

■ Übergang in das Solarzeitalter

- Solarer Wasserstoff – Innovative Techniken zur Erzeugung
- Strategien für eine vollständig solare Energieversorgung

Solarer Wasserstoff – Innovative Techniken zur Erzeugung

Dr. Rainer Tamme

DLR

Rainer.Tamme@dlr.de

Dr. Christian Sattler

DLR

christian.sattler@dlr.de

Dr. Ludwig Jörissen

ZSW

ludwig.joerissen@zsw-bw.de

Einführung

Wasserstoff – chemisches Symbol H – kommt in der Natur nur in gebundener Form vor. Beispiele für chemische Verbindungen mit einem hohen Wasserstoffanteil sind Wasser (H₂O), Methan (CH₄) oder Methanol (CH₃OH). Auch Biomasse weist einen erheblichen Wasserstoffgehalt auf. Um Wasserstoff in reiner Form herzustellen, muss man ihn aus seinen Verbindungen durch chemische Umwandlung freisetzen. Da hierfür Energie aufgewendet werden muss, stellt Wasserstoff im Gegensatz zu den fossilen Rohstoffen wie Erdöl oder Erdgas keine Primärenergie dar.

Die jährliche weltweite Erzeugung beträgt etwa 500 Mrd. m³. In Deutschland liegt der Wasserstoffverbrauch derzeit bei etwa 19 Mrd. m³/a. Dies entspricht einem Energiegehalt von 216 PJ/a, was etwa 1,5 % des deutschen Primärenergieverbrauchs im Jahr 2001 darstellt. Unter energetischen Aspekten ist Wasserstoff daher aktuell noch als eher unbedeutend einzuordnen.

*Tabelle 1
Übersicht der derzeit
technisch relevanten
Wasserstoff Herstellungsprozesse*

| | Dampf- reformierung | Partielle Oxidation | Kohle- Vergasung | CO ₂ Konvertierung |
|------------------|------------------------|-----------------------------------|---|--|
| Verfahren | Allotherm Autotherm | Shell, Texaco u.a. | Winkler, Lurgi, Koppers-Totzek, Texaco u.a. | HT-Konvertierung TT-Konvertierung |
| Temperatur in °C | > 850 | 1200–1400 | 800–2000 | HT: 350–500 TT: 200–250 |
| Druck in bar | 25 | 10–100 | 1–40 | angepasst |
| Reaktionsmittel | H ₂ O | H ₂ O / O ₂ | H ₂ O / O ₂ | H ₂ O |
| Katalysator | Nickeloxid | - | - | Fe ₂ O ₃ /Cr ₂ O ₃ |

Wasserstoff wird heute überwiegend in der chemischen und metallurgischen Industrie eingesetzt. Über 50 % werden zur Erzeugung wichtiger Zwischenverbindungen wie Ammoniak und Methanol oder für die Hydrierung organischer Zwischenverbindungen und in der Metallurgie genutzt. Ein geringerer Teil findet Verwendung in der Mineralölverarbeitung und in der Herstellung synthetischer Kraft- und Schmier-

stoffe. Der derartig eingesetzte Wasserstoff wird aus fossilen Energierohstoffen erzeugt. Hierbei weisen diverse Erdölfraktionen sowie Erdgas mit etwa 80 % den dominierenden Anteil auf. Bei der Herstellung kommen überwiegend thermische Verfahren mit Wasser als Reaktionsmittel zur Anwendung. Die wichtigsten sind in *Tab. 1* zusammengestellt.

Es ist davon auszugehen, dass der Bedarf an Wasserstoff zukünftig ansteigen wird. Zum einen wird der Verbrauch von „Chemiewasserstoff“ steigen, um den wachsenden Bedarf an Düngemitteln (Ammoniak als Basisrohstoff) und an leichten Kraftstoffen zu decken (dies bedeutet zukünftig auch eine vermehrte Erzeugung durch Hydrierung von schwerem Rohöl, Ölsand oder Ölschiefer). Zum anderen wird Wasserstoff zunehmend Bedeutung gewinnen als Brennstoff zur Strom- und Wärmeerzeugung mittels Brennstoffzellen, als Ersatz fossiler Kraftstoffe zur CO₂-Reduktion und zur Substitution bzw. Schonung fossiler Brennstoffe.

Der Einsatz von Wasserstoff als zukünftiger Brenn- und Kraftstoff macht energetisch und ökologisch allerdings nur dann Sinn, wenn seine Erzeugung mit regenerativen Energien oder zumindest mit deutlich reduziertem Einsatz fossiler Energie erfolgen kann.

Der „klassische Pfad“ – Wasserstoff-Erzeugung mittels Elektrolyse aus Solarzellen und Windstrom

Wasserstoff mittels Elektrolyse mit nicht-fossiler Energie zu erzeugen ist mit regenerativ erzeugtem Strom z. B. aus Windkraft oder Photovoltaik möglich. Die Herausforderung, auch im instationären, diskontinuierlichen Betrieb einen Elektrolyseur zu betreiben, ist in verschiedenen Demonstrationsprojekten erfolgreich nachgewiesen worden. Beispielfhaft soll das HYSOLAR

Projekt genannt werden. Im Rahmen dieses deutsch-saudiarabischen Gemeinschaftsvorhabens wurde im Zeitraum 1985-1990 die dynamische Betriebsweise an einer 350 kW Photovoltaik/Elektrolyse Anlage in Riad und einer 10 kW-Anlage in Stuttgart intensiv untersucht. Ab 1993 wurde der Elektrolyseur auch mit dem Strom einer Windkraftanlage betrieben. Die zusammenfassenden Ergebnisse der bisherigen Betriebserfahrungen haben gezeigt, dass die elektrolytische Wasserstoffherzeugung mittels PV- bzw. Windstrom im technischen Maßstab langzeitstabil, mit hohem Wirkungsgrad und exzellenter Wasserstoffqualität realisierbar ist. Eine kommerzielle Umsetzung ist aber bisher an den zu hohen Kosten eines derartigen Prozesses gescheitert. *Abb. 1* zeigt einen Vergleich der auf fossiler Basis erreichbaren Wasserstoffgestehungskosten mit den Kosten für Elektrolyse-Wasserstoff aus regenerativ erzeugtem Strom (*Abb. 1*).

