

UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES  
BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT,  
NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT

Forschungsbericht 200 97 104  
UBA-FB 000

02  
02

# **Langfristszenarien für eine nachhaltige Energienutzung in Deutschland**

**- Kurzfassung -**

Projektleitung:

**Dr.-Ing. Manfred Fishedick, Dr. Joachim Nitsch**

Wuppertal Institut für Klima Umwelt Energie

**Dr.-Ing. Manfred Fishedick**

**Dipl. geogr. Stefan Lechtenböhmer**

**Dipl.- Ing. Thomas Hanke**

**Dr. Claus Barthel**

**Dipl.- Ing. Christian Jungbluth**

**Dr.-rer.pol. Dipl.-Ing. Dirk Assmann**

**Tobias vor der Brüggen**

DLR, Institut für Thermodynamik

**Dr. Joachim Nitsch**

**Dr. Franz Trieb**

**Dipl. Phys. Michael Nast**

**Dipl. Ing. Ole Langniß**

**Dipl.-Ing. Lars-Arvid Brischke**

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Diese Climate Change-Veröffentlichung kann bezogen werden bei  
**Vorauszahlung von 10,00 €**  
durch Post- bzw. Banküberweisung,  
Verrechnungsscheck oder Zahlkarte auf das

Konto Nummer 4327 65 - 104 bei der  
Postbank Berlin (BLZ 10010010)  
Fa. Werbung und Vertrieb,  
Ahornstraße 1-2,  
10787 Berlin

Parallel zur Überweisung richten Sie bitte  
eine schriftliche Bestellung mit Nennung der  
**Climate Change-Nummer** sowie des **Namens**  
und der **Anschrift des Bestellers** an die  
Firma Werbung und Vertrieb.

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr  
für die Richtigkeit, die Genauigkeit und  
Vollständigkeit der Angaben sowie für  
die Beachtung privater Rechte Dritter.  
Die in der Studie geäußerten Ansichten  
und Meinungen müssen nicht mit denen des  
Herausgebers übereinstimmen.

Herausgeber: Umweltbundesamt  
Postfach 33 00 22  
14191 Berlin  
Tel.: 030/8903-0  
Telex: 183 756  
Telefax: 030/8903 2285  
Internet: <http://www.umweltbundesamt.de>

Redaktion: Fachgebiet I 2.5  
Dr. Helmut Kaschenz

Berlin, Juni 2002

## Berichts-Kennblatt

1. Berichtsnummer UBA-FB	2.	3.
4. Titel des Berichts Langfristszenarien für eine nachhaltige Energienutzung in Deutschland		
5. Autor(en), Name(n), Vorname(n) Fischedick, Manfred, Dr. Nitsch, Joachim, Dr. u. a.	8. Abschlußdatum Juni 2002	9. Veröffentlichungsdatum Juli 2002
6. Durchführende Institution (Name, Anschrift)  Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH Döppersberg 19, 42103 Wuppertal DLR Stuttgart, Institut für technische Thermodynamik Pfaffenwaldring 38-40, 70569 Stuttgart	10. UFOPLAN-Nr. FKZ 200 97 104	11. Seitenzahl 450
	12. Literaturangaben 228	13. Tabellen und Diagramme 138
	14. Abbildungen 4	
	7. Fördernde Institution (Name, Anschrift)  Umweltbundesamt, Postfach 33 00 22, D-14191 Berlin	
15. Zusätzliche Angaben		
16. Kurzfassung Im Rahmen der Untersuchung konnte aufgezeigt und an, Veränderungsprozesse beschreibenden, Wendeszenen plastisch erläutert werden, dass eine nachhaltige Energieversorgung (die u. a. eine Minderung der CO <sub>2</sub> -Emissionen von 80 % bis zum Jahr 2050 gegenüber 1990 zum Ziel hat) technisch möglich, ökonomisch tragfähig, mit weitergehenden Zielen der Energiepolitik (z B. Versorgungssicherheit) kompatibel ist und die Akteure trotz des zum Teil hohen Veränderungsbedarfs vor keine unlösbaren Probleme stellt, sondern Herausforderung und Chance zugleich darstellt. Eine derartige Entwicklung ist nur dann möglich, wenn die begonnene Dynamik der verstärkten Nutzung erneuerbarer Energien konsequent fortgesetzt wird, der anstehende Ersatz- und Erneuerungsbedarf im Kraftwerkspark konsequent zu einer Effizienzsteigerung und Umorientierung auf eine im Wesentlichen gekoppelte Strom- und Wärmeerzeugung genutzt wird und mit der Energieeinsparung ein neuer Schwerpunkt der Energiepolitik etabliert wird. Darüber hinaus müssen für die langfristig anstehenden Infrastrukturanforderungen (Dezentralisierung, neue Treibstoffe) die notwendigen Entscheidungen frühzeitig vorbereitet und hinreichend robuste Entwicklungslinien identifiziert und aufgegriffen werden.		
17. Schlagwörter Energieszenarien, Nachhaltigkeit, Klimaschutz, Erneuerbare Energien, Ökologie, Energiewirtschaft, Energiepolitik Zukunftstechnologien, Verkehr, klimaverträgliche Mobilität, Gebäudesanierung, Versorgungssicherheit		
18. Preis	19.	20.

## Report Cover Sheet

<b>1. Report No.</b> UBA-FB	<b>2.</b>	<b>3.</b>
<b>4. Title of Report</b> Long-term scenarios for sustainable energy use in Germany		
<b>5. Author(s); surname(s), first name(s)</b> Fischedick, Manfred, Dr. Nitsch, Joachim, Dr. et al.		<b>8. Completion date</b> June 2002
<b>6. Performing Organisation (name, address)</b> Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH Döppersberg 19, 42103 Wuppertal DLR Stuttgart, Institut für technische Thermodynamik Pfaffenwaldring 38-40, 70569 Stuttgart		<b>9. Publication date</b> July 2002
		<b>10. UFOPLAN No.</b> FKZ 200 97 104
<b>7. Funding Institution (name, address)</b> Umweltbundesamt Postfach 33 00 22 D – 14191 Berlin		<b>11. Number of pages</b> 450
		<b>12. References</b> 228
		<b>13. Tables and diagrams</b> 138
		<b>14. Figures</b> 4
<b>15. Additional information</b>		
<b>16. Abstract</b>  <p>The study was able to show, and explain vividly through scenarios describing change processes, that a sustainable use of energy (aimed, among other things, at reducing CO<sub>2</sub> emissions by 80% by 2050 compared with 1990 levels) is technically feasible, economically viable, compatible with farther-reaching objectives of energy policy (e.g. supply security), and does not, in spite of the substantial need for change, present the players involved with any insurmountable problems but, rather, constitutes both a challenge and an opportunity.</p> <p>Such a development is possible only if the efforts launched to give momentum to the increased use of renewable energy sources are continued consistently, the impending need for replacement and renewal within the generation system is consistently utilised for increasing efficiency and a reorientation mainly towards combined heat and power production, and energy saving is made a new focal point of energy policy. Furthermore, with regard to long-term infrastructure requirements (decentralisation, new fuels), the necessary decisions must be prepared at an early stage and sufficiently robust lines of development must be identified and followed.</p>		
<b>17. Key words</b> energy scenarios, sustainability, climate protection, renewable energy sources, ecology, energy industry, energy policy, frontier technologies, transport, climate-compatible mobility, rehabilitation of buildings, supply security		
<b>18. Price</b>	<b>19.</b>	<b>20.</b>

## 1 Herausforderungen für die Energieversorgung

Aus den Leitlinien für eine nachhaltige Entwicklung lassen sich vier wesentliche **Nachhaltigkeitsdefizite** der derzeitigen Energieversorgung ableiten.

1. Die **globale Klimaerwärmung** wird ganz überwiegend als ein mit der Nutzung fossiler Energieträger verknüpftes Problem mit hoher Eintrittswahrscheinlichkeit betrachtet. Allerdings zeigen sich in der internationalen Energiepolitik unterschiedliche Positionen hinsichtlich der Dringlichkeit, der Klimaveränderung entgegenzuwirken.
2. Die **Verknappung und Verteuerung der Reserven von Erdöl und Erdgas** stehen heute zwar weniger im Blickwinkel von Politik und Öffentlichkeit, allerdings wird der sog. „depletion mid-point“ beim Erdöl – also der Zeitpunkt bei dem das weltweite Fördermaximum erreicht wird – nach weitgehend übereinstimmender Meinung bereits in 15 bis 20 Jahren erwartet.
3. Hinsichtlich der **nuklearen Gefährdung** bestehen unterschiedliche Positionen, vor allem in Bezug auf die Eintrittswahrscheinlichkeit großer Unfälle und deren Folgen sowie Ausmaß und Zeitdauer der radioaktiven Belastungen bei Betrieb und Entsorgung.
4. Das **sehr starke Gefälle des Energieverbrauchs zwischen Industrie- und Entwicklungsländern** hat sich in den letzten Jahren praktisch nicht verringert.

Aus der Analyse bestehender Szenarien, d. h. konsistenter Beschreibungen möglicher Zukunftspfade des Energiesystems, lässt sich feststellen, dass **nur eine Kombination von Effizienz- und Konsistenzstrategien, also dem Ausbau erneuerbarer Energien, ein gleichzeitiges Angehen aller Nachhaltigkeitsdefizite der heutigen Energieversorgung erlaubt**. In den Industrieländern haben darüber hinaus Suffizienzstrategien eine ergänzende Bedeutung. Für Deutschland sind aus den Studienergebnissen folgende Handlungsnotwendigkeiten abzuleiten:

- Steigerung der mittleren Energieproduktivität für mindestens zwei bis drei Jahrzehnte auf Werte um 3 bis 3,5%/a (im Vergleich zu rund 1,7%/a in der letzten Dekade). Dies führt bis 2030 zu einem um 25% bis 30% geringeren Primärenergieverbrauch als unter Status Quo Bedingungen.
- Steigerung des Beitrags erneuerbarer Energien am Primärenergieverbrauch auf 12% bis 15% bis 2030 und an der Stromerzeugung auf 25% im Vergleich zu einer Status-Quo Entwicklung mit Beiträgen von 4% bis 5% bei der Primärenergie und unter 15% bei Strom.
- Mindestens Verdopplung bis Verdreifachung des Beitrags der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) an der Stromversorgung bis zum Jahr 2020 gegenüber heute.

## 2 Eckdaten der Szenarien – über „Effizienz“ zur „Nachhaltigkeit“

Für die langfristige Umsetzung der vorgenannten Nachhaltigkeitsziele reichen die bisher spezifizierten Anforderungen jedoch noch nicht aus. Eigene Analysen zeigen, dass ausgehend von der Entwicklung der wesentlichen Rahmenbedingungen (Bevölkerungsentwick-

lung, Wachstum Bruttoinlandprodukt etc.), wie sie im Analyseraster der Enquête-Kommission „Nachhaltige Energieversorgung“ des Deutschen Bundestages formuliert sind, bis zur Mitte des Jahrhunderts ein massiver Veränderungsbedarf besteht. Dies gilt insbesondere dann, wenn die langfristigen CO<sub>2</sub>-Minderungsziele (Reduktion um 80% bis 2050 gegenüber dem Niveau des Jahres 1990) erreicht werden sollen. Der Primärenergieverbrauch muss hierfür innerhalb von 50 Jahren auf etwa 46% des heutigen Niveaus (Bezugsjahr 1998) zurückgeführt werden (Abbildung 1), der Endenergiebedarf auf 54%. Eine sehr konsequente Strategie der Stromeinsparung reduziert die Stromnachfrage bis 2050 um insgesamt 20%; hierfür müssen flächendeckend energieeffiziente Geräte und Produktionsverfahren zur Anwendung kommen. Die der Energieeinsparung heute vielfach gegenüber stehenden Hemmnisse müssen über innovative Maßnahmen und Instrumente (z. B. Energieeffizienzfonds) entscheidend abgebaut werden.

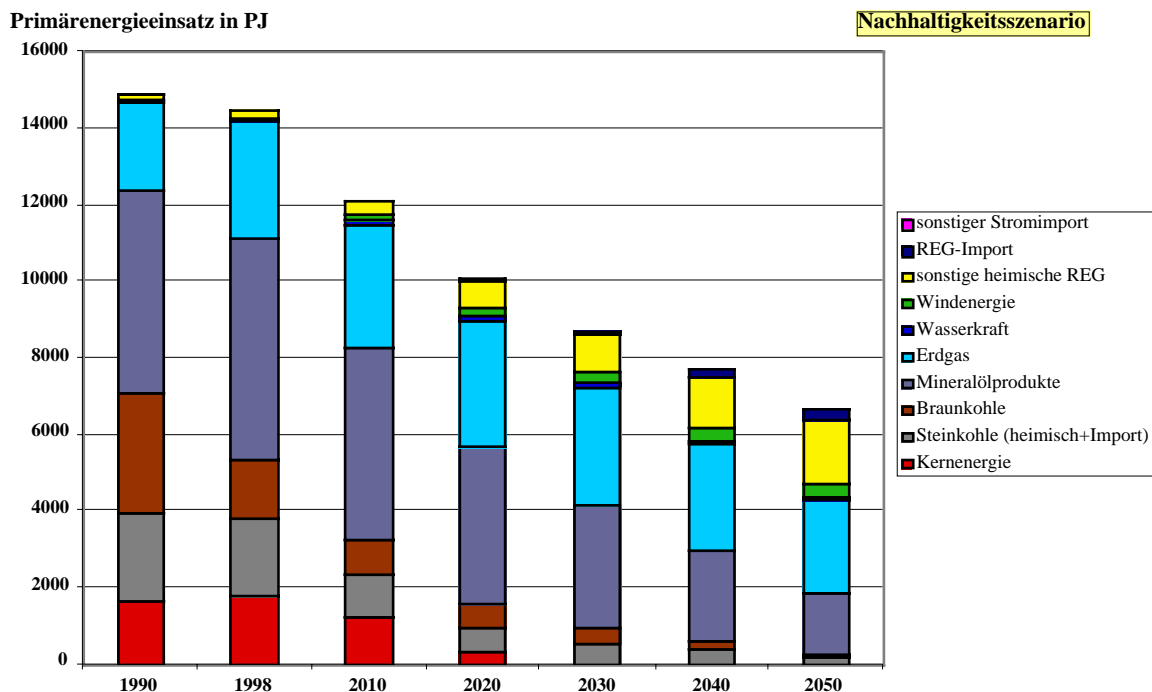
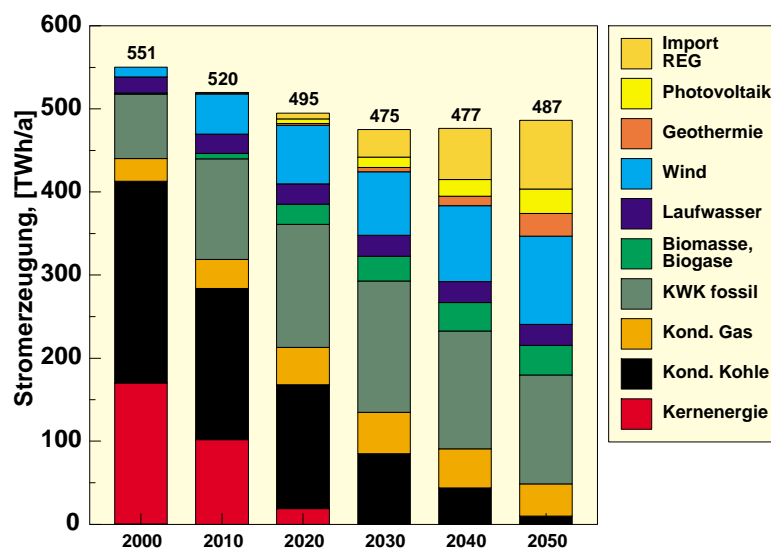


Abbildung 1: Entwicklung des Primärenergieverbrauchs im Szenario Nachhaltigkeit bis 2050

## 2.1 Stromversorgung der Zukunft – effizient, dezentral und großräumig vernetzt

In einer solchen veränderten Energiewelt muss aber nicht nur gespart werden, sondern auch deren Bereitstellung muss sich drastisch ändern. Der im deutschen Kraftwerkspark in den nächsten beiden Jahrzehnten aus Altersgründen entstehende Ersatzbedarf (bis 2020 müssen rund 70% der heute bestehenden Kapazitäten ersetzt werden) schafft hierfür den notwendigen Spielraum. Durch den deutlichen Ausbau der gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung (KWK) und den Zuwachs der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien kommt es zunehmend zu einer Verlagerung der Stromerzeugung an den Standort der

Stromanwendung. Intelligente Steuerungssysteme müssen dafür Sorge tragen, dass diese dezentralen Stromerzeugungsanlagen koordiniert werden und sich günstig in das Lastmanagement der Verbraucher einpassen lassen (virtuelle Kraftwerke). Erneuerbare Energien werden spätestens nach 2040 zum dominierenden Faktor (2050 beträgt ihr Stromerzeugungsanteil mehr als 50%; Abbildung 2). Dabei sind hier alle verfügbaren Optionen sowie der Import von Strom aus erneuerbaren Energien aus dem Ausland (offshore Windenergie der Nordseeländer, Strom aus solarthermischen Kraftwerken Südeuropas bzw. Nordafrikas) von Bedeutung. Große Kondensationskraftwerke, die heute das Bild der Stromerzeugung dominieren, spielen im Jahr 2050 nur noch eine untergeordnete Rolle. Unter dieser Voraussetzung entsteht nach dem Jahr 2030 auch ein hinreichender Spielraum für die elektrolytische Wasserstoffherzeugung, wodurch die Stromerzeugung trotz weiter rückläufiger Nachfrage bei den Endverbrauchern wieder ansteigt.



Uba-Zestrom2.pre; 1.03.02

Abbildung 2: 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)

## 2.2 Altbauanierung und Nahwärmestrategie – Kennzeichen einer effizienten fossil - regenerativen Wärmeversorgung

Neben der Verbesserung der Wärmedämmstandards der Gebäude erfordert das Nachhaltigkeitsszenario vor allem eine deutliche Erhöhung der energetischen Sanierungsrate. Heute werden zwar 2,5% aller bestehenden Gebäude jährlich saniert (z. B. Fassadenerneuerung), jedoch nur in jedem fünften Fall kommt es zeitgleich zu einer energetischen Sanierung. Nur durch eine konsequente Erhöhung der Zahl auch energetisch sanierter Gebäude

kann das große Potenzial im Wärmebereich mit spezifischen Minderungsmöglichkeiten von 50% bis 70%, ausgeschöpft werden.

Parallel zu der Verknüpfung kleinerer und mittelgroßer Stromerzeuger zu „virtuellen“ Kraftwerken kommt es im Nachhaltigkeitsszenario auch zum Ausbau vernetzter Wärmeversorgungssysteme. Hierdurch wird es möglich, eine Vielzahl effizienter Techniken mit ihren jeweiligen Vorteilen optimal miteinander zu verbinden, bereits mittels fossiler Brennstoffe sehr effiziente Wärmeversorgungen auf KWK-Basis aufzubauen und damit die Grundlage zu bilden, um später sukzessive erneuerbare Energien in größerem Umfang einzuführen.

Für die im Nachhaltigkeitsszenario angenommenen Strukturveränderungen ist es bis 2050 notwendig, etwa zwei Drittel des um 45% reduzierten Wärmebedarfs über Nah- und Fernwärmenetze zu verteilen (Abbildung 3). Die Umstrukturierung des Wärmesektors bewirkt somit, dass die Einzelversorgung auf der Basis von Heizöl 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.

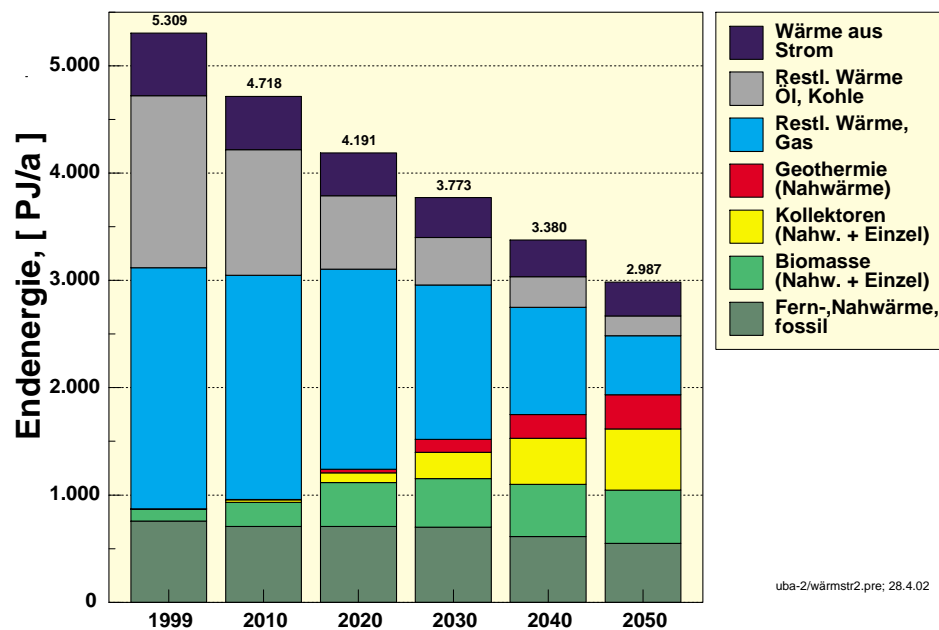


Abbildung 3: Verlauf des Wärmebedarfs und Veränderung der Wärmebereitstellungsstruktur (Raumheizung, Warmwasser, Prozesswärme) im Szenario Nachhaltigkeit durch Fern- und Nahwärme aus fossiler und biogener Kraft-Wärme-Kopplung sowie aus Kollektor- und Geothermiewärme und verbleibende Deckung durch konventionelle Versorgung

## 2.3 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 (Analyseraster Enquête-Kommission) bis 2050 noch um 10% wächst und die Güterverkehrsleistung sich mehr als verdoppelt, haben wirkungsvolle Effizienzmaßnahmen an Fahrzeugen die höchste Priorität. Eine zielstrebige Strategie der Verringerung des Flottenverbrauchs durch technische Maßnahmen, begleitet von einem längerfristig in einer dann energiebewussteren Welt freiwilligen Umstieg auf sparsamere Fahrzeuge, führt zu einer deutlichen Reduktion des Kraftstoffverbrauchs. Dies gilt insbesondere für den Individualverkehr (mittlerer Flottenverbrauch in 2030 ca. 4,5 l/100 km, in 2050 ca. 2 l/100 km). Zeitlich versetzt erfolgt die Einführung neuer Kraftstoffe, die etwa ab 2020 Bedeutung erlangt (Abbildung 4). Während zunächst der Anteil von Diesel auch im Zuge der relativ wachsenden Bedeutung des Güterverkehrs zunimmt, Benzin entsprechend an Bedeutung verliert, erhöht sich der Beitrag von Erdgas auf 2,5% im Jahr 2020 und auf 12% im Jahr 2050. Erdgas kommt als ebenfalls gasförmiger Kraftstoff damit die Rolle als Wegbereiter für den Einstieg in die Wasserstoffwirtschaft zu, denn Wasserstoff trägt 2050 bereits mit 17% zur Deckung der Nachfrage nach Kraftstoffen bei. Biodiesel spielt aufgrund der Flächenkonkurrenzen zwischen dem Energiepflanzenanbau und dem aus Nachhaltigkeitsgründen wünschenswerten Ausweiten des ökologischen Landbaus nur eine bescheidende Rolle.

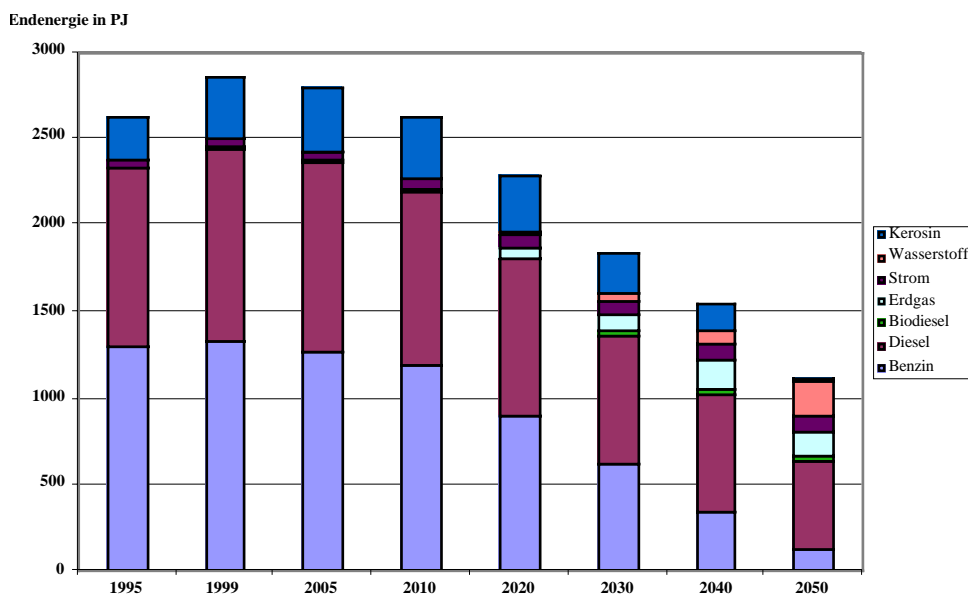


Abbildung 4: Entwicklung des Endenergiebedarfs für Verkehr und seiner Struktur im Nachhaltigkeitsszenario bis 2050

## 3 Energiewirtschaftliche Implikationen

Im Nachhaltigkeitsszenario kommt es im Verlauf von 50 Jahren zu stark ausgeprägten Veränderungen des Energiesystems, die beträchtliche Investitionen in Techniken der ratio-

nelleren Energienutzung und -wandlung und des Einsatzes erneuerbarer Energien voraussetzen. 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 sollte 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 erreicht werden kann.
3. **Rechtzeitig sind alle relevanten Technologien in der „richtigen“ zeitlichen Abfolge zu mobilisieren:** In Abwägung zu Punkt 2 sind im Sinne eine Vorsorge auch heute noch teurere Technologien (Photovoltaik) oder noch zu demonstrierende Technologien (HDR-Stromerzeugung) 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.

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 bis zum Ende des Betrachtungszeitraums (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 durchschnittlich **3,8 Mrd. EUR/a** (entsprechend 48 EUR/Kopf und Jahr), was etwa 0,14% des mittleren BIP in diesem Zeitabschnitt entspricht. Für die Energiewirtschaft sind dies keine unbekanntes Größenordnungen, sondern Aufwendungen wie sie aus dem Bereich der Steinkohlesubventionen seit zwei Jahrzehnten zur Tagesordnung gehören. Für die ersten beiden Dekaden kann wegen der dominierenden Durchführung von wirtschaftlichen Einsparmaßnahmen in der Gesamtbilanz sogar von negativen Kosten ge-

genüber der Status Quo Entwicklung ausgegangen werden. Wenn jedoch die kostengünstigen Investitionen in Einsparmaßnahmen allmählich ausgeschöpft sind und gleichzeitig die steigenden Investitionen in erneuerbare Energien wirken, steigen die Differenzkosten entsprechend an (Abbildung 5).

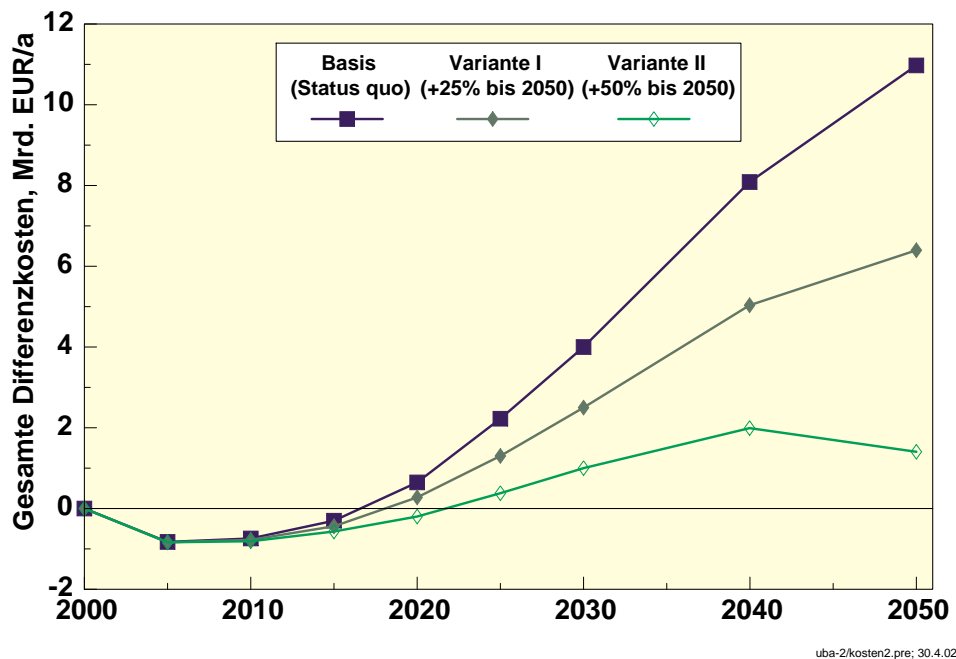


Abbildung 5: Verlauf der Kostendifferenz zwischen Nachhaltigkeits- und Status Quo Szenario für drei unterschiedliche Varianten der zukünftigen Preise fossiler Energieträger

Welchen Verlauf die Differenzkosten nach 2030 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 nicht unwahrscheinlich ist – oder werden mittels geeigneter Instrumente die externen Kosten weitgehend in die Marktpreise von Energie aufgenommen, so gehen die Differenzkosten auch teurerer Einsparoptionen sowie einer Vielzahl von Technologien aus dem Bereich erneuerbarer Energien im Zeitverlauf gegen Null oder werden sogar negativ. Gegen 2050 kann so das Nachhaltigkeitsszenario bei höheren Preisvarianten kostenneutral gegenüber der Status Quo Entwicklung wirken.

Die heimischen Energieträger Stein- und Braunkohle werden 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 die Nachfrage nach importierten Energieträgern nicht nur absolut zurückgeht, sondern auch der relative Anteil der Energieimporte unter den entsprechenden Werten der Status Quo Entwicklung liegt. Be-

reits im Jahr 2020 werden im Nachhaltigkeitsszenario rund 2.700 PJ 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. Gleichzeitig leisten erneuerbare Energien und das Energieeinsparen 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 vorgesehen. Formal steigt hierdurch die Importabhängigkeit zwar an, schwerer wiegt aber möglicherweise der potentielle Beitrag des Stromimports zur Friedens- und Krisensicherung. In Ländern mit heute hohen fossilen Energieexporten kann der Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien (und ihr späterer Export) grundlegende Basis für einen friedlichen und wirtschaftlich profitablen Übergang sein. Für andere Länder mit heute hohen Importanteilen, grundsätzlich aber einem hohen Angebot an erneuerbaren Energien ergeben sich – unter der Voraussetzung, dass zunächst die eigenen Energieprobleme gelöst werden – hierdurch neue Geschäftsfelder und zusätzliche Optionen zur Devisenbeschaffung. Zudem können hierdurch 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.

#### 4 Weitere Perspektiven einer nachhaltigen Energieversorgung

Zweifelsohne ist die skizzierte Entwicklung als sehr ambitioniert zu bezeichnen und erfordert über viele Jahrzehnte eine besonders engagierte Energiepolitik. Erneuerbare Energien müssen stärker in den Mittelpunkt der Anstrengungen rücken und mit der Energieeffizienzpolitik muss ein neuer Schwerpunkt gebildet werden. Es stellt sich dennoch die Frage, ob der dargestellte Zukunftspfad die Grenzen des Machbaren beschreibt oder noch weitergehende Handlungsspielräume verbleiben. Dabei ist zunächst zu diskutieren, ob die Entwicklung im Bereich erneuerbarer Energien nicht noch schneller verlaufen bzw. in welcher Zeit 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 Energiever-

sorger und Verbraucher sowie weitblickende Investitionen in große Fertigungsstätten für erneuerbaren Energien in idealer Weise ineinander greifen. In diesem Fall kann, neben einer weiteren, allerdings begrenzten Steigerung der Anteile erneuerbarer Energien bei der Strom- und Wärmeerzeugung, 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 frühesten 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 ist in Abbildung 6 in einer „Maximalvariante“ beschrieben. Sie setzt eine ausreichende Verfügbarkeit preisgünstiger Stromerzeugungspotenziale aus erneuerbaren Energien um 5 EUR-c/kWh Stromerzeugungskosten voraus, wofür hauptsächlich größere Wind-Offshore-Parks sowie solarthermische Kraftwerke infrage kommen.

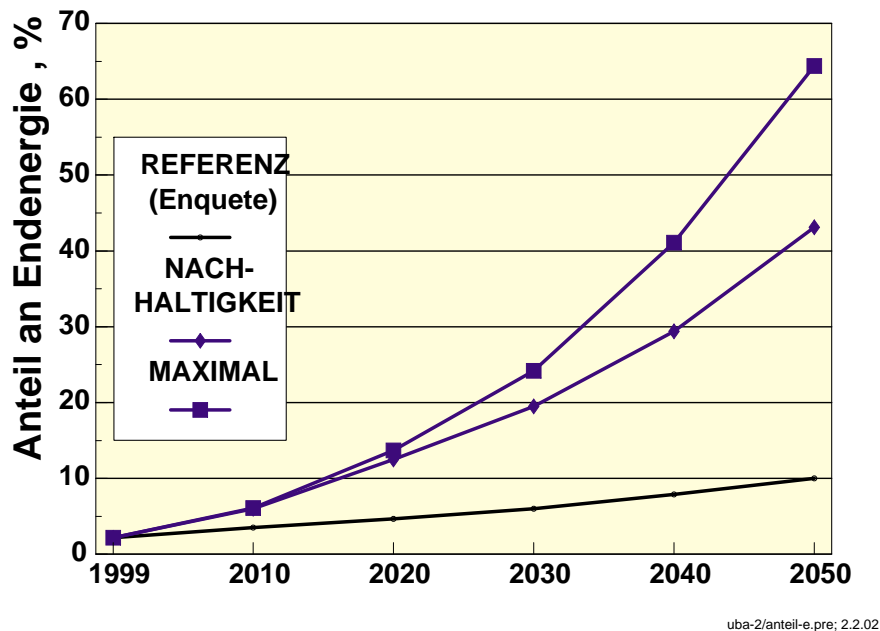


Abbildung 6: Entwicklung der Anteile von erneuerbarer Energien am gesamten Endenergieverbrauch im Szenario „Nachhaltigkeit“ im Vergleich zu einer „Maximalvariante“ und dem Referenzszenario der Enquete-Kommission

Die zusätzliche in der Maximalvariante unterstellte Stromerzeugung ist als Quelle für die elektrolytische Wasserstoffherzeugung (in Verbindung mit einem erweiterten Lastmanagement dient die Elektrolyse gleichzeitig als flexibler Verbraucher) und damit für die breite Einführung von Wasserstoff als neuem Kraftstoff notwendig. Mit einer zusätzlichen Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien von 238 TWh (dies entspricht zu diesem Zeitpunkt rund 60% der Nachfrage aus den Endverbrauchersektoren) werden in der „Maximalvari-

ante“ im Jahr 2050 rund 70% des bis dahin deutlich reduzierten Kraftstoffbedarfs in Form von Wasserstoff bereitgestellt.

Letztendlich ist die 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.

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 (Abbildung 7).

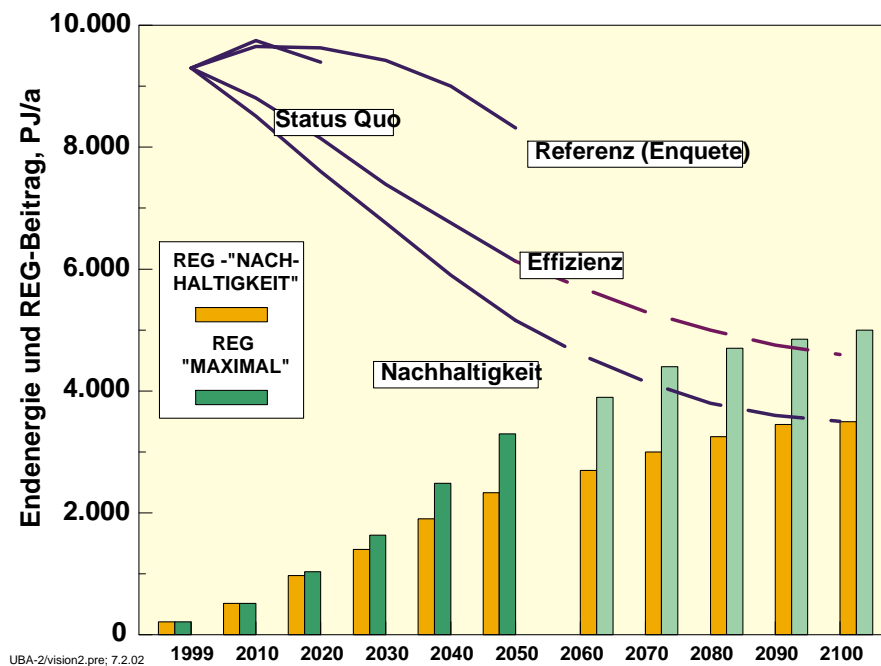


Abbildung 7: Wechselwirkung von Energieeffizienz und Ausbau erneuerbarer Energien und daraus ableitbare, mögliche Weiterentwicklung der wichtigsten Szenariogrößen im Verlauf dieses Jahrhunderts

In jedem Fall ist eine Zielerreichung nur dann möglich, wenn der Ausbau erneuerbarer Energien und das Energieeinsparen durch die Nutzung energieeffizienterer Geräte und Produktionsverfahren Hand in Hand gehen. Nur von einer umfassenden Einführungsstrategie der erneuerbaren Energien in Kombination mit einer Energieeinsparoffensive ist zu

erwarten, dass die derzeitigen Nachhaltigkeitsdefizite der Energieversorgung deutlich gemindert werden ohne gleichzeitig neuartige Probleme zu verursachen. Von Anfang an ist dabei auf einen ökonomisch und ökologisch optimierten Ausbau erneuerbarer Energien zu achten. Dies gilt für das Erschließen der Windenergiepotenziale (onshore wie offshore) genauso wie für die Ertüchtigung der Wasserkraftwerke (vor allem der großen Anlagen im Süden Deutschlands), den weiteren Ausbau der Biomassenutzung, der Geothermie und der Photovoltaik.

Die Entlastungseffekte der neuen Technologien treten aufgrund der heute zum Teil noch vergleichsweise hohen Kosten und des noch geringen Ausbauszustands 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 hoch rentablen rationelleren Energienutzung unerlässlich. Die Energiepolitik muss sich beiden 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 nicht zu lösen. Im Gegensatz zu früher kommt es dabei nicht mehr allein darauf an, einzelne Technologien weiter zu entwickeln. Notwendig ist vielmehr ein vernetztes Denken und die Integration von Einzeltechnologien in intelligente Systemlösungen (dezentrale Strom- und Wärmenetze). Dies erfordert auch unter den Akteuren (z. B. Energiewirtschaft, Anlagenbau, Banken) neue Kooperationsformen.

Eine nachhaltige Energiewelt ist in vielen Punkten anders als das was wir heute gewohnt sind. Wie sich im Rahmen von Wendeszenen, in denen die Veränderungsprozesse für die beteiligten Akteure beschrieben werden können, zeigen lässt, stellt dies aber keinen Anlass für Besorgnis dar. Zum Erreichen der Nachhaltigkeitsziele sind Veränderungen unumgänglich, für die Beteiligten sind diese Herausforderung und Chance zugleich.



## Kurzfassung

### 1 Anforderungen an eine nachhaltige Energienutzung und resultierende Kriterien

#### 1.1 Was bedeutet Nachhaltigkeit für die Energieversorgung?

Die Ursprünge des Begriffes „Nachhaltigkeit“ liegen in der Energiekrise gegen Ende des 18. Jahrhunderts<sup>1</sup>. Die Gesellschaft war damals auf den deutschen Wald als Rohstoff- und Energiequelle angewiesen. Um der Übernutzung des Waldes Einhalt zu gebieten und die Versorgungsbasis zu sichern, wurde in Deutschland eine auf langfristige Ressourcenerhaltung angelegte Forstwirtschaft zur rechtlichen und sozialen Norm. Eine ausreichende Verfügbarkeit und sichere Bereitstellung von Energie (und Rohstoffen) steht auch heute wieder im Zentrum gesellschaftspolitischer Entscheidungen. Die Deckung der Energienachfrage ist eine fundamentale Voraussetzung für die soziale und wirtschaftliche Entwicklung einer Gesellschaft. Für Deutschland und andere Industriegesellschaften stellt sie den zentralen Lebensnerv für Produktion und Konsum dar. Vor dem Hintergrund einer Steigerung des Weltenergieverbrauchs seit 1950 auf mehr als das Vierfache (in Deutschland auf rund das Dreifache) und bei Zugrundelegung derzeitiger globaler Verbrauchsniveaus werden die fossilen Energieträger in wenigen Generationen erschöpft sein. Besonders problematisch ist dabei, dass gerade diejenigen Energieträger mit den kürzesten Reichweiten (also Gas und Erdöl) zur Zeit die größten Zuwachsraten aufweisen. Die heute als sicher einzustufenden Reserven reichen auch auf der Grundlage heutiger Fördermengen bei Öl nur noch etwas mehr als 40 Jahre und bei Erdgas noch rund 65 Jahre.

