



# **Langfristszenarien für eine nachhaltige Energie- nutzung in Deutschland**

**Forschungsvorhaben für das Umweltbundesamt**

**UFOPLAN FKZ 200 97 104**

## **Executive Summary**

### **Projektleitung:**

Dr.-Ing. Manfred Fishedick (WI), Dr. Joachim Nitsch (DLR)

### **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

Wuppertal, Stuttgart, Juni 2002

## 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.

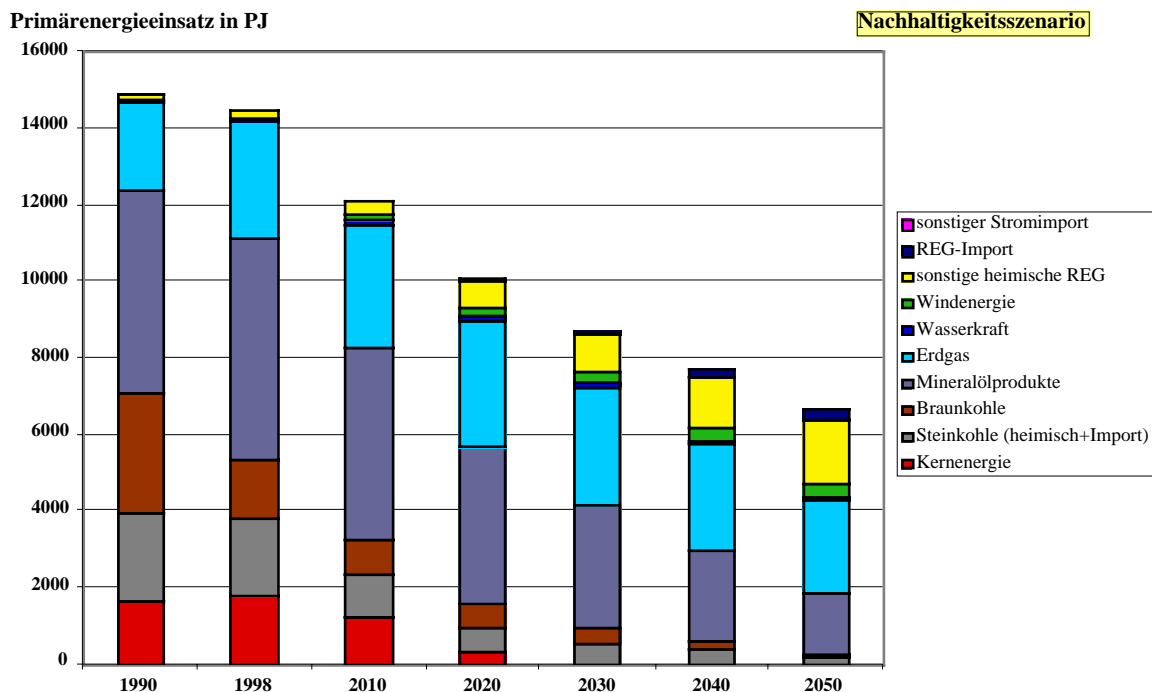
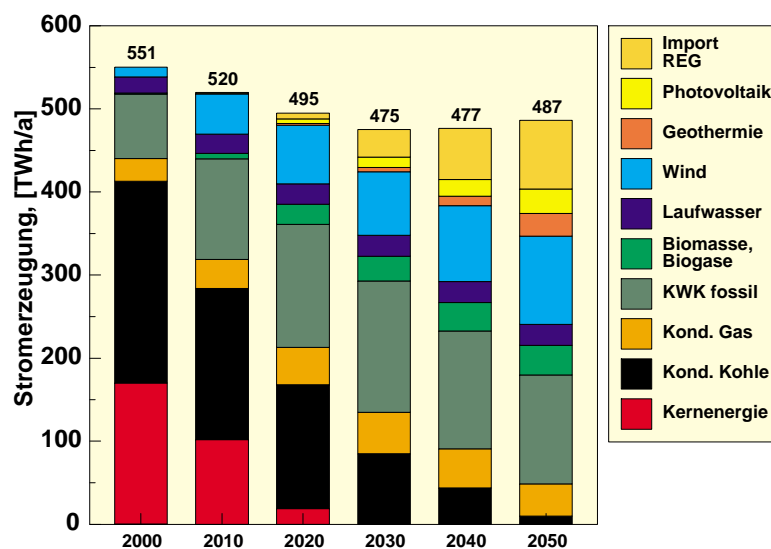


Abbildung 1: Entwicklung des Primärenergieverbrauchs im Szenario Nachhaltigkeit bis 2050

## 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-Zelstrom2.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.