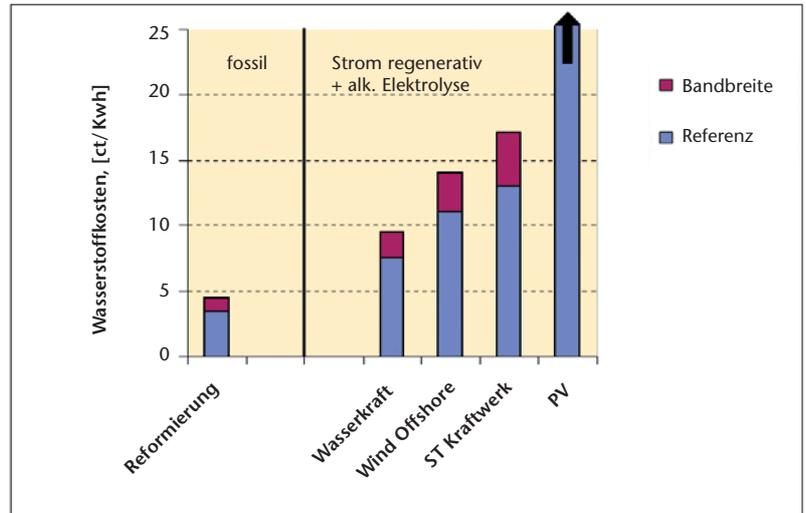
Strategien, die Erzeugungskosten von solarem Wasserstoff zu verringern, müssen darauf gerichtet sein:

- die Kosten der regenerativen Stromerzeugung signifikant zu reduzieren,
- solar-fossile Hybridprozesse als Übergangstechnologie einzubeziehen, und
- thermische Prozesse zur Vermeidung der Umwandlungsverluste bei der Stromerzeugung zu entwickeln.

Der solar/fossile Hybridprozess:

Wasserstoff-Erzeugung mittels solarer Dampfreformierung fossiler Kohlenwasserstoff-Verbindungen

Bei den Herstellungsprozessen entsprechend *Tab. 1* lassen sich 30-40% der eingesetzten Primärenergie einsparen, wenn für die Umwandlung regenerative Energie eingesetzt werden kann. Hierzu ist konzentrierte Solarstrahlung hervorragend geeignet, da mit ihr die notwendigen hohen Prozesstemperaturen erreicht werden können. In *Abb. 2* ist das Prinzip einer solaren Reformierung dargestellt. Die wesentliche neuartige Komponente ist ein durch konzentrierte Solarstrahlung beheizter Reformer.



Ein derartiger Reformer wurde beim DLR in den vergangenen acht Jahren entwickelt und im Rahmen des EU-Projekts SOLASYS im 300 kW-Maßstab gebaut. Die neuartigen Subkomponenten sind eine transparente Wand in Form eines gewölbten Quarzfensters, sowie eine gasdurchlässige, katalytisch aktive Absorberstruktur. *Abb. 3* zeigt den, beim WIS Weizmann Institut of Science in Israel installierten, solaren Reformer nach der Inbetriebnahme. Der Testbetrieb läuft

Abbildung 1
Aktuelle Wasserstoffgestehungskosten (gasförmig ab Großverbraucher) im Vergleich fossil – regenerativ

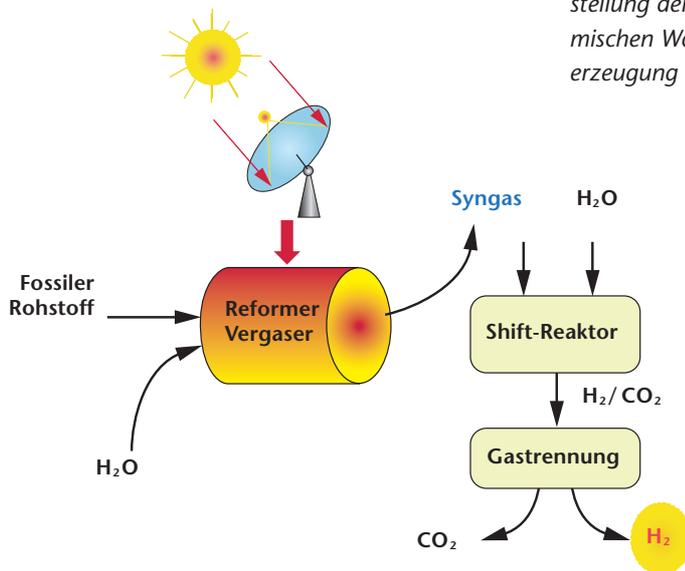


Abbildung 2
Schematische Darstellung der solarthermischen Wasserstoffherzeugung

seit dem Frühjahr 2002 äußerst erfolgreich. Auf der Basis der bisherigen Testergebnisse lässt sich ein Vergleich zwischen fossiler und solarer Wasserstoff-Erzeugung auf Basis der Dampfreformierung von Methan durchführen. Die Ergebnisse



Abbildung 3
SOLASYS Reformer im
Testbett der WIS Ver-
suchsanlage in Israel

sind in Tab. 2 zusammengestellt. Für den Kostenvergleich der Wasserstoffherzeugung wurden folgende Annahmen gemacht:

1. Für den fossilen Referenzfall wurden Methankosten von 0,2 €/m³, 8000 Betriebsstunden pro Jahr und spezifische Investitionskosten von 350 €/kW H₂ angenommen.
2. Für den solaren Herstellungsprozess wurde die Solarturm-Kraftwerkstechnologie mit einem integrierten SOLASYS Reformer mit 2000 Betriebsstunden pro Jahr und Investitionskosten von 1000 €/kW_{th} eingesetzt.

