung der vorhandenen Reaktoren vor. Andere (insbesondere einige außereuropäische Industrie- und Schwellenländer wie Japan und Südkorea aber auch die USA und in Europa Frankreich und Finnland) setzen dagegen auf die weitere Nutzung der Kernenergie.
4. Das vierte Nachhaltigkeitsdefizit besteht in dem **sehr starken Gefälle des Energieverbrauchs zwischen Industrie- und Entwicklungsländern**, das sich in den letzten Jahren praktisch nicht verringert hat. Derzeit verbrauchen 21% der Weltbevölkerung in den Industrieländern 70% der jährlich eingesetzten konventionellen Energie. Am untersten Ende der Skala steht die Gruppe der gering entwickelten Länder mit 33% der Weltbevölkerung und 4% des kommerziellen Energieverbrauchs; rund 2 Mrd. Menschen haben auch heute noch keinen Zugang zu Elektrizität. Ein auch nur tendenzieller Ausgleich dieser Unterschiede würde die oben genannten Nachhaltigkeitsdefizite verschärfen, wenn nicht gleichzeitig überproportional der Einsatz fossiler und nuklearer Energie reduziert wird. Darüber hinaus ist die Verteilungsfrage auch hinsichtlich finanzieller oder ökologischer Folgelasten von großer Bedeutung. Im Fall der Klimaproblematik besteht eine potentielle Konfliktverschärfung darin, dass die voraussichtlich am stärksten von den Folgen möglicher Klimaänderungen betroffenen Regionen solche sein werden, die am wenigsten zu ihrer Verursachung beigetragen haben oder die diesen Folgen am wenigsten mit technischen und finanziellen Mitteln entgegenwirken können.

In verschiedenen längerfristig angelegten Entwicklungsszenarien der globalen Energieversorgung (**Abb. 1**) wird Bezug auf obige Nachhaltigkeitsdefizite genommen und versucht mehr oder weniger engagierte Wege zu beschreiben, wie diese überwunden werden können. Trotz der unterschiedlichen Schwerpunkte der hier aufgeführten Szenarien, gehen alle betrachteten Zukunftspfade von einem globalen Mehrbedarf an Energie infolge der Notwendigkeit einer Angleichung des weltweiten Pro-Kopf-Verbrauchs an Energie aus (Verringerung des 4. Nachhaltigkeitsdefizits). Szenarien mit „Business as Usual“- Charakter (Shell, WEC A3 und WEC B) verringern allerdings die Nachhaltigkeitsdefizite 1 bis 3 nicht, sondern vergrößern sie sogar, da sowohl der Verbrauch an fossilen Ressourcen (und damit die Treibhausgasemissionen) als auch die Nutzung der Kernenergie bis 2050 weiter steigen. Nur Szenarien, die weltweit eine weitaus effizientere Energienutzung (und damit z. B. einen absoluten Rückgang des Energieverbrauchs in den Industrieländern bewirken) unterstellen, bieten die Chance zur Verringerung aller vier genannten Nachhaltigkeitsdefizite (WEC C1, RIGES, Factor 4, SEE).

Unabhängig von der jeweiligen zugrunde liegenden Zielsetzung zeigt sich im Szenariovergleich, dass in allen globalen Zukunftsentwürfen einer zukünftigen Energieversorgung der Einsatz erneuerbarer Energien im Laufe der nächsten Jahrzehnte beträchtlich steigt und im Jahr 2050 hohe Deckungsanteile erreicht. Ihr Beitrag liegt, ausgehend von 14% in 1998

(einschließlich nichtkommerzieller Biomasse), bei den WEC - Szenarien im Jahr 2050 bei 30% (Szenario A3), 22% (Szenario B) bzw. 39% (Szenario C1), was im Vergleich zu anderen Szenarien noch als eher moderat zu bezeichnen ist. Shell unterstellt in seinen Szenariorechnungen für das Jahr 2050 einen Anteil erneuerbarer Energien von rund 50% am (hohen) Primärenergieverbrauch. RIGES geht in seinen globalen Betrachtungen von einem Beitrag von 57% bis zur Mitte des Jahrhunderts aus; am weitesten geht das Szenario SEE mit Anteilen von 70%. Die absoluten Beiträge der erneuerbaren Energien sind mit 20 Mrd. t SKE/a, also mehr als dem derzeitigen gesamten Weltenergieverbrauch, jedoch im Shell-Szenario am höchsten. Aus potenziellseitiger Sicht sind derartige Beiträge vorstellbar. Allerdings ist heute nicht erkennbar, wie ohne einen drastischen Wechsel der globalen Energiepolitik die erforderliche globale Wachstumsdynamik der erneuerbaren Energien und die dazu erforderliche konsequente Erschließung und Ausweitung der neuen Märkte so rechtzeitig und so umfassend in Gang kommen soll, dass bereits zur Mitte des Jahrhunderts derart hohe absolute Beiträge der erneuerbaren Energien auf globaler Ebene verwirklicht werden können.

Aus der Analyse der globalen Energieszenarien lässt sich damit ableiten, dass nur eine Kombination von Effizienzstrategien und Konsistenzstrategien (d.h. Ausbau erneuerbarer Energien) eine gleichzeitige Verringerung der wesentlichen Nachhaltigkeitsdefizite der heutigen Energieversorgung erlaubt. Dass „technische“ Effizienz im Sinne einer rationellen Energieanwendung dazu allein möglicherweise nicht ausreicht und daher mittel- bis langfristige auch Elemente einer Suffizienzstrategie, also eine Veränderung von Lebens- und Konsumstilen in den industrialisierten Ländern hinzutreten müssen, sei hier nur am Rande vermerkt.



**Abbildung 1: Szenarien des Weltenergieverbrauchs für das Jahr 2050 und resultierende CO<sub>2</sub>-Emissionen im Vergleich zum derzeitigen Zustand (1 Mrd. t SKE/a = 29,3 EJ/a)**  
 Shell-Szenario „Nachhaltige Entwicklung“ (Shell 1995); WEC = Diverse Szenarien der Weltenergiekonferenzen 1995 und 1998 (WEC 1995, 1998); RIGES = „Renewable Intensive Global Energy Scenario“ (Johansson et.al. 1993); Faktor 4 = Szenario aus (Lovins, Hennicke 1999); SEE = Szenario „Solar Energy Economy“, (Nitsch 1999)

## 2. Anforderungen an „Nachhaltigkeitsszenarien“ – Fallbeispiel Deutschland

Die zuvor genannten Nachhaltigkeitsdefizite treten nicht nur auf der globalen Ebene auf, sondern sind auch bzw. gerade bei der zukünftigen Entwicklung der deutschen Energieversorgung zu beachten. Um beurteilen zu können, mit welchen Strategien und Maßnahmen eine Beseitigung der bestehenden Defizite möglich ist und welche Anstrengungen dies erfordert, eignet sich auch für die nationalen Betrachtung die Szenarioanalyse.

In Energieszenarien werden konsistente Entwicklungen dargestellt, die vom jeweils aktuellen Zustand ausgehend als zukünftig für möglich erachtet werden können. Sie versuchen nicht zu beschreiben, wie die tatsächliche Entwicklung wahrscheinlich ablaufen könnte, sondern wie sie unter bestimmten Randbedingungen verlaufen dürfte. Szenarien stellen also in sich geschlossene und widerspruchsfreie Zukunftsentwürfe dar, die auf der Basis von konsistenten Annahmen mit Computermodellen und mehr oder weniger umfangreichen Datensätzen sowie nach gewissen Grundphilosophien ihrer Konstrukteure errechnet werden. Sie ermöglichen einen transparenteren wissenschaftlichen und gesellschaftspolitischen Diskurs über die „Erfüllbarkeit von Zielen“ und die „Realitätstüchtigkeit der eingesetzten Instrumente“. Die Maxime bei der Szenarioentwicklung lässt sich folgendermaßen zusammenfassen: Wichtiger als eine wahrscheinliche Zukunft vorherzusagen, ist das Wissen darüber, ob und inwieweit Entscheidungsspielräume existieren und welche unterschiedlichen Ziele auf welchem Wege mit heutigen Entscheidungen erreicht oder zumindest vorbereitet werden können.

In der Szenarioanalyse unterscheidet man zwischen sog. „Status Quo“ oder „Business as Usual“ -Szenarien, die versuchen eine Trendfortschreibung abzubilden und zielorientierten Szenarien, in denen das Erreichen bestimmter Zielmarken (z. B. Klimaschutzziele) im Mittelpunkt steht. Den aktuellen **Status-Quo-Szenarien** der deutschen Energieversorgung ist trotz aller Unterschiede gemeinsam, dass sie von einem Rückgang des Primärenergieverbrauchs (**Abb. 2**) und des Endenergieverbrauchs bis 2030 ausgehen. Von einer Entkopplung des Energieverbrauchs vom weiteren Wirtschaftswachstum kann also auch mittelfristig ausgegangen werden. Dies gilt jedoch nicht für den Stromverbrauch, der unter Status Quo Bedingungen in der Zukunft weiter, wenn auch gegenüber den bisherigen Wachstumsraten in abgeschwächter Form, ansteigt. Der CO<sub>2</sub>-Ausstoß sinkt hingegen günstigstenfalls nur leicht ab. Das von der Bundesregierung im Rahmen einer Selbstverpflichtung formulierte Ziel, 25% der CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2005 (Basis 1990) zu reduzieren, wird deutlich verfehlt (**Abb. 3**). Dem längerfristigen Kyoto-Reduktionsziel von –21% von sechs Treibhausgasen (inkl. CO<sub>2</sub>) zwischen 2008 und 2012 (Basis 1990) nähert sich ein Teil der Trendszenarien immerhin an. Einen unter den Szenarien repräsentativen, mittleren Weg, sowohl hinsichtlich des Primärenergieverbrauchs als auch der CO<sub>2</sub>-Emissionen beschreibt das in den Abbildungen besonders gekennzeichnete BMU-Referenzszenario (BMU 2000). Das Referenzszenario der Enquete-Kommission (Enquete 2002) ist hinsichtlich des Primärenergieverbrauchs diesem Szenario sehr ähnlich, aufgrund unterschiedlicher Annahmen zur Entwicklung der Energieträgerstruktur unterscheiden sich diese beiden Szenarien bezüglich der zukünftigen CO<sub>2</sub>-Emissionen etwas stärker.

Alle Trendszenarien sehen darüber hinaus moderate Wachstumsraten für die Stromerzeugung und die Wärmebereitstellung aus erneuerbaren Energien vor. Für das Jahr 2010 ergeben sich – ausgehend von den derzeitigen 2,3% - Anteile bis zu 3,3% und für 2020 bis zu 4,4%. Die unterstellte Entwicklung der Kraft-Wärme-Kopplung ist uneinheitlich. Prognos geht von einem deutlichen Wachstumstrend aus, andere Szenarien (BMU 2000, Matthes 2000)

zeigen deutlich geringere Erhöhungen, im Projekt „Politikszenerien“ (Politikszenerien 1999) wird dagegen von einer rückläufigen Entwicklung ausgegangen.

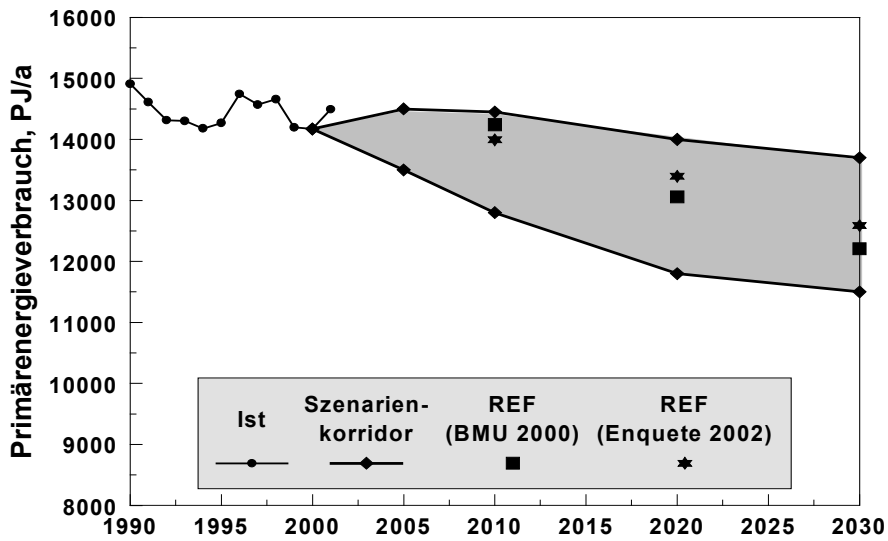


Abbildung 2: Bandbreite des Primärenergieverbrauchs in den betrachteten Status-Quo Szenarien (unterdrückter Nullpunkt zur deutlicheren Darstellung der Spreizung)

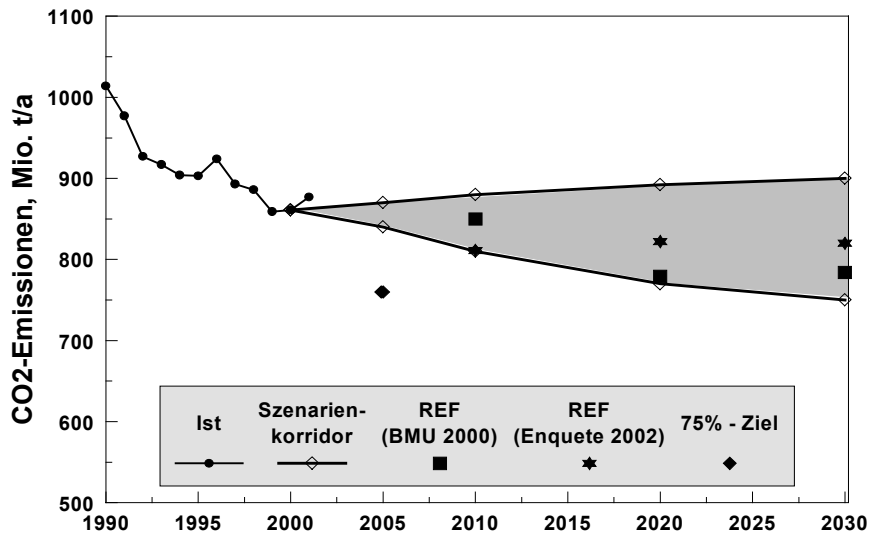


Abbildung 3: Bandbreite der zukünftigen CO<sub>2</sub>-Emissionen in den betrachteten Status-Quo-Szenarien (unterdrückter Nullpunkt zur deutlicheren Darstellung der Spreizung)

