



Perspektiven der Energieversorgung – neue Herausforderungen und Aufgaben *

Von Prof. Dr.-Ing. Alfred Voß

Das von der Landesregierung nach der Reaktorkatastrophe von Tschernobyl in Auftrag gegebene Energiegutachten hatte die Aufgabe, technisch mögliche Wege einer langfristig gesicherten Energieversorgung Baden-Württembergs umfassend zu analysieren und hinsichtlich ihrer ökologischen, ökonomischen und gesellschaftlichen Auswirkungen zu bewerten. Dabei war insbesondere zu untersuchen, ob und in welchem Umfang und in welchen Schritten auf den Einsatz der Kernenergie verzichtet werden kann und welche Konsequenzen damit verbunden waren.

Aufbauend auf einer umfangreichen Analyse der verschiedenen Energieversorgungsoptionen sowie der Möglichkeit einer rationelleren Energieverwendung und gestützt auf die Ergebnisse einer Szenarioanalyse möglicher Wege der Energieversorgung Baden-Württembergs, kam das Energiegutachten unter anderem zu folgenden Schlußfolgerungen:

1. Die Entwicklung des Endenergieverbrauchs wird zukünftig auch bei hohen wirtschaftlichen Wachstumsraten durch vergleichsweise geringe Zuwächse geprägt sein. Aufgrund der unsicheren Wirtschafts- und Energiepreisentwicklung bestehen erhebliche Unsicherheiten über die zukünftige Entwicklung des Verbrauchs.

2. Die Möglichkeiten einer grundsätzlichen Umstrukturierung der Energieversorgung Baden-Württembergs sind gegenwärtig eng begrenzt, wenn man sich nicht am prinzipiell technisch Machbaren, sondern am Ziel einer effizienten Bereitstellung und Nutzung der Energie orientiert, so daß die gesamtwirtschaftlichen Kosten niedrig und bezahlbar bleiben.

3. Allein aus versorgungstechnischer Sicht betrachtet, ist ein Verzicht Baden-Württembergs auf die Kernenergie machbar. Er wäre allerdings mit deutlich höheren Stromerzeugungskosten, negativen gesamtwirtschaftlichen Konsequenzen und einer deutlichen Erhöhung der Umweltbelastung verbunden.

4. Der rationellen Energieverwendung kommt zur Erreichung der energiepolitischen Ziele eine besondere Bedeutung zu. Dabei gilt es vor allem, die Hemmnisse zur Ausschöpfung der bestehenden wirtschaftlichen Einsparmöglichkeiten abzubauen.

5. Der technisch mögliche Beitrag der erneuerbaren Energiequellen zur Energieversorgung Baden-Württembergs ist mit 20 Prozent durchaus beachtlich, das wirtschaftliche Potential ist deutlich geringer. Die erneuerbaren Energiequellen stellen sich zum gegenwärtigen Zeitpunkt

nicht als eine tragfähige Säule für eine heute einzuleitende Umstrukturierung der Energieversorgung dar.

6. Trotz der gegenwärtigen Entspannung auf den Weltenergiemärkten sind die Versorgungsrisiken latent weiter existent, insbesondere beim Erdöl. Der Substitution von Erdöl kommt daher weiter eine besondere Bedeutung zu.

7. Die mit der Verbrennung fossiler Energieträger verbundenen Klimaeffekte können zu einer Begrenzung der Nutzung dieser Energieträger führen.

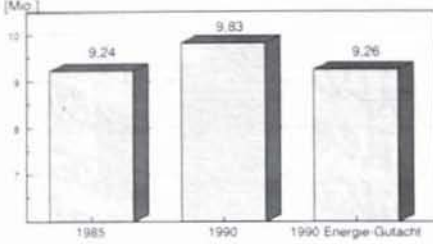
Diese Schlußfolgerungen haben auch heute noch weitestgehend Bestand. Das heißt aber nicht, daß sich die Gewichte einzelner Aspekte nicht verschoben hätten, was ggf. eine Neuorientierung von Teilbereichen der Energiepolitik notwendig macht. Auf zwei mir wesentlich erscheinende Aspekte will ich im weiteren eingehen.

Die nachstehende Abbildung stellt die im Energiegutachten für 1990 unterstellte Bevölkerungszahl der tatsächlichen gegenüber. Die Bevölkerungsentwicklung in Baden-Württemberg wurde demnach unterschätzt. Langfristig ist aus heutiger Sicht von einem Anstieg auf über 10 Mio. Einwohner und nicht von einem Rückgang auszugehen.

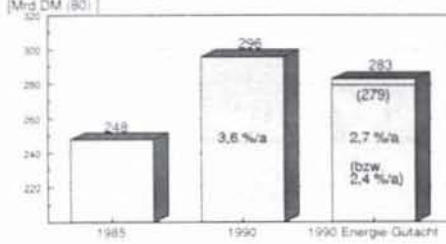
Auch das Wachstum der Gesamtwirtschaft war mit 3,6 Prozent/a bis 1990 deutlich höher als im Energiegutachten

* Vortrag vor der Verbandsversammlung des Neckar-Elektrizitätsverbandes 2. 10. 1991

Bevölkerung



Bruttoinlandsprodukt in [Mrd. DM (80)]

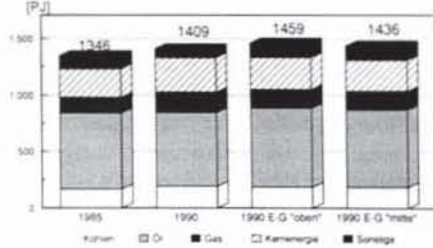


Bevölkerung und Bruttoinlandsprodukt in Baden-Württemberg

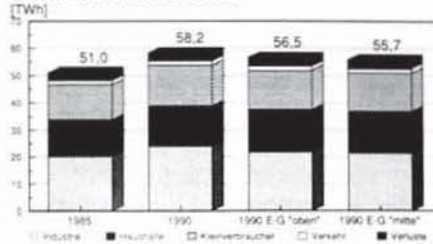
unterstellt. Höhere Wachstumsraten sind auch für die nächsten Jahre zu erwarten. Bevölkerungszuwachs und stärkeres Wirtschaftswachstum bleiben nicht ohne Auswirkungen auf den Energieverbrauch.

Der Gesamtenergieverbrauch des Jahres 1990 ist unter den projizierten Werten aus dem Energiegutachten geblieben. Dagegen hat der Stromverbrauch aber deutlich stärker zugenommen. Die durchschnittliche Wachstumsrate 1985 - 1990 betrug 2,6 Prozent/a, während im Gutachten eine Steigerung um 1,8 - 2,0 Prozent/a angenommen wurde. Wesentliche Gründe hierfür waren - die stärkere Substitution fossiler Brennstoffe durch Strom und - neue Anwendungsbereiche des Stroms,

PE-Verbrauch



Stromverbrauch in TWh



Primärenergie-Verbrauch und Stromverbrauch in Baden-Württemberg

z. B. im Kommunikationsbereich und in der Automatisierung

Aus heutiger Sicht ist davon auszugehen, daß der Stromverbrauch auch mittelfristig höhere Zuwachsraten aufweisen wird, als die 1,2 bis 1,7 Prozent/a, die im Energiegutachten unterstellt wurden. Vor diesem Hintergrund ist aus meiner Sicht die von der Landesregierung damals gezogene Schlußfolgerung, daß der Ausbau der Stromversorgung, insbesondere der Ausbau der Kernenergie für dieses Jahrhundert als abgeschlossen gelten kann, sicher noch einmal zu überprüfen.