Tabelle 2
Vergleich fossiler und
solarer Wasserstoff-
erzeugung mittels
Dampfreformierung

| Dampfreformierung | | fossil/konventionell | solar |
|---|---|----------------------|-----------|
| Verhältnis CH ₄ /H ₂ O | | 1 : 3 | 1 : 3 |
| Prozessdruck | bar | 20 | 20 |
| Prozesstemperatur | °C | 850 | 850 |
| Spez. Methanverbrauch | m ³ CH ₄ /m ³ H ₂ | 0,42 | 0,25 |
| Spez. CO ₂ Emission | kg CO ₂ /m ³ H ₂ | 0,75 | 0,45 |
| Spez. Energieverbrauch | kW _{th} /m ³ H ₂ | 3,9 | (2,3) + 1 |
| H ₂ Gestehungskosten ohne Transport | ct/kWh | 3,9 | 4,8 |

Es ergeben sich ca. 25% höhere Kosten für den solaren Fall. Bei zukünftig steigenden Erdgaspreisen kann erwartet werden, dass sich der Kostenvorteil der konventionellen Herstellung deutlich reduzieren wird. Bei Kosten von ca. 0,28 €/m³ für Methan könnte die solare Reformierung wirtschaftlich konkurrenzfähig betrieben werden.

Der solarthermisch/elektrische Hybridprozess:

Wasserstoff-Erzeugung mittels solarthermischer Stromerzeugung und Hochtemperatur-Elektrolyse

Beim solarthermisch/elektrischen Hybridprozess kann solarthermische Energie sowohl zur Stromerzeugung als auch für einen direkten thermischen Prozess eingesetzt werden. Ein derartiger Hybridprozess ist die Hochtemperatur-Elektrolyse, die Dampf bei 900 °C in Wasserstoff und Sauerstoff umwandelt. Der elektrische Energiebedarf nimmt mit zunehmender Temperatur der Elektrolyse ab. Für die verschiedenen Verfahren zur Wasserelektrolyse sind die wesentlichen Parameter in Tab. 3 zusammengestellt.

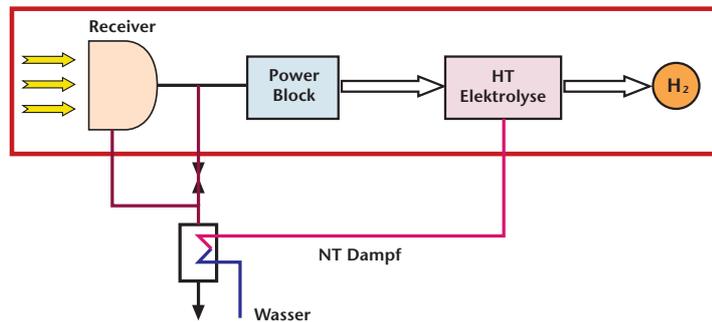
Bei einem solarthermischen Kraftwerk kann die Hochtemperatur-Elektrolyse sehr elegant realisiert werden, indem ein Teil der solaren Hochtemperatur Wärme direkt zur Dampferzeugung genutzt wird (autotherme Prozessführung), bzw. für Dampferzeugung und Bereitstellung der erforderlichen Prozesswärme von 900 °C (allotherme Prozessführung). Das Flussdiagramm für einen derartigen Hybridbetrieb ist in Abb. 4 schematisch dargestellt.

Wegen der erforderlichen hohen Prozesstemperaturen wird dieser Pfad zur solaren Wasserstoffherzeugung nur mittels der Solarturm-Technologie realisiert werden können. Für das Beispiel eines 100 MW Solarturm-Kraftwerks mit einem offenen Luftreceiver, wie er im PS-10 Projekt eingesetzt werden soll, sind der Energiebedarf

| Parameter | | Alkalische Elektrolyse | Fortgeschr. Alkalische Elektrolyse | HT-Elektrolyse (autotherm) | HT-Elektrolyse (allotherm) |
|---------------------|---|------------------------|------------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Temperatur | °C | 80 | 90–120 | 900 | 900 |
| Druck | bar | 15 | 30 | 20 | 20 |
| Elektrische Energie | kWh _{el} /Nm ³ H ₂ | 4,6 | 4,0 | 3,2 | 2,6 |
| NT-Wärme (Dampf) | kWh _{th} /Nm ³ H ₂ | - | - | 0,6 | 0,6 |
| HT-Wärme | kWh _{el} /Nm ³ H ₂ | - | - | - | 0,5 |

Tabelle 3
Eckdaten verschiedener Wasserelektrolyseure

und die Wasserstoffausbeute berechnet worden. Die Ergebnisse sind in Tab. 4 wiedergegeben. Als Referenzfall ist die alkalische Wasserelektrolyse und als Beispiel für den Hybridprozess ist die autotherme Hochtemperatur-Elektrolyse gewählt worden. Die Ergebnisse zeigen, dass durch die partielle direkte Nutzung der solarthermischen Energie die solaren Wasserstoff-Gestehungskosten erheblich gesenkt werden können. Hierzu tragen im Wesentlichen zwei Aspekte bei. Zum einen können ca. 10% der Strahlungsenergie thermisch, d.h. ohne Umwandlungsverluste genutzt werden, weiterhin kann, durch Verminderung der Receiver-Randbereich-Verluste und durch Absenkung des Schwellenwerts für den Receiver-Betrieb, ein deutlich höherer Wirkungsgrad des Receivers erreicht werden.



duzierten solaren Wasserstoffherstellung. Hierzu zählen vor allem die solare Reformierung, die bei steigenden Gaspreisen mittelfristig wirtschaftlich konkurrenzfähig werden kann. Auch ein solarthermisch/elektrischer Hybridprozess zur Wasserstoffherstellung mittels solarthermischer Stromerzeugung und solarthermisch unterstützter Hochtemperatur-Elektrolyse kann Wasserstoff zu diskussionswürdigen Kosten herstellen.

Abbildung 4
Schematische Darstellung für einen solarthermischen/elektrischen Hybridprozess

Zusammenfassung

Es ist technisch machbar, Wasserstoff mittels Solarenergie zu erzeugen. Nachgewiesen wurde, dass die Herstellung mittels alkalischer Wasserelektrolyse in Verbindung mit Strom aus Photovoltaik und Windkraft auch im intermittierenden Betrieb mit stabilem Wirkungsgrad und hoher Betriebssicherheit zu realisieren ist. Für eine breite Anwendung sind die Wasserstoff-Erzeugungskosten, vor allem für „Photovoltaik-Wasserstoff“ noch wesentlich zu hoch. Daher ist eine Senkung der solaren Stromerzeugungskosten zwingend notwendig.