Von Nachhaltigkeitsszenarien wird erwartet, dass sie die angestrebten Ziele im Zeitverlauf erreichen. Hierzu gehört für den Energiebereich neben einer verstärkten Ressourcenschonung vor allem die deutliche Minderung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes. Darüber hinaus sind Risikogesichtspunkte (Nachhaltigkeitsdefizit 3) zu berücksichtigen. Insofern können nur solche Szenarien als Nachhaltigkeitsszenarien gelten, die von einem Rückzug aus der nuklearen Stromerzeugung ausgehen, wie er z. B. im Rahmen des Energiekonsenses zwischen Bundesre-

gierung und Kraftwerksbetreibern im Jahr 2000 festgelegt worden ist<sup>3</sup>. In vielen in den letzten Jahren entwickelten Nachhaltigkeitsszenarien, wird für die Entwicklung des Klimaschutzes von dem Leitindikator CO<sub>2</sub> ausgegangen und unterstellt, dass bis zum Jahr 2020 eine Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von etwa 40% (gegenüber dem Ausgangsniveau des Jahres 1990) auf dem Nachhaltigkeitspfad liegt. Dies gilt z. B. für das Klimaschutzszenario des BMWi-Energieberichts, das Szenario „Potenzial“ der Studie „Energiewende 2020“ (Matthes 2000) und das 40% Szenario aus den Projekt „Politikszenerien II“ (Politikszenerien 1999). Auch die Szenarien II des Projekts „Energie 2010“ (Altner 1998) können hier eingeordnet werden.

Für die langfristige Umsetzung der vorgenannten Nachhaltigkeitsziele reichen diese mittelfristigen Anforderungen jedoch noch nicht aus. Ausgehend von der Entwicklung der wesentlichen Rahmenbedingungen, die aus Gründen der Vergleichbarkeit dem Analyseraster der Enquête-Kommission des Deutschen Bundestages „Nachhaltige Energieversorgung“ (Enquete 2002) entnommen sind<sup>4</sup>, zeigt sich, dass bis zur Mitte des Jahrhunderts ein sehr weitgehender Veränderungsbedarf in der Energiewirtschaft besteht.

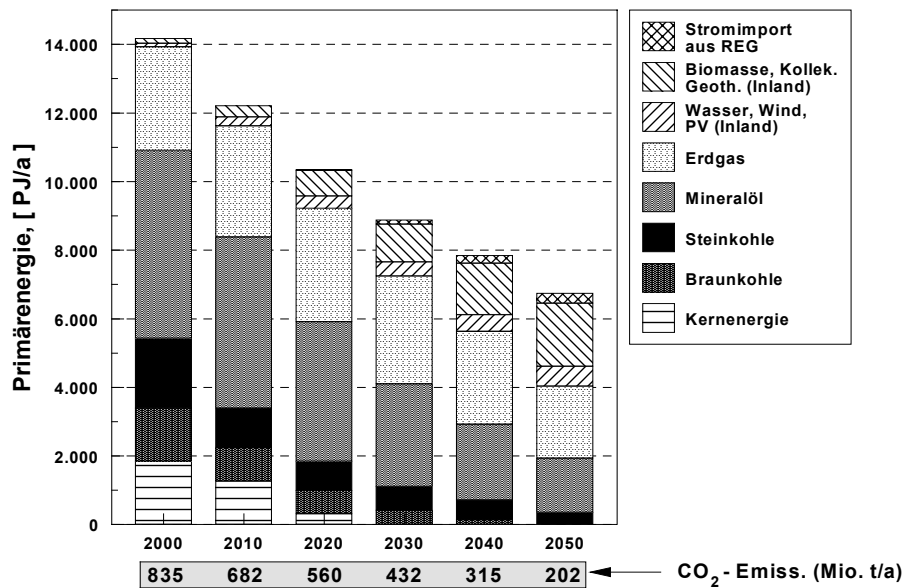
Dies gilt insbesondere dann, wenn langfristige CO<sub>2</sub>-Minderungsziele, also z. B. die Reduktion um 80% bis 2050 gegenüber dem Niveau des Jahres 1990, wie die Klimawissenschaftlern des IPCC es heute für die Industrieländer empfehlen, erreicht werden sollen. Das hier im Folgenden diskutierte Langfristszenario „Nachhaltigkeit“ (UBA 2002) geht von einer derartigen Zielsetzung aus. Es kommt u.a. zu dem Ergebnis, dass innerhalb von 50 Jahren der gesamte Primärenergieverbrauch auf unter 50% des heutigen Niveaus zurückgeführt werden sollte (**Abb. 4**). Im Nachfragebereich ist hier insbesondere im Bereich der Altbausanierung, der Reduktion des Stromverbrauchs und der raschen Einführung sparsamerer Fahrzeuge anzusetzen. Eine in der Untersuchung beschriebene sehr konsequente Strategie der Stromeinsparung ermöglicht es z.B. die Stromnachfrage bis 2050 um insgesamt 20% gegenüber dem heutigen Niveau zu reduzieren; hierfür müssen flächendeckend energieeffiziente Geräte und Produktionsverfahren zur Anwendung kommen. Die Umsetzung einer derartigen Strategie ist kein „Selbstgänger“. Die der Energieeinsparung heute vielfach gegenüber stehenden Hemmnisse müssen mittels innovativer Maßnahmen und Instrumente wirksam abgebaut werden. Ideen und Konzepte sind hierfür bereits entwickelt worden (z. B. Einführung eines Energieeffizienzfonds), harren aber noch der Umsetzung.

Aus den in UBA 2002 angestellten Szenarioanalysen lassen sich verschiedene robuste Zusammenhänge ableiten, die für die Erreichbarkeit der eingangs genannten Nachhaltigkeitsziele von entscheidender Bedeutung sind. Dabei kann zwischen kurz-, mittel- und längerfristigen Gesichtspunkten unterschieden werden.

---

<sup>3</sup> Dabei ist die noch verbleibende Reststrommenge aus Kernkraftwerken auf 2.623 TWh limitiert worden. Umgerechnet entspricht dies einer Betriebszeit der einzelnen Anlagen von im Mittel 30 bis 35 Jahren, womit das letzte Kernkraftwerk in Deutschland spätestens im Jahr 2025 außer Betrieb gehen dürfte.

<sup>4</sup> Danach sinkt die Bevölkerungszahl von heute rund 82 Mio. im Zeitverlauf sukzessive ab und erreicht über 80,8 Mio. im Jahr 2020 und 77,9 Mio. im Jahr 2030 zum Ende des Betrachtungszeitraums mit 67,8 Mio. ihren Tiefpunkt. Gegenüber dem Ausgangsniveau entspricht dies einem Rückgang von 17,3%. Im gleichen Zeitraum steigt die Wirtschaftsleistung gemessen am Bruttoinlandsprodukt (BIP) an. Ausgehend von 1.935 Mrd. DM98 im Jahr 1998 stellt sich bis zum Jahr 2050 mit den dann erreichten 3.989 EUR mehr als eine Verdopplung ein. Für die Energieträgerpreise wird im Analyseraster eher von moderaten Zuwächsen ausgegangen. So erhöht sich der Ölpreis in den nächsten fünf Dekaden um rund 134% bzw. 1,7%/a, während der Importsteinkohlepreis um knapp 50% zulegt.



**Abbildung 4: Entwicklung des Primärenergieverbrauchs und seiner Struktur im Szenario „Nachhaltigkeit“, sowie resultierende CO<sub>2</sub>-Emissionen (UBA 2002).**

Für den **kurzfristigen Zeitraum bis 2005/2010** zeigt sich aus den Szenarioanalysen, dass die Erreichung der Nachhaltigkeitsziele folgende Strategieelemente erfordert:

- mindestens eine Verdopplung des Anteils erneuerbarer Energien,
- eine deutliche Ausweitung des Beitrags der Kraft-Wärme-Kopplung,
- eine Verstärkung der Anstrengungen zur Energie- und insbesondere der Stromeinsparung (bis hin zu einer Verdopplung der jährlichen Steigerungsraten der Energieproduktivität) und
- Technologien weiterzuentwickeln und in den Markt einzuführen, die eine Brückenfunktion in eine langfristig nachhaltige Energieversorgung leisten können (z. B. Brennstoffzellen).

**Mittelfristig (bis 2020/2030)** erscheint es notwendig,

- den eingeschlagenen Weg kontinuierlich weiter zu gehen. Dies betrifft vor allem den Bereich der rationellen Energieanwendung und hier insbesondere die Sektoren mit langen Zeitkonstanten wie die Gebäudesanierung und die Effizienzerhöhung der Fahrzeugflotte,
- die aufgegriffenen Strategieelemente konsequent weiterzuentwickeln. Im Vordergrund steht dabei der Aufbau entsprechender Infrastrukturen, wie z.B. Nahwärmeversorgungen, die Etablierung internationaler Märkte für erneuerbare Energien sowie die Errichtung erweiterter und flexiblerer Netzstrukturen (u.a. für den Betrieb dezentraler, sog. „virtueller“ Kraftwerke und die effiziente Integration größerer Mengen fluktuierender Strom aus erneuerbaren Energien);
- den in diesem Zeitraum im Kraftwerkspark anstehenden Erneuerungsbedarf für eine gezielte Umgestaltung zu nutzen, indem weitere Effizienzpotenziale ausgeschöpft werden (Kraft-Wärme-Kopplung) und die Kompatibilität mit dem Ausbau erneuerbarer Energien gewährleistet wird, statt durch die Errichtung wenig zukunftsfähiger (Grundlast-) Kraftwerke die heutigen Strukturen zu zementieren und die Handlungsmöglichkeiten langfristig einzuschränken (Langlebigkeit des Kapitalstocks im Kraftwerksbereich);

- über mögliche Senken in Bezug auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen endgültige Klarheit (prinzipielle Eignung, ökologische Langfristverträglichkeit, Nachhaltigkeit) zu erlangen (z. B. CO<sub>2</sub>-Abtrennung und -Entsorgung) ;
- neue Schwerpunkte im Bereich der Mobilität zu setzen (z.B. Kombination effizienterer Fahrzeuge mit neuen Treibstoffen, wirksame Anreize für eine deutliche Umschichtung des Güterverkehrs auf die Bahn,).

**Langfristig (bis etwa 2050)** ist schließlich darauf zu achten,

- die erreichte Ausbaudynamik bei den erneuerbaren Energien, der rationellen Energieanwendung und der Brennstoffsubstitution zu sichern und stetig fortzuentwickeln und insbesondere erneuerbare Energien zum zentralen Bestandteil jeder Energieversorgung zu machen;
- weitere erneuerbare Quellen in den Energiemix einzubeziehen: z. B. Stromimport aus erneuerbaren Energiequellen, Wasserstoff; je nach Ergebnissen der zuvor erforderlichen Prüfung möglicherweise auch CO<sub>2</sub>-neutrale fossile Kraftwerke mit angeschlossener CO<sub>2</sub>-Entsorgung;
- neue klimaverträgliche Kraftstoffe auf der Basis erneuerbarer Quellen in den gesamten Verkehrsbereich zu integrieren und;
- die verschiedenen zusätzlichen Komponenten durch ein intelligentes Management miteinander zu vernetzen und eine optimale Balance zwischen den verstärkt dezentralen Strukturen und den überregional zu vernetzenden Systemen – bis hin zu einem europäischen Verbund der Nutzung erneuerbarer Energien – zu finden.

