

**Energie und Klima:
Ist eine klimaverträgliche
Energieversorgung erreichbar?**

Prof. Dr. A. Voss

Einleitung

Waren es in den achtziger Jahren die sogenannten neuartigen Waldschäden, die im Mittelpunkt der Umweltdiskussion standen, so ist es heute die Gefahr einer anthropogenen Klimaveränderung mit ihren weitreichenden Konsequenzen, die als die zentrale Herausforderung angesehen wird, der sich die Menschheit gegenüberübersieht. Es kann davon ausgegangen werden, dass es trotz der noch bestehenden Wissenslücken über einzelne Aspekte des komplexen Klimageschehens und über die Auswirkungen von Klimaveränderungen ausreichend wissenschaftlich fundierte Hinweise und Indizien gibt, die es allein aus Vorsorgegesichtspunkten und aus unserer Verantwortung für die kommende Generation notwendig machen, heute bereits Massnahmen zur Begrenzung der drohenden Klimaveränderung einzuleiten und nicht erst die Klärung der noch offenen Fragen abzuwarten.

Vor diesem Hintergrund soll zunächst die Dimension der Herausforderung deutlich gemacht werden, um die klimarelevanten Spurengasemissionen auf ein Niveau zurückzuführen, das die Klimaänderungen in tolerierbaren Grenzen hält. Danach werden für die Bundesrepublik Deutschland die aus heutiger Sicht bestehenden Möglichkeiten der Minderung von Treibhausgasen näher diskutiert, um damit der Beantwortung der Frage, ob eine klimaverträgliche Energieversorgung machbar und ökonomisch verkraftbar ist, ein Stück näherzukommen.

Bedeutung von Treibhausgasen für das Klima

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 rund 50 % am anthropogenen Treibhauseffekt in der letzten Dekade. 22 % des anthropogenen Treibhausef-

fektes werden den Fluorchlorkohlewasserstoffen (FCKW) und 13 % dem Methan zugerechnet. Die verbleibenden 15 % entfallen auf andere Treibhausgase wie das Distickstoffoxid (N_2O), 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 % den bei weitem grössten Teil zur Emission von Treibhausgasen bei. Auf die chemischen Produkte, wie FCKW und Halone, entfallen etwa 20 %, und die Waldvernichtung sowie die Landwirtschaft sind mit je 15 % beteiligt. In den Industrieländern hat die Energieversorgung ein noch grösseres Gewicht als Quelle anthropogener Treibhausgase, und dieses Gewicht wird, angesichts der im Montrealer Protokoll und in London 1990 beschlossenen Ziele zur drastischen Reduktion der Produktion und des Verbrauchs von FCKW und Halonen, weiter zunehmen. Aus diesem Grund wird im weiteren die Energieversorgung, als die wichtigste Quelle der Treibhausgasemissionen, näher untersucht.

Weltweite Reduktionsnotwendigkeiten

Um die Klimaänderungen und ihre Konsequenzen auf ein tolerierbares Mass zu begrenzen, hat die Weltkonferenz "The Changing Atmosphere" von Toronto gefordert, die weltweiten CO_2 -Emissionen bis zum Jahr 2005 um 20 % und bis zum Jahr 2050 um 50 % gegenüber dem Niveau des Jahres 1987 zu reduzieren, und die zweite Weltklimakonferenz von Genf weist darauf hin, dass es notwendig wäre, die weltweiten CO_2 -Emissionen kontinuierlich um 1 % pro Jahr zu reduzieren, um bis zur Mitte des nächsten Jahrhunderts den Anstieg der atmosphärischen CO_2 -Konzentration auf ein Niveau zu begrenzen, das 50 % über dem der vorindustriellen

Zeit liegt. In ähnlicher Weise sind auch die Freiset- zungen der anderen Treibhausgase zu vermindern. Diese Reduktionen der globalen CO₂-Emissionen bzw. die da- mit verbundenen Einschränkungen des Verbrauchs fossi- ler Energieträger sind dabei vor dem Hintergrund zu sehen, dass nahezu alle Energieprognosen von einem weiteren Anstieg des weltweiten Verbrauchs an fossi- len Energieträgern ausgehen.

Was aber bedeuten diese globalen Minderungsziele für die einzelnen Staaten? Welche Treibhausgasemissions- minderungen resultieren daraus für die Bundesrepu- blik, damit sie ihren Beitrag zur Erreichung der glo- balen Ziele leisten? Einen allgemein akzeptierten Schlüssel zur Ableitung nationaler Treibhausgasminde- rungsziele gibt es bisher nicht. Angesichts des Fak- tums, dass die energiebedingte Freisetzung von Treib- hausgasen in der Vergangenheit nahezu ausschliesslich durch die Industrieländer erfolgt ist, die auch heute noch für rund 75 % 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 zu- vor genannten globalen Minderungsziele mag die fol- gende einfache Ueberlegung geben. Um die Zielvorgaben der Toronto-Konferenz aus dem Jahr 1988 zu erreichen, wären die weltweiten CO₂-Emissionen des Jahres 1987 in Höhe von rund 20 Mrd. t bis zum Jahr 2005 auf rund 16 Mrd. t und bis 2050 auf 10 Mrd. t zu verringern. Bei rund 6,5 Mrd. Menschen im Jahr 2005 und rund 10 Mrd. Menschen im Jahr 2050 würden diese Minde- rungsziele 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 im Jahr 1987 - dem Referenzjahr für die zuvor genannten Min- derungsziele - die CO₂-Emissionen je Einwohner rund

12 t und in der ehemaligen DDR rund 21 t. Gleiches Emissionsrecht vorausgesetzt, müsste die Bundesrepublik Deutschland (alt) also die CO₂-Emissionen bis 2005 um weit mehr als 50 % und bis zur Mitte des nächsten Jahrhunderts um mehr als 90 % reduzieren. Diese Zahlen mögen zum einen die Dimension der notwendigen Unstrukturierung unserer vornehmlich auf fossilen Energieträgern beruhenden Energieversorgung zur Erreichung eines klimaverträglichen Energiesystems umreißen und zum anderen andeuten, mit welchen Reduktionsforderungen an die Industrieländer, zum Beispiel von Seiten der Entwicklungsländer, im Rahmen der laufenden 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 % bis zum Jahr 2005 bzw. die von der Enquête-Kommission "Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre" geforderte Reduktion um 30 % nicht ausreichen werden, um die weltweiten Zielvorgaben der Toronto-Konferenz zu erreichen.

Die für eine internationale Konvention zum Schutz der Erdatmosphäre notwendige Festlegung nationaler Reduktionsvorgaben, das heisst des Umfangs und des Tempos der national erforderlichen Begrenzungen der energiebedingten Treibhausgasemissionen, ist noch zu leisten. Diese schwierige Aufgabe wird wohl nur gelingen, wenn für die einzelnen Länder bzw. Ländergruppen fundierte Informationen über die jeweiligen Minderungsmöglichkeiten und ihre Konsequenzen vorliegen, um die Belastungen der notwendigen tiefgreifenden Umstrukturierung der Energieversorgung gerecht verteilen zu können. Unabhängig von dem letztendlich notwendigen Umfang der Treibhausgasminderung 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 zumindest auf längere Sicht sehr weitgehende Treibhausgasminderungsmöglichkeiten zur Verfügung. Aber nicht alles was technisch machbar ist, ist auch wirtschaftlich darstellbar und schon gar nicht effizient im Sinne der Nutzung knapper verfügbaren 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 Treibhausgasminderung 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 Enquête-Kommission "Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre" des Deutschen Bundestages erarbeitet wurden, an denen der Autor beteiligt war. Als Bezugszeitpunkte für quantitative Aussagen dienen dabei die Jahre 1987 und 2005.

CO₂-Emissionen und Minderungsmöglichkeiten

Die energiebedingten CO₂-Emissionen in der Bundesrepublik Deutschland (alt) betragen 1989 ca. 684 Mio t CO₂ (einschliesslich des internationalen Luftverkehrs). Die gesamten CO₂-Emissionen der Bundesrepublik (alt) hatten damit einen Anteil von rund 3 % an den weltweiten energiebedingten CO₂-Emissionen.

Im Bild S. 52 sind die CO₂-Emissionen in der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 1989 nach Energieträgern und Sektoren dargestellt. Es wird ersichtlich, dass das Mineralöl mit 38,4 % den Hauptemittenten der CO₂-Emissionen darstellt. Auf die Steinkohle entfielen 26,9 % und das Erdgas bzw. die Braunkohle trugen mit 18,8 % bzw. 15,1 % zum gesamten CO₂-Ausstoss bei. Hauptemittent in der Bundesrepublik Deutschland war im Jahr 1989 die Stromerzeugung mit einem Anteil von 34,3 %. Daneben waren der Verkehr mit rund 20 % sowie die Industrie und die Haushalte mit 16,9 % bzw. 12,7 % an den energiebedingten CO₂-Emissionen beteiligt. Prinzipiell lassen sich die energiebedingten CO₂-Emissionen durch eine Palette unterschiedlichster Massnahmen reduzieren. Darunter fallen

- eine Minderung des Verbrauchs fossiler Energieträger durch rationelle Energienutzung oder Energiesparen (z.B. durch Steigerung der Nutzungsgrade in Kraftwerken oder Einsatz von GuD-Anlagen) oder durch Konsumverzicht,
- eine Substitution kohlenstoffreicher Energieträger (z.B. Kohle) durch kohlenstoffarme Energieträger (z.B. Erdgas),
- der Ersatz fossiler Energieträger durch CO₂-freie Energiequellen wie die Kernenergie und die regenerativen Energiequellen,
- die Vermeidung der Freisetzung des bei der Verbrennung fossiler Energieträger entstehenden CO₂ in die Atmosphäre (CO₂-Rückhaltung und Entsorgung).

