

Energiespeicher, neue Sekundärenergieträger und Nutzungssysteme, Entsorgungsmöglichkeiten von Kohlendioxid sowie Möglichkeiten der Emissionsminderung klimarelevanter Spurengase

**Zusammenfassung der Ergebnisse des
Studienkomplexes A.5**

A. Voß, H. J. Wagner

**Institut für Kernenergetik und Energiesysteme (IKE)
Stuttgart
Kernforschungsanlage Jülich (KFA) GmbH
Jülich**

I n h a l t s v e r z e i c h n i s**Zusammenfassung****1. Einleitung****2. Stand der Technik, Entwicklungsperspektiven,
CO₂-Minderungspotentiale der einzelnen
Techniken****2.1 Neue Kraftstoffe und Antriebssysteme****2.2 Verkehrliche Maßnahmen****2.3 Speichertechniken, Wasserstoff****2.4 Neue Sekundärenergieträger und
Nutzungssysteme****2.5 CO₂-Entsorgungstechniken****3. Gesamtpotentiale und ihre Ein-
ordnung****4. Emissionsminderung indirekt wirkender
Spurengase aus stationären Quellen****5. Schlußfolgerungen, offene Fragen, Bewertung****Studienverzeichnis zum Studienkomplex A 5**

Zusammenfassung

Der Studienkomplex A5 beschäftigt sich mit

- fahrzeugtechnischen und verkehrslenkenden Maßnahmen,
- Energiespeicher und Wasserstoffnutzung,
- Entsorgungsmöglichkeiten von CO₂,
- neue Sekundärenergieträger (wie Wasserstoff und Methanol aus fossilen Rohstoffen) und Nutzungssysteme,
- Maßnahmen zur Reduzierung von NO_x, CO und HC als Vorläufer-substanzen von Klimagasen sowie
- N₂O-Bildung durch die Energieerzeugung.

Die heterogene Aufgabenstellung dieses Studienpaketes erlaubt es nicht, die Ergebnisse in wenigen CO₂-Reduktionszahlen zusammenzufassen.

Die wesentlichen Ergebnisse des Studienkomplexes A5 sind:

- Fahrzeugspezifisch können durch Verbesserung der Pkw-Motoren etwa ein Viertel der heutigen CO₂-Emissionen reduziert werden. Die Abschätzung der Fahrleistung, des Käuferverhaltens und des Fahrerhaltens ist nicht Gegenstand dieses Studienkomplexes, so daß kein absolutes Minderungspotential angebar ist.
- Der derzeitige Stand der praktischen Erprobung von verkehrslenkenden Maßnahmen läßt die Ermittlung eines CO₂-Reduktionspotentials durch diese Maßnahmen nicht zu; die Nutzung öffentlicher Verkehrsmittel ist in der Regel spezifisch CO₂-ärmer als der Individualverkehr.
- Wärmespeicher für kurzzeitige Wärmespeicherung sind Stand der Technik und tragen nennenswert zur Erhöhung des solaren Deckungsgrades von solaren Wärmeerzeugungssystemen bei. Langzeitwärmespeicher zur saisonalen Speicherung von Wärme sind noch nicht Stand der Technik.
- In der elektrischen Energieversorgung sind Pumpspeicheranlagen die energie- und kostengünstigsten Speicher. Für dezentrale Solaranwendungen sind Batterien geeignet und verfügbar, aber noch optimierungsbedürftig. Schwungradspeicher und supraleitende magnetische Speicher sind noch Forschungs- und Versuchsgegenstand.

- Als langfristig von der Kapazität her ausreichende CO₂-Deponie kommt nur die Tiefsee in Betracht. Die ökologische Verträglichkeit dieser Maßnahme wurde bisher nicht untersucht. Sie ist die entscheidende Voraussetzung zur Erschließung der CO₂-Deponie. Das Abscheiden von CO₂ aus Kraftwerken würde zu einer signifikanten Reduzierung des Wirkungsgrades führen.

Im Gegensatz zu den anderen betrachteten CO₂-Minderungsmaßnahmen befindet sich die CO₂-Deponierung noch in einem konzeptionellen Stadium.

- Die Wasserstoff- und Methanolerzeugung aus fossilen Rohstoffen führt zu keiner absoluten Minderung der CO₂-Emissionen. Dieser Weg ist nur sinnvoll als Vorstufe zur CO₂-Deponierung, da die vielen dezentralen CO₂-Emissionsquellen beim Endverbrauch nur an relativ wenigen zentral anfallenden CO₂-Emissionen "konzentriert" werden.
- N₂O-Emissionen aus stationären Feuerungs- und Entstickungsanlagen lassen aufgrund der abgeschätzten Gesamtmengen die Entwicklung von entsprechenden Vermeidungstechniken nicht vordringlich erscheinen.
- Ob durch die eingeleiteten Minderungsmaßnahmen für NO_x und HC eine Änderung der Immissionssituation von Ozon zu erwarten ist, kann nicht angegeben werden.

Ein wichtiger Aussagepunkt des Studienpaketes A5 ist die CO₂-Abscheidung aus "zentralen" CO₂-Emissionsquellen (wie Kraftwerke, Wasserstofferzeugungsanlagen aus fossiler Energie) und Deponierung des CO₂ in der Tiefsee. Die vorliegenden Aussagen ergeben sich aufgrund der derzeitigen technischen und wirtschaftlichen Überlegungen, wie sie in der Literatur enthalten sind.

Hier besteht erheblicher weiterer Forschungsbedarf; zum einen, um die technisch wirtschaftlichen Rahmenbedingungen einer CO₂-Abscheidung und Deponierung zu klären, zum anderen um die ökologischen Auswirkungen, die Verweilzeiten etc. der CO₂-Einbringung in die Tiefsee und in Kavernen abschätzen zu können.

Von den im Studienkomplex A 5 untersuchten CO₂-Minderungsmöglichkeiten könnten bis zum Jahre 2005 nennenswerte Beiträge nur von

- den fahrzeugtechnischen Maßnahmen,
- den verkehrslenkenden Maßnahmen und
- Energiespeichern

erbracht werden.