### **3. Das UBA - Nachhaltigkeitsszenario im Detail**

#### **3.1 Ein wichtiger Schlüssel zur Nachhaltigkeit – mehr Effizienz im Strombereich**

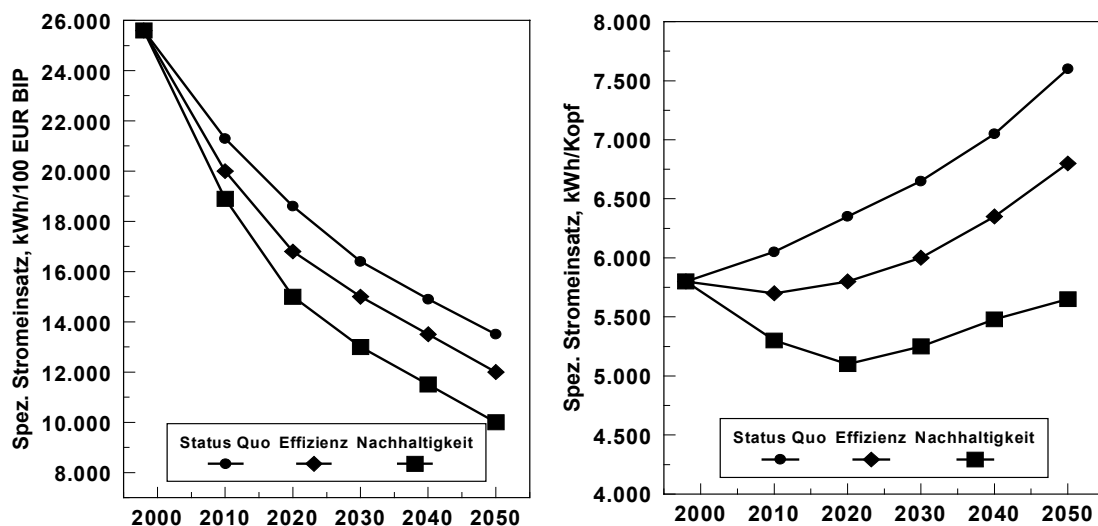
Im Basisjahr 1998 lag der Endenergieeinsatz von Strom bei 1.700 PJ/a (472,2 TWh). Davon entfiel fast die Hälfte auf die Industrie sowie je etwa ein knappes Viertel auf Gewerbe, Handel, Dienstleistungen sowie die privaten Haushalte. Der Stromverbrauch im Verkehr war demgegenüber unbedeutend. Elektrischer Strom hat seinen Anteil am Endenergieeinsatz in allen Sektoren in den letzten Jahrzehnten kontinuierlich gesteigert. Wenn auch die Zuwachsraten in den letzten Jahren deutlich abgenommen haben, wird in Status Quo-Szenarien auch künftig ein weiterer Zuwachs erwartet. Gründe für diese Entwicklung sind in der vielfach noch weiter steigenden Ausstattung der Haushalte und der Wirtschaft mit elektrischen Geräten und Anlagen zu sehen. An erster Stelle stehen dabei Telekommunikations- und EDV-Anlagen sowie Anlagen zur Kühlung und Klimatisierung. Bedeutsam ist ferner auch der weitere Ersatz fossil befeuerter Anlagen durch elektrisch betriebene Aggregate im Produktionsbereich.

Kehrseite der vielseitigen und häufig einfachen Verwendungsmöglichkeit von elektrischer Energie ist die relativ aufwändige, kostspielige und derzeit emissionsintensive Bereitstellung des Energieträgers Strom. Bei einem Anteil des Stroms am Endenergieeinsatz in Deutschland von heute rund 18% entfallen mehr als ein Drittel der durch den Energieeinsatz in Deutschland verursachten CO<sub>2</sub>-Emissionen und mit rd. 50 Mrd. EUR/a fast die Hälfte der von den Energieverbrauchern aufzubringenden Energiekosten auf die Strombereitstellung. **Deshalb ist die rationelle und sparsame Verwendung von Strom ein zentraler Baustein**

**zur Entwicklung eines nachhaltigen Energiesystems.** Die dazu vorhandenen Ansatzpunkte sowie die zur Ausschöpfung der bestehenden CO<sub>2</sub>-Minderungspotenziale verfügbaren Optionen im Bereich der elektrischen Geräte, Anlagen und Prozesse lassen sich in drei Kategorien aufteilen:

- Nutzung effizienterer Geräte, Anlagen und Prozesse einschließlich der integrierten Gebäudeplanung und intelligenten Steuerung, angepasste Dimensionierung (z. B. von Umwälzpumpen im Bereich der Hausheizungssysteme, die häufig um den Faktor 2 bis 3 überdimensioniert sind) und teilweise sogar der Verzicht auf die entsprechende Anlage bzw. Anwendung (z. B. elektrischer Dosenöffner).
- Ersatz von elektrischer Energie durch andere Energieträger in Anwendungsbereichen, die nicht „stromspezifisch“ sind, also z.B. die Elektrodirektheizungen, die elektrische Warmwasserbereitung, die Wassererwärmung in Wasch- und Spülmaschinen sowie Teile der Prozesswärmeerzeugung.
- Minderungspotenziale durch den bewussteren Umgang mit Strom bzw. elektrischen Geräten durch Verringerung der Leerlaufverluste im Stand-by Betrieb, durch Vermeidung des Gebrauchs verbrauchsintensiver Geräte wie z.B. des elektrischen Wäschetrockners sowie durch Vermeidung von Teillastnutzungen (z. B. von Spülmaschinen oder Waschmaschinen).

Alle drei Strategieelemente werden zur Gestaltung eines künftigen nachhaltigen Energiesystems im Nachhaltigkeitsszenario eingesetzt. Das Ausmaß der anzustrebenden Produktivitätssteigerung im Strombereich wird deutlich im Vergleich mit dem Wachstum der Wirtschaftsleistung in den nächsten 50 Jahren (**Abb. 5**).



**Abbildung 5: Entwicklung des spezifischen Stromesatzes (kWh/100 € BIP (links) und kWh/Einwohner (rechts)) in den Szenarien aus (UBA 2002).**

Im Status Quo-Szenario erhöht sich die Produktivität des Stromesatzes zwischen 1998 und 2020 bereits um 27% und nimmt bis zum Jahr 2050 noch einmal um etwa die gleiche Größenordnung zu (in der Abbildung ist mit der Stromintensität der Umkehrwert der Energieproduktivität dargestellt). Eine Einheit Bruttoinlandsprodukt (BIP) kann damit bereits auch ohne über den Trend hinaus gehende Maßnahmen im Jahr 2020 mit einem um ein Viertel

geringeren Einsatz elektrischer Energie bereitgestellt werden als 1998. Im Szenario Nachhaltigkeit sind größere Produktivitätssteigerungen bis hin zu einer Verringerung der Stromintensität von insgesamt rund 60% über den gesamten Betrachtungszeitraum bis zum Jahr 2050 angenommen. Trotz der auch im Trend unterstellten Produktivitätssteigerungen steigt der Pro-Kopf-Verbrauch von Strom im Zeitverlauf im Status Quo-Szenario an. Im Nachhaltigkeitspfad kann der spezifische Verbrauch pro Einwohner zunächst gesenkt werden, erreicht aber im Jahr 2050 bei rückläufiger Bevölkerung zugleich aber unvermindert wachsender Wirtschaftsaktivität fast wieder das Ausgangsniveau des Jahres 1998.

### **3.2 Stromversorgung der Zukunft – effizient, dezentral und großräumig vernetzt**

Die Stromversorgung Deutschlands ist trotz der 1998 erfolgten Liberalisierung des Strommarktes auch heute noch wesentlich von der bis dahin existierenden, zentralistischen Monopolstruktur geprägt. Von insgesamt rund 900 deutschen Stromversorgungsunternehmen stellten im Jahr 2000 allein die sechs größten Unternehmen<sup>5</sup>, die sogenannten Verbundunternehmen, etwa 80% der Bruttostromerzeugung bereit. Infolgedessen sind große, ausschließlich stromerzeugende Kern- und Kohlekraftwerke heute die maßgeblichen Stützen der deutschen Stromversorgung. Sie liefern 82% des nachgefragten Stroms, rund 12% stammen aus der wesentlich effizienteren, zumeist in kleineren Einheiten realisierten Kraftwärme-Kopplung, erneuerbare Energien haben mit 6% Anteil - mit Ausnahme der Wasserkraft und der Windkraft - noch geringe Bedeutung. Die Elektrizitätswirtschaft in Deutschland an der Schwelle zum 21. Jahrhundert lässt sich somit durch folgende Kennzeichen charakterisieren:

- Öffnung von einer monopolistischen zu einer liberalisierten Versorgungsstruktur mit zunehmendem Wettbewerb und Handel auf dem Stromsektor mit Erweiterung des Stromverbunds innerhalb Westeuropas und Ausdehnung nach Osteuropa.
- Fusion der großen Energieversorger zu wenigen noch größeren Unternehmen, welche maßgebliche Teile der Transport- und Verteilungsnetze und 80% der Stromerzeugung kontrollieren, wodurch die Gefahr besteht, dass die Liberalisierung durch Oligopolbildung unterlaufen wird.
- Stromerzeugung und -verteilung sind noch weitgehend auf zentrale Strukturen ausgelegt; Primärenergieträger zur Stromerzeugung sind hauptsächlich Kernenergie und Kohlen.
- Die bestehenden Gesetze ermöglichen die Förderung der Erneuerbaren Energien und der Kraft-Wärme-Kopplung und schreiben den Ausstieg aus der Atomwirtschaft innerhalb von ca. 20 Jahren fest.
- Die Strompreise sind seit der Liberalisierung im Jahr 1998 auch auf Basis der zu Monopolzeiten aufgebauten Überkapazitäten deutlich gesunken, das Minimum ist allerdings bereits durchschritten. Spätestens gegen Ende dieses Jahrzehntes dürfte der dann einsetzenden Kraftwerkserneuerungsbedarf zu einem deutlichen Wiederanstieg der Strompreise führen.

Der durch die Liberalisierung eingeleitete Umbruch stellt eine hohe Herausforderung dar, er birgt in sich auch zahlreiche Chancen, Entwicklungen in Richtung einer nachhaltigen Strom-

---

<sup>5</sup> Seit dem Zusammenschluss von VEAG, BEWAG und HEW mit der schwedischen Vattenfall bestehen derzeit nur noch 4 Verbundunternehmen.

versorgung einzuleiten. Die wesentlichen Strategieelemente für die dazu erforderliche Umgestaltung der Stromversorgung sind

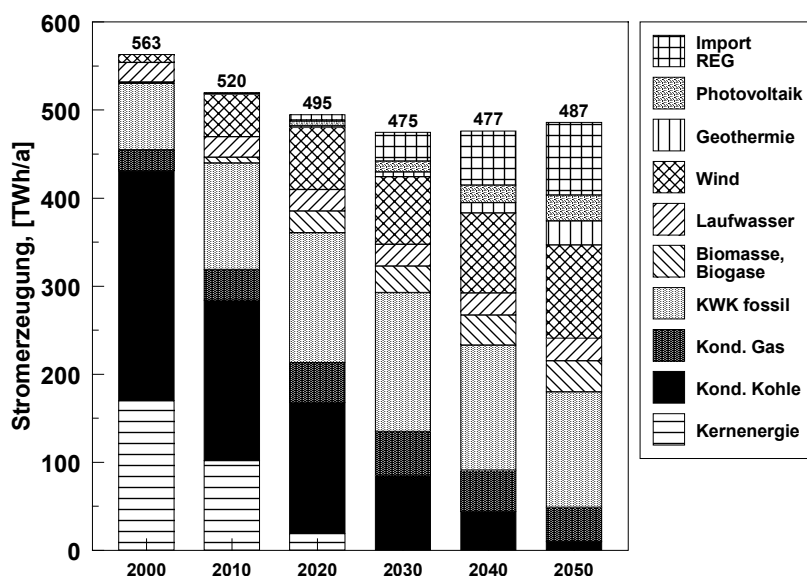
- der deutliche Ausbau der gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung (KWK) durch die derzeitigen Marktakteure (vornehmlich Modernisierung und Ersatz im Kraftwerksbereich und bei der Industrie) aber auch durch neue Akteure,
- eine signifikante Effizienzsteigerung bei den verbleibenden ausschließlich stromerzeugenden, fossil gefeuerten Kraftwerke durch entsprechende Ertüchtigungsmaßnahmen bestehender Anlagen als auch durch den Neubau besonders effizienter Kraftwerke,
- die Substitution kohlenstoffreicher Brennstoffe für die Stromerzeugung (z. B. Stein- und Braunkohle) durch kohlenstoffärmere Energieträger (z. B. Erdgas)<sup>6</sup>
- der Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien zur längerfristig dominierenden Energiequelle
- und schließlich die Verringerung von Transport- und Verteilungsverlusten durch die Verlagerung eines Teils der Stromerzeugung an den Standort der Stromanwendung (dezentrale Stromerzeugung), die sich zugleich günstig in das Lastmanagement der Verbraucher einpassen lassen (virtuelle Kraftwerke).

Das abgestimmte Zusammenwirken dieser Strategieelemente findet sich in der durch das Nachhaltigkeitsszenario beschriebenen Zukunftsentwicklung (**Abb. 6**) wieder. Es führt innerhalb von 50 Jahren zu einer völligen Veränderung der Stromversorgungsstruktur. Das letzte Kernkraftwerk geht im Nachhaltigkeitsszenario in der Mitte der dritten Dekade dieses Jahrhunderts außer Betrieb, die Anteile fossiler Kondensationskraftwerke werden bis 2050 mit dann nur noch 13% ihren Beitrag stark reduziert haben. Als reine Kondensationskraftwerke kommen im Wesentlichen nur noch schnell regelbare, neue gasgefeuerte GuD-Kraftwerke zum Einsatz, welche effizient sind und niedrige Fixkosten besitzen. Die Kraft-Wärme-Kopplung mit Heizkraftwerken (HKW), dezentralen BHKW einschließlich Mikrogasturbinen, Stirlingmotoren und Brennstoffzellen hat sich mit einem Anteil von 38% Anteil (185 TWh/a) bis 2030 relativ gesehen in ihrer Bedeutung verdreifacht, die Biomasse liefert dazu steigende Anteile der Brennstoffe. Der Anteil der übrigen erneuerbaren Energiequellen ist bis 2050 auf 56% gestiegen (einschließlich Biomasse 65%), wobei sowohl heimische Quellen (Photovoltaik, Wind, Laufwasser, Geothermie, Biomasse) als auch Importquellen (Wasserkraft, Wind, Solarthermische Kraftwerke) zum Einsatz kommen. Dabei findet auch das Konzept der virtuellen Kraftwerke Verwendung, das alle Komponenten des Systems einschließlich der Verbraucher selbst vernetzt und aufeinander abstimmt.

Nach 2030 leistet die Stromversorgung durch den überregionalen Import von Elektrizität aus erneuerbaren Quellen mittels Hochspannungsgleichstromleitungen (HGÜ), die über große Entfernungen Strom aus Skandinavien, Südeuropa, windreichen Küsten in Westeuropa und sogar Nordafrika transportieren einen zunehmend wichtigen Beitrag zu einer verstärkten europäischen Vernetzung. Zusätzlich zur Deckung der Endenergienachfrage nach Strom wird, beginnend in 2030, weitere Stromerzeugungskapazität aus erneuerbaren Energien für die Erzeugung von Wasserstoff bereitgestellt, der insbesondere im Verkehr und als Beimischung in das Erdgasnetz Verwendung findet; im Jahr 2050 sind dies insgesamt 57 TWh/a.