Drohende Klimagefahren eingrenzen

Der zweite Aspekt, dessen Einschätzung sich in den letzten Jahren verändert hat, ist der der Klimaveränderung durch die Freisetzung von Treibhausgasen. Unter den Klimatologen besteht heute ein weitgehender Konsens, daß es bei einer weiter zunehmenden Freisetzung von sog. Treibhausgasen zu Klimaveränderungen mit weitreichenden, teilweise katastrophalen Auswirkungen kommen wird. Trotz noch bestehender Wissenslücken über einzelne Aspekte der komplexen Klimageschehen und über die konkreten Wirkungen von Klimaveränderungen, gibt es heute ausreichend wissenschaftlich fundierte Hinweise und Indizien, die es allein aus Versorgungsgründen und aus unserer Verantwortung für die kommenden Generationen notwendig machen, heute bereits Maßnahmen zur Begrenzung der drohenden Klimagefahren einzuleiten und nicht erst die Klärung der noch offenen Fragen abzuwarten.

Seit Beginn der Industrialisierung sind die Konzentrationen der sogenannten Treibhausgase in der Atmosphäre durch menschliche Tätigkeit angestiegen. Das wichtigste Treibhausgas ist CO₂, mit einem Anteil von rd. 50 Prozent am anthropogenen Treibhauseffekt in der letzten Dekade. 22 Prozent des anthropogenen Treibhauseffektes werden den Fluorchlorkohlenwasserstoffen (FCKW) und 13 Prozent dem Methan zugerechnet. Die verbleibenden 15 Prozent entfallen auf andere Treibhausgase wie das Distickstoffoxid (N₂O), den stratosphärischen Wasserdampf und das Ozon in der unteren Atmosphäre, an dessen Bildung in erster Linie die Stickoxide (NO_x), das Kohlenmonoxid (CO) und flüchtige organische Verbindungen beteiligt sind. Weltweit gesehen trägt der Energiebereich infolge der Nutzung fossiler Energieträger mit 50 Prozent den bei weitem größten Teil zur Emission von Treibhausgasen bei: Auf die chemischen Produkte wie FCKW und Halone, entfallen etwa 20 Prozent und die Waldvernichtung sowie die Landwirtschaft sind mit je 15 Prozent beteiligt. In den Industrieländern hat die Energieversorgung ein noch

größeres Gewicht als Quelle anthropogener Treibhausgase.

Die Minderungsziele und ihre Auswirkungen auf die Bundesrepublik

Um die Klimaänderungen und ihre Konsequenzen auf ein tolerierbares Maß zu begrenzen, hat die Weltkonferenz „The Changing Atmosphere“ von Toronto gefordert, die weltweiten CO₂-Emissionen bis zum Jahr 2005 um 20 Prozent und bis zum Jahr 2050 um 50 Prozent gegenüber dem Niveau des Jahres 1987 zu reduzieren, und die zweite Weltklimakonferenz von Genf weist darauf hin, daß es notwendig wäre, die weltweiten CO₂-Emissionen kontinuierlich um 1 Prozent pro Jahr zu reduzieren, um bis zur Mitte des nächsten Jahrhunderts den Anstieg der atmosphärischen CO₂-Konzentration auf ein Niveau zu begrenzen, das 50 Prozent über dem der vorindustriellen Zeit liegt. In ähnlicher Weise sind auch die Freisetzen der anderen Treibhausgase zu vermindern.

Was aber bedeuten diese globalen Minderungsziele für die einzelnen Staaten? Welche Treibhausgasemissionsminderungen resultieren daraus für die Bundesrepublik, damit sie ihren Beitrag zur Erreichung der globalen Ziele leistet?

Einen allgemein akzeptierten Schlüssel zur Ableitung nationaler Treibhausgasemissionsminderungsziele gibt es bisher nicht. Angesichts des Faktums, daß die energiebedingte Freisetzung von Treibhausgasen in der Vergangenheit nahezu ausschließlich durch die Industrieländer erfolgt ist, die auch heute noch für rund 75 Prozent der CO₂-Emissionen verantwortlich sind, werden sie den Hauptbeitrag zur Minderung der Treibhausgasemissionen leisten müssen.

Eine erste Orientierung über die Größenordnung der CO₂-Reduktion in unserem Land zur Erreichung der zuvor genannten globalen Minderungsziele mag die folgende einfache Überlegung geben. Um die Zielvorgaben der Toronto-Konferenz aus dem Jahr 1988 zu erreichen, wären die weltweiten CO₂-Emissionen des Jahres 1987 in Höhe von rd. 20 Mrd. t bis zum Jahr 2005 auf rd. 16 Mrd. t und bis 2050 auf 10 Mrd. t zu verringern. Bei rd. 6,5 Mrd. Menschen im Jahr 2005 und rd. 10 Mrd. Menschen im Jahr 2050 würden diese Minderungsziele bedeuten, daß im Weltdurchschnitt jeder Erdenbürger dann 2,5 bzw. 1 t CO₂ pro Jahr durch die Nutzung fossiler Energieträger freisetzen dürfte.

In der Bundesrepublik Deutschland betragen die CO₂-Emissionen je Einwohner im Jahr 1987 rd. 12 t und in der ehemaligen DDR rd. 21 t. Gleiches Emissionsrecht vorausgesetzt, müßten wir also unsere CO₂-Emissionen bis 2005 um weit mehr als 50 Prozent und bis zur Mitte

des nächsten Jahrhunderts um mehr als 90 Prozent reduzieren. Diese Zahlen mögen zum einen die Dimension der notwendigen Umstrukturierung unserer vornehmlich auf fossilen Energieträgern beruhenden Energieversorgung zur Erreichung eines klimaverträglichen Energiesystems umreißen und zum anderen andeuten, mit welchen Reduktionsforderungen an die Industrieländer, z. B. von seiten der Entwicklungsländer, im Rahmen der bevorstehenden internationalen Verhandlungen zur Erreichung einer Konvention über den Schutz der Erdatmosphäre zu rechnen ist.

Unter Berücksichtigung der berechtigten Belange der Entwicklungsländer ergibt sich, daß die von der Bundesregierung angestrebte Minderung der CO₂-Emissionen um 25 Prozent bis zum Jahr 2005 bzw. die von der Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ geforderte Reduktion um 30 Prozent nicht ausreichen werden, um die weltweiten Zielvorgaben der Toronto-Konferenz zu erreichen.