Die fahrzeugtechnischen Maßnahmen führen zwar zu einer fahrzeugspezifischen Reduktion, konkurrieren aber mit der erwarteten Zunahme der Verkehrsleistung. Der Beitrag verkehrslenkender Maßnahmen hängt von der Akzeptanz dieser Maßnahmen und von der Wahl des Verkehrsmittels durch den Verbraucher ab.

Energiespeicher sind in der Regel Bestandteil von solaren Wärmesystemen; ihr Beitrag bis 2005 wird durch die Markteinführung der Solarsysteme bestimmt. Technische Entwicklungen, die zu wirtschaftlicheren saisonalen Wärme- und Stromspeichern führen, zeichnen sich bis 2005 nicht ab.

Die CO₂-Deponierung hängt in erster Linie von der ökologischen Verträglichkeit ab. Selbst wenn diese in wenigen Jahren geklärt werden könnte, erfordert der Aufbau der Abscheideanlagen und der CO₂-Transportinfrastruktur wenigstens eine Dekade, so daß ein nennenswerter Beitrag erst nach 2005 zu erwarten wäre.

Der Einsatz von fossil erzeugtem Wasserstoff und Methanol ist nur in Verbindung mit der CO₂-Deponie sinnvoll und deshalb an diesen zeitlichen Rahmen geknüpft.

1. Einleitung

Aufgabenstellung

Rund 85 % des gesamten Primärenergieverbrauchs und rund 80 % des gesamten Endenergieverbrauchs der Bundesrepublik Deutschland werden gegenwärtig durch Energieträger gedeckt, die unmittelbar fossilen Ursprungs sind. Deshalb sind sie und ihre Nutzungstechniken in den Bereichen Verkehr, Wärmemarkt und Umwandlungsbereich im Zusammenhang mit dem Ersatz fossiler Primärenergieträger aus Klimagründen zu betrachten.

Im einzelnen werden im Studienkomplex A.5 die Möglichkeiten der CO₂-Minderung durch

- neue Kraftstoffe und Antriebssysteme,
- neue Verkehrssysteme und die Substitution bzw. Verlagerung von Verkehrsleistung,
- Speichertechniken,
- neue Sekundärenergieträger und Nutzungssysteme sowie
- die Rückhaltung und Entsorgung von CO₂,

untersucht. Dabei werden, soweit dies möglich ist, der bisher erreichte Entwicklungsstand und die Entwicklungsperspektiven dargestellt sowie die technischen und wirtschaftlichen Potentiale der CO₂-Minderung und die CO₂-Minderungskosten ermittelt. Des Weiteren wird die Minderung der Spurengase CO, NMKW (Nichtmethankohlenwasserstoffe), NO_x und N₂O untersucht, deren Klimarelevanz in der Fähigkeit zur Bildung von Ozon zu sehen ist.

Verbindung und Einordnung zu anderen Studienkomplexen

Bezüglich des Untersuchungsgegenstandes des Studienkomplexes A.5 wurden entsprechend der Aufgabenstellung die folgenden Quervernetzungen gegenüber den anderen Studienkomplexen erfaßt und es werden die folgenden Beschränkungen zugrunde gelegt:

- Einflüsse des Verkehrssektors auf die Siedlungsstruktur bzw. Steuerungsmöglichkeiten durch die Siedlungsstruktur werden vorrangig im Studienkomplex A.6 untersucht.

- Der Einsatz nuklearer Energie zur Wasserstoffherstellung und zur Veredlung fossiler Energieträger wird im Studienkomplex A.4 behandelt.
 - Die Erzeugung von Alkoholen oder Energieträgern aus Biomasse wird im Studienkomplex A.2 betrachtet.
 - Maßnahmen zur Emissionsminderung im Verkehrssektor werden im Studienkomplex A.1 untersucht.
 - Die Methan-Emissionen werden im Studienkomplex A.3 behandelt.
- Diese Abgrenzung der Untersuchungsbereiche erschwert die Einordnung der Ergebnisse des Studienkomplexes A.5. Deshalb sollten bei der Diskussion der Ergebnisse des Studienkomplexes A.5 diese Verbindungen zu den anderen Studienkomplexen des Studienprogrammes der Enquete-Kommission immer mit beachtet werden.

Emissionen im Jahr 1987 in der Bundesrepublik Deutschland

Als Treibhausgase werden die Gase in der Atmosphäre bezeichnet, die ihre wesentlichen Absorptionsbanden im Wellenlängenbereich der Wärmestrahlung, im Infrarotbereich, aufweisen, die also bei Anstieg ihrer Konzentrationen den Treibhauseffekt der Atmosphäre verstärken und damit eine Erhöhung der Temperatur an der Erdoberfläche bewirken können. Die wichtigsten Treibhausgase sind der Wasserdampf, Kohlendioxid, Methan, Distickstoffoxid, die FCKW und Ozon. Die Treibhausgase aus allen Quellen tragen nach dem gegenwärtigen Kenntnisstand mit folgenden Beiträgen zum durch Menschen verursachten (anthropogenen) Treibhauseffekt bei:

- Kohlendioxid (CO ₂)	mit rd.	50 %
- Methan (CH ₄)	mit rd.	19 %
- Fluorkohlenwasserstoffe (FCKW)	mit rd.	17 %
- Ozon der Troposphäre (O ₃)	mit rd.	8 %
- Distickstoffoxid (N ₂ O)	mit rd.	4 %
- Wasserdampf der Stratosphäre (H ₂ O)	mit rd.	2 %

Durch die im Rahmen des Studienkomplexes A.5 behandelten Techniken und Maßnahmen werden hiervon das Kohlendioxid, das Ozon und das Distickstoffoxid beeinflusst. Der Treibhauseffekt durch CO₂ wird im wesentlichen durch seine Absorptionsbande bei 15 μ m bewerkstelligt. Nach dem gegenwärtigen Kenntnisstand hat die atmosphärische CO₂-