---

<sup>6</sup> Die CO<sub>2</sub>-Abscheidung und –Deponierung ist hier als Option nicht mit aufgelistet worden, da sie bisher nicht zu den in Deutschland oder Europa praktizierten Klimaschutzinstrumenten gehört, sie vergleichsweise energieverbrauchsintensiv und kostenintensiv ist und noch hohe Unsicherheiten über das in der Praxis zu realisierende Speicherpotenzial bestehen. Darüber hinaus sind für bestimmte Endlageroptionen (CO<sub>2</sub>-Deponierung in der Tiefsee) die Langzeitwirkungen und ökologischen Folgen noch nicht hinreichend bekannt und abschätzbar.



**Abbildung 6 : Strukturveränderungen bei der Stromerzeugung im Nachhaltigkeitsszenario bis 2050 nach Kraftwerksarten und den Beiträgen erneuerbarer Energien (ab 2030 einschließlich des Strombedarfs für die Wasserstoffherzeugung mit 57 TWh/a in 2050)**

Die Stromerzeugungsstruktur im Jahr 2050 unterscheidet sich damit maßgeblich von der Heutigen. Aber auch vor 50 Jahren sah die Stromversorgung deutlich anders aus. Fast die gesamte Stromerzeugung basierte damals auf der Verbrennung von Kohle. Im Nachhaltigkeitsszenario werden die erneuerbaren Energien die entscheidende Grundlage der Versorgung darstellen. Wesentlich für den hierfür erforderlichen massiven Aufbau von Stromerzeugungskapazitäten aus erneuerbaren Energien ist eine zeitlich und ökonomisch aufeinander abgestimmte Erschließung aller Potenziale. Kurzfristig (etwa bis 2010) sind die wichtigsten Ziele, die technische Reife (Verfügbarkeit) zu verbessern und weiter zur marktwirtschaftlichen Wettbewerbsfähigkeit aufzuschließen. Dies favorisiert aus heutiger Sicht zunächst die Biomasse und die Windenergie und die restlichen Potenziale der Wasserkraft. Potenzielseitige Restriktionen sind bisher, außer bei der Wasserkraft, nur in Teilbereichen zu erwarten. Dies betrifft vor allem die windhöffigen Gebieten des Küstenbereichs und ausgewählter Regionen des Binnenlandes mit ihren heute schon hohen Anteile der Windenergie und die Nutzung der begrenzten Altholzpoteziale bei der Biomasse. Hinzu tritt die Notwendigkeit, alle anderen Technologien aus dem Bereich erneuerbare Energien wenigsten in dem Maße in den Markt einzuführen, dass sie nach 2010 in energiewirtschaftlich relevantem Maße an der zukünftigen Strombedarfsdeckung teilnehmen können und entscheidende technologische Weiterentwicklungen angeregt worden sind. Dies betrifft die Photovoltaik, die geothermische Stromerzeugung (Errichtung von HDR-Demonstrationsanlagen) und den Bau einer größeren Anzahl solarthermischer Kraftwerke zur lokalen Stromversorgung in den sonnenreichen Ländern in Südeuropa und Nordafrika.

Im Nachhaltigkeitsszenario überschreitet bis zum Jahr 2050 keiner der Energieträger einen Anteil an der Stromerzeugung von 30%, die Energieversorgung wird also von keiner der Energiequellen übermäßig dominiert. Der größte Anteil liegt mit etwa 30% beim Erdgas, dessen Beitrag zu diesem Zeitpunkt aber bereits wieder rückläufig ist. Den größten Beitrag erneuerbarer Energien leistet mit 20% die Windkraft, gefolgt vom Stromimport aus solarthermischen Kraftwerken (10%) und der bis dahin vollständig ausgebauten heimischen Wasserkraft (8,5%). Die restlichen Quellen sind mit maximal je 4 – 5% an der Nettostromer-

zeugung beteiligt. Damit bewegen sich insbesondere die Anteile der fluktuierenden Quellen Wind und Photovoltaik in einem Rahmen, der zwar höhere Anforderungen an die Kraftwerks- und Netzsteuerung stellt, aber aus heutiger Sicht als technisch beherrschbar angesehen werden kann, (ET 2002). Hierzu tragen auch die mittlerweile stark verbesserten Prognoseverfahren für die Windenergie bei. Bereits heute lässt sich der Windenergiebeitrag mit einem Fehler von weniger als 6% tagesgenau abschätzen

Während sich unter Status Quo-Bedingungen die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen der Stromerzeugung wegen des sukzessiven Ausstiegs aus der Kernenergie erst längerfristig verringern, sinken diese wegen des vollständigen Umbaus der Stromversorgung im Nachhaltigkeitsszenario kontinuierlich ab. Unter Trendbedingungen erreichen sie im Jahr 2050 die Hälfte des Ausgangsniveaus von 0,60 kg/kWh<sub>el</sub>. Im Nachhaltigkeitsszenario ist dieser Wert bereits 2030 erreicht, zwanzig Jahre später führt die Strombereitstellung spezifisch nur noch zu einem Fünftel der CO<sub>2</sub>-Emissionen des Jahres 1998. Der klimaverträgliche Ausstieg aus der Kernenergie stellt sich damit nur als ein Zwischenschritt in den Bemühungen dar, die Stromerzeugung klimaverträglicher und nachhaltig zu gestalten.

### **3.2 Altbausanierung und Nahwärmestrategie – Kennzeichen einer effizienten fossil - regenerativen Wärmeversorgung**

Der Wärmemarkt erhält in der öffentlichen Wahrnehmung häufig nicht den ihm zustehenden Stellenwert, obwohl immerhin 57% des Endenergiebedarfs für die Bereitstellung von Wärme benötigt werden und dabei 40% der CO<sub>2</sub>-Emissionen entstehen. Zur Einleitung einer nachhaltigen Entwicklung wird der Wärmemarkt daher stärker als bisher zu berücksichtigen sein. Besonders dominant ist der Anteil der Wärme im Bereich der privaten Haushalte. 87% des Endenergiebedarfs werden hier für die Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser benötigt. Dies weist auf erhebliche Einsparpotenziale durch verbesserte Wärmedämmung im Gebäudebestand hin. Darüber hinaus wird die Wärme nur bei geringen Temperaturen unterhalb von 100 °C benötigt. Dieser Temperaturbereich ist für erneuerbare Energien wie solare Wärme oder Geothermie und auch für andere energiesparende Umwandlungstechniken wie die Wärmepumpe besonders geeignet. Schließlich kann durch eine verbesserte Wärmedämmung ein großer Teil des Raumwärmebedarfs überhaupt vermieden werden.

Bei der Renovierung von Altbauten sind nach der Anfang 2002 in Kraft getretenen Energieeinsparverordnung (EnEV) wärmetechnische Mindeststandards für die sanierten Bauteile einzuhalten. Bei einer vollständigen Sanierung des heutigen Bestandes an Wohngebäuden könnte sich im Mittel der Nutzwärmebedarf für Raumheizung von derzeit 182 auf 78 kWh/m<sup>2</sup>/a verringern. Durch verbesserte Wärmedämmung können also knapp drei Fünftel des Raumwärmebedarfs eingespart werden (**Tabelle 1**). Bei älteren Bauwerken aus der Zeit vor dem Inkrafttreten der ersten Wärmeschutzverordnung sind die Einsparungen sowohl besonders kostengünstig als auch spezifisch betrachtet besonders hoch. Das mengenmäßig größte Potenzial ist in der großen Anzahl von Gebäuden zu finden, welche in den ersten 25 Nachkriegsjahren errichtet wurden.

Energetische Verbesserungen werden am kostengünstigsten zu dem Zeitpunkt durchgeführt, an dem das betroffene Bauteil ohnehin zur Sanierung ansteht. Nur die zusätzlichen Kosten für die wärmetechnische Verbesserung sind dann bei der Wirtschaftlichkeitsberechnung zu berücksichtigen. Es resultieren geringe Kosten zwischen 0,8 und 1,7 ct/kWh, bei einem inflationsbereinigten Zinssatz von 4%. Als Mittelwert über die Sanierung des gesamt-

ten Altbaubestandes ergeben sich Kosten von 1,35 ct pro eingesparte kWh. Der größte Teil hiervon ist also bereits bei den heutigen Brennstoffkosten wirtschaftlich erschließbar.

**Tabelle 1: Technisches und wirtschaftliches Einsparpotenzial des Wärmebedarfs von bestehenden Wohngebäuden (PJ/a)**

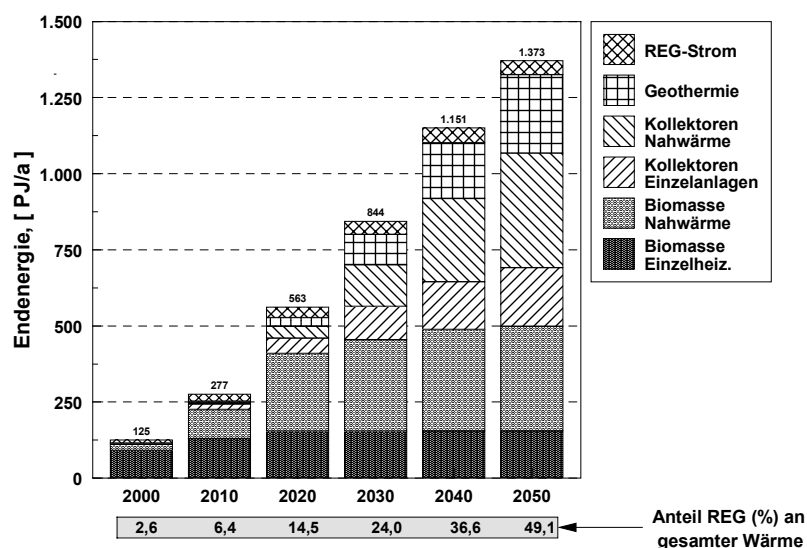
	<b>ABL</b>	<b>NBL</b>
<b>Nutzenergieverbrauch 1999</b>	1.642 (100%)	359(100%)
<b>Technisches Einsparpotenzial</b>	920 (56%)	224 (63%)
<b>Wirtschaftliches Einsparpotenzial</b>		
- bis 2 Cent/kWh	822 (50%)	214 (59%)
- bis 4 Cent/kWh	872 (53%)	224 (63%)
Umgesetzte Einsparung im <b>Szenario Nachhaltigkeit</b> (Sanierungsrate 2%/a)	690 (42%)	213 (59%)

Trotz der wirtschaftlich günstigen Rahmenbedingungen gibt es in Deutschland einen erheblichen Sanierungsstau. Die Sanierungsrate von Gebäuden liegt zwar bei etwa 2,5%/a, aber nur bei jeder fünften Sanierung werden auch die Möglichkeiten einer gleichzeitigen kostengünstigen Verbesserung der Wärmedämmung genutzt. Bei einer Fortschreibung der heutigen Sanierungsraten würden die energetischen Einsparmöglichkeiten im Gebäudebestand erst nach etwa 200 Jahren vollständig umgesetzt sein. Für die Einleitung einer nachhaltigen Entwicklung ist es daher unverzichtbar, Maßnahmen zu ergreifen, durch welche eine Verbesserung der Wärmedämmung parallel zu ohnehin anstehenden Sanierungsarbeiten zur Selbstverständlichkeit wird und die günstigen Gelegenheiten nicht wie bisher in den meisten Fällen verpasst werden.

Große Beiträge zur Deckung des Wärmebedarfs können durch Biomasse, Solarkollektoren und Geothermie geliefert werden. Ihre verstärkte Nutzung stellt eine ideale Ergänzung der Einsparbemühungen dar. Heute wird das Potenzial der erneuerbaren Energien erst zu einem geringen Teil ausgeschöpft. Nur im Bereich der Biomasse wird bereits ein merklicher Anteil des Potenzials in Höhe von 10 bis 20% genutzt. Jeweils etwa 40% des Potenzials resultieren aus festen Reststoffen (Holz oder Stroh) und dem Anbau von Energiepflanzen auf ungenutzten Ackerflächen. Biogase (Klär gas, Deponiegas, Vergärung von Gülle oder Biomüll) spielen demgegenüber eine geringere Rolle. Das gesamte Potenzial (ohne die der Stromerzeugung zuzuordnenden Altholzmengen) liegt bei etwa 750 PJ/a. Ein Teil hiervon, insbesondere Biogas, wird in KWK-Anlagen eingesetzt. Solarkollektoren werden heute in Deutschland zum größten Teil auf den Dächern von Ein- und Zweifamilienhäusern installiert. Als Aufstellungsflächen kommen aber auch alle anderen Gebäude sowie weitere bauliche Strukturen wie Lärmschutzwände oder die Überdachung von Parkplätzen in Frage. Nach Berücksichtigung aller Restriktionen einschließlich der Nutzungskonkurrenz durch Photovoltaik kann etwa 30% des durch verbesserte Wärmedämmmaßnahmen bereits reduzierten Bedarfs für Raumwärme und Warmwasser durch auf Dächern installierte Solarkollektoren gedeckt werden (gut 700 PJ/a Nutzwärme). Für weitere Stellflächen innerhalb von Siedlungen kann nochmals mit dem gleichen Betrag gerechnet werden (solare Nahwärmekonzepte). Damit ist das Potenzial etwa doppelt so groß wie das der Biomasse. Die Nutzung von hydrogeothermalen Lagerstätten ist die kostengünstigste Möglichkeit, Erdwärme zu nutzen.