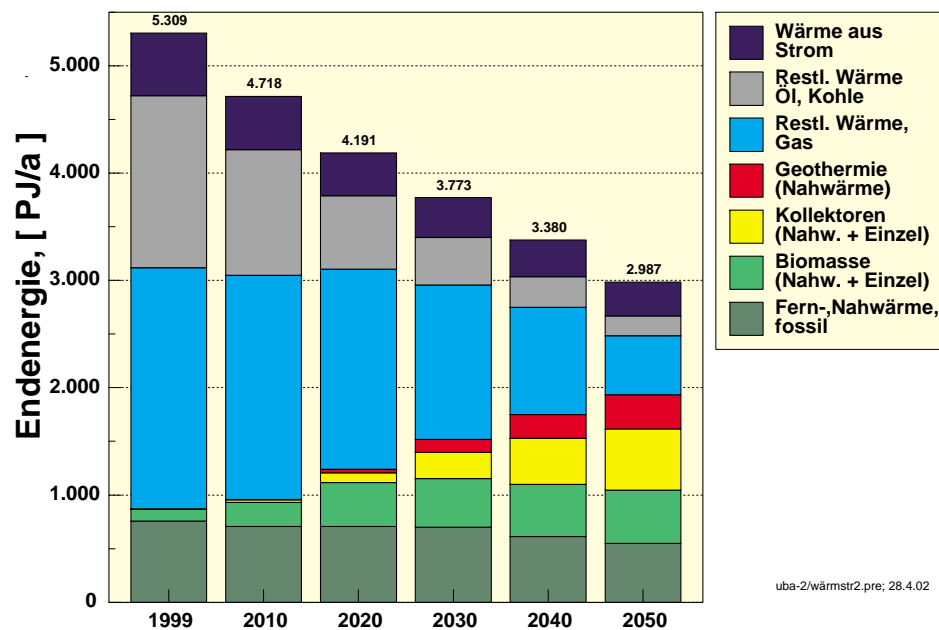


Abbildung 3: Verlauf des Wärmebedarfs und Veränderung der Wärmebereitstellungsstruktur (Raumheizung, Warmwasser, Prozesswärme) im Szenario Nachhaltigkeit durch Fern- und Nahwärme aus fossiler und biogener Kraft-Wärme-Kopplung sowie aus Kollektor- und Geothermiewärme und verbleibende Deckung durch konventionelle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