Thermische Prozesse, bei denen die Umwandlungsverluste zur Stromerzeugung vermieden werden, bieten chancenreiche Optionen für die Entwicklung innovativer Prozesse zur kostenre-

| | Referenzfall ST Stromerzeugung alkalische Elektrolyse | thermisch/elektrischer Hybridprozess HT Elektrolyse |
|------------------------------------|---|---|
| Strahlungsleistung in den Receiver | MW | 312 |
| HT Wärme zum Power Block | MW | 250 |
| Prozesswärme zur Dampferzeugung | MW | - |
| Receiver Wirkungsgrad | % | 80 |
| Wasserstoffausbeute | m ³ /h | 21.700 |
| Gewinn | % | 44 |
| Wasserstoffkosten | ct/kWh | 13-17 |

Tabelle 4
Wasserstoff-Erzeugung mittels solarthermischer Stromerzeugung (Referenz) und solarthermisch/elektrischem Hybridprozess beim Einsatz der Solarturm-Kraftwerkstechnik vom Typ PS10 mit einer Leistung von 100 MW

Literatur

- Häussinger, P., Lohmüller, R., Watson, A.M.,
Hydrogen – Production , Ullmann’s Ency-
clopedia of Industrial Chemistry, Sixth
Edition, 1998 Electronic Release.
- Winter, C.J., Nitsch, J., Hrsg., Wasserstoff als
Energieträger, Springer Verlag Berlin,
Heidelberg 1986, ISBN 3-540-15865-0.
- Nitsch, J., Potenziale der Wasserstoffwirtschaft,
Gutachten für den wissenschaftlichen Beirat
der Bundesregierung Globale Umweltverän-
derungen (WBGU), Stuttgart, 2002.
- Tamme, R., Lefdal, P.M., Neue ressourcen-
schonende H₂-Herstellungsverfahren –
Kohlenwasserstoffspaltung und Reforming-
prozesse –, VDI Berichte Nr. 201, 1995,
13-26.
- Tamme R., Buck R., Epstein M., Fisher U.,
Sugarmen C., Solar Upgrading of fuels for
Generation of Electricity, J. of Solar Energy
Eng. 2001, Vol.123,160-163.
- Möller S., Buck, R., Tamme R., Epstein M.,
Liebermann D., Moshe Meri, Fisher U.,
Rotstein A., Sugarmen C., Solar production
of syngas for electricity generation:
SOLASYS project testphase, Proc. of the
11th SolarPACES Int. Symp. on concentrated
Solar Power and Chemical Energy Techno-
logies, Zurich, 2002, 231-237.
- Dönitz W., Erdle E.: „High-Temperature Electro-
lysis of Water Vapor – Status of Develop-
ment and Perspectives for Application“ Int.
J. Hydrogen Energy, Vol. 10, No. 5, 1985,
291-295.
- Becker M., Klimas P. C. (eds.): „Second Genera-
tion Central Receiver Technologies: A Status
Report“, C. F. Müller Verlag, Karlsruhe,
1993.

Strategien für eine vollständig solare Energieversorgung¹

Herausforderungen für die Energieversorgung – über Energieeffizienz zur Nachhaltigkeit

Aus den Leitlinien für eine nachhaltige Entwicklung lassen sich vier wesentliche Nachhaltigkeitsdefizite der derzeitigen Energieversorgung ableiten [1]:

- globale Klimaerwärmung
- Verknappung und Verteuerung der Reserven von Erdöl und Erdgas
- nukleare Gefährdungen
- das sehr starke Gefälle des Energieverbrauchs zwischen Industrie- und Entwicklungsländern

Aus der Analyse aktueller Szenarien lässt sich feststellen, dass nur eine aufeinander abgestimmte Kombination von Effizienz- und Konsistenzstrategien, also der Kombination von rationeller Energieverwendung und der Nutzung aller erneuerbaren Energiequellen zu wirtschaftlich sinnvollen Anteilen, ein gleichzeitiges Angehen aller Nachhaltigkeitsdefizite der heutigen Energieversorgung erlaubt. Für Deutschland sind daraus folgende mittelfristige Maßnahmen 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 12-15% bis 2030 und an der Stromerzeugung auf 25%. Bei einer Status-Quo-Entwicklung wäre nur mit Beiträgen von 4-5% bei der Primärenergie und weniger als 15% bei Strom zu rechnen.
- Mindestens Verdopplung bis Verdreifachung des Beitrags der Kraft-Wärme-Kopplung

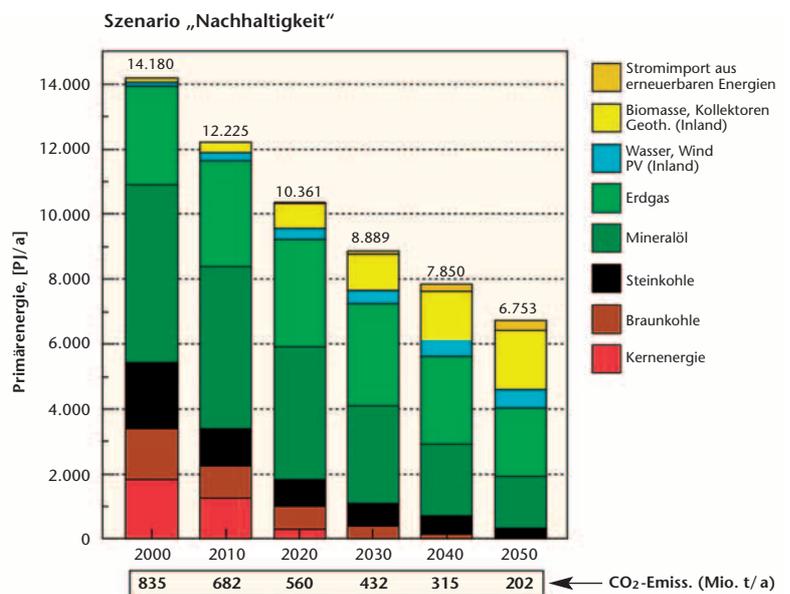
(KWK) zur Energieversorgung bis zum Jahr 2020 gegenüber heute.