Unter Berücksichtigung der Siedlungsstrukturen in den Gebieten mit derartigen Vorkommen, beträgt das Potenzial der Geothermie 1.100 PJ. Diese Energiemenge steht jährlich für einen Zeitraum von 100 Jahren zur Verfügung. Danach sind diese hydrothermalen Lagerstätten erschöpft bzw. müssen sich regenerieren. Wird auch die Nutzung von Erdwärme mit Erdsonden einbezogen, so ist das Potenzial nahezu unbegrenzt, da überall ab etwa 2.000 m Tiefe die Untergrundtemperaturen für Zwecke der Beheizung ausreichen. In noch weiterer Tiefe (> 5.000 m) ist eine effiziente Nutzung im Verbund mit einer geothermischen Stromerzeugung (Hot Dry Rock Verfahren) möglich.

Die Entwicklung im Wärmemarkt ist durch die Annahme geprägt, dass zunächst das durch die Bundesregierung angestrebte Verdopplungsziel bis 2010 zeitgerecht erreicht wird. Dabei werden die kostengünstigen Potenziale vorrangig erschlossen, also insbesondere die Nutzung des kostengünstigen Teils der biogenen Reststoffe, welche in der Forst- und Landwirtschaft sowie in den Holzverarbeitenden Betrieben anfallen. Darüber hinaus wird zusätzlich schon im Zeitraum bis 2010 berücksichtigt, dass rechtzeitig und in hinreichendem Maße Erfahrungen mit denjenigen (teureren) Techniken gesammelt werden müssen, welche im Zeitraum danach zu den tragenden Säulen der Entwicklung werden sollen. Dies sind ab 2020 die größeren Kollektoranlagen zur Raumwärmebereitstellung (Solare Nahwärme) und die Geothermie. Damit kommt es im Nachhaltigkeitsszenario zum verstärkten Ausbau vernetzter Wärmeversorgungssysteme unterschiedlicher Größe. In fast allen Fällen können erneuerbare Energien in einem Nahwärmenetz kostengünstiger genutzt werden als in Kleinanlagen für einzelne Gebäude. Für die Nutzung eines großen Teils des Potenzials erneuerbarer Energien ist eine Zusammenfassung mehrerer Verbraucher zu einem großen Verbund sogar nahezu unerlässlich. Mehr als zwei Drittel des Beitrags erneuerbarer Energien zur Wärmebereitstellung wird demnach um 2050 mit Hilfe von Nahwärmenetzen bereitgestellt. (**Abb. 7**).

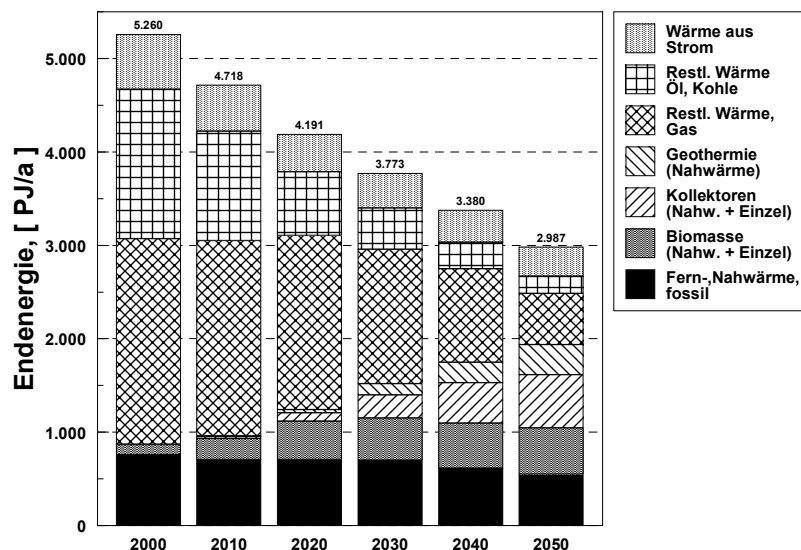


**Abbildung 7: Beitrag erneuerbarer Energien zur Wärmebereitstellung (Raumwärme, Warmwasser) unterschieden nach Energiequellen sowie nach Einzelanlagen und Nahwärmeversorgungen.**

Auch die Ausweitung der Kraft-Wärme-Kopplung auf Basis fossiler Brennstoffe ist vielfach an die Existenz von Nahwärmenetzen gekoppelt. „Nahwärme“ ist dabei als Sammelbegriff für eine große Bandbreite von Netzgrößen zu verstehen. Sie reicht von der Verknüpfung von

Einzelgebäuden bis zur Versorgung von Stadtteilen mit mittelgroßen BHKW. Die Übergänge zur Objektversorgung einerseits und zur Fernwärmeversorgung andererseits sind fließend. Einzelne Nahwärmenetze können zu „Fernwärmenetzen“ zusammenwachsen mit einer entsprechenden Anpassung der Heizzentralen bei Erneuerung der Anlage. „Vernetzte Wärmeversorgung“ ist das wärmeseitige Gegenstück zur Verknüpfung kleinerer und mittelgroßer Stromerzeuger zu „virtuellen“ Kraftwerken im Strombereich. Sie erlaubt es, eine Vielzahl effizienter Techniken optimal einzusetzen und bereits mit fossilen Brennstoffen sehr effiziente Wärmeversorgungen aufzubauen um später sukzessive erneuerbare Energien in das bestehende System einzuführen. Vielfach sind die betreffenden Energieerzeuger in Kraft-Wärme-Kopplung gleichzeitig Bestandteil dieser virtuellen Kraftwerke.

Entsprechend groß ist die Veränderung der zukünftigen Struktur des Wärmemarkts. Der Anteil von Nahwärme wird bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung des Fernwärmeanteils an der Wärmeversorgung erheblich ausgebaut. Für die im Nachhaltigkeitsszenario angenommenen Strukturveränderungen ist es bis 2050 notwendig, knapp 60% des gesamten (deutlich reduzierten) Wärmebedarfs über Nah- und Fernwärmenetze zu verteilen (Abb.7, **Abb. 8**). Überraschend ist dabei der mengenmäßig zunächst konstante und längerfristig leicht zurückgehende Beitrag der fossilen KWK (relativ wächst der Anteil der KWK an der Wärmeversorgung von derzeit rund 10% auf 25%). Er ist durch den Übergang zu KWK-Anlagen mit deutlich höherer Stromkennziffer im Vergleich zu heute bedingt, hinzu kommt längerfristig das starke Vordringen erneuerbarer Energien. Die Umstrukturierung des Wärmesektors bewirkt somit, dass die Einzelversorgung auf der Basis Heizöl in den nächsten 50 Jahren nahezu völlig verschwindet und diejenige mit Erdgas stark zurückgeht. Die deutsche Siedlungsstruktur mit geschlossenen Ortschaften und relativ kleinen Grundstücksgrößen stellt prinzipiell eine gute Ausgangsbasis für den Ausbau der Nahwärmeversorgung dar, dennoch werden die notwendigen Maßnahmen Jahrzehnte dauern und müssen so schnell wie möglich eingeleitet werden.

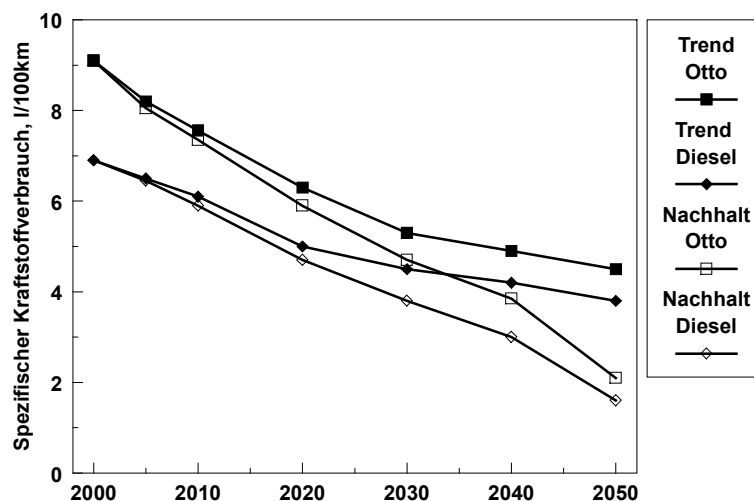


**Abbildung 8 : Verlauf des Wärmebedarfs und Veränderung der Wärmebereitstellungsstruktur (Raumheizung, Warmwasser, Prozesswärme) im Szenario Nachhaltigkeit durch Fern- und Nahwärme aus fossiler und biogener Kraft-Wärme-Kopplung sowie aus Kollektor- und Erdwärme und verbleibende Deckung durch konventionelle Versorgung.**

### 3.3 Verkehr – zuerst effizient dann regenerativ

Auch im Verkehrssektor spielt das zeitlich optimale Ineinandergreifen von Effizienz- und Konsistenzstrategie eine wesentliche Rolle, wobei hier zunächst Effizienzverbesserungen im Vordergrund stehen. Da die Personenverkehrsleistung den Annahmen zufolge bis 2050 noch um 10% wächst und die Güterverkehrsleistung sich mehr als verdoppelt, haben wirkungsvolle Effizienzmaßnahmen an Fahrzeugen die höchste Priorität.

Trotz der bereits deutlichen Verbesserungen der Fahrzeugeffizienz unter Trendbedingungen (**Abb. 9**) trägt der motorisierte Individualverkehr auch im Jahr 2050 noch mit mehr als 50% zum Energieverbrauch des Verkehrs bei. Vor diesem Hintergrund liegt es nahe, im Rahmen einer Nachhaltigkeitsstrategie bei der Verringerung der verkehrsbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen hier einen besonderen Schwerpunkt zu setzen, zumal das technische Potenzial mit den im Trend erreichten Werten bei weitem noch nicht ausgeschöpft ist. In den meisten Studien werden Verbrauchssenkungen von mehr als 50% in wenigen Jahren für möglich gehalten, d. h. für Otto-Pkw Werte unter 5 l/100 km. Im Trendszenario wird dieser Wert im Bestand erst nach 2040 erreicht. Langfristig ist auch ein Verbrauch von unter 3 l/100 km bis zu 2 l/100 km auch für Mittelklassewagen mit hinreichendem Leistungs- und Fahrkomfort darstellbar. Hierfür wäre allerdings ein radikaler Wandel innerhalb der Automobilindustrie zu einem „Leichtfahrzeugbau“ nötig, denn solche Automobilkonzepte basieren auf teilweise neuen Komponenten und Fertigungstechnologien wie konsequentem Leichtbau durch faserverstärkte Kunststoffe, Aluminium und dem noch leichteren Magnesium sowie auf neuen elektromotorischen Antriebssystemen wie Brennstoffzelle oder Hybridantriebe. Solche tiefgreifenden Veränderungen sind nicht innerhalb eines Jahrzehnts denkbar, wohl aber innerhalb von 30 oder 40 Jahren. Sie machen sich im Nachhaltigkeitsszenario daher im wesentlichen erst ab 2030 bemerkbar.

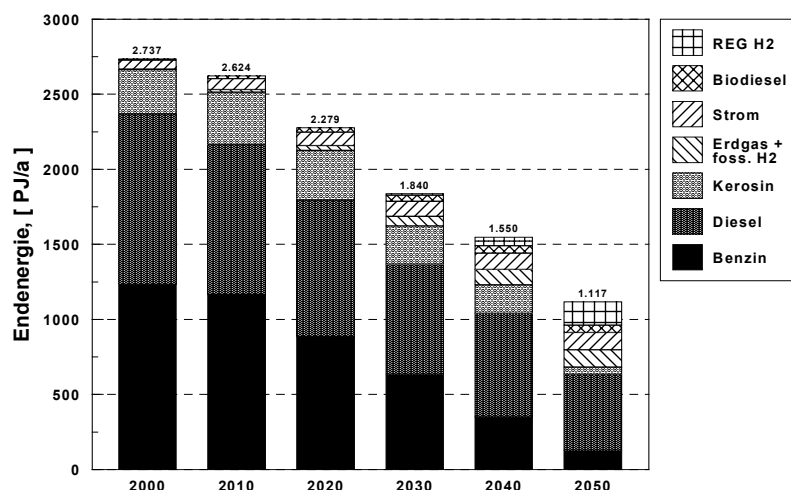


**Abbildung 9: Entwicklung des spezifischen Verbrauchs von PKW (durchschnittlicher Verbrauch im Fahrzeugbestand) im Nachhaltigkeitsszenario im Vergleich zur Trendentwicklung.**

Für eine Abschätzung der Minderungspotenziale im Nachhaltigkeitsszenario wird davon ausgegangen, dass sich der durchschnittliche Verbrauch der Fahrzeugflotte bis zum Jahr 2030 auf 4,7 l/100 km bei Otto-Pkw und 3,8 l/100 km bei Diesel-Pkw reduzieren lässt, wozu sowohl eine effizientere Technik als auch eine verbrauchsmindernde Fahrweise beitragen.

Bis zum Jahr 2050 ist eine Absenkung des Durchschnittsverbrauchs im Fahrzeugbestand auf 2,1 l/100 km für Otto- und 1,6 l/100 km für Diesel-Pkw unterstellt. Gegenüber dem heute erreichten Ausgangsniveau erfordert dies eine jährliche Verbesserung des spezifischen Verbrauchs von knapp 3%/a, eine Größenordnung die über einen so langen Zeitbereich zweifelsohne ehrgeizig ist, aber durchaus im Bereich auch eigener Ziele der Automobilindustrie (CO<sub>2</sub>-Selbstverpflichtung bis 2008). Dieser Prozess kann unterstützt werden, wenn im Sinne einer allgemein wachsenden Einsicht hinsichtlich Klimaschutz die Verkehrsteilnehmer freiwillig verstärkt auf weniger hochmotorisierte (und damit sparsamere) Fahrzeuge umsteigen.