Auf alle zuvor genannten Optionen soll im folgenden kurz eingegangen werden. Dabei werden ihre technischen Minderungspotentiale und die jeweiligen spezifischen CO₂-Minderungskosten der Massnahmen erläutert.

Rationelle Energieanwendung und Energieeinsparung

Betrachtet man einen Zeitraum von 20 Jahren in der Vergangenheit, so kann man feststellen, dass auf allen Stufen der Prozesskette, also von der Energiegewinnung über die Umwandlung bis zur Nutzung beim Letztverbraucher, deutliche Fortschritte in bezug auf die Energieeffizienz erzielt wurden. Die Energieintensität unserer Volkswirtschaft, also der Energieverbrauch pro Einheit der volkswirtschaftlichen Wertschöpfung, konnte seit 1973 um fast 30 % reduziert werden.

Die rationelle Energienutzung hat in den letzten Jahren Fortschritte in allen Bereichen erzielen können. Bild S. 53 zeigt beispielhaft die Senkung der spezifischen Stromverbräuche bei Elektro-Haushaltsgeräten bezogen auf das Jahr 1970. So sank beispielsweise der spezifische Stromverbrauch bei Waschmaschinen und Gefriergeräten seit 1970 um 60 bzw. 56 %. Der spezifische Stromverbrauch von Geschirrspülern, Kühlschränken und Backöfen reduzierte sich im gleichen Zeitraum um 44 %, 46 % bzw. 39 %. Es bleibt jedoch anzumerken, dass mit der in der Vergangenheit erzielten Nutzungsgradverbesserung und Effizienzsteigerung die technischen Möglichkeiten zur Energieeinsparung bei gleicher Energiedienstleistung, das heisst ohne Konsumverzicht, noch nicht ausgeschöpft sind.

Bild S. 54 zeigt die technischen Potentiale der Energieeinsparung in der Bundesrepublik Deutschland (alt), wie sie von der Enquête-Kommission "Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre" des deutschen Bundes-

tages in ihrem Studienprogramm ermittelt wurden. Diese technischen Potentiale bezeichnen die aus heutiger Sicht technisch möglichen Energieeinsparungen, ohne Berücksichtigung wirtschaftlicher Aspekte und von Hemmnissen, die einer Ausschöpfung der Potentiale entgegenstehen. Insgesamt wurde ein technisches Einsparpotential von 35 bis 45 % des Energieverbrauchs des Jahres 1987 ermittelt.

Die Verminderung des Energieverbrauchs, also die Einsparung von Energie, kann dabei in der Regel in nennenswertem Umfang nur über Investitionen, zum Beispiel in neue, energietechnische günstigere Geräte oder Investitionen in der Wärmedämmung bei Altbauten, erfolgen. Technisch gesehen ist hier sehr viel möglich, zum Beispiel ein Null-Energie-Haus, bei dem bei Zwangsbelüftung nahezu allein die internen Wärmequellen zur Aufrechterhaltung einer angenehmen Raumtemperatur ausreichen. Die Frage ist aber auch hier, ob all das, was mit höherem Aufwand technisch möglich ist, auch aus der Sicht der Vermeidung von Treibhausgasen effizient ist.

Als Mass für die Effizienz, das heisst für das Kosten-Nutzen-Verhältnis von CO₂-Minderungsmaßnahmen werden im folgenden die spezifischen CO₂-Minderungskosten in DM/t CO₂ verwendet, die den Aufwand angeben, um die Emission einer Tonne CO₂ zu vermeiden. Die hier im weiteren genannten spezifischen Minderungskosten sind dabei anhand einer für das Jahr 2005 unterstellten Energiepreissituation ermittelt worden, die dadurch gekennzeichnet ist, dass die Importpreise von Oel, Erdgas und Kohle gegenüber 1987 um rund 50 % ansteigen. Die Strompreise nehmen dagegen im gleichen Zeitraum nur geringfügig zu. Die Kostenermittlung erfolgt hier aus volkswirtschaftlicher und nicht aus betriebswirtschaftlicher Sicht.

Bild S. 55 zeigt exemplarisch einige der zuvor genannten Einsparmassnahmen und die damit verbundenen

spezifischen CO₂-Minderungskosten. Die negativen Kostenangaben implizieren dabei, dass diese Massnahme auch ohne Betrachtung ihrer CO₂-Minderung ökonomisch gesehen sinnvoll ist. Dies ist zum Beispiel der Fall, wenn die Kostenersparnis einer Energiesparmassnahme grösser ist als der finanzielle Aufwand für diese Massnahme. Die Beispiele zeigen, dass man mit einem gegebenen Kostenaufwand je nach ergriffener Energieeinsparmassnahme sehr unterschiedliche Minderungen des CO₂-Ausstosses erreichen kann. Die technischen Minderungspotentiale der rationellen Energieanwendung und des Energiesparens sind beachtlich. Für das Jahr 2005 ergibt sich ein Gesamtpotential von bis zu 350 Mio t CO₂, das entspricht rund 50 % der CO₂-Emissionen des Jahres 1987.

CO₂-Minderung durch fossile Brennstoffsubstitution

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 kohlenstoffreicher Energieträger, wie zum Beispiel die Kohle, durch kohlenstoffärmere Energieträger, wie zum Beispiel das Erdgas, zu einer Reduktion der CO₂-Emissionen führt.

Die Substitution fester und flüssiger fossiler Energieträger durch Erdgas wird, wenn man vom Verkehrssektor absieht, nicht durch das Fehlen der entsprechenden Techniken beschränkt. Auch die Verfügbarkeit von Erdgas stellt aus heutiger Sicht keinen begrenzenden Faktor für die mittelfristige Ausweitung der Erdgasnutzung zur Minderung der CO₂-Emissionen dar.

Bild S. 56 zeigt einige Beispiele für die technischen Minderungspotentiale der Erdgassubstitution und ihre spezifischen Minderungskosten. Das gesamte, durch einen verstärkten Einsatz von Erdgas technisch erzielbare CO₂-Minderungspotential bis zum Jahr 2005 liegt bei ca. 150 Mio t CO₂, wenn man die Verfügbarkeit der notwendigen Erdgasmengen voraussetzt. Bezieht man dieses Minderungspotential wiederum auf das Jahr 1987, so entspricht es einer 20 %igen Reduktion der CO₂-Emissionen. Die spezifischen Minderungskosten weisen dabei eine sehr grosse Bandbreite auf. Sie werden entscheidend durch die Relation der Energieträgerpreise beeinflusst. Die Entwicklung dieser Energieträgerpreise und Preisrelationen ist jedoch mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Hinzu kommt, dass die durch eine CO₂-Minderung induzierten Nachfragesteigerungen beim Erdgas die Energiepreisrelation erheblich beeinflussen können. Hier liegt das eigentliche ökonomische Risiko einer auf Erdgas setzenden CO₂-Minderungsstrategie.

Berücksichtigt man, dass selbst eine vollständige Umstellung der Energieversorgung auf Erdgas nur 30 % der CO₂-Emissionen vermeidet, so lässt sich feststellen, dass der verstärkte Einsatz von Erdgas allein keine langfristig tragfähige Option zur Erreichung einer klimaverträglichen Energieversorgung darstellt. Erdgas kann aber einen wichtigen Beitrag in der Uebergangsphase auf eine klimaverträgliche Energieversorgung leisten.

Kernenergie

Die Kernenergie trug im Jahr 1989 mit einer Stromerzeugung von 149 TWh zu etwa einem Drittel zur Bruttostromerzeugung in der Bundesrepublik Deutschland (alt) bei. Unterstellt man eine Stromerzeugung der gleichen Menge in Kohlekraftwerken, so trug die Kernenergie im Jahr 1989 zu einer CO₂-Reduktion von rund

140 Mio t CO₂ bei. Bild S. 57 zeigt die technischen CO₂-Minderungspotentiale und die spezifischen Minderungskosten der Kernenergie für das Jahr 2005.