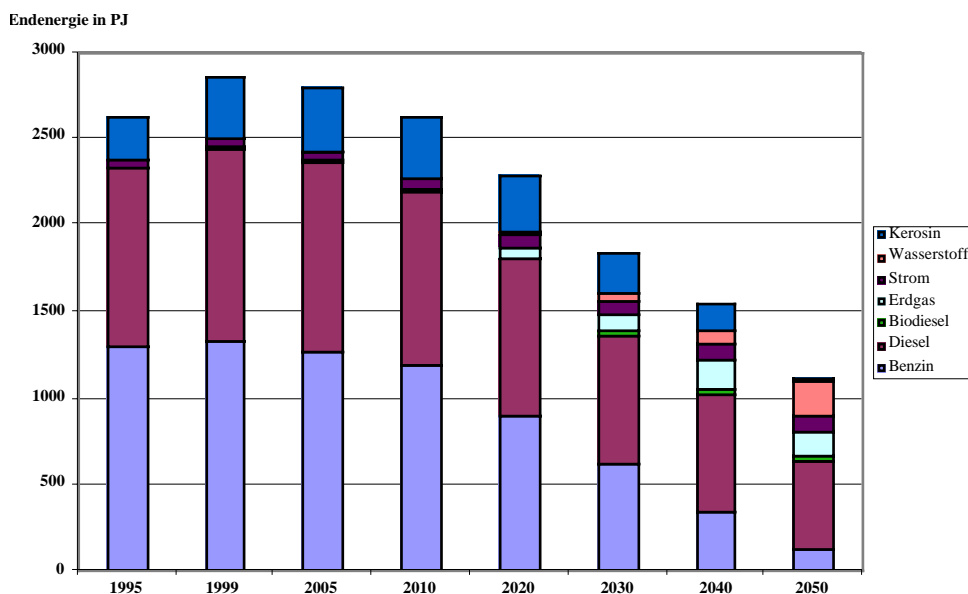


Abbildung 4: Entwicklung des Endenergiebedarfs für Verkehr und seiner Struktur im Nachhaltigkeitsszenario bis 2050

## 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).

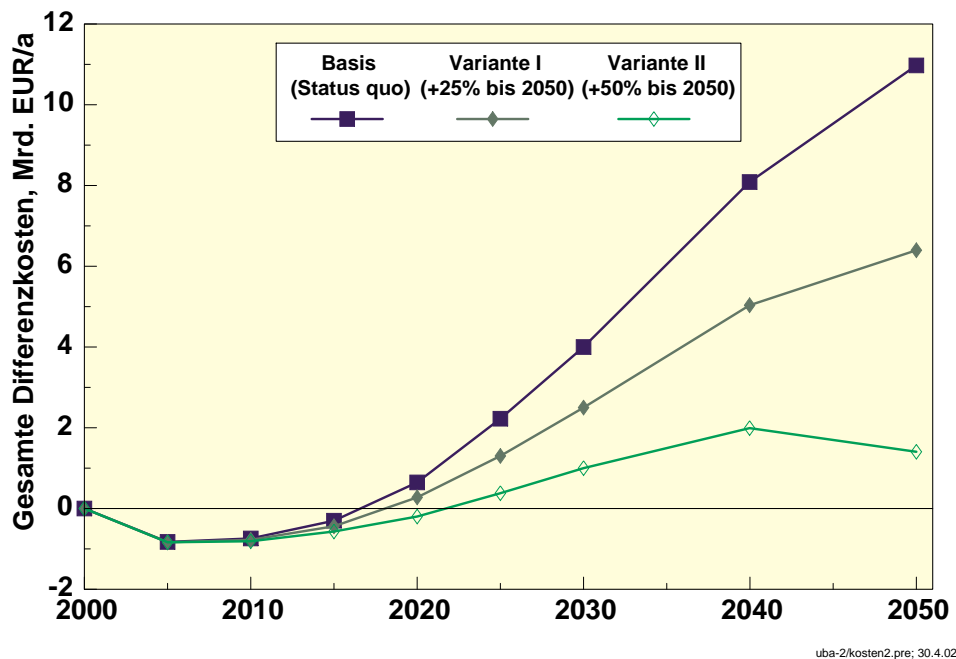


Abbildung 5: Verlauf der Kostendifferenz zwischen Nachhaltigkeits- und Status Quo Szenario für drei unterschiedliche Varianten der zukünftigen Preise fossiler Energieträger

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 frühestens ab dann von einem ausreichend effizienten Fahrzeugpark als entscheidende Grundvoraussetzung für die Einführung „teurerer“ neuer Kraftstoffe ausgegangen werden kann. Zudem ist die CO<sub>2</sub>-Minderungswirkung des direkten Einsatzes erneuerbarer Energien in der Stromerzeugung bis zu diesem Zeitpunkt höher. Die deutliche Steigerung des Beitrags erneuerbarer Energien im Verkehr 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.