Gleichzeitig ist die Ausbeutung nicht-erneuerbarer fossiler Ressourcen eng verknüpft mit der Beanspruchung der Aufnahmefähigkeit der Umwelt für Abfälle und Emissionen. Der überwiegende Teil anthropogener Emissionen von Luftschadstoffen und Treibhausgasen sind auf Förderung, Umwandlung, Transport und Verbrennung fossiler Energieressourcen zurückzuführen, die, global gesehen, einen Anteil von rund 85% am Primärenergieverbrauch haben. Mindestens ebenso gravierend wie eine Verknappung an Energie sind die möglichen Folgen eines Klimawandels infolge einer anhaltenden energiebedingten Freisetzung des wichtigsten Treibhausgases CO<sub>2</sub>. Außerdem ist die Nutzung von Energieressourcen mit gewissen Stör- und Unfallrisiken verbunden, die zu signifikanten Gefährdungen der Umwelt und der menschlichen Gesundheit führen können. Im Fall der Kernenergie kommt eine extrem langfristige Belastung nachfolgender Generationen mit Entsorgungserfordernissen bzw. -risiken hinzu. Spätestens seit den Terroranschlägen im September 2001 in den USA sind auch die Risiken des Missbrauchs bei weltweiter Verbreitung (Proliferation, Sabotageanfälligkeit) oder bei einem Übergang auf langlebige Systeme (Brütertechnologie) wieder verstärkt in das Bewusstsein getreten.

---

<sup>1</sup> Detaillierte Quellenangaben finden sich in der Langfassung. In der Kurzfassung wurde aus Gründen der besseren Lesbarkeit auf Quellenangaben verzichtet.

Zwischen energiebezogenen Aktivitäten mit ihren teilweise globalen ökologischen Auswirkungen und (globalen) Problemen wie Armut, Bevölkerungswachstum, unzulängliche Ernährung, mangelnde Sicherheit oder Defizite in Wirtschaft und Handel besteht häufig eine unmittelbare Verknüpfung. Zwischen dem Pro-Kopf-Energieverbrauch der ärmsten Länder (z. B. Äthiopien) und dem eines amerikanischen Bürgers liegt der Faktor Hundert. Außerdem wird in den Entwicklungsländern im Durchschnitt deutlich weniger energieeffizient produziert als in den Industriestaaten. Dem Unterschied im Verbrauch entsprechen Unterschiede in der Versorgung mit Energie. Ein auch nur tendenzieller Ausgleich dieser Unterschiede im Energieeinsatz führt – auch bei deutlich verstärkten Anstrengungen zu einer rationelleren Energienutzung – bei einem Anstieg der Weltbevölkerung auf 9 bis 10 Mrd. Menschen bis 2050 zu einem weiteren signifikanten Wachstum der globalen Energienachfrage. Damit kommt der Energieversorgung bzw. dem Zugang und dem angemessenen Umgang mit Energieressourcen eine zentrale Bedeutung für die Realisierung der Ziele einer nachhaltigen Entwicklung gerade auch im internationalen Kontext zu.

Wie angesichts dieser Diagnose eine nachhaltige Entwicklung im Energiebereich erreicht werden kann, ist heute nicht definitiv und abschließend beantwortbar. Im Zuge des erforderlichen gesellschaftlichen Diskussionsprozesses über das Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung im Allgemeinen und seine Übertragung auf die Energieversorgung ist es jedoch erforderlich, ein aus heutiger Sicht angemessenes Anforderungsprofil zu erarbeiten und Orientierungs- und Handlungswissen zur Gestaltung einer nachhaltigen Energieversorgung bereitzustellen. Auf der inter- bzw. supranationalen Ebene sind von verschiedener Seite derartige Leitlinien formuliert worden. In Anlehnung an die Basisdefinition des Brundtland-Berichts kann man eine nachhaltige Energieversorgung in einer allgemeinen Form wie folgt definieren:

*„Energie soll ausreichend und – nach menschlichen Maßstäben – langandauernd so bereitgestellt werden, dass möglichst alle Menschen jetzt und in Zukunft die Chance für ein menschenwürdiges Leben haben, und in die Wandlungsprozesse nicht rückführbare Stoffe sollen so deponiert werden, dass die Lebensgrundlagen der Menschen jetzt und zukünftig nicht zerstört werden“.*

Unter Berücksichtigung dieser Definition sowie in dem Versuch einer Übertragung des integrativen Nachhaltigkeitsansatzes auf den Energiebereich werden nachfolgend energiespezifische Leitlinien aufgeführt. Sie können als generelle Orientierung für die im Energiesektor handelnden Akteure bzw. für die Entwicklung (politischer) Handlungsstrategien dienen (die gewählte Reihenfolge impliziert dabei keine Gewichtung):

- **Zugang und Verteilungsgerechtigkeit für alle:** Für alle Menschen sind vergleichbare Chancen des Zugangs zu Energieressourcen bzw. –dienstleistungen zu gewährleisten.
- **Ressourcenschonung:** Kommenden Generationen sind die Nutzungsoptionen für die verschiedenen Energieressourcen offen zu halten oder es müssen vergleichbare Optionen der Bereitstellung von Energiedienstleistungen geschaffen werden. Neben den Energieressourcen selbst, muss dies auch für nichtenergetische Ressourcen gelten, die

im Zusammenhang mit der Förderung, Umwandlung und Nutzung von Energie verbraucht werden.

- **Umwelt-, Klima- und Gesundheitsverträglichkeit:** Die Regenerations- und Anpassungsfähigkeiten natürlicher Systeme (der „Umwelt“) dürfen durch energiebedingte Emissionen nicht überschritten werden. Gefahren für die menschliche Gesundheit, etwa durch Akkumulation problematischer Schadstoffe, sind zu vermeiden.
- **Soziale Verträglichkeit:** Bei der Gestaltung von Energieversorgungssystemen ist zu gewährleisten, dass allen Betroffenen die Teilhabe an den jeweiligen Entscheidungsprozessen möglich ist. Die Handlungs- und Gestaltungsspielräume von wirtschaftlichen Akteuren bzw. von Gemeinwesen dürfen durch diese Systeme nicht eingeengt werden, sondern sind möglichst zu erweitern.
- **Risikoarmut und Fehlertoleranz:** Unvermeidbare Risiken bei der Energieerzeugung und –nutzung sind grundsätzlich zu minimieren sowie in ihrer räumlichen und zeitlichen Ausdehnung zu begrenzen. Hierbei sind auch fehlerhaftes Verhalten, unsachgemäße Handhabung oder mutwillige Zerstörung zu berücksichtigen.
- **Umfassende Wirtschaftlichkeit:** Energiedienstleistungen sollen – in Relation zu anderen Kosten des Wirtschaftens und des Konsums – zu vertretbaren gesamtwirtschaftlichen Kosten bereitgestellt werden. Das Kriterium der „Vertretbarkeit“ bezieht sich dabei zum einen auf die reinen betriebswirtschaftlichen, im Zusammenhang mit der Energieerzeugung oder –nutzung entstehenden Kosten. Zum anderen schließt es auch die Inanspruchnahme anderer Produktionsfaktoren wie Arbeit und natürliche Ressourcen ein, also auch die externen ökologischen und sozialen Kosten, soweit diese ermittelt werden können.
- **Bedarfsgerechte Nutzungsmöglichkeit und dauerhafte Versorgungssicherheit:** Die zur Befriedigung von nachhaltigkeitskompatiblen Bedürfnissen erforderliche Energie muss dauerhaft, in ausreichender Menge sowie zeitlich und räumlich bedarfsgerecht zur Verfügung stehen. Hierzu ist u.a. eine ausreichende räumliche und energieträgerbezogene Diversifizierung der Energiequellen anzustreben, um auf unvorhersehbare Krisen reagieren zu können und um generell Handlungsspielräume für die Zukunft zu erhalten bzw. zu vergrößern. Ebenso sind leistungsfähige Versorgungsstrukturen zu schaffen und zu erhalten, die sich gleichzeitig gut in Siedlungsstrukturen implementieren lassen.
- **Internationale Kooperation und Verträglichkeit:** Die Gestaltung der Energiesysteme auf der internationalen Ebene soll Destabilisierungstendenzen und durch den Mangel an Ressourcen bedingte Konfliktpotenziale vermeiden und die friedliche Kooperation der Staaten fördern. Generell sind bi- und multilaterale Kooperationen bei Gestaltung und Betrieb von Energiesystemen anzustreben.

## 1.2 Indikatoren für eine nachhaltige Entwicklung der Energieversorgung

Wie lässt sich nun aber feststellen, wie nachhaltig eine Entwicklung ist bzw. in welche Richtung sie verlaufen soll? Hierzu bedarf es eines Indikatorensystems. Für Beurteilung einer nachhaltigen Entwicklung des Energiesystems werden nur solche Indikatoren ausgewählt, die einen klaren Bezug zu den Regeln und Zielen einer nachhaltigen Energieversorgung haben (*Kriterium der Regeladäquanz*) und bei denen eindeutig ist, in welche Richtung sie sich verändern sollten, um mehr Nachhaltigkeit zu erreichen (*Kriterium der Zielfähigkeit*). Auch sollten die Indikatoren die wesentlichen in der Gesellschaft diskutierten Problembereiche abdecken (*Kriterium der Problemadäquanz*). Ein weiteres wichtiges Kriterium für die Auswahl von Indikatoren zur Beurteilung der Nachhaltigkeit der Energieversorgung ist die *Datenverfügbarkeit*. Das ausgewählte Indikatorensystem sollte sich auf vorhandene Daten bei den Statistischen Ämtern auf europäischer, nationaler und regionaler Ebene stützen. Die Daten sollten in einer Zeitreihe von mindestens 10 Jahren abgebildet werden können, um Trends ablesen zu können.

Neben quantifizierbaren Indikatoren sind verschiedene Indikatoren zunächst nur qualitativ formulierbar. Im ökonomischen und sozialen Bereich dominieren sie sogar. Gleichzeitig ist die eindeutige Zuordnung dort nicht immer möglich, vielmehr gibt es relativ große Schnittmengen (z.B. im Themenfeld „Beschäftigung“). Die vorgeschlagenen Indikatoren sollten dennoch vorwiegend objektiver Art sein, d.h. sich auf prinzipiell „messbare“ Daten beziehen. Wo es sinnvoll ist, können subjektive Indikatoren verwendet werden, wie z.B. Akzeptanz und Einstellung der Bevölkerung gegenüber bestimmten Technologien.

Nachfolgend sind die Bereiche aufgeführt, die zur Beurteilung der Nachhaltigkeit der Energieversorgung relevant sind (**Tabelle 1**), für sie wurden im Hauptbericht ca. 70 Indikatoren aufgeführt. Ein ähnlicher, sehr detaillierter Katalog, wurde aktuell von der Enquete-Kommission „Nachhaltige Energieversorgung“ im November 2001 veröffentlicht.

**Tabelle 1: Aufzählung der Bereiche für die Indikatoren die für ein nachhaltiges Energiesystem definiert wurden.**

<p><b>I) Ökologische Indikatoren</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. <i>Atmosphäre, Klimawandel</i></li> <li>2. <i>Versauerung und Eutrophierung, bodennahes Ozon</i></li> <li>3. <i>Flächennutzung, -modifikation und -verbrauch</i></li> <li>4. <i>Abfälle, Wasserbelastung</i></li> <li>5. <i>Erschöpfbare Energievorräte</i></li> <li>6. <i>Nicht energetische Ressourcen</i></li> <li>7. <i>Erneuerbare Energien</i></li> <li>8. <i>Zusätzliche Indikatoren (u.a. Primärenergieverbrauch in und für Deutschland, Anteil KWK; Energieproduktivität)</i></li> </ol> <p><b>II) Ökonomische und soziale Indikatoren</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>9. <i>Kosten je Einheit Energiedienstleistung beim Nutzer</i></li> <li>10. <i>Treibhausgas- (bzw. CO<sub>2</sub>-) Vermeidungskosten</i></li> <li>11. <i>(Gesundheitliche) Risiken der Energiebereitstellung</i></li> <li>12. <i>Sozialverträglichkeit der Energieversorgung</i></li> <li>13. <i>Akzeptanz der Energieversorgungssysteme</i></li> <li>14. <i>Internalisierungsgrad ökologischer und sozialer Kosten</i></li> <li>15. <i>Beschäftigungswirkungen</i></li> <li>16. <i>Importstrukturen der Energie</i></li> <li>17. <i>Wettbewerbs- und Innovationsfähigkeit</i></li> <li>18. <i>Volks- und betriebswirtschaftliche Bedeutung der Energieversorgung</i></li> <li>19. <i>Internationale Zusammenarbeit</i></li> </ol>
--

### 1.3 Nachhaltigkeitsdefizite der derzeitigen Energieversorgung

Aus den Regeln und Indikatoren für eine nachhaltige Entwicklung lassen sich unmittelbar die wesentlichen Nachhaltigkeitsdefizite der derzeitigen Energieversorgung ableiten. 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. eine Anpassung an eine Klimaveränderung für eine geeignete Reaktion halten, sind zwar in der (vor allem außereuropäischen) Diskussion wissenschaftlicher und öffentlicher Natur vernehmbar, bleiben jedoch eine deutliche Minderheit. Allerdings 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. Während allerdings für die absoluten (statischen) Reichweiten noch deutlich unterschiedliche Zeitpunkte genannt werden, wird der sog. „depletion mid-point“ beim Erdöl – also der Zeitpunkt bei dem das weltweite Fördermaximum erreicht wird – weitgehend übereinstimmend bereits in 15-20 Jahren erwartet. Über die damit einhergehenden Preissteigerungen besteht dagegen ein uneinheitliches Bild. Je nachdem, wie weit der Einsatz fossiler Back-stop-Technologien und moderner Kohletechnologien (Ölschiefer, Teersande; CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Deponierung) als Option betrachtet wird und ob beim Erdgas noch von bedeutenden, nicht explorierten Ressourcen oder unkonventionellen Vorkommen (z. B. Gashydrate) ausgegangen wird.

Unbestritten ist dagegen wieder, dass infolge der weltweit weiteren Ausschöpfung der Lagerstätten von einer zunehmenden Konzentration der verbleibenden Quellen auf politisch weniger stabile Regionen auszugehen ist. Schon bald werden sich mehr als 80% der globalen Reserven 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 „Ressourcenschonung“ dürfte allerdings in Zukunft wieder deutlich zunehmen.

3. Deutlich größere Differenzen existieren hinsichtlich der Bewertung der **nuklearen Gefährdung**. Hier wird von nahezu keiner Seite die Möglichkeit nuklearer Unfälle ausgeschlossen. Die Auseinandersetzungen betreffen vor allem die Eintrittswahrscheinlichkeit und die Folgen von Katastrophenfällen sowie das Ausmaß und die Zeitdauer der radioaktiven Belastungen 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 viele außereuropäische Industrie- und Schwellenländer aber auch die USA und in Europa in 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 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 Nachhaltigkeitsdefizite 1-3 verschärfen, wenn nicht gleichzeitig überproportional der Einsatz fossiler und nuklearer Energie reduziert wird. Darüber hinaus ist die Verteilungsfrage auch hinsichtlich finanzieller oder ökologischer Folgekosten von großer Bedeutung. Im Fall der Klimaproblematik besteht eine potentielle

Konfliktverschärfung darin, dass die voraussichtlich am stärksten von den Folgen möglicher Klimaänderungen betroffenen Regionen wahrscheinlich 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 längerfristig angelegten Entwicklungsszenarien der globalen Energieversorgung (vgl. Kapitel 2.4) werden obige Nachhaltigkeitsdefizite bzw. die Notwendigkeit, sie zu verringern, durchaus berücksichtigt, wobei die Gewichtungen allerdings unterschiedlich sind. Ersichtlich ist, dass alle Szenarien von einem globalen Mehrbedarf an Energie infolge der Notwendigkeit einer Angleichung des weltweiten Pro-Kopf-Verbrauchs an Energie ausgehen (Verringerung des 4. Nachhaltigkeitsdefizits). Alle Szenarien nehmen auch eine beträchtlich verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien an. Szenarien mit „Business as Usual“-Charakter verringern allerdings die Nachhaltigkeitsdefizite 1 bis 3 nicht, sondern vergrößern sie sogar, da sowohl der Bedarf nach fossilen Ressourcen (und damit die Treibhausgasemissionen) als auch nach Kernenergie bis 2050 weiter steigt. Lediglich Szenarien, die gleichzeitig eine weitaus effizientere Energienutzung (und damit einen absoluten Rückgang des Energieverbrauchs in den Industrieländern) unterstellen, bieten die Chance zur gleichzeitigen Verringerung aller vier genannten Nachhaltigkeitsdefizite: ***Erst eine Kombination von Effizienz- und Konsistenzstrategien (d.h. Ausbau erneuerbarer Energien - und (in den Industrieländern) auch von Suffizienzstrategien) erlaubt offensichtlich ein gleichzeitiges Angehen aller Nachhaltigkeitsdefizite der heutigen Energieversorgung.***

## 1. 4 Wege zur Erreichung einer nachhaltigen Energieversorgung

Eine Objektivierung des Problemkomplexes zwischen überwiegend anerkannter Klimagefährdung, den divergierenden Haltungen zu den Risikoaspekten der Kernenergie, den zu erwartenden Verknappungstendenzen im fossilen Bereich und den - aus den im internationalen Vergleich extrem unausgewogenen Zugang zu Energie entstehenden volkswirtschaftlichen und sozialen Schäden - erscheint aus heutiger Sicht nicht möglich. Versuche in dieser Richtung hier mit Hilfe wissenschaftlicher Methoden wie der Monetarisierung externer Kosten eine Lösung herbeizuführen müssen zum heutigen Zeitpunkt als weitgehend gescheitert angesehen werden. Über zentrale Annahmen solcher Verfahren konnte bisher kein Konsens erzielt werden und wird wohl auch in näherer Zukunft nicht zu erzielen sein. Beim Klimaproblem sind dabei weniger die Eintrittswahrscheinlichkeit sondern Art und Kosten der Folgen mit riesigen Unsicherheiten behaftet. Auch bei der nuklearen Gefährdung sind die Unsicherheiten hinsichtlich der Folgen und ihrer Kosten nicht geringer, hinzu kommen hier die wissenschaftlichen Kontroversen zur Eintrittswahrscheinlichkeit. Ungelöst bzw. umstritten bleiben insbesondere wichtige Fragen, vor allem hinsichtlich der Bewertung heutiger und künftiger Menschenleben, die obigen Nachhaltigkeitsdefiziten zum Opfer fallen oder nur unzureichend zur Entfaltung kommen. Auch die indirekt hervorgerufenen Gefährdungen, wie verstärkte Migrationen oder aus Energieknappheit resultierende kriegerische Konflikte, sind monetär nicht erfassbar.

Im Grundsatz akzeptiert die Politik die von der Wissenschaft vorgeschlagenen Kriterien und Zielvorstellungen zur Verminderung der Nachhaltigkeitsdefizite der Energieversorgung und hält ihre Umsetzung im Prinzip für erforderlich. Allerdings fallen die politischen Ziele teilweise deutlich weniger ambitioniert aus, als dies in von der Wissenschaft vorgeschlagenen Zielsystemen dargelegt wird. Weiterhin konzentrieren sich die konkreten politischen Zielsetzungen relativ stark auf die ökologischen Aspekte einer zukunftsfähigen Energieentwicklung, während ökonomische und soziale Ziele nur in sehr allgemeiner Form angesprochen werden.

Hinsichtlich der potentiellen Lösungsoptionen zum existierenden Problempotenzial gibt es speziell in Deutschland keinen wesentlichen Dissens zu den *technischen Möglichkeiten*. Unterschiedliche Positionen ergeben sich hauptsächlich hinsichtlich der Kostenaspekte, besonders vor dem Hintergrund der Verminderung von Klimarisiken bei gleichzeitigem Verzicht auf die Kernenergie. Alle gesellschaftlichen Gruppen sehen allerdings in der verstärkten und effizienten Energienutzung und der verstärkten Nutzung erneuerbarer Energien ein zentrales Element einer Strategie zur Verringerung der wesentlichen Nachhaltigkeitsdefizite. Die Aussagen unterscheiden sich lediglich in der Dynamik des Ausbaus und hinsichtlich der einzusetzenden Instrumente zur Durchsetzung dieser Dynamik. Erneuerbare Energien können vor diesem Hintergrund daher zu Recht als eine der Schlüsseltechnologien dieses Jahrhunderts bezeichnet werden.

Ein operables Konzept für die Ableitung konkreter energiepolitischer Ziele - vor dem Hintergrund der oben diskutierten Nachhaltigkeitsdefizite - verlangt einen Abgleich zwischen den bereits in der Politik diskutierten oder vereinbarten Zielvorstellungen und den vielfältigen, unter Experten für notwendig gehaltenen oder angestrebten Veränderungen der wesentlichen Indikatoren. **Tabelle 2** zeigt einen Zielkatalog für Deutschland, der als Grundlage für zu entwerfende Energieszenarien dienen kann. Die langfristigen Zielsetzungen sind sehr anspruchsvoll, sie sind aber eine wesentliche Voraussetzung zur Annäherung an eine Nachhaltigkeit.

**Tabelle 2: Zielkatalog für eine zukunftsfähige Energieentwicklung in Deutschland**

Bereich	Mindestanforderung			Ziel		
	2005	2008/2012		2005	2010/2020	2040/2050
<b>Ökologie</b>						
CO <sub>2</sub> / weitere Treibhausgase	CO <sub>2</sub> : - 25% auf Basis 1990	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O, PFC, HFC, SF <sub>6</sub> : - 21% auf Basis 1990		- 25% auf Basis 1990	- 30 – 40% auf Basis 1990 bzw. 1995	- 70 – 80% auf Basis 1990 bzw. 1995
SO <sub>2</sub>	- 92% in 2010 auf Basis 1990			k. A.	- 70 – 80%	k. A.
NO <sub>x</sub>	- 60% in 2010 auf Basis 1990			- 60 -70%	- 70 – 90%	- 90 – 100%
Regenerative Energien	<b>2010</b>	<b>2030</b>	<b>2050</b>	<b>2010/2020</b>	<b>2040/2050</b>	
	Verdopplung des Anteils an der Stromerzeugung auf 10% und am Primärenergieverbrauch auf 4%	25% des Primärenergieverbrauchs	50% des Primärenergieverbrauchs	10 bis 20% des Primärenergieverbrauchs	40 bis 65% des Primärenergieverbrauchs	
Fossile Brennstoffe	<b>2010</b>			<b>2005/2010</b>	<b>2040/2050</b>	
	18% KWK-Anteil an Bruttostromerzeugung; vgl. auch CO <sub>2</sub> -Minderungsziele (EU-Ziel)			20 – 25% Anteil	35 – 40% Anteil	
Rationelle Energiewandlung	Jährliche Energieproduktivitätssteigerung um 3,5% bis 2020/2030					
Materialverbrauch	Erhöhung der Rohstoffproduktivität auf das Zweieinhalbfache bis 2020			<b>2010/2020</b>	<b>2040/2050</b>	
				- 20 – 30%	- 80 – 90%	
<b>Ökonomie/Soziales System</b>						
Internationale übergeordnete Ziele	Sicherung internationaler Zusammenarbeit durch fairen Welthandel von Gütern und Rohstoffen, Sicherstellung eines angemessenen Finanz-, Technologie- und Innovationstransfers zwischen Industrie- und Entwicklungsländern und gezielte friedenssichernde Maßnahmen					
Nationale Wirtschaftsstruktur	Möglichst große Branchen- und Unternehmensvielfalt, hohe Innovationsfähigkeit und Krisenfestigkeit					
Versorgungssicherheit	Ist zu gewährleisten durch Diversifikation der Energiequellen und –träger, durch entsprechenden Netzbetrieb sowie durch Energieproduktivitätssteigerungen (bei Energieerzeugung und –nutzung)					
Infrastruktur für Energie	Aufbau, Erhalt und Optimierung der zu Energieversorgung und zur Energieproduktivitätssteigerung notwendigen Infrastruktur (Strom- u. Gasnetz inkl. Regelung für Betrieb, Energieeffizienzagentur)					
Produktions- und Konsumgewohnheiten	Unterstützung nachhaltiger Konsum- und Produktionsweisen, sowie öko-effizienter Dienstleistungen (nicht nur Energiedienstleistungen, sondern z. B. auch Car-Sharing etc.)					
Gesundheit	Reduzierung der energiebedingten Gesundheitsrisiken: Verringerung der Emissionen, Vorsorge gegen Strahlenbelastungen, Vermeidung von Schwermetallemissionen und Lärm					
Beschäftigung	Keine Arbeitsplatzverluste auf gesamtwirtschaftlicher Ebene, strukturelle Veränderungen (Verschiebungen zwischen Sektoren u. Veränderung der Qualifikationsstruktur) müssen sozial- und wirtschaftsverträglich gestaltet werden			(nachhaltige) Vollbeschäftigung		
Soziale Verträglichkeit	Energiekosten müssen in einem angemessenen Verhältnis zu Kosten anderer Güter und Dienstleistungen stehen; insbesondere muss Energie auch für sozial schwache Haushalte bezahlbar bleiben. An der Ausgestaltung des Energiesystems müssen Akteure unterschiedlicher Interessengruppen in ausreichender Zahl beteiligt sein					
Wirtschaftlichkeit	Betriebswirtschaftliche Wirtschaftlichkeit der Investitionen/Maßnahmen muss gegeben sein, regenerative Energien und Techniken zur Energieproduktivitätssteigerung sind zeitlich begrenzt zu fördern ; Internalisierung externer Effekte ist mittelfristig erforderlich					

## 2 Analyse und Kategorisierung aktueller Szenarien

### 2.1 Von der Prognose zu Szenarien

Aus der Vergangenheit wissen wir: Fehlprognosen über die Entwicklung des Energiesystems sind eher die Regel als die Ausnahme. Nicht selten haben diese dazu geführt, dass die relative Zunahme des Energieverbrauchs in seiner zeitlichen Entwicklung überschätzt worden ist. Viele Kraftwerke sind unter diesen falschen Annahmen gebaut worden. Erst später hat man erkannt, dass sie eigentlich nicht gebraucht werden. Infolge der dynamischen Entwicklung der nationalen und globalen Märkte haben diese Unsicherheiten eher noch zugenommen. Vieles spricht auch dafür, dass die Geschwindigkeit des technischen und sozialen Wandels weiter zunimmt. Eine Folge dieser Beschleunigung ist eine wachsende Prognoseunsicherheit. Wer kann denn schon sicher abschätzen, ob und wann z. B. Kleinst-Brennstoffzellen in den Markt eingeführt werden und zu welchen Veränderungen ihre Marktpenetration führen wird. Gleichermäßen liegen aber auch als Folge struktureller Veränderungen der Energiewirtschaft, wie die Öffnung der Märkte, ein hohes Maß an Unsicherheiten vor. Die Liberalisierung der Energiemärkte stellt die größte Marktveränderung seit dem 2. Weltkrieg dar und ist in ihren Ausmaßen auch heute noch nicht vollständig erkennbar. Die ersten Erfahrungen zeigen, dass Geschwindigkeit und Umfang der Implikationen deutlich schneller und vielschichtiger waren als zuvor prognostiziert wurde.

Ernüchtert durch die geringe Treffsicherheit von Prognosen über voraussichtliche Trendentwicklungen wurde bereits Anfang der siebziger Jahre damit begonnen, alternative Zukunftspfade in Szenarien in Form von „Wenn-Dann“-Aussagen zu beschreiben. Das global und in vielen Märkten tätige Unternehmen Shell gehörte dabei zu den Pionieren der Szenarioarbeit. In Energieszenarien werden konsistente Pfade beschrieben, die vom jeweils aktuellen Zustand als möglich erachtet werden können. Sie versuchen nicht zu beschreiben, wie die Realität sich wahrscheinlich entwickeln wird, sondern wie sie sich unter bestimmten Bedingungen entwickeln könnte. Szenarien stellen dabei 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 der Ziele“ und die „Realitätstüchtigkeit von Mitteln“. 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.**

Im Folgenden wird auf die aktuell vorliegenden Szenarien eingegangen, die zum Teil sehr unterschiedliche Zukunftspfade aufzeigen. Um eine Übersicht zu gewährleisten, werden sie – soweit eindeutig möglich – in Kategorien eingeteilt. Dabei wird unterschieden zwischen „**Status Quo-Szenarien**“, „**Effizienzsznarien**“ und „**Nachhaltigkeitsszenarien**.“

Weiterhin wird unterschieden nach kurz- und mittelfristigen Szenarien (bis 2030) und Langfristszenarien (bis 2050). Die wichtigsten europäischen und globalen Szenarien werden ebenfalls aufgegriffen.

Status Quo- oder Trendszenarien leiten sich aus „Business-as-Usual“ Betrachtungen ab. Sie zeigen Entwicklungen auf, die sich entweder ausschließlich aus der Vergangenheit extrapolieren lassen oder berücksichtigen zusätzlich lediglich diejenigen Maßnahmen, deren Umsetzung sich heute schon deutlich abzeichnet. Nachhaltigkeitsszenarien orientieren sich dagegen an Nachhaltigkeitszielen, versuchen diese weitestgehend zu erfüllen und diskutieren die daraus resultierenden Anforderungen und die in absehbarer Zeit erforderlichen Maßnahmen, die zum Einschwenken in die dargelegte Richtung erforderlich sind. Die von der Bundesregierung vorgegebenen Zielwerte (z. B. Klimaschutzziele) spielen dabei eine zentrale Rolle. Effizienz-Szenarien siedeln sich vom Grad der Zielerreichung zwischen den beiden vorgenannten Varianten an. Sie zeichnen sich darüber hinaus vor allem dadurch aus, dass sie die rationelle Energieanwendung als kurz- bis mittelfristig vorrangige und robuste Handlungsmöglichkeit in den Mittelpunkt stellen.

Auf der Basis der Szenarien, deren Mehrzahl sich auf die mittelfristige Zeitebene konzentriert, kann anschaulich gemacht werden, welche Möglichkeiten bei der Realisierung einer langfristig nachhaltigen Energienutzung in Deutschland bestehen und welche Zielabweichungen in welchem Ausmaß zu erwarten sind, wenn man den einen oder anderen Weg folgt, sowie welche Teilbereiche des Energiesystems dabei besondere Bedeutung besitzen. Beschreitet man etwa zu lange einen Status Quo-Pfad (vgl. **Abbildung 1**), ist zu erwarten, dass die gewünschte Zielerreichung zunehmend erschwert wird oder nur noch mit sehr großem Aufwand erreichbar ist. Ab einem bestimmten Zeitpunkt können dann die angestrebten Ziele überhaupt nicht mehr erreicht werden.

Für die Einordnung der einzelnen Szenarien in die verschiedenen Kategorien aber auch als strukturierendes Hilfsmittel für die Beschreibung werden die wesentlichen Indikatoren aus den in Tabelle 1 dargestellten Bereichen verwendet. Von Bedeutung als Gradmesser für die ökologische Nachhaltigkeit sind dabei insbesondere

- der resultierende End- und Primärenergieaufwand sowie dessen Struktur als Maßstab für den Ressourcenschutz und die Versorgungssicherheit,
- die hiermit korrespondierenden CO<sub>2</sub>-Emissionen als Maßstab für den Klimaschutz,
- die (Energie-)Produktivitätssteigerung während des Betrachtungszeitraums als Maßstab für den Ressourcenschutz,
- der Anteil erneuerbarer Energien als Maßstab für einen klimaverträglichen Anteil an der Energiebereitstellung und
- der Kernenergieanteil als Maßstab für die Risikoarmut und Fehlertoleranz.

Darüber hinaus sind der Ausstoß von Luftschadstoffen, die Anteile heimischer Energieträger, die Rolle der rationellen Energienutzung und neuer Technologien in den einzelnen Verbrauchssektoren sowie die Veränderungen im Sektor Verkehr und beim Strom-

verbrauch als zwei bisher noch wachsende Bereiche des Endenergiebedarfs von Bedeutung.

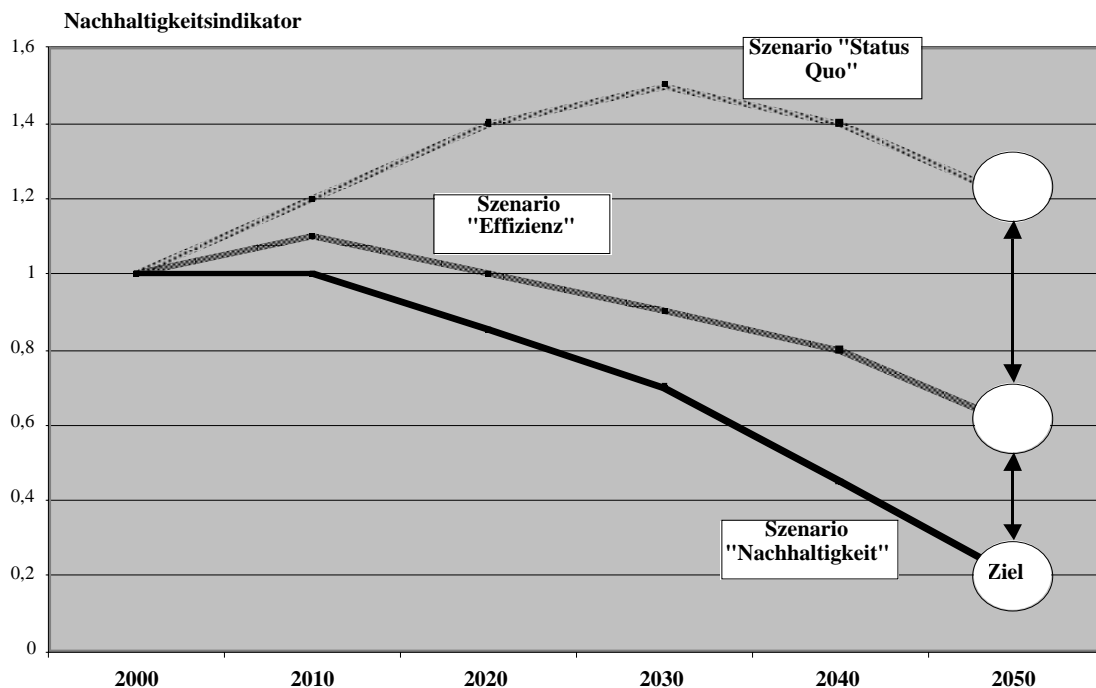


Abbildung 1: Beispielhafte Abweichung von der Zielvorgabe in Abhängigkeit des gewählten Zukunftspfades für die Szenariokategorien: „Status Quo“, „Effizienz“ und „Nachhaltigkeit“.

## 2.2 Nationale Kurz- und Mittelfristszzenarien

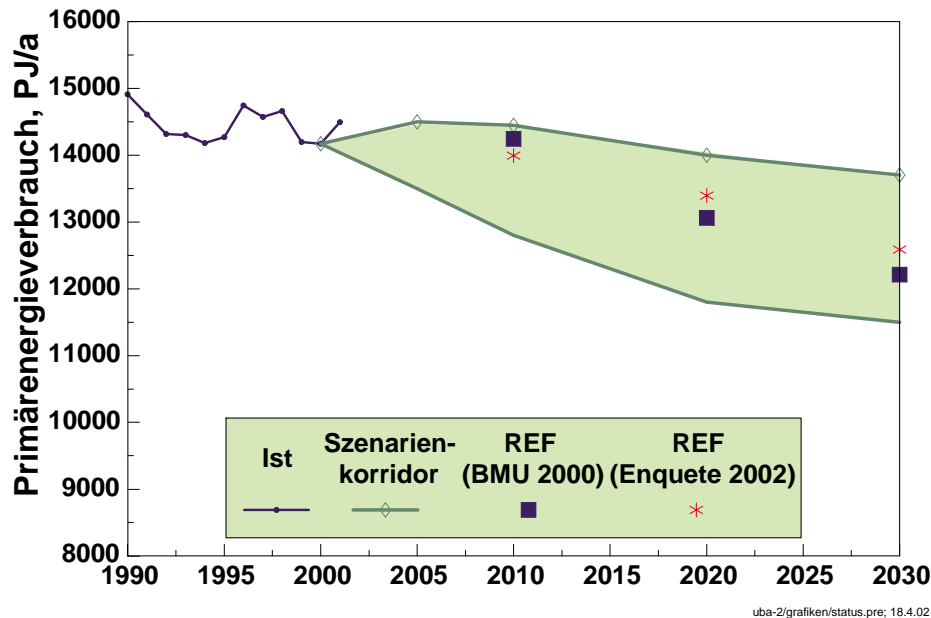
In der Rubrik nationale Kurz- bis Mittelfristszzenarien wurden nachfolgend aufgeführte Untersuchungen detaillierter betrachtet. Nachrichtlich hinzugefügt werden die wichtigsten Eckdaten der Referenzentwicklung der Enquete-Kommission „Nachhaltige Energieversorgung“ vom April 2002.

Den **Status-Quo bzw. Trendszenarien** unter den Kurz- und Mittelfristszzenarien ist trotz aller Unterschiede gemeinsam, dass sie von einem leichten Rückgang des Primärenergieverbrauchs (**Abbildung 2**) und 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 ansteigt. Der CO<sub>2</sub>-Ausstoß sinkt hingegen ebenfalls, zumindest tendenziell, leicht ab. Das angestrebte Klimaschutzziel –25% bis 2005 (Basis 1990) der Bundesregierung wird aber deutlich verfehlt (**Abbildung 3**). Dem längerfristigen Kyoto-Reduktionsziel –21% zwischen 2008 und 2012 (Basis 1990) nähert sich ein Teil der Trendszenarien immerhin an. Einen mittleren Weg, sowohl hinsichtlich des Primärenergieverbrauchs als auch der CO<sub>2</sub>-Emissionen beschreibt das in den Abbildungen besonders gekennzeichnete BMU-Referenzszenario. Das aktuelle Referenzszenario der Enquete-Kommission ist hinsichtlich des Primärenergieverbrauchs diesem Szenario sehr ähnlich, aufgrund unterschiedlicher Annahmen zur Entwicklung der Energieträger-

struktur unterscheiden sich diese beiden Szenarien bezüglich der zukünftigen CO<sub>2</sub>-Emissionen etwas stärker, beide liegen aber innerhalb des Korridors der betrachteten Status-Quo-Szenarien.

- **Enquete:** Enquête-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“, 1990-1995
- **Energie 2010:** Gruppe Energie 2010, Phase I und II, 1995 und 1998
- **Prognos/EWI:** Energiereport III von Prognos, Basel und EWI Köln, 1999
- **Politiksznarien:** Politiksznarien I und II im Auftrag des Umweltbundesamts, 1997-1999
- **BMU:** Szenarien des Wuppertal Instituts im Auftrag des Bundesumweltministerium, 1999 - 2000
- **Energiewende:** Szenarien des Öko-Instituts im Auftrag der Heinrich Böll Stiftung, 1998-2000
- **Modellexperiment:** BMBF Modellexperiment: „Szenarioanalysen“, 1998-2000
- **Jülich:** Szenarien des Forschungszentrums Jülich für die Landesregierung von NRW
- **ESSO:** Esso Report 2000

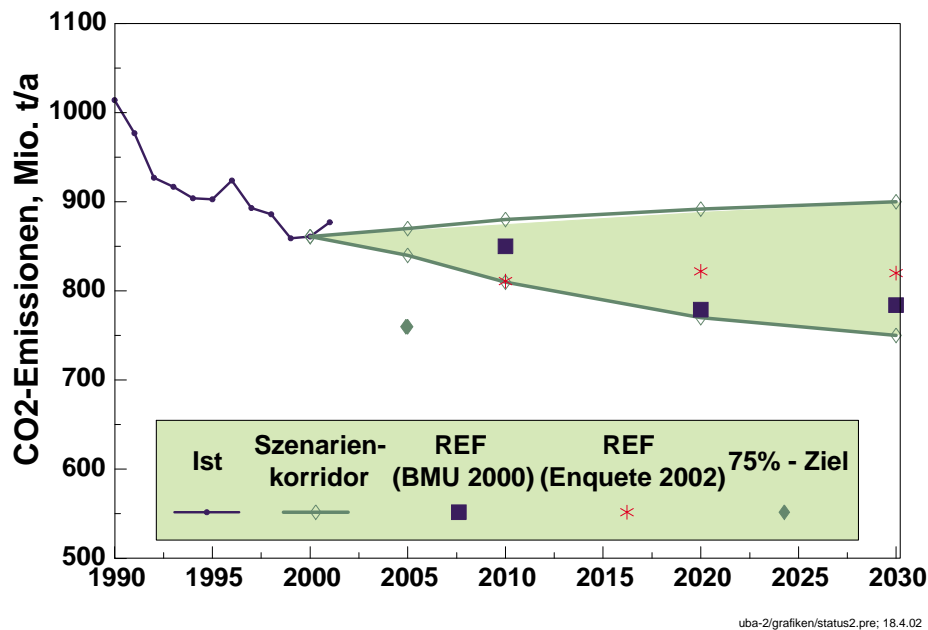
Alle Trendszenarien sehen darüber hinaus auch moderate Wachstumsraten für die Stromerzeugung und die Wärmebereitstellung aus erneuerbaren Energien vor. Für das Jahr 2010 ergeben sich – ausgehend von den derzeitigen 2,3% (Substitutionsmethode) - Anteile bis zu 3,3% und für 2020 bis zu 4,4%. Die unterstellte Entwicklung der Kraft-Wärme-Kopplung ist uneinheitlich. Prognos geht von einem deutlichen Wachstumstrend aus, andere Szenarien (BMU, Energiewende) zeigen deutlich geringere Erhöhungen, im Projekt „Politiksznarien“ wird dagegen von einer rückläufigen Entwicklung ausgegangen. Als repräsentatives Referenzszenario lässt sich das BMU-Szenario bezeichnen.



**Abbildung 2: Bandbreite des Primärenergieverbrauchs 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 im Rahmen der Nachhaltigkeitsdiskussion zu berücksichtigen. Insofern können nur solche Szenarien als nachhaltig gelten, die von einem Rückzug aus der nuklearen Stromerzeugung ausgehen, wie er z. B. im Rahmen des Energiekonsenses zwischen Bundesregierung und Kraftwerksbetreibern festgelegt worden ist<sup>2</sup>. Geht man von dem Leitindikator CO<sub>2</sub> aus und unterstellt, dass bis zum Jahr 2020 nur eine Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von etwa 40% (gegenüber dem Ausgangsniveau des Jahres 1990) auf dem Nachhaltigkeitspfad liegt, lassen sich von den betrachteten Szenarien die Szenarien „Begrenzte Betriebszeit“ und „Kyoto/30 Betriebsjahre“ der BMU-Studie, das Szenario „Potential“ der Energiewende 2020 Studie und das 40% Szenario aus den Politikszenerien II als **Nachhaltigkeitsszenarien** bezeichnen. Auch die Szenarien II des Projekts „Energie 2010“ können hier eingeordnet werden.