Im Bereich der Stromerzeugung ergibt sich im Rahmen des Zubau- und Ersatzbedarfs von Stein- und Braunkohlekraftwerken bis zum Jahr 2005 ein CO₂-Minderungspotential von ca. 150 Mio t CO₂. Die technischen Minderungspotentiale der nuklearen Fernwärme- und Prozesswärmeerzeugung sind naturgemäss mit maximal 15 bzw. 35 Mio t CO₂ kleiner. Für die Stromerzeugung aus Kernenergie ergeben sich dabei durchwegs negative spezifische Minderungskosten, selbst wenn man gegen Importkohle und nicht gegen die teure heimische Steinkohle rechnet. Im Bereich der Fernwärme- sowie Prozessdampf- und Prozesswärmeerzeugung wären dagegen teilweise erheblich höhere spezifische Minderungskosten zu erwarten. Die Erzeugung von Wasserstoff mittels Elektrolyse liesse Kosten von bis zu 530 DM/t geminderten Kohlendioxids erwarten.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass ohne eine Behinderung oder Verzögerung des Ausbaus der Kernenergie durch Hemmnisse jeglicher Art aus technischer Sicht bis zum Jahr 2005 eine Minderung der CO₂-Emissionen von bis zu 200 Mio t CO₂/a erreichbar wäre. Dies entspricht etwa 25 % der derzeitigen gesamten CO₂-Emissionen der Bundesrepublik Deutschland (alt). Eine Ausnutzung eines grossen Teils dieses CO₂-Minderungspotentials durch Vermeidung fossiler Energieerzeugung wäre dabei aus gegenwärtiger Sicht möglich, ohne die Kosten der Energiebereitstellung zu erhöhen. Aber es gilt auch festzustellen, dass alleine durch eine Ausweitung des Einsatzes der Kernenergie die CO₂-Minderungsziele nicht erreichbar wären.

Erneuerbare Energiequellen

Der Beitrag der erneuerbaren Energiequellen zur Energieversorgung der Bundesrepublik Deutschland (alt) liegt gegenwärtig bei 2,6 % des Primärenergieverbrauchs. Mit rund 1,5 % hat unter diesen 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 Jahrzehnten deutliche Fortschritte erzielt 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 Herstellkosten gebracht. Nach allgemeiner Auffassung ist aber das physikalisch-technische Entwicklungspotential der Photovoltaik ebenso wie das Kostensenkungspotential noch keineswegs ausgeschöpft. Trotz der in den letzten Jahren erzielten Verbesserungen im Bereich der Nutzung erneuerbarer Energiequellen sind bis heute nur wenige wirtschaftlich konkurrenzfähig. Untersucht man den Beitrag der erneuerbaren Energiequellen zur Energieversorgung unter Klimagesichtspunkten, so zeigt Bild S. 58, dass die technischen CO₂-Vermeidungspotentiale mit 130 bis 220 Mio t CO₂/a bis zum Jahr 2005 durchaus beachtlich sind. Die Diskrepanz zwischen dem technisch Möglichen und dem wirtschaftlichen Aufwand ist hier besonders gross, was in hohen spezifischen CO₂-Minderungskosten zum Ausdruck kommt. Das grösste Potential weist dabei die Photovoltaik auf; ihr Einsatz zur Stromerzeugung würde im Jahr 2005 CO₂-Emissionen in Höhe von bis zu 60 Mio t CO₂/a vermeiden können. Die dabei entstehenden Kosten belaufen sich jedoch auf rund 290 DM pro vermiedener Tonne CO₂.

Von einigen Ausnahmen und Nischenanwendungen abgesehen stellen die erneuerbaren Energiequellen also zumindestens mittelfristig keine effiziente und wirtschaftlich tragfähige Option zur Minderung der Treibhausgasemissionen dar. Gleichwohl gilt es vor dem Hintergrund der gegebenenfalls notwendig werdenden drastischen Reduktion des Verbrauchs fossiler Energieträger, die Option der erneuerbaren Energiequellen durch intensive Forschung und Entwicklung voranzubringen.

Entsorgungsmöglichkeiten von CO₂

Grundsätzlich ist auch eine nicht klimabeeinflussende Nutzung fossiler Energieträger denkbar, wenn das bei der Verbrennung entstehende CO₂ zurückgehalten und so endgelagert werden kann, dass es dauerhaft von der Atmosphäre ferngehalten wird. Grundbedingung für alle Ueberlegungen zur CO₂-Rückhaltung und -Entsorgung ist, dass der damit verbundene Energieaufwand kleiner ist als der Heizwert jener Menge an fossilem Brennstoff, aus der das CO₂ entstanden ist.

Bild S. 59 zeigt die prinzipiell bestehenden Entsorgungsmöglichkeiten von CO₂ bei Nutzung fossiler Energieträger. Eine Option stellt die Verminderung der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre dar. Eine technische Atmosphärenwäsche ist jedoch aufgrund der geringen Konzentration von CO₂ in der Atmosphäre (350 ppm) energetisch unsinnig. Eine Bindung von CO₂ über die Photosynthese, also eine natürliche Atmosphärenwäsche, bedarf sehr grosser Landflächen, da Pflanzen nur in ihrer Wachstumsphase CO₂ fixieren. Tendenziell sollte erreicht werden, dass durch Aufforstung der weitere weltweite Abbau von Biomasse zumindest gestoppt wird.

Eine weitere Option ist die Vermeidung einer Freisetzung von CO₂ in die Atmosphäre. Dazu stehen drei

denkbare Varianten zur Verfügung: die Kohlenstoffabtrennung aus dem Brennstoff, die CO₂-Abtrennung aus den Rauchgasen und eine Brennstoffumwandlung durch Vergasung mit nachgeschalteter CO₂-Abtrennung. Bei einer Kohlenstoffabtrennung aus dem fossilen Energieträger, die zum Beispiel bei der Kohle durch den sogenannten Hydrocarb-Prozess möglich wäre, würde natürlich nur ein Teil der Energie des Brennstoffs genutzt. Im Falle der Kohle wären dies 18 % und im Falle des Erdgases rund 47 %. CO₂ liegt in Rauchgasen mit einer Konzentration von etwa 8 bis 15 Volumenprozenten vor. Die heute verfügbaren chemischen Waschverfahren benötigen einen hohen Energieaufwand, wodurch die Wirkungsgrade der Umwandlung auf 18 bis 28 %, je nach betrachtetem CO₂-Endlagerverfahren, sinken würden. Die Verbrennung mit O₂ und anschließende Endlagerung des CO₂ ist wegen der erforderlichen Luftzerlegung ebenfalls sehr energieaufwendig. Unter dem Gesichtspunkt des Energieaufwandes stellt sich die Vergasung von Kohle mit CO₂-Abtrennung im Rahmen eines Gasturbinen/Dampfturbinenkraftwerks (GuD-Kraftwerk) als die derzeit interessanteste technische Möglichkeit dar. Bild S. 60 zeigt schematisch einen solchen Prozess.

Das Grundprinzip beruht darauf, dass Kohle durch einen Vergasungsprozess in ein Synthesegas, das im wesentlichen aus CO und H₂ besteht, übergeführt wird. Anschliessend wird das Kohlenmonoxid mit Dampf zu CO₂ "geshiftet", so dass das Gasgemisch H₂/CO₂ mit einem Absorber getrennt werden kann. Das Wasserstoffgas wird dann in einer Gasturbine mit Abhitzekessel (GuD) in Elektrizität umgewandelt. Die Abtrennung des CO₂ bewirkt in diesem Prozess eine Wirkungsgradreduktion von 44 % auf 27 bis 38 %; die spezifischen Minderungskosten liegen dabei in einem Bereich von 30 bis 150 DM/t CO₂.

Als Endlager für das anfallende CO₂ kommen wegen der grossen Mengen praktisch nur leere Erdgasfelder oder

die Tiefsee in Betracht. Die Erdgasfelder können theoretisch nur die Mengen CO₂ aufnehmen, die der CO₂-Erzeugung entsprechen. Der Ozean stellt zwar ein grosses Reservoir für die Endlagerung von CO₂ dar, ungeklärt sind aber noch eventuelle ökologische Auswirkungen einer Tiefseelagerung und das tatsächliche Rückhaltevermögen der Tiefsee. Erste Versuche hierzu werden derzeit von japanischen Wissenschaftlern im Tiefseegraben vor Japan durchgeführt.

CO₂-Reduktionsstrategien

Bild S. 61 zeigt zusammenfassend die technischen Reduktionspotentiale der verschiedenen CO₂-Minderungsoptionen im Vergleich. Die einzelnen Potentialangaben bezeichnen die CO₂-Minderung, die aus technischer Sicht, das heisst unter Vernachlässigung ökonomischer und sonstiger Aspekte, für die Bundesrepublik Deutschland (alt) mittels erheblicher Anstrengungen gegebenenfalls bis zum Jahr 2005 erreichbar scheint. Die technischen CO₂-Minderungspotentiale der einzelnen Optionen können nicht zu einem Gesamtpotential aufsummiert werden, da sie sich teilweise auf denselben fossilen Energieverbrauch beziehen.

Dennoch gilt die Feststellung, dass aus technischer Sicht schon mittelfristig nennenswerte Minderungen der CO₂-Emissionen erreichbar sind. Angesichts der für eine klimaverträgliche Energieversorgung notwendigen Begrenzungen der Treibhausgasemissionen kann, auch dies zeigen die technischen Potentialabschätzungen, eine Option allein das Problem nicht lösen.