Für die langfristige Umsetzung der vorgenannten Nachhaltigkeitsziele reichen diese mittelfristigen Anforderungen jedoch noch nicht aus. Ausgehend von der Entwicklung der wesentlichen Rahmenbedingungen (Bevölkerung, Bruttoinlandprodukt, Verkehrsleistungen etc.), wie sie u.a. im Analyseraster der Enquête-Kommission „Nachhaltige Energieversorgung“ des Deutschen Bundestages formuliert sind, besteht bis zur Mitte des Jahrhunderts ein massiver Veränderungsbedarf bei der Energieversorgung. Dies gilt insbesondere dann, wenn das langfristige CO₂-Minderungsziel einer Reduktion um 80%

Dr. Joachim Nitsch
DLR
joachim.nitsch@dlr.de

Dr. Manfred Fischeck
Wuppertal-Institut für
Klima, Umwelt, Energie
manfred.fischeck@wupperinst.org

Dr. Frithjof Staïß
ZSW
frithjof.staiss@zsw-bw.de



bis 2050 gegenüber dem Niveau des Jahres 1990, erreicht werden soll. Der Primärenergieverbrauch muss hierfür innerhalb von 50 Jahren auf etwa 50% des heutigen Niveaus zurückgeführt werden (Abb. 1; [2]). Im Nachfragebereich ist hier insbesondere im Bereich der Altbausanierung, der Reduktion des Stromverbrauchs und der raschen Einführung sparsamerer Fahrzeuge anzusetzen. Eine sehr konsequente Strategie der Stromeinsparung reduziert z.B. die

Abbildung 1
Entwicklung des Primärenergieverbrauchs und seiner Struktur im Szenario „Nachhaltigkeit“, sowie resultierende CO₂-Emissionen.

¹ Der Beitrag beruht im wesentlichen auf der Zusammenfassung der Untersuchung: M. Fischeck, J. Nitsch u.a. „Langfristszenarien für eine nachhaltige Energienutzung in Deutschland“ im Auftrag des Umweltbundesamtes Berlin, Juni 2002.

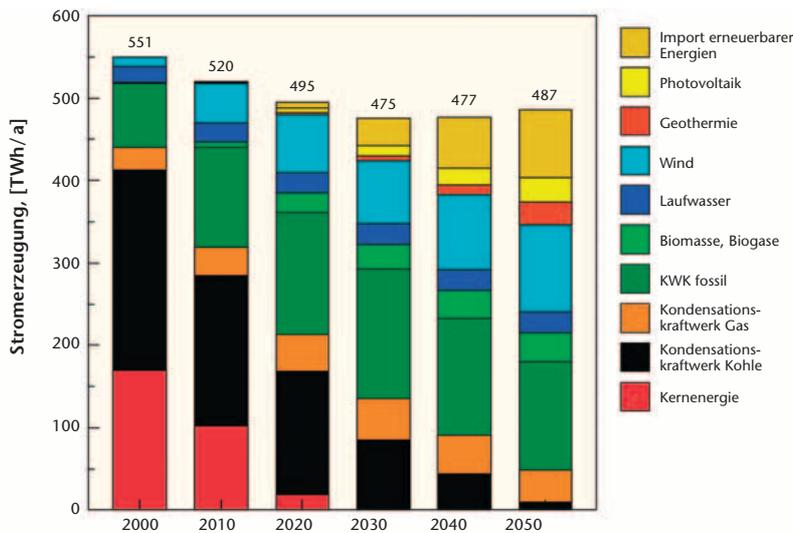


Abbildung 2
Strukturveränderungen bei der Stromerzeugung im Nachhaltigkeitsszenario bis 2050 nach Kraftwerksarten und den Beiträgen erneuerbarer Energien (ab 2030 einschließlich des Strombedarfs für die Wasserstoffherzeugung mit 57 TWh/a in 2050)

Stromnachfrage bis 2050 um insgesamt 20%. Hierfür müssen flächendeckend energieeffiziente Geräte und Produktionsverfahren zur Anwendung kommen. Die der Energieeinsparung heute vielfach gegenüber stehenden Hemmnisse können mittels innovativer Maßnahmen und Instrumente (z. B. Energieeffizienzfonds) entscheidend abgebaut werden.

Teilstrategie I

Die zukünftige Stromversorgung – effizient, dezentral und großräumig vernetzt

In einer solchen veränderten Energiewelt wird sich auch die Art der Energiebereitstellung deutlich ändern. Bis 2020 müssen rund 70% der heute bestehenden Kraftwerkskapazitäten ersetzt werden. Der im deutschen Kraftwerkspark in den nächsten beiden Jahrzehnten anstehende Ersatzbedarf schafft also 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 koordinieren diese dezentralen Stromerzeugungsanlagen und passen sie günstig in das Lastmanagement der Verbraucher ein („virtuelle“ Kraftwerke). Erneuerbare Energien werden spätestens nach 2040 zur dominierenden Quelle (2050 beträgt ihr Strom-

erzeugungsanteil mehr als 50%; Abb. 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 der Anteil der Stromerzeugung trotz weiter rückläufiger Nachfrage bei den Endverbrauchern wieder ansteigt.

Teilstrategie II

Altbausanierung und Nahwärmeausbau – Kennzeichen einer effizienten fossil-regenerativen Wärmeversorgung

Neben der Verbesserung der Wärmedämmstandards von Gebäuden erfordert das Nachhaltigkeitsszenario vor allem eine deutliche Erhöhung der energetischen Sanierungsrate von Altbauten. Heute werden zwar 2,5% aller bestehenden Gebäude jährlich saniert, 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 unterschiedlicher Größe. Hierdurch wird es möglich, eine Vielzahl effizienter Techniken mit ihren jeweiligen Vorteilen optimal miteinander zu verknüpfen. Die bereits sehr effiziente Wärmeversorgungen auf KWK-Basis mit fossilen Brennstoffen wird weiter ausgebaut und ist die Grundlage, 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 (Abb. 3). Die Umstrukturierung des Wärmesektors bewirkt, dass die Einzelversorgung auf der Basis von Heizöl praktisch 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.