<sup>2</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.



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

In die **Kategorie Effizienz** lässt sich keines der betrachteten Szenarien unmittelbar einordnen. Das „Politik-Szenario“ der Studie Energiewende 2020 kann sowohl hinsichtlich der umgesetzten Einsparmaßnahmen als aber auch in Bezug auf die verstärkte Nutzung von erneuerbaren Energien und der KWK eher als abgeschwächtes Nachhaltigkeitsszenario bezeichnet werden. Einer spezifischen Konzentration auf den Effizienzgesichtspunkt kommt das 30%-Szenario der Politikszenerarien II am nächsten. Der Primärenergieeinsatz sinkt hier im Zeitverlauf von 1995 bis 2020 um rund 19,5% (im Vergleich zu 10% im Referenzszenario) bzw. 0,9%/a. Dabei werden - wie ein Vergleich mit dem Modell-Basisszenario zeigt - im Wesentlichen diejenigen Einsparoptionen ausgeschöpft, die auch ohne weitere energiepolitische Maßnahmen ergriffen würden, wenn keine Hemmnisse vorliegen würden. Die erneuerbaren Energien spielen in diesem Zukunftsentwurf keine maßgebliche Rolle. Mit einer Minderung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes um 30% werden die Nachhaltigkeitsziele nicht erreicht.

Die in Nachhaltigkeitsszenarien angestrebte Reduktion an CO<sub>2</sub>-Emissionen (- 40% bis 2020, etwa - 50% bis 2030) bei gleichzeitigem Verzicht auf die weitere Kernenergienutzung kann erreicht werden, wenn folgende Entwicklungen zeitgerecht einsetzen und parallel durchgeführt werden:

- **Steigerung der mittleren Energieproduktivität im gesamten Zeitraum auf Werte um 3 – 3,5%/a (Status-Quo-Entwicklung 2,0 – 2,3%/a; Vergangenheit 1,4 – 1,7%/a). Dies führt bis 2030 zu einem um 25% bis 30% geringeren Primärenergieverbrauch als in der Status-Quo -Entwicklung.**

- **Steigerung des Beitrags erneuerbarer Energien am Primärenergieverbrauch auf 12 – 15% bis 2030; an der Stromerzeugung auf ca. 25% (Status-Quo ca. 4 – 5%; am Strom < 15%) und**
- **mindestens Verdopplung des Beitrags der Kraft-Wärme-Kopplung gegenüber heute.**

Von den untersuchten Szenarien kommt das BMU-Szenario „Kyoto-Ziele/30 Betriebsjahre“ dieser Zuordnung am nächsten.

### 2.3 Nationale Langfristszenarien

Folgende Untersuchungen der letzten zehn Jahre waren für eine Analyse hinsichtlich der Entwicklung der nationalen Energieversorgung bis etwa 2050 geeignet

- **TA-Wasserstoff:** „Bedingungen und Folgen von Aufbaustrategien für eine solare Wasserstoffwirtschaft“, Untersuchung für die Enquête-Kommission „Technikfolgenabschätzung,
- **ISI/Prognos:** „Konsistenzprüfung einer denkbaren zukünftigen Wasserstoffwirtschaft“. Untersuchung für das Bundeswirtschaftsministerium,
- **DLR/ISE:** „Strategien für eine nachhaltige Energieversorgung“,
- **ISI/Siemens:** „Energieszenarien mit reduzierten CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2050“,
- **TU Berlin:** „Systemtechnik einer klimaverträglichen Elektrizitätsversorgung in Deutschland für das 21. Jahrhundert“,
- **DLR/TAB:** „Potenziale und Perspektiven regenerativer Energieträger“

Bei diesen Langfristszenarien handelt es sich – mit einer Ausnahme - um Nachhaltigkeits-szenarien, die von einem gleichzeitigen Ausstieg aus der Kernenergie ausgehen. Die Szenarien verfolgen aber insgesamt unterschiedliche Strategien um die vorgegebenen Nachhaltigkeitsziele – im Wesentlichen eine weitergehende Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 80% bis zum Jahr 2050 – bei möglichst tragbarer ökonomischer Belastung zu erreichen. Verschiedene Szenariovarianten innerhalb einer Untersuchung stellen dazu die Bandbreite der Handlungsmöglichkeiten dar. Die beiden in der Auflistung letztgenannten Untersuchungen konzentrieren sich auf die Elektrizitätsversorgung; die beiden frühen Untersuchungen beziehen sich nur auf die alten Bundesländer.

Die Eckdaten der Szenarien sind für das Zieljahr in **Tabelle 3** zusammengestellt. Die Energieproduktivität steigt in allen Szenarien deutlich an, die Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Energieverbrauch setzt sich in Zukunft also nicht nur weiter fort, sondern beschleunigt sich zum Teil sogar deutlich. Beim Endenergieverbrauch stimmen die Angaben weitgehend überein, mit Werten um 500 TWh/a für Elektrizität, 600 TWh/a für Wärme und 300 TWh/a für Treibstoffe, lediglich bei der Studie „TA-Wasserstoff“ fällt der niedrige Stromverbrauch auf (praktisch kein Wärme- bzw. Verkehrsanteil).

Die Anteile erneuerbarer Energien im Stromsektor werden bis 2050 mit Werten zwischen 50 und 80% durchweg hoch eingeschätzt. Interessant ist dabei, dass die früheren Szenarien deutlich geringere Potenziale für Windkraft ausweisen als die jüngere Studien. Dies ist u.a. durch die rasante Entwicklung hin zu größeren Anlagen und neuerdings zu Offshore-Windparks zu erklären. Diese Tatsache macht deutlich, wie schwierig die Entwicklung neuer Technologien in ihrer dynamischen Wachstumsphase einzuschätzen ist. Im Allgemeinen – dies macht diese Analyse deutlich - wurde die Marktdynamik erneuerbarer Energien bisher unterschätzt.

Wasserkraft und Biomasse erreichen in allen Szenarien relativ frühzeitig hohe Ausschöpfungsgrade bis zu 100% der verfügbaren Potenziale. Die Anteile der Photovoltaik werden sehr unterschiedlich eingeschätzt. Bis auf eine Ausnahme wird die Möglichkeit der Stromerzeugung aus Geothermie mittels Hot-Dry-Rock-Verfahren nicht betrachtet. Ebenso kommt der Stromimport aus erneuerbaren Quellen wie Wasserkraft, Geothermie, Windkraft und Sonnenenergie nur eingeschränkt zum Tragen. Diese Energiequellen werden in den frühen Szenarien an den Kraftwerksstandorten meist zur Wasserstoffherstellung eingesetzt, Strom findet demnach in indirekter Form über einen chemischen Energiespeicher Verwendung. Kraft-Wärme-Kopplung gewinnt in fast allen Szenarien zunehmend an Bedeutung, wenn hochgesteckte Emissionsziele erreicht werden sollen. Die Szenarien stimmen weiterhin darin überein, dass große Anteile erneuerbarer Energien im Verkehrssektor (Kraftstoffe) nur über Wasserstoff realisiert werden können.

Das Szenario **TA-Wasserstoff**, Variante I-A, geht im Vergleich zu den anderen untersuchten Szenarien von einem geringen Endenergieverbrauch aus, der im Wesentlichen durch Produktivitätssteigerung, Wärmedämmung und andere Energiesparmaßnahmen sowie durch weitgehende Substitution des Stromeinsatzes im Wärmebereich durch Wasserstoff bedingt ist. Die Kraft-Wärme-Kopplung spielt in diesem Szenario eine geringere Rolle als in den anderen Untersuchungen. Stromimporte erneuerbarer Energien dienen ausschließlich zur Produktion von Wasserstoff.

Das Szenario **ISI/Prognos**, Variante Diversifikation, geht von hohen Anteilen erneuerbar erzeugten Wasserstoffs in allen Sektoren aus. In diesem Szenario wurde nicht auf Kernenergie verzichtet, sie wird ebenfalls in Teilen zur Wasserstoffproduktion eingesetzt. Solarstromimporte aus Photovoltaik und thermischen Solarkraftwerken in Südeuropa und Nordafrika sind bei diesem Szenario ebenfalls vorgesehen.

Das Szenario des **ISE/DLR** erreicht ohne den Einsatz von erneuerbarem Wasserstoff trotzdem Anteile erneuerbarer Energien in der gleichen Größenordnung wie die anderen Szenarien. Dabei wird auf den Einsatz von Kraftstoffen aus Biomasse im Verkehrssektor vollständig verzichtet und statt dessen deren Einsatz in der Kraft-Wärme-Kopplung favorisiert. Verbleibendes Erdgas wird vornehmlich in GuD-Anlagen und zur Kraft-Wärme-Kopplung genutzt. Die Kernenergie wird nicht mehr benötigt, auch der Einsatz von Kohle geht stark zurück, da vor allem schnell regelbare, gasgefeuerte Kraftwerke zum Ausgleich zwischen Last und erneuerbarem Angebot gebraucht werden. Solarstromimporte aus Photovoltaik und thermischen Solarkraftwerken in Südeuropa und Nordafrika sind bei diesem Szenario in deutlich größerem Maßstab als im Ansatz von ISI/Prognos vorgesehen.

**Tabelle 3: Vergleich wesentlicher Eckdaten der Langfristszenarien mit 80%-iger Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zum Jahr 2050 (2040)**

Langfristszenarien (Energien in TWh/a)	TA- Wasser- stoff <sup>1</sup>	ISI/ Prognos <sup>1</sup>	DLR/ ISE	ISI/ Sie- mens	TU Berlin	DLR/ TAB
Erscheinungsjahr	1990	1991	1997	1997	2000	2000
Zieljahr	2050	2040	2050	2050	2050	2050
<b>Ges. Endenergieverbrauch</b>	<b>1151</b>	<b>1372</b>	<b>1472</b>	<b>1445</b>	-	-
<b>Anteil erneuerbarer Energien (%)</b>	<b>65</b>	<b>60</b>	<b>58</b>	<b>53</b>	-	-
<b>Endenergie Strom 3)</b>	<b>292</b>	<b>503</b>	<b>522</b>	<b>495</b>	<b>519 2)</b>	<b>528</b>
<b>Anteil erneuerbarer Energien (%)</b>	<b>74</b>	<b>58</b>	<b>65</b>	<b>49</b>	<b>80</b>	<b>69</b>
Wasserkraft	27	25	25	20	25	25
Windenergie	36	34	71	81	164	105
Photovoltaik	69	17	69	57	175	40
Biomasse/Biogase /Müll	22	13	35	84	50	35
Stromimport Solarthermische KW	0	28	90	0	0	85
Geothermie (Hot Dry Rock)	0	0	0	0	0	35
Stromimport Photovoltaik	0	28	47	0	0	0
Import erneuerbarer Wasserstoff	63	148	0	0	0	0
Fossile Brennstoffe	75	31	185	204	105	163
Kernenergie/ Importstrom konv.	0	179	0	49	0	0
<b>Endenergie Wärme 4)</b>	<b>598</b>	<b>537</b>	<b>655</b>	<b>690</b>	-	-
<b>Anteil erneuerbarer Energien (%)</b>	<b>67</b>	<b>66</b>	<b>80</b>	<b>48</b>	-	-
Sonne/ Geothermie/Biomasse	251	71	526	316	-	-
Erneuerbarer Wasserstoff	148	283	0	13	-	-
Fossile Brennstoffe	199	183	129	361	-	-
<b>Endenergie Mobilität</b>	<b>261</b>	<b>332</b>	<b>295</b>	<b>260</b>	-	-
<b>Anteil erneuerbarer Energien (%)</b>	<b>69</b>	<b>60</b>	<b>0</b>	<b>73</b>	-	-
Erneuerbarer Wasserstoff	180	169	0	177	-	-
Kraftstoffe aus Biomasse	0	30	0	12	-	-
Fossile Kraftstoffe	81	133	295	177		

1) nur alte Bundesländer 2) Mittelwert aus Trend- und Sparszenario 3) einschl. Einsatz für Wärme und Mobilität, 4) einschließlich KWK-Wärme bzw. Fernwärme.

Das Szenario von **ISI/SIEMENS** setzt Wasserstoff, der nur teilweise auf der Basis erneuerbarer Energien erzeugt wird, fast ausschließlich im Verkehrssektor ein. Der Anteil erneuerbarer Energiequellen ist insgesamt etwas geringer als in anderen Szenarien, dafür findet der Kohleeinsatz mittels Vergasung in GuD-Kraftwerken statt, wobei CO<sub>2</sub> abgetrennt und deponiert wird. Auch Energiesparmaßnahmen und der Einsatz der Kraft-Wärme-Kopplung stehen im Vordergrund dieser Strategie.

Die beiden letzten Szenarien von der **TU Berlin** und **DLR/TAB** beziehen sich ausschließlich auf den Elektrizitätssektor. Während das Szenario der TU Berlin lediglich heimische erneuerbare Energien einbezieht, werden im DLR/TAB Ansatz Stromimporte aus Wasserkraft, Geothermie, Wind und Solarkraftwerken sowie die heimische geothermische Stromerzeugung über Hot Dry Rock (HDR) einbezogen. Daraus ergibt sich ein deutlich geringerer Ausschöpfungsgrad der verfügbaren Quellen, geringere Fluktuationen und eine bessere räumliche Verteilung der Energieströme.

Selbst im Szenario der TU Berlin mit extrem großen Anteilen an stark fluktuierendem Wind- und Photovoltaik-Strom hält sich der Speicherbedarf für Strom aus erneuerbaren Energien aber in Grenzen, so dass der Einsatz von Wasserstoff ausschließlich für diesen Zweck nicht gerechtfertigt ist. Auch große erneuerbare Anteile im Wärmesektor scheinen ohne Wasserstoff erreichbar zu sein (ISE/DLR). Insgesamt ist aus den Analysen zu schließen, dass der Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft insbesondere dann erforderlich wird, wenn hohe CO<sub>2</sub>-Minderungsraten im Verkehrssektor erzielt werden sollen. Dann aber gibt es längerfristig kaum wirtschaftlichere Alternativen zu einer Wasserstoffwirtschaft. Ist Wasserstoff für den Einsatz im Verkehr erst einmal verfügbar, zeigen sich allerdings weitere mögliche Synergieeffekte mit der Stromwirtschaft (Wasserstofferzeugung in Zeiten von erneuerbaren Angebotsspitzen) und der Wärmewirtschaft (dezentrale Kraft-Wärme-Kopplung mit Brennstoffzellen), die eine sinnvolle Verzahnung der Wasserstoffwirtschaft mit den anderen Sektoren erlauben.

## 2.4 Europäische und globale Energieszenarien

Für das **europäische Umfeld** wurden vier Untersuchungen zur Analyse der zukünftigen Energieversorgung herangezogen:

- **IPSEP:** „Energy Policy in the Greenhouse“ Vol. II: „Cutting Carbon Emissions – Burden or Benefit?“
- **Generaldirektion** „Die Energie in Europa bis zum Jahr 2020 – ein Szenario-Ansatz“,
- **TERES:** EU-Altener: „TERES – The European Renewable Energy Study“,
- **Outlook:** „EU-Energy Outlook to 2020“.

Die folgenden Untersuchungen wurden für die Analyse **globaler Szenarien** benutzt. Die WEC-Szenarien und die „Factor 4“-Einsparerszenarien des Wuppertal-Instituts wurde dabei detailliert untersucht.

- **WEC:** Szenarien des World Energy Council und des IIASA,
- **Wuppertal:** „Globale Energieszenarien als Basis für die Marktanalyse von Zukunftstechnologien“
- **Shell:** Shell-Szenario „Nachhaltige Entwicklung“

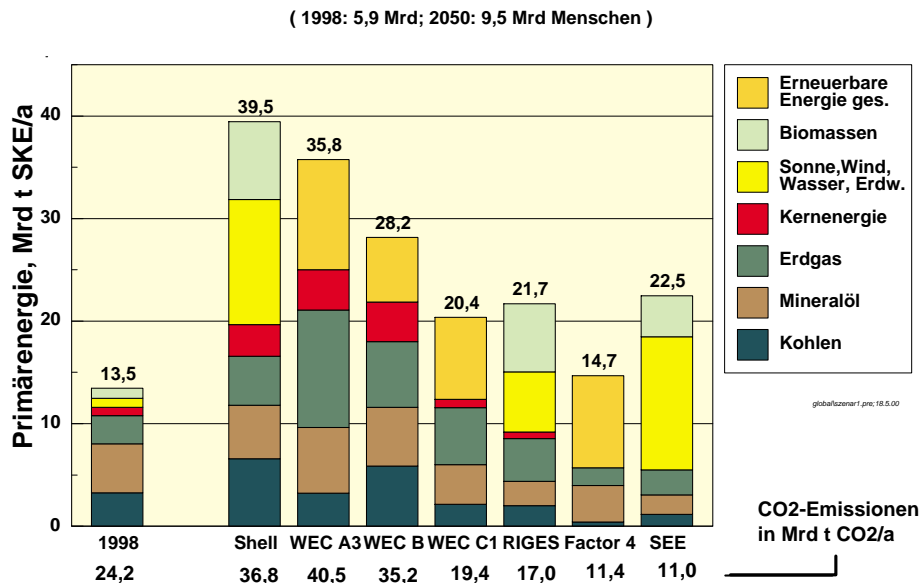
- **RIGES:** „Renewable Intensive Global Energy Scenario“ (Johansson, 1993)
- **Factor 4:** Szenario aus „Voller Energie“ (Lovins, Hennicke, 1999)
- **SEE:** Szenario „Solar Energy Economy“ (Nitsch, 1999)

Den umfassenderen der oben genannten Untersuchungen (Generaldirektion, TERES, Outlook, WEC) ist gemeinsam, dass jede für sich einen Fächer von Szenarien aufspannt, die von Status Quo-Entwicklungen bis zu Nachhaltigkeitsszenarien reichen und verschiedene Zwischenformen enthalten. Sie gehen nur in wenigen Fällen von konkret gesetzten Zielen für eine CO<sub>2</sub>-Reduktion aus; ihr Anliegen ist es vielmehr, „alle möglichen Energiezukünfte“ zu erfassen und die mit den jeweiligen Varianten verknüpfte Entwicklungsdynamik zu beschreiben und daraus Schlussfolgerungen abzuleiten. Wegen der insgesamt stärkeren Wachstumsdynamik sowohl der europäischen wie der globalen Energienachfrage, sind ein Teil der Szenarien mit deutlichen Zunahmen der CO<sub>2</sub>-Emissionen verknüpft. Weitere Untersuchungen (IPSEP, Factor 4, RIGES) haben dagegen – ähnlich wie die beschriebenen nationalen Szenarien – zielgerichteten Charakter in Bezug auf die Erreichung der europäischen und globalen Klimaschutzziele. Sie lassen sich daher zur Einordnung der nationalen Nachhaltigkeitsszenarien verwenden.

In **Abbildung 4** sind für die globale Ebene aus der Fülle der Szenariovarianten sieben ausgewählt, die stellvertretend für die Kategorien „Status Quo“ und „Nachhaltigkeit“ stehen können. Es sind die stark wachstumsorientierten Szenarien Shell, WEC A3 und WEC B und die stark effizienzorientierten Szenarien WEC C1, RIGES, Factor 4 und SEE. Bemerkenswert ist, dass der Primärenergieverbrauchsanteil der erneuerbaren Energien in allen Szenarien deutlich steigt. Er liegt ausgehend von 14% in 1995 (einschließlich nichtkommerzielle Biomasse), selbst 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 beispielsweise 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 die erforderliche globale Wachstumsdynamik der erneuerbaren Energien ohne Durchführung rigoroser Maßnahmen und der konsequenten Erschließung und Ausweitung der neuen Märkte so rechtzeitig und so umfassend in Gang kommen soll, dass bereits zur Mitte des Jahrhunderts die derart hohe absolute Beiträge der erneuerbaren Energien auf globaler Ebene verwirklicht werden können. Eine weitgehend auf erneuerbaren Energien basierende Energieversorgung erscheint nur dann möglich, wenn gleichzeitig über eine forcierte Energieeinsparpolitik das zu erreichende absolute Niveau abgesenkt wird.

In **Abbildung 4** wird darüber hinaus insbesondere deutlich, dass trotz großer Beiträge erneuerbarer Energien und in einigen Fällen auch steigender Kernenergiebeiträge die Szenario-

rien, welche die herkömmliche Wachstumsdynamik des Energieverbrauchs in den Industrieländern fortschreiben und diese auch auf die Entwicklungsländer übertragen – also die Status Quo-Szenarien - *keine Reduktion der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen erreichen. Dies unterstreicht noch einmal die enorme Bedeutung einer weltweit wesentlich rationelleren Energienutzung, wie sie in den Szenarien WEC C1, RIGES, SEE und Factor 4 unterstellt wurde.*



**Abbildung 4: Szenarien des Weltenenergieverbrauchs für das Jahr 2050 im Vergleich zum derzeitigen Verbrauch (Bevölkerung 2050: 9,5 Mrd.; 1 Mrd. t SKE/a = 29,3 EJ/a)**

Von dieser These geht insbesondere das Weltenergieszenario „Factor 4“ aus. Anstoß für die Szenariountersuchung des Wuppertal Instituts gab die Tatsache, dass auch der Ökologierpfad des WEC (C1) nicht die erklärten CO<sub>2</sub>-Minderungsziele des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) zum Jahr 2050 erfüllt. Mit einem technologiebezogenen „Bottom-up“-Ansatz ist deshalb vor allem gezeigt worden, welche Energieeinsparungen prinzipiell möglich sind, wenn die gesamte Bandbreite der Effizienztechnologien nicht nur bei der Bereitstellung von Energien (also etwa im Kraftwerk), sondern auch auf der Nachfrageseite (d. h. bei der Energienutzung) konsequent umgesetzt werden. Das Szenario kann daher als konsequenteste Ausprägung einer Effizienzstrategie bezeichnet werden. Bei gleichem fossilen Energiesockel und unterschiedlicher Gewichtung der Teilstrategie „Energieeffizienz“ und „Erneuerbare Energien“ erreichen die Szenarien „Factor 4“ und „SEE“ als einzige Szenarien eine Halbierung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes bis zum Jahr 2050.

## 2.5 Aus der Szenarioanalyse abgeleitete Empfehlungen für Nachhaltigkeitsszenarien

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

Für die **kurzfristige Zeitebene (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 zuvor beschriebenen 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 und auszubauen. Im Vordergrund steht dabei der Aufbau entsprechender Infrastrukturen, wie z.B. Nahwärmeversorgungen und die Etablierung der Märkte für erneuerbare Energien sowie der Aufbau virtueller Kraftwerke,
- den in diesem Zeitraum im Kraftwerkspark anstehenden Erneuerungs- und Ersatzbedarf für eine zielorientierte Umgestaltung zu nutzen in dem Effizienzpotenziale ausgeschöpft und Kompatibilität mit dem Ausbau erneuerbarer Energien gewahrt wird statt durch die Errichtung wenig zukunftsfähiger Kraftwerke die heutigen Strukturen zu zementieren und die Handlungsmöglichkeiten langfristig einzuschränken (Langlebigkeit des Kapitalstocks im Kraftwerksbereich); im entsprechenden Maße gilt dies auch für den Erneuerungsbedarf auf der Ebene der Stromnetze,
- über mögliche Senken in Bezug auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen endgültige Klarheit (prinzipielle Eignung, Nachhaltigkeit) zu erlangen (z. B. CO<sub>2</sub>-Entsorgung) und
- neue Schwerpunkte im Bereich der Mobilität zu setzen (verstärkte Anreize für den Umstieg auf die Bahn, Kombination effizienter Autos mit neuen Treibstoffen).

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

- die erreichte Ausbaudynamik (bei den erneuerbaren Energien, der rationellen Energie-

anwendung, Brennstoffsubstitution) zu sichern und stetig fortzuentwickeln und so zu einem inhärenten Teil jeder Energieversorgung zu machen,

- weitere Quellen in den Energiemix einzubeziehen (z. B. Stromimport aus erneuerbaren Energiequellen, je nach Ergebnissen der zuvor erforderlichen Prüfung auch CO<sub>2</sub>-neutrale fossile Kraftwerke mit angeschlossener CO<sub>2</sub>-Entsorgung),
- neue klimaverträgliche Kraftstoffe auf der Basis erneuerbarer Quellen in das gesamte Energiesystem 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. Szenariophilosophie und Eckdaten der Szenarien

#### 3.1 Szenariophilosophie: Schritt für Schritt zur Nachhaltigkeit

Aufbauend auf den aus den vorliegenden Studien erlangten Erkenntnissen werden in der Untersuchung nachfolgend drei mögliche Zukunftspfade aufgezeigt. Dies erfolgt auf der Basis jeweils gleicher demoskopischer und ökonomischer Ausgangsdaten, die aus Gründen der Vergleichbarkeit dem Analyseraster der Enquête-Kommission des Deutschen Bundestages „Nachhaltige Energieversorgung“ entnommen sind.

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 3989 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 49,4% zulegt.

Das **Status Quo-Szenario** basiert bis zum Jahr 2020 mit dem Energiereport III von Prognos/EWI auf der bis dato aktuellsten Analyse aus dem Jahr 1999, die bis zum Ende des Betrachtungszeitraums (d. h. bis zum Jahr 2050) auf der Basis eigener Annahmen fortgeschrieben worden ist. Dabei werden nur Maßnahmen zugrunde gelegt, deren Umsetzung heute bereits absehbar bzw. beschlossen ist. Entsprechend werden auch Annahmen zur Weiterentwicklung bestehender Maßnahmen (z. B. Energieeinsparverordnung) getroffen. Spezifische Zielvorgaben insbesondere auch hinsichtlich des Erreichens bestimmter Klimaschutzziele bestehen für diesen Entwicklungspfad nicht. Zwischenzeitlich liegt aus den parallel laufenden Arbeiten der Enquête-Kommission ein aktuelles Referenzszenario vor, das ebenfalls eine Status-Quo-Entwicklung beschreibt. Auf die Ergebnisse dieser Betrachtung wird im Folgenden an geeigneten Stellen nachrichtlich verwiesen.

Auch im **Effizienzscenario** werden keine konkreten Klimaschutzvorgaben gemacht, allerdings wird unterstellt, dass gegenüber Trendbedingungen in deutlich erhöhtem Umfang Effizienztechniken sowohl nachfrage- als auch angebotsseitig zur Anwendung kommen. Dabei werden in erster Linie diejenigen Potenziale der rationellen Energienutzung und –wandlung umgesetzt, die unter den gegebenen Bedingungen für die nachfragenden Akteure wirtschaftlich realisiert werden können. Ebenso werden Einsparmaßnahmen aufgegriffen soweit sie mit einer geringen Umsetzungsintensität verbunden sind. Im Effizienzscenario erfolgt über die forcierte Energieeinsparung hinaus auch ein gegenüber Status Quo-Bedingungen stärkerer Ausbau der erneuerbaren Energien, wobei in erster Linie diejenigen Optionen ausgeschöpft werden, die heute schon wirtschaftlich sind bzw. von denen in naher Zukunft ein Überschreiten der Wirtschaftlichkeitsschwelle zu erwarten ist. Wesentliche strukturverändernde Maßnahmen bleiben im Effizienzscenario unberücksichtigt.

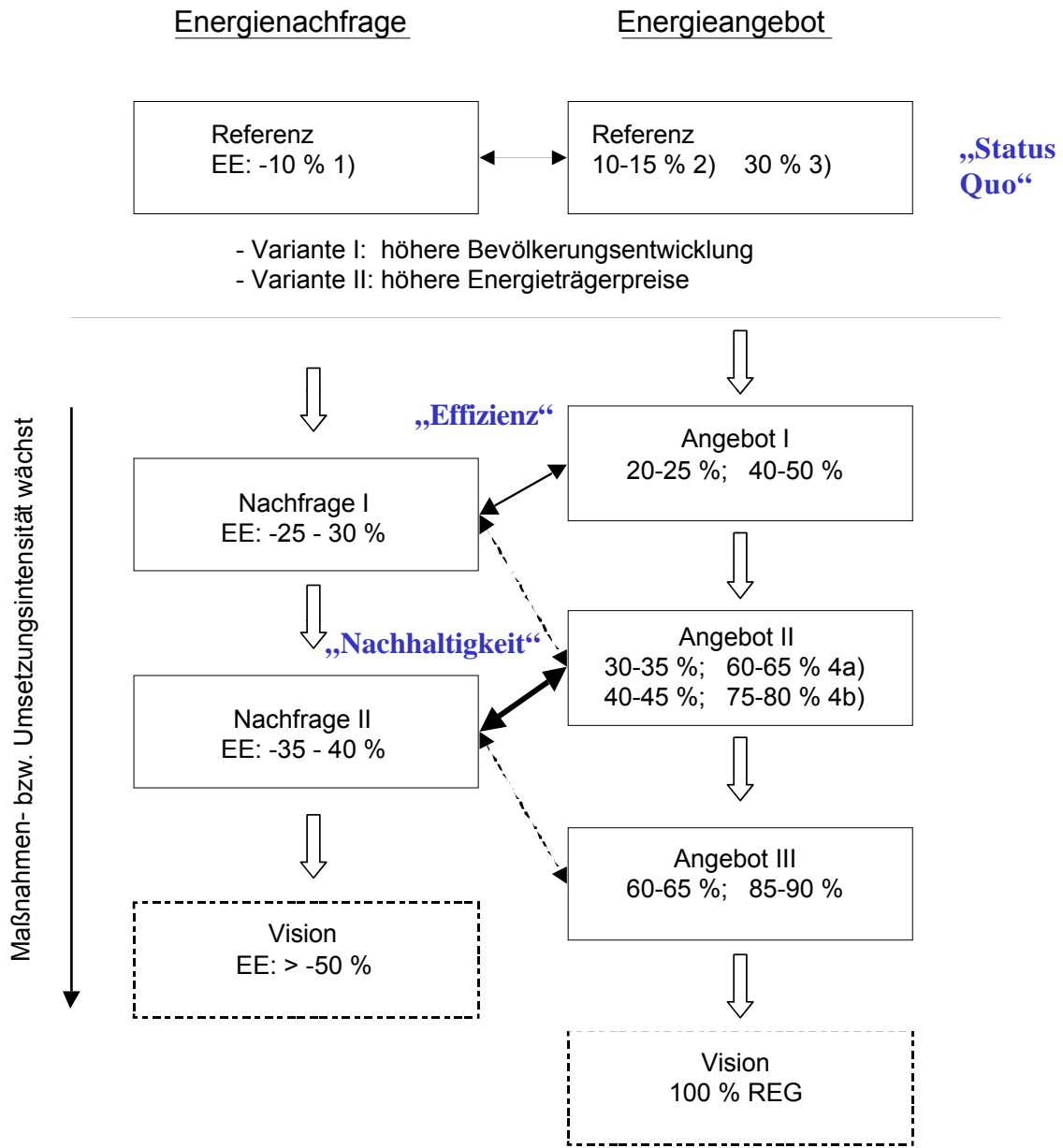
Im **Nachhaltigkeitsszenario** wird schließlich ein Zukunftspfad beschrieben, der die maßgeblichen Ziele einer nachhaltigen Entwicklung des Energiesystems erfüllt. Dies gilt insbesondere für die Verminderung der Treibhausgasemissionen (Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 80% bis 2050 gegenüber 1990) als Leitindikator. Auch die weitergehenden Indikatoren und Zielsetzungen werden soweit möglich betrachtet und mögliche Konflikte zwischen Zielfeldern aufgezeigt. Im Vergleich zum Effizienzscenario wird unterstellt, dass zur beschleunigten und intensiveren Ausschöpfung der Effizienzpotenziale deutlich weitergehende Politikmaßnahmen mit höherer Umsetzungsintensität aufgegriffen werden. Durch die mit diesem Entwicklungspfad verbundenen technischen und strukturellen Veränderungen kommt es bei den Verbrauchern zudem zu einem Bewusstseins- und Wertewandel, der zu einer höheren Sensibilisierung der Verbraucher hinsichtlich der Nutzung von Energie führt. Schließlich konzentriert sich der Ausbau erneuerbarer Energien in diesem Szenario auf die Mobilisierung aller Technologien und Energiequellen, die strukturell und ökologisch verträglich in das sich wandelnde Energiesystem integriert werden können.

Die Annäherung an das Nachhaltigkeitsszenario erfolgt durch die Entwicklung spezifischer **Bausteine für die Nachfrage- und Angebotsseite** des Energiesystems. Sie sollen belastbar aufzeigen, wie man sich der Vision einer nachhaltigen Energiewirtschaft schrittweise technisch und strukturell nähern kann. Hierfür wird der Begriff der Umsetzungsintensität verwendet, der als ein Maßstab für die Tiefe und Breite der erforderlichen Veränderungen sowie die Intensität der diesen entgegenstehenden Hemmnissen verstanden werden kann. Die Umsetzungsintensität steigt in den Szenariobausteinen von moderat (Baustein I) auf engagiert (Baustein II) bis anspruchsvoll (Baustein III) an. Aus Gründen der Übersicht sind in **Abbildung 5** nur drei maßgebliche Bausteine aufgeführt, obwohl diesen weitere Detailbausteine zugrunde liegen. Das Bausteinkonzept eignet sich auch dazu, durch das iterative Kombinieren der einzelnen Elemente aufzuzeigen, ob und ggf. wo bei der Erfüllung der vorgegebenen Minderungsziele noch Freiheitsgrade und Auswahlmöglichkeiten bestehen.

In den Szenario-Bausteinen sind zum einen Maßnahmen gebündelt, die eher der Nachfrageseite zuzuordnen sind (Nachfrage I und II) und zum anderen Maßnahmen, die primär auf

# Szenarienkonzeption

## Bausteine für Effizienz- und Nachhaltigkeitsszenarien



- 1) Reduktion des absoluten Endenergieverbrauchs gegenüber 2000
- 2) Anteil REG am Endenergieverbrauch
- 3) CO<sub>2</sub>-Minderung gegenüber 1990
- 4) a) bei Verknüpfung mit Nachfrage I b) bei Verknüpfung mit Nachfrage II

**Abbildung 5: Darstellung der in der Untersuchung betrachteten Szenarien/Szenariobausteine**

der Angebotsseite wirksam sind (Angebot I bis III). Die vollständige Trennung der Nachfrage- und Angebotsseite ist allerdings nur scheinbar. Bei der Konzeption der verschiedenen Bausteine ist bereits auf ein hohes Maß an Kompatibilität zu achten. So stehen beispielsweise effiziente dezentrale Systeme der Wärmebereitstellung (z. B. Brennwertkessel, Gas-Wärmepumpen) auf der Nachfrageseite in Konkurrenz zu Nahwärmelösungen, welche für einen verstärkten Einsatz von Solar- und Erdwärme wesentlich sind und hier der Angebotsseite zugeordnet werden. Zwischen den verschiedenen nachfrage- und angebotsseitigen Bausteinen sind deshalb von vornherein sinnvolle Kompromisse zu finden. Weitere Wechselwirkungen resultieren aus den erforderlichen ökonomischen Betrachtungen. Steigen angebotsseitig beispielsweise die Stromgestehungskosten, führt dies auf der Nachfrageseite zu einer beschleunigten Umsetzung von Effizienzpotenzialen.

Die ausgewählten Szenarien sind durch bestimmte Bausteinkombinationen gekennzeichnet. Die Kombination Nachfrage II und Angebot II etwa führt zu einer etwa 80%igen Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen und kann daher als Nachhaltigkeitsszenario definiert werden. Dagegen bildet sich das geforderte Effizienzzenario aus der Kombination Nachfrage I und Angebot I. Alle weiteren Bausteinkombination dienen dem Illustrieren von Zwischenschritten (Nachfrage I und Angebot II) oder von weitergehenden Entwicklungsschritten. So kommt die Kombination Nachfrage II und Angebot III dem Idealbild der Energiewirtschaft bereits sehr nahe, wie sie sich am Ende dieses Jahrhunderts präsentieren könnte. Führt man beide Stränge weiter in Richtung der Bausteine „Vision“, so lässt sich eine hocheffiziente Energieanwendung, die möglicherweise verbunden ist mit anderen, positiv auf die Energienachfrage wirkenden Lebensstilen (z. B. verstärkter Kauf regionaler Produkte, ökologischer Landbau, vernetzte Mobilität), mit einem zu 100% auf erneuerbaren Energien aufbauenden Energieangebotssystem verknüpft. Die hier beschriebene Methodik ist damit darauf ausgerichtet mit engagierten aber „realistischen“ Szenarien unter Berücksichtigung ihrer Umsetzungserfordernisse die Vision einer nachhaltigen Energiewirtschaft glaubhaft abzuleiten und darzustellen. In der Abbildung sind drei wesentliche Kenngrößen aufgeführt. Nachfrageseitig ist es der bis zum Zieljahr 2050 zu erwartende

Rückgang des Endenergieverbrauchs, während angebotsseitig für den gleichen Zeitraum der Anteil erneuerbarer Energien und die aus der Verknüpfung mit dem zugehörigen Angebotbaustein resultierende CO<sub>2</sub>-Minderung gegenüber dem Ausgangsjahr 1990 dargestellt sind.

### 3.2 Eckdaten der Szenarien

Die Entwicklung des Primärenergieverbrauchs und der resultierenden CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Status Quo Entwicklung sind in **Abbildung 6** in der Übersicht dargestellt. Danach reduziert sich der CO<sub>2</sub>-Ausstoss unter Status Quo Bedingungen nur geringfügig von rund 860 Mio. t in 1998 auf 847 Mio. t im Jahr 2020. Im gleichen Zeitraum geht der Primärenergieverbrauch um 4,6 % zurück. Mit einem gegenüber dem Jahr 1990 zu erwartenden Rückgang der CO<sub>2</sub>-Emissionen von lediglich 14,1 %, bleibt die Entwicklung im Status Quo Szenario weit von den national bzw. international gesteckten Klimaschutzzielen entfernt. Im Referenzszenario der Enquête-Kommission ergeben sich mit knapp 830 Mio. t

CO<sub>2</sub> für das Jahr 2020 leicht geringere Emissionswerte, bis zum Jahr 2050 verringert sich der CO<sub>2</sub>-Ausstoß trendbedingt auf ca. 701 Mio. t, was einer Minderung von knapp 29 % gegenüber dem Jahr 1990 entspricht.

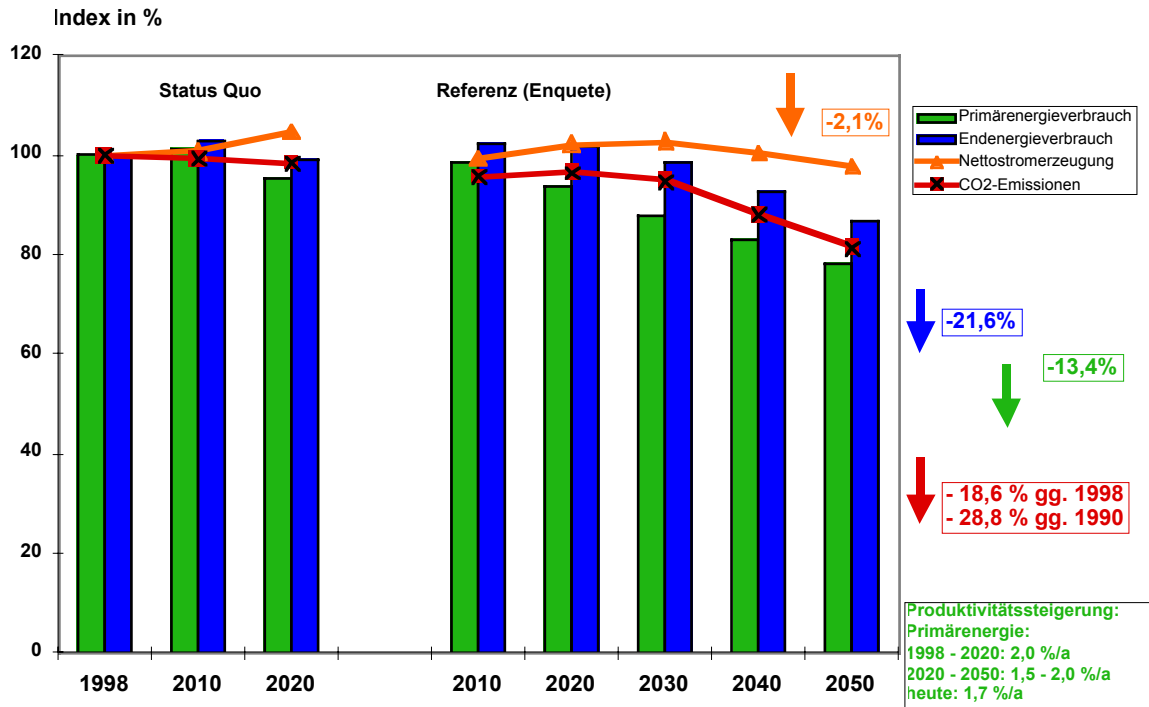


Abbildung 6: Entwicklung der wesentlichen Kenngrößen in der Status Quo Entwicklung

Wesentliche Eckdaten in Indexform (1998 = 100) für die von den Status Quo Bedingungen abweichenden Szenarien zeigt **Abbildung 7** für das Effizienzzenario (7a) und für das Nachhaltigkeitsszenario (7b). Während sich unter Status Quo-Bedingungen der CO<sub>2</sub>-Ausstoß bis 2020 nur geringfügig um 2% und der Primärenergieverbrauch um 4,6% reduziert, zeigen sich in diesen Szenarien deutliche Veränderungen gegenüber dem heutigen Zustand.