Eine derartige Strategie der Verringerung des Flottenverbrauchs durch technische Maßnahmen, führt zu einer deutlichen Reduktion des Kraftstoffverbrauchs (**Abb. 10**) und wirkt sich besonders auf den Verbrauch von Benzin aus, während der Anteil von Diesel im Zuge der relativ wachsenden Bedeutung des Güterverkehrs zunächst noch zunimmt. Aufgrund des Vorrangs der Effizienzstrategie setzt die Einführung neuer, insbesondere regenerativer Kraftstoffe zeitlich verzögert ein. Ein wesentlicher Grund dafür ist auch die Tatsache, dass der Einsatz einer Einheit erneuerbarer Energien im Strombereich auf absehbare Zeit mit einer deutlich größeren CO<sub>2</sub>-Minderungswirkung einhergeht als im Verkehrsbereich, die Einsatzeffizienz bezogen auf den resultierenden CO<sub>2</sub>-Minderungsbeitrag an anderer Stelle also zunächst deutlich größer ist. Erdgas kommt als gasförmiger Kraftstoff die Rolle als Wegbereiter für den Einstieg in die Wasserstoffversorgung zu, sein Beitrag steigt auf 2,5% im Jahr 2020 und auf 12% (einschl. reformiertem Wasserstoff) im Jahr 2050. Die Einführung von Wasserstoff aus erneuerbaren Quellen beginnt um 2030 und trägt 2050 mit 17% zur Deckung der Nachfrage nach Kraftstoffen bei. Biodiesel spielt aufgrund der Flächenkonkurrenzen zwischen dem Energiepflanzenanbau und der aus Nachhaltigkeitsgründen wünschenswerten Ausweitung des ökologischen Landbaus im Nachhaltigkeitsszenario nur eine relativ geringe Rolle.



**Abbildung 10: Entwicklung des Endenergiebedarfs für Verkehr und seiner Struktur im Nachhaltigkeitsszenario bis 2050.**

## 4. Energiewirtschaftliche Implikationen des Nachhaltigkeitsszenarios.

### 4.1 Aufwendungen für die Umstrukturierung der Energieversorgung

Neben der verstärkten Energieeinsparung sind die größten Veränderungen in Bezug auf eine nachhaltige Energienutzung beim sukzessiven Ausbaus erneuerbarer Energien notwendig. Bereits heute kommt es in diesem Bereich schon zu einem signifikanten Mitteleinsatz. Mit Hilfe von Förderprogrammen des Bundes, der Länder und Kommunen sowie gesetzlicher Vorgaben, vor allem des Erneuerbaren Energien Gesetzes (EEG), werden derzeit die Zusatzkosten aufgebracht, die erforderlich sind, um energiewirtschaftlich zunehmend relevante Beiträge von erneuerbaren Energien zu erzielen und einen Beitrag zum Aufbau sich selbst tragender Märkte zu leisten. Im Jahr 2000 wurden so rund 1,3 Mrd. EUR/a (0,7 Mrd. EUR/a allein mittels des EEG) aufgebracht und damit rund 5 Mrd. EUR/a an Investitionen in Anlagen induziert. Der größte Anteil dieser Mittel wurde direkt und verursachergerecht von den Verbrauchern geleistet, ein kleinerer Teil aus öffentlichen Steuermitteln zugesteuert. Mittlerweile sind einige Technologien, insbesondere die Windenergie, aus dem Stadium der „Pioniermärkte“ herausgewachsen. Eine besondere Sorge von Wirtschaft und Politik ist deshalb, in eine Dauersubvention für erneuerbare Energien zu geraten, wie es z.B. bis heute bei der deutschen Steinkohle der Fall ist, oder - wie bei der Kerntechnik - auf Technologien zu setzen, die letztlich aus Sicherheits- oder anderen Gründen von der Bevölkerung abgelehnt werden.

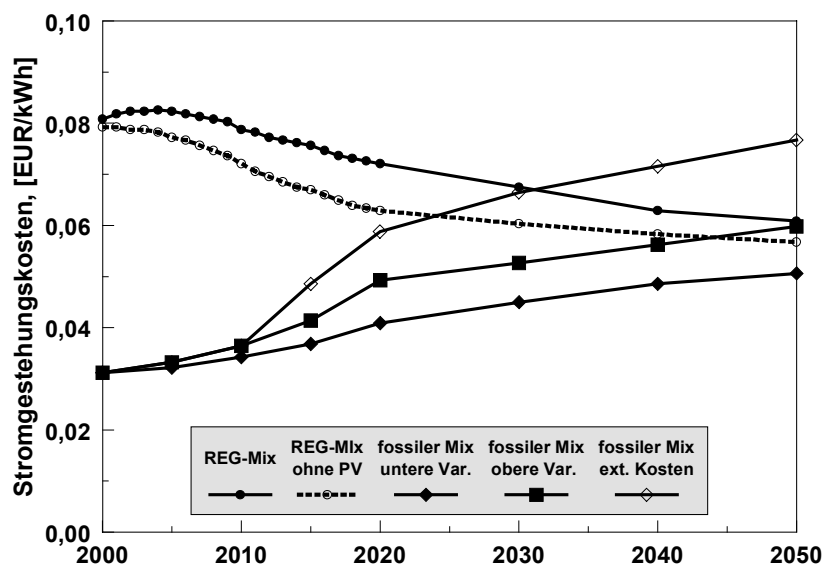
Tatsächlich sind viele der erneuerbaren Energiequellen im Jahr 2000 noch relativ teuer und können sich deshalb nur im Rahmen energiepolitischer Unterstützung am Markt durchsetzen. Auch die konventionellen Technologien auf der Basis fossiler Energiequellen haben aber im Laufe ihrer Entwicklung Lernkurven durchlaufen. Mit zunehmender Reife flachen die Lernkurven ab, können sich aber durch neue Entwicklungserfolge auch wieder verstetigen. Forschung und Entwicklung, neue Materialien und immer leistungsfähigere Mikroprozessoren führen noch heute z.B. bei Gasturbinen zu abnehmenden Kosten, obwohl diese schon seit fast hundert Jahren eingesetzt werden. Teilweise können sich durch sich ändernde Anforderungen, z.B. an die Vermeidung von Emissionen, Kosten auch wieder erhöhen. Entsprechende Erfolge, die sich in signifikanten Kostendegressionen widerspiegeln sind auch bei den erneuerbaren Energien zu erwarten und in den vergangenen Jahren an vielen Stellen auch schon bestätigt worden.

Beim Vergleich von Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energien (und ebenso von Effizienz-Technologien) mit Energietechniken, die fossile Brennstoffe nutzen, sind besonders zwei Aspekte von Bedeutung:

- Die Technologien zur Stromerzeugung auf der Basis fossiler Energieträger sind heute schon weitgehend ausgereift, d.h. die Anlagenkosten liegen bereits in der Nähe des unteren Niveaus; weitere Kostensenkungen ändern die Kostenrelationen nicht mehr grundsätzlich. Die meisten Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energien sind als „junge“ Technologien dagegen noch deutlich davon entfernt.
- Den Lernkurven unterliegende Technologiekosten sind bei der fossilen Energienutzung nur ein Teil der Gesamtkosten. Meist sind die Kosten für Brennstoffe der größere Anteil. Sie sind sowohl kurzfristigen Preisschwankungen als auch insbesondere längerfristigen Preisanstiegen ausgesetzt und unterliegen mit zunehmender Verknappung der Vorkommen hohen geopolitischen Risiken. Wenn dagegen zukünftig voll entwickelte investitionsintensive Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energien, deren laufende Kosten

sehr gering sind, ihr niedrigstes Kostenniveau erreicht haben, gibt es keinen ersichtlichen Grund dafür, dass die (realen) Kosten dann wieder ansteigen werden.

Wegen dieser Tendenzen schließt sich die Kostenschere zwischen erneuerbaren und konventionellen Energietechnologien stetig. **Abb. 11** zeigt dies am Beispiel der mittleren Stromgestehungskosten des Mixes an erneuerbaren Energien des Nachhaltigkeitsszenarios (REG-MIX) im Vergleich zu einem Mix aus neuen Steinkohle- und Erdgas-Kondensationskraftwerken (fossiler Mix: untere und obere Variante der Brennstoffpreise). Diese können heute in der Grundlast (7000 h/a) Strom zwischen 3,2 und 3,6 ct/kWh bereitstellen. Für Steinkohle erhöhen sich diese Kosten selbst bis 2050 nur relativ gering auf rund 4 cent/kWh; für Gaskraftwerke sind aufgrund höhere Brennstoffpreisanstiege dagegen für denselben Zeitpunkt bereits Stromkosten zwischen 5 und 6,5 ct/kWh zu erwarten. Berücksichtigt man zusätzlich die externen Kosten dieser Art der Stromerzeugung (Steinkohle 2,25 ct/kWh; Gas-GuD 1,0 ct/kWh entsprechend den Ergebnissen aus ExternE (European Commission 1999)), so gelangt das Stromkostenniveau beider Kraftwerksarten in einen Bereich zwischen 6,5 ct/kWh und 7,5 ct/kWh im Jahr 2050, ist also um den Faktor 2 höher als die Stromkosten heutiger Neukraftwerke und um den Faktor 4 höher als Strom aus heutigen Altkraftwerken<sup>7</sup>.



**Abbildung 11: Entwicklung der mittleren Stromgestehungskosten von erneuerbaren Energien im Szenario Nachhaltigkeit mit und ohne anteiliger Stromerzeugung aus Photovoltaik im Zeitverlauf im Vergleich zu einem Mix aus neuen fossilen Kraftwerken in Abhängigkeit unterschiedlicher Anstiege der Preise für Steinkohle und Erdgas (untere/obere Variante) sowie unter Berücksichtigung von externen Kosten ab etwa 2010.**

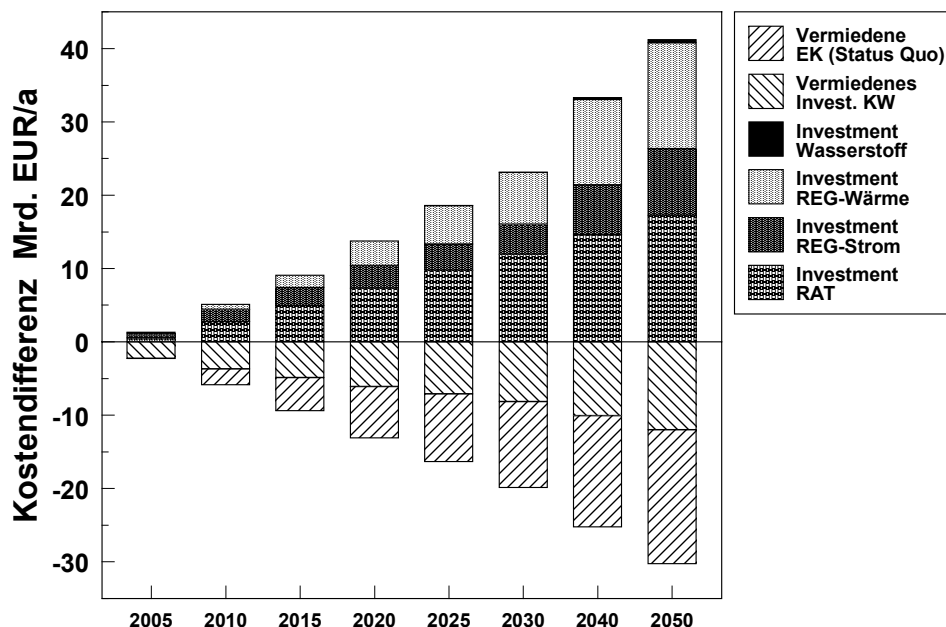
Ein Schnittpunkt der Kostenkurven ist längerfristig sicher. Spätestens dann ist auch die Ablösung der fossilen durch erneuerbare Energieträger aus rein ökonomischen Gründen sinnvoll. Je nach energiepolitischen Vorgaben (z.B. Einbeziehung externer Kosten in die Energiekosten, direkt oder indirekt z.B. mittels Emissionshandel oder anderer Instrumente) und

<sup>7</sup> Die im Projekt ExternE ermittelten externen Kosten der Stromerzeugung in Kohle- und Gaskraftwerken entsprechen etwa auch den unteren Schätzungen hinsichtlich der Kosten einer Abtrennung und Endlagerung von CO<sub>2</sub> aus den Rauchgasen dieser Kraftwerke. Diese technische Maßnahme würde somit einer Internalisierung eines Teils der externen Kosten der Kohle- und Gasnutzung bedeuten.

gewähltem Energieträgerpreispfad kann der Zeitpunkt der Kostengleichheit in einem breiten Zeitraum zwischen 2020 und 2050 liegen.

Nur erneuerbare Energiequellen ermöglichen damit langfristig relativ stabile Energiekosten – allerdings auf höherem Niveau als derzeit. Eine Sorge dabei ist jedoch, dass die notwendigen Zusatzaufwendungen für einen solchen Umbau zwischenzeitlich Ausmaße annehmen könnten, die für unsere Volkswirtschaft im internationalen Wettbewerb schädlich wären. Demgegenüber ist allerdings abzuwägen, welche wirtschaftlichen Vorteile Staaten oder Regionen entstehen, die als erste erfolgreich in der Lage sind, die global wachsenden Märkte für regenerative und Effizienz-Technologien zu besetzen („first mover advantage“). Schließlich handelt es sich, wenn man sich an Szenarien der zukünftigen globalen Energieversorgung orientiert, um Märkte in der Größenordnung von 250 Mrd. EUR/a im Jahr 2030 und von 400 – 500 Mrd. EUR/a um 2050.