Teilstrategie III

**Verkehr –
zuerst effizient dann regenerativ**

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

- Eine zielstrebige Strategie verringert den Flottenverbrauch durch technische Maßnahmen.
- Ein längerfristig freiwilliger Umstieg auf sparsamere Fahrzeuge in einer dann energiebewussteren Welt, führt zu einer deutlichen Reduktion des Kraftstoffverbrauchs.

Dies gilt insbesondere für den Individualverkehr (mittlerer Flottenverbrauch in 2030 ca. 4,5l/100 km, in 2050 ca. 2l/100 km). Zeitlich versetzt erfolgt die Einführung neuer Kraftstoffe, die nach dem Nachhaltigkeitsszenario ab 2020 Bedeutung erlangt (Abb. 4). Während zunächst der Anteil von Diesel auch im Zuge der relativ wachsenden Bedeutung des Güterverkehrs zunimmt, 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. Wasserstoff trägt 2050 mit 17% zur Deckung der Nachfrage nach Kraftstoffen bei. Biodiesels

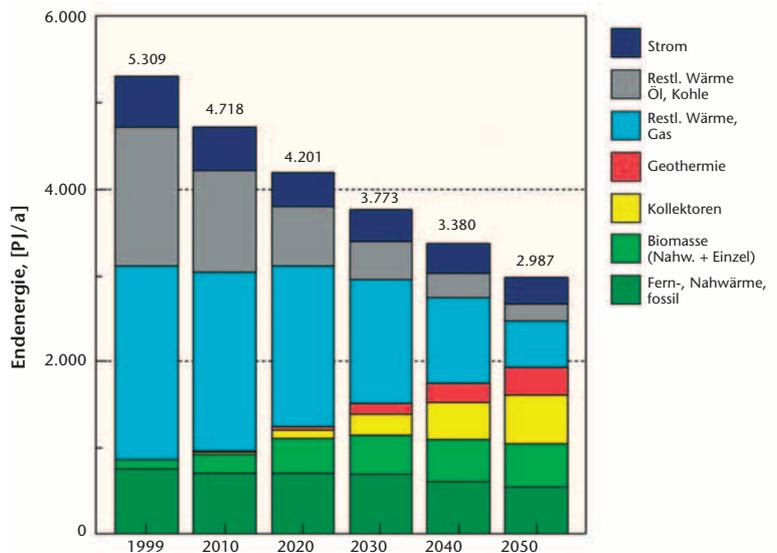


Abbildung 3
Veränderung der Wärmebereitstellungsstruktur (Heizung, Warmwasser, Prozesswärme) im Szenario Nachhaltigkeit durch Fern- und Nahwärme aus fossiler und biogener Kraft-Wärme-Kopplung sowie aus Kollektor- und Erdwärme und restl. konventionelle Energien

spielt aufgrund der Flächenkonkurrenzen zwischen dem Energiepflanzenanbau und dem aus Nachhaltigkeitsgründen wünschenswerten Ausweiten des ökologischen Landbaus nur eine bescheidende Rolle.

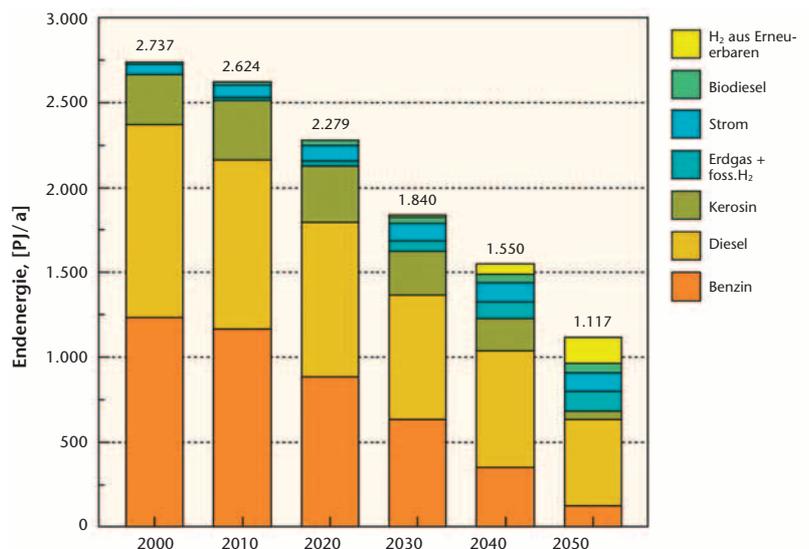
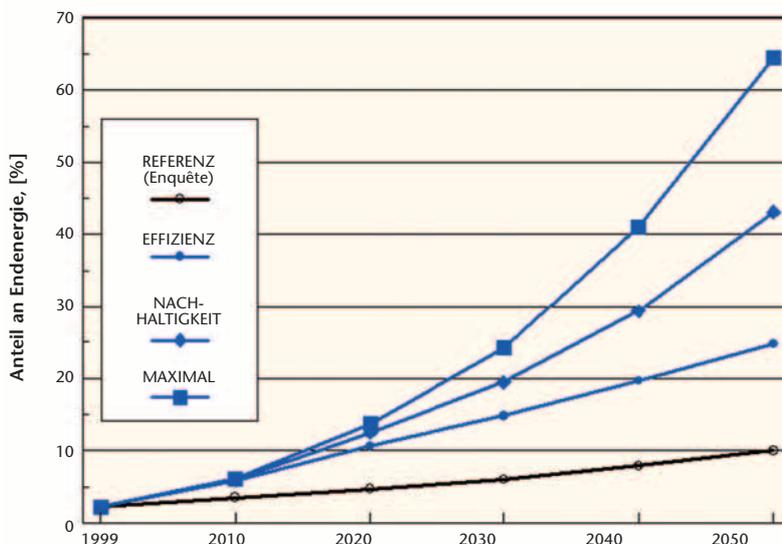


Abbildung 4
Entwicklung des Endenergiebedarfs für Verkehr und der Kraftstoffstruktur im Nachhaltigkeitsszenario bis 2050

Weitere Perspektiven einer nachhaltigen Energieversorgung

Die skizzierte Entwicklung am Beispiel des Szenarios „Nachhaltigkeit“ ist als sehr ambitioniert zu bezeichnen und erfordert über mehrere 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 angesichts der drängenden Nachhaltigkeitsdefizite die Frage, ob der dargestellte Zukunftspfad die Grenzen des Machbaren beschreibt oder noch weitergehende Handlungsspielräume verbleiben. Zu diskutieren ist, ob die Entwicklung im Bereich erneuerbarer Energien nicht noch schneller verlaufen bzw. in welcher Zeit die gesamte Energieversorgung auf erneuerbare Energien umgestellt werden könnte.