Bereits im **Effizienzzenario** wird mit einem Rückgang der CO<sub>2</sub>-Emissionen um rund 30% (40%) bis zum Jahr 2020 (2030) gegenüber 1998 ein wesentlicher Schritt in die Richtung einer klimaverträglicheren Energieversorgung gemacht. Langfristig erhöht sich das Minderungspotenzial seit 1998 auf 56% (61% gegenüber 1990), wenn die Maxime effizienter Einsatz und Bereitstellung von Energie sich flächendeckend durchsetzt. Mit einem Mittelwert von 2,5%/a (Zeitraum 1998 bis 2050) liegt die jährliche Produktivitätssteigerung des Primärenergieeinsatzes deutlich oberhalb der im Trend zu erwartenden Werte (2,0%/a) und übertrifft auch die in der Vergangenheit erreichten Steigerungsraten (1,7%/a). Dies bewirkt, dass der Primärenergieverbrauch bis 2050 - trotz einer Verdoppelung des Bruttoinlandsprodukts (BIP) - um rund 44% und der Endenergieverbrauch um 35% gegenüber dem Ausgangsniveau des Jahres 1998 zurückgeht. Die Produktivität des Energieeinsatzes erhöht sich in der betrachteten Zeitspanne damit um etwas mehr als den Faktor 3,7. Die Stromproduktivität (BIP/kWh Stromeinsatz) verdoppelt sich, so dass das

Effizienzscenario zu einer völligen Entkopplung des Stromverbrauch vom Wachstum des BIP führt.

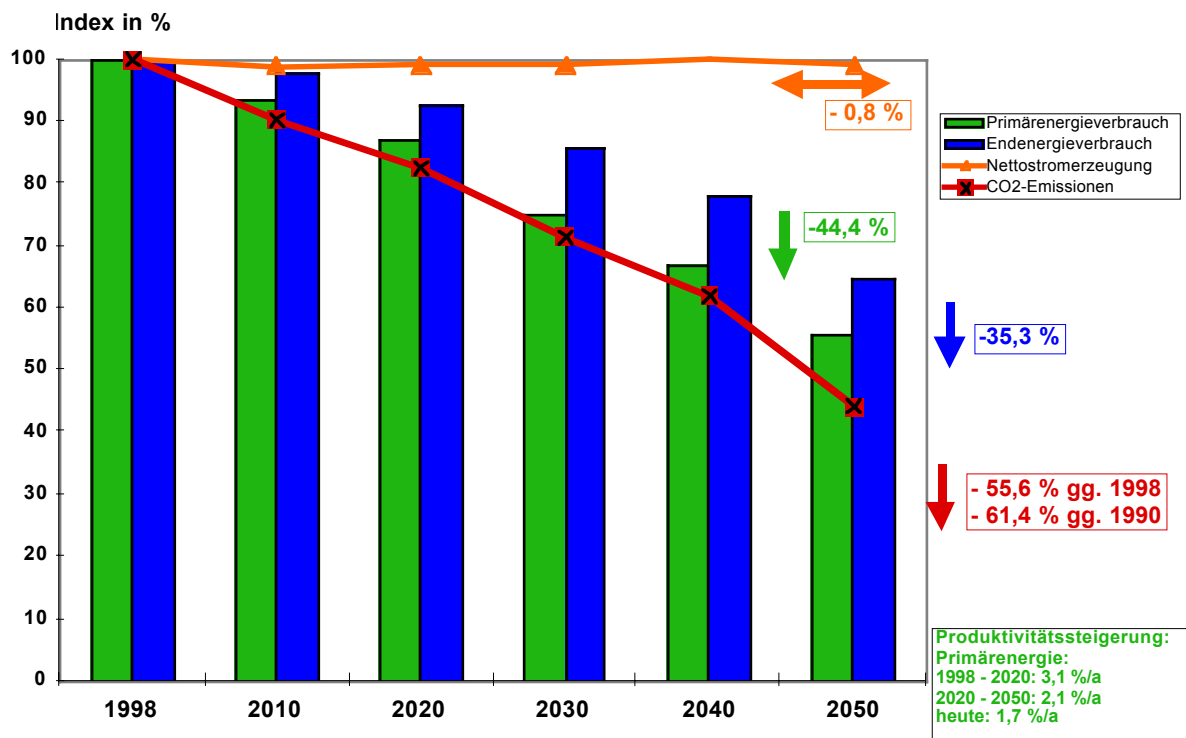
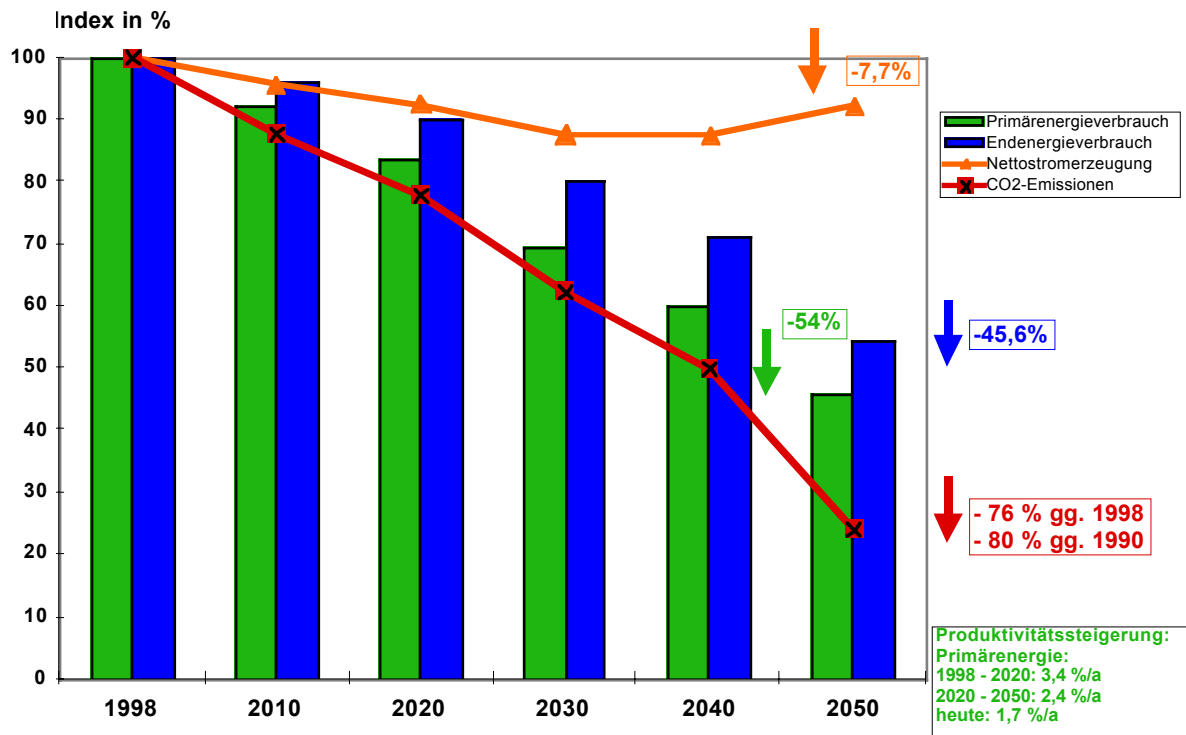


Abbildung 7a: Entwicklung der wesentlichen Kenngrößen im Szenario Effizienz im Zeitverlauf

Von der aus Nachhaltigkeitsgesichtspunkten langfristig anzustrebenden Zielsetzung für die Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes um 80% ist aber auch das Szenario Effizienz noch deutlich entfernt. Eine derartige Entwicklung wird durch das Szenario **Nachhaltigkeit** skizziert (Abbildung 7). Der Primärenergieverbrauch ist gegenüber dem Szenario Effizienz noch einmal um rund ein Siebtel reduziert und sinkt bis 2050 auf 46% des Wertes von 1998. Das langfristige jährliche Mittel der Energieproduktivitätssteigerung liegt mit ca. 2,8%/a noch einmal um 0,3 Prozentpunkte höher als im Effizienzscenario. Dies ist nur mit einer deutlichen Verstärkung des energiepolitischen Engagements (gerade in Bezug auf den häufig vernachlässigten Bereich der Energienutzung bei den Endverbrauchern) im Verbund mit einem insgesamt gesteigerten Energiebewusstsein zu realisieren. Das betrifft auch der Strombereich, die Nettostromerzeugung reduziert sich bis 2030 um 12%. Während die Stromnachfrage danach weiter sinkt, steigt die Nettostromerzeugung infolge der ab 2030 einsetzenden elektrolytischen Wasserstoffherzeugung wieder an. Obwohl jedoch in 2050 eine zusätzliche Strommenge von 57 TWh/a dafür benötigt wird, bleibt die Nettostromerzeugung auch dann noch um 7,7% unter dem heutigen Wert.



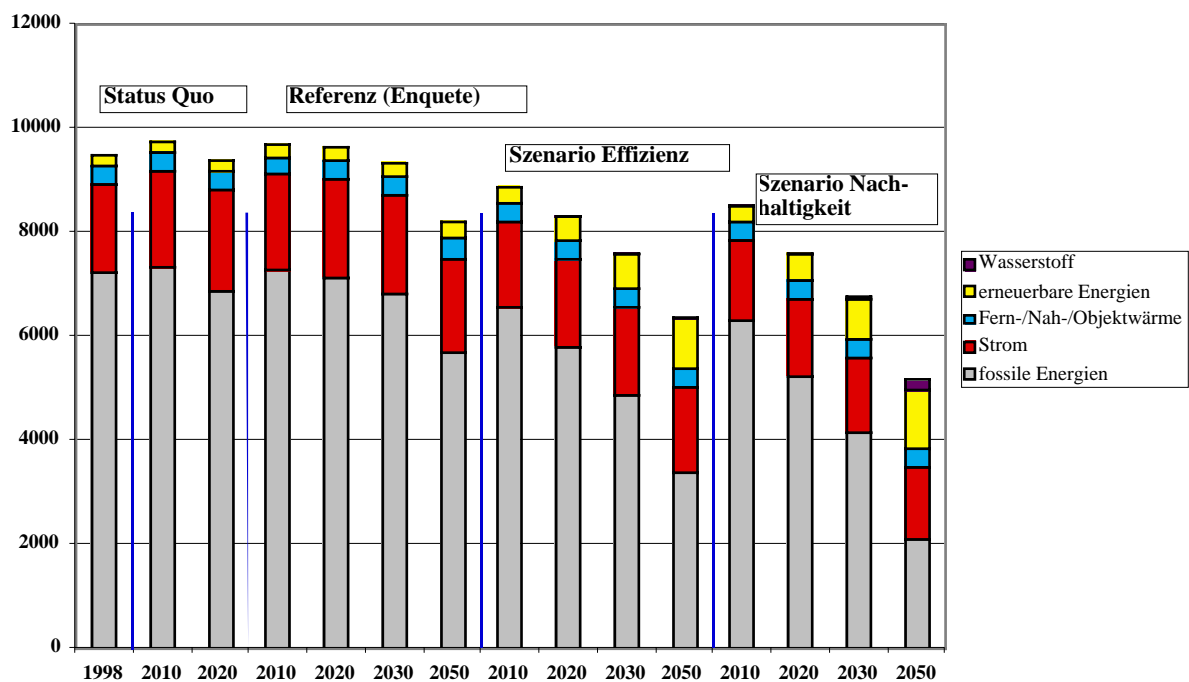
**Abbildung 7b: Entwicklung der wesentlichen Kenngrößen des Nachhaltigkeitsszenarios im Zeitverlauf**

Auch beim Blick auf die Entwicklung des Endenergieeinsatzes (**Abbildung 8**) zeigen sich signifikante Unterschiede im Vergleich der unterschiedlichen Zukunftspfade. Unter Status Quo-Bedingungen verbleibt der Endenergieverbrauch bis zum Jahr 2020 nahezu auf dem Niveau des Jahres 1998. Durch verbraucherseitige Energieproduktivitätssteigerungen kann damit gerade die zunehmende Nachfrage nach Energiedienstleistungen kompensiert, aber kein nachhaltiger Einsparerfolg realisiert werden. Der auch im Status Quo Szenario zu beobachtende Rückgang des Primärenergieverbrauchs ist also weitgehend auf Maßnahmen im Bereich der Energiebereitstellung, vor allem bei den stromerzeugenden Kraftwerken, zurückzuführen. Im Endenergeträgermix zeigen sich in den im Energiereport III ausgewiesenen 20 Jahren nur geringfügige Veränderungen. Die Bedeutung von Strom nimmt zu Lasten der fossilen Energieträger leicht zu. Fern- und Nahwärme sowie die erneuerbaren Energien kommen kaum über ihre bisherigen vergleichsweise geringen Anteile hinaus. Bei einer Fortschreibung der Entwicklung unter Status Quo Bedingungen bis zum Jahr 2050 kann nach aktuellen Analysen der Enquête-Kommission „Nachhaltige Energieversorgung“ nur mit einem weiteren Rückgang des Endenergieeinsatzes um weniger als 15% gerechnet werden. Erneuerbare Energien spielen in diesem Szenario auch langfristig nur eine vernachlässigbare Rolle.

Im Szenario Effizienz liegt ein deutlich stärkeres Gewicht auf der Durchführung von Energieeinsparmaßnahmen bei den Endverbrauchern in Industrie, Gewerbe und privaten Haushalten. Bis zum Jahr 2020 führt dies bereits zu einem Rückgang des Endenergieeinsatzes von mehr als 14%. Am Ende des Betrachtungszeitraums liegt die Nachfrage nach Endenergie um rund ein Drittel niedriger als heute, dies entspricht für die gesamte be-

trachtete Zeitspanne einem jährlichen Rückgang von im Mittel mehr als 0,8%. Gleichzeitig geht der Anteil der fossilen Energieträger, von denen Stein- und Braunkohle auch unter Status Quo Bedingungen bereits deutlich an Bedeutung verlieren, an der Deckung des Endenergiebedarfs von heute mehr als 76% über 69% im Jahr 2020 langfristig auf knapp 51% zurück. Die hierdurch entstehende Lücke wird besonders durch einen relativ gesehen vermehrten Stromeinsatz (absolut gesehen bleibt der Strombedarf über den gesamten Betrachtungszeitraum nahezu auf einem konstanten Niveau) und einem zunehmenden Beitrag von Fern-/Nah- und Objektwärme sowie den erneuerbaren Energien geschlossen. Vor allem die Nahwärmebereitstellung auf der Basis von Solarkollektoren und mit Biomasse befeuerten Heiz- und Heizkraftwerken nimmt ebenso deutlich zu wie die Bereitstellung von Strom und Wärme in dezentral bei den Verbrauchern installierten kleinen Brennstoffzellen.

Endenergie in PJ



**Abbildung 8: Entwicklung des Endenergieeinsatzes im Vergleich der Szenarien (Status Quo nach Energiebericht III von Prognos/EWI)**

Unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten reichen diese endenergieseitigen Anstrengungen aber noch nicht aus, die ehrgeizigen Ziele zu erfüllen. Die Einsparbemühungen müssen weiter forciert werden, so dass der Endenergieverbrauch gegenüber dem Szenario Effizienz noch einmal um knapp 16% bis zum Jahr 2050 gesenkt werden kann. Der wesentliche Grundstein für eine erfolgreiche Umsetzung der Nachhaltigkeitsziele bei der Energieeinsparung ist dabei bereits in den ersten Jahrzehnten zu legen. Im Vergleich zum Status Quo Szenario ist allein bis zum Jahr 2020 ein Rückgang des Endenergieeinsatzes von mehr als 19% zu realisieren. Dies ist nur möglich, wenn die Einsparbemühungen bei allen

Energieträgern und in allen Verbrauchssektoren greifen und zu einem neuen Schwerpunkt der Energiepolitik werden.

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

Elektrischer Strom hat seinen Anteil am Endenergieeinsatz von Haushalten, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen, Industrie und Verkehr in den letzten Jahrzehnten kontinuierlich gesteigert. Wenn auch die Zuwachsraten in der Vergangenheit deutlich abgenommen haben, wird unter den Bedingungen des Status Quo-Szenario 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.

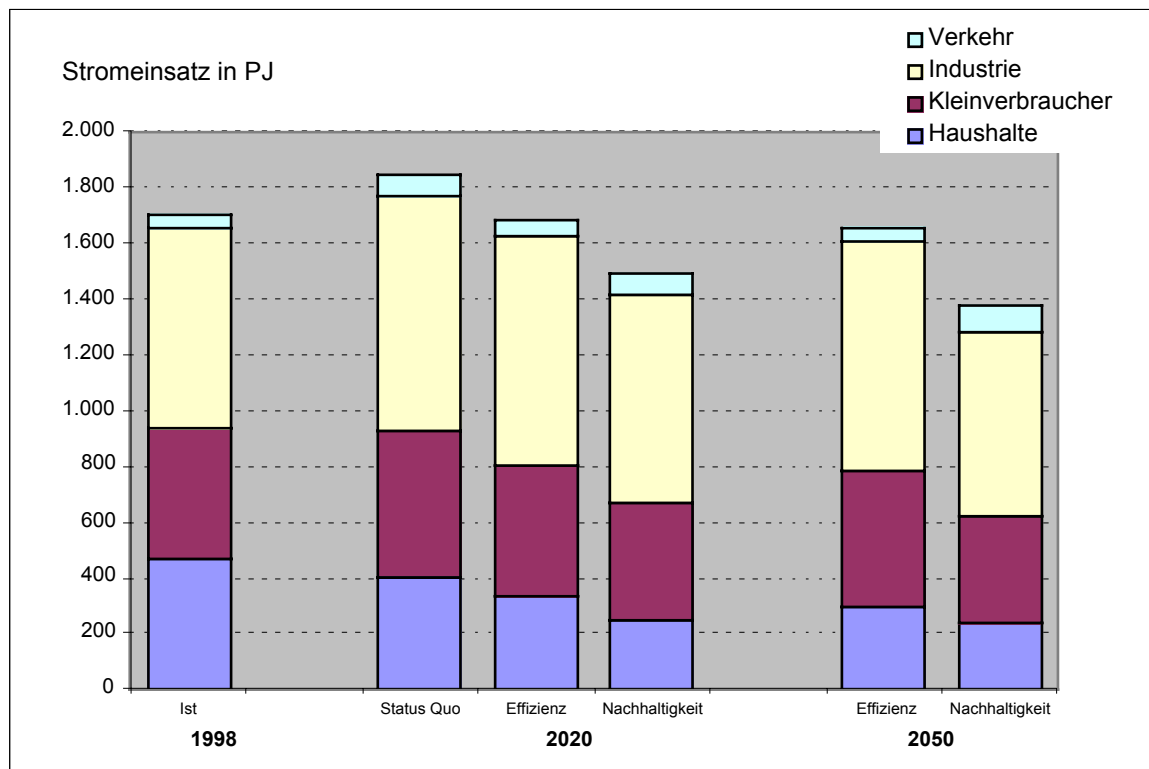
Kehrseite der vielseitigen und einfachen Verwendungsmöglichkeit von elektrischer Energie ist die relativ aufwändige, kostspielige und derzeit emissionsintensive Bereitstellung des Energieträgers Strom. Bei einem Anteil des Stroms am Endenergieeinsatz in Deutschland von derzeit 18% entfallen mehr als 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, eine angepasste Dimensionierung und teilweise sogar der mögliche Verzicht auf die entsprechende Anlage.
- Ersatz von elektrischer Energie durch andere Energieträger in Anwendungsbereichen, die nicht „stromspezifisch“ sind, also z.B. die Elektrodirektheizungen, die 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 verbrauchsintensiver Geräte wie z.B. des elektrischen Wäschetrockners sowie durch Vermeidung von Teillastnutzungen.

Alle drei Strategieelemente werden zur Gestaltung eines künftigen nachhaltigen Energiesystems benötigt werden, und dies in allen stromverwendenden Sektoren (**Abbildung 9**). 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.



**Abbildung 9: Entwicklung der Stromnachfrage im Szenariovergleich für die Jahre 2020 und 2050**

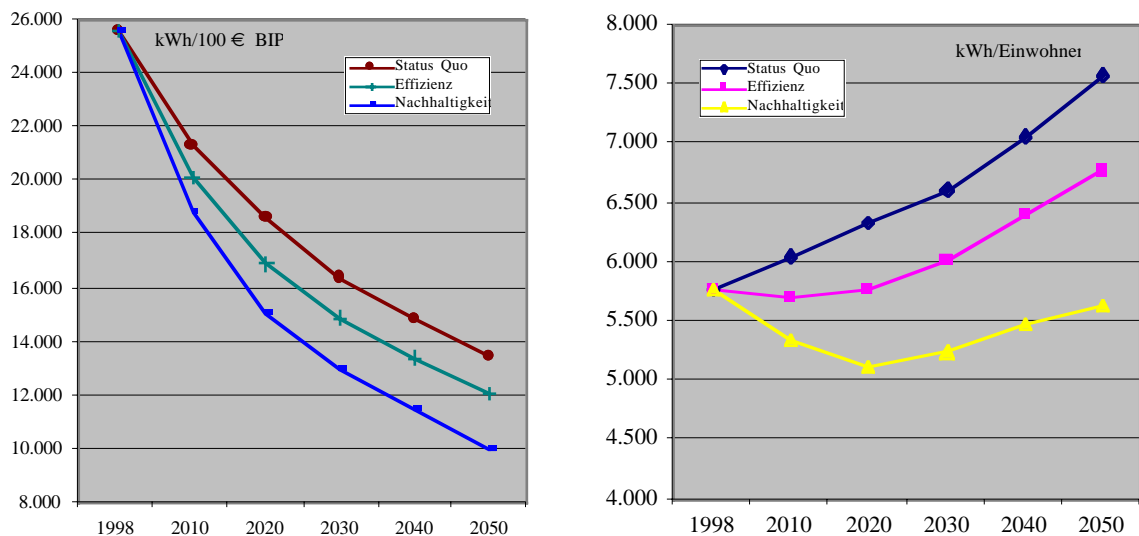
In der Status Quo-Entwicklung steigt die Bedeutung des Stroms als Endenergieträger weiter an. Im Jahr 2020 erreicht der Stromeinsatz über 1.800 PJ/a (500 TWh), was mit Zuwachsraten von rund 0,4% pro Jahr einem etwa halb so schnellen Anstieg wie in den vergangenen 20 Jahren entspricht. Die größten Zuwächse entfallen dabei auf Industrie und Kleinverbraucher. Durch die dynamische Verbrauchsentwicklung in diesen Bereichen werden die in diesem Zeitraum realisierten Einsparungen in den Haushalten deutlich überkompensiert.

Im Szenario Effizienz kann der Anstieg des Stromeinsatzes gestoppt und etwa auf dem heutigen Niveau stabilisiert werden. Dahinter verbergen sich allerdings deutliche Strukturveränderungen. Vor allem im Bereich der Haushalte kann im Effizienzscenario unter anderem durch ein Substitutionsprogramm für elektrische Nachtspeicherheizungen sehr viel elektrischer Strom eingespart werden. Dies reicht aus, um die noch leichten Zuwächse in den übrigen Verbrauchergruppen zu kompensieren.

Im Szenario Nachhaltigkeit wird der derzeitige Wachstumstrend des Stromverbrauchs umgekehrt werden. Über den gesamten Zeitraum bis 2050 sinkt er um durchschnittlich 0,4% pro Jahr. Hierzu tragen neben zusätzlichen Einsparungen im Bereich der Haushalte nun auch Gewerbe, Handel, Dienstleistungen sowie die Industrie mit signifikanten Beiträgen bei. Im Verkehr dagegen kommt es aufgrund des zeitgleichen Ausbaus schienenge-

bundener (elektrischer) Verkehrsmittel in beiden Szenarien zu einem steigenden Stromverbrauch.

Das Ausmaß der Produktivitätssteigerung im Strombereich wird erst deutlich im Vergleich mit dem Wachstum der Wirtschaftsleistung in den nächsten 50 Jahren (**Abbildung 10**). Im Status Quo-Szenario erhöht sich die Produktivität des Stromesinsatzes 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 unter Status-Quo-Bedingungen im Jahr 2020 mit einem um ein Viertel geringeren Einsatz elektrischer Energie bereitgestellt werden als 1998. Die größten Produktivitätssteigerungen resultieren im Szenario Nachhaltigkeit mit einer Verringerung der Stromintensität von insgesamt rund 60% über den gesamten Betrachtungszeitraum bis zum Jahr 2050. Dagegen steigt die Verwendung von Strom je Einwohner im Zeitverlauf im Status Quo- aber auch im Effizienzzenario an. Nur 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.



**Abbildung 10: Entwicklung des spezifischen Stromesinsatzes (kWh/ 100 DM BIP und kWh/Einwohner) im Szenariovergleich**

## 5 Stromversorgung der Zukunft: dezentral und großräumig vernetzt, regenerativ und effizient

### 5.1 Von der Liberalisierung zum Nachhaltigkeitsszenario

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>3</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 etwa 84% des nachgefragten Stroms, lediglich rund 14% stammen aus der wesentlich effizienteren, zumeist in kleineren Einheiten realisierten KWK und erneuerbare Energien haben mit 6% Anteil - mit Ausnahme der Wasserkraft und der Windkraft - noch geringe Bedeutung (**Abbildung 11, linker Balken**). 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 die Verteilungsnetze und 80% der Stromerzeugung kontrollieren, wodurch die Gefahr besteht, dass die Liberalisierung durch Oligopolbildung unterlaufen wird.
- Stromerzeugung und -verteilung sind noch auf zentrale Strukturen ausgelegt; Primärenergieträger zur Stromerzeugung sind hauptsächlich Kernenergie und Kohlen.
- Neue 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.
- Der bevorstehende Wiederanstieg der Strompreise nach einem deutlichen Preisverfall kurz nach der Liberalisierung zeichnet sich ab.

Der durch die Liberalisierung eingeleitete Umbruch birgt in sich die Chance, Entwicklungen in Richtung einer nachhaltigen Stromversorgung einzuleiten. Die wesentlichen Strategieelemente für die dazu erforderliche Umgestaltung der Stromversorgung sind

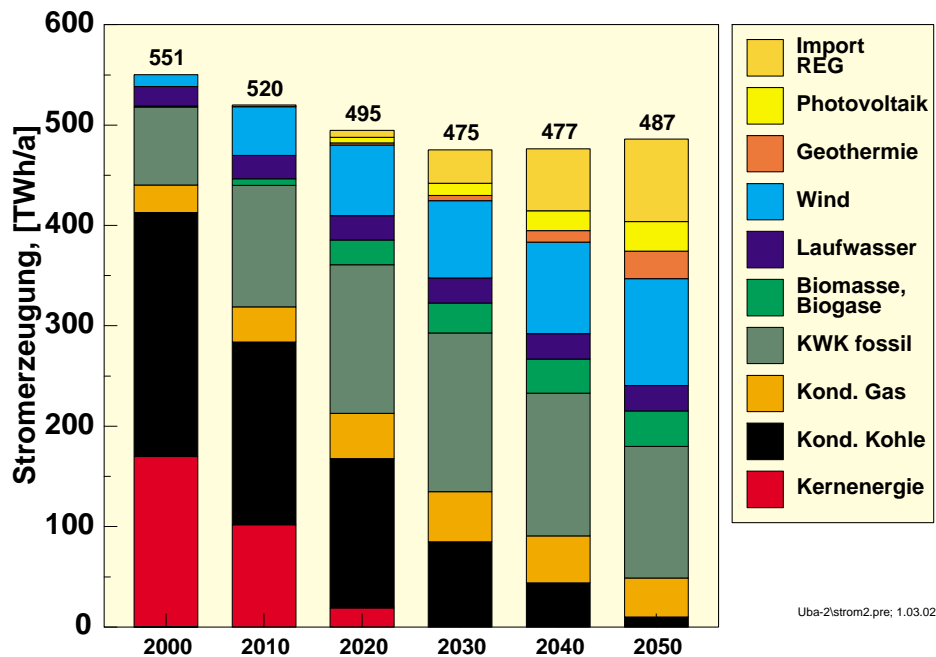
- der deutliche Ausbau der gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung (KWK) durch die alten Marktplayer (vornehmlich Modernisierung und Ersatz im Kraftwerksbereich und bei der Industrie) aber auch durch neue Akteure,
- eine Verringerung des Anteils ausschließlich stromerzeugender, fossil gefeuerter Kraftwerke bei gleichzeitiger Erhöhung des Stromerzeugungswirkungsgrades sowohl bestehender Anlagen als auch durch den Neubau besonders effizienter Kraftwerke,

---

<sup>3</sup> Seit dem Zusammenschluss von VEAG, BEWAG und HEW mit der schwedischen Vattenfall bestehen derzeit nur noch 4 Verbundunternehmen.

- die Substitution kohlenstoffreicher Brennstoffe für die Stromerzeugung (z. B. Stein- und Braunkohle) durch kohlenstoffärmere Energieträger (z. B. Erdgas)<sup>4</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 Entwicklung der Szenarien, insbesondere dem Nachhaltigkeitsszenario (**Abb. 11**) wieder. Es führt innerhalb von 50 Jahren zu einer völligen Veränderung der Stromversorgungsstruktur.



**Abbildung 11: Bruttostromerzeugung im Nachhaltigkeitsszenario (einschließlich des Strombedarfs für die Wasserstoffherzeugung ab 2030 (in 2050 57 TWh/a)**

Das letzte Kernkraftwerk geht im Nachhaltigkeitsszenario in der Mitte der dritten Dekade dieses Jahrhunderts außer Betrieb, die Anteile fossiler Kondensationskraftwerke werden

<sup>4</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 energieverbrauchsinintensiv 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 (bis wann diffundiert das eingelagerte CO<sub>2</sub> wieder an die Oberfläche) und ökologischen Folgen noch unbekannt.

bis 2050 mit dann noch 13% ihren Beitrag stark reduziert haben, im Wesentlichen verbleiben schnell regelbare, neue gasgefeuerte GuD-Kraftwerke, welche effizient sind und niedrige Fixkosten besitzen. Die Kraft-Wärme-Kopplung mit HKW, dezentralen BHKW einschließlich Mikrogasturbinen, Stirlingmotoren und Brennstoffzellen hat sich mit 38% Anteil (185 TWh/a) bis 2030 mehr als verdoppelt, 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, Hot Dry Rock Geothermie, Biomasse) als auch Importquellen (Wasserkraft, Geothermie, Wind, Solarthermische Kraftwerke) zum Einsatz kommen. Dabei wird das Konzept der virtuellen Kraftwerke eingesetzt, 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. Zusätzlich zur Deckung der Endenergienachfrage nach Strom wird, beginnend in 2030, weitere Stromerzeugungskapazität aus erneuerbaren Energien für die Erzeugung von Wasserstoff, der insbesondere im Verkehr und als Beimischung in das Erdgasnetz Verwendung findet, bereitgestellt, im Jahr 2050 sind dies insgesamt 57 TWh/a.

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 Grundlage darstellen. Wesentlich für einen 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 Kriterien technische Reife und Nähe zur marktwirtschaftlichen Wettbewerbsfähigkeit. Dies favorisiert die Biomasse und die Windenergie und die restlichen Potenziale der Wasserkraft. Potenzialseitige Restriktionen sind, außer bei der Wasserkraft und in windhöffigen Gebieten des Küstenbereichs noch nicht zu erwarten. Hinzu tritt die Notwendigkeit, alle anderen Technologien aus dem Bereich erneuerbare Energien wenigstens in dem Maße in den Markt einzuführen, dass sie nach 2010 in energiewirtschaftlich relevantem Maße an der zukünftigen Strombedarfsdeckung teilnehmen können. Dies betrifft die Photovoltaik, die geothermische Stromerzeugung (Errichtung von HDR-Demonstrationsanlagen) und den Bau einer größeren Anzahl solarthermischer Kraftwerke zur lokalen Stromversorgung in den Standortländern in Südeuropa und Nordafrika.

Im Nachhaltigkeitsszenario überschreitet bis zum Jahr 2050 keiner der Energieträger einen Anteil an der Energieerzeugung von 30%, d.h. die Energieversorgung wird von keiner der Energiequellen übermäßig dominiert. Der größte Anteil liegt mit etwa 30% beim Erdgas, es ist zu diesem Zeitpunkt bereits aber wieder rückläufig. Den größten Beitrag erneuerbarer Energien leistet mit 19% die Windkraft, gefolgt vom Stromimport aus solarthermischen

Kraftwerken (11%) und der bis dahin vollständig ausgebauten heimischen Wasserkraft (8,5%). Alle restlichen Quellen sind mit maximal je 4 – 5% an der Nettostromerzeugung beteiligt. Damit bewegen sich insbesondere die Anteile der fluktuierenden Quellen Wind und Photovoltaik in einem Rahmen, der schon heute als technisch beherrschbar und unkritisch angesehen wird.

Während sich unter Status Quo-Bedingungen die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen der Stromerzeugung wegen des sukzessiven Ausstiegs aus der Kernenergie nicht verringern lassen, sinken diese wegen des vollständigen Umbaus der Stromversorgung im Effizienz- und Nachhaltigkeitsszenario kontinuierlich. In Ersterem 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.

## 5.2 Gibt es genügend Spielraum für Veränderungen?

Veränderungen sind immer dann möglich, wenn Ersatzmaßnahmen anstehen. Im deutschen Kraftwerkspark ist dies ganz massiv nach 2010 der Fall. Unter der Annahme einer gleichbleibenden Auslastung der einzelnen Kraftwerksarten ergibt sich eine Abnahme der durch den derzeitigen Kraftwerksbestand bereitstellbaren Strommenge von derzeit 525 TWh/a Bruttostromerzeugung (ohne erneuerbare Energien) auf 320 TWh/a im Jahr 2010 und auf 150 TWh/a im Jahr 2020 (**Abbildung 12**). Das letzte „Altkraftwerk“ wird im Jahr 2040 stillgelegt. Die für eine Stromversorgung mit hohem Anteil erneuerbarer Energien wenig geeignete Grundlastkapazität auf fossiler und nuklearer Basis ist bis 2030 nahezu abgebaut. Neuinvestitionen in derartige Kraftwerke (Braunkohle, große Steinkohle-Kondensationskraftwerke) werden im Nachhaltigkeitsszenario nur in wenigen Ausnahmen erfolgen. Trotz der zeitgleich rückläufigen Stromnachfrage entstehen ausreichende Spielräume, bei anstehenden Neuinvestitionen sowohl die Erfordernisse einer wachsenden Einspeisung von Strom aus erneuerbaren Energien als auch den verstärkten Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung zu berücksichtigen. Diese „Deckungslücke“ (ohne Zubau erneuerbarer Energien) beträgt je nach Annahmen über die Lebensdauer der einzelnen Kraftwerke im Jahr 2010 bereits rund 70 bis 120 TWh/a und wächst bis 2030 auf maximal 350 TWh/a. Neben der Ablösung der Kernenergie, die heute noch einen Stromerzeugungsbeitrag leistet von mehr als 150 TWh, kommt dabei vor allem dem Ersatz der Steinkohlekraftwerke (Ersatz von 120 TWh bis 2030) und Braunkohlekraftwerke (Ersatz von 80 TWh bis 2030) eine entscheidende Bedeutung zu. Bereits im Jahr 2010 entspricht dies einer Kraftwerksleistung von 10–20 GW.

Als Fazit kann festgehalten werden, dass für einen konsequenten und forcierten Ausbau einer Stromversorgung auf der Basis erneuerbarer Energien bis in hohe Anteile über 50% Spielräume bestehen. Dabei ist die Beurteilung der „Qualität“ von Strom aus erneuerbaren Energien nicht an die heutige Kraftwerksstruktur und deren Erfordernisse gekoppelt. Im Zuge von Ersatz- und Neuinvestitionen wandelt sich auch der konventionelle Kraftwerks-

park und kann in einem weiten Bereich so gestaltet werden, dass zusammen mit den Anlagen auf der Basis erneuerbarer Energien eine jederzeit sichere, effiziente und auch ökonomisch günstige Systemlösung entstehen kann. Diese Chance darf nicht vertan werden. Langfristig wird der Bedarf an reinen Grundlastkraftwerken im Zuge des Ausbaus erneuerbarer Energien stark zurückgehen und es werden flexible Anlagen mit geringen Fixkosten und kleineren Leistungen (gasgefeuerte GuD-Kraftwerke) favorisiert. Diese aus der Sicht des Ausbaus erneuerbarer Energien wünschenswerten Strukturänderungen sind aber auch weitgehend mit den durch den liberalisierten Strommarkt gesetzten Rahmenbedingungen (Forderung nach kurzen Amortisationszeiten und entsprechend spezifisch geringen Investitionskosten) kompatibel.

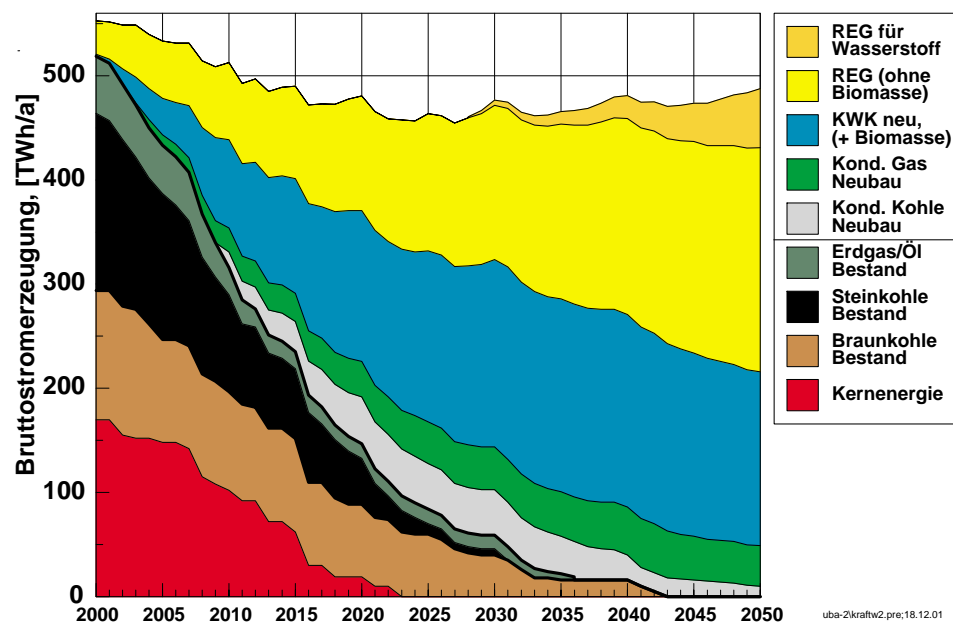


Abbildung 12: Beitrag des derzeitigen Kraftwerksbestandes zur Stromerzeugung und Neubau fossiler Kondensationskraftwerke, KWK-Anlagen und erneuerbarer Energien bis zum Jahr 2050 im Nachhaltigkeitsszenario

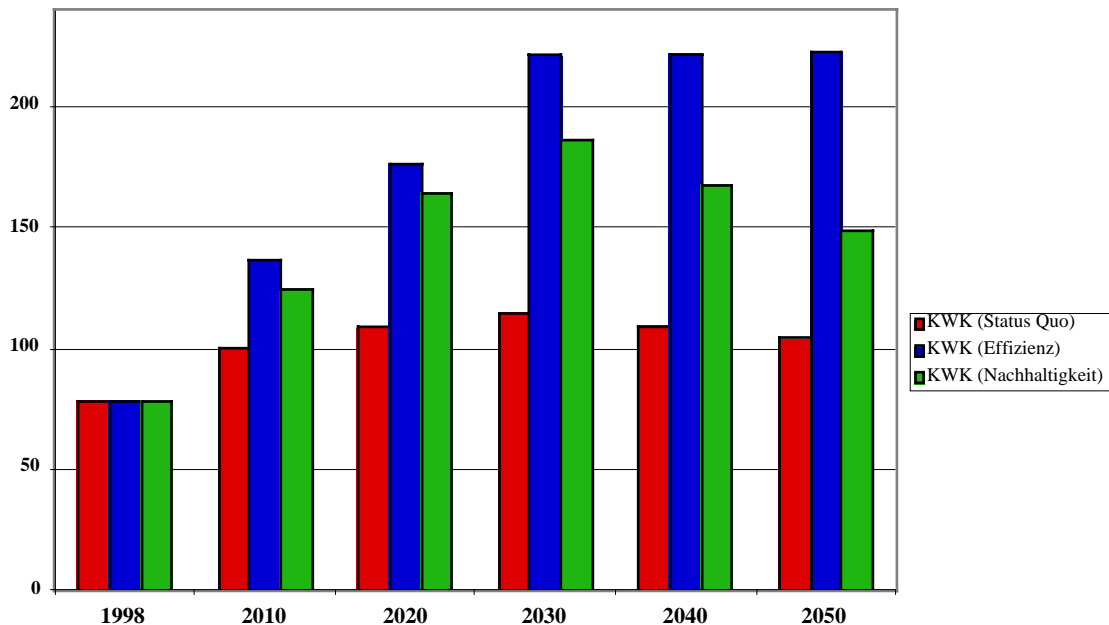
### 5.3 Klimaschutz durch stärkeren Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung

Im Klimaschutzprogramm der Bundesregierung ist die Verdopplung des derzeitigen KWK-Anteils an der Stromversorgung ein wesentlicher Bestandteil einer kurz- bis mittelfristig wirksamen CO<sub>2</sub>-Minderungsstrategie. Diese energiepolitische Orientierungsmarke für das Jahr 2010 deckt sich mit verschiedenen in den letzten Jahren erstellten Klimaschutzszenarien. Auch in den hier untersuchten Varianten des KWK-Ausbaus wird davon ausgegangen, dass es gegenüber Status Quo-Bedingungen zu einer deutlichen Erhöhung der gekoppelten Stromerzeugung kommt. Durch die Ertüchtigung und den Ersatz der be-

stehenden Anlagen der öffentlichen und industriellen KWK, kann in den nächsten zehn Jahren bereits ein wesentlicher Schritt in die Richtung des Verdopplungsziels gemacht werden. Dabei werden Kraftwerke mit einer geringen Stromkennzahl durch solche mit deutlich höherem Strom- zu Wärmeverhältnis und einer effizienteren Stromerzeugung substituiert. Für den weiteren Ausbau der KWK ist von besonderer Bedeutung, dass der Ersatz des bestehenden KWK-Kraftwerksparks mit den entsprechenden nachfrageseitigen Szenariobausteinen für die Gebäudesanierung und Prozessoptimierung und damit insgesamt geringeren Wärmelasten abgestimmt werden muss und entsprechend frühzeitig in den Aufbau und Ausbau der entsprechenden Nah- und Fernwärmenetze investiert wird. Für die dezentrale KWK im Nahwärmeversorgungsbereich ist deshalb ebenso wie für die Einzel-Objektversorgung, die in Zukunft vor allem auf der Basis von Brennstoffzellen, modernen kleinen Verbrennungsmotoren, Mikrogasturbinen sowie Stirlingmotoren Bedeutung bekommen dürfte, zu beachten, dass sich im Zuge der Verbesserung alternativer Technologien (z. B. Gas-Wärmepumpe, elektrische Wärmepumpen) und sich verändernden Vorleistungsketten (z. B. Verringerung der spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen der Stromerzeugung) neue Konkurrenztechnologien auf der Nutzerseite etablieren was den erreichbaren Marktanteil der KWK begrenzt.