Konzentration zwischen etwa 180 und 200 ppm in den Eiszeiten und etwa 280 und 300 ppm in den Warmzeiten geschwankt. Ihr vorindustrieller Wert (etwa im Jahr 1800) liegt bei 280 ppm. Seitdem ist sie ständig angestiegen, im Jahr 1958 hatte die CO₂-Konzentration bereits 315 ppm erreicht und steigt seitdem in der gesamten Atmosphäre annähernd gleichförmig um etwa 0,4 % pro Jahr an. Im Jahr 1987 betrug sie 348 ppm. Die natürlichen Quellen des CO₂ sind die Pflanzenatmung, die mikrobielle Zersetzung des organischen Materials im Boden, Gesteinsverwitterung und die Freisetzung von CO₂ aus dem Ozean. Nur 4 % des jährlich emittierten CO₂ sind anthropogenen Ursprungs. Hierbei handelt es sich zu rund 90 % um die Verbrennung fossiler Energieträger und zu rund 10 % um die Emissionen von CO₂ durch Landnutzungsänderungen.

Die derzeitige Konzentration von Ozon in der Troposphäre wird mit 10 bis 30 ppb angegeben (geschätzter Mittelwert ca. 20 ppb). Aufgrund der kurzen Lebensdauer von Ozonmolekülen sind die troposphärischen Ozonkonzentrationen sehr starken räumlichen und zeitlichen Schwankungen unterworfen. In Perioden photochemischen Smogs können regional 200 ppb überschritten werden. Die bodennahe Ozonkonzentration weist einen ausgeprägten Tages- und Jahresgang auf. In den mittleren Breiten der Nordhemisphäre treten in den Mittagsstunden während der Sommermonate die höchsten Konzentrationen auf. Die jährliche Zunahme von troposphärischem Ozon wird mit ungefähr 0,5 % angegeben. Verursacht werden diese hohen Ozon-Konzentrationen in der Troposphäre nicht zuletzt durch die Freisetzung von sogenannten "Vorläufersubstanzen", u. a. auch aus anthropogenen Quellen. Zu diesen Vorläufersubstanzen zählen insbesondere Kohlenmonoxid (CO), Stickoxide (NO_x) und eine Vielzahl an flüchtigen organischen Verbindungen (VOC). Gemäß der Aufgabenstellung des Studienkomplexes A.5 wird bei den flüchtigen organischen Verbindungen das Methan nicht behandelt. Zur Vermeidung von Fehlinterpretationen werden die übrigen flüchtigen organischen Verbindungen mit NMKW (Nichtmethan-kohlenwasserstoffe) bezeichnet.

CO wird über eine komplizierte Reaktionskette beim photochemischen Abbau des Methans und anderer höherer Kohlenwasserstoffe gebildet, bei der unvollständigen Verbrennung, insbesondere in Kraftfahrzeu-

gen, bei Wald- und Steppenbränden sowie bei der Verbrennung von Biomasse wie etwa Holz und landwirtschaftlichen Abfallstoffen. NO_x -Quellen für die Troposphäre sind mikrobiologische Prozesse im Boden (Denitrifikation), Biomasseverbrennung und Verbrennung von fossilen Brennstoffen. Außerdem entsteht NO_x durch Blitzenentladungen. In der nördlichen Hemisphäre stammt NO_x jedoch vorwiegend aus anthropogenen Quellen. Besonders die Abgase von Kraftfahrzeugen führen in Ballungsgebieten zu sehr hohen NO_x -Mischungsverhältnissen, die sich nicht nur regional, sondern auch global auswirken.

Das Distickstoffmonoxid (N_2O) ist unter den Bedingungen in der Troposphäre zwar äußerst stabil und trägt dort nicht zur Ozonbildung bei. Aufgrund der Absorption von IR-Strahlung sowie des Abbaus in der Stratosphäre unter Bildung von ozonzerstörenden NO_x -Radikalen beeinflussen diese Moleküle dennoch die klimatischen Verhältnisse. Nach den bisherigen Einschätzungen trägt das N_2O bei einer mittleren Konzentration von 310 ppb zu ca. 4 % zum derzeitigen Treibhauseffekt bei. Der jährliche Konzentrationsanstieg wird mit 0,2 bis 0,3 % abgeschätzt. Natürliche Hauptquelle des N_2O ist die mikrobiologische Denitrifikation und Nitrifikation in natürlichen Böden, wobei denitrifizierende Bakterien Nitrat und nitrifizierende Bakterien Ammoniak teilweise umwandeln. Eine wesentliche anthropogene Quelle ist die Verwendung stickstoffhaltiger Dünger in der Landwirtschaft.

Die Anteile der energiebedingten Emissionen der Treibhausgase CO_2 , CO, NMKW, NO_x und N_2O an den Gesamtemissionen variieren entsprechend den spezifischen Bedingungen von Land zu Land, bewegen sich in vergleichbaren Ländern allerdings in ähnlicher Größenordnung. Die Emissionssituation für die Spurenstoffe CO_2 , CO, NMKW, NO_x und N_2O in der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 1987 ist in Tabelle 1.1 wiedergegeben. Die energiebedingten Emissionen der verschiedenen Schadstoffe sind getrennt für die verschiedenen Emittentenbereiche aufgeführt, in denen die im Rahmen des Studienkomplexes A.5 betrachteten Maßnahmen und Techniken eingesetzt werden können.