Abbildung 5
Entwicklung der Anteile erneuerbarer Energien am gesamten Endenergieverbrauch in einer „Maximalvariante“ im Vergleich zu den Szenarien „Nachhaltigkeit“ und „Effizienz“ der UBA-Studie [1] und dem Referenzszenario der Enquête-Kommission



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 erneuerbare 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 Nachhaltigkeitszenario 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 CO₂-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 *Abb. 5* in einer „Maximalvariante“ beschrieben. Sie setzt eine ausreichende Verfügbarkeit preisgünstiger Stromerzeugungspotenziale aus erneuerbaren Energien um 5 ct/kWh Stromerzeugungskosten voraus, wofür hauptsächlich größere Wind-Offshore-Parks sowie solarthermische Kraftwerke infrage kommen.

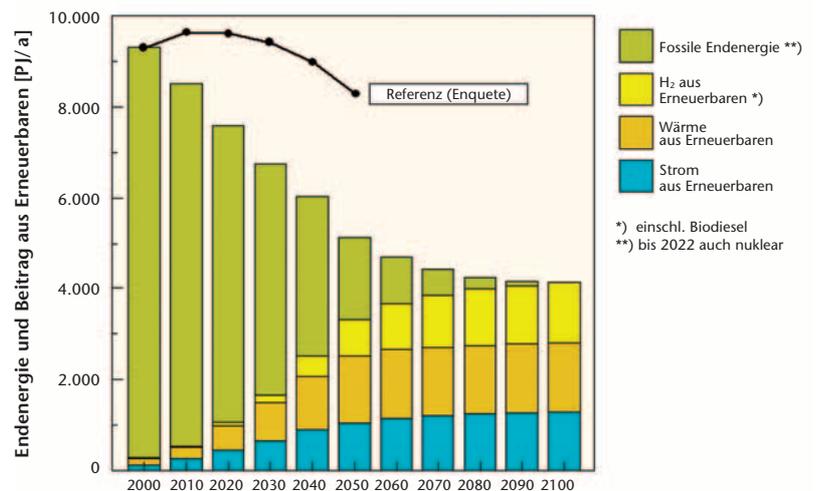
Die zusätzliche in der Maximalvariante unterstellte Stromerzeugung ist als Quelle für die elektrolytische Wasserstoffherzeugung (in Verbindung mit einem erweiterten Lastmanagement dient die Elektrolyse gleichzeitig als flexibler Verbraucher) und damit für die breite Einführung von Wasserstoff als neuem 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 „Maximalvariante“ (*Abb. 5*) im Jahr 2050 rund 70% des bis dahin deutlich reduzierten Kraftstoffbedarfs in Form von Wasserstoff bereitgestellt.

Die bis 2050 skizzierte Entwicklung kann als Zwischenschritt auf dem Weg zu einer insgesamt CO₂-freien Energieversorgung verstanden werden. Eine Extrapolation der Maximalvariante bis zum Jahr 2100 führt zu einer nahezu vollständigen Vermeidung von energetisch bedingtem CO₂ mit einem Anteil von Wasserstoff aus erneuerbaren Energien um 30–35% am Endenergieverbrauch. Der Verkehrssektor ist dann zu 85% und der Wärmebereich zu rund 30% mit Wasserstoff versorgt. Im Stromsektor werden die erforderlichen Kondensationskraftwerke zur Abdeckung der Reserveleistung ebenfalls mit Wasserstoff versorgt.

Unter günstigen Umständen – also Reduktion des Energieverbrauchs entsprechend dem Nachhaltigkeitsszenario – bei gleichzeitigem Wachstum der erneuerbaren Energien entsprechend der Maximalvariante – könnte so bis 2100 der Energiebedarf vollständig mittels erneuerbarer Energien gedeckt werden. Bei einer geringeren Ausbaugeschwindigkeit erneuerbarer Energien oder geringeren Erfolgen bei der effizienten Energienutzung kann sich der Substitutionsprozess fossiler Energien aber auch bis über 2100 erstrecken (Abb. 6).

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 Energie-Einsparoffensive 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 Ausbaus Zustands allerdings anfänglich nur langsam in Erscheinung und erfordern ausreichend hohe und länger andauernde Vorleistungen. Gerade deswegen ist die Kopplung mit einer anspruchsvollen Strategie der zu weiten Teilen rentablen rationelleren Energienutzung unerlässlich. 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 wer-



den, 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).

Energiewirtschaftliche Implikationen

Im Nachhaltigkeitsszenario kommt es im Verlauf von 50 Jahren zu stark ausgeprägten Veränderungen des Energiesystems, die beträchtliche Investitionen in Techniken der rationelleren Energienutzung und -wandlung und des Einsatzes erneuerbarer Energien voraussetzen. 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

Abbildung 6
 Wechselwirkung von Energieeffizienz und erneuerbarer Energien und mögliche Weiterentwicklung der wichtigsten Szenariogrößen im Verlauf dieses Jahrhunderts (bis 2050 Langfristszenario „REG-MAX“ [1])