Bilanziert man die jährlichen Mehraufwendungen, die im Rahmen des Nachhaltigkeitsszenarios gegenüber einer Status Quo Entwicklung entstehen (Zusatzinvestitionen in Energieeinsparmaßnahmen und erneuerbare Energien), und stellt sie den vermiedenen Aufwendungen (eingesparte Brennstoffkosten und vermiedene Investitionen in konventionelle Anlagen) gegenüber, resultieren für das Nachhaltigkeitsszenario für den gesamten Betrachtungszeitraum (2000 bis 2050) Differenzkosten von kumuliert rund 200 Mrd. EUR (kumuliert und auf das Jahr 1998 abdiskontiert ergeben sich Differenzkosten von 40 Mrd. EUR). Die durchschnittlichen Zusatzkosten für die Volkswirtschaft belaufen sich demnach auf **3,8 Mrd. EUR/a** (entsprechend 48 EUR/Kopf und Jahr), was etwa 0,14% des mittleren BIP in diesem Zeitabschnitt entspricht (**Abb. 12**).

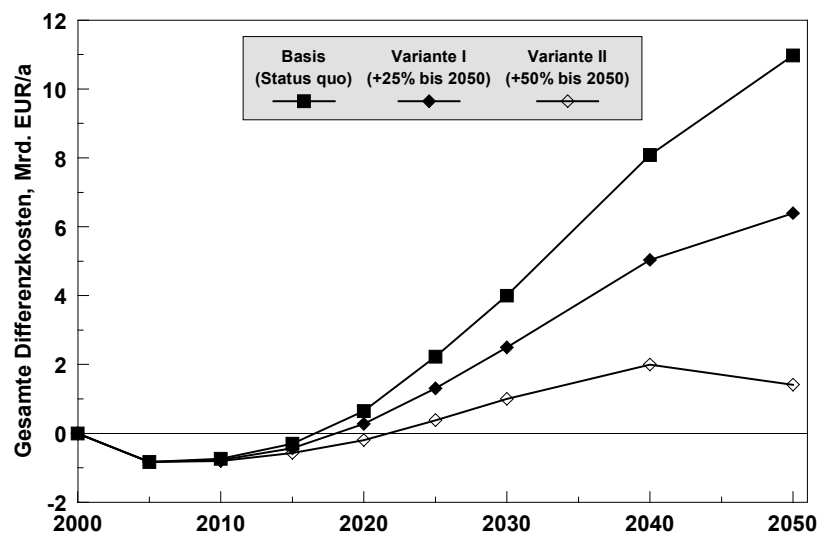


**Abbildung 12: Aufteilung der Kostendifferenz zwischen Nachhaltigkeits- und Status Quo-Szenario auf verschiedene Kostengruppen in den jeweiligen Jahren bis 2050 (Energiepreis: untere Variante; EK = Energiekosten; KW = Kraftwerke und Heizanlagen; RAT = Rationelle Energienutzung; REG = erneuerbare Energien).**

Für die ersten beiden Dekaden kann wegen der dominierenden Durchführung von wirtschaftlichen Einsparmaßnahmen im Gebäudebereich und bei der rationellen Stromverwen-

dung in der Gesamtbilanz sogar von leicht negativen Kosten gegenüber der Status Quo Entwicklung ausgegangen werden (**Abb.13**). Wenn jedoch die kostengünstigen Investitionen in Einsparmaßnahmen ausgeschöpft sind und gleichzeitig die steigenden Investitionen in erneuerbare Energien wirken, steigen die Differenzkosten entsprechend an

Welchen Verlauf die Differenzkosten nach 2020 nehmen, hängt von der antizipierten Energiepreisentwicklung ab. Steigen die Energiepreise stärker als in der Status Quo Entwicklung unterstellt – was aufgrund des moderaten Anstiegs in der Status Quo Entwicklung und der stark zunehmenden Risiken nicht unwahrscheinlich ist – oder werden mittels geeigneter Instrumente die externen Kosten weitgehend in die Marktpreise von Energie aufgenommen, so steigen die jährlichen Differenzkosten auf nur noch geringe Werte von maximal 2 Mrd. EUR/a (+50% höhere Energiepreise in 2050 im Vergleich zur Status quo – Entwicklung). Gegen Mitte diesen Jahrhundert kann so das Nachhaltigkeitsszenario bei höheren Preisvarianten kostenneutral gegenüber der Status Quo Entwicklung und danach kostengünstiger werden.



**Abbildung 13: Verlauf der Kostendifferenz zwischen Nachhaltigkeits- und Status Quo Szenario für drei unterschiedliche Varianten der zukünftigen Preise fossiler Energieträger.**

## 4.2 Versorgungssicherheit und Energieimport

Die Nutzung der heimischen Energieträger Stein- und Braunkohle wird im Nachhaltigkeitsszenario besonders stark reduziert. Dies stellt jedoch keine Gefährdung unserer Versorgungssicherheit dar. Das Nachhaltigkeitsszenario kann im Gegenteil sogar als **aktive Krisensicherung** verstanden werden, weil durch den absoluten Rückgang des Primärenergieverbrauchs und den verstärkten Ausbau erneuerbarer Energien auch die Nachfrage nach importierten Energieträgern deutlich zurückgeht. Bereits im Jahr 2020 werden im Nachhaltigkeitsszenario rund 2.700 PJ/a weniger Energie aus anderen Ländern nach Deutschland eingeführt als unter Status Quo Bedingungen. Das sind fast 20% des gesamten heutigen Primärenergieeinsatzes und mehr als 25% des heutigen Energieimports. Bis 2050 beträgt die Differenz bereits 4.800 PJ/a. Gleichzeitig leisten erneuerbare Energien und das Energieein-

sparen auch einen wichtigen Beitrag zur Diversifizierung des Energieangebots. Sie ergänzen damit den mit den Klimaschutzanforderungen noch kompatiblen heimischen Kohlesockel und die Einfuhr von Erdgas und Erdöl aus dem Ausland.

Während die Einfuhr fossiler Energien nach Deutschland abnimmt, ist ab dem Jahr 2030 ein Bezug von Strom aus erneuerbaren Energien aus dem Ausland im Rahmen eines Stromverbunds, der sowohl europäische wie nordafrikanische Länder umfasst (Wind Off-shore; Solarstrom aus Südeuropa bzw. Nordafrika) vorgesehen. Hierdurch steigt die Importabhängigkeit zwar wieder leicht an, schwerer wiegt aber der Beitrag des Stromimports zur Entwicklung der Exportländer infolge der von diesen erzielbaren Exporterlöse und damit auch zur Friedens- und Krisensicherung. In Ländern mit heute hohen fossilen Energieexporten kann so der Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien (und ihr späterer Export) grundlegende Basis für einen friedlichen und wirtschaftlich profitablen Übergang auf eine andere Energieexportquelle sein. Für andere Länder mit heute hohen Importanteilen, aber einem hohen Angebot an erneuerbaren Energien, ergeben sich – unter der Voraussetzung, dass zunächst die eigenen Energieprobleme gelöst werden – hierdurch neue Betätigungsfelder und Optionen zur Devisenbeschaffung. Zudem können durch die induzierte Technologieentwicklung und den schnelleren Aufbau von Energiebereitstellungsstrukturen indirekt auch Lösungsbeiträge für andere drängende Probleme geleistet werden (z. B. Meerwasserentsalzung).

Auch für den **Arbeitsmarkt sind tendenziell keine negativen Wirkungen** zu erwarten. Bei der Umsetzung derart vielfältiger Maßnahmen, wie sie für die Durchführung des Nachhaltigkeitsszenarios erforderlich sind, wird es Gewinner- als auch Verliererbranchen geben. Während in der Bauwirtschaft durch die Sanierungsoffensive im Gebäudebestand zusätzlich 85.000 bis 200.000 Arbeitsplätze geschaffen bzw. erhalten werden können, im Bereich erneuerbare Energien langfristig ein Beschäftigungspotenzial von 250.000 bis 350.000 erschlossen werden könnte, wird sich der unter Status Quo Bedingungen bereits abzeichnende Arbeitsplatzabbau in der Kohle- und Mineralölwirtschaft eher beschleunigen. Dieser Prozess läuft aber so langsam ab, dass eine sozial verträgliche Umgestaltung möglich ist.

Im Nachhaltigkeitsszenario kommt es im Verlauf von 50 Jahren zu stark ausgeprägten Veränderungen des Energiesystems, die beträchtliche Investitionen in Techniken der rationelleren Energienutzung und -wandlung und des Einsatzes erneuerbarer Energien voraussetzen. Für den Bereich der Stromerzeugung belaufen sich die im Nachhaltigkeitsszenario ausgelösten Investitionen bis zum Jahr 2050 auf rund 280 Mrd. EUR, für die Wärmebereitstellung einschließlich des Ausbaus von Nahwärmenetzen sind es über 250 Mrd. EUR. Werden dabei die unten aufgeführten Prinzipien beachtet, so kann der Umbau in Richtung einer nachhaltigen Energieversorgung auch wirtschaftlich attraktiv gestaltet werden:

1. **Das Energieversorgungssystem ist zeitlich vorrangig zu optimieren und wesentlich effizienter zu gestalten:** In den meisten Fällen ist kurz- bis mittelfristig eine rationellere Nutzung von Energie oder die Vermeidung unnötigen Energieeinsatzes kostengünstiger als die Bereitstellung erneuerbarer Energien. Teilweise sind entsprechende Investitionen sogar mit ökonomischen Vorteilen gegenüber einer Status Quo Entwicklung verbunden. Sie sind daher eine wesentliche Voraussetzung für eine Begrenzung der entstehenden Zusatzkosten. Diese technologischen Optionen sollten daher rasch in allen Verbrauchssektoren umgesetzt werden, damit anschließend erneuerbare Energien wachsende Anteile dieses verminderten Energieumsatzes decken können.

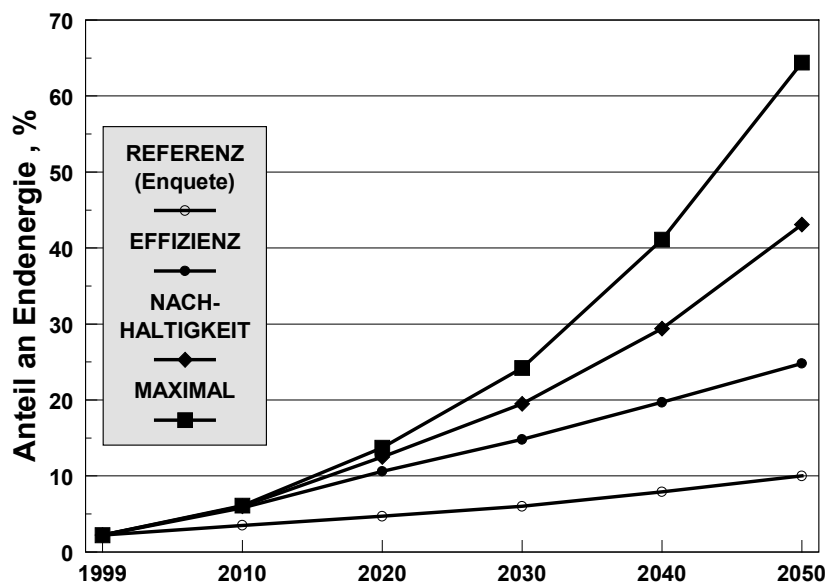
2. **Die Kosten während der gesamten Aufbauphase von erneuerbaren Energien sind zu minimieren:** Die Nutzung der Potenziale erneuerbarer Energien sollte an möglichst ergiebigen Standorten mit jeweils gut angepassten Anlagen erfolgen, um eine hohe Auslastung der installierten Anlagen zu erreichen. Der Ausbau muss möglichst geringe Ausgleichsanforderungen an den Netzbetrieb stellen, um geringe Kosten für den Umbau der Netze und der fossilen Reserveleistung zu erzielen. Daraus ergibt sich die Forderung nach guter zeitlicher Anpassung von Energienachfrage und regenerativem Energieangebot, was durch einen entsprechend ausgewogenen Mix von Energiequellen und eine ausreichende große Vernetzung erreicht werden kann.
3. **Rechtzeitig sind alle relevanten Technologien in der „richtigen“ zeitlichen Abfolge zu mobilisieren:** In Abwägung zu Punkt 2 sind im Sinne einer Vorsorge auch heute noch teurere Technologien (Photovoltaik) oder noch zu demonstrierende Technologien (z.B. Stromerzeugung aus Erdwärme) in den Markt zu bringen, damit sie zu einem späteren Zeitpunkt die über mehrere Jahrzehnte erforderliche Marktdynamik übernehmen können. Sie dürfen andererseits nicht zu rasch die Märkte dominieren, da sonst die mittleren Energiegestehungskosten unnötig hoch werden.

## 5 Weitere Perspektiven einer nachhaltigen Energieversorgung

Die am Beispiel des Szenarios „Nachhaltigkeit“ skizzierte Entwicklung zu einer nachhaltigen, klimaverträglichen Energienutzung ist als sehr ambitioniert zu bezeichnen und erfordert über viele Jahrzehnte eine besonders engagierte Energiepolitik. Erneuerbare Energien müssen stärker in den Mittelpunkt der Anstrengungen rücken, zudem muss mit der Energieeffizienzpolitik ein neuer Schwerpunkt gebildet werden. Im Zusammenwirken beider Strategien kann bis 2050 knapp die Hälfte des (gegenüber dem heutigen Niveau dann reduzierten) Endenergieverbrauchs mit erneuerbaren Energien gedeckt werden, (**Abb. 14**). Das weniger ambitionierte Szenario „Effizienz“ aus (UBA 2002) erreicht im gleichen Zeitraum lediglich 25%, das Referenzszenario nach (Enquete 2002) nur unbedeutende 10%. Es stellt sich dennoch angesichts der drängenden Nachhaltigkeitsdefizite die Frage, ob der dargestellte Zukunftspfad die Grenzen des Machbaren beschreibt oder noch weitergehende Handlungsspielräume verbleiben. Von Interesse ist insbesondere, ob die Entwicklung im Bereich erneuerbarer Energien nicht noch schneller verlaufen könnte und in welcher Zeit möglicherweise die gesamte Energieversorgung auf erneuerbare Energien umgestellt werden könnte.