Wie aus der Tabelle 1.1 zu ersehen ist, sind bei den CO_2 -Emissionen die Kraft- und Fernheizwerke, die Industrie und der Verkehrssektor

die Emittentenbereiche mit den größten Anteilen. Bei der Freisetzung der Schadstoffe CO, NMKW und NO_x kommt dem Verkehrssektor die größte Bedeutung zu. Als weitere, in Tabelle 1.1 nicht aufgeführte wichtige NMKW-Quelle ist die Anwendung von Lösemitteln bzw. lösemittelhaltigen Produkten zu nennen. Größere Mengen an NO_x wurden im Jahr 1987 auch von Kraft- und Fernheizwerken freigesetzt. Die energiebedingten N₂O-Emissionen scheinen dagegen, gemessen an den natürlichen und sonstigen anthropogenen N₂O-Emissionen, eine untergeordnete Rolle zu spielen. Bezüglich der energiebedingten N₂O-Emissionen sind für das Jahr 1987 in der Bundesrepublik Deutschland die Sektoren Kraftwerke und Fernheizwerke sowie die Industrie von besonderer Bedeutung. Es ist darauf hinzuweisen, daß in bestimmten Emittentenbereichen, z. B. den Großfeuerungsanlagen oder dem Verkehrssektor, aufgrund von gesetzlich festgelegten Emissionsgrenzwerten verschiedene Maßnahmen zur Emissionsminderung inzwischen bereits verwirklicht sind bzw. in absehbarer Zeit durchgeführt werden, die für einzelne Spurengase zu deutlichen Emissionsminderungen führen werden. Allerdings ist davon auszugehen, daß damit das gesamte technisch mögliche Minderungspotential noch nicht ausgeschöpft wird.

Tabelle 1.1

CO₂-, CO-, NMKW-, NO_x- und N₂O-Emissionen verschiedener Emittentenbereiche

in der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 1987

Emittentenbereich	CO ₂	CO	NMKW	NO _x	N ₂ O
1 Kraftwerke und Fernheizwerke					
Emissionen in Mio. t/a	206,65	0,04	0,01	0,48	0,03
Anteil in %	29,3	0,6	0,3	18,5	35,6
2 Verkehr					
Emissionen in Mio. t/a	131,06	5,80	1,32	1,61	0,01
Anteil in %	18,6	79,4	86,3	62,0	8,0
3 Industrie					
Emissionen in Mio. t/a	156,64	0,10	0,01	0,31	0,02
Anteil in %	22,2	1,3	0,9	11,8	26,0
4 Kleinverbraucher					
Emissionen in Mio. t/a	63,58	0,16	0,01	0,05	0,01
Anteil in %	9,0	2,1	0,5	1,9	10,2
5 Haushalte					
Emissionen in Mio. t/a	112,92	1,02	0,05	0,09	0,01
Anteil in %	16,0	14,0	3,3	3,5	17,9
6 Sonstige					
Emissionen in Mio. t/a	35,10	0,19	0,13	0,06	0,00
Anteil in %	5,0	2,6	8,7	2,3	2,3
7 Energienutzung					
Emissionen in Mio. t/a	705,95	7,30	1,53	2,60	0,08
Anteil in %	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Anteil an den Gesamtemissionen in % ¹⁾	86	88	56	99	
8 Anteil des Wärmemarktes an Zeile 3, 4 und 5					
Emissionen in Mio. t/a	247,70	1,18	0,06	0,34	0,04
Anteil in %	32,8	16,2	3,8	12,9	52,2

¹⁾ im Jahr 1986 /UBA, 1989a/²⁾ einschließlich Methan

2. Stand der Technik, Entwicklungsperspektiven, CO₂-Minderungspotentiale der einzelnen Techniken

Im folgenden werden, soweit dies möglich ist, für die im Studienkomplex A.5 untersuchten CO₂-Minderungsmöglichkeiten, d. h. für neue Kraftstoffe, für verkehrliche Maßnahmen, für Speichertechniken, für neue Sekundärenergieträger und Nutzungssysteme und für die Entsorgungstechniken von CO₂, der bisher erreichte Entwicklungsstand dargestellt, die Entwicklungsperspektiven aufgezeigt und die technischen und wirtschaftlichen Potentiale der CO₂-Minderung angegeben.

2.1 Neue Kraftstoffe und Antriebssysteme

In der BRD betragen 1987 die direkten durch die eingesetzten Kraftstoffe bedingten CO₂-Emissionen im Verkehrssektor ca. 130 Mio. t CO₂/a. Einschließlich der vorgelagerten Prozesse und der Stromerzeugung der Deutschen Bundesbahn wurden ca. 151 Mio. t CO₂/a emittiert. Dies entspricht einem Anteil an den gesamten energiebedingten Emissionen von ca. 21 %. Der Personenkraftwagen-(Pkw-)Verkehr hatte dabei mit 90 (97) Mio. t CO₂/a einen Anteil an den Verkehrsemissionen von 69 (64) %, der Lkw-Verkehr mit 28 (29) Mio. t CO₂ einen Anteil von 21 (19) %. Die CO₂-Emissionen durch den Schienenverkehr werden wesentlich durch die Emissionen bei der Stromerzeugung bestimmt (Schienenverkehr insgesamt 1 (6,3) Mio. t CO₂/a). Durch den Flugverkehr über der Bundesrepublik wurden ca. 11 Mio. t CO₂ emittiert. Betrachtet man die Emissionen durch den gesamten grenzüberschreitenden Flugverkehr vom Start- bzw. Zielflughafen in der Bundesrepublik bis zum ersten Ziel- bzw. letzten Startflughafen im Ausland mit, so ergibt sich ein um 10 Mio. t CO₂ höherer Wert. Die Gesamtsumme der Flugzeugemissionen kann nicht ohne weiteres mit den Emissionen der anderen Verkehrsmittel verglichen werden, da sich durch den Emissionsort andere Wirkungen ergeben könnten, insbesondere durch das in großen Höhen emittierte Wasser (Kondensstreifen). Aufgrund des großen Anteils des Straßenverkehrs an den CO₂-Emissionen des Verkehrs wurden in den Studien des Studienkomplexes A.5 vor allem die CO₂-Minderungsmöglichkeiten im Straßenver-

kehr untersucht. Entsprechend wird auch im folgenden nur auf diesen Bereich eingegangen.