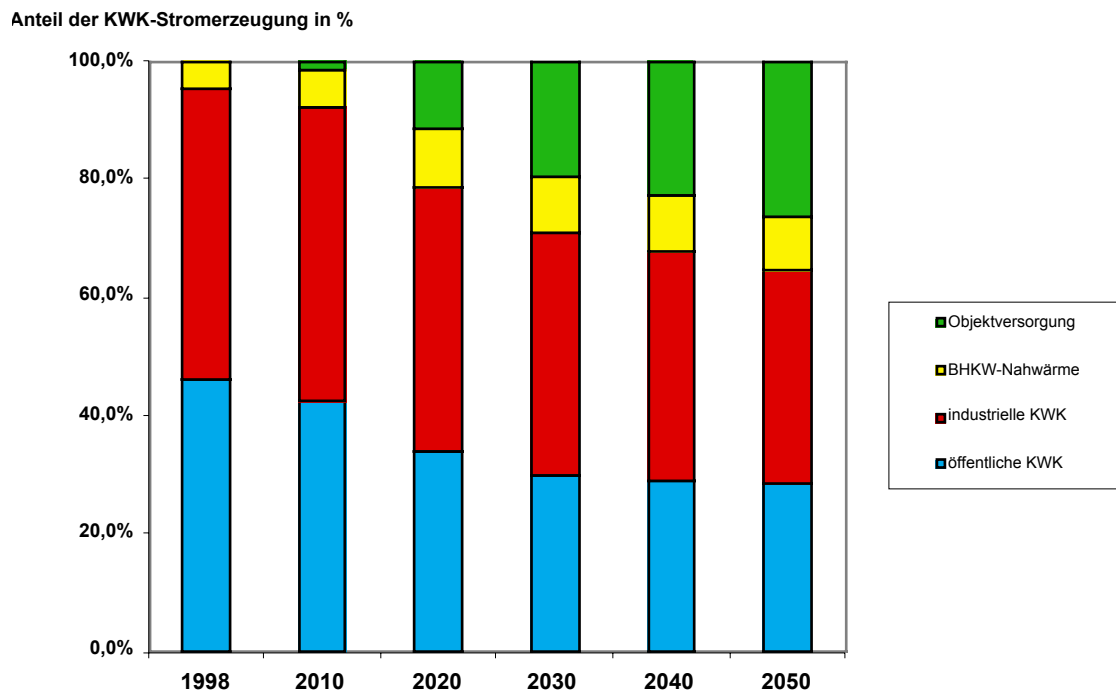
Wichtige Wechselwirkungen bestehen auch zwischen dem sich infolge verstärkter Einsparbemühungen reduzierenden Wärmebedarf für Raumwärme einerseits und dem Ausbau der erneuerbaren Energien andererseits, zwischen denen die KWK als Bindeglied einzubetten ist. Das Baukastenprinzip der Szenarioerstellung erlaubt es, diese Wechselwirkungen abzubilden und daraus die jeweils optimale Rolle der KWK in den Szenariokombinationen abzuleiten. Wegen der geringeren Umsetzung von Einsparpotenzialen auf der Nachfrageseite im Effizienzscenario (Nachfrage I) bei gleichzeitig geringerem Zuwachs erneuerbarer Energien erhält der Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung hier eine größere Bedeutung als im Nachhaltigkeitsszenario. Dies äußert sich in deutlich größeren Anteilen von KWK-Strom an der Stromerzeugung (**Abbildung 13**). Der im Mittel größere Anteil fossiler Energien im Effizienzscenario wird durch die relativ bedeutsamere KWK effizient umgesetzt, während im Nachhaltigkeitsszenario ab etwa 2030 wieder eine allmähliche Substitution der fossil versorgten KWK einsetzt.

## Stromerzeugung in TWh



**Abbildung 13: Entwicklung der KWK in den verschiedenen Bausteinkonzepten im Vergleich zur Status Quo Entwicklung**

Entsprechend erhöht sich im **Effizienzzenario** die gekoppelte Stromerzeugung von rund 78 TWh/a im Jahr 1998 über knapp 176 TWh/a im Jahr 2020 auf 224 TWh/a im Jahr 2030, sie verdreifacht sich also. Zu diesem Zeitpunkt entspricht dies einem Anteil an der erforderlichen Nettostromproduktion von rund 44%. Bis zum Jahr 2050 kann dieser bei leicht sinkender Nachfrage und etwa gleichbleibender KWK-Stromproduktion noch leicht auf 45% erhöht werden. Die treibenden Größen für den Ausbau der KWK sind zusammengefasst bis 2010 vor allem der Ersatz und die Modernisierung bestehender großer KWK-Anlagen der öffentlichen Versorgung und der Industrie, während nach 2010 dann der Ausbau der dezentralen KWK-Stromerzeugung und zunehmend auch der Objektversorgung (wobei zunehmend Brennstoffzellen zum Einsatz kommen) dominiert (**Abbildung 14**). Nach 2030 gibt es auch in diesen Bereichen keine signifikanten Spielräume für weitere Zuwächse mehr, so dass infolge des immer weiter sinkenden Wärmebedarfs im Gebäudebestand die KWK-Stromerzeugung auf konstantem hohem Niveau verbleibt.



**Abbildung 14: Entwicklung der vier Teilsegmente der gekoppelten Stromerzeugung im Effizienzzenario**

Auch im Bausteinkonzept für das **Nachhaltigkeitsszenario** kommt es für die KWK zu einer signifikanten Ausweitung der Stromerzeugung. Nach mehr als einer Verdopplung gegenüber dem Ausgangsniveau des Jahres 1998 bis zum Jahr 2020 auf 162 TWh/a, erhöht sich die gekoppelte Bereitstellung elektrischer Energie bis 2030 mit 187 TWh/a auf den Maximalwert im Betrachtungszeitraum. Knapp 43% des nachgefragten Stroms wird dann durch KWK-Anlagen erzeugt. Bis zum Jahr 2050 verringert sich dieser Anteil aufgrund der sich verschärfenden Konkurrenzsituation wieder auf 37%, die zugehörige gekoppelte Stromerzeugung fällt auf 149 TWh/a ab. Bis 2010 beruht auch hier der Ausbau der KWK im Wesentlichen auf der Modernisierung bestehender Großanlagen im Bereich der öffentlichen und industriellen KWK. Der Ausbau der dezentralen KWK in der Objekt- und Nahwärmeversorgung erlangt nach 2010, insbesondere im Zuge der fortschreitenden Erfolge der Brennstoffzellentechnologie, eine stark wachsende Bedeutung. Insgesamt bleibt die KWK im Nachhaltigkeitsszenario aber hinter den Perspektiven des Effizienzzenarios zurück. Maßgeblich ist hierfür die schneller einsetzende (vor allem auch ökologische) Konkurrenz zwischen der fossilen KWK und dem Ausbau der Objekt- und Nahwärmeversorgung auf der Basis erneuerbarer Energien.

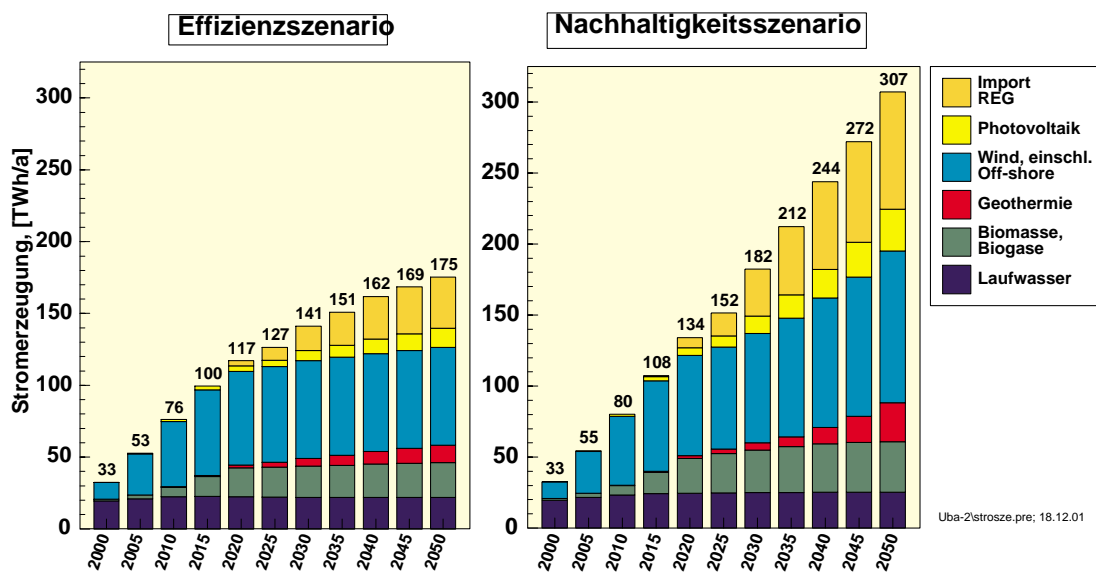
## 5.4 Erneuerbaren Energien gehört die Zukunft

Der zukünftige Ausbau der erneuerbaren Energien orientiert sich an mehreren Einflussgrößen. Zum einen stellen die technischen Potenziale und ihre Verknüpfung mit den derzeitigen und zukünftigen Kosten der jeweiligen Technologien die Basis für die Ausbaupfade von erneuerbaren Energien dar. Zum andern sind die energiepolitischen Zielvor-

stellungen und die Anforderungen des Klimaschutzes aber auch die Perspektiven auf den Exportmärkten wichtige Eingangsgrößen. Deshalb dient auch als „Einstieg“ für den Zeitraum bis 2010 eine Zubauentwicklung, die sich am Verdopplungsziel der Bundesregierung (und der EU) orientiert. Sie wird als feste Zielgröße in allen Szenariovarianten mit Ausnahme der Status-Quo-Entwicklung umgesetzt. Dieser Einstiegspfad geht von einer „ausgewogenen“ Mobilisierung aller Technologien aus, so dass diese spätestens nach 2010 in die Lage versetzt werden, eigenständig wachsende Märkte herauszubilden. Die Erreichung dieses Zwischenziels ist eine wesentliche Voraussetzung dafür, dass erneuerbare Energien überhaupt in den nächsten Jahrzehnten eine wichtige Rolle am Energiemarkt bestreiten können

Nach 2020 unterscheiden sich die Ausbaupfade für erneuerbare Energien in den Szenarien (**Abbildung 15**) deutlich. Im **Effizienzscenario** wird von einem eher verhaltenen Wachstum und einer vorsichtigen Ausschöpfung der Potenziale ausgegangen. Windenergie und Biomasse wachsen nur noch geringfügig. Photovoltaik, Erdwärme und Stromimport tragen erst zur Jahrhundertmitte mit relevanten Beiträgen zur Stromversorgung bei. Erneuerbare Energien stellen in 2050 ein Drittel der Stromerzeugung.

Die eigentlich mögliche Dynamik eines Ausbaus erneuerbarer Energien wird erst im **Nachhaltigkeitsszenario** vollständig genutzt. Dies erfordert eine deutliche Verringerung der Kostenschere (einerseits Kostendegressionen bei erneuerbaren Energien – andererseits Anstieg der Preise konventioneller Energien durch klimapolitische Instrumente), so dass von einer weitgehenden Wirtschaftlichkeit der meisten Technologien ausgegangen werden kann. Die Analyse führt bis 2050 zu folgenden Ergebnissen: Um 2020 sind die Potenzialgrenzen bei Wasserkraft mit 25 TWh/a zu 100% ausgeschöpft. Auch das Wachstum von KWK - Anlagen auf der Basis von Biomasse und Biogas verlangsamt sich nach starkem Wachstum zwischen 2010 und 2020 wieder. Wind wächst weiterhin gleichmäßig mit konstantem Marktvolumen, wobei der Ersatzbedarf für heutige Anlagen zunehmend an Bedeutung gewinnt. Die übrigen Technologien, also Photovoltaik, Strom aus Erdwärme und Stromimport, beginnen mit ihrem eigentlichen, energiewirtschaftlich relevanten Wachstum erst nach 2020. Um 2040 wird unter den genannten Rahmenbedingungen die 50%-Marke an der Stromerzeugung überschritten und bis zur Jahrhundertmitte ein Anteil von knapp zwei Drittel erreicht.



**Abbildung 15: Ausbau von erneuerbaren Energien in den Szenarien Effizienz und Nachhaltigkeit bis 2050; im Nachhaltigkeitsszenario sind ab 2030 Stromanteile für die Wasserstoffproduktion enthalten (2030: 5 TWh/a; 2050: 57 TWh/a)**

Das im Nachhaltigkeitsszenario unterstellte dynamische Wachstum der erneuerbaren Energien wird ab 2030 auch für die beginnende Bereitstellung von Wasserstoff im Verkehrsbereich eingesetzt. Beginnend mit einer zusätzlichen Stromerzeugung aus Offshore-Windenergie in Höhe von 5 TWh/a steigt dieser Beitrag bis auf 57 TWh/a im Jahr 2050. Die größten Beiträge kommen neben der Windkraft aus importiertem Strom aus erneuerbaren Energien. Daneben werden auch die beim Ausgleich von Stromangebot und Nachfrage nicht mehr nutzbaren Überschüsse zur Wasserstoffherzeugung genutzt.

## 5.5 Von Großkraftwerken zur dezentral geprägten und großräumig vernetzten Stromversorgung.

Obwohl noch zentralisierte Versorgungsstrukturen vorherrschen, zeichnen sich bereits heute die wesentlichen Merkmale der Stromversorgung des 21. Jahrhunderts ab, die durch Deregulierung, Liberalisierung, sowie einer verstärkten Umwelt- und Ressourcenschonung geprägt sein werden. Die Veränderungen im Stromsektor werden auf der einen Seite mit einem wachsenden überregionalen Energieaustausch einhergehen, auf der anderen Seite steigt der Anteil kleiner, dezentraler effizienter Stromerzeuger an. Der zunehmende Einsatz moderner Informations- und Kommunikationstechnologien eröffnet gleichzeitig neue Möglichkeiten des interaktiven Last- und Energiemanagements in das auch industrielle und private Verbraucher eingebunden werden können. Mit Hilfe verbesserter Verfahren zur Prognose, Einsatzplanung und Lastverteilung können Energiequellen und Verbraucher

optimal integriert werden, woraus sich sogenannte „virtuelle Kraftwerke“ ergeben. Sie bestehen aus einer größeren Anzahl kleiner, dezentraler Versorgungseinheiten, vorwiegend KWK-Anlagen wie Motor-BHKW, Mikrogasturbinen und Brennstoffzellen und Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energie, sowie aus Energiespeichermodulen (z. B. Wärmespeicher). Auch kleine und mittelgroße fossil gefeuerte Kraft- und Heizkraftwerke, vorzugsweise GuD-Anlagen, können in das System eingebunden sein.

Diese Entwicklung kommt auch der sukzessiven Integration erneuerbarer Energien entgegen, die zu ihrer optimalen Entfaltung auf eine dezentral vernetzte, gleichzeitig aber großräumig verbundene Stromversorgung angewiesen sind. Um nämlich eine strukturell und ökonomisch attraktive Stromversorgung mit dominierendem Anteil erneuerbarer Energien zu erhalten, müssen alle verfügbaren Quellen in einem ausgewogenen Mischungsverhältnis genutzt und ihre Eigenschaften und Fähigkeiten in geeigneter Weise kombiniert werden. Das betrifft sowohl die heimischen Energiequellen

- Windenergie mit deutlichem Schwerpunkt im Norden inkl. offshore-Standorten,
- Wasserkraft mit deutlichem Schwerpunkt im Süden,
- Photovoltaik mit nahezu gleichförmiger Verteilung über die Siedlungsstrukturen bei leichtem Schwerpunkt im Süden,
- Biomasse mit leichtem Schwerpunkt im Süden und starker Konzentration auf ländliche Räume und
- Strom aus Geothermie (HDR) mit einem möglichen Schwerpunkt im Süden,

als auch Ressourcen im Ausland, die wegen ihrer teilweise sehr großen Potenziale nicht nur vor Ort genutzt werden können, sondern auch über Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung oder längerfristig mittels Wasserstoff prinzipiell für eine europäisch optimale Bedarfsdeckung eingesetzt werden können. Bezogen auf Deutschland sind dies

- Strom aus Wasserkraft und Geothermie auf Island,
- Wasserkraft in Skandinavien,
- Windkraft an europäischen Küsten und Offshore-Anlagen außerhalb des deutschen Hoheitsgebiets und
- Solarthermische und windtechnische Stromerzeugung im Norden Afrikas (Maghreb-Staaten) und Südeuropa.

Im Nachhaltigkeitsszenario für 2050 sind 16% der gesamten Stromerzeugung importierter Strom aus erneuerbaren Energien. Etwa gleich große Anteile gelangen aus Quellen im „Norden“ und im „Süden“ in das deutsche Verbundnetz, da die Importquellen entsprechend ihrer Herkunft im Süden bzw. im Norden Deutschlands eingespeist werden. Ein ständiger Nord-Süd-Energietransport innerhalb Deutschlands wird deshalb nicht auftreten, sondern eher ein wechselnder, kurzzeitiger Energieausgleich in beide Richtungen. Dies

lässt sich näherungsweise auf eine großräumige, gesamteuropäische Vernetzung übertragen.

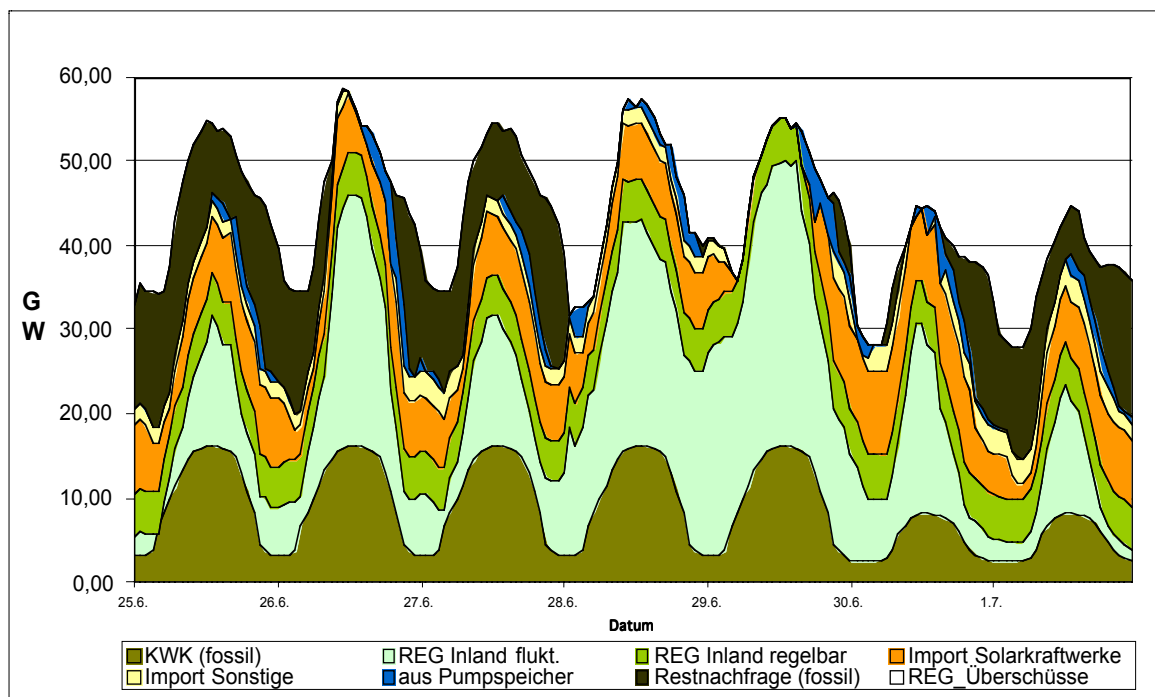
Es gibt sowohl ökonomische als auch ökologische Gründe dafür, die Vielfalt des Angebotes erneuerbarer Energien zu nutzen, anstatt auf nur einige wenige (heimische) Quellen zurückzugreifen und diese sehr stark auszubauen. Die Kombination aller erneuerbarer Quellen führt bei einem ausgewogenem Ausbau der verschiedenen Technologien zu einem relativ gleichmäßigen zeitlichen Angebotsprofil und zu einer günstigen räumlichen Verteilung des Stromangebots in Deutschland. Dadurch steigt die mittlere Anlagenleistung, der Bedarf an Leistung für eine bestimmte Strommenge und damit auch die Investitionskosten können deutlich reduziert werden. Überschüsse können bis hin zu hohen Anteilen erneuerbarer Energien weitgehend vermieden werden. Damit sinkt auch der Bedarf an Regelungskapazität in thermischen Kraftwerken und an Speichertechnologien, was sich auf die Gesamtkosten wiederum günstig auswirkt.

Ein weiterer Aspekt ist unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten von großer Bedeutung: Die Nutzung der heimischen erneuerbaren Energien und die generelle Diversifizierung der Stromversorgung wird Deutschland weniger abhängig von Energieimporten machen. Trotzdem wird die Energieversorgung zu großen Teilen auf internationalen Partnerschaften aufgebaut sein und kommt damit den Bestrebungen einer Liberalisierung der Energiemärkte und dem politischen Zusammenwachsen Europas entgegen. Der Grund liegt darin, dass die Potenziale insbesondere der solaren Stromquellen den zukünftig absehbaren Eigenbedarf der südlichen Erzeugerländer bei weitem übersteigen. Ähnlich verhält es sich mit dem größten Teil der weltweiten Ressourcen erneuerbarer Energien, die daher nur durch Energiepartnerschaften von Import- und Exportländern erschlossen werden können. Ohne derartige Verbundlösungen wird die globale Stromversorgung die Herausforderungen in Bezug auf Nachhaltigkeit nicht erfüllen können. Die Erschließung der Solar- und Windpotenziale speziell in Nordafrika ist zudem auch unter dem Gesichtspunkt einer wirtschaftlichen und politischen Stabilisierung dieses Gebiets und seiner Beziehungen zu Europa zu beurteilen (vgl. soziale Indikatoren in Abschnitt 1). Letztlich lassen sich hiermit möglicherweise auch andere global zunehmende Probleme lösen, denkt man an solarthermische Kraftwerke, die primär zur Entsalzung von Meerwasser und erst in zweiter Linie zur Erzeugung von Strom eingesetzt werden.

Als Argument gegen große Anteile erneuerbarer Energien an der Stromversorgung wird meist hervorgebracht, ihr fluktuierender und unvorhersehbarer Charakter erlaubten es nicht, eine gesicherte Grundlast bereitzustellen. Dabei wird jedoch außer Acht gelassen, wie Stromnachfrage eigentlich entsteht, nämlich aus der Summe vieler disperser, fluktuierender und im Einzelnen unvorhersehbarer Verbraucher. Prinzipiell sind daher fluktuierende Stromnachfrage und Stromerzeugung aus erneuerbaren Quellen analoge Phänomene. Ein Teil der Fluktuationen erneuerbarer Energien, insbesondere der Tag-Nacht-Zyklus der Sonnenenergie und das Wintermaximum der Windenergie, können durchaus mit dem Bedarf unserer im Wesentlichen tagaktiven Gesellschaft in Einklang gebracht werden. Die Deckung der Grundlast erfordert, analog zu ihrer Entstehung, die Kombination vielfältiger, großflächig verteilter, wenig korrelierter Quellen, die in ihrem Zusammenspiel eine möglichst gleichmäßige Leistungscharakteristik aufweisen. Wichtig ist dabei ein ausgewoge-

nes Verhältnis der verschiedenen Anteile erneuerbarer Energien. Zur Überprüfung der These wurde das Zusammenspiel der verschiedenen Energiequellen und Regelstrategien auf der Basis des Mengengerüsts für das Nachhaltigkeitsszenario im Jahr 2050 modelliert (**Abbildung 17**).

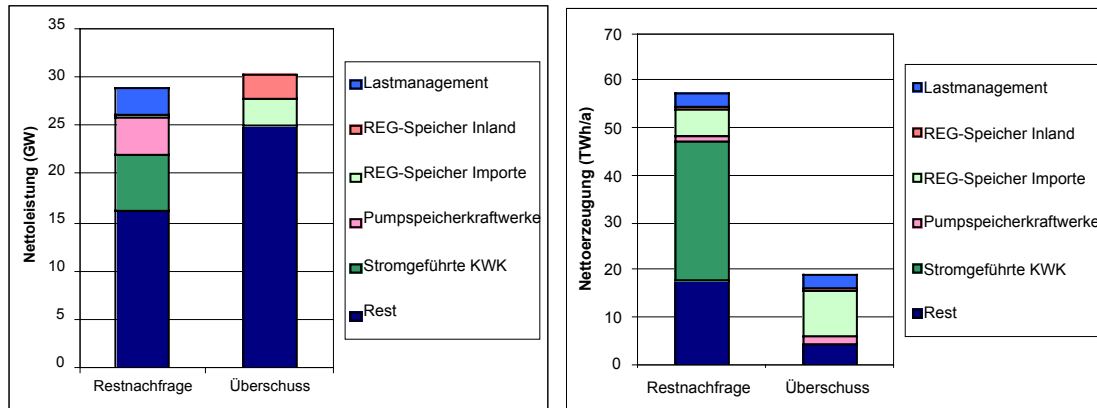
Dabei stellt sich heraus, dass die fluktuierenden erneuerbaren Energiequellen (Photovoltaik und Wind) zusammen mit der wärmegeführten Kraft-Wärme-Kopplung - also die unregelbaren Komponenten des Strommixes - durchaus den größten Teil der Grundlast abdecken können und sogar auf natürliche Weise den täglichen Schwankungen des Strombedarfs folgen. Die Mittellast wird weitgehend durch die regelbaren erneuerbaren Komponenten abgedeckt (Import, Geothermie, Wasserkraft, im Sommer auch zeitweise stromgeführte KWK). Fossil gefeuerte GuD-Kondensationskraftwerke und Pumpspeicher stellen die noch erforderliche Restleistung bereit. Die dann noch geringen verbleibenden Überschüsse werden über eine elektrolytische Wasserstoffherzeugung abgepuffert.



**Abbildung 17: Zusammenwirken unterschiedlicher Energiequellen bei der Deckung der Stromnachfrage am Beispiel einer Sommerwoche im Jahr 2050**

In der **Abbildung 18** lässt sich die Wirksamkeit einzelner Ausgleichs-, Regelungs- und Anpassungsmaßnahmen in der Jahresbilanz der Stromerzeugung des Jahres 2050 erkennen. Bei Kombination aller Ausgleichsmaßnahmen – wovon die stromgeführte KWK die wirksamste darstellt – kann die im Nachhaltigkeitsszenario noch erforderliche Kondensationsleistung von 29 GW auf 16 GW reduziert werden (linke Grafik), die damit erzeugte Strommenge verringert sich von 58 TWh/a auf 19 TWh/a (rechte Grafik). Diese Kraftwerke müssen kurzfristig abrufbar sein, d.h. die Anforderungen von Spitzenlastkraftwerken erfüllen. Heute liegt deren installierte Leistung bei etwa 35 GW. Gleichzeitig lassen sich nicht verwertbare Überschüsse an Strom aus erneuerbaren Energien in Höhe von 30 auf 25 GW bzw. von 19 auf 4 TWh/a reduzieren, was noch 1% der Jahresstrommenge entspricht. Bei weiterer Erhöhung der Anteile erneuerbarer Energien an der Stromversorgung können

die dann deutlich wachsenden Überschüsse z.B. zur Wasserstoffherzeugung genutzt werden.



**Abbildung 18: Maximale Restnachfrage und Überschuss an erneuerbaren Energien sowie deren Reduktion durch verschiedene Ausgleichsmaßnahmen für die Leistung (links) und für die Jahresenergieerzeugung (rechts) im Nachhaltigkeitsszenario des Jahres 2050.**

## 5.6 Wie teuer wird der Strom?

Nur mit Hilfe öffentlicher Förderprogramme des Bundes, der Länder und zahlreicher Kommunen, vor allem des Erneuerbaren Energien Gesetzes (EEG), gelingt es derzeit, die Zusatzkosten aufzubringen, die erforderlich sind, um größere Märkte und energiewirtschaftlich relevante Beiträge von erneuerbaren Energien zu erzielen. Im Jahr 2000 wurden so rund 1,3 Mrd. EUR/a (0,7 Mrd. EUR/a allein mittels des EEG) letztlich von den Verbrauchern aufgebracht, um immerhin rund 5 Mrd. EUR/a Investitionen in Anlagen zu induzieren. 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 Kohle 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 durchsetzen. Auch die konventionellen Technologien auf der Basis fossiler Energiequellen haben 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 Reinigung oder Vermeidung von Emissionen, Kosten auch wieder erhöhen.

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. Wenn dagegen zukünftig voll entwickelte investitionsintensive Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energien ihr niedrigstes Kosteniveau 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. **Abbildung 19** 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). Diese können heute in der Grundlast (7000 h/a) Strom zwischen 3,2 und 3,6 cent/kWh bereitstellen. Für Steinkohle erhöhen sich diese Kosten selbst bis 2050 nur relativ gering auf rund 4 cent/kWh; für Gaskraftwerke sind dagegen für denselben Zeitpunkt bereits Stromkosten zwischen 5 und 6,5 cent/kWh zu erwarten. Berücksichtigt man zusätzlich die externen Kosten (fossiler Mix: externe Kosten) dieser Art der Stromerzeugung (Steinkohle 2,25 cent/kWh; Gas-GuD 1 cent/kWh) so gelangt das Stromkostenniveau beider Kraftwerksarten in einen Bereich zwischen 6,5 cent/kWh und 7,5 cent/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.

Ein Schnittpunkt der Kostenkurven ist längerfristig sicher und damit auch die Ablösung der fossilen durch erneuerbare Energieträger schon aus rein ökonomischen Gründen sinnvoll. Je nach energiepolitischen Vorgaben (z.B. Einbeziehung externer Kosten in die Energiekosten) und gewähltem Preispfad kann der Zeitpunkt jedoch in einem breiten Zeitraum zwischen 2020 und 2050 liegen.

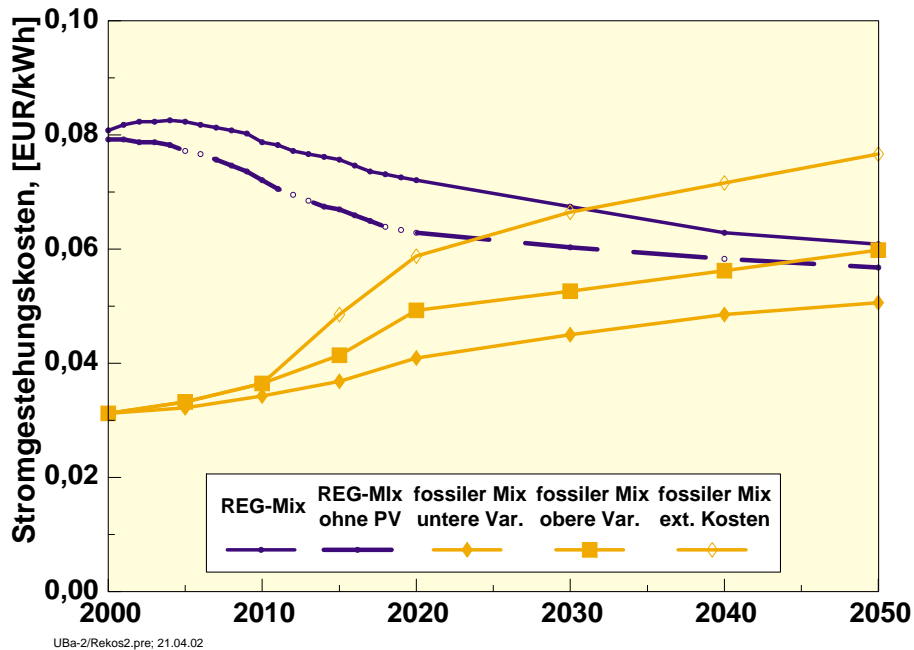


Abbildung 19: Entwicklung der mittleren Stromgestehungskosten von erneuerbaren Energien im Szenario Nachhaltigkeit mit und ohne anteiliger Stromerzeugung aus Photovoltaik im Zeitverlauf im Vergleich zu einem Mix aus neuen fossilen Kraftwerken in Abhängigkeit unterschiedlicher Anstiege der Preise für Steinkohle und Erdgas (untere/obere Variante) bzw. unter Berücksichtigung von externen Kosten

Erneuerbare Energiequellen stellen daher tatsächlich die einzige vertretbare Option dar, um auch langfristig relativ stabile Energiekosten – allerdings auf höherem Niveau als derzeit - zu erhalten. Eine Sorge dabei ist jedoch, dass die notwendigen Zusatzaufwendungen für einen solchen Umbau und die erzielbaren mittleren Stromgestehungskosten 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.

Ein Umbau in Richtung einer nachhaltigen Energieversorgung muss dennoch auch schon mittelfristig wirtschaftlichen Kriterien genügen um nachhaltig zu sein. Folgende Prinzipien sind dabei zielführend:

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 kos-

tengünstiger als die Bereitstellung erneuerbarer Energien. Diese technologischen Optionen sollten daher möglichst rasch in allen Verbrauchssektoren umgesetzt werden, damit anschließend erneuerbare Energien große 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 möglichst hohe Auslastung der installierten Anlagen zu erreichen. Der Ausbau sollte 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 möglichst guter zeitlicher Anpassung von Energienachfrage und regenerativem Energieangebot, was durch einen entsprechend ausgewogenen Mix von Energiequellen erreicht werden kann.
3. **Rechtzeitig sind alle relevanten Technologien in der „richtigen“ zeitlichen Abfolge zu mobilisieren:** In Abwägung zu Punkt 2 sind im Sinne eine Vorsorge auch heute noch teurere Technologien (Photovoltaik) oder noch zu demonstrierende Technologien (HDR-Stromerzeugung) 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.

## 6 Wärmeversorgung von morgen – effizienter und anders

### 6.1 Private Haushalte – Schlüsselbereich für die Reduktion des Wärmebedarfs.

Der Wärmemarkt erhält in der öffentlichen Wahrnehmung häufig nicht den ihm zustehenden Stellenwert, obwohl immerhin 57% des Endenergiebedarfs für die Erzeugung von Raumwärme benötigt werden. 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 oder die Brennwertnutzung 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 Bau-

teile 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 4**). Bei älteren Bauwerken aus der Zeit vor dem Inkrafttreten der ersten Wärmeschutzverordnung sind die Einsparungen sowohl besonders kostengünstig als auch 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 cent/kWh, bei einem inflationsbereinigten Zinssatz von 4%. Als Mittelwert über die Sanierung des gesamten Altbaubestandes ergeben sich Kosten von 1,35 cent/kWh. Der größte Teil hiervon ist also bereits bei den heutigen Brennstoffkosten wirtschaftlich erschließbar.

**Tabelle 4: Technisches und wirtschaftliches Einsparpotenzial des Wärmebedarfs von bestehenden Wohngebäuden (PJ/a)**

	ABL	NBL
<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: <b>Szenario Effizienz</b> (Sanierungsrate 1,2%/a)	264 (16%)	162 (45%)
<b>Szenario Nachhaltigkeit</b> (Sanierungsrate 2%/a)	690 (42%)	213 (59%)

Trotz der wirtschaftlich günstig erschließbaren Potenziale gibt es in Deutschland einen erheblichen Sanierungsstau. Die Sanierungsrate von Gebäuden liegt zwar bei etwa 2,5%/a, aber nur bei jeder fünften Maßnahme 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 Sanierungsar-

beiten zur Selbstverständlichkeit wird und die günstigen Gelegenheiten nicht wie bisher in den meisten Fällen verpasst werden.

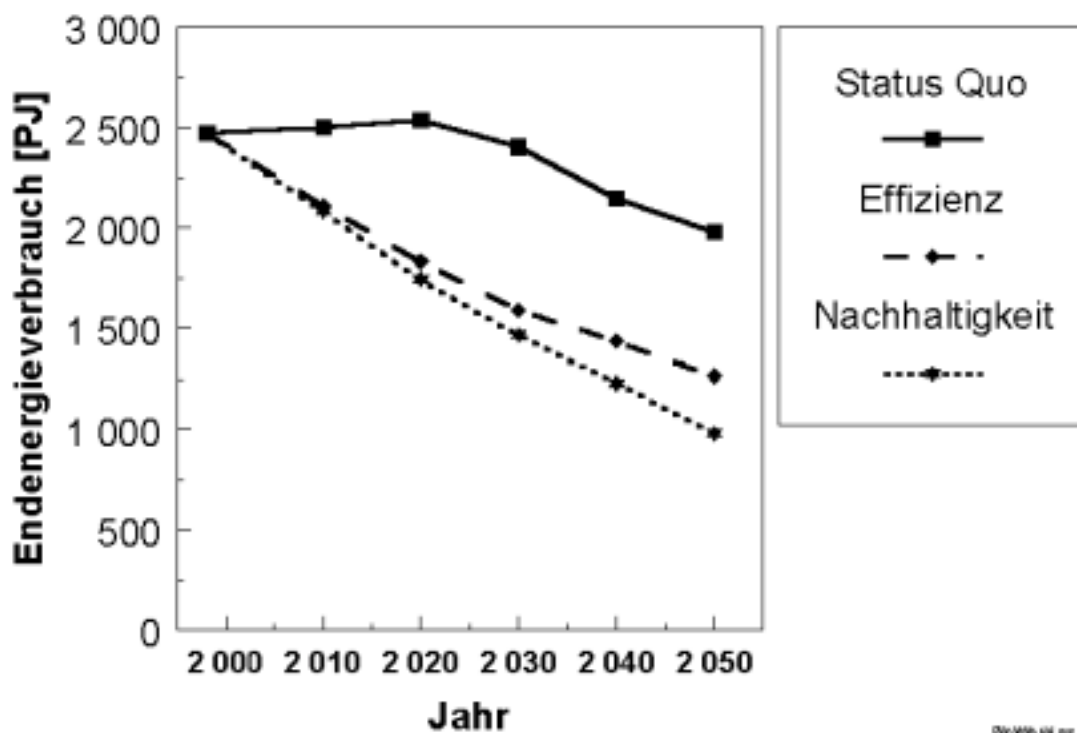
In den hier betrachteten Szenarien spiegelt sich diese Erkenntnis wieder. Im Effizienzscenario werden nur solche Einzelmaßnahmen realisiert, welche auch nach Anlegung strenger Kriterien wirtschaftlich sind. Mit Hilfe verschiedener Maßnahmen geringer Umsetzungstiefe kann zudem eine Erhöhung der energetischen Sanierungsrate auf 1,2%/a erreicht werden. Im anspruchsvolleren Nachhaltigkeitsszenario können sich Einzelmaßnahmen gegenseitig unterstützen, wenn insgesamt die Summe aller durchgeführten Optionen unterhalb des vorgegebenen Grenzwerts liegt. Dadurch, dass nicht mehr an jede Einzelmaßnahme strenge einzelwirtschaftliche Kriterien angelegt werden, können die Maßnahmenpakete auch die Sanierung solcher Bauteile enthalten, die nach dem Kriterienkatalog des Effizienzscenarios noch nicht erfasst werden. In Summe führen diese Vorgaben dazu, dass die heute für den Altbaubestand gültige EnEV im Zeitverlauf eingehalten wird, da die hierdurch geforderten Maßnahmen im wirtschaftlichen Rahmen liegen. Im Nachhaltigkeitsszenario liegt zudem die Sanierungsrate bei im Mittel 2,0%/a, so dass bis 2050 der gesamte Altbaubestand saniert ist.

In den Szenarien ist auch der Wärmebedarf der zukünftigen Neubauten zu berücksichtigen. In allen Szenarien werden dabei die gleichen Neubauraten zugrunde gelegt. Sie richten sich nach der zukünftig zu erwartenden Bevölkerungszahl und dem anhaltenden Trend zu größeren Wohnungen. Die Wohnfläche je Kopf wird bis 2050 kontinuierlich von heute 38,5 m<sup>2</sup> auf 58,6 m<sup>2</sup> wachsen. Hieraus folgt, dass die Wohnfläche in Deutschland bis 2030 noch um 34% zunehmen wird. Danach wird sich jedoch aufgrund der schrumpfenden Bevölkerung eine leichte Verringerung der Wohnflächen ergeben. Die Neubauraten werden in diesen Jahren weit unter dem heute gewohnten liegen. Auch bezüglich des Wärmebedarfs der Neubauten werden zwischen dem Effizienz- und dem Nachhaltigkeitsszenario nur geringfügige Unterschiede gemacht. In beiden Szenarien werden die Anforderungen gegenüber den heute gültigen Verordnungen weiter verschärft. Ab 2006 werden Neubauten mindestens im Niedrigenergiehausstandard errichtet. Bis 2050 wird dann der Anteil der Passivhäuser an den Neubauten auf 70% gestiegen sein.