Technische, wirtschaftliche und ökologische Aspekte

Unabhängig von dem letztendlich notwendigen Umfang der Treibhausgasminde- rung kommt bei der Formulierung von energiepolitischen Strategien und Konzepten zur Erreichung einer klimaverträglichen Energieversorgung der Differenzierung zwischen dem technisch Möglichen, dem wirtschaftlich Darstellbaren und dem ökologisch Effizienten eine besondere Bedeutung zu.

Rein technisch gesehen, stehen uns zumindest auf längere Sicht sehr weitgehende Treibhausgasminderungsmöglichkeiten zur Verfügung. Aber nicht alles was technisch machbar ist, ist auch wirt-

schaftlich darstellbar und schon gar nicht effizient im Sinne der Nutzung knapper verfügbarer Ressourcen zur Vermeidung von Klimaveränderungen. Eine Politik, die die Klimagefahren auf ein tolerierbares Maß eingrenzen will, ist auf ein gleichgerichtetes Handeln aller Staaten angewiesen. Dies wird wohl nur zu erreichen sein, wenn die Lasten gerecht verteilt und so gering wie möglich sind, damit insbesondere die Länder der Dritten Welt auch ihre anderen, ihnen derzeit viel wichtigeren Entwicklungsziele erreichen können. Aus diesem Grund gewinnen kosteneffiziente CO₂-Reduktionsmaßnahmen ihre große Bedeutung. Anders ausgedrückt, eine klimaverträgliche Begrenzung der Treibhausgasemissionen wird wohl nur erreicht werden können, wenn die dafür verfügbaren, begrenzten Aufwendungen streng nach dem ökonomischen Prinzip verwendet werden, mit jeder aufgewendeten Mark eine möglichst hohe Treibhausgasminde- rung zu erreichen. Dies ist ein zentrales Kriterium für die Erarbeitung von Strategien und Konzepten zur Abwendung der Klimagefahren.

Im folgenden wird nun auf die Möglichkeiten zur Minderung der CO₂-Emissionen in der Bundesrepublik Deutschland (ohne die Gebiete der ehemaligen DDR) näher eingegangen. Dabei werden Untersuchungsergebnisse verwendet, die im Rahmen eines Studienprogramms für die Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ des Deutschen Bundestages erarbeitet wurden, an dem der Autor beteiligt war. Als Bezugszeitpunkte für quantitative Aussagen dienen dabei die Jahre 1987 und 2005.

Energiebedingte CO₂-Emissionen in Deutschland

Die der Energieversorgung in Gesamtdeutschland zuzurechnenden CO₂-Emissionen betragen im Jahr 1989 rd. 1000 Mio. t CO₂. Auf das Gebiet der alten Bundesrepublik entfielen rd. 700 Mio. t CO₂ und auf das der ehemaligen DDR rd. 315 Mio. t CO₂.

Von den 700 Mio. t CO₂-Emissionen entfallen

- 38 Prozent auf das Mineralöl
- 27 Prozent auf die Steinkohle
- 19 Prozent auf das Erdgas
- 15 Prozent auf die Braunkohle.

Alle energieverbrauchenden Sektoren sind an den Emissionen beteiligt.

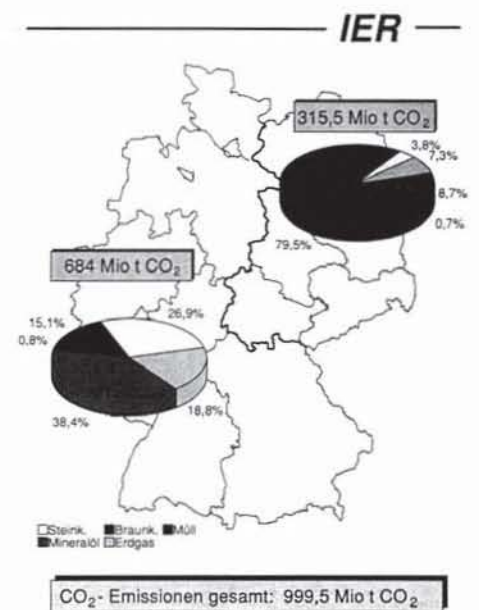
Rd. 700 Mio. t CO₂ sind als Emission der alten Bundesländer im Gedächtnis zu behalten.

CO₂-Emissionen und Minderungsmöglichkeiten

Die energiebedingten CO₂-Emissionen in den alten Bundesländern betragen im

Jahr 1987 ca. 715 Mio t CO₂/a (einschl. 10 Mio. t CO₂/a aus dem internationalen Luftverkehr). Damit trug die Bundesrepublik Deutschland mit einem Anteil von rund 3,2 Prozent zu den weltweiten energiebedingten CO₂-Emissionen bei. Die ehemalige DDR emittierte in diesem Jahr rund 350 Mio. t CO₂.

In nachstehender Graphik sind die CO₂-Emissionen in der Bundesrepublik Deutschland nach Energieträgern und Emittentenbereichen dargestellt. Die Aufschlüsselung der CO₂-Emissionen nach Energieträgern zeigt, daß im Jahr 1987 der Hauptbeitrag mit 37,4 Prozent auf die Verbrennung von Mineralölprodukten entfiel. Auf die Steinkohle entfielen 26,1 Prozent und das Erdgas bzw. die Braunkohle trugen mit 17,5 Prozent bzw. 13,9 Prozent zum gesamten Ausstoß an CO₂ bei.



CO₂- Emissionen in Mio t CO₂ im Jahr 1989

Hauptemittent in der Bundesrepublik Deutschland war im Jahr 1987 die Stromerzeugung, auf die 231 Mio. t CO₂ oder 32 Prozent der CO₂-Emissionen zurückzuführen waren. Daneben waren der Verkehr mit rd. 20 Prozent sowie die Industrie und die Haushalte mit jeweils 16 Prozent an den energiebedingten CO₂-Emissionen beteiligt.

Grundsätzlich lassen sich die energiebedingten CO₂-Freisetzungen in die Atmosphäre reduzieren durch

- eine Minderung des Verbrauchs fossiler Energieträger durch rationellere Energieverwendung oder Energieeinsparung (z. B. durch Steigerung der Nutzungsgrade in Kraftwerken oder Kesselanlagen) oder durch den Verzicht auf Energiedienstleistung,
- den Ersatz fossiler Energieträger durch CO₂-freie Energiequellen wie die Kernenergie und die erneuerbaren Energiequellen,

IER

* rationelle Energienutzung und Energieeinsparung

* Substitution fossiler Brennstoffe untereinander

* Kernenergie

* Erneuerbare Energiequellen

* Entsorgung von CO₂

* Konsumverzicht

IER

Möglichkeiten der Minderung von CO₂-Emissionen

- eine Substitution kohlenstoffreicher (z. B. Kohle) durch kohlenstoffärmere (z. B.) fossile Energieträger sowie
- durch die Vermeidung der Freisetzung des bei der Verbrennung fossiler Energieträger entstehenden CO₂'s in die Atmosphäre (CO₂-Rückhaltung und Entsorgung).

Auf die einzelnen Minderungsoptionen, ihr Minderungspotential und ihre Minderungskosten sei nun näher eingegangen.

Rationelle Energienutzung und Energieeinsparung

Auf allen Stufen der Prozeßkette von der Energiegewinnung über die Umwandlung bis zur Nutzung beim Verbraucher konnten in den letzten Jahren deutliche Fortschritte in bezug auf eine Steigerung der Energieeffizienz erzielt werden. Die Energieproduktivität unserer Volkswirtschaft hat sich seit 1973 durch eine rationellere Energieverwendung um fast 30 Prozent erhöht. In vielen Energieverwendungsbereichen konnte der spezifische Energieverbrauch deutlich reduziert werden. So z. B. sank der spezifische Stromverbrauch bei Waschmaschinen und Geschirrspülern seit 1970 um 60 bzw. 44 Prozent.

Gleichwohl gilt die Feststellung, daß mit den in der Vergangenheit erreichten Nutzungsgradverbesserungen und Effizienzsteigerungen die technischen Möglichkeiten zur Minderung des Energieverbrauchs bei gleicher Energiedienstleistung, d. h. ohne Konsumverzicht, noch keineswegs ausgeschöpft sind.

Im Rahmen der Arbeiten für die Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ wurden die aus heutiger Sicht technisch möglichen Energieeinsparungen und die damit ver-

bundenen CO₂-Minderungen abgeschätzt. Folgende Abbildung zeigt diese technisch möglichen CO₂-Reduktionspotentiale für verschiedene Verwendungsbereiche der Energie. In Summe belaufen sie sich auf 35 bis 45 Prozent der CO₂-Emissionen des Jahres 1987. Die Realisierung dieser durch Einsparmaßnahmen rein technisch möglichen CO₂-Minderungen ist dabei je nach Maßnahme mit einem unterschiedlichen Aufwand verbunden, der in der Regel mit einer steigenden Ausschöpfung des technischen CO₂-Minderungspotentials überproportional ansteigt, d. h. die Grenzkosten der CO₂-Minderung nehmen zu. Eine Quantifizierung der CO₂-Minderungskosten durch Energieeinsparung oder gar die Angabe von CO₂-Minderungs-Kosten-Funktionen der verschiedenen Energieeinsparmaßnahmen ist gegenwärtig nur für Teilbereiche möglich.

In folgender Graphik sind für einige ausgewählte Energieeinsparmaßnahmen die damit verbundenen CO₂-Minderungskosten angegeben. Als Maß für die Effizienz der CO₂-Minderung werden dabei die spezifischen CO₂-Minderungskosten verwendet, die den Aufwand in DM angeben, um die Emission einer Tonne CO₂ zu vermeiden.

Die hier und im weiteren genannten spezifischen CO₂-Minderungskosten sind dabei anhand einer für das Jahr 2005 unterstellten Energiepreissituation ermittelt worden, die dadurch gekennzeichnet ist, daß die Importpreise von Öl, Erdgas und Kohle gegenüber 1987 um rd. 50 Prozent ansteigen, während die Strompreise nur leicht zunehmen. Die in der Graphik aufgeführten negativen Minderungskosten bedeuten, daß unter den getroffenen Preisannahmen für das Jahr 2005 diese Einsparmaßnahmen auch ohne eine Be-

IER

Maßnahme	Energieein-	spez. CO ₂ -
	sparung	Min.-kosten
	[%]	[DM/t CO ₂]
Wärmedämmung		
* Schwedenstandard	30	0 bis 90
* Niedrigenergiehaus	60 bis 80	220
Gasbrennwertkessel		
	15 bis 20	- 90 bis 55
Wirkungsgradsteigerung fossiler Kraftwerke (GuD-Anlagen)		
	5 bis 20	- 155 bis 290
Kompaktleuchtstofflampe		
	70 bis 80	- 80 bis 130

Gesamtpotential: 140 bis 350 Mio t CO₂/a

Energieeinsparung und spez. CO₂-Minderungskosten einiger Energieeinsparmaßnahmen

wertung ihrer CO₂-Minderung wirtschaftlich sind, d. h. die Kostenersparnis durch geringeren Energieverbrauch ist, über die Nutzungsdauer betrachtet, größer als der Aufwand für die Energieeinsparmaßnahme. Die große Bandbreite der angegebenen spezifischen CO₂-Minderungskosten einer Maßnahme resultiert zum einen aus den unterschiedlichen Einsatzbedingungen (z. B. Leistungsgröße, jährliche Nutzungsstunden usw.) und zum anderen aus der Art des eingesparten fossilen Energieträgers (Kohle, Mineralöl oder Gas). Dennoch machen die Zahlen eindrucksvoll deutlich, daß mit demselben Kostenaufwand je nach durchgeführter Energieeinsparmaßnahme viel oder wenig Minderung des CO₂-Ausstoßes erreicht werden kann.

Austausch fossiler Energieträger untereinander

Aufgrund des unterschiedlichen Wasserstoff-Kohlenstoff-Verhältnisses der verschiedenen fossilen Brennstoffe entsteht bei ihrer Verbrennung bezogen auf dieselbe Energiemenge unterschiedlich viel CO₂. Setzt man die direkten CO₂-Emissionen der Steinkohle zu 100, so entstehen bei der Verbrennung, bezogen auf dieselbe Energiemenge, bei der Braunkohle 120, beim Heizöl 78 und beim Erdgas nur 59 Einheiten CO₂. Diese Angaben zeigen, daß die Substitution C-reicher Energieträger, wie z. B. Kohle, durch C-ärmere Energieträger, wie z. B. Erdgas, zu einer Reduktion der CO₂-Emissionen führt.

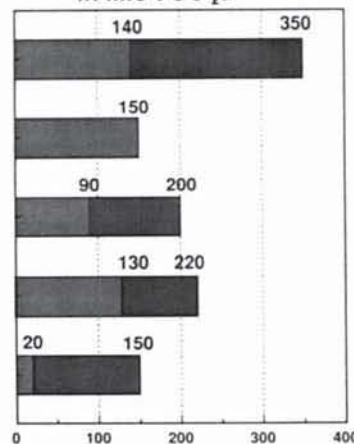
Die Techniken für einen Ersatz fester und flüssiger fossiler Energieträger durch Erdgas sind, wenn man den Verkehrssektor ausklammert, vorhanden, und auch die Ressourcensituation und

IER

CO₂-Minderung durch

- * Rationelle Energienutzung und Energieeinsparung
- * Substitution C-reicher durch C-arme fossile Energieträger
- * Kernenergie
- * Erneuerbare Energiequellen
- * CO₂ Entsorgung

Techn. CO₂ Minderungspotential in Mio t CO₂/a¹⁾



¹⁾ Überschneidende Potentiale, Zahlen können nicht addiert werden

Quelle: IER, 1994

Technische CO₂ Minderungspotentiale in der Bundesrepublik Deutschland bis zum Jahr 2005

Maßnahme	Minderungspotential in Mio t CO ₂	Spezifische Mind.-kosten in DM/t CO ₂
Stromerzeugung		
- Braunkohle durch Gas	53,4	+ 23
- Steinkohle durch Gas	53,2	+ 11 ¹⁾
Fernwärme		
- Steinkohle durch Gas	2,1	- 160 bis - 20 ¹⁾
Industrie		
- Braunkohle durch Gas	1,4	- 100 bis + 600
- Steinkohle durch Gas	10,1	- 210 bis + 450 ¹⁾
- Heizöl schwer durch Gas	3,5	- 200 bis + 100
Haushalte		
- Heizöl durch Gas	11,7	- 270 bis + 450
- Kohle durch Gas	2,0	- 170 bis + 100 ¹⁾
Kleinverbraucher		
- Heizöl schwer durch Gas	0,4	+ 30 bis + 40
- Heizöl leicht durch Gas	4,2	- 240 bis + 410
Gesamtpotential: bis 150 Mio t CO₂/a		

¹⁾ umrechnet auf der Basis der Importkohlepreise

CO₂-Minderungsmöglichkeiten der Substitution C-reicher durch C-arme fossile Brennstoffe im Jahr 2005

die Erdgasproduktionsmöglichkeiten würden es nach dem gegenwärtigen Kenntnisstand erlauben, die Erdgasnutzung mittelfristig auszuweiten, um damit zur CO₂-Minderung beizutragen.

In obigem Schaubild sind die technischen CO₂-Minderungspotentiale und Minderungskosten einer Substitution von Kohle und Heizöl durch Erdgas für die Bereiche Stromerzeugung, Fernwärme, Industrie, Haushalte und Kleinverbraucher angegeben. Das gesamte durch einen verstärkten Erdgaseinsatz bis zum Jahr 2005 technisch erschließbare CO₂-Minderungspotential liegt bei rund 150 Mio. t, die Verfügbarkeit der notwendigen Erdgasmengen vorausgesetzt. Bezogen auf die CO₂-Emissionen des Jahres 1987, entspricht dies 20 Prozent.

Die, ausgehend von den zugrunde gelegten Energiepreisen im Jahr 2005, ermittelten spezifischen CO₂-Minderungskosten einer Substitution durch Erdgas weisen eine große Bandbreite auf, die sich wieder aus den jeweiligen spezifischen Randbedingungen (Anlagekostenrelationen, Ausnutzungsdauern usw.) ergibt. Geht man, wie bei den Zahlenangaben im Schaubild, bei der Ermittlung der spezifischen CO₂-Minderungskosten von den Preisen für Importkohle aus, so wäre bei den getroffenen Preisannahmen für das Jahr 2005 der größte Teil (85 Prozent) des technischen CO₂-Minderungspotentials von 150 Mio. t CO₂ eines verstärkten Gaseinsatzes nur mit zusätzlichen Kosten (d. h. positiven spez. Minderungskosten) zu erschließen. Die spezifischen CO₂-Minderungskosten eines verstärkten Erdgaseinsatzes werden ganz wesentlich durch die Energieträgerpreisrelation zwischen den fossilen Energieträgern bestimmt. Die zukünftige

Energieträgerpreisentwicklung und damit auch die Entwicklung der fossilen Energieträgerpreisrelationen ist aber mit erheblichen Unsicherheiten verbunden. Hinzu kommt, daß eine Strategie der CO₂-Reduktion durch Austausch fossiler Energieträger untereinander über die damit verbundenen Nachfrageeffekte (verstärkte Nachfrage nach Erdgas und reduzierte Nachfrage nach Kohle) auf den Weltenergiemärkten zu Preisreaktionen führen kann, die die spezifischen CO₂-Minderungskosten erhöhen und die Kosteneffizienzen eines verstärkten Erdgaseinsatzes erheblich verschlechtern können. Hierin liegt das ökonomische Risiko einer auf Erdgas setzenden CO₂-Minderungsstrategie. Der verstärkte Einsatz von Erdgas stellt allein aufgrund seines begrenzten technischen CO₂-Minderungspotentials keine langfristig tragfähige Option zur Erreichung einer klimaverträglichen Energieversorgung dar. Erdgas könnte aber einen wesentlichen Beitrag für die Eingrenzung negativer Klimaveränderungen in der Übergangsphase hin zu einer weitgehend CO₂-freien Energieversorgung leisten.

Kernenergie

Die Kernenergie trug im Jahr 1989 mit einer Stromerzeugung von 149 TWh zu einem Drittel zur gesamten Bruttostromerzeugung in der Bundesrepublik Deutschland bei. Würde diese Stromerzeugung in Kohlekraftwerken erfolgen, so bedeutet dies eine zusätzliche CO₂-Emission in Höhe von ca. 130 Mio. t/a.

Mit dem derzeit erreichten Stand der Kerntechnik sind aber weder ihre technischen bzw. sicherheitstechnischen noch ihre ökonomischen Entwicklungsmöglichkeiten sowie ihr Potential zur Deckung des Energiebedarfs und zur CO₂-Minderung ausgeschöpft.

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt wird die Kernenergie fast ausschließlich zur Stromerzeugung eingesetzt. Die Wärmeauskopplung aus Kernkraftwerken, in Entwicklung befindliche kleine Heizreaktoren sowie der Hochtemperaturreaktor ermöglichen es mittelfristig aber auch, daß die Kernenergie einen Beitrag zur Versorgung des nichtelektrischen Energiemarktes leisten könnte.

Kurzfristig könnte eine Erhöhung der Auslastung der bestehenden Kernkraftwerke einen Beitrag zur CO₂-Minderung in der Höhe von 18 bis 27 Mio. t CO₂/a leisten, wenn die Stromerzeugung in Kohlekraftwerken entsprechend zurückgefahren würde. Mittelfristig sind weitergehende CO₂-Reduktionen nur durch den Zubau von Kernkraftwerken zu erreichen.

Das maximal technisch mögliche CO₂-Minderungspotential ergibt rd. 200 Mio. t CO₂/a, was etwa 25 Prozent der gesam-

ten CO₂-Emissionen des Jahres 1987 entspricht. Das größte Einzelpotential liegt im Bereich der Stromerzeugung, wenn im Rahmen des Ersatz- und Erweiterungsbedarfs Kernkraftwerke anstelle von Kohlekraftwerken zugebaut würden. Die technischen CO₂-Minderungspotentiale bis zum Jahr 2005 der nuklearen Fernwärme- und Prozeßwärmeerzeugung sind mit bis zu 15 bzw. 35 Mio. CO₂/a deutlich kleiner.

Für die Stromerzeugung aus Kernenergie ergeben sich dabei durchweg negative spezifische CO₂-Minderungskosten, selbst wenn man gegen die Importkohle und nicht gegen die teure heimische Steinkohle rechnet. Im Bereich der Fernwärme- sowie Prozeßdampf- und Prozeßwärmeerzeugung wären dagegen die Minderungspotentiale nur mit zusätzlichen Kosten auszuschöpfen. Die Wasserstoffherzeugung mittels Kernenergie wäre mit sehr hohen Minderungskosten behaftet.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß auch der Ausbau der Kernenergie bis zum Jahr 2005 nur einen begrenzten Beitrag zur Minderung der CO₂-Emissionen leisten könnte, der allein die Minderungsziele nicht erreichen läßt. Die Nutzung eines großen Teils des CO₂-Minderungspotentials der Kernenergie wäre dabei aus heutiger Sicht möglich, ohne die Kosten der Energiebereitstellung zu erhöhen.

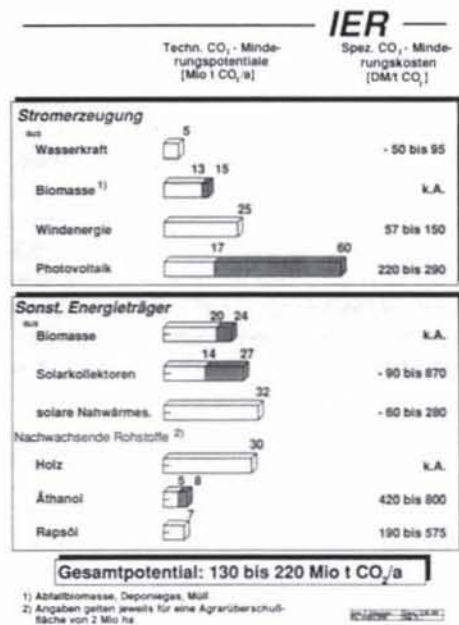
Erneuerbare Energiequellen

Der Beitrag der erneuerbaren Energiequellen zur Energieversorgung der Bundesrepublik Deutschland liegt gegenwärtig bei 2,6 Prozent des Primärenergieverbrauchs. Mit rd. 1,5 Prozent hat dabei die Wasserkraft die größte Bedeutung, gefolgt von der energetischen Abfallverwertung und dem Brennholz.

Bei der Entwicklung der Techniken zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen sind in den letzten beiden Jahrzehnten deutliche Fortschritte gemacht worden. Kleine Windenergiekonverter werden heute aus einer seriennahen Produktion angeboten. Solarkollektoranlagen zur Erwärmung von Schwimmbadwasser und Brauchwasser können heute als weitgehend technisch ausgereift bezeichnet werden. Die intensiven Forschungs- und Entwicklungsprogramme haben auch bei den Solarzellen deutliche Fortschritte in bezug auf die Steigerung der Wirkungsgrade und die Reduktion der Herstellungskosten gebracht, auch wenn die letzteren hinter den Kostenprognosen der späten siebziger Jahre zurückgeblieben sind. Nach allgemeiner Auffassung ist aber das physikalisch-technische Entwicklungspotential der Photovoltaik ebenso wie das Kostensenkungspotential noch keineswegs ausgeschöpft.

Ohne auf die technischen Entwicklungsaspekte und die Entwicklungsperspektiven der erneuerbaren Energiequellen hier näher eingehen zu können, läßt sich allgemein feststellen, daß trotz der erzielten Fortschritte nur wenige Techniken zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen heute schon wirtschaftlich konkurrenzfähig sind.

Stellt man die Frage nach dem zukünftigen Beitrag der regenerativen Energiequellen zur Reduktion von Treibhausgasen, so ist zwischen dem technischen Potential und dem unter Beachtung wirtschaftlicher Aspekte zu realisierenden Beitrag zu differenzieren.



CO₂-Minderungspotentiale und Minderungskosten der erneuerbaren Energiequellen für das Jahr 2005

Für die Stromerzeugung aus Wasserkraft, Biomasse, Windenergie und Photovoltaik ergibt sich in der Bundesrepublik Deutschland (ohne das Gebiet der ehemaligen DDR) ein technisches Potential von bis zu 140 TWh/a. Dies entspricht einem CO₂-Minderungspotential von bis zu 106 Mio. t CO₂/a. Für die Erzeugung von Wärme und anderen Energieträgern liegt das technische Potential im Bereich von 700 bis 890 PJ/a. Die gesamten technisch möglichen CO₂-Minderungen ergeben sich zu 130 bis 220 Mio. t CO₂/a, dies entspricht 18 bis 30 Prozent der CO₂-Emissionen des Jahres 1987. Bei den hier unterstellten Energiepreissteigerungen bis zum Jahr 2005 wären aber nur ein Teil des Wasserkraftpotentials und etwa 20 Prozent des Wärmeerzeugungspotentials wirtschaftlich erschließbar.

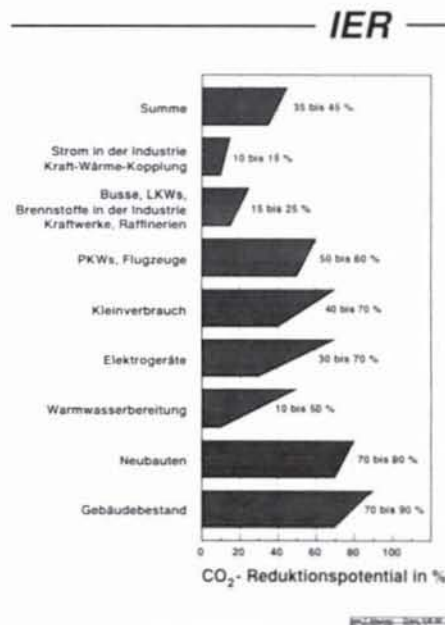
Die bis zu diesem Zeitpunkt nicht erreichte Wirtschaftlichkeit drückt sich, wie z. B. im Falle der Photovoltaik oder der Erzeugung flüssiger Energieträger aus nachwachsenden Rohstoffen, in hohen spezifischen CO₂-Minderungskosten

aus. Dies gilt auch für die in dem Bild 3 nicht aufgeführte Option des solaren Wasserstoffs.

Trotz des beachtlichen CO₂-Minderungspotentials stellen sich die erneuerbaren Energiequellen also mittelfristig als eine wenig effiziente Möglichkeit zur Treibhausgasreduzierung dar.

CO₂-Reduktionsstrategien

In nachstehender Graphik sind die zuvor diskutierten technischen CO₂-Reduktionspotentiale der uns im Prinzip zur Verfügung stehenden CO₂-Minderungsmöglichkeiten noch einmal im Vergleich dargestellt. Die einzelnen Potentialangaben bezeichnen die CO₂-Minderungen, die aus technischer Sicht, unter Vernachlässigung ökonomischer und sonstiger Aspekte, für die Bundesrepublik Deutschland (ohne die neuen Bundesländer) mittels erheblicher Anstrengungen gegebenenfalls bis zum Jahr 2005 erreichbar wären. Die technischen CO₂-Minderungspotentiale der einzelnen Optionen können nicht zu einem Gesamtpotential aufsummiert werden, da sie sich teilweise auf denselben fossilen Energieverbrauch beziehen.



Technische Potentiale der Energieeinsparung in der Bundesrepublik Deutschland in % des Energieverbrauches des Jahres 1987

Dennoch erscheint die Feststellung gerechtfertigt, daß für die Bundesrepublik Deutschland bereits mittelfristig nennenswerte CO₂-Minderungen technisch möglich erscheinen.

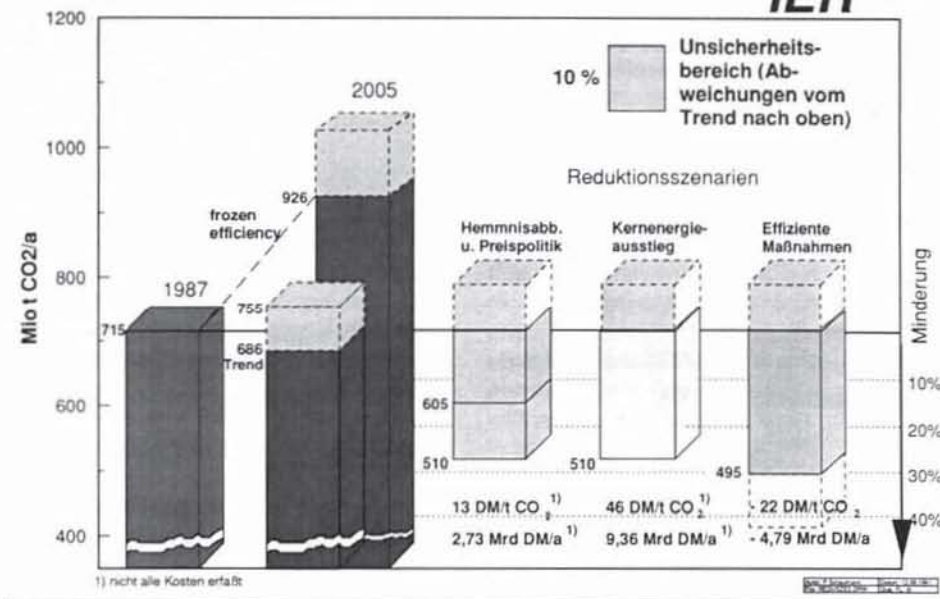
Das Vorhandensein nennenswerter technischer CO₂-Minderungsmöglichkeiten sagt aber noch nichts darüber aus, welche gesamtwirtschaftlichen Belastungen mit der Minderung von CO₂-Emissionen verbunden sind und welche CO₂-Minderungsmöglichkeiten es erlauben, vorgegebene Minderungsziele mit den gering-

sten gesamtwirtschaftlichen Belastungen zu erreichen oder wie die Aufwendungen für die CO₂-Emissionsminderungen möglichst effizient genutzt, d. h. in maximale CO₂-Minderungen umgesetzt werden. Um aber die Volkswirtschaft angesichts der gewaltigen Umstrukturierungsaufgabe der Energieversorgung zur Vermeidung nicht tolerierbarer Klimaveränderungen nicht unverträglich zu belasten, kommt effizienten Minderungsstrategien eine besondere Bedeutung zu. Im Rahmen der Arbeiten für die Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ sind aufbauend auf den Einzelanalysen der verschiedenen CO₂-Minderungsoptionen erste Überlegungen bezüglich der Ausgestaltung von Strategien zur Verminderung energiebedingter CO₂-Emissionen angestellt worden. Nach Vorgabe der Enquete-Kommission waren dabei drei Reduktionsszenarien für das Jahr 2005 zu erarbeiten, die sich an dem Ziel einer etwa 30prozentigen CO₂-Minderung (bezogen auf die Emissionen des Jahres 1987) orientieren und unterschiedliche energiepolitische Auffassungen reflektieren sollten. In einem ersten Szenario „Hemmnisabbau und Preispolitik“ sollten der Energieeinsparung Priorität gegeben werden. Die Kernkraftwerkskapazität sollte auf dem gegenwärtigen Niveau eingefroren, aber höher ausgelastet werden und der Erdgaseinsatz sollte um nicht mehr als 30 Prozent zunehmen. In einem zweiten Szenario „Kernenergieausstieg“ sollten die CO₂-Minderungen unter der Annahme eines Verzichtes auf die Nutzung der Kernenergie ab dem Jahr 2005 untersucht werden. Schließlich war ein drittes Szenario mit Ausbau der Kernenergie zu erstellen.

Allen Szenarien gemeinsam ist die Annahme einer Bevölkerungszahl von 60 Mio. im Jahr 2005 (Bundesrepublik Deutschland, ohne die neuen Bundesländer) und eines Wachstums des Bruttoinlandsproduktes von durchschnittlich 2,4 Prozent/a bis 2005.

Die durchgeführten Szenarioanalysen beschränkten sich auf die Abschätzung der energie-, emissions- und soweit möglich kostenseitigen Aspekte. Andere für die Bewertung von Minderungsstrategien wichtige Bereiche wie die Auswirkungen auf die Wirtschafts- und Wirtschaftsstrukturentwicklung, auf die Wettbewerbsfähigkeit und die Beschäftigung wurden ebensowenig untersucht wie die Fragen der Durchsetzbarkeit und der Robustheit der Ergebnisse hinsichtlich unsicherer Annahmen. Insofern können die Ergebnisse nur eine erste Orientierung liefern.

In folgendem Bild ist der Versuch gemacht worden, wesentliche Ergebnisse der Reduktionsszenarien im Vergleich darzustellen. Die mit „Trend“ bezeichneten



CO₂-Reduktionsszenarien im Vergleich

te Entwicklung der CO₂-Emissionen beruht auf der Annahme, daß die gegenwärtigen Rahmenbedingungen der Energieversorgung im wesentlichen unverändert fortbestehen. Insbesondere werden keine speziellen Eingriffe zur Minderung der CO₂-Emissionen unterstellt. Unter diesen Status-quo-Bedingungen bleiben die CO₂-Emissionen bis zum Jahr 2005 nahezu unverändert auf dem Niveau des Jahres 1987 (Reduktion um 4 Prozent). In Anbetracht des im Jahr 2005 gut 50 Prozent höheren Bruttoinlandsproduktes und einer gestiegenen Energiedienstleistungsnachfrage bedeutet dies aber, daß die dem Trendszenario zugrundeliegenden Effizienzsteigerungen und Energieträgersubstitutionen bereits zu einer deutlichen Minderung des spezifischen CO₂-Ausstoßes geführt haben. Diese implizite CO₂-Minderung, die ja aus heutiger Sicht auch noch zu leisten ist, läßt sich näherungsweise quantifizieren, wenn man die energetischen Nutzungsgrade und die Energieträgerstruktur des Jahres 1987 bis zum Jahr 2005 festschreibt. Unter dieser Annahme der „frozen efficiency“ würde sich für das Jahr 2005 ein Anstieg der CO₂-Emissionen auf rund 920 Mio. t CO₂ ergeben. Die Differenz zu den CO₂-Emissionen der Trendentwicklung in Höhe von 240 Mio. t CO₂ ist als Minderungsbedarf mit zu beachten, wenn man die angestrebte CO₂-Minderung, d. h. die Minderungsziele, an dem CO₂-Emissionsniveau des Jahres 1987 orientiert.