Prinzipiell lassen sich - bei gleichen Fahrzeugleistungen - CO₂-Emissionen im Straßenverkehr reduzieren durch:

- Verringerung der spezifischen Kraftstoffverbräuche bei heutigen Antrieben und Kraftstoffen,
- den Einsatz neuartiger Fahrzeuge, Antriebe und Kraftstoffe,
- verkehrliche Maßnahmen.

In diesem Abschnitt wird auf die technischen Maßnahmen eingegangen.

Der Kraftstoffverbrauch der Kraftfahrzeuge läßt sich durch technische Maßnahmen noch erheblich senken. Exemplarisch seien die folgenden Ansatzpunkte genannt:

- Reduzierung des Fahrzeuggewichtes,
- Reduzierung des Luftwiderstands der Fahrzeuge,
- Trennung von Motor und Getriebe bei gleichzeitiger Motorabschaltung,
- stufenlose Getriebe zur Ermöglichung eines verbrauchsoptimierten Motorbetriebs,
- Maßnahmen am Motor wie Aufladung, Zylinderabschaltung, Änderung des Verbrennungsprozesses,
- Direkteinspritzung beim Dieselmotor.

Der spezifische Kraftstoffverbrauch und damit die spezifischen CO₂-Emissionen werden wesentlich durch den Luftwiderstand des Fahrzeuges, das Fahrzeuggewicht und die Motorauslegung bestimmt. Durch den verstärkten Einsatz kleinerer und leichter Fahrzeuge ließe sich der Energieverbrauch und damit die CO₂-Emissionen erheblich reduzieren. Ebenso läßt sich z. B. durch eine Reduzierung der Auslegungshöchstgeschwindigkeit von 160 km/h auf 140 km/h in Verbindung mit einer Verringerung des Luftwiderstandsbeiwertes von 0,35 auf 0,3 eine Verbrauchsreduktion um 15 % erreichen.

Für die heutigen Otto- und Dieselmotoren weisen die Arbeiten im Studienkomplex A.5 eine Reduktion des Verbrauchs durch motorische Maßnahmen bis zum Jahr 2030 gegenüber 1989 um 25 % bei Fahrzeugen mit Ottomotor und um 20 % bei Fahrzeugen mit Dieselantrieb aus. Der Dieselmotor weist gegenüber dem Benzinmotor - vor allem

bei Teillast - einen höheren Motorwirkungsgrad auf. Auf der Basis von vergleichbaren Fahrzeugen (gleiches Gesamtgewicht), unter Einbeziehung der Kraftstoffherstellung und des von /Heitland, u. a., 1989/ angegebenen motorischen Verbesserungspotentials würden im Jahr 2005 Dieselfahrzeuge ca. 18 % weniger CO₂ emittieren als Benzinfahrzeuge. Eine abschließende Bewertung der Substitution von Benzin- durch Dieselfahrzeuge unter Einbeziehung aller Fahrzeugemissionen ist jedoch nicht möglich, solange die Klimarelevanz einiger emittierter Stoffe nicht geklärt ist.

Neuere Entwicklungen versuchen die Vorteile der ottomotorischen mit denjenigen der dieselmotorischen Verbrennung zu verbinden. Dabei soll, ausgehend vom Ottomotor, ein günstigeres Verbrauchs- und Schadstoffverhalten dadurch erreicht werden, daß man anstelle einer homogenen Gemischverbrennung eine Gemischschichtung anstrebt, d.h. zunächst wird ein fettes Gemisch gezündet und anschließend ein armes Gemisch verbrannt.

Durch den Einsatz von alternativen Kraftstoffen im Verkehr läßt sich der Anstieg der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre mindern, wenn die mit der Kraftstoffherstellung und dem Kraftstoffeinsatz verbundene CO₂-Erzeugung geringer ist als bei heutigen Kraftstoffen. Als alternative Kraftstoffe kommen Erdgas, LPG (Propan/Butan), Methanol, Ethanol und Pflanzenöle aus Biomasse, Wasserstoff sowie Strom in Betracht. LPG wird während des Raffinerieprozesses gewonnen und steht daher nur in begrenztem Umfang zur Verfügung. Der direkte Einsatz von Erdgas kommt wegen dem großen Volumen und dem hohen Gewicht der Druckspeicher weniger bei Pkws als bei Nutzfahrzeugen in Frage.

Im Vergleich zu heutigen konventionellen Benzinfahrzeugen lassen sich mit Alkoholfahrzeugen bis zu 20 % günstigere Energieverbräuche erzielen. Die wesentlichen Probleme bei der Anpassung von Fahrzeugen an die Alkoholkraftstoffe sind heute gelöst. Sowohl die volumenbezogene als auch die massenbezogene Energiedichte von Methanol sind etwa halb so groß wie die von Benzin, so daß sich der Aufwand für die Kraftstoffspeicherung entsprechend erhöht. Durch den Einsatz von Katalysatoren in Methanolfahrzeugen lassen sich die

heutigen, für Fahrzeuge mit Benzinmotor geltenden Abgasgrenzwerte erreichen. Die vor allem in der Startphase gegenüber dem Benzinmotor erhöhten Aldehydemissionen lassen sich durch zusätzliche Startkatalysatoren, Lufteinblasung und ähnliche Maßnahmen ebenfalls beschränken. Methanol kann sowohl in Otto-als auch in Dieselmotoren eingesetzt werden. Hinsichtlich der Emissionen und des Energieverbrauchs bietet das dieselmotorische Verfahren Vorteile. Ob der Einsatz von Methanol als Kraftstoff zu einer Verringerung der CO₂-Emissionen führt, hängt entscheidend davon ab, welche Emissionen bei der Methanolerzeugung entstehen. Im folgenden werden beispielhaft die CO₂-Emissionen eines Methanolfahrzeugs auf der Basis eines VW Golf für das Jahr 2005 dargestellt. Legt man einen Methanolverbrauch von 12,1 Liter pro 100 km im 1/3-Mix zugrunde, so sind die fahrzeugseitigen CO₂-Emissionen um ca. 9 % geringer als beim vergleichbaren Benzinfahrzeug und etwa gleich hoch wie beim Dieselfahrzeug. Werden jedoch noch die bei der Herstellung und Verteilung des Methanols entstehenden CO₂-Emissionen mit betrachtet, so zeigt sich, daß bei einem Einsatz von fossilen Brennstoffen zur Methanolerzeugung bestenfalls unter Verwendung von Erdgas als Rohstoff die Methanolfahrzeuge gegenüber Benzinfahrzeugen geringere CO₂-Emissionen aufweisen. Im einzelnen ergeben sich für das Jahr 2005 die folgenden spezifischen Gesamtemissionen für Methanolkraftstoff aus verschiedenen fossilen Energieträgern:

- Methanol aus Erdgas	17,6 kg CO ₂ je 100 km,
- Methanol aus schwerem Heizöl	30,2 kg CO ₂ je 100 km,
- Methanol aus Steinkohle	38,8 kg CO ₂ je 100 km,
- Methanol aus Steinkohle und Kernkraft	17,6 kg CO ₂ je 100 km,
- Methanol aus Braunkohle	46,8 kg CO ₂ je 100 km.

Demgegenüber weisen Benzinfahrzeuge - unter Berücksichtigung einer Emissionsreduktion gegenüber 1987 von 15 % - über die gesamte Nutzungskette betrachtet spezifische CO₂-Emissionen von rund 19,1 kg CO₂ je 100 km und Dieselfahrzeuge - bei einer Reduktion von 10 % - von rund 15,7 kg CO₂ je 100 km auf. Auf die Möglichkeit einer CO₂-Entsorgung zumindest des bei der Methanolerzeugung zentral anfallenden CO₂ wird in Kapitel 2.5 eingegangen.

Bei der Herstellung von Kraftstoffen aus Biomasse kann ein geschlossener CO₂-Kreislauf erreicht werden. Dies gilt jedoch nur

dann, wenn die bei der Produktion der Biokraftstoffe direkt oder indirekt eingesetzte Energie für Düngung, Pflanzenschutz, landwirtschaftliche Betriebe und Umwandlungsprozesse nicht mit CO₂-Emissionen aus fossilen Brennstoffen verbunden ist, z. B. wenn die benötigte Prozeßenergie aus Bio-Brennstoffen gedeckt wird. Inwieweit dies möglich ist, ist in den Untersuchungen nicht ausgewiesen und bedarf noch weiterer Forschungen. Das Einsatzpotential von Biokraftstoffen wird wesentlich durch die zur Produktion benötigte landwirtschaftliche Nutzfläche begrenzt.

Ethanol aus Zuckerrüben bzw. Zuckerhirse weist bei hohen Hektarerträgen die günstigste Energiebilanz auf (Flächenertrag: Zuckerrüben: 109 GJ/ha, direkter und indirekter Energieeinsatz: 0,48-0,71 MJ/MJ Ethanol, Zuckerhirse: 104 GJ/ha, 0,19 MJ/MJ Ethanol). Ethanol kann ohne motorische Änderungen bis zu 5 % dem Benzin beigemischt werden. Reine Ethanolfahrzeuge bieten sowohl in Hinblick auf die Energienutzung als auch im Hinblick auf das Abgasverhalten erhebliche Vorteile gegenüber herkömmlichen Benzin- und Dieselfahrzeugen (20 % bzw. 5 % bessere Energienutzung). Die Produktionskosten für Ethanol betragen ca. 1,0-1,6 DM/l, was einem Äquivalentspreis von 1,50-2,40 DM/l Benzin entspricht.

In der Bundesrepublik erscheint Raps zur Pflanzenölherstellung besonders geeignet. Bei einer energetischen Nutzung der gesamten Rapspflanze ergibt sich unter Berücksichtigung des Energieaufwands für Düngung, Pflanzenschutz, Kraftstoff, Heizöl und Ölgewinnung ein Produktionsaufwand von 0,12 MJ/MJ Rapsöl. Wird das anfallende Rapsstroh energetisch nicht genutzt, so beträgt er 0,27 MJ/MJ Rapsöl. Die Produktionskosten betragen unter den heutigen Bedingungen 2,14 DM/kg Rapsöl /Strehler, u.a., 1989/. Pflanzenöle eignen sich vor allem zur dieselmotorischen Verbrennung. Der vielstofffähige Elsbettmotor zeigt dabei gegenüber serienmäßigen Dieselmotoren Vorteile. Eine Veresterung der Pflanzenöle beseitigt die Nachteile dieser Kraftstoffe (ungünstige Kaltstartfähigkeit, hohe Zähigkeit) gegenüber Diesel und ermöglicht den Einsatz in serienmäßigen Motoren im Wechsel mit Dieselkraftstoff.

Der Einsatz von Wasserstoff als Kraftstoff bietet die Möglichkeit eines CO₂-freien Fahrzeugbetriebes. Bis auf geringe, durch Schmieröl erzeugte CO- und HC-Emissionen entstehen am Fahrzeug nur noch NO_x-Emissionen, die sich durch motorische Maßnahmen minimieren lassen. Die von heutigen Kraftstoffen abweichenden Eigenschaften des Wasserstoffs (geringe volumenbezogene Energiedichte, niedrige Zündenergie) erfordern gravierende Änderungen am Motor. Ein wesentliches Hindernis für den praktischen Einsatz im Verkehr ist die Wasserstoffspeicherung im Fahrzeug. Von den drei Speichermöglichkeiten - gasförmig unter hohem Druck, als Metallhydrid oder in flüssiger Form - erscheint die gasförmige Speicherung wegen den voluminösen Behältern und der notwendigen Kompressionsenergie das ungünstigste Verfahren. Die Speicherung als Metallhydrid erfordert die Mitführung relativ großer Massen. Obwohl bei der Metallhydridspeicherung neuerdings Fortschritte erzielt werden konnten, sehen /Heitland, u. a., 1989/ die Nutzung von Flüssigwasserstoff als das aussichtsreichste Verfahren. Wird der Wasserstoff aus fossilen Energieträgern ohne CO₂-Entsorgung erzeugt, so führt dies zu höheren CO₂-Emissionen als bei vergleichbaren Benzin- oder Dieselfahrzeugen. Für 2005 ergeben sich die folgenden spezifischen CO₂-Gesamtemissionen für Wasserstoff getriebene Fahrzeuge:

- Wasserstoff aus Erdgas	60,2 kg CO ₂ je 100 km,
- Wasserstoff aus schwerem Heizöl	72,4 kg CO ₂ je 100 km,
- Wasserstoff aus Steinkohle	89,5 kg CO ₂ je 100 km,
- Wasserstoff aus Braunkohle	99,1 kg CO ₂ je 100 km,
- Wasserstoff aus Elektrol. (GuD-Steink.)	99,1 kg CO ₂ je 100 km,
- Wasserstoff aus Elektrol. (heut. Mix)	84,7 kg CO ₂ je 100 km.

Das bei der Herstellung und Verflüssigung des Wasserstoffs anfallende CO₂ kann theoretisch entsorgt werden. Auf diese Problemstellung wird in Kapitel 2.5 eingegangen. Die Wasserstoffelektrolyse mit CO₂-freier Stromerzeugung (Kernenergie, Photovoltaik, Wasserkraft) bietet dagegen die Möglichkeit einer Wasserstoffnutzung ohne die Erzeugung von CO₂.

Elektrofahrzeuge emittieren beim Betrieb keine kraftstoffbedingten Schadstoffe. Zudem sind solche Fahrzeuge erheblich leiser als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren. Die Erfahrungen im Einsatz von Elektrofahrzeugen haben jedoch gezeigt, daß die niedrige Speicherkapa-

zität, das hohe Gewicht der Batterie, ungenügende Reichweite und Zuladung sowie hohe Fahrzeug- und Batteriekosten - auch bei größeren Produktionszahlen - einen wirtschaftlichen Einsatz der Fahrzeuge derzeit nicht zulassen. Prinzipiell stehen zur Entwicklung eines Elektrofahrzeuges zwei verschiedene Wege zur Verfügung - eine von Grund auf neue, dem Elektroantrieb angepaßte Konstruktion oder eine Entwicklung auf der Basis eines Großserienfahrzeugs. Über Elektrofahrzeuge auf der Basis von konventionellen Serienfahrzeugen liegen umfangreiche Erfahrungen vor. Mit solchen Fahrzeugen lassen sich heute Reichweiten von 100 - 200 km erzielen. Die Batterien haben derzeit eine Lebensdauer von mindestens 30000 km. Bei einer Jahresproduktion von 100000 Pkw sind bei einem Elektro-Pkw die Kosten pro Fahrzeugkilometer (in Preisen von 1987) etwa doppelt so hoch wie bei einem Benzin-Pkw vergleichbarer Größe. Wird der benötigte Strom in einem modernen Steinkohle-GuD-Kraftwerk erzeugt, so entstehen spezifische CO₂-Emissionen von 25,0 kg CO₂ je 100 km. Bei einer Stromerzeugung mit der heutigen Erzeugungsstruktur würden 21,3 kg CO₂ je 100 km emittiert. Die Entwicklung von batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen ist fahrzeug- und antriebsseitig noch nicht abgeschlossen. Vor allem bei den Energiespeichern sind noch erhebliche Verbesserungen notwendig, damit mit heutigen Fahrzeugen vergleichbare Reichweiten erreicht werden können.

Im Straßengüterverkehr werden überwiegend Dieselmotoren mit Direkteinspritzung eingesetzt. Kraftstoffverbrauchsminderungspotentiale werden hier als gering angesehen, wobei ein Zielkonflikt zwischen der Verbrauchsoptimierung und der Verminderung der NO_x-Emissionen besteht. Der Einsatz von Alkoholen als alternative Kraftstoffe ist denkbar, in den Arbeiten des Studienkomplexes A.5 werden jedoch keine CO₂-Minderungspotentiale angegeben.

Das Entwicklungspotential der auf heutigen Kraftstoffen beruhenden Antriebssysteme ist noch erheblich und sollte daher dringend vorangetrieben werden. Der Einsatz von Kraftstoffen aus Biomasse wird wesentlich durch den hohen Energieeinsatz zur Kraftstoffherzeugung, die benötigten landwirtschaftlichen Anbauflächen und durch hohe Kosten begrenzt. Durch den Einsatz von CO₂-frei erzeugtem Wasserstoff und Strom im Straßenverkehr könnten langfristig die

CO₂-Emissionen im Straßenverkehr erheblich reduziert werden. Damit die Fahrzeuge vor allem in Bezug auf Reichweite und Handhabung der Betankung mit heutigen Fahrzeugen vergleichbar werden, bedürfen beide Konzepte jedoch noch großer technischer Fortentwicklung. Die Kosten für solche Fahrzeuge werden erheblich über denen heutiger Fahrzeuge liegen.

Abbildung 2.1 zeigt zusammenfassend eine Gegenüberstellung der spezifischen CO₂-Emissionen der verschiedenen alternativen Kraftstoffe mit unterschiedlichen Herstellungsverfahren mit denjenigen von Benzin- und Dieselfahrzeugen. Die Werte wurden unter Zugrundelegung vergleichbarer Fahrzeuge (gleiches Fahrzeuggewicht) und unter Einbeziehung der Entwicklungspotentiale bis 2005 berechnet. Bei Alternativkraftstoffen aus fossilen Energieträgern ist gegenüber Benzinfahrzeugen nur beim Einsatz von Methanol aus Erdgas eine geringe Emissionsreduktion zu erreichen. Das bei der Stromerzeugung im heutigen Strommix in etwa zu gleichen Emissionen führende Elektroauto kann wegen der gegenüber konventionellen Fahrzeugen geringeren Reichweite nur bedingt das Benzinfahrzeug ersetzen. Das größte CO₂-Minderungspotential ergibt sich durch den verstärkten Einsatz von Dieselfahrzeugen gegenüber Benzinfahrzeugen.