Die Ausbaugeschwindigkeit der erneuerbaren Energien wird sich nur dann noch weiter steigern lassen, wenn wesentliche Rahmenbedingungen, wie eine progressive europäische und internationale Klimaschutzpolitik, verantwortungsbewusstes Handeln der Energieversorger bei den anstehenden Neuinvestitionen, kritische Verbraucher und zeitgerechte Investitionen in große Fertigungsstätten für erneuerbare Energien in idealer Weise ineinander greifen. In diesem Fall könnte insbesondere der Verkehrsbereich rascher als im Nachhaltigkeitsszenario angenommen, auf erneuerbare Energien umgestellt werden. Diese Ausweitung ist jedoch in größerem Ausmaß erst ab 2030 sinnvoll, da frühestens ab dann von einem ausreichend effizienten Fahrzeugpark als entscheidende Grundvoraussetzung für die Einführung „teurerer“ neuer Kraftstoffe ausgegangen werden kann. Zudem ist die CO<sub>2</sub>-Minderungswirkung des direkten Einsatzes erneuerbarer Energien in der Stromerzeugung bis zu diesem Zeitpunkt höher. Die deutliche Steigerung des Beitrags erneuerbarer Energien im Verkehr auf 65% in 2050 ist in Abb. 14 in einer „Maximalvariante“ beschrieben. Sie setzt eine ausreichende Verfügbarkeit preisgünstiger Stromerzeugungspotenziale aus erneuerbaren Energien um 5 ct/kWh Stromerzeugungskosten voraus, wofür hauptsächlich größere Wind-

Offshore-Parks sowie solarthermische Kraftwerke infrage kommen. Diese zusätzliche Stromerzeugung dient der elektrolytischen Wasserstoffherzeugung und ermöglicht so die breite Einführung von Wasserstoff als neuen Kraftstoff. Mit einer zusätzlichen Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien von 240 TWh/a (dies entspricht zu diesem Zeitpunkt rund 60% der Nachfrage aus den Endverbrauchersektoren) werden in der „Maximalvariante“ im Jahr 2050 rund 70% des bis dahin deutlich reduzierten Kraftstoffbedarfs in Form von Wasserstoff bereitgestellt.

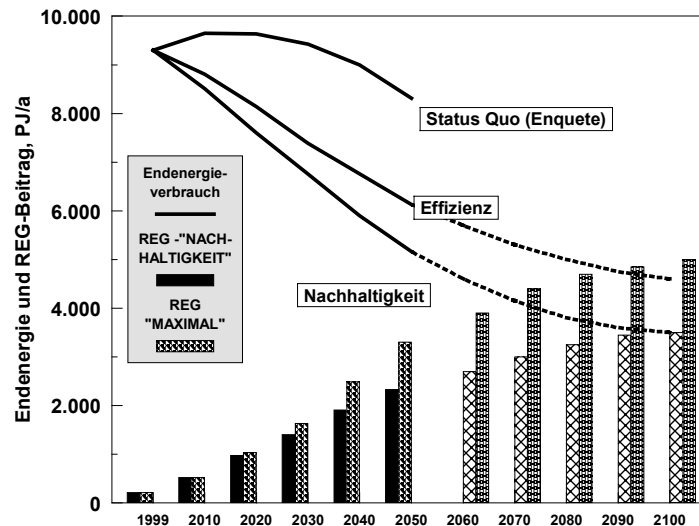


**Abbildung 14: Entwicklung der Anteile von erneuerbarer Energien am gesamten Endenergieverbrauch in einer „Maximalvariante“ im Vergleich zu den Szenarien „Nachhaltigkeit“ und „Effizienz“ der UBA-Studie (UBA 2002) und dem Referenzszenario der Enquete-Kommission (Enquete 2002).**

Letztendlich ist die bis 2050 skizzierte Entwicklung nur als Zwischenschritt auf dem Weg zu einer insgesamt CO<sub>2</sub>-freien Energieversorgung zu verstehen. So führt eine Extrapolation der Maximalvariante zu einer nahezu vollständigen Vermeidung von energetisch bedingtem CO<sub>2</sub> mit einem Anteil von Wasserstoff aus erneuerbaren Energien um 30% bis 35% am Endenergieverbrauch; der Verkehrssektor ist dann zu 85% und der Wärmebereich zu rund 30% mit Wasserstoff versorgt. Im Stromsektor werden die verbleibenden Kondensationskraftwerke zur Abdeckung der Reserveleistung ebenfalls mit Wasserstoff versorgt (WBGU 2002). Unter günstigen Umständen – also Reduktion des Energieverbrauchs entsprechend Szenario Nachhaltigkeit bei gleichzeitigem Wachstum der erneuerbaren Energien entsprechend der Maximalvariante – könnte so bereits um 2070 der Energiebedarf praktisch vollständig mittels erneuerbarer Energien gedeckt werden. Bei einer geringeren Ausbaugeschwindigkeit erneuerbarer Energien kann sich der Substitutionsprozess fossiler Energien auch bis über 2100 erstrecken (**Abb. 15**).

In jedem Fall können derartige Ziele nur erreicht werden, wenn der Ausbau erneuerbarer Energie, der Einsatz energieeffizienterer Geräte, Anlagen und Produktionsverfahren und eine gründliche energetische Sanierung des Gebäudebestandes Hand in Hand gehen. Nur von einer umfassenden Einführungsstrategie der erneuerbaren Energien in Kombination mit einer „Energieeffizienzoffensive“ ist zu erwarten, dass die derzeitigen Nachhaltigkeitsdefizite der Energieversorgung deutlich gemindert werden ohne gleichzeitig neuartige Probleme zu

verursachen. Die verbleibenden Wirkungen können bei einem von Anfang an ökologisch optimierten Ausbau erneuerbarer Energien in engen Grenzen gehalten werden. Dabei ist insbesondere auf mögliche Konfliktfelder (z. B. Flächenkonkurrenzen, Naturschutz, Landschaftsbild) zu achten.



**Abbildung 15: Zukünftiger Endenergieverbrauch und möglicher Beitrag erneuerbarer Energien in den Szenarien nach (UBA 2002) mit einer Extrapolation bis 2100.**

Der lange Betrachtungszeitraum der hier vorgestellten Szenarien erlaubt es, den gesamten Prozess der Einführung der erneuerbaren Energien – der aus energiewirtschaftlicher Sicht gerade erst beginnt – mit hinreichender Genauigkeit zu beschreiben. Es können dabei mehrere Phasen des Ausbaus erneuerbarer Energien unterschieden werden:

- Bis 2010: Energiepolitisch gestützter „**Einstieg**“ durch Zielvorgaben und wirksame Instrumentenbündel.
- 2010 – 2020: „**Stabilisierung**“ des Wachstums bei allmählichem Rückzug der energiepolitischen Instrumente.
- 2020 – 2030: Vollwertige „**Etablierung**“ aller neuen Technologien zur Nutzung erneuerbarer Quellen mit noch unterschiedlicher Ausprägung in den einzelnen Verbrauchssektoren und Aufbau von Importstrukturen für Strom aus erneuerbaren Energien.
- 2030 – 2050: Beginnende „**Dominanz**“ der erneuerbaren Energien in allen Bereichen der Energieversorgung und erste Anwendungen für Wasserstoff aus erneuerbaren Energien.
- Nach 2050: Fortschreitende „**Ablösung**“ der fossilen Energieträger und Etablierung einer vollständig auf erneuerbaren Energien beruhenden Energiewirtschaft u. a. durch den sukzessiven Einstieg in die Wasserstoffwirtschaft.

Die Entlastungseffekte der neuen Technologien treten aufgrund der heute zum Teil noch vergleichsweise hohen betriebswirtschaftlichen Kosten und des noch geringen Ausbausstands allerdings anfänglich nur langsam in Erscheinung und erfordern ausreichend hohe und länger andauernde Vorleistungen. Gerade deswegen ist die Kopplung mit einer anspruchsvollen Strategie der zu weiten Teilen rentablen rationelleren Energienutzung unerlässlich. Im Gegensatz zu früher kommt es dabei nicht mehr allein darauf an, einzelne Tech-

nologien weiter zu entwickeln. Notwendig ist vielmehr ein vernetztes Denken und die Integration von Einzeltechnologien in intelligente Systemlösungen. Die Energiepolitik muss sich diesen Aufgaben stellen, wenn sie ihre Zielvorgaben erreichen will. Dies ist nicht nur vor dem Hintergrund der nationalen Entwicklungsperspektiven notwendig, sondern auch Teil der globalen Verantwortung. Wenn die für eine global nachhaltige Energieversorgung erforderlichen Technologien nicht in den Industrieländern entwickelt und ihre Markteinführung vorangetrieben werden, sind die weltweiten Probleme der Energieversorgung nicht zu lösen.

#### **Literatur:**

(Altner 1998): G. Altner, H-P. Dürr, G. Michelsen, J. Nitsch: „Zukünftige Energiepolitik“. Economica Verlag, Bonn 1998.

(BMU 2000): M. Fishedick u.a.: „Bewertung des Ausstiegs aus der Kernenergie aus klimapolitischer Sicht“. Studie für das Bundesumweltministerium, Wuppertal-Institut, 2000.

(Enquete 2002): Endbericht der Enquete-Kommission „Nachhaltige Energieversorgung“, Deutscher Bundestag Berlin, Drucksache 14/9400 vom 7.7.2002

(ET 2002): F.Trieb, J. Nitsch, L. Brischke u.a. : „Sichere Stromversorgung mit regenerativen Energien.“ Energiewirtschaftliche Tagesfragen, September 2002.

(European Commission 1999): „Externalities of Fuel Cycles.“ Europ. Comm., DG XII, JOULE. ExternE – Externalities of energy, Vol.7; Methodology 1998 update. European Commission, EUR 19083.

/GCN 2002): C.J. Campell, F. Liesenborghs, J. Schindler, W. Zittel: „Ölwechsel“. Deutscher Taschenbuchverlag, München, 2002.

(Fishedick 2000) : M. Fishedick, O. Langniß, J. Nitsch: „Nach dem Ausstieg – Zukunftskurs Erneuerbare Energien“. Hirzel-Verlag, Stuttgart, 2000.

(HGF 2001): J. Nitsch, C. Rösch u.a.: „Schlüsseltechnologie Regenerative Energien“, Teilbericht im Rahmen des HGF-Projekts: Global zukunftsfähige Entwicklung – Perspektiven für Deutschland. DLR Stuttgart, FZ Karlsruhe, November 2001

(Johannson et.al. 1993): T. B. Johannson, H. Kelly, et.al.: „Renewable Energy – Sources for Fuels and Electricity“. Island Press, Washington. D.C., 1993

(Kopfmüller 2000): J. Kopfmüller, R. Coenen, J. Nitsch, u.a.: Konkretisierung und Operationalisierung des Leitbilds der nachhaltigen Entwicklung für den Energiebereich.“ Anhörungstext für die Enquete-Kommission „Nachhaltige Energieversorgung“; FZKA Nr. 6578, Karlsruhe 2000.

(Lovins, Hennicke 1999): A. Lovins, P. Hennicke: „Voller Energie – Die globale Faktor Vier-Strategie für Klimaschutz und Atomausstieg“. Campus-Verlag, Frankfurt, 1999.

(Matthes 2000): F. Matthes, M. Cames: „Energiewende 2020 - Der Weg in eine zukunftsfähige Energiewirtschaft“. Studie im Auftrag der Heinrich-Böll-Stiftung, Berlin 2000.

(Nitsch 1999): J. Nitsch: „Entwicklungsperspektiven erneuerbarer Energien und ihre Bedeutung für die Energieversorgung von Entwicklungsländern“. Tagungsband „Märkte der Zukunft – Erneuerbare Energien für Entwicklungsländer“. Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, Friedrichshafen, Juli 2001.

(Politiksznarien 1999): G. Stein, B. Strobel (Hrsg.): „Politiksznarien für den Klimaschutz“. Untersuchung im Auftrag des Umweltbundesamtes, Band 5. Schriften des Forschungszentrum Jülich, , Reihe Umwelt/Environment, Band 20, Jülich 1999.

(Prognos 2000): Prognos AG (Hrsg. „Energierport III – die längerfristige Entwicklung der Energiemärkte im Zeichen von Wettbewerb und Umwelt“. Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart, 2000.

(Shell 1995): „Energie im 21. Jahrhundert“. Studie der Shell-AG, Hamburg, aktuelle Wirtschaftsanalysen 5, Heft 25, 1995.

(UBA 2002): M. Fishedick, J. Nitsch u.a.: „Langfristszenarien für eine nachhaltige Energienutzung in Deutschland“. Untersuchung im Auftrag des Umweltbundesamtes; Forschungsbericht 200 97 104, UBA-FB 000314, Berlin, Juni 2002

(WEC 1995): „Global Energy Perspectives to 2050 and Beyond“. Joint IIASA – World Energy Council Report, Laxenburg/Austria, London 1995

(WEC 1998): „Energie für Deutschland - Fakten, Perspektiven und Positionen im globalen Kontext“. Dt. Nat. Komitee (DNK) des Weltenergiesrates. Düsseldorf 1998.

(WBGU 2002): J. Nitsch: „Potenziale der Wasserstoffwirtschaft.“ Gutachten für den Wissenschaftlichen Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU), Stuttgart, Juni 2002.