Neben einer verbesserten Wärmedämmung tragen auch verbesserte Heizanlagen zu einer nachhaltigen Entwicklung bei. Von besonderem Interesse sind dabei neben dem heute schon weit verbreiteten Brennwertkessel, die Wärmepumpen sowie die derzeit in der Entwicklung befindlichen Heizsysteme mit integrierten Brennstoffzellen. Welches dieser Systeme die geringsten CO<sub>2</sub>-Emissionen aufweist, hängt stark von der Entwicklung im Strommarkt ab. Eine abnehmende CO<sub>2</sub>-Intensität bei der Stromerzeugung begünstigt die (Elektro-)Wärmepumpe und relativiert die mit dem heutigen Strommix einhergehenden Vorteile der mit Erdgas betriebenen Brennstoffzellen oder Wärmepumpen. Im Nachhaltigkeitsszenario mit seinem hohen Anteil an CO<sub>2</sub>-freier Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien gehören Elektrowärmepumpen ab 2020 (außer KWK und erneuerbaren Energien) zu den günstigsten konventionellen Heizungssystemen. Vorteile für die Brennstoffzelle ergeben sich langfristig nur noch, wenn sie anstelle von Erdgas mit Biogas oder Wasserstoff aus erneuerbaren Energien betrieben werden. Die zukünftige optimale Behei-

zungsstruktur hängt daher von der jeweiligen Kombination der Szenariobausteine ab und unterscheidet sich dementsprechend im Effizienz- und Nachhaltigkeitsszenario.

Als Ergebnis der Annahmen zur Gebäudesanierung, der Aktivitäten im Neubaubereich und der zukünftigen Beheizungsstruktur stellt Abbildung 20 den resultierenden Endenergiebedarf der Haushalte für Raumwärme und Warmwasser dar. Dabei sind in den aufgeführten Energiemengen neben den konventionellen Brennstoffen und Heizstrom auch die nachfolgend beschriebenen Beiträge der erneuerbaren Energien enthalten. Aus den wenig unterschiedlichen Verläufen des Verbrauchs im Effizienz- und Nachhaltigkeitsszenario erkennt man, dass die Reduktion des Wärmebedarfs in Haushalten eine in jedem Fall zu ergreifende, robuste Strategie darstellt.



**Abbildung 20: Endenergiebedarf der privaten Haushalte für Raumwärme und Warmwasser in den drei Szenarien**

Raumwärme und Warmwasser werden nicht nur von den Haushalten benötigt. Auch im gewerblichen Bereich (sog. Kleinverbraucher) und in der Industrie müssen Gebäude beheizt und mit Warmwasser versorgt werden. Aus technischer Sicht ist dieser Bedarf aber ähnlich strukturiert wie bei den privaten Haushalten. Dementsprechend kann auch im Bereich der Nichtwohngebäude mehr als die Hälfte des heutigen Wärmebedarfs durch eine systematische energetische Sanierung bestehender Gebäude bei gleichzeitig steigenden Standards für Neubauten eingespart werden.

## 6.2 Erneuerbare Energien als Wärmelieferanten

Große Beiträge zur Deckung des Wärmebedarfs können durch Biomasse, Solarkollektoren und Geothermie geliefert werden. Ihre verstärkte Nutzung stellt eine ideale Ergänzung der Einsparbemühungen dar. Im Wärmemarkt erfolgte bei den erneuerbaren Energien in den letzten Jahren eine teilweise stürmische Entwicklung. So wuchs der Markt der Solarkollektoren nach der Einführung des Marktanreizprogramms der Bundesregierung in den letzten beiden Jahren um jeweils 50% auf gut 900 000 m<sup>2</sup> verglaste Kollektorfläche an. Der Trend geht von Anlagen, welche nur Warmwasser erzeugen, mittlerweile hin zu größeren Anlagen, welche auch Teile des Heizungsbedarfs abdecken können. Nach dem Auslaufen des überwiegenden Teils der Länderförderungen und mehrfachen Einschnitten bei den Förderbedingungen des Bundesprogramms deutet sich allerdings für 2002 wieder ein stagnierender Markt an.

Auch im Bereich der Holzfeuerungen gab es in den letzten Jahren kräftige Zuwächse. So stieg der jährliche Absatz von Kleinstfeuerungen (Kamine und Kachelöfen), welche i.a. zusätzlich zu einer bestehenden Öl- oder Gaszentralheizung installiert werden, innerhalb von fünf Jahren von 15.000 auf 27.000 Stück. Auch bei den größeren Holzfeuerungen für Zentralheizungen oder für Holzheizwerke gab es deutliche, aber weniger gut dokumentierte Zuwächse. Den Zugängen bei den Neuanlagen sind die Abgänge von Altanlagen gegenzurechnen.

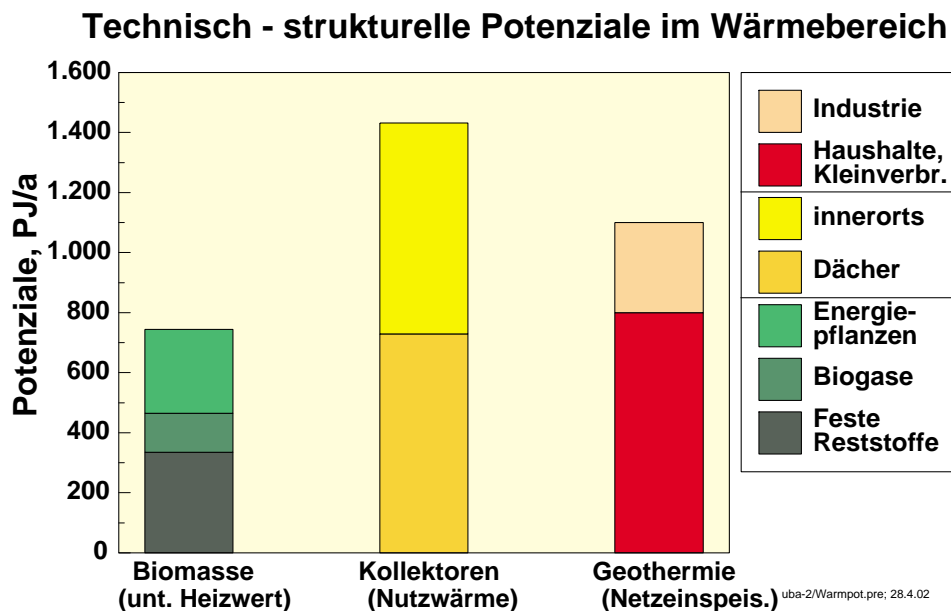
Ebenso herrscht in der geothermischen Branche Optimismus vor. Es wird damit gerechnet, dass hier in den nächsten Jahren neben den laufenden und geplanten Projekten weitere Anlagen hinzukommen werden. Das größte Problem bei der Nutzung von Geothermie ist die Mindestgröße der Anlagen, welche erforderlich ist, um die Wärmegewinnung aus Tiefen von mehr als 1.500 m unter der Erdoberfläche rentabel zu machen. Dies erschwert auch die Realisierung wirtschaftlich sinnvoller Projekte in erheblichem Maße.

Heute wird das Potenzial der erneuerbaren Energien erst zu einem geringen Teil ausgeschöpft. Nur im Bereich der Biomasse wird bereits ein merklicher Anteil 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 (Klärgas, Deponiegas, Vergärung von Gülle oder Biomüll) spielen demgegenüber eine untergeordnete 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 (**Abbildung 21**).

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. Damit ist das Potenzial etwa doppelt so groß wie das der Biomasse.

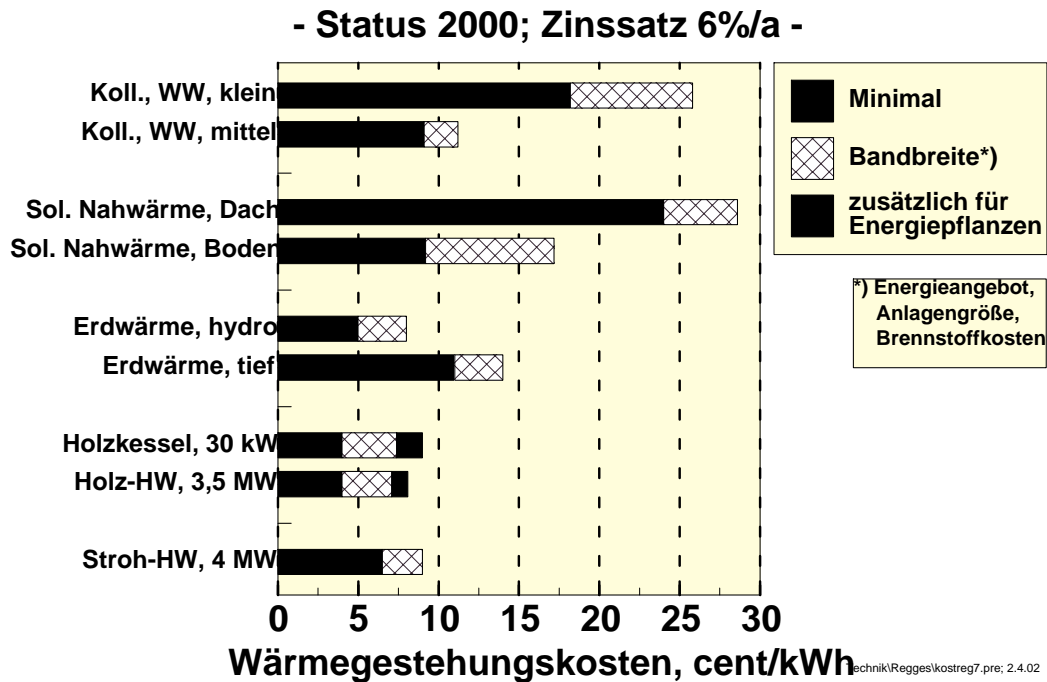
Die Nutzung von hydrogeothermalen Lagerstätten ist die kostengünstigste Möglichkeit, Erdwärme zu nutzen. Unter Berücksichtigung der Siedlungsstrukturen in den Gebieten mit derartigen Vorkommen, beträgt das Potenzial der Geothermie 1.100 PJ. Diese Energiemenge steht jährlich immerhin für einen Zeitraum von 100 Jahren zur Verfügung. Danach sind diese hydrothermalen Lagerstätten erschöpft. In der sich anschließenden Regenerationsphase muss ihnen die Gelegenheit gegeben werden sich zu erholen, was jedoch nur sehr langsam geht. 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).



**Abbildung 21: Technisch-strukturelle Potenziale erneuerbarer Energien im Wärmemarkt**

Die Bandbreite der Kosten von Wärme aus erneuerbaren Energien ist groß (**Abbildung 22**). Am kostengünstigsten ist das Potenzial der Biomasse erschließbar. Bereits heute liegen Holzkessel und Holzheizwerke im wirtschaftlichen Bereich. Es ist jedoch nur zur Deckung eines Bruchteils des gesamten Wärmebedarfs ausreichend. Höhere Beiträge können durch Geothermie oder solare Wärme bereitgestellt werden. Allerdings sind hierfür höhere Aufwendungen notwendig. Wärme aus Solaranlagen ist noch vergleichsweise teuer. Hier kann aber insbesondere für die potenziell besonders bedeutsame Solare Nahwärme einschließlich saisonaler Speicherung mit Kostendegressionen auf weniger als die Hälfte

der heutigen Kosten gerechnet werden, sodass zukünftig die Kostenspanne zwischen den unterschiedlichen Technologien abnehmen wird. Kosten sind allerdings nur eines von mehreren Auswahlkriterien bei der Marktausweitung von Technologien. So wird etwa der Ausbau der Geothermie gegenüber der solaren Wärme dadurch gehemmt, dass erstere nur in größeren Nahwärmenetzen sinnvoll eingesetzt werden kann.



**Abbildung 22: Derzeitige Wärmekosten erneuerbarer Energien frei Verbraucher**

Die Entwicklung im Wärmemarkt ist in den Szenarien zunächst durch die Annahme geprägt, dass 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 Reststoffe, welche in der Forst- und Landwirtschaft sowie in den Holzverarbeitenden Betrieben anfallen. In beiden Szenarien 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 Solare Nahwärme und die Geothermie (**Abbildung 23**).

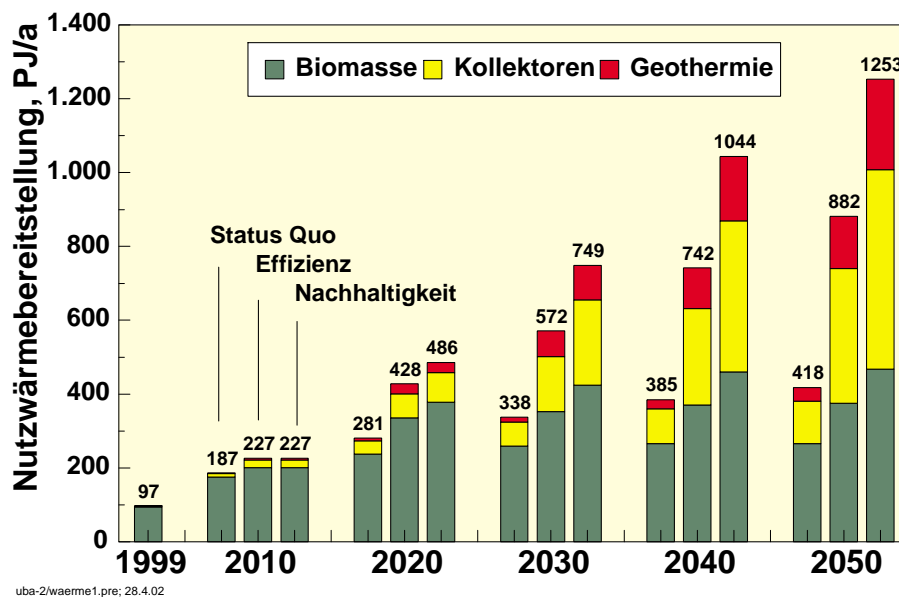


Abbildung 23: Nutzwärmebereitstellung aus erneuerbaren Energien in den Szenarien Status Quo, Effizienz und Nachhaltigkeit

### 6.3 Nahwärme – das Bindeglied zwischen fossiler und regenerativer Wärmeversorgung

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. Dazu gehören die

- Nutzung von Tiefengeothermie,
- Nutzung von Langzeitwärmespeichern für solare Wärme,
- Verbrennung von halmgutartiger Biomasse, wie z.B. Stroh,
- Kraft-Wärme-Kopplung bei Verbrennung von fester Biomasse.

Auch die Ausweitung der Kraft-Wärme-Kopplung auf Basis fossiler Brennstoffe ist vielfach an die Existenz von Nahwärmenetzen gekoppelt. „Nahwärme“ ist dabei als Überbegriff für eine große Bandbreite von Netzgrößen zu verstehen. Sie reicht von der Verknüpfung mehrerer Einzelgebäude bis hin zur Versorgung von Stadtteilen mit mittelgroßen BHKW. Die Übergänge zur Objektversorgung einerseits und zur Fernwärmeversorgung andererseits sind fließend. So können einzelne Nahwärmenetze beispielsweise im Laufe der Zeit zu „Fernwärmenetzen“ zusammenwachsen mit einer entsprechenden Anpassung

der Heizzentralen bei Erneuerung der Anlage. „Vernetzte Wärmeversorgung“ ist also 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 mittels fossilen Brennstoffen sehr effiziente Wärmeversorgungen aufzubauen um später sukzessive erneuerbare Energien in das bestehende System einzuführen.

Entsprechend groß ist die Veränderung der zukünftigen Struktur des Wärmemarkts im Effizienz- und Nachhaltigkeitsszenario. Bei beiden wird der Anteil von Nahwärme bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung des Fernwärmeanteils (vgl. Abschnitt zur KWK) 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 (**Abbildung 24**). Dies ist nicht nur für die KWK erforderlich, sondern auch für die deutliche Ausweitung der erneuerbaren Energien. 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 höherem Strom- zu Wärmeverhältnis (Stromkennziffer) im Vergleich zu heute bedingt, hinzu kommt längerfristig das starke Vordringen erneuerbarer Energien. Die Umstrukturierung des Wärmesektors bewirkt somit, dass insbesondere im Nachhaltigkeitsszenario die Einzelversorgung auf der Basis Heizöl völlig verschwindet und diejenige mit Erdgas stark zurückgeht.

Diese Strukturveränderungen müssen rechtzeitig eingeleitet werden. Die deutsche Siedlungsstruktur mit geschlossenen Ortschaften und relativ kleinen Grundstücksgrößen kommt dem Einsatz von Nahwärme entgegen. Das prinzipiell erschließbare Potenzial für Nah- und Fernwärme liegt bei etwa 95% des Bedarfs für Raumwärme und Warmwasser, wenn die Obergrenze für den zulässigen Wärmeverlust des Verteilsystems bei 15% angesetzt wird. Erfolgreich durchgeführte Nahwärmeversorgungen zeigen beim Vergleich mit Einzelversorgungen überdies, dass Kostengründe nicht gegen die Errichtung von Nahwärmeversorgungen sprechen. Die Hemmnisse, die einer Verwirklichung dieses Strukturwandels entgegenstehen sind nicht unüberwindbar wie ein Blick auf das Nachbarland Dänemark zeigt. Dort werden bereits heute trotz einer vergleichsweise geringeren Besiedlungsdichte 58% aller Wohnungen über Nah- oder Fernwärmenetze beheizt.

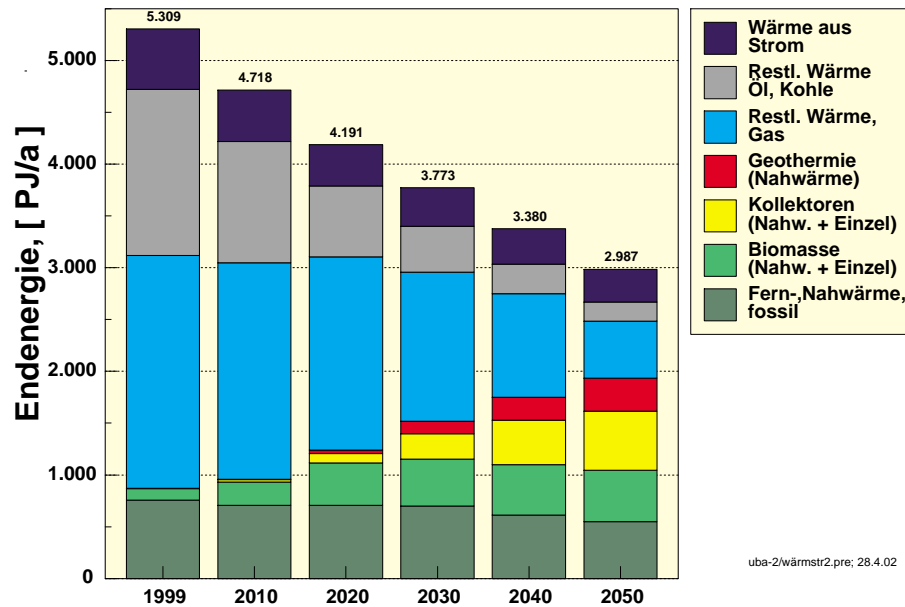


Abbildung 24: Wärmebereitstellung (Raumheizung, Warmwasser, Prozesswärme) im Szenario Nachhaltigkeit durch Fern- und Nahwärme aus fossiler und biogener Kraft-Wärme-Kopplung einschließlich Spitzenkessel (KWK) sowie aus Kollektor- und Geothermiewärme (unterer Teil der Grafik) und verbleibende Deckung durch konventionelle Versorgung (oberer Teil)

## 7. Neue Wege im Verkehr

### 7.1 Energieverbrauch und seine Reduktionsmöglichkeiten

Der Verkehr trägt heute zu 22% zu den energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen bei (1999), sein Anteil am Endenergieverbrauch liegt bei 30% und damit um mehr als 10 Prozentpunkte höher als 1980. Zwischen 1990 und 1999 haben die verkehrsbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen um 15 Mio. t/a, d. h. um mehr als 8% zugenommen. Der Verkehrsbereich ist derjenige Verbrauchssektor, der den Bestrebungen einer wirksamen Treibhausgasminde rung am deutlichsten entgegensteht. Für die Höhe des zukünftigen Energieverbrauchs im Verkehr ist damit die Veränderung der Verkehrsleistung einer der wesentlichen Bestimmungspa rameter. Die wichtigsten Entwicklungen lassen sich wie folgt charakterisieren:

#### Personenverkehr:

- Die Verkehrsleistung pro Kopf steigt weiter an. Langfristig wird der Anstieg aufgrund von Sättigungstendenzen gebremst.

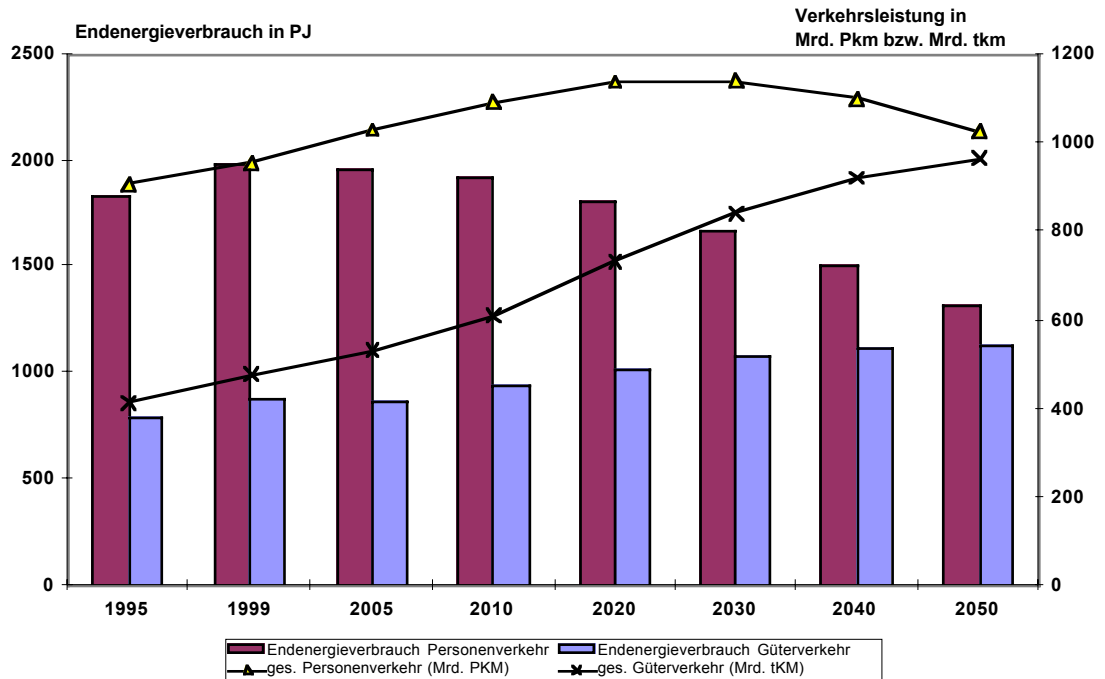
- Die mittlere Durchschnittsgeschwindigkeit steigt bei begrenztem Mobilitätszeitbudget mittelfristig noch an (infolge eines starken Wachstums von Luftverkehr und schnellen Bahnen). Bei einem seit vielen Jahren empirisch nachgewiesenen etwa gleichbleibendem Zeitaufwand für Mobilität erhöht sich entsprechend die Verkehrsleistung pro Kopf.
- Der Freizeitverkehr nimmt weiter zu. Eine Rolle spielt hierbei auch der sich stark verändernde Altersaufbau der Bevölkerung. Daraus ergibt sich ein Wachstum bei den (Fernverkehr-) Bahnen und beim Luftverkehr, wobei zum Ende des Betrachtungszeitraumes die Bahnen schneller wachsen als der Luftverkehr. Der Öffentliche Straßenpersonennahverkehr (ÖSPV) weist eine absolut konstant bleibende Personenverkehrsleistung auf. Der Rückgang der gesamten Personenverkehrsleistung ab 2030 geht zu Lasten des motorisierten Individualverkehrs (MIV).

### **Güterverkehr:**

- Die Intensität der Arbeitsteilung nimmt national wie international langfristig weiter zu. Dies führt unmittelbar zu einer Steigerung des Güterverkehrs.
- Die Entwicklung des Straßengüterverkehrs ist mit leicht fallender Tendenz mit der Entwicklung des Bruttoinlandsprodukts korreliert. Der Anteil an der gesamten Güterverkehrsleistung bleibt jedoch konstant (Vor- und Nachlauf von Fernverkehrsfahrten).
- Für den Güterfernverkehr wird angenommen, dass die Transportintensität - gemessen am Nettoproduktionswert des Verarbeitenden Gewerbes - bis etwa 2020 ansteigt. Der Grund hierfür ist die zunehmende Intensivierung der Arbeitsteilung. Langfristig wird ein moderater Rückgang der Transportintensität unterstellt.
- Bezogen auf das BIP resultieren daraus nach 2030 rückläufige Transportintensitäten. Verstärkt wird dieser Effekt durch die zunehmenden Bedeutung des Dienstleistungssektors.
- Bahn und Schiff weisen absolut gesehen Zuwächse auf. Während die Bahn hier auch anteilig gewinnt, geht der Anteil der Schifffahrt im selben Ausmaß zurück. Der Straßengüterfernverkehr wächst entsprechend der gesamten Güterverkehrsleistung.

Bereits unter Status Quo Bedingungen kann der Zuwachs des durch den MIV bedingten Energieeinsatzes in den nächsten zehn Jahren gestoppt werden. Die weiter wachsende Verkehrsleistung (zwischen 1999 und 2010 um mehr als 14%) kann durch Steigerungen der fahrzeugspezifischen Effizienz ausgeglichen werden. Nach 2010 wird das fortgesetzte Wachstum der Verkehrsleistung sogar durch die weiterhin steigende Effizienz überkompensiert. Zwischen 1999 bis 2020 kommt es durch stetige Verbesserungen der Fahrzeugtechnik zu einer jährlichen Verringerung des spezifischen Verbrauchs von PKW um 1,5%/a. Der spezifische Verbrauch sinkt in diesem Zeitraum dabei um fast 30%, der absolute Energieverbrauch allerdings nur um knapp 9%. Nach 2020 macht sich dann der

Rückgang der Verkehrsleistung infolge rückläufiger Bevölkerungszahlen bemerkbar. Der Endenergieverbrauch des Personenverkehrs sinkt bis 2050 auf 66% des Wertes von 1999 (Abbildung 25).



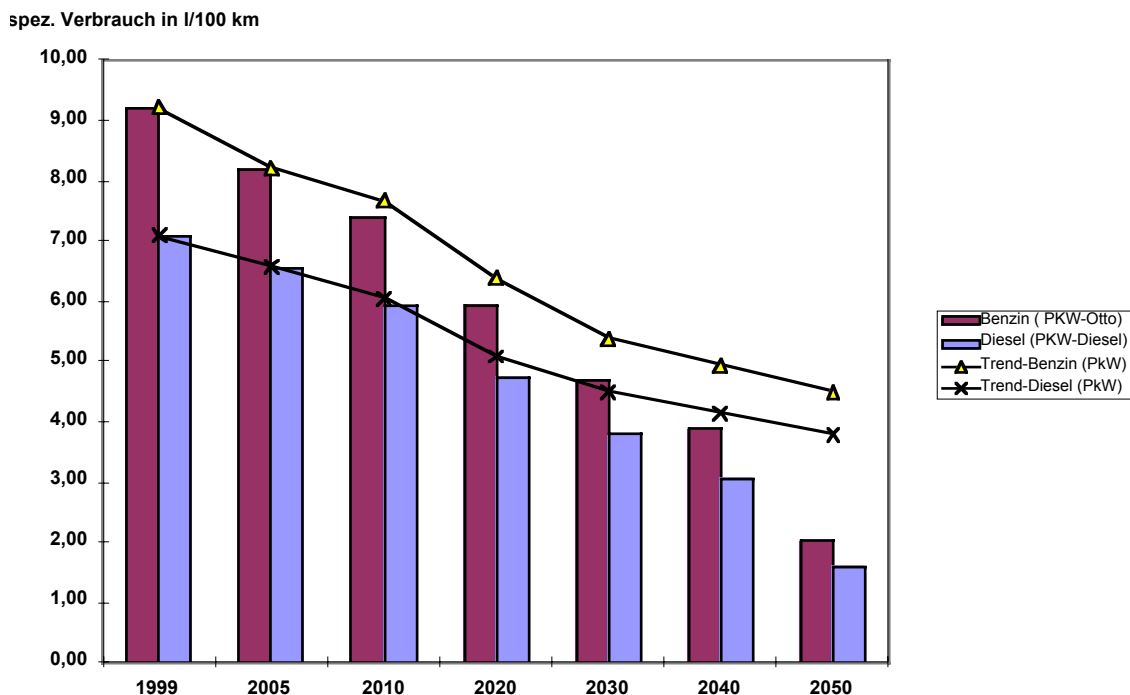
**Abbildung 25: Entwicklung von Verkehrsleistung und Energieverbrauch unter Status Quo Bedingungen**

Deutlich höhere Zuwachsraten des Energieverbrauchs werden für den Güterverkehr erwartet. Nach den vorliegenden Prognosen ist bis zum Jahr 2050 von mehr als einer Verdoppelung des Transportaufkommens auszugehen. Der Endenergieanteil des Güterverkehrs von 30% am gesamten Verbrauch des Verkehrssektors wird sich deshalb in den nächsten Jahrzehnten beträchtlich erhöhen und sich demjenigen des MIV deutlich annähern. Im Jahr 2050 liegt der Endenergieverbrauch mit 1.150 PJ/a um 28% über dem heutigen Wert. Insgesamt sinkt somit, trotz beträchtlicher technologischer Fortschritte, der Energieverbrauch des Verkehrs unter Status Quo Bedingungen bis 2050 nur um 14% auf dann 2 500 PJ/a.

Trotz der bereits deutlichen Verbesserungen der Fahrzeugeffizienz unter Status Quo-Bedingungen 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.

Für eine Abschätzung der Minderungspotenziale im Nachhaltigkeitsszenario wird davon ausgegangen, dass sich der durchschnittliche Verbrauch der Fahrzeugflotte bis zum Jahr 2030 auf (effektiv) 4,7 l/100 km bei Benzin-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 2,0 l/100 km für Benzin- und 1,6 l/100 km für Diesel-Pkw denkbar (**Abbildung 26**). Gegenüber dem heute erreichten Ausgangsniveau erfordert dies eine jährliche Verbesserung des spezifischen Verbrauchs von knapp 3%/a. Dieser Prozess kann noch beschleunigt werden, wenn im Sinne einer allgemeinen Klimaschutzphilosophie die Verkehrsteilnehmer freiwillig verstärkt auf weniger hochmotorisierte (und damit sparsamere) Fahrzeuge umsteigen.



**Abbildung 26: Entwicklung des spezifischen Verbrauchs von PKW (durchschnittlicher Verbrauch im Fahrzeugbestand) im Nachhaltigkeitsszenario**

## 7.2 Neue Kraftstoffe

Ausgehend von der Diskussion um die Einsatzchancen von Brennstoffzellen hat sich in den letzten Jahren auch eine intensive Debatte über neue Kraftstoffe ergeben. Während

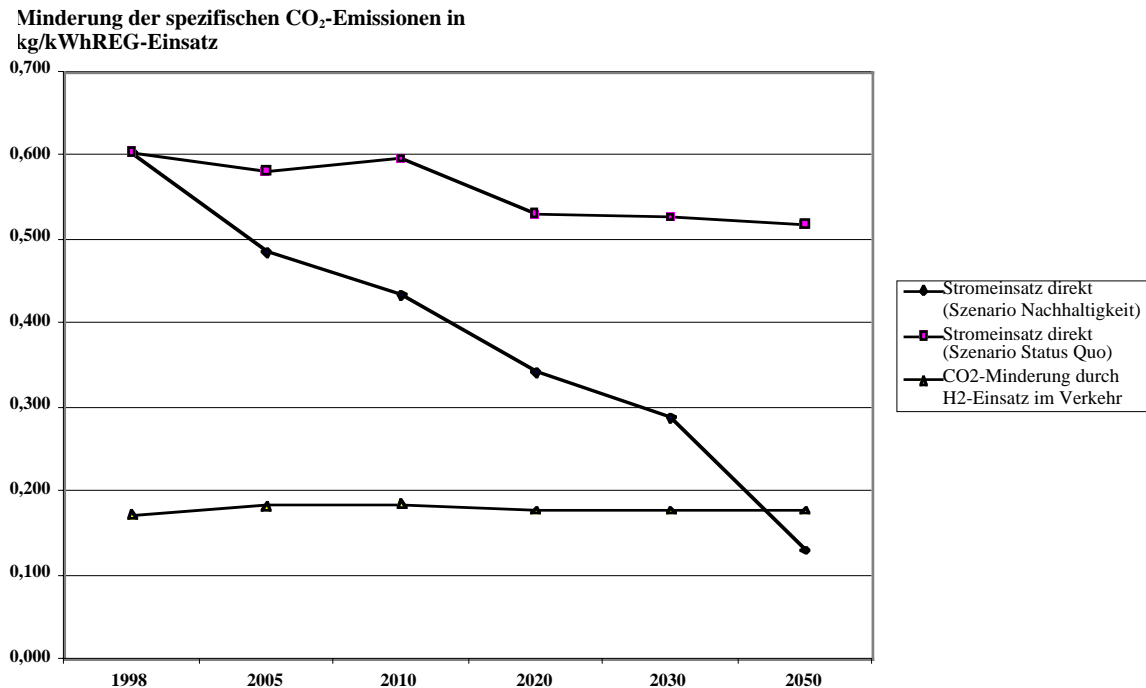
heute nahezu ausschließlich Mineralölprodukte (Benzin, Diesel, Kerosin) die Versorgung sicherstellen, könnten zukünftig vermehrt auch andere Kraftstoffe zum Einsatz kommen. Die Spannbreite reicht hier von Erdgas, synthetischem Benzin (aus Erdgas oder biogenen Energieträgern), Methanol aus Erdgas oder Biomasse und Biodiesel bis hin zu Wasserstoff. Aus heutiger Sicht stellt – auch aufgrund begrenzender Faktoren bei anderen Optionen (z. B. hohe Konkurrenz um die limitierten Biomassepotenziale) - vor allem Erdgas eine viel versprechende Option dar und könnte die Funktion eines „Übergangskraftstoffs“ einnehmen. Einerseits würde hiermit die Versorgungsbasis um einen neuen Energieträger erweitert und entsprechende Abhängigkeiten vom Öl verringert. Andererseits ließe sich der geringere Kohlenstoffgehalt des Erdgas bei ähnlichen oder leicht besseren Antriebswirkungsgraden nutzen. Letztlich könnte mit Erdgas der Einstieg in eine Wasserstoffinfrastruktur vorbereitet werden.

Im Vergleich zu der Entscheidung über den Kraftstoff gerät die Frage über die Wahl des Antriebs (d. h. im Wesentlichen Verbrennungsmotor oder Brennstoffzelle mit Elektromotor) in den Hintergrund. Für die Ökobilanz des gesamten Fahrzyklus ist die Prozesskette des Kraftstoffes die entscheidendere Größe. Im Rahmen der hier gemachten Abschätzungen bleibt – nicht zuletzt wegen der noch verbleibenden Unsicherheiten hinsichtlich der technischen Entwicklungen - daher bewusst offen, welche Anteile der jeweiligen Antriebstechniken in den einzelnen Jahren Verwendung finden.

Langfristig, so die einhellige Meinung der meisten Experten (z. B. Verkehrswirtschaftliche Energiestrategie des Bundes), wird sich Wasserstoff als Kraftstoff durchsetzen, sofern es gelingt ihn auf der Basis erneuerbarer Energien kostengünstig bereitzustellen. Heute und auf absehbare Zeit erscheint es jedoch sinnvoller, den regenerativ erzeugten Strom besser direkt einzusetzen, da hiermit auf absehbare Zeit eine deutlich größere CO<sub>2</sub>-Minderungswirkung erzielt werden kann (**Abbildung 27**). Erst etwa ab dem Jahr 2040 wird regenerativer Wasserstoff „ökologisch konkurrenzfähig“. Umfangreiche Infrastrukturinvestitionen in diesen Sektor sind bis dahin nicht kosteneffizient im Hinblick auf die erzielbaren Einsparungen an fossilen Energien und den Klimaschutz. Der Anteil erneuerbarer Energien hat in dem betrachteten Beispiel im Nachhaltigkeitsszenario in der Stromerzeugung um 2040 die 50% Marke überschritten, der fossile Anteil basiert wesentlich auf dem Einsatz von Erdgas in effizienten KWK-Anlagen, wodurch die Kohlenstoffintensität des durch eine zusätzliche kWh Strom aus erneuerbaren Energien substituierten Stroms deutlich absinkt. Mit einem entsprechenden Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung ist zudem ein Zeitpunkt erreicht, wo Wasserstoff als Speichermedium langsam an Bedeutung gewinnt.

Der flächendeckende Einstieg in die Wasserstoffwirtschaft wird aus den aufgeführten Gründen noch einige Jahrzehnte dauern. Andererseits sind die langen Zeitkonstanten zu beachten, die für den Aufbau neuer Infrastrukturen erforderlich sind. Notwendig erscheint in jedem Fall die Fortsetzung von öffentlich geförderter Forschung und Entwicklung und die Umsetzung von Pilotprojekten. Darüber hinaus sollte der Aufbau von geeigneten Nischenmärkten geprüft werden; die Auswahl dieser Nischen ist jedoch schwierig. Der Öff-

fentliche Personennahverkehr (ÖPNV) erscheint dafür aufgrund des dort bestehenden Kostendrucks ohne massive zusätzliche staatliche Unterstützungen nicht geeignet. Im Hinblick auf den unter Klimaschutzgesichtspunkten besonders problematischen Flugverkehr dürften aufgrund der zentralen Strukturen die infrastrukturellen Probleme zwar am geringsten sein, dafür aber die technisch-ökonomischen Schwierigkeiten besonders hoch liegen. Aufgrund der klimarelevanten Wasserdampfemissionen in hohen Luftschichten kommt zudem nur ein Einsatz im innerdeutschen Luftverkehr in Frage.



**Abbildung 27: Spezifische Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch den Einsatz von Strom aus erneuerbaren Energien**

Von entscheidender Bedeutung erscheint demnach, wie die Übergangszeit in ein derzeit noch nicht terminierbares Wasserstoffzeitalter gestaltet werden kann. Die Grundsatzentscheidung für den Übergangsenergieträger im Verkehr „nach Benzin und Dieselkraftstoff“ wird aller Voraussicht zwischen Methanol und Erdgas fallen. Aus heutiger Sicht könnte Erdgas diese Schlüsselfunktion zukommen. Als bereits eingeführter Energieträger sind sowohl die Infrastrukturveränderungen im Verhältnis zu Methanol geringer einzuschätzen als auch die zu erwartenden Akzeptanzprobleme.

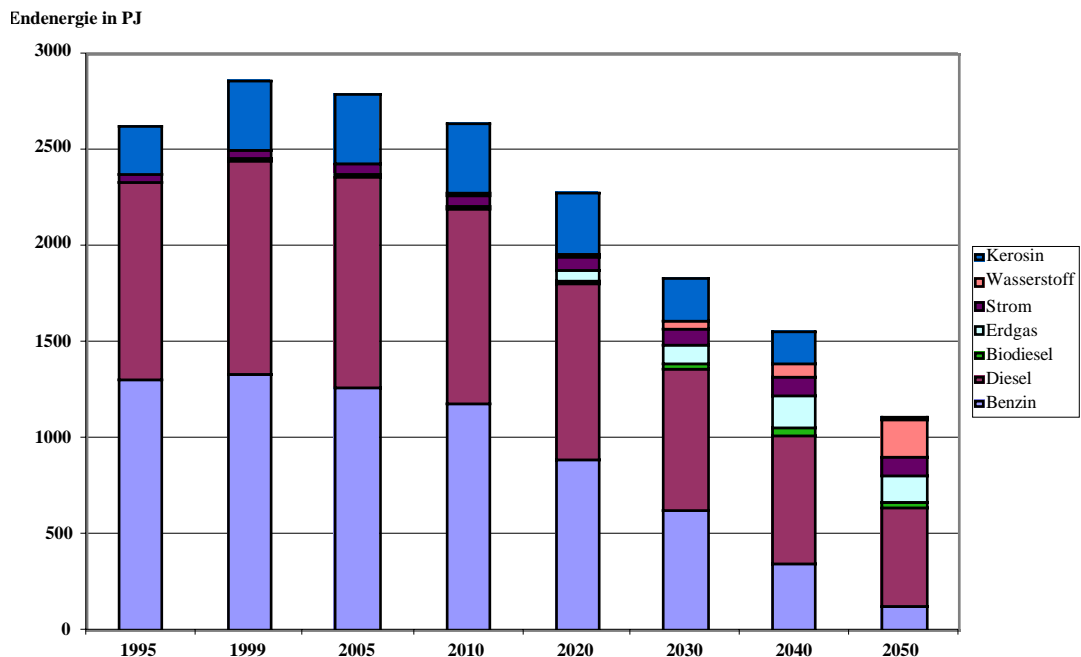
Aber auch aus energetischen und damit letztendlich ökologischen Gründen macht ein Einsatz von Erdgas im Vergleich zu Methanol Sinn. Betrachtet man nur die reinen kraftstoffbezogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen und lässt Unterschiede in der Effizienz der Antriebssysteme zunächst unberücksichtigt, weist der direkte Einsatz von Erdgas eine um rund 25% geringere CO<sub>2</sub>-Intensität auf als der Umweg über die Umwandlung von Erdgas in Methanol. Methanol hat dann Vorteile gegenüber Erdgas, wenn es auf der Basis erneuerbarer Energien bereitgestellt werden kann, also z. B. aus Biomasse oder aus elektrolytisch hergestelltem Wasserstoff. Hierfür sind die Potenziale aber begrenzt bzw. liegen verschiedene

Konkurrenzbeziehungen (z. B. in Bezug auf eine Ausweitung des ökologischen Landbaus) vor, die die Anbaumöglichkeiten von Raps oder anderen Energiepflanzen beschränken.

Als Zwischenfazit lässt sich festhalten:

- langfristig ist die Bereitstellung von Kraftstoffen notwendig, die in einem erheblichen Maße auf erneuerbaren Energien basieren, wenn auch im Verbrauchssektor Verkehr eine den Nachhaltigkeitszielen adäquate Minderung der Treibhausgasemissionen erreicht werden soll,
- kurz – bis mittelfristig ist der Einsatz von erneuerbaren Energien in anderen Bereichen (vor allem der Stromerzeugung) hinsichtlich des hiermit verbundenen Minderungseffektes aber effizienter. Aus Vorsorgegründen sollte aber auch in dieser Zeitspanne nicht vollständig auf den Einsatz von erneuerbaren Energien im Verkehr verzichtet werden, sondern die notwendigen Optionen offen gehalten werden,
- für den in den nächsten Dekade notwendigen Minderungsbeitrag des Sektors Verkehr ist die Ausschöpfung der Effizienzpotenziale von weit größerer Bedeutung als die Diskussion um neue Kraftstoffe. Eine nachhaltige Reduzierung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs schafft überhaupt erst die notwendigen Voraussetzungen für ihren vernünftigen Einsatz im Fahrzeug (man denke u.a. an die so erst sinnvoll mögliche Speicherung von Wasserstoff an Bord) und den Auf- und Ausbau einer teuren neuen Infrastruktur,
- die Implementierungshürden für den Aufbau einer neuen Verkehrsinfrastruktur sind hoch (Kosten, Akzeptanz, Technologie) und sie bedürfen eines ausreichenden Vorlaufes. Sie müssen aber dennoch mittelfristig überwunden werden. Dies erfordert eine möglichst frühzeitige (europaweite) konsensuale Festlegung auf einen gangbaren Weg und auf die zielorientierte Auswahl von Übergangsstrategien, um „stranded investments“ zu vermeiden und zusätzliche Hürden durch langlebige teure Strukturen erst gar nicht aufkommen zu lassen.

Die aus diesen Überlegungen abgeleitete Veränderung des Kraftstoffmixes prägt die Struktur des Nachhaltigkeitsszenarios (**Abbildung 28**).



**Abbildung 28: Entwicklung des Endenergiebedarfs für Verkehr und seiner Struktur im Nachhaltigkeitsszenario**

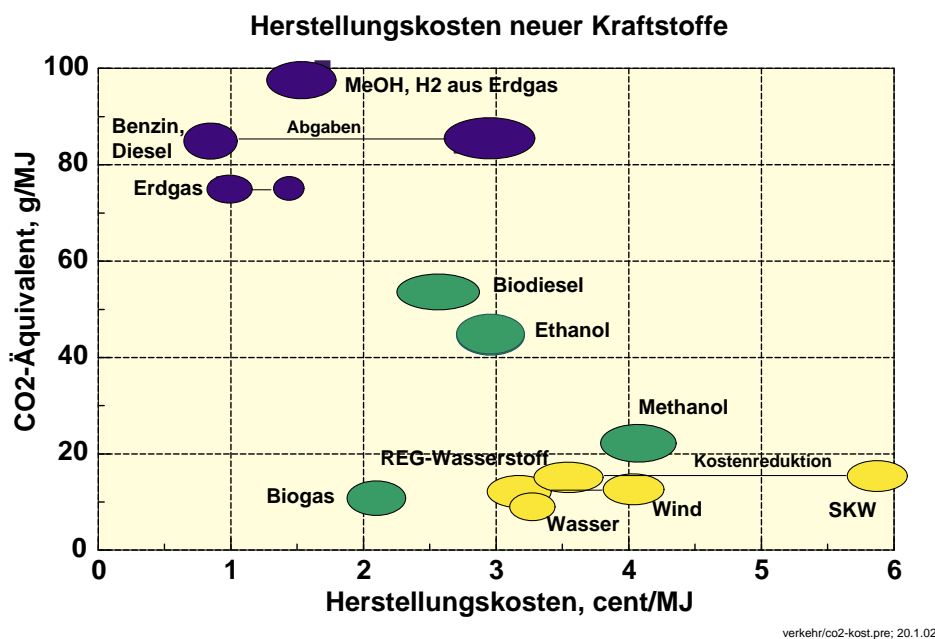
Im Wesentlichen sind zwei Trends zu erkennen. Zum einen erhöht sich der Anteil von Diesel im Zuge der wachsenden Bedeutung des Güterverkehrs im Vergleich zum Personenverkehr. Zum zweiten verliert Benzin durch die Einführung neuer Kraftstoffe, zunächst Erdgas und dann später Wasserstoff, weiter an Bedeutung. Sein Anteil sinkt von 47% in 1999 über 39% in 2020 auf noch 12% im Jahr 2050. Im gleichen Zeitverlauf erhöht sich der Beitrag von Erdgas über 2,5% im Jahr 2020 und 5,2% im Jahr 2030 auf 12,6% im Jahr 2050. Wasserstoff trägt am Ende des Betrachtungszeitraum bereits mit 17,5% zur Abdeckung der Nachfrage nach Kraftstoffen bei, gewinnt insgesamt aber erst ab 2030 mit einem Anteil von 2% energiewirtschaftliche Bedeutung. Im Vergleich zu anderen Ländern ist Deutschland in Bezug auf die Wasserstoffnutzung kein Vorreiter, sondern könnte von den andernorts gemachten Erfahrungen (z. B. Island) profitieren. Allerdings käme Deutschland sicher in der Technologieentwicklung eine besondere Rolle zu.

### 7.3 Kosten von Kraftstoffen auf regenerativer Basis

Wie im Strom- und Wärmebereich ist die Bereitstellung emissionsarmer Energie aus erneuerbaren Energien auch im Verkehrsbereich derzeit noch teurer als aus fossiler Primärenergie, wo Herstellungs- und Vertriebskosten zusammen 0,8 bis 0,9 cent/MJ ausmachen (**Abbildung 29**). Zwar ist das emissionsarme Biogas mit dem Faktor 2 in der Bereitstellung noch relativ günstig, es ist aber potenzialseitig unbedeutend. Biodiesel und Ethanol erfordern für eine Halbierung der spezifischen Emissionen die etwa dreifachen Herstellungskosten. Methanol aus Restholz mit niedrigem Emissionsniveau um 20 g CO<sub>2</sub>-Äquivalent/MJ verursacht Herstellungskosten um 4 cent/MJ (bei der Herstellung aus E-

nergiepflanzen steigen sowohl die Kosten wie – unter Berücksichtigung aller relevanten Treibhausgase - die Emissionshöhe).

Die niedrigsten klimarelevanten Emissionen um 10 – 15 g CO<sub>2</sub>-Äquivalent/MJ bewirkt elektrolytisch erzeugter Wasserstoff wenn die Energiequelle regenerativer Strom ist. Wird auch in der Vorkette (Anlagenerstellung, Transport, Verdichtung, Verflüssigung) zunehmend erneuerbare Energie eingesetzt, so gehen diese Emissionen gegen Null. Derzeit erlaubt es nur der Einsatz von kostengünstigem Wasserkraftstrom (z.B. Island, Norwegen) und Windstrom in den Kostenbereich von Biomasse-Kraftstoffen vorzustoßen. Mit Strom aus solaren Kraftwerken würde Wasserstoff in den nächsten Jahren für Großabnehmer in Deutschland rund 6 cent /MJ kosten. Mit den noch möglichen erheblichen Kostenreduktionspotenzialen kann längerfristig Windwasserstoff zu Kosten von 3 cent/MJ und Solarwasserstoff zu 3,5 cent/MJ bereitgestellt werden. Die Herstellungskosten erreichen somit Werte, die nahezu den heutigen Verkaufspreisen von Benzin entsprechen.



**Abbildung 29: Klimarelevante Emissionen und Herstellungskosten von Kraftstoffen (Herkömmliche Kraftstoffe mit und ohne Abgaben; Biodiesel = Verkaufspreise; REG-Wasserstoff derzeitige und längerfristig erreichbare Herstellungskosten)**

Auf den ersten Blick scheinen die in Abbildung 29 dargestellten Kostenbarrieren unüberwindbar zu sein. In der Einführungsphase ermöglichen aber die auf konventionellen Kraftstoffen ruhenden hohen Abgaben in Verbindung mit einer finanziellen Förderung der Neukraftstoffe (z.B. Flächenstilllegungsprämien für Biomassekraftstoffe) den erforderlichen Markteinstieg. Dies wird heute z.B. durch eine reduzierte Mineralölsteuer für Erdgas praktiziert und auch Dieselmotoren sind steuerlich deutlich günstiger als Benzin gestellt.

Biodiesel ist vollständig von der Mineralölsteuer und der Ökosteuer befreit. Überschreiten die so geförderten Kraftstoffe jedoch mengenmäßig eine bestimmte Größenordnung, so machen sich für den Staat merkliche Einnahmeverluste aus der zurückgehenden Mineralölsteuer bemerkbar, die anderweitig kompensiert werden müssten. Eine völlige Steuerfreiheit klimaverträglicher Kraftstoffe kann es daher auf Dauer nicht geben. Auch die neuen Kraftstoffe müssen sich in einem hinreichenden Zeitfenster im Wettbewerb behaupten können.

Allerdings bestehen für eine mittelfristige Erhöhung der Steuern auf konventionelle Kraftstoffe noch Spielräume. Ein maßvoller Anstieg von Kraftstoffpreisen wie er in der ökologischen Steuerreform bisher realisiert worden ist (jährliche Steigerung von 3 cent/l) würde weitere Anreize zu einer Verringerung des spezifischen Verbrauchs leisten und bei einer entsprechenden sozialverträglichen Ausgestaltung auch kompatibel zum Leitbild der Nachhaltigkeit umgesetzt werden können. Dies gilt umso mehr als die Kraftstoffpreise in der Vergangenheit deutlich geringer als die privaten Einkommen und auch viele Preise anderer Verbrauchsgüter gestiegen sind. Zum einen können im Zuge der Weiterentwicklung der Öko-Steuer daher die Abgaben auf Kraftstoffe generell erhöht werden, zum anderen können jetzige Vergünstigungen, wie die geringere Besteuerung von Dieselmotoren und die längst fällige Besteuerung von Flugtreibstoffen bereinigt werden. Dies schafft Freiräume für die Besserstellung von neuen Alternativen. Längerfristig könnte sich daher ein „verträgliches“ Kostenniveau für Kraftstoffe einpendeln, das beim 1,5 bis 2-fachen des heutigen Preisniveaus von Kraftstoffen liegt. Damit wäre eine Umgestaltung des Verkehrsbereichs in die hier diskutierte Richtung vorstellbar. Zugleich würden im erheblichen Umfang Anreize entstehen, sparsame Autos nicht nur zu entwickeln, sondern auch einzusetzen. Bei einem auf 40% gegenüber heute reduziertem Kraftstoffgesamtverbrauch im Jahr 2050, wie er im Rahmen der hier für das Nachhaltigkeitsszenario getroffenen Annahmen für möglich und notwendig gehalten wird, wäre die absolute finanzielle Belastung der Verkehrsteilnehmer durch den Kauf von Kraftstoffen geringer als heute.

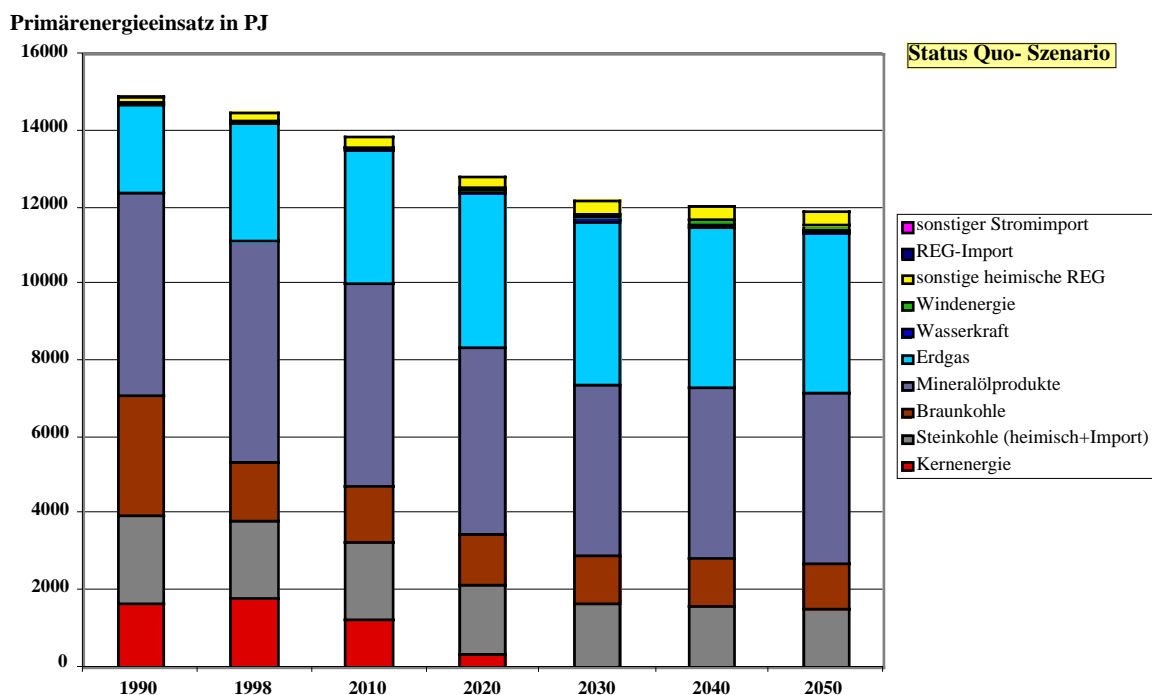
## 8. Energiewirtschaftliche Implikationen

In den Szenarien Effizienz und Nachhaltigkeit kommt es zu teilweise stark ausgeprägten Veränderungen des Energiesystems. Zu den daraus resultierenden energiewirtschaftlichen Implikationen gehören vor allem die Veränderungen des Primärenergieeinsatzes in Höhe und Zusammensetzung, die hierdurch bedingte Veränderung der Importabhängigkeit und Versorgungssicherheit, Mehr- oder Minderkosten, die mit dem Beschreiten der Zukunftspfade verbunden sind, Auswirkungen auf den Arbeitsmarkt und potenzielle Konfliktfelder mit vorliegenden Entwicklungstendenzen, die den Zukunftspfaden entgegenstehen könnten.

### 8.1 Entwicklung des Primärenergiebedarfs

Bereits unter Status Quo-Bedingungen kommt es zu einem Rückgang der Primärenergie-nachfrage (**Abbildung 30**). Hierzu trägt die Produktivitätssteigerung auf der Seite der

Endenergieanwendungen ebenso bei, wie spezifische Verbesserungen in den verschiedenen Bereitstellungsstufen der Endenergieträger. Während der Endenergieeinsatz im betrachteten Zeitverlauf (1998 bis 2050) allerdings lediglich um rund 6% zurückgeht, reduziert sich der Primärenergieeinsatz um etwa 18%. Dies ist einerseits auf Produktivitätssteigerungen bei der Stromerzeugung (insbesondere KWK) zurückzuführen, andererseits auch auf die andersartige primärenergetische Bewertung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien im Rahmen der statistisch anzuwendenden Wirkungsgradmethode. Beim Primärenergiemix sind, mit Ausnahme des sukzessiven Ausstiegs aus der Kernenergie, keine großen strukturellen Umbrüche festzustellen. Bei leichtem absoluten Rückgang verstärken fossile Energien sogar noch ihre Bedeutung als Basis der Energieversorgung. Mineralöle sind im gesamten Zeitverlauf der bedeutendste Energieträger. Eine Verschiebung findet zwischen Stein- und Braunkohle einerseits und Ergas andererseits statt, wobei Letzteres seinen absoluten Beitrag nahezu verdoppelt. Erneuerbare Energien steigen dagegen nur geringfügig, sie tragen im Jahr 2050 lediglich zu knapp 5% zur Deckung der Primärenergienachfrage bei. Damit werden die gesetzten Nachhaltigkeitsziele unter Status Quo Bedingungen deutlich verfehlt. So sinken die CO<sub>2</sub>-Emissionen beispielsweise bis 2020 lediglich auf 98% und bis 2050 auf 82% des Niveaus des Jahres 1999.



**Abbildung 30: Veränderung der Primärenergienachfrage und seiner Struktur im Status Quo-Szenario**

Im Effizienz-, besonders jedoch im Nachhaltigkeitsszenario stellen sich dagegen deutliche Veränderungen ein. In letzteren wird mit 54% mehr als die Hälfte des heutigen Primärenergieeinsatzes eingespart (**Abbildung 31**). Die endenergie seitige Energieeinsparung liegt bei 45%, wobei der Stromverbrauch mit 20% deutlich weniger abnimmt. Elektrische Anwendungen werden im Verhältnis zu den Anderen bedeutsamer.

Der deutliche Rückgang der Energienachfrage beruht auf einer mittleren jährlichen Produktivitätssteigerungsrate, bezogen auf das Bruttoinlandsprodukt, von 2,85%/a. Damit wird die Primärenergie im Nachhaltigkeitsszenario im Jahr 2050 mehr als viermal so effizient genutzt wie heute. Ein Vergleich mit der Produktivitätssteigerungsrate in der Status Quo Entwicklung von 1,75%/a zeigt die damit verbundenen großen Herausforderungen an die Energiepolitik. Eine derartige Entwicklung ist nur zu erreichen, wenn die Energieeinsparung zu einem neuen zentralen Faktor der Energiepolitik wird. Auch bezogen auf den spezifischen Energieeinsatz pro Kopf ergeben sich im Zeitverlauf deutliche Veränderungen. Während im Jahr 1998 der pro Kopf Energieverbrauch noch bei 176 GJ/Kopf lag, reduziert sich der Durchschnittsverbrauch im Nachhaltigkeitsszenario im Jahr 2030 (2050) auf 112 GJ/Kopf (98 GJ/Kopf).

Im Nachhaltigkeitsszenario verlieren die fossilen Energien bis 2050 zwar nicht ihre dominierende Rolle, ihr absoluter Beitrag verringert sich jedoch auf 30% des heutigen Wertes. Zudem erfolgt ein Wechsel unter den fossilen Energieträgern. Nur Erdgas behält seinen absoluten Beitrag – nach einer Zunahme in den Jahren 2020 bis 2030 – und wird zur Mitte des Jahrhunderts mit 36% Anteil zum wichtigsten Einzelenergieträger. Steinkohle verliert deutlich an Gewicht, ihr Einsatz beschränkt sich im Wesentlichen noch endenergiebedingt auf die Stahlerzeugung, Braunkohle wird praktisch nicht mehr eingesetzt. Dafür tragen mit fast einem Drittel (31,3%) heimische erneuerbare Energiequellen und zusätzlich zu 4,6% der Stromimport aus erneuerbaren Energien zur Deckung der Energienachfrage bei. Entsprechend sind die CO<sub>2</sub> – Emissionen auf 24% des Wertes von 1998 gesunken, was einem Rückgang auf rund 20% des Bezugswerts von 1990 entspricht. In Tabelle 5 sind die wichtigsten Indikatoren des Nachhaltigkeitsszenarios – auch im Vergleich zur Referenzentwicklung der Enquete Kommission „Nachhaltige Energieversorgung“ – zusammengefasst.

**Tabelle 5: Wesentliche Indikatoren zur Charakterisierung der Entwicklung der Energieversorgung entsprechend dem Nachhaltigkeitsszenario im Vergleich (PEV = Primärenergieverbrauch; FOS = Primärenergieeinsatz fossiler Energien; END = Endenergieverbrauch; BIP = Bruttoinlandsprodukt)**

	PEV/ Kopf	Strom/ Kopf	FOS	CO <sub>2</sub>	REG/ END	PEV/ BIP	Strom/ BIP
	GJ/a	GJ/a	1999 =100	1999 =100	%	GJ/ TDM	GJ/TDM
Status 1999	173	20,7	100	100	2,0	3,81	0,46
Status Quo 2020 (Prognos /EWI 2000)	166	22,7	104	98	5,3	2,45	0,34
Referenz 2050 (Prognos/IER 2001)	165	25,9	81	82	10,0	1,48	0,23
<b>Szenario Nachhaltigkei- tigkeit 2050</b>	<b>98</b>	<b>20,3</b>	<b>34</b>	<b>24</b>	<b>43,0</b>	<b>0,88</b>	<b>0,18</b>

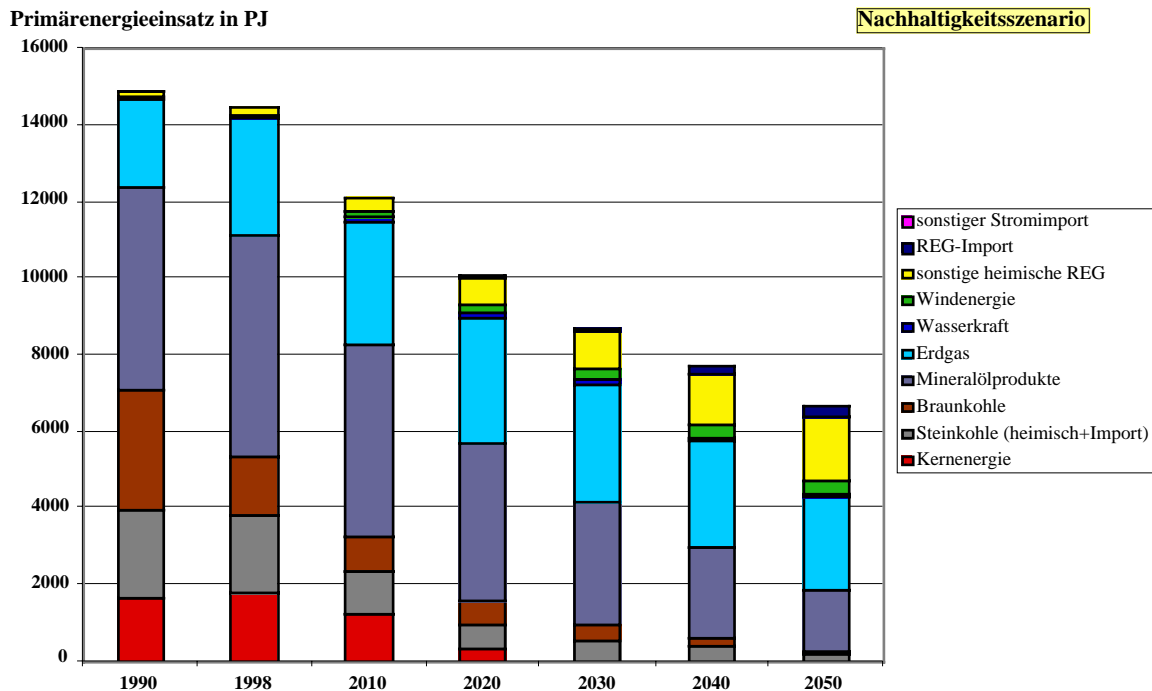


Abbildung 31 : Veränderung der Primärenergienachfrage und seiner Struktur im Nachhaltigkeitsszenario

## 8.2 Versorgungssicherheit und Importabhängigkeit

Die heimischen Energieträger Stein- und Braunkohle werden im Nachhaltigkeitsszenario besonders stark reduziert. Dies stellt jedoch keine Gefährdung unserer Versorgungssicherheit dar. Wie **Abbildung 32** verdeutlicht, kann Klimaschutz im Gegenteil sogar als aktive Krisensicherung verstanden werden, weil durch den absoluten Rückgang des Primärenergieverbrauchs und den verstärkten Ausbau erneuerbarer Energien die Nachfrage nach importierten Energieträgern zurückgeht. Von derzeit 25,6% in Deutschland selber bereitgestellter Primärenergie sinkt dieser Anteil in der Status Quo Entwicklung bis 2020 auf 22% und im Effizienzzenario auch auf 23%. Bei dieser Rechnung wurde unterstellt, dass sich der heimische Steinkohlenanteil entsprechend der absehbaren Entwicklung der Steinkohlesubventionen von über 28 Mio. t SKE im Jahr 2010 auf rund 17 Mio. t SKE im Jahr 2020 verringern wird.

Im Nachhaltigkeitsszenario erhöht sich dagegen der heimische Anteil an der Energieversorgung durch den weiteren Ausbau erneuerbarer Energien, und dies trotz des signifikanten Anteils des Stromimportes aus erneuerbaren Energien bis 2050 auf 33,5%. Im gleichen Zeitraum erhöht sich die Abhängigkeit von Drittländern unter Status Quo-Bedingungen auf knapp 80% (im Effizienzzenario auf 77%). Rechnet man die Energieeinsparung als indirekte heimische Energiequelle (schließlich ist de facto eine geringere Energiemenge zu importieren) mit ein, werden allein im Jahr 2020 im Nachhaltigkeitsszenario rund 2.700 PJ bzw. fast 94 Mio. T SKE weniger Energie aus anderen Ländern nach Deutschland eingeführt als unter Status Quo-Bedingungen. Das ist immerhin fast 20% des gesamten heutigen

Primärenergieeinsatzes und mehr als 25% des heutigen Energieimportes. Gleichzeitig leisten erneuerbare Energien und das Energieeinsparen auch einen wichtigen Beitrag zur Diversifizierung des Energieangebotes. Sie ergänzen damit den mit den Klimaschutzanforderungen noch kompatiblen heimischen Kohlesockel und die Einfuhr von Erdgas und Erdöl aus dem Ausland.

Aufgrund des insgesamt gegenüber heute und der Status Quo Entwicklung starken Entkopplung von den fossilen Energieträgern ist das Nachhaltigkeitsszenario weniger stark anfällig gegenüber Energieträgerpreisschwankungen. Von der unter Status Quo-Bedingungen angenommenen sehr moderaten Verteuerung der Energieträgerpreise abweichende Entwicklungen führen für das Nachhaltigkeitsszenario zu weniger starken Auswirkungen wie für den Status Quo-Fall. Dass solche Entwicklungen nicht ausgeschlossen sind, ist angesichts der knapper werdenden Ressourcen und der zunehmenden Annäherung an den „mid depletion“ - Punkt (d. h. den Punkt ab dem die jährlichen Fördermengen rückläufig werden) evident. Gleichmaßen bestehen nicht unerhebliche geopolitische Risiken durch die verstärkte Konzentration der verbleibenden Reserven von Erdöl und Erdgas auf immer weniger, zumeist politisch wenig stabile Regionen. Erneuerbare Energiequellen sind dagegen regional weit verteilt verfügbar. Die Einfuhr von Strom aus erneuerbaren Energien führt dementsprechend zu keinen vergleichbaren Abhängigkeiten. Im Gegenteil bietet der Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien (und ihr späterer Export) in Ländern mit heute hohen fossilen Energieexporten die Möglichkeit eines friedlichen und wirtschaftlich profitablen Übergangs. Für andere Länder ergeben sich – unter der Voraussetzung, dass zunächst die eigenen Energieprobleme gelöst werden - hierdurch neue Geschäftsfelder und zusätzliche Optionen zur Devisenbeschaffung.

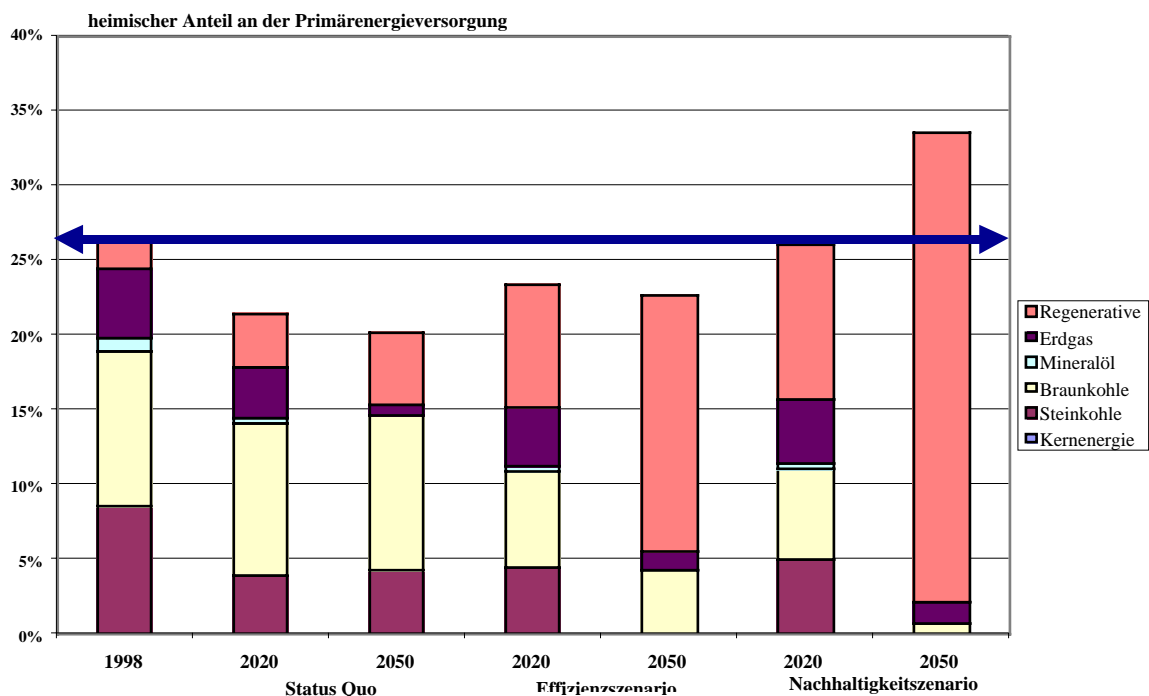


Abbildung 32 : Entwicklung des heimischen Primärenergieanteils im Szenariovergleich

### 8.3 Gesamtwirtschaftliche Auswirkungen

Bilanziert man die jährlichen Mehraufwendungen, die im Rahmen des Nachhaltigkeitszenarios gegenüber einer Status Quo Entwicklung entstehen (dies sind vor allem Zusatzinvestitionen in Energieeinsparmaßnahmen und erneuerbare Energien) und stellt sie den vermiedenen Aufwendungen (eingesparte Brennstoffkosten und vermiedene Investitionen in konventionelle Anlagen) gegenüber, resultieren für das Nachhaltigkeitszenario bis zum Ende des Betrachtungszeitraums (2000 bis 2050) **Differenzkosten von kumuliert rund 201 Mrd. EUR (kumuliert und auf das Jahr 1998 abdiskontiert ergeben sich Differenzkosten von 40 Mrd. EUR)**. Die durchschnittlichen Zusatzkosten für die Volkswirtschaft können demnach auf im Mittel **3,8 Mrd. EUR/a**, also etwa 0,12% des mittleren BIP in diesem Zeitabschnitt, quantifiziert werden. Bezogen auf die Gesamtbevölkerung entspricht dies **einer jährlichen Mehrbelastung von im Mittel 48 EUR/(Person/a)**. Dabei wurde gemäß des Analyserasters der Enquête-Kommission von nur moderaten Energiepreisanstiegen, wie sie auch in der Status Quo-Entwicklung angenommen wurden, ausgegangen. Trotz der – auch im Vergleich zu anderen Verbrauchsgütern eher moderaten Preisannahmen für die Energieträger – kann für die ersten beiden Dekaden aufgrund des starken Fokus auf der Durchführung von wirtschaftlichen Einsparmaßnahmen in der Gesamtbilanz sogar von negativen Kosten gegenüber der Referenzentwicklung ausgegangen werden. Wenn jedoch die kostengünstigen Investitionen in Einsparmaßnahmen allmählich ausgeschöpft sind und gleichzeitig die steigenden Investitionen in erneuerbare Energien wirken, steigen die Differenzkosten entsprechend an (**Abbildung 33**).

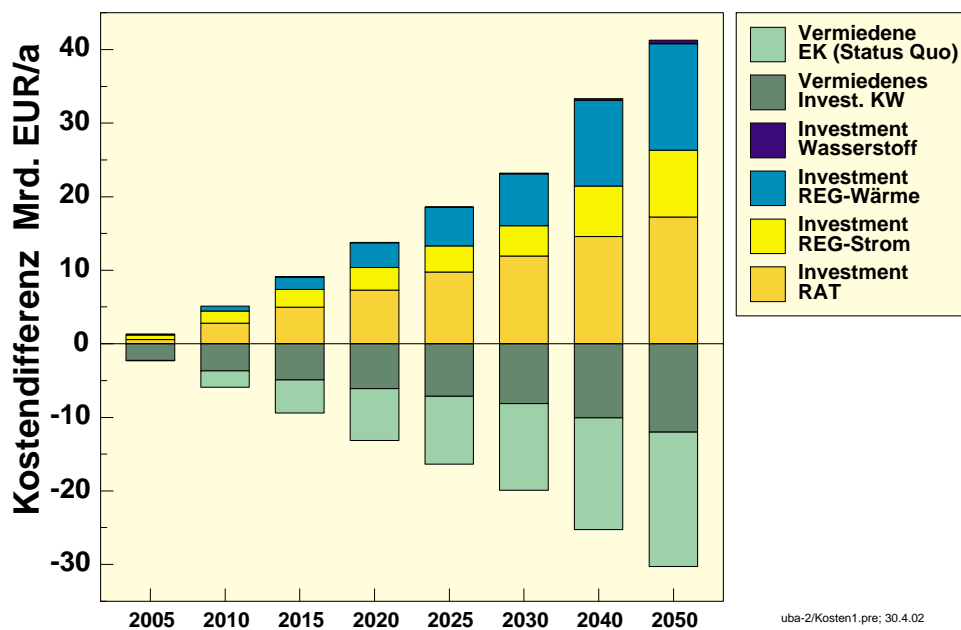
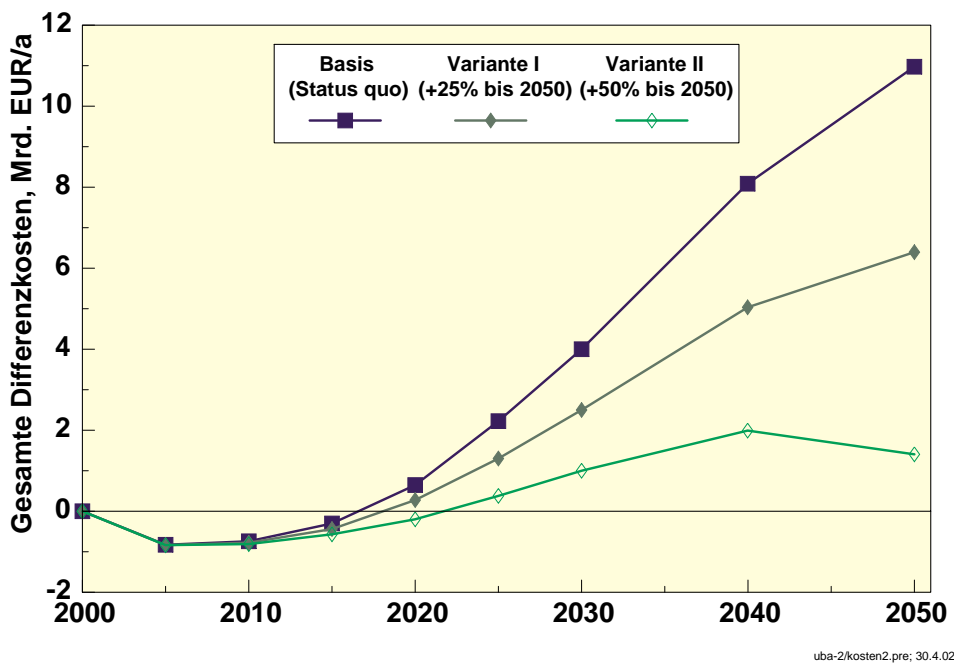


Abbildung 33: Aufteilung der Kostendifferenz zwischen Nachhaltigkeits- und Status Quo-Szenario auf verschiedene Kostengruppen in den jeweiligen Jahren bis 2050 (Energiepreisszenario Status Quo; EK = Energiekosten; KW = Kraftwerke und Heizanlagen; RAT = Rationelle Energienutzung; REG = erneuerbare Energien)

Welchen Verlauf die Differenzkosten nach 2030 nehmen, hängt von der antizipierten Energiepreisentwicklung ab. Steigen die Energiepreise stärker als in der Status Quo-Entwicklung unterstellt – wovon mit gewisser Wahrscheinlichkeit ausgegangen werden kann – und/oder werden mittels geeigneter Instrumente die externen Kosten die Marktpreise von Energie aufgenommen, so unterschreiten die Differenzkosten weiterer Einsparoptionen und auch einer Vielzahl von Technologien aus dem Bereich erneuerbarer Energien die Nulllinie. Gegen 2050 ist das Nachhaltigkeitszenario in höheren Preisvarianten, als im Analyseraster der Enquête-Kommission angenommen, insgesamt kostengünstiger als eine auch dann noch auf fossilen Energien beruhende Status-Quo-Entwicklung. Abbildung 34 zeigt den Verlauf der gesamten Differenzkosten der Basisvariante (Status Quo-Kosten) im Vergleich zu zwei Varianten, bei denen die Preise für fossile Energieträger im Jahr 2050 um 25% (Variante I) bzw. um 50% (Variante II) höher sind als in der Basisvariante. Die durchschnittlichen Zusatzkosten zwischen 2000 und 2050 verringern sich entsprechend auf 1,8 Mrd. EUR/a (Variante I) bzw. auf lediglich 0,3 Mrd. EUR/a (Variante II). In dieser Variante ist auch ersichtlich, dass die jährlichen Differenzkosten ihr Maximum um 2040 überschreiten und danach gegen Null tendieren.



**Abbildung 34: Gesamte Kostendifferenz zwischen Nachhaltigkeits- und Status Quo-Szenario für drei unterschiedliche Verläufe der zukünftigen Preise fossiler Energieträger (Basis: Analyseraster Enquête-Kommission sowie demgegenüber Variante + 25 % bzw. + 50%)**

Die resultierende jährliche Mehrbelastung der Volkswirtschaft liegt damit in einem Bereich der in energiewirtschaftlichen Zusammenhängen nicht unüblich ist (**Tabelle 6**). Sie werden zudem durch andere Modellrechnungen der jüngeren Vergangenheit bestätigt (vgl. Modellexperiment 2000 des BMWi). Jedoch zeigen sich gegenüber dem Energiebericht des Bundeswirtschaftsministeriums deutliche Abweichungen, was vor allem auf die dort

durchgeführte methodische Überschätzung der Einsparkosten (keine sektorübergreifende Betrachtung, Übergewichtung des Verkehrs) zurückzuführen ist.

**Tabelle 6: Vergleichende Bewertung der resultierenden Mehrkosten**

<b>Mehraufwendungen Klimaschutz (1998-2050)</b>	<b>201 Mrd. EUR</b>
<b>Mittlerer jährlicher Mehraufwand</b>	<b>3,8 Mrd. EUR/a</b>
<b>(Bandbreite in Abhängigkeit Energieträgerpreise)</b>	<b>(0,3 – 1,8 – 3,8 Mrd. EUR/a)</b>
<b>Mehraufwand Pro-Kopf</b>	<b>48 EUR/(Person*a)</b>
Steinkohlesubventionen (2000-2005)	2 -3,5 Mrd. EUR/a
Einnahmen Ökosteuern (2001-2003)	12 – 17,5 Mrd. EUR/a
- davon nur Stromsteuer	4 – 5.5 Mrd. EUR/a
100.000 Dächerprogramm	0,1 Mrd. EUR/a
Erneuerbare Energien Gesetz (EEG)	0,4 Mrd. EUR/a
<b>Kumulierte Differenzkosten bis 2020</b>	
Szenario Nachhaltigkeit	- 7,4 Mrd. EUR
Modellexperiment 2000	25 – 80 Mrd. EUR
BMWi-Energiebericht	250 Mrd. EUR

Und wie sieht es mit der Arbeitsplatzwirksamkeit der skizzierten Entwicklung aus? Hierzu konnten zwar keine eigenen Rechnungen gemacht werden, ein Blick auf die Ergebnisse vorliegender Modellrechnungen zeigt aber, dass keine signifikanten negativen Auswirkungen auf den **Arbeitsmarkt** im Rahmen einer Klimaschutzentwicklung zu erwarten sind. Allerdings halten sich auch errechnete positive gesamtwirtschaftliche Wirkungen in einem relativ geringen Rahmen. Wichtiger als die nur mit großer Unsicherheit bestimmbare absolute Anzahl möglicher zusätzlicher Arbeitsplätze ist die Tatsache, dass es mit der Umsetzung derart vielfältiger Maßnahmen, wie sie für das Nachhaltigkeitsszenario beschrieben worden sind, sowohl Gewinner- als auch Verliererbranchen geben wird. Als Beispiele für Gewinner lassen sich die Bauwirtschaft und die Unternehmen im Bereich erneuerbarer Energien aufführen, als Verlierer gilt die Kohlewirtschaft.

Der **Bauwirtschaft**, die derzeit wieder besonders von der Konjunkturflaute betroffen ist, bieten sich im Nachhaltigkeitsszenario hervorragende Ausgangsbedingungen für sinnvolle Investitionen zum Abbau der Arbeitslosigkeit. Die im Szenario vorgeschlagene Strategie verspricht eine klassische „win-win-Situation“ von der alle Seiten profitieren können. Gerade in Zeiten von Konjunkturreinbrüchen können Investitionen und wirksame Investitionsförderungen des Staates eine Stabilisierung des Bausektors bewirken und so sehr viele Arbeitsplätze sichern. Eine durch den Klimaschutz motivierte Sanierungsoffensive ist in diesem Sinne auch ein wichtiges Beschäftigungsprogramm. Diese Erkenntnis ist in der Wissenschaft fest etabliert. Verschiedene wissenschaftliche Untersuchungen weisen für die Bauwirtschaft unter Klimaschutzbedingungen – je nach Rahmenannahmen - positive

Beschäftigungseffekte zwischen 85.000 und 205.000 Beschäftigten aus. Der Grund für die relativ große Einmütigkeit in dieser Frage liegt u.a. in der Struktur der Bauwirtschaft. Da hier – und vor allem im Ausbau- und Isolationsgewerbe, die von einer Klimaschutzstrategie besonders profitieren würden – eine stark mittelständisch und regional geprägte Struktur vorliegt, werden Investitionen zu einem großen Teil in der Region wirksam. Der Anteil importierter Vorleistungen ist relativ gering. Hinzu kommt eine hohe Arbeitsintensität im Bausektor. Von jedem Euro der hier investiert wird fallen zwischen 40 und 60 cent direkt als Arbeitskosten an.