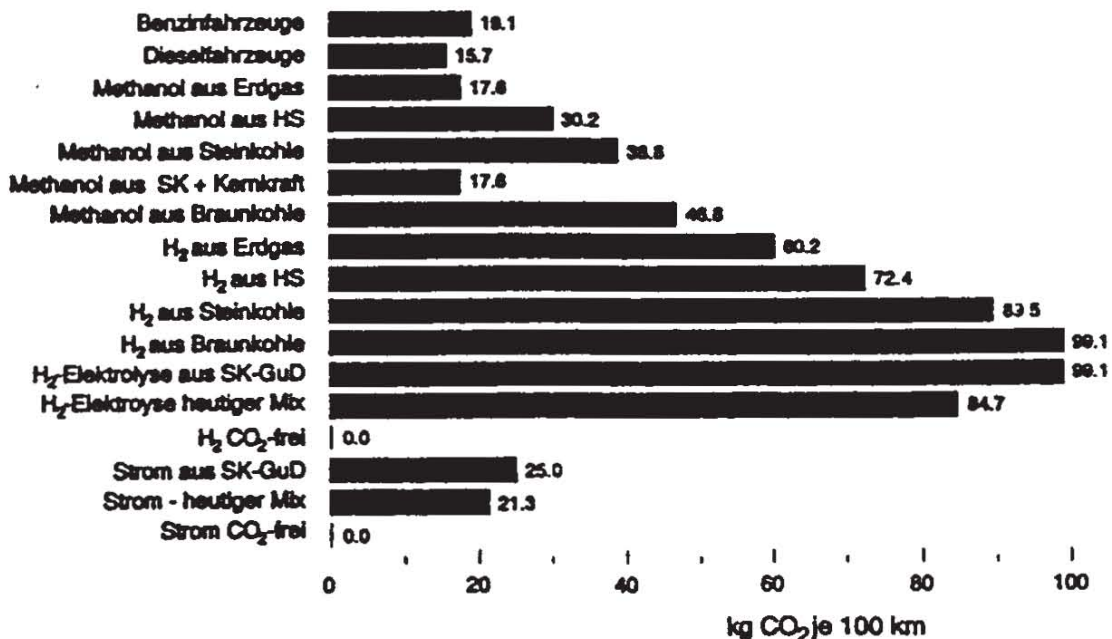


Abb. 2.1: CO₂-Emissionen beim Einsatz verschiedener Kraftstoffe einschließl. der vorgelagerten Prozesse (bez. auf einen Fahrzeugtyp und den Entwicklungsstand des Jahres 2005)

Es sei noch einmal erwähnt, daß die Frage einer Endlagermöglichkeit des bei der Herstellung der alternativen Kraftstoffe zentral anfallenden CO₂ in Kapitel 2.5 diskutiert wird.

2.2 Verkehrliche Maßnahmen

Die Vorschläge, Ideen und Versuche, durch verkehrliche Maßnahmen die CO₂-Emissionen zu reduzieren, sind äußerst zahlreich. /Steierwald, u. a., 1989/ weisen ausdrücklich daraufhin, daß auf Grund der Komplexität des Verkehrssystems sowohl die tatsächliche Wirkung einzelner Maßnahmen als auch ein Gesamtminderungspotential für die BRD nur schwer abgeschätzt werden kann. Durch das Zusammenwirken ausgewählter, aufeinander abgestimmter Maßnahmen im Sinne eines integrierten Gesamtkonzeptes sind jedoch trendverstärkende, synergistische Effekte vorstellbar, die zu einer umweltverträglicheren Abwicklung des Verkehrs beitragen /Steierwald, u. a., 1989/.

Durch die Verlagerung von Verkehrsanteilen auf Verkehrsmittel mit geringeren spezifischen CO₂-Emissionen lassen sich bei gleicher Verkehrsleistung die Gesamtemissionen verringern. Gegenüber dem privaten Straßenverkehr zeigen neben dem nicht motorisierten Verkehr die öffentlichen Massentransportmittel im Personen- und Gütertransport deutlich geringere direkt betriebsbedingte spezifische Emissionen. So betragen im Jahr 1987 die durch den Kraftstoffeinsatz bedingten direkten und indirekten Emissionen im Straßenverkehr 180 g CO₂/Pkm, im Schienenfernverkehr 79 g CO₂/Pkm und im Schienennahverkehr 68 g CO₂/Pkm /Höpfner, u. a., 1989/. Durch die Erhöhung des Auslastungsgrades, die Verstetigung des Fahrtablaufes sowie die Schulung von Fahrzeugführern lassen sich die Emissionswerte der Schienenfahrzeuge noch verbessern.

Die Nutzung des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) ist in den Städten der BRD höchst unterschiedlich. Während z. B. in Stuttgart 170 Fahrten pro Jahr und Einwohner mit öffentlichen Nahverkehrsmitteln unternommen wurden, waren es in Hannover 230 und in Zürich 430. Auch ohne wesentliche Erhöhung des betrieblichen Aufwandes konnte in einigen Städten durch tariflichen Maßnahmen (z. B. übertragbare und billigere Zeitfahrkarten), eine Steigerung der Ver-

kehrleistung im ÖPNV um ca. 15 % erreicht werden. Unterstellt man eine solche Steigerung in allen Städten und Gemeinden der BRD, so könnten 0,44 % der gesamten Fahrleistungen des motorisierten Individualverkehrs auf den ÖPNV verlagert werden. /Steierwald, u. a., 1989/ betonen jedoch, daß durch Umweltkarten etc. ein großer Imagegewinn für den öffentlichen Verkehr erzielt werden konnte. In Verbindung mit fiskalischen Maßnahmen lassen sich günstigere Preise im ÖPNV nahezu kostenneutral gestalten. Durch eine