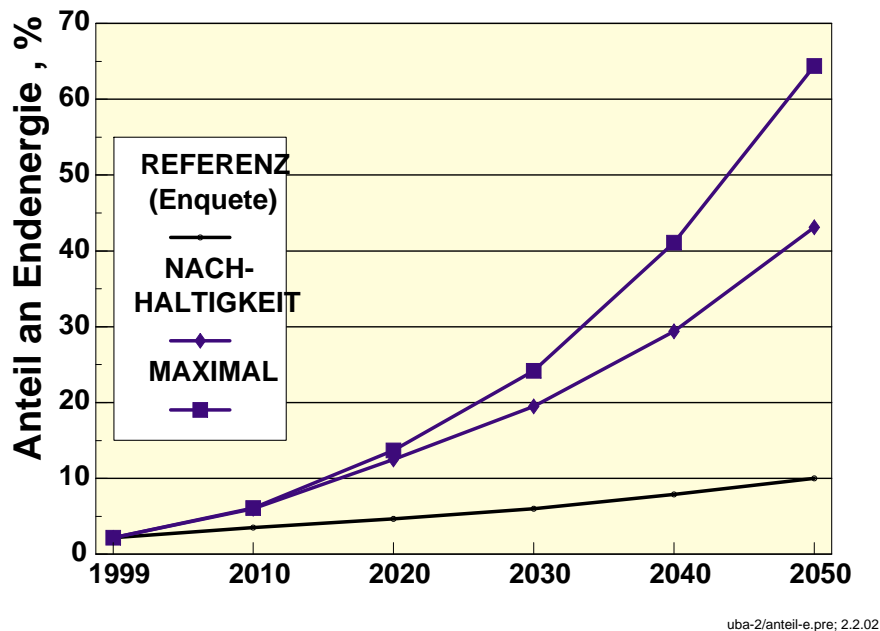


Abbildung 6: Entwicklung der Anteile von erneuerbarer Energien am gesamten Endenergieverbrauch im Szenario „Nachhaltigkeit“ im Vergleich zu einer „Maximalvariante“ und dem Referenzszenario der Enquete-Kommission

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).

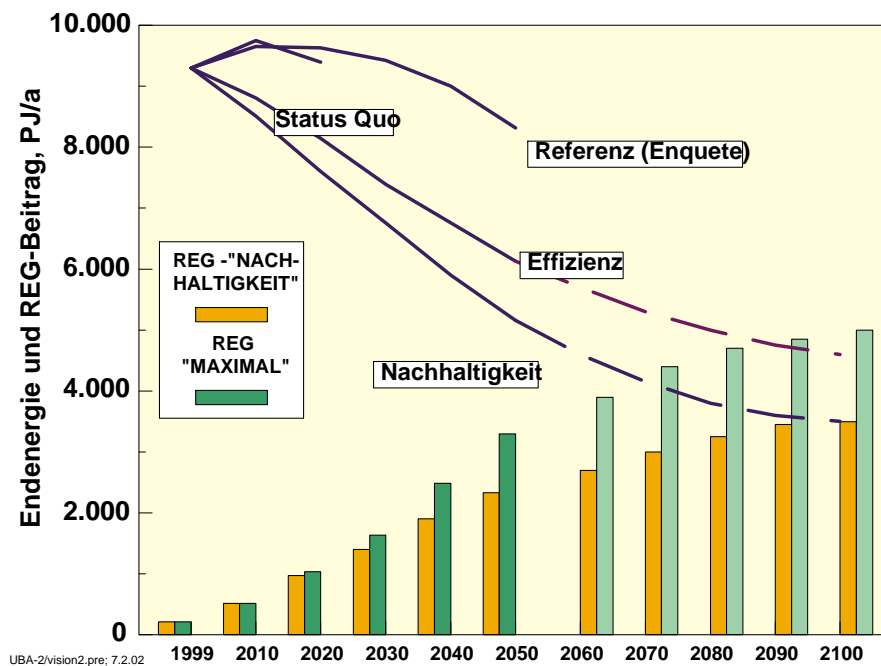


Abbildung 7: Wechselwirkung von Energieeffizienz und Ausbau erneuerbarer Energien und daraus ableitbare, mögliche Weiterentwicklung der wichtigsten Szenariogrößen im Verlauf dieses Jahrhunderts

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.