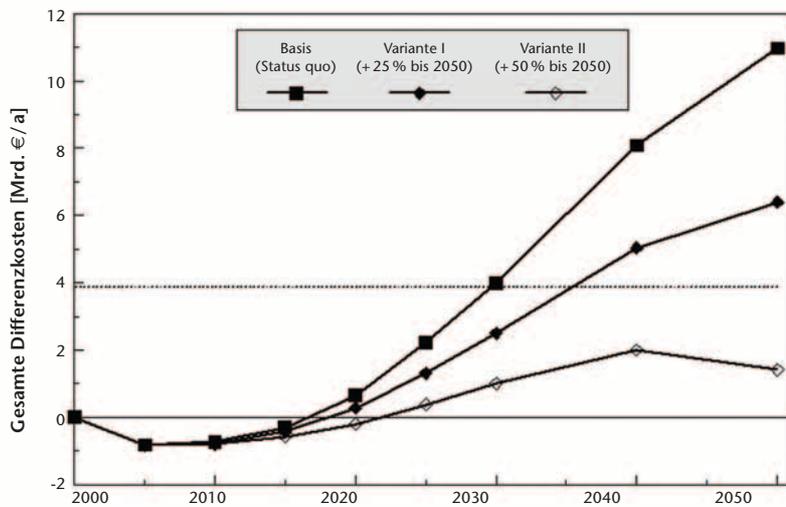


Abbildung 7
Verlauf der Kostendifferenz zwischen Nachhaltigkeits- und Status Quo Szenario für drei unterschiedliche Varianten der zukünftigen Preise fossiler Energieträger

umgesetzt werden, damit anschließend erneuerbare Energien wachsende Anteile dieses verminderten Energieumsatzes decken können.

- Die Kosten während der gesamten Aufbau-phase von erneuerbaren Energien sind zu minimieren: Die Nutzung der Potenziale erneuerbarer Energien sollte an möglichst ergiebigen Standorten mit jeweils gut angepassten Techniken erfolgen, um eine hohe Auslastung der installierten Anlagen zu erreichen. Der Ausbau muss möglichst geringe Ausgleichsanforderungen an den Netzbetrieb stellen, um geringe Kosten für den Umbau der Netze und der fossilen Reserveleistung zu erzielen. Daraus ergibt sich die Forderung nach guter zeitlicher Anpassung von Energienachfrage und regenerativem Energieangebot, was durch einen entsprechend ausgewogenen Mix von Energiequellen und eine ausreichend große Vernetzung erreicht werden kann.
- 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 (geometrische 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 entstehen, und stellt sie den vermiedenen Aufwendungen (eingesparte Brennstoffkosten und vermiedene Investitionen in konventionelle Anlagen) gegenüber, so resultieren für das Nachhaltigkeitsszenario bis 2050 Differenzkosten von insgesamt rund 200 Mrd. € (kumuliert und auf das Jahr 1998 abdiskontiert ergeben sich Differenzkosten von 40 Mrd. €). Die durchschnittlichen Zusatzkosten für die Volkswirtschaft belaufen sich demnach auf 3,8 Mrd. €/a (entsprechend 48 €/Kopf und Jahr), was etwa 0,14% des mittleren BIP in diesem Zeitabschnitt entspricht. Für die ersten beiden Dekaden kann wegen der dominierenden Durchführung von wirtschaftlichen Einsparmaßnahmen in der Gesamtbilanz sogar von negativen Kosten gegenüber 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 (Abb. 7).

Welchen Verlauf die Differenzkosten nach 2030 nehmen, hängt von der Energiepreisentwicklung ab. Steigen die Energiepreise für fossile Energieträger stärker als in der Status-Quo-Entwicklung unterstellt – was nicht unwahrscheinlich ist – oder werden mittels geeigneter Instrumente die externen Kosten in die Marktpreise 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. Bereits 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. Hierdurch steigt die Importabhängigkeit zwar wieder leicht an, schwerer wiegt aber der Beitrag des Stromimports zur Entwicklung der Exportländer infolge der Exporterlöse und damit zur Friedens- und Krisensicherung. In Ländern mit heute hohen fossilen Energieexporten kann so der Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien (und ihr späterer Export) grundlegende Basis für einen friedlichen und wirtschaftlich profitablen Übergang sein. Für andere Länder mit einem hohen Angebot an erneuerbaren Energien aber heute hohen Energieimporten, ergeben sich unter der Voraussetzung, dass zunächst die eigenen Energieprobleme gelöst werden durch Energieexporte neue Geschäftsfelder und zusätzliche Optionen zur Devisenbeschaffung. Zudem können auch Lösungsbeiträge für andere drängende Probleme geleistet werden wie z. B. für die Trinkwassergewinnung durch Meerwasserentsalzung.

Auch für den Arbeitsmarkt sind tendenziell positive 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. Der sich bereits unter Status-Quo-Bedingungen abzeichnende Arbeitsplatzabbau in der Kohle- und Mineralölwirtschaft wird eher beschleunigt. Dieser Prozess kann aber so ablaufen, dass eine sozial verträg-

liche Umgestaltung möglich ist. In der Bauwirtschaft entstehen dagegen durch die Sanierungsoffensive im Gebäudebestand zusätzlich 85.000 bis 200.000 Arbeitsplätze. Im Bereich erneuerbare Energien kann – allein für den Inlandsabsatz – langfristig ein Beschäftigungspotenzial von 280.000 bis 400.000 erschlossen werden. Dies ist ein Mehrfaches der heute in den Energieversorgungsunternehmen vorhandenen Arbeitsplätzen.

Literatur

- [1] M. Fishedick, J. Nitsch u.a.: „Langfristszenarien für eine nachhaltige Energienutzung in Deutschland.“. Untersuchung im Auftrag des Umweltbundesamtes; Forschungsbericht 200 97 104, UBA-FB 000314, Berlin, Juni 2002
- [2] J. Nitsch, C. Rösch u.a.: „Schlüsseltechnologie Regenerative Energien“, Teilbericht im Rahmen des HGF-Projekts: Global zukunftsfähige Entwicklung – Perspektiven für Deutschland. DLR Stuttgart, FZ Karlsruhe, November 2001

Weiterführende Literatur

- Prognos AG, IER Stuttgart, Wuppertal-Institut: Szenarienerstellung – Untersuchung für die Enquête-Kommission „Nachhaltige Energieversorgung“ des Deutschen Bundestages. Basel, Stuttgart, Wuppertal 2002
- J. Nitsch, H. Bradke, F. Staiß: „Struktur und Entwicklung der zukünftigen Stromversorgung Baden-Württembergs.“ Eine Untersuchung im Auftrag des Wirtschaftsministeriums Baden-Württemberg. DLR Stuttgart, ISI Karlsruhe, ZSW Stuttgart, März 2002