Szenario „Hemmnisabbau und Preispolitik“

Im Reduktionsszenario „Hemmnisabbau und Preispolitik“ nehmen die CO₂-Emissionen im Vergleich zu 1987 um rund 205 Mio. t, d. h. um 28,7 Prozent auf

510 Mio. t CO₂/a ab. Diese CO₂-Minderung ist zurückzuführen auf eine weitgehende Ausschöpfung der Einsparmöglichkeiten in allen Endverbraucherbereichen, eine Verlagerung und Reduktion von Verkehrsleistung, eine erhebliche Ausweitung der Strom- und Wärmezeugung mittels erneuerbaren Energiequellen, nahezu eine Verdoppelung der KWK-Erzeugung und einen um 20 Prozent zunehmenden Erdgaseinsatz. Des weiteren werden CO₂-Emissionen in Höhe von 27 Mio. t CO₂ durch eine bessere Auslastung der bestehenden Kernkraftwerke vermieden.

Reduktionsszenario „Kernenergieausstieg“

Das Reduktionsszenario „Kernenergieausstieg“ weist mit 510 Mio. t CO₂ dieselben CO₂-Emissionen und damit auch dieselben Emissionsreduktionen wie das Szenario „Hemmnisabbau und Energiepolitik“ aus. Um dies zu erreichen, wären aufgrund der Beendigung der Nutzung der Kernenergie im Jahr 2005 die Energieeinsparungen weiter zu verstärken, die Nutzung der erneuerbaren Energiequellen auszuweiten und der Erdgaseinsatz zu erhöhen. Die dazu notwendigen Maßnahmen seien an einigen Beispielen verdeutlicht. Für den Raumwärmebereich wird unterstellt, daß nahezu 40 Prozent des Altbaubestandes wärmetechnisch so saniert werden, daß der durchschnittliche Heizenergieverbrauch um zwei Drittel absinkt und alle Neubauten bis zum Jahr 2005 im Durchschnitt einen spez. Nettoheizenergiebedarf von 40 kWh/m²a bei Einfamilienhäusern bzw. 25 kWh/m²a bei Mehrfamilienhäusern aufweisen. Die Stromerzeugung in der Kraft-Wärme-Kopplung müßte etwa 2,8mal so hoch sein wie 1987. Die Strom-

erzeugungskapazität auf Basis erneuerbarer Energiequellen wäre bis 2005 um etwa 11,3 GW_{el} auszuweiten, allein auf die Windkraft entfielen davon 5,2 GW_{el}. Letztlich sei noch erwähnt, daß der Erdgaseinsatz um insgesamt 50 Prozent zu nehmen müßte und die Stromerzeugung in erdgasgefeuerten Kondensationskraftwerken müßte von 21,5 TWh in 1987 auf 103,6 TWh in 2005, d. h. um fast 500 Prozent ansteigen.

Reduktionsszenario „Ausbau der Kernenergie“

Im Reduktionsszenario mit Ausbau der Kernenergie sind die einzelnen CO₂-Minderungsmaßnahmen weitgehend nach den Effizienzkriterien ausgewählt worden. Im Sinne einer effizienzorientierten CO₂-Minderungsstrategie werden dabei alle im Rahmen der erwarteten Energiepreissteigerungen aus volkswirtschaftlicher Sicht sinnvollen Energieeinsparmöglichkeiten, auch durch eine verstärkte Kraft-Wärme-Kopplung, ebenso genutzt, wie die diesbezüglichen Potentiale der erneuerbaren Energiequellen. Die Kernenergie trägt sowohl im Bereich der Stromerzeugung wie auch durch die Bereitstellung von Fern- und Prozesswärme zur CO₂-Minderung bei. Mit vermiedenen CO₂-Emissionen in Höhe von fast 92 Mio. t CO₂/a entfällt der bei weitem größte Anteil der durch den Ausbau der Kernenergie reduzierten CO₂-Emissionen auf eine Ausweitung der Stromerzeugung in Kernkraftwerken. Dabei wird unterstellt, daß sich die installierte Bruttoengpaßleistung der Kernkraftwerke von heute 23,6 GW_{el} auf 36,6 GW_{el} im Jahr 2005 erhöht. Der Anteil der Kernenergie an der gesamten Stromerzeugung würde dann im Jahr 2005 rd. 56 Prozent betragen.

Insgesamt ergeben sich in diesem effizienzorientierten Reduktionsszenario mit Kernenergieausbau CO₂-Emissionen im Jahr 2005 in Höhe von 495 Mio. t. Dies entspricht einer Minderung um 220 Mio. t CO₂ oder 31 Prozent gegenüber dem Jahr 1987.

Vergleich der Reduktionsszenarien

Vergleicht man nun die drei Reduktionsszenarien untereinander, so ergeben sich trotz der in der Größenordnung vergleichbaren CO₂-Minderungen doch einige wesentliche Unterschiede. Sie liegen einmal in dem unterschiedlichen Kostenaufwand für die Erreichung der CO₂-Minderung. Die jährlichen Nettokosten für die CO₂-Minderungsmaßnahmen belaufen sich im Falle des Reduktionsszenarios „Hemmnisabbau und Energiepolitik“ auf rd. 2,7 Mrd./a und im Fall des Reduktionsszenarios „Kernenergieausstieg“ auf mehr als 9 Mrd. DM/a, wobei

hier wegen fehlender Daten nicht alle Zusatzkosten erfaßt werden konnten und im Falle des Kernenergieausstiegs z. B. auch die Kapitalvernichtung durch die vorzeitige Stilllegung der Kernkraftwerke nicht bewertet worden ist.

Die Minderung der CO₂-Emissionen im effizienzorientierten Reduktionsszenario mit Ausbau der Kernenergie wäre dagegen mit einer Kostenentlastung der Volkswirtschaft von rund 4,8 Mrd. DM/a verbunden.

Ein weiterer wesentlicher Unterschied zwischen den drei Reduktionsstrategien besteht im Hinblick auf ihre Möglichkei-

ten, falls notwendig, weitergehende CO₂-Minderungsziele zu erreichen. Diese sind im Falle des Kernenergieausstiegs wohl nicht vorhanden. Würde man hingegen bei der Reduktionsstrategie mit Ausbau der Kernenergie, die in den beiden anderen Szenarien unterstellten weitergehenden Maßnahmen im Bereich der Energieeinsparung, der Ausweitung der Nutzung erneuerbarer Energiequellen und von Erdgas auch durchführen, so ließen sich die CO₂-Emissionen und weitere 65 Mio. t/a reduzieren.

Letztlich sei noch darauf hingewiesen, daß sich die drei Reduktionsszenarien

auch hinsichtlich der notwendigen politischen Eingriffstiefe zu ihrer Umsetzung unterscheiden, wobei die CO₂-Minderung mit gleichzeitigem Kernenergieausstieg wohl den größten politischen Eingriffs- und Regelungsbedarf hat.

Prof. Dr.-Ing. Alfred Voß leitet das Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieverwendung der Universität Stuttgart