In Anbetracht der begrenzten Ressourcen bzw. Aufwendungen, die zur Minderung der Treibhausgasemissionen zur Verfügung stehen, und um möglichst schnell wirksam werdende Minderungen zu erreichen, kommen Kosten-Nutzen-Ueberlegungen, kommt der Entwicklung einer effizienten Minderungsstrategie eine besondere Bedeu-

tung zu. Dies gilt insbesondere auch, um die Volkswirtschaft angesichts der gewaltigen Umstrukturierungsaufgabe der Energieversorgung nicht unvertretbar zu belasten. Wegen der unterschiedlichen spezifischen CO₂-Minderungskosten, das heisst der unterschiedlichen Kosten-Nutzen-Relationen von Treibhausgasminderungsmaßnahmen ist dazu eine differenzierte Betrachtung der prinzipiell verfügbaren Möglichkeiten notwendig.

Im Rahmen der Arbeiten der Enquête-Kommission "Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre" sind aufbauend auf einer Vielzahl von Einzelanalysen der verschiedenen CO₂-Minderungsoptionen erste Ueberlegungen bezüglich der Ausgestaltung von Strategien zur Verminderung energiebedingter CO₂-Emissionen angestellt worden. Dabei wurden drei unterschiedliche Reduktions-szenarien für das Jahr 2005 erarbeitet, die sich an dem Ziel einer 30 %igen CO₂-Minderung bezogen auf das Referenzjahr 1987 orientierten und unterschiedliche energiepolitische Auffassungen repräsentieren sollten. Das Szenario des Hemmnisabbaus und der Preispolitik gab der Energieeinsparung höchste Priorität. Die Kernkraftwerkskapazität sollte bei gleichbleibender Kapazität höher ausgelastet werden, die Zunahme des Erdgaseinsatzes war auf 30 % beschränkt. Das Szenario Kernenergieausstieg untersuchte CO₂-Minderungsoptionen unter der Annahme eines Verzichts auf die Nutzung der Kernenergie ab dem Jahr 2005. Ein drittes Szenario, hier "effiziente Massnahmen" genannt, untersuchte die Potentiale der CO₂-Minderung bei gleichzeitigem Ausbau der Kernenergienutzung.

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 und die Beschäftigung wurden ebensowenig untersucht wie die Fragen der

Durchsetzbarkeit und der Robustheit der Ergebnisse hinsichtlich unsicherer Annahmen. Die in Bild S. 62 gegenübergestellten wesentlichen Ergebnisse der drei untersuchten Szenarien können deshalb nur erste Anhaltspunkte für die Ableitung rationaler CO₂-Minderungsstrategien geben.

Die mit Trend bezeichnete 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 %). In Anbetracht des im Jahr 2005 gut 50 % höheren Bruttoinlandproduktes 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. Die implizite CO₂-Minderung, die 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, das heisst die Minderungsziele, an dem CO₂-Emissionsniveau des Jahres 1987 orientiert.

Im Reduktionsszenario "Hemmnisabbau und Energiepolitik" nehmen die CO₂-Emissionen im Vergleich zum Jahr 1987 um rund 205 Mio t, das heisst um 28,7 % auf 510 Mio t CO₂/a ab. Diese CO₂-Minderung ist zurückzuführen auf eine weitgehende Ausschöpfung der Einsparmög-

lichkeiten in allen Endverbraucherbereichen, eine Verlagerung und Reduktion von Verkehrsleistung, eine erhebliche Ausweitung der Strom- und Wärmeerzeugung mittels erneuerbarer Energiequellen, nahezu eine Verdopplung der KWK-Erzeugung und einen um 20 % zunehmenden Erdgaseinsatz. Des weiteren werden CO₂-Emissionen in Höhe von 27 Mio t CO₂ durch eine bessere Auslastung der bestehenden Kernkraftwerke vermieden.

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 % des Altbaubestandes wärmetechnisch so saniert werden, dass der durchschnittliche Heizenergieverbrauch um zwei Drittel absinkt und alle Neubauten bis zum Jahr 2005 im Durchschnitt einen spezifischen Nettoheizenergiebedarf von 40 kWh/m²a bei Einfamilienhäusern bzw. 25 kWh/m²a bei Mehrfamilienhäusern aufweisen. Die Stromerzeugung in der Kraft-Wärme-Kopplung müsste etwa 2,8 mal so hoch sein wie 1987. Die Stromerzeugungskapazität auf Basis erneuerbarer Energiequellen wäre bis 2005 um etwa 11,3 GW auszuweiten; allein auf die Windkraft entfielen davon 5,2 GW. Letztlich sei noch erwähnt, dass der Erdgaseinsatz um insgesamt 50 % zunehmen müsste, und die Stromerzeugung in erdgasgefeuerten Kondensationskraftwerken müsste von 21,5 TWh in 1987 auf 103,6 TWh in 2005, das heisst um fast 500 % ansteigen.

Im "effizienzorientierten" Reduktionsszenario sind die einzelnen CO₂-Minderungsmaßnahmen weitgehend nach den Effizienzkriterien ausgewählt worden. Im

Sinne einer effizienzorientierten CO₂-Minderungsstrategie werden dabei alle im Rahmen der erwarteten Energiepreisssteigerungen 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 auf 36,6 GW im Jahr 2005 erhöht. Der Anteil der Kernenergie an der gesamten Stromerzeugung würde dann im Jahr 2005 rund 56 % 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 % gegenüber dem Jahr 1987.

Vergleicht man nun die drei Reduktionsszenarien untereinander, so ergeben sich trotz der in der Gröszenordnung 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 rund 2,7 Mrd DM/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 zum Beispiel 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. Der Beitrag der verschiedenen Massnahmen zur Minderung der CO₂-Emissionen und die damit verbundenen Kosteneinsparungen (bzw. Kosten) sind in Bild S. 63 dargestellt. Im Vergleich zum Kernenergieausstiegsszenario ergäbe sich damit bei einer CO₂-Minderung von rund 30 % eine jährliche Kostendifferenz von mehr als 15 Mrd DM.

Ein weiterer wesentlicher Unterschied zwischen den drei Reduktionsstrategien besteht im Hinblick auf ihre Möglichkeiten, falls notwendig weitergehende CO₂Minderungsziele 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 um weitere 65 Mio t/a reduzieren.

Unter Berücksichtigung der Unsicherheiten der Kostendaten weist dieses Ergebnis bei vorsichtiger Wertung darauf hin, dass nennenswerte CO₂-Minderungen ohne zusätzliche Kostenbelastungen für die Volkswirtschaft möglich erscheinen. Weitergehende Minderungen sind durch Massnahmen mit höheren Minderungskosten erzielbar.

Mit der hier beschriebenen Minderung der CO₂-Emissionen im effizienzorientierten Reduktionsszenario wäre auch eine Reduktion anderer klimarelevanter Spurengase verbunden. Diese würden sich bei Methan (CH₄) auf 41 %, bei Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffen auf 87 % und bei Stickoxiden (NO_x) auf 53 % der Emissionen des Jahres 1987 belaufen.

Die Dimension des Anpassungsbedarfs zur Erreichung der von der Bundesregierung bzw. der Enquête-Kommission geforderten Ziele lässt sich durch eine "makroenergiewirtschaftliche" Analyse veranschaulichen. Die hier erläuterten Ueberlegungen basieren auf der Abhängigkeit der energiebedingten CO₂-Emissionen von der Höhe des Bruttoinlandprodukts (BIP), dem spezifischen Energieverbrauch - das ist die Primärenergie- menge, die notwendig ist, um eine Einheit BIP zu erstellen - und der Kohlenstoffintensität der Energieversorgung. Als Kohlenstoffintensität bezeichnet man die CO₂-Emissionen, die je Primärenergieeinheit freigesetzt werden.

Bild S. 64 zeigt die Entwicklung der Kohlenstoffintensität aufgetragen über dem spezifischen Energieverbrauch für die Bundesrepublik Deutschland (alt) in den Jahren 1950 bis 1989. Der spezifische Energieverbrauch als Indikator für die Energieeffizienz einer Volkswirtschaft lag im Jahr 1989 bei 218,6 kg SKE pro DM BIP. Er hat sich von 1970 bis 1989 um ca. 36 % vermindert. Die Kohlenstoffintensität in der BRD (alt) hat sich in den letzten Jahren ebenfalls stark vermindert, von 2,2 t CO₂/t SKE im Jahr 1970 auf 2,8 t CO₂/t SKE im Jahr 1989. Ursache hierfür waren insbesondere der gestiegene Einsatz von Kernenergie (1970/1989: + 46 Mio t SKE) und Erdgas (1970/1989: + 47 Mio t SKE). Mit dieser Verminderung des spezifischen Energieverbrauchs und der Absenkung der Kohlenstoffintensität konnten in der Bundesrepublik Deutschland (alt) zwischen 1970 und 1989 trotz eines Anstiegs des realen BIP um 55 % die energiebedingten CO₂-Emissionen um ca. 11 % reduziert werden.

Bei gegebenem BIP für das Betrachtungsjahr 2005 können nun mögliche Entwicklungen der Kohlenstoffintensität und des spezifischen Verbrauchs für die Erreichung des Reduktionsziels der Bundesregierung (25 %), der Enquête-Kommission (30 %) oder weiterreichender Reduktionsziele angegeben werden (siehe S. 64).

Eine Analyse des "Trends" der letzten 20 Jahre zeigt, dass die Ziele der Bundesregierung bei einer Fortsetzung der Entwicklungen der letzten Jahre (rationellere Energienutzung, verstärkter Einsatz von Erdgas und Kernenergie) erreichbar scheinen. Eine detaillierte Betrachtung lässt jedoch erkennen, dass dies erheblicher Anstrengungen bedarf.

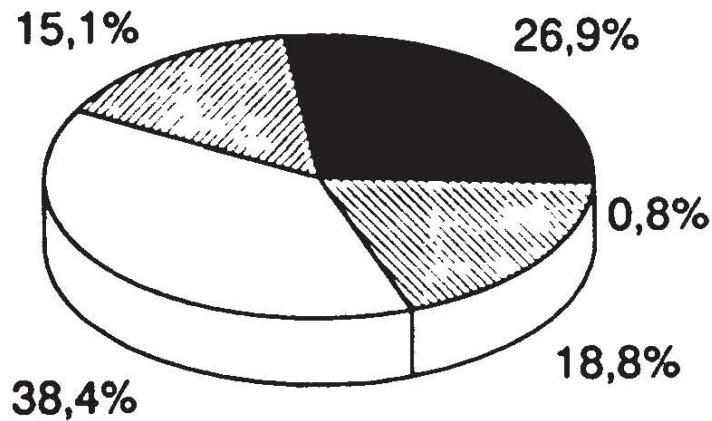
Fazit

Eine kritische Würdigung der zuvor dargestellten Ergebnisse führt zu dem Schluss, dass sie allenfalls als eine erste Orientierungshilfe dienen können und in vielerlei Hinsicht noch zu erweitern und abzusichern sind. Für einzelne Minderungsmaßnahmen liegen belastbare Kostenangaben und insbesondere Angaben zu Kosten in Gestalt von Zielverzichten nicht oder nur rudimentär vor. Eine umfassende Analyse und Bewertung der Vor- und Nachteile unterschiedlicher Treibhausgas-minderungsstrategien, die auch die gesamtwirtschaftlichen Effekte, die umweltseitigen Vor- und Nachteile sowie die möglichen Preisrückwirkungen auf den internationalen Energiemärkten einbezieht, ist noch zu leisten. Nimmt man die Warnungen der Klimatologen ernst, so stehen die Industrie-, Schwellen- und Entwicklungsländer vor einer der gewaltigsten Herausforderungen, der sich die Menschheit je gegenüber sah. Auf dem Weg zu einer klimaverträglichen Energieversorgung, die globales Handeln erfordert, kommt in internationaler Abstimmung den Industrienationen, insbesondere in Ost- und Westeuropa, eine Schrittmacherrolle, eine wegweisende Funktion zu. Für die Bundesrepublik Deutschland existieren auch mittelfristig schon beachtliche technische Möglichkeiten zur Minderung der energiebedingten Treibhausgasemissionen. Ein Teil dieser Minderungspotentiale liesse sich dabei ausschöpfen, ohne die Volkswirtschaft mit zusätzlichen Kosten zu belasten.

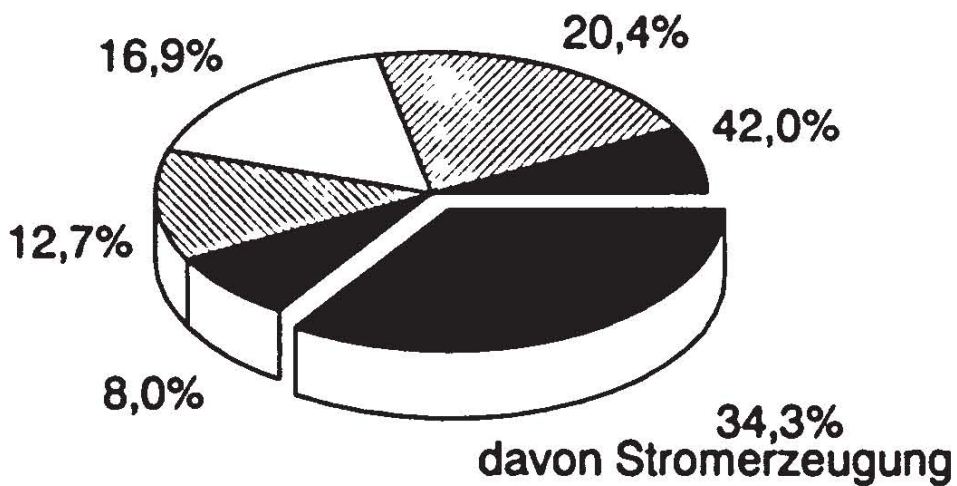
Eine robuste und flexible Politik zur Minderung der energiebedingten Treibhausgase sollte entsprechend dem Effizienzangebot zunächst die CO₂-Minderungsmöglichkeiten, deren ökonomischer Nutzen allein schon grösser ist als ihre Kosten, ausschöpfen. Die Ausnutzung der hier vorhandenen Treibhausgasminderungspotentiale erlaubt es der Bundesrepublik Deutschland und den anderen Industrieländern auch, eine Schrittmacherrolle zu übernehmen, ohne die Volkswirtschaft einseitigen Belastungen auszusetzen. Schritte und Massnahmen in dieser Richtung tragen dabei gleichzeitig zur Realisierung anderer Ziele, wie der Reduzierung der sonstigen Schadstoffbelastungen der Luft, der Preiswürdigkeit der Energie und der Ressourcenschonung bei. Eine effizienzorientierte Treibhausminderungspolitik wird dabei auf keine der vorhandenen Optionen, die einen spürbaren Beitrag zur CO₂-Reduktion leisten können, verzichten können.

CO₂-Emissionen in der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 1989

684 Mio. t. CO₂/a



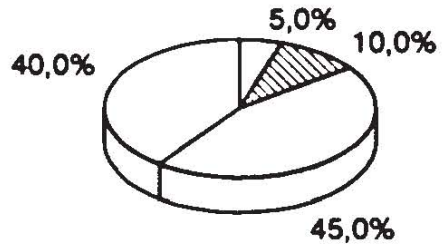
- Steinkohle
- Braunkohle
- Mineralöle
- Gase
- Sonstige



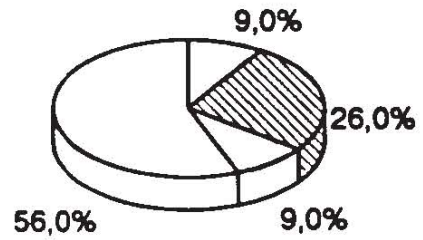
- Umwandlung
- Verkehr
- Industrie
- Haushalte
- Kleinverbraucher

Minderung des spezifischen Stromverbrauchs bei Elektrogeräten bezogen auf 1970

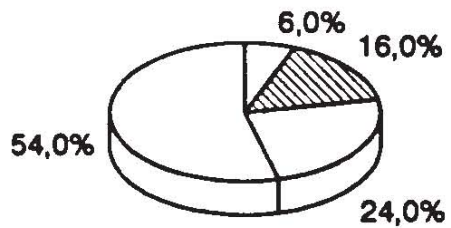
Waschmaschinen 60 %



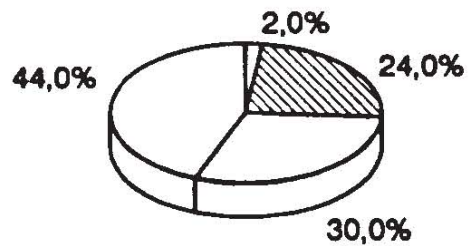
Geschirrspüler 44 %



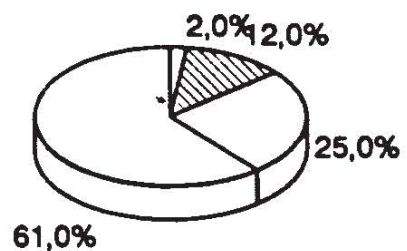
Kühlschränke 46 %



Gefriergeräte 56 %

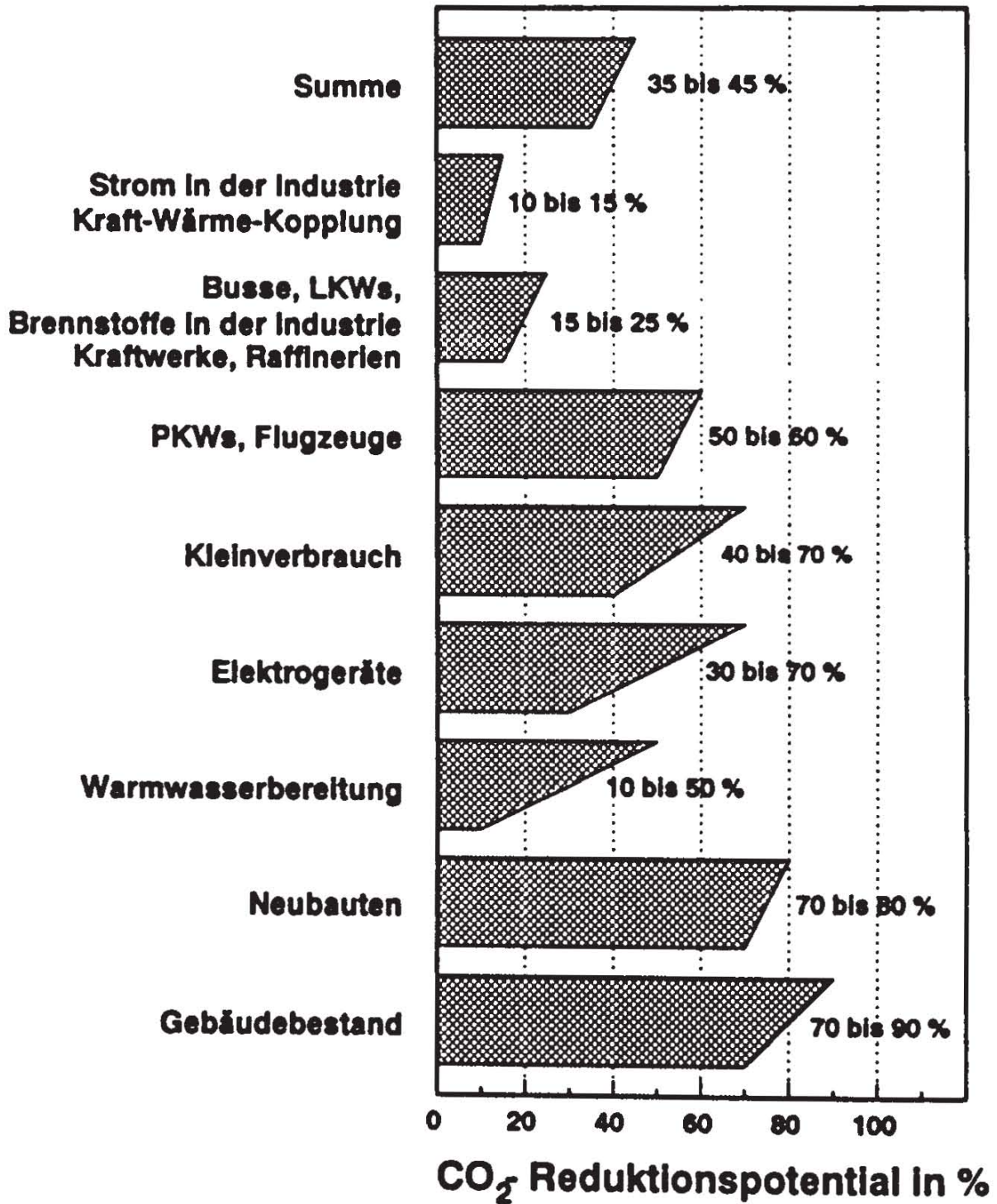


Herde (Backofen) 39 %



-  1970 - 78
-  1978 - 85
-  1985 - 88

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



**Energieeinsparung und spez. CO₂-Minderungskosten
einiger Energiesparmassnahmen**

<u>Maßnahme</u>	Energieein- sparung	spez. CO ₂ - Mind.-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

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

<u>Maßnahme</u>	Minderungs- potential in Mio t CO₂	Spezifische Mind.-kosten in DM/t CO₂
<i>Stromerzeugung</i>		
- Braunkohle durch Gas	53,4	+ 23
- Steinkohle durch Gas	53,2	+ 11 ¹⁾
<i>Fernwärme</i>		
- Steinkohle durch Gas	2,1	- 160 bis - 20 ¹⁾
<i>Industrie</i>		
- 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
<i>Haushalte</i>		
- Heizöl durch Gas	11,7	- 270 bis + 450
- Kohle durch Gas	2,0	- 170 bis + 100 ¹⁾
<i>Kleinverbraucher</i>		
- 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) ermittelt auf der Basis der Importkohlepreise

Technische CO₂-Minderungspotentiale und spezifische Minderungskosten der Kernenergie im Jahr 2005

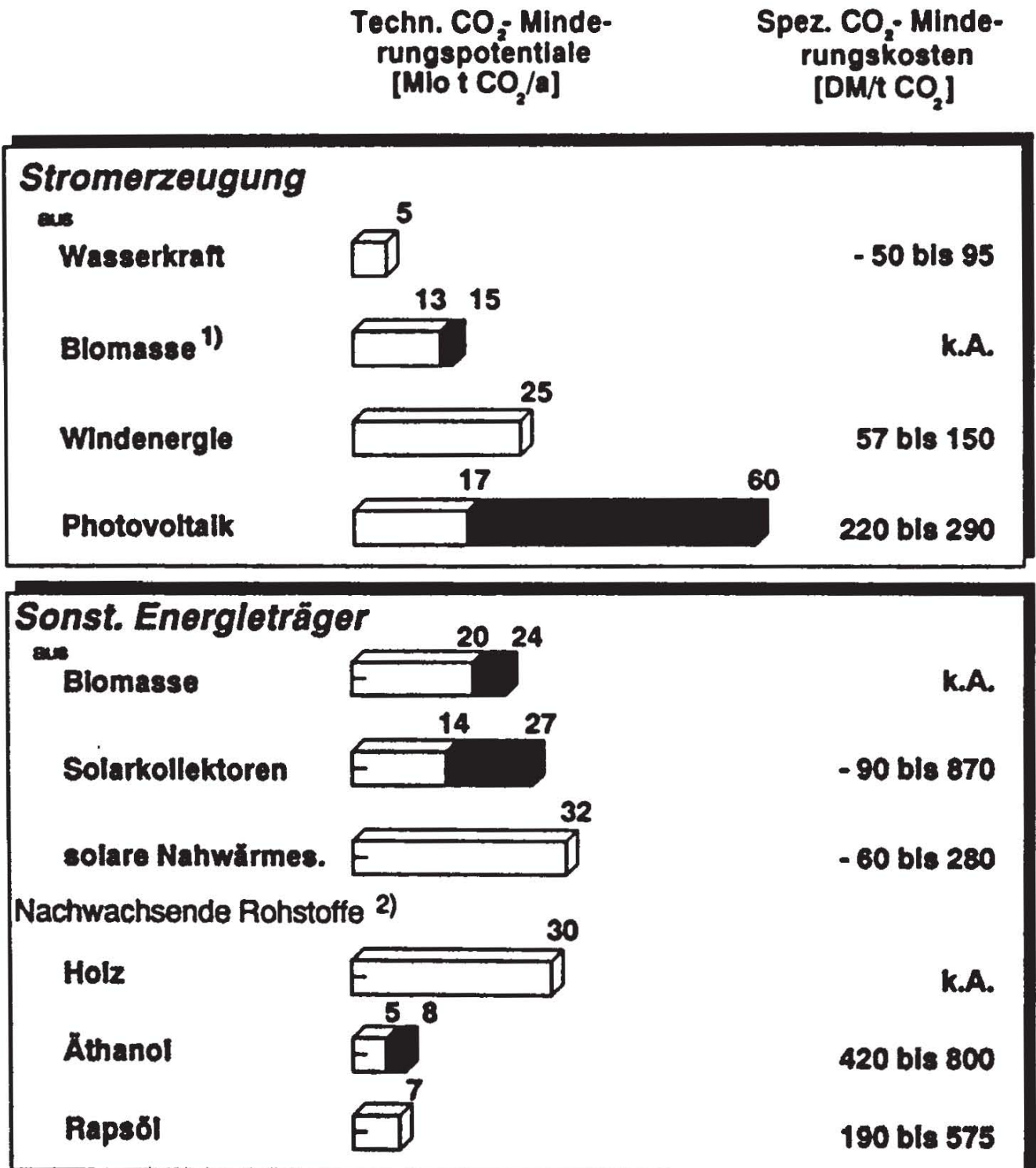
Bereich / Maßnahmen	Technisches CO₂-Minderungspotential [Mio t CO₂/a]	Spezifische Minderungskosten [DM/t CO₂]
<u>Stromerzeugung</u>		
* Zubau 1 KKW/a ab 1997	50 bis 95	-5 bis -15 ¹⁾
* Zubau von 2 KKW/a ab 1997	88 bis 149	-3,5 bis -13 ¹⁾
<u>Öffentliche Nah- und Fernwärmerversorgung</u>		
* Auskopplung aus KKW (LWR)	5 bis 13	-50 bis +750
* Einsatz von Kernhelzwerken	7 bis 16,5	-190 bis +140
<u>Ind. Prozeßdampf- und Prozeßwärmeerzeugung</u>		
* Prozeßdampf u. Prozeßwärme	35	bis +20
<u>Wasserstoffherzeugung (Elektrolyse)</u>		
* Wasserstoff als Substitut für Kohle, Öl, Gas	k.A.	300 bis 530 ²⁾

Gesamtpotential: 90 bis 200 Mio t CO₂/a

1) ermittelt anhand der Preise von Import- u. Braunkohle

2) nur auf Basis der Herstellungskosten von Wasserstoff ermittelt

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

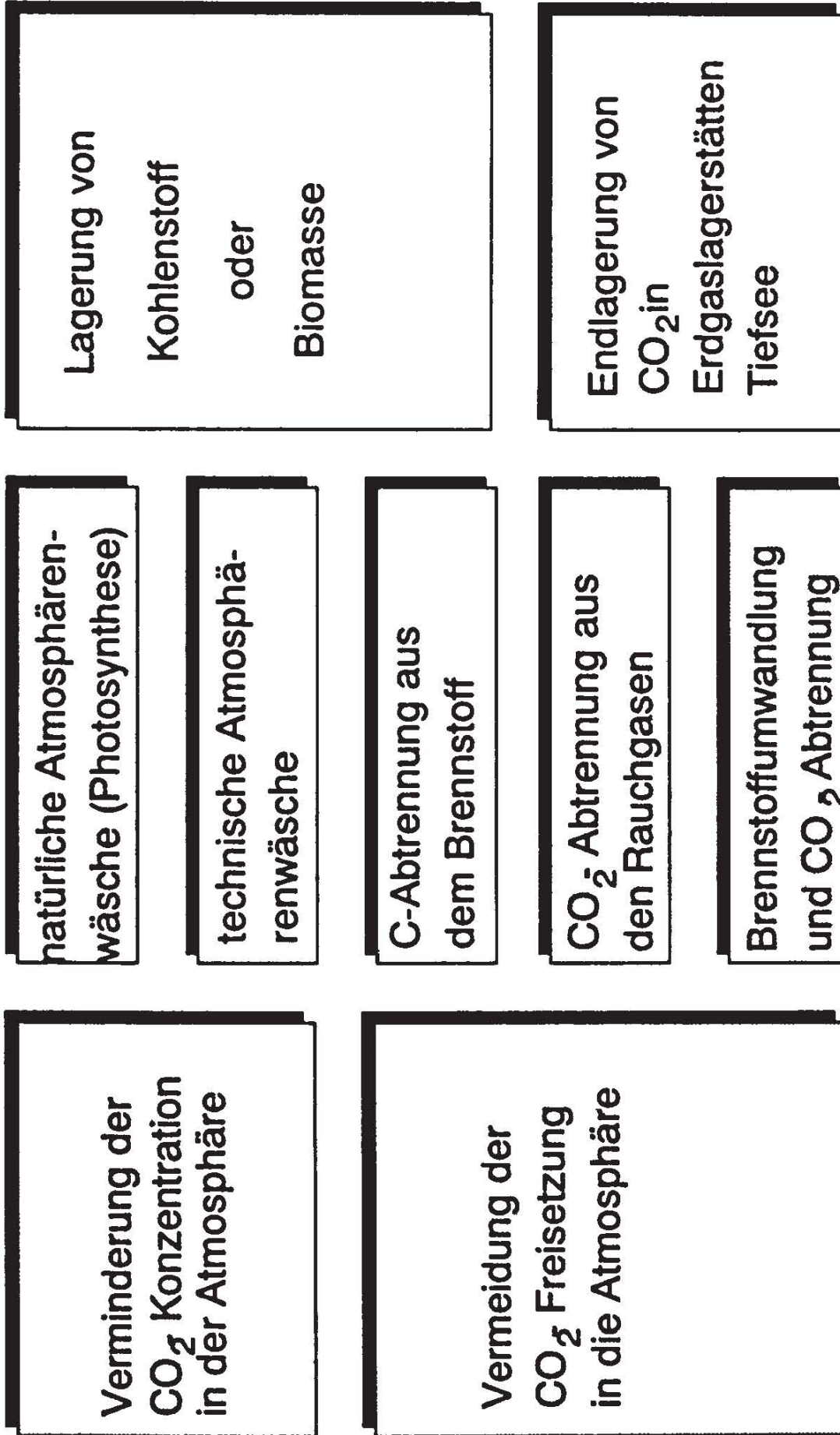


Gesamtpotential: 130 bis 220 Mio t CO₂/a

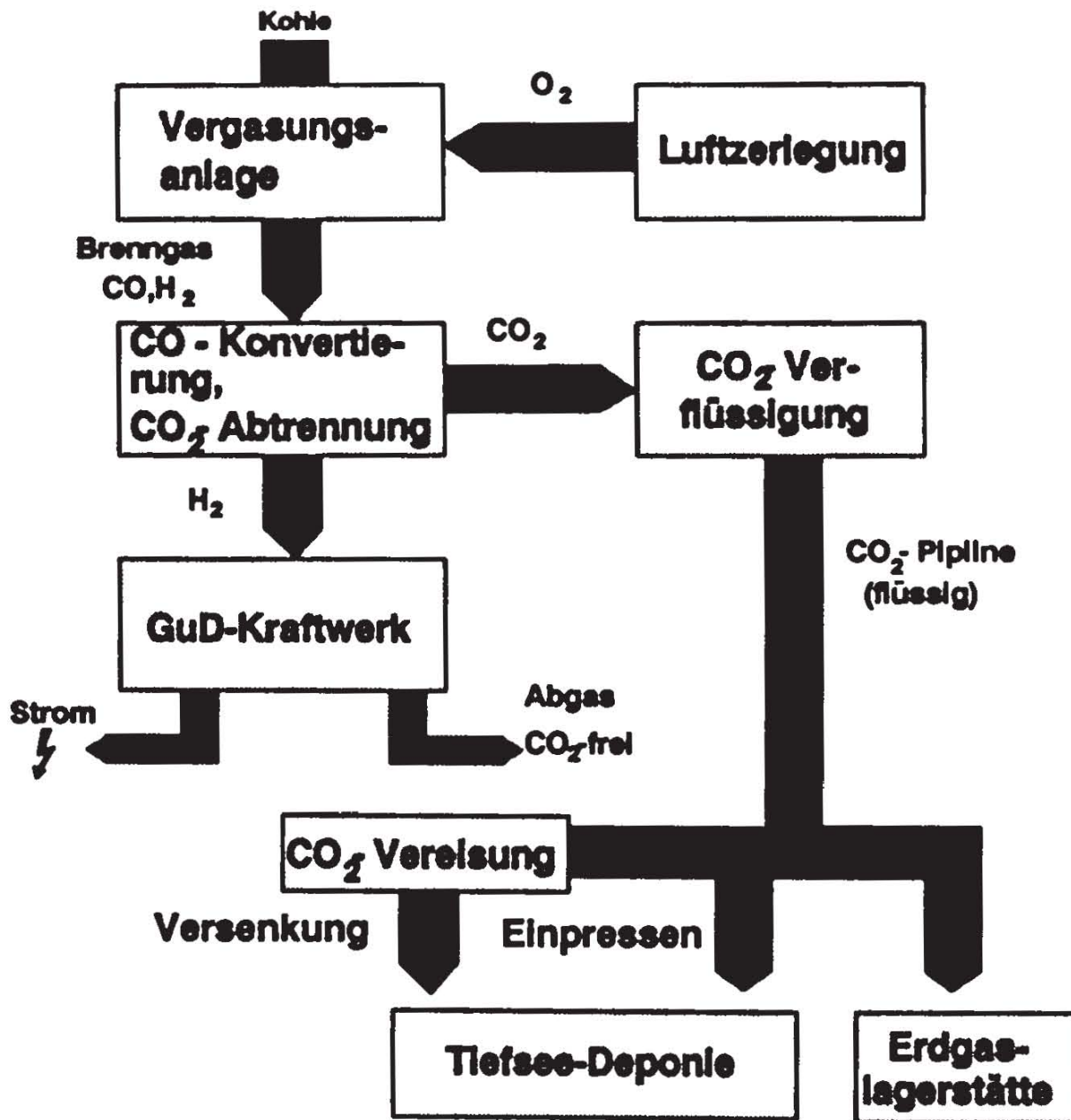
1) Abfallbiomasse, Deponiegas, Müll

2) Angaben gelten jeweils für eine Agrarüberschussfläche von 2 Mio ha

Entsorgungsmöglichkeiten von CO₂ bei Nutzung fossiler Energieträger



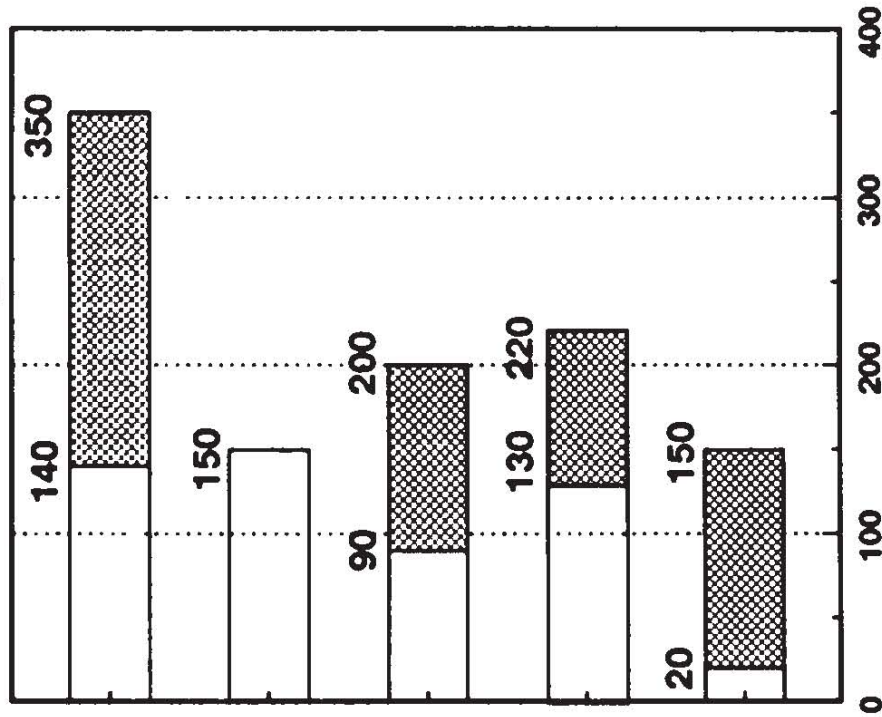
CO₂-Entsorgungsmöglichkeiten beim GuD-Kraftwerk mit Kohlevergasung



Netto-Wirkungsgrad	27%	35%	38%
CO ₂ -Minderungskosten DM/t CO ₂	87 - 154	42 - 72	32 - 54

Technische CO₂-Minderungspotentiale in der Bundesrepublik Deutschland bis zum Jahr 2005

Techn. CO₂ Minderungspotential
in Mio t CO₂/a¹⁾

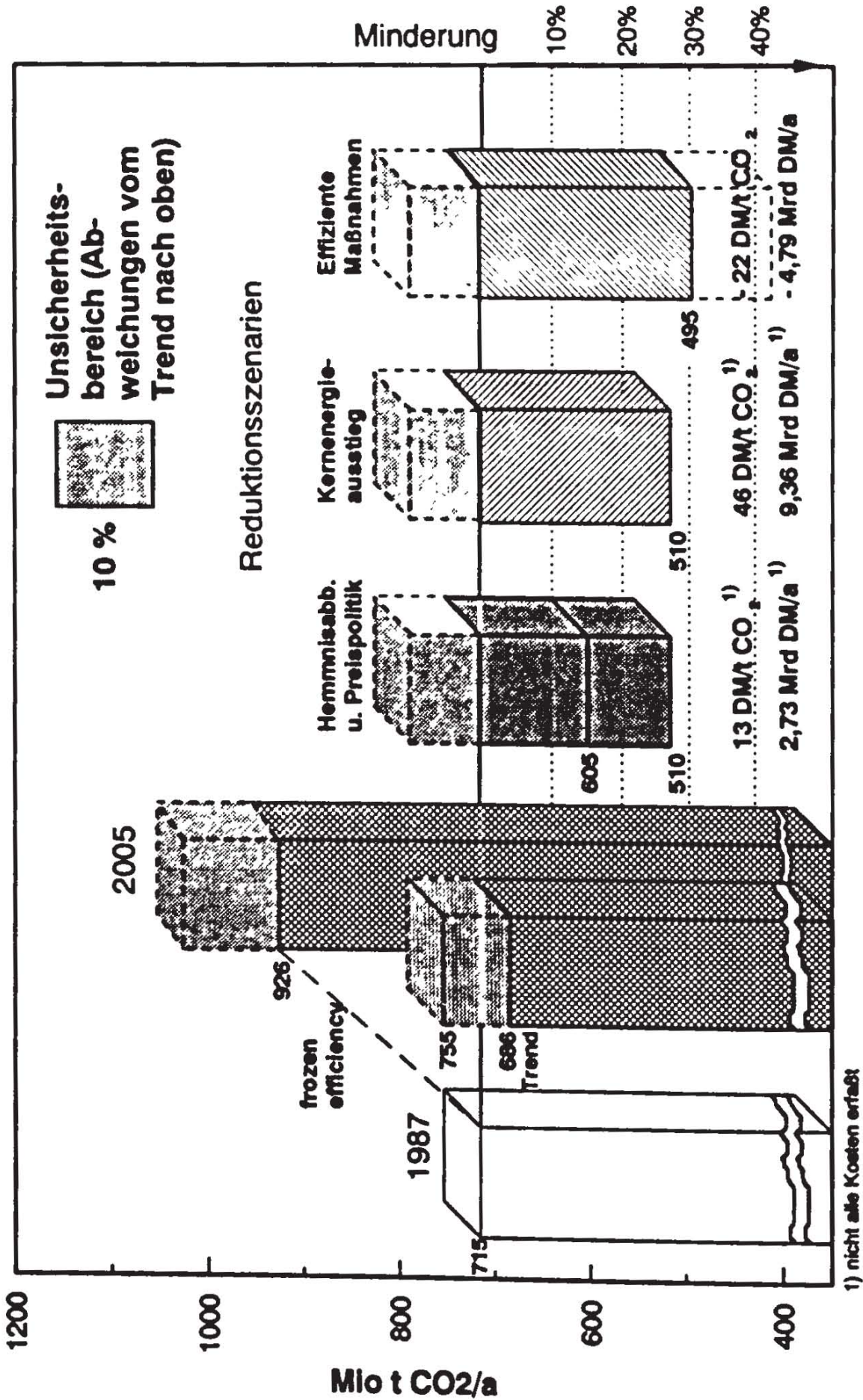


CO₂-Minderung durch

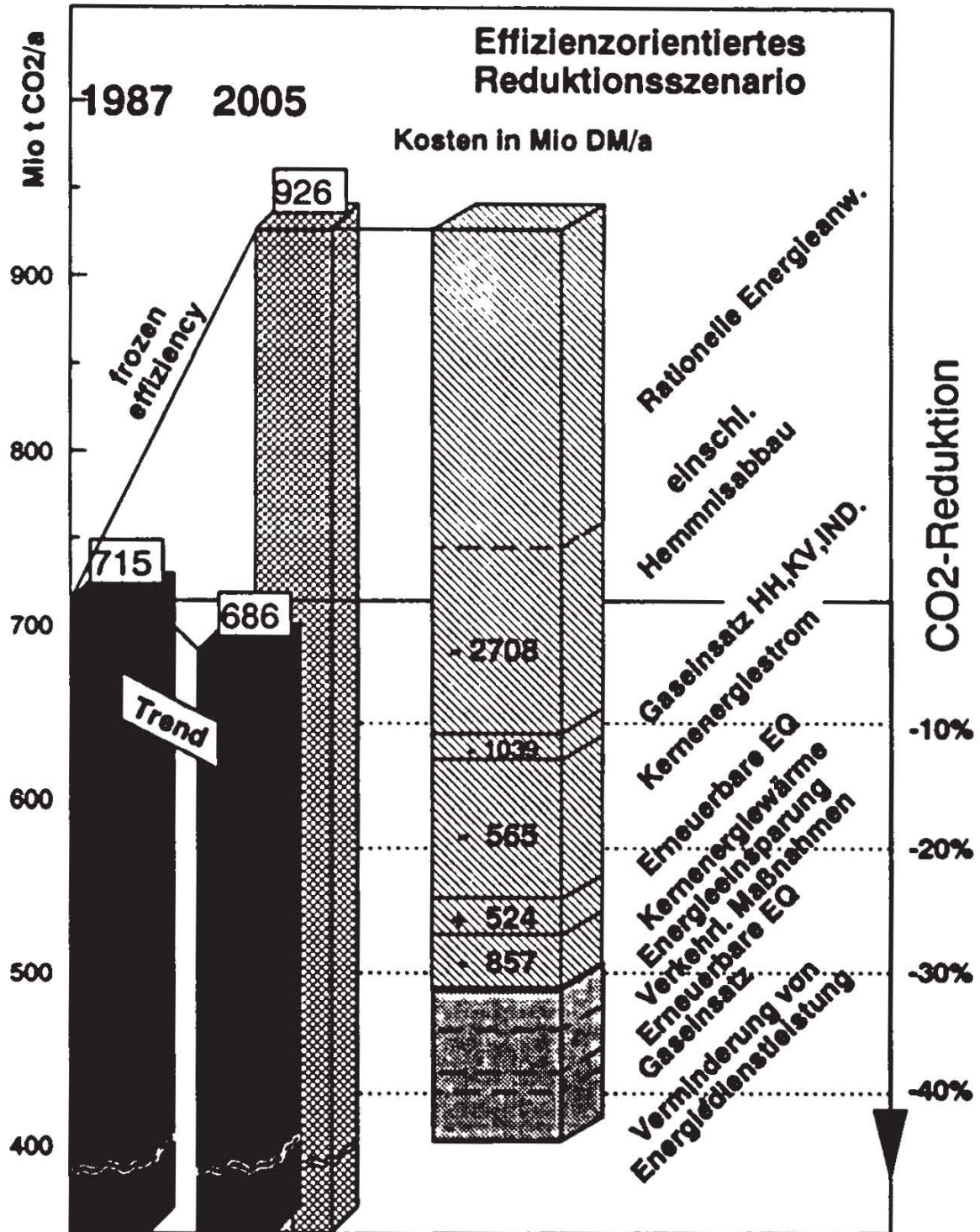
- * Rationelle Energienutzung und Energieeinsparung
- * Substitution C-reicher durch C-arme fossile Energieträger
- * Kernenergie
- * Erneuerbare Energiequellen
- * CO₂-Entsorgung

1) Überschneidende Potentiale, Zahlen können nicht addiert werden

CO₂-Reduktionsszenarien im Vergleich



Effizienzorientiertes Reduktionsszenario mit Ausbau der Kernenergie



Kohlenstoffintensität und spezifischer Energieverbrauch - Entwicklung in der Vergangenheit und Anforderungen zur Erreichung unterschiedlicher CO₂-Minderungsziele (bezogen auf das Emissionsniveau 1987)