Die **erneuerbaren Energien** haben sich in der jüngsten Vergangenheit sehr dynamisch entwickelt. Für die gesamte Branche mit einem Gesamtumsatz von 3,6 Mrd. Euro im Jahr 2000 (nur Neuinvestitionen in Anlagen, ohne Betrieb) lässt sich die Zahl der Beschäftigten auf rund 38.000 abschätzen. Damit arbeiten heute schon mehr Menschen im Bereich erneuerbare Energien als etwa im gesamten Umfeld der Kernenergie. Auch in Bezug auf den Steinkohlebergbau ist bereits eine vergleichbare Größenordnung erreicht worden. Aufgrund ihres dezentralen Charakters und des damit verbundenen hohen spezifischen Beschäftigungspotenzials kann sich bei einem weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien (ebenso auch für Einspartechnologien) auch für die klassische Energiewirtschaft eine neue Arbeitsplatzdynamik entwickeln. Dies ist ein wichtiger Hoffnungsschimmer für eine Branche, die in den letzten Jahren aufgrund der Liberalisierung und großer Umstrukturierungen dramatische Arbeitsplatzverluste verkraften musste. Denn die Entwicklung der erneuerbaren Energien steht erst am Anfang. Wird das Verdopplungsziel erfüllt, das sich die Bundesregierung bis zum Jahr 2010 gesetzt hat, kann ebenfalls mit bis zu einer Verdopplung der Beschäftigtenzahl gerechnet werden. Erneuerbare Energien würden dann bereits zum wichtigen Wirtschaftsfaktor im Energiebereich.

Langfristig muss der Anteil erneuerbarer Energien weit über das mit dem Verdopplungsziel avisierte Maß hinausgehen. Ein Ausbau entsprechend dem Nachhaltigkeitsszenario schafft brutto 250.000 bis 350.000 neue Arbeitsplätze. Mit dem Ausbau der erneuerbaren Energien ist ein gewaltiges Investitionsprogramm verbunden. 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. Mit dem Auf- und Ausbau hinreichend stabiler heimischer Märkte werden auch die wesentlichen Voraussetzungen geschaffen, um auch auf dem Exportmarkt erfolgreich agieren zu können, was entsprechend weitere Umsätze mit sich bringen würde. So konnten sich in den letzten Jahren als direkte Folge des heimischen Booms in der Windenergienutzung bereits verschiedene deutsche Windkrafthersteller am internationalen Markt etablieren. Und auch das Interesse vieler großer, international tätiger Unternehmen (z.B. Shell und BP bei der Photovoltaik, Babcock bei der Biomassenutzung, die MVV bei der Windenergienutzung) in diesem Bereich ist ein Zeichen dafür, dass hier bereits ein Umdenken stattgefunden hat.

Im Vergleich zur Bauwirtschaft und zu den Unternehmen aus dem Bereich erneuerbare Energien, sind für die Arbeitsplätze im **Bergbau** dagegen negative Auswirkungen zu erwarten. Klimaschutz ist allerdings nicht gleichzusetzen mit einem kurzfristigen Ausstieg

aus der Kohlenutzung. Auch wenn der Klimaschutz mit seinen Konsequenzen ernst genommen wird, kann noch über Jahre und Jahrzehnte nennenswert Bergbau in Deutschland betrieben werden. Mit rund 35 Mio. t Steinkohle und 104 Mio. t Braunkohle liegt im Nachhaltigkeitsszenario auch im Jahr 2010 noch ein hohes Verbrauchsniveau vor, das sich bis zum Jahr 2020 dann auf 21 Mio. t Steinkohle und 68 Mio. t Braunkohle reduziert<sup>5</sup>. Erst am Ende des Betrachtungszeitraums, also 2050, spielen Stein- und Braunkohle mit Einsatzmengen von 7 Mio. t (vor allem in der Stahlindustrie) bzw. 5 Mio. t nur noch eine untergeordnete Rolle. Die Stromerzeugung aus Kohle beträgt zu diesem Zeitpunkt noch knapp 25 TWh.

Für die Steinkohle entspricht dies Mengenverhältnissen, die derzeit auch im Rahmen der Verhandlungen über die Fortführung der Subventionierung des deutschen Steinkohlebergbaus diskutiert werden. Diese Mengen werden trotz sinkender staatlicher Unterstützung vermutlich aus heimischer Förderung bereitgestellt und entsprechend viele Lagerstätten offengehalten werden können.

Auch die existierenden Tagebaue der Braunkohle, deren Laufzeiten überwiegend bei noch rd. 20 Jahren liegen, können im Rahmen der Entwicklung des Nachhaltigkeitsszenario ausgekohlt werden, ohne mit den Klimaschutzziele in Konflikt zu kommen. Dagegen steht der Aufschluss neuer großer Tagebaue, wie etwa Garzweiler II, mit dem langfristig unter Status Quo-Bedingungen Fördermengen von jährlich rund 40 Mio. t Braunkohle realisiert werden sollen, im Gegensatz zum Nachhaltigkeitsszenario. Die Braunkohleindustrie muss sich also ähnlich wie die Steinkohle auf einen weiteren kontinuierlichen Schrumpfungsprozess einstellen, der jedoch bei weitem langsamer verlaufen würde, als das, was sie im vergangenen Jahrzehnt vor allem in den neuen Bundesländern erlebt hat und was mit z. T. großen Opfern für die Belegschaft und die Reviere bewältigt wurde.

Insgesamt sind die Zukunftsaussichten für die Bergleute in den bundesdeutschen Revieren nicht einfach. Bereits in der Vergangenheit wurden massiv Arbeitsplätze abgebaut. Allein zwischen 1990 und 2000 verringerte sich ihre Zahl (Braun- und Steinkohle insgesamt) von 260.000 auf 79.000. Im Steinkohlebergbau, die im Jahr 2000 noch 58.000 Menschen beschäftigte, ist für 2005 ein weiterer Rückgang um über 20.000 auf dann noch 36.000 bereits vereinbart. Im Braunkohlebergbau laufen ebenfalls weitere Restrukturierungsprogramme um die Zahl der Arbeitsplätze weiter zu verringern. In diesem Sinne verschärft Klimaschutz diesen Trend, ist aber nicht sein alleiniger Auslöser.

## 9. Veränderungen konkret – Wendeszenen verdeutlichen den Wandel

Die Umsetzung einer nachhaltigen Entwicklung ist mit weitgehenden Veränderungen verbunden. Dies haben die einzelnen sektoralen Beschreibungen und auch der im letzten Kapitel dargestellte zusammenfassende Überblick deutlich gemacht. Für die verschiedenen Akteure, die entweder Energie bereitstellen oder Energie einsetzen, ist dies mit großen

<sup>5</sup> Zum Vergleich: im Jahr 2000 (1999) wurden 33 (39) Mio. t Stein- und 167 (161) Mio. t Braunkohle gefördert.

Herausforderungen verbunden. In der Langfassung der Untersuchung ist deshalb für verschiedene Beispiele im Rahmen von Wendeszenen beschrieben worden, wie dieser Veränderungsprozess konkret aussehen könnte, welche Akteure die treibenden Faktoren für die Veränderung sind (z. B. der Bürgermeister, der in seiner Gemeinde den Anstoß zur Errichtung eines solaren Nahwärmenetzes gibt), inwieweit Akzeptanzschwierigkeiten (z. B. in Bezug auf ein notwendig werdendes andersartiges Lüftungsverhalten in energieeffizienten Gebäuden) zu erwarten sind bzw. diesen begegnet werden kann, wie Optionen zusammenpassen und sich in ihren Wechselwirkungen ergänzen und welche neuen Technologien eine Schlüsselstellung in einer nachhaltigen Energieversorgung einnehmen.

Die Wendeszenen dienen letztendlich dazu, Veränderung zu beschreiben und den Schrecken gegenüber den anstehenden Herausforderungen zu nehmen. Im Einzelnen sind in diesem Zusammenhang betrachtet worden:

- Licht, ganz anders und effizient
- Brennstoffzelle der Alleskönner?
- Der Traum vom CO<sub>2</sub>-freien Kraftwerk
- Sauberer Strom bei Tag und Nacht
- Durch die Kopplung verschiedener Quellen zur emissionsfreien Fabrik
- Wie die Sonne in das Land kommt – internationale Partnerschaften
- Haus der Zukunft – zwischen Intelligenz und Partnerschaft
- Wer ist ökologischer, Brennstoffzelle oder elektrische Wärmepumpe
- Büro der Zukunft – auch bei der Arbeit wird Energie gespart
- Gemeinsam geht es manchmal besser: Wohnungsbaugesellschaften als Multiplikator
- Die Kombination macht es, intelligente Wärmeversorgung im Verbund
- Nahwärme für die Gemeinde Tannlicht
- Arabeske: Das Auto als Kraftwerk (Power Vehicles)
- Island startet eine Energierevolution
- Combi Car: Autos gemeinsam nutzen
- Von der Kernenergie zur nachhaltigen Energieversorgung – aus großen Herausforderungen erwachsen zahlreiche Chancen: Beispiel Baden-Württemberg
- Von der Kohle zur Sonne: Die Solarstadt Gelsenkirchen

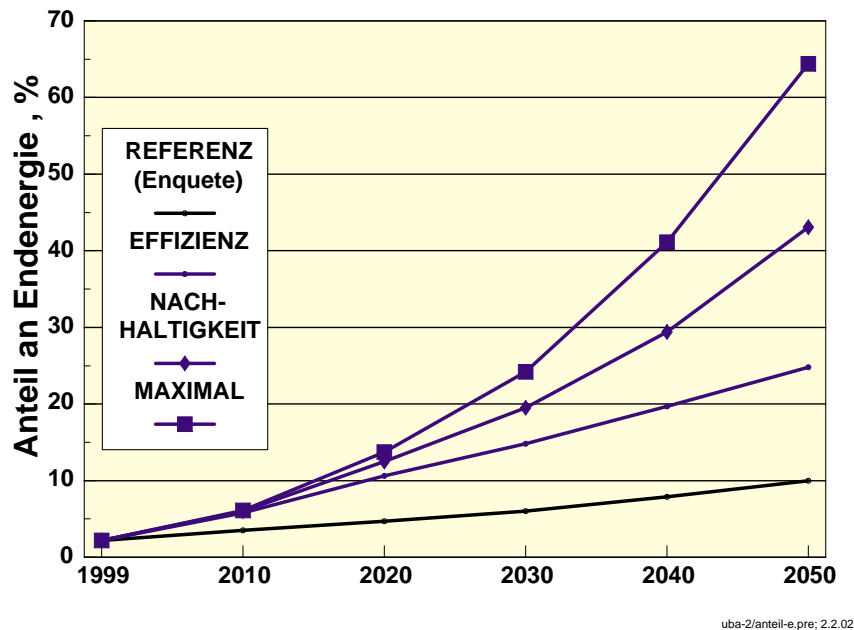
## 10. Auf dem Weg zur „solaren“ Energiewirtschaft

### 10.1 Ausbauzustand erneuerbarer Energien in 2050 – ein Zwischenfazit

Neben der beträchtlichen Produktivitätssteigerung, deren Potenziale im Nachhaltigkeits-szenario zum Zeitpunkt 2050 schon sehr weit ausgeschöpft sein werden, muss der Anteil erneuerbarer Energien am gesamten Energieeinsatz deutlich ausgeweitet werden. Er ist im Nachhaltigkeitsszenario auf 43% des Endenergieverbrauchs bzw. 36% des Primärenergieverbrauchs gestiegen. Obwohl dieser Wert schon außerordentlich hoch ist, stellt sich auch die Frage, ob diese Entwicklung nicht noch schneller verlaufen könnte bzw. in welcher Zeit die gesamte Energieversorgung auf erneuerbare Energien umgestellt werden könnte. Zwar sind die CO<sub>2</sub>-Emissionen schon beträchtlich gesunken, aus der Sicht des Ressourcenverzehr ist der im Jahr 2050 verbleibende Verbrauch fossiler Energierohstoffe jedoch noch zu hoch, um letztendlich als nachhaltig gelten zu können. Dies gilt insbesondere auch vor dem Hintergrund eines weltweit wachsenden Drucks auf die Energiemärkte.

Wie kann aber der Anteil erneuerbarer Energien weiter erhöht werden. Betrachtet man zunächst die direkte Nutzung von Strom aus erneuerbaren Energien, so wird im Szenario Nachhaltigkeit mit einem Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung von 61% bereits ein hoher Deckungsanteil erreicht. 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 und Verbraucher sowie weitblickende Investitionen in große Fertigungsstätten für erneuerbaren Energien in idealer Weise ineinander greifen. Auf diese Weise könnte im Jahr 2050 ein Anteil von 75% Anteil am Stromverbrauch des Szenarios Nachhaltigkeit erreicht werden. Noch höhere Anteile sind ohne den flächendeckenden Einsatz eines chemisch speicherbaren Energieträgers (Wasserstoff) in einem großräumigen Stromverbund nicht realisierbar.

In Analogie dazu kann auch der Wärmebereich und der Verkehrssektor betrachtet werden, wobei die heutigen Ausgangsbedingungen in beiden Bereichen schwieriger sind als im Strombereich (heutige Anteile erneuerbarer Energien: Strom 6%; Wärme 2%; Verkehr 0,5%). Mit 25% (Effizienz-szenario) bzw. 43% (Nachhaltigkeitsszenario) Anteil im Jahr 2050 am gesamten Endenergieverbrauch sind dementsprechend die Anteile deutlich geringer als für Strom (**Abbildung 35**). Überprüft man hier die Möglichkeiten einer noch rascheren Ausweitung der Anteile, so zeigen sich im Wärmebereich enge Grenzen, da die weiter ausschöpfbaren Potenziale von Kollektor- und Geothermiewärme lediglich Niedertemperaturwärme anbieten, die im Wesentlichen nur noch auf Kosten von Wärme aus (fossiler) Kraft-Wärme-Kopplung ausgeweitet werden kann. Geht man von obiger Kombination günstiger Rahmenbedingungen aus und unterstellt eine Reduzierung fossiler KWK-Wärme im Jahr 2050 auf 65% des Wertes im Szenario Nachhaltigkeit, so kann im Wärmebereich ein maximaler Anteil von rund 60% Wärme (Nachhaltigkeitsszenario 45%) erreicht werden.

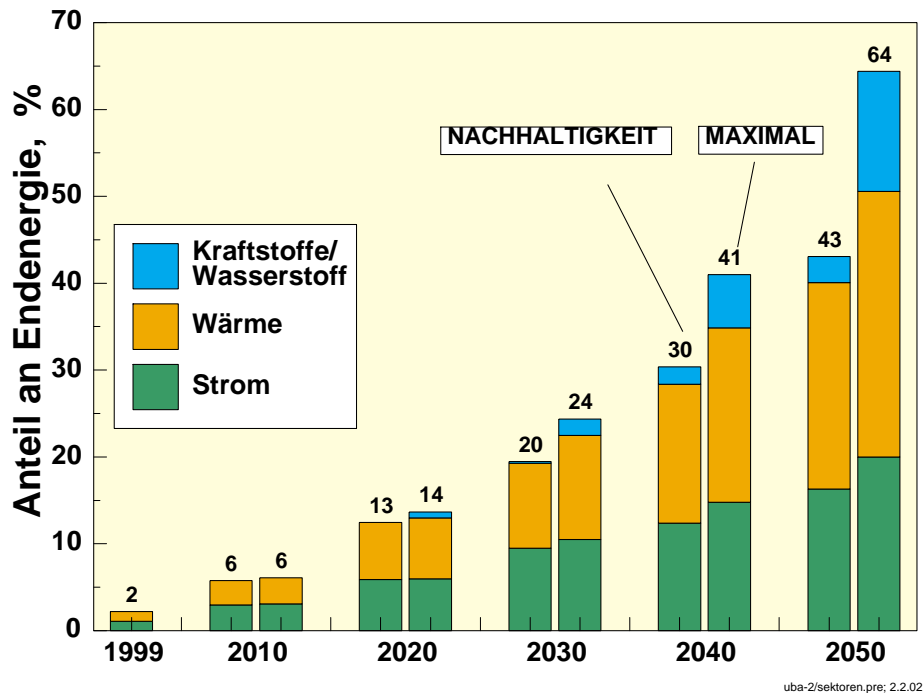


**Abbildung 35: Entwicklung der Anteile erneuerbarer Energien am gesamten Endenergieverbrauch in den Szenarien „Effizienz“ und „Nachhaltigkeit“ im Vergleich zu einer „Maximalvariante“ und dem Referenzszenario der Enquete-Kommission**

Auch der Verkehrssektor, der im Szenario Nachhaltigkeit erst zu 15% mit erneuerbaren Energien versorgt ist, bietet weitere Möglichkeiten einer deutlichen Ausweitung ihres Beitrags. Diese Ausweitung ist jedoch in größerem Ausmaß erst ab 2030 sinnvoll, da einerseits frühesten ab diesem Zeitpunkt von einem ausreichend effizienten Fahrzeugpark als entscheidende Grundvoraussetzung für die Einführung „teurerer“ neuer Kraftstoffe ausgegangen werden kann. Andererseits führt der Einsatz erneuerbarer Energien zunächst in anderen Sektoren zu einer spezifisch höheren Minderung der Treibhausgasemissionen, in dem z. B. durch Windstrom direkt Kohlestrom substituiert wird. Die Ausweitung des Beitrags erneuerbarer Energien im Verkehr in der „Maximalvariante“ beruht zudem auf der Voraussetzung einer ausreichenden Verfügbarkeit preisgünstiger Stromerzeugungspotenziale aus erneuerbaren Energien um 5 cent/kWh Stromerzeugungskosten, wofür hauptsächlich größere Wind-Offshore-Parks, sowie solarthermische Kraftwerke infrage kommen. Diese zusätzliche Stromerzeugung ist die Quelle für die elektrolytische Wasserstoffherzeugung (in Verbindung mit einem erweiterten Lastmanagement dient die Elektrolyse gleichzeitig als flexiblen Verbraucher) und damit für die breite Einführung von Wasserstoff als neuen Kraftstoff.

Im Szenario Nachhaltigkeit werden im Jahr 2050 bereits 57 TWh/a Strom aus erneuerbaren Energien (der zweifache Wert der gesamten heutigen Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien) für die Wasserstoffherzeugung eingesetzt. In der Maximalvariante wird dieser Wert auf 295 TWh/a gesteigert, womit 70% des Kraftstoffbedarfs des Jahres 2050 in Form

von Wasserstoff bereitgestellt werden könnte.<sup>6</sup> Aufsummiert könnten damit unter den genannten günstigen Rahmenbedingungen 64% des gesamten Endenergieverbrauchs des Szenarios Nachhaltigkeit im Jahr 2050 mittels erneuerbarer Energien gedeckt werden (**Abbildung 36**, jeweils rechte Balken), wobei der Hauptzuwachs gegenüber dem Szenario Nachhaltigkeit aus dem Verkehr stammt. Der fossile Energieeinsatz reduziert sich entsprechend auf 24% der heutigen Menge, der CO<sub>2</sub>-Ausstoß mit 129 Mio. t/a auf nur noch 15% der heutigen Emissionen.



**Abbildung 36: Entwicklung der Anteile erneuerbarer Energien am gesamten Endenergieverbrauch nach Sektoren im Szenario Nachhaltigkeit und in der Maximalvariante**

Mit der „**Maximalvariante**“ ist diejenige Ausbaustrategie skizziert, die aus heutiger Sicht unter sehr günstigen Bedingungen bis zum Jahr 2050 erreicht werden könnte. Der Ausbaupfad des Szenarios Nachhaltigkeit stellt demgegenüber die **Untergrenze** dar, wenn die klima- und energiepolitischen Langfristziele zeitgerecht erreicht werden sollen. Dass beide Ausbauszenarien ehrgeizige Zielsetzungen mit enormen industrie- und arbeitsmarktpolitischen Auswirkungen entsprechen, verdeutlichen die in **Tabelle 7** zusammengestellten installierten Leistungen und Jahresumsätze des Ausbauzustandes 2050 im Vergleich zum heutigen Markt für erneuerbare Energien. Die installierten Leistungen sind um bis zu zwei Größenordnungen höher als heute (außer Wasserkraft). Dies gilt ebenso für die jährlichen

<sup>6</sup> Verglichen mit dem heutigen Kraftstoffbedarf wären es lediglich 26%, woraus die Notwendigkeit einer deutlich effizienteren Nutzung von Kraftstoffen evident wird.

Anlagenverkäufe, wobei der Ersatz von Altanlagen stetig steigende Anteile des Jahresumsatzes ausmacht.

Die jährlichen Investitionen in Anlagen bewegen sich im Jahr 2050 zwischen 19 (Nachhaltigkeit) und 28 Mrd. EUR/a (Maximalvariante), liegen also beim sechs- bis achtfachen des heutigen Umsatzes. Dabei ist zu bedenken, dass bis zu diesem Zeitpunkt beträchtliche Kostensenkungen bei den meisten Technologien umgesetzt worden sind. Zu diesem Zeitpunkt werden auch starke Auslandsmärkte entstanden sein, da die hier beschriebenen Szenarien nur bei einer größtenteils gemeinsamen internationalen Klima- und Energiepolitik über diesen langen Zeitabschnitt hinweg verwirklicht werden können. Diese Märkte können insbesondere von denjenigen Volkswirtschaften bedient werden, die im Anlagenbau in der Wachstumsphase Führungspositionen errungen haben. Bei der Windenergie ist Deutschland bereits heute dabei auf dem besten Wege. In 2050 kann bei erfolgreicher Umsetzung obiger Ausbauziele also von einer prosperierenden „Solarwirtschaft“ in Deutschland ausgegangen werden (wobei unter dem Begriff der „Solarwirtschaft“ hier alle relevanten Technologien aus dem Bereich erneuerbare Energien eingeschlossen sind). In vergleichbarer Weise gilt dies auch für den Bereich der Effizienztechnologien.

**Tabelle 7 : Installierte Leistungen und jährlicher Leistungsumsatz von Anlagen im Bereich erneuerbare Energien in 2000 und für zwei Ausbaustände des Jahres 2050**

	2000		Nachhaltigkeit 2050		Maximalvar. 2050	
	Installierte Leistung <sup>1)</sup>	Jährlicher Umsatz <sup>2)</sup>	Installierte Leistung <sup>1)</sup>	Jährlicher Umsatz <sup>2)</sup>	Installierte Leistung <sup>1)</sup>	Jährlicher Umsatz <sup>2)</sup>
Wasserkraft	4 550	25	5 250	100	5 250	100
Windenergie <sup>3)</sup>	6 100	1 670	42 600	2 150	82 000	4 100
Photovoltaik	110	40	30 000	1 800	70 000	3 900
Kollektoren	3	0,60	400	22	440	26
Geothermie Wärme	70	ca. 15	31 000	1 800	42 000	2 500
Geothermie Strom	-	-	3 900	275	9 100	640
Biomasse, -gas <sup>4)</sup>	17 000	ca. 800	68 300	2 730	68 300	2 730
Solartherm. Kraftwerke <sup>5)</sup>	-	-	11 000	640	26 000	1 300
Übriger Stromimport <sup>5)</sup>	-	-	3 700	190	9 800	450
<b>Ges. Umsatz (Mrd. EUR/a)</b>		<b>3,4</b>		<b>19,0</b>		<b>28,2</b>

1) MW el, th; bei Kollektoren Mio. m<sup>2</sup>) Zubau und Ersatz: MW/a, Mio. m<sup>2</sup>/a

3) einschließlich Offshore in deutschen Gewässern, 4) ohne Kleinanlagen für Holz (Kachelöfen, Kamine); Feuerungs- bzw. Gasleistung der Anlagen, 5) nur Anteil für Import nach Deutschland

## 10.2 Eine vollständig regenerative Energiewirtschaft – Vision oder realistische Perspektive?

Aus technisch-struktureller Sicht sind auch nach dem Jahr 2050 noch vielfältige Ausbaumöglichkeiten von erneuerbaren Energien vorhanden. Insbesondere sind bis dahin die technischen Potenziale der Nutzung der Solarstrahlung mittels Photovoltaik und solarthermischen Kraftwerken erst zu sehr geringen Anteilen ausgeschöpft. Die in größerem Umfang verfügbare zusätzliche Quelle ist damit in erster Linie elektrische Energie. Einer Ausweitung auf dem Stromsektor sind jedoch – wie zuvor dargelegt - Grenzen gesetzt. Bei einer Stromproduktion aus erneuerbaren Energien über diese Grenzen hinaus ist daher die Umwandlung in eine speicherbare Endenergieform erforderlich. Bereits im Szenario Nachhaltigkeit und der Maximalvariante ist von dieser Möglichkeit Gebrauch gemacht worden, insbesondere um den Verkehrssektor mit erneuerbaren Energien zu erreichen. Wasserstoff hat im Jahr 2050 endenergieseitig einen Anteil von 3% (Nachhaltigkeit) bzw. von 15% (Maximalvariante).

Wasserstoff hat bei der Ausweitung des Versorgungsbeitrags der erneuerbaren Energien aus mehreren Gründen gegenüber anderen speicherbaren Energieträgern wesentliche Vorteile:

- Es wird ein Energieträger benötigt, der relativ einfach aus elektrischer Energie hergestellt werden kann, da diese längerfristig die Hauptenergieart einer intensiven Nutzung erneuerbarer Energien sein wird und in technisch sehr großen Mengen bereitgestellt werden kann.
- Die Überschüsse einer ausgedehnten Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien sollten verhältnismäßig leicht und in flexibler Form, d.h. in sehr unterschiedlichen Leistungen bei möglichst großer Effizienz dezentral und zentral umgewandelt werden und damit wesentliche Beiträge zum Lastmanagement leisten können.
- Der Energieträger muss multifunktional nutzbar sein, d.h. sowohl im Wärmebereich (Mittel- und Hochtemperaturbereich) wie auch als Kraftstoff eingesetzt werden können. Außerdem soll sein breiter Einsatz in fortschrittlichen Kraft-Wärme-Kopplungstechniken (Brennstoffzellen) in effizienter Weise möglich sein.
- Transport und Verteilung des Energieträgers sollten auf vorhandenen Infrastrukturen aufbauen können. Er muss zudem saisonal speicherbar sein.

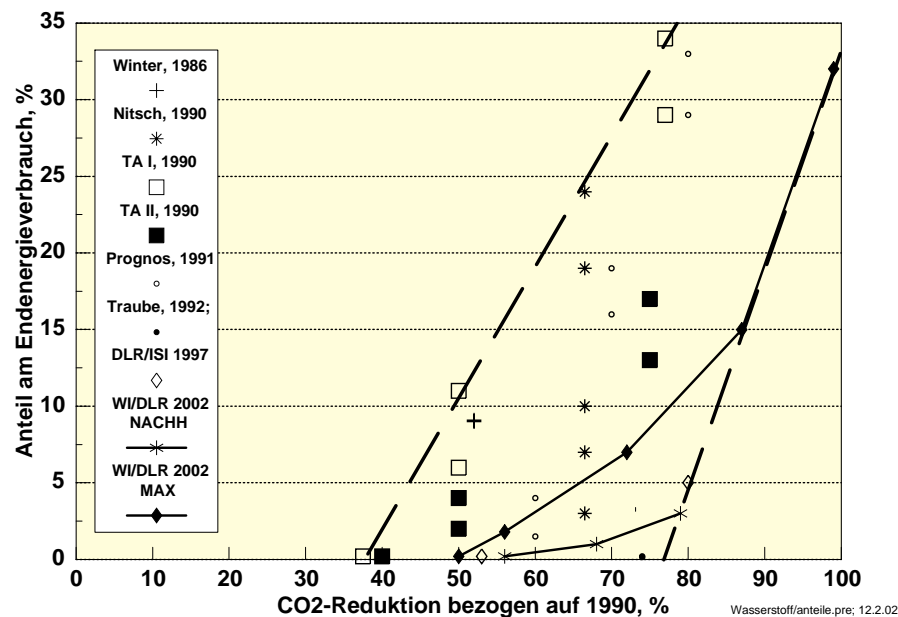
Diese Eigenschaften treffen nur auf regenerativ erzeugten Wasserstoff zu. Er ist prinzipiell in der Lage, die durch die Angebotsstruktur gesetzten Grenzen zu überwinden und allen Energienutzern zu jeder Zeit eine gesicherte Energieversorgung zu gewährleisten. Als weiterer Vorteil kommt hinzu, dass ein gleichfalls gasförmiger Energieträger, nämlich Erdgas, derzeit an Bedeutung gewinnt. Die gegenwärtige Ausweitung seines Anteils – die allerdings aus Ressourcen Gründen mittelfristig zu begrenzen ist – ist kompatibel mit einem gleichzeitig verstärkten Ausbau der erneuerbaren Energien. Erdgas ist somit die geeignete fossile „Übergangsenergie“ bei einer Transformation des Energiesystems in Richtung er-

erneuerbare Energien und Wasserstoff. Dies gilt insbesondere auch für die Infrastrukturproblematik, die häufig einen limitierenden Faktor für die Einführung neuer Energieträger darstellt. Die Erdgasinfrastruktur kann in nahezu idealer Weise über die anteilige Einspeisung von Wasserstoff neben dem Aufbau und der späteren Vernetzung dezentraler, lokaler Wasserstoffnetze genutzt werden. Sollen also die in der Maximalvariante genannten Anteile erneuerbarer Energien deutlich nach oben überschritten werden, so dürfte dies im Wesentlichen nur mit einer Ausweitung des Anteils von Wasserstoff möglich sein, der dann für seine stationäre Nutzung sukzessive in die Erdgasinfrastruktur eingebunden wird. Auch im Verkehrsbereich kann ein verstärkter Einsatz von Erdgas die Wasserstoffnutzung vorbereiten. Da jedoch Verluste bei der Wasserstoffbereitstellung unvermeidlich sind und diese zusätzliche Kosten verursachen, liegt es auf der Hand, dass zuvor alle anderen preiswerteren Verfahren der Nutzung erneuerbarer Energien ausgeschöpft werden sollten. Eine verhältnismäßig späte flächendeckende Einführung von Wasserstoff, wie im Szenario Nachhaltigkeit und auch in der Maximalvariante angenommen, ist daher naheliegend.

Die Option „Solarer Wasserstoff“ wurde in den letzten 15 Jahren schon in zahlreichen Untersuchungen betrachtet. Insbesondere hatte sich die Enquete Kommission: „Technikfolgenabschätzung und -bewertung“ des Dt. Bundestages im Jahr 1990 eigens mit einer speziellen Studie dieser Thematik sehr gründlich angenommen. Stellt man die Aussagen dieser und weiterer grundlegender Untersuchungen zum Thema „Wasserstoff“ im Hinblick auf den Beitrag von Wasserstoff bei einer sehr weitgehenden Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen zusammen, so erhält man die in **Abbildung 37** dargelegten Zusammenhänge:

- Die Bandbreite des Eintritts von Wasserstoff in die Energieversorgung liegt zwischen einer 50 und 80%igen Reduktion von CO<sub>2</sub> (bezogen auf 1990); bis dahin haben rationellere Energiewandlung und –nutzung und die direkte bzw. lokale Nutzung von erneuerbaren Energien Vorrang.
- Die tendenziell jüngeren Studien, die sich intensiver mit den Möglichkeiten des Lastmanagements von Strom aus erneuerbaren Energien auseinandergesetzt haben, verschieben den Eintrittszeitpunkt von Wasserstoff zu höheren CO<sub>2</sub>-Reduktionswerten um 70 – 80%. Bei CO<sub>2</sub>-Reduktionsbemühungen > 80% kommt keine Untersuchung ohne Wasserstoff aus.
- Den größten Einfluss auf die Wasserstoffeinführung haben CO<sub>2</sub>-Reduktionsstrategien im Verkehrssektor. Wird die Einführung von Wasserstoff im Verkehr forciert (wie z.B. in der vorliegenden Maximalvariante), so ist bereits bei einem Reduktionsniveau um 60% Wasserstoff merklich an der Endenergiebereitstellung beteiligt. Werden die direkten Nutzungsmöglichkeiten von erneuerbaren Energien stärker betont, so wird Wasserstoff erst ab einem CO<sub>2</sub>-Reduktionsniveau von 80% relevant.
- Eine Extrapolation der Maximalvariante auf eine nahezu vollständige Vermeidung von energetisch bedingtem CO<sub>2</sub> führt zu einem Anteil von Wasserstoff aus erneuerbaren Energien um 30 – 35% am Endenergieverbrauch; der Verkehrssektor ist dann zu 85%, der Wärmebereich zu rund 30% mit Wasserstoff versorgt.

- Hinterlegt man die CO<sub>2</sub>-Reduktionswerte in Abbildung 37 mit einer Zeitskala, so ist eine breite Einführung von Wasserstoff aus erneuerbaren Energien nicht vor 2025 erforderlich (und wegen der dann immer noch relativ hohen Kosten volkswirtschaftlich auch nicht sinnvoll); andererseits sollte seine flächendeckende Einführung bis 2050 erfolgt sein, wenn eine weitere CO<sub>2</sub>-Reduktion über 80% hinaus angestrebt wird bzw. die Ressourcenbasis längerfristig ganz auf erneuerbare Energien umgestellt werden soll. Eine Auseinandersetzung mit den wasserstoffspezifischen Technologien und den Übergangsmöglichkeiten von Erdgas zu Wasserstoff ist aufgrund der hohen Zeitkonstanten aber heute schon erforderlich.



**Abbildung 37: Bandbreite des Beitrags von Wasserstoff aus erneuerbaren Energien an der Reduktion energiebedingter CO<sub>2</sub>-Emissionen im deutschen Energiesystem nach mehreren Untersuchungen zur Einführung von Wasserstoff**

Versucht man die in dieser Studie erarbeiteten Erkenntnisse zu einem Ausblick auf die mögliche Entwicklung der Energiewirtschaft jenseits von 2050 bis zum Ende des Jahrhunderts zusammenzufassen, so zeigt sich, dass eine erfolgreiche Umwandlung der jetzigen in eine nachhaltige Energieversorgung wesentlich von drei Strategieelementen abhängt:

1. Die eingeleitete Reduktion von Treibhausgasemissionen muss in den nächsten zwei bis drei Jahrzehnten im Wesentlichen von einer **deutlich rationelleren Energiewandlung- und -nutzung (REN)** erbracht werden. Dies zeigt der Verlauf der Endenergie nachfrage in den Szenarien Effizienz und Nachhaltigkeit. Gelingt dies nur unzulänglich - wie durch die Referenzentwicklung dargestellt - kann die CO<sub>2</sub>-Reduktion ins Stocken geraten.

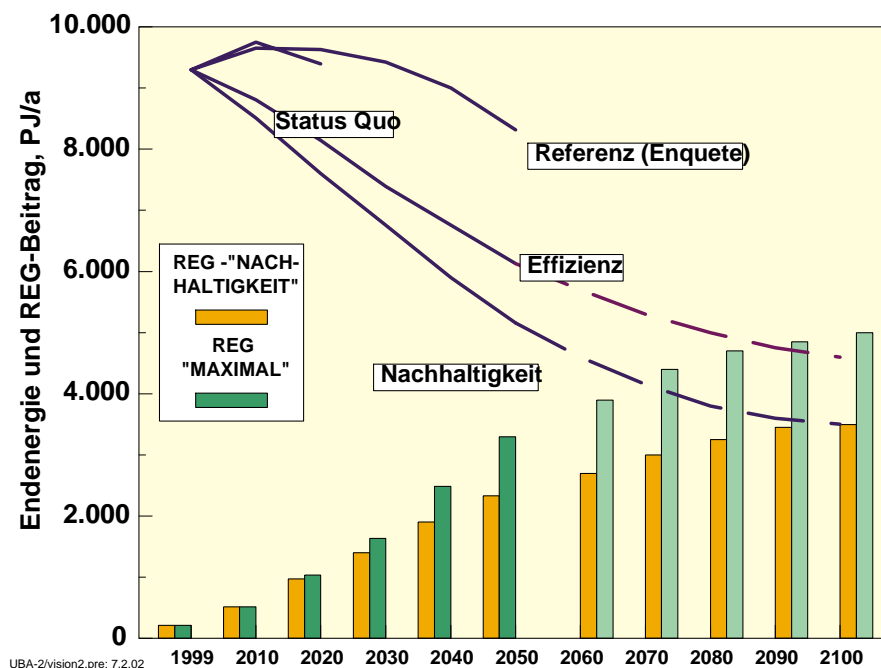
2. Der gleiche Zeitabschnitt ist entscheidend für die energiewirtschaftlich **relevante Mobilisierung der erneuerbaren Energien aber auch zukünftig weiterhin notwendiger, neuer fossiler Technologien**, damit sie in den folgenden Jahrzehnten die eingeleitete Dynamik der CO<sub>2</sub>-Reduktion aufrechterhalten können und die Lücke zwischen weiter sinkendem Energieverbrauch und möglichen Zuwachs der erneuerbaren Energien rasch genug schließen können. Dies gilt insbesondere für effiziente KWK-Anlagen (inklusive Brennstoffzellen). Erneuerbare Energien können aus einer ganzen Reihe von Gründen in diesem Zeitraum nicht so rasch ausgebaut werden, als dass sie die gewünschten Reduktionsziele im Wesentlichen allein erbringen und gleichzeitig den Ausstieg aus der Kernenergie kompensieren könnten. Aus **Abbildung 38** ist ersichtlich, dass erst das erfolgreiche Zusammenwirken der REN- und REG-Strategie zu den bis 2050 gewünschten Reduktionszielen führt.
3. Können sich bis etwa 2040/2050 die Technologien in der hier unterstellten Weise auf dem (Welt-)Markt etablieren, kann bereits von einem Erfolg der REN//REG-Strategie gesprochen werden. Obwohl sich danach die weiteren Energieverbrauchsenkungen deutlich verlangsamen werden, ist jetzt die Wachstumsdynamik der erneuerbaren Energien so stabil, dass sie – auch bei bereits abnehmenden Zuwachsraten – die Hauptrolle bei der weiteren Substitution fossiler Energieressourcen übernehmen können. Das Kostenniveau ist dann so weit gesunken<sup>7</sup>, dass auch aufwendigere Optionen, wie die Wasserstoffbereitstellung, in wachsendem Umfang eingesetzt werden können, um alle Verbrauchsbereiche mit CO<sub>2</sub>-neutralen Energieträgern zu erreichen und um die Restriktionen auf der Angebotsseite (z. B. im Bereich des Infrastrukturaufbaus) aufzuheben.

Unter sehr 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 weniger hohen Ausbaugeschwindigkeit erneuerbarer Energien erstreckt sich der Substitutionsprozess fossiler Energien bis 2100. Ebenso lange dauert es, wenn bei maximalem Ausbau erneuerbarer Energien geringere Erfolge bei der Verringerung des Energieverbrauchs erzielt werden. Schließlich zeigt die Kombination Verbrauch entsprechend Effizienzscenario und Ausbau erneuerbarer Energien entsprechend Nachhaltigkeitsszenario (**Abbildung 38**), dass auch im Jahr 2100 noch geringe Mengen fossiler Energie benötigt werden. Als ein guter Anhaltswert für die vollständige Ablösung fossiler Energierohstoffe kann daher der Zeitpunkt um 2100 betrachtet werden; er kann allerdings je nach Intensität der Teilstrategien um +/- 30 Jahre variieren. Gegenüber dem Zustand 2050, in dem erneuerbare Energien zwischen 2.350 und 3.300 PJ/a Endenergie bereitstellen, wäre ihr Beitrag nochmals um 40 – 50% zu steigern. Die Potenziale dafür sind da. Der Anteil des Imports auf der Basis erneuerbarer Energien läge dann bei ca. 30 – 35%, wäre also deutlich kleiner als die heutige Importab-

<sup>7</sup> Ein brauchbarer Orientierungswert liegt dann bei Erzeugungskosten von 5 – 7 cent/kWh für REG-Strom und REG-Wärme bei im Mittel halbiertem Energieverbrauch und einer doppelt so hohen Wertschöpfung (BIP) im Vergleich zu heute.

hängigkeit von fossilen Energierohstoffen. Dabei ist auch berücksichtigt, dass dann die Mehrheit aller Länder in ähnlichem Ausmaß regenerative Ressourcen in Anspruch nehmen.

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



**Abbildung 38: Mögliche Weiterentwicklung der wichtigsten Szenariogrößen in Fortführung der bis 2050 eingetretenen Entwicklungsdynamik für REN und REG**

- 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.

Als Fazit kann festgehalten werden, dass eine derartige Einführungsstrategie der erneuerbaren Energien in Kombination mit einer Energieeinsparoffensive die derzeitigen Nachhaltigkeitsdefizite der Energieversorgung deutlich mindern kann. Dabei ist von Anfang an darauf zu achten, dass dadurch keine neuartigen Probleme entstehen. Die verbleibenden Probleme können deutlich eingegrenzt werden, wenn von Anfang an auf einen ökologisch optimierten Ausbau erneuerbarer Energien geachtet wird, der insbesondere auf mögliche Konfliktfelder (z. B. Flächenkonkurrenzen, Naturschutz, Landschaftsbild) eingeht. Eine nachhaltige Energieversorgung wird also nur im Verbund von erneuerbaren Energien und Effizienztechnologien zu erreichen sein. Die Entlastungseffekte der neuen Technologien treten aufgrund der heute zum Teil noch vergleichsweise hohen Kosten und des noch geringen Ausbauszustandes allerdings anfänglich nur langsam in Erscheinung und erfordern ausreichend hohe und länger andauernde Vorleistungen. Gerade deswegen ist die Koppelung mit einer anspruchsvollen Strategie der zu weiten Teilen hoch rentablen rationelleren Energienutzung unerlässlich. Die Energiepolitik muss sich beiden Aufgaben stellen, wenn sie ihre Zielvorgaben erreichen will. Die erfolgreich angestoßene dynamische Entwicklung im Bereich erneuerbare Energien muss hierzu fortgesetzt werden, gleichzeitig aber die Energieeinsparung als neuer Schwerpunkt der Energiepolitik etabliert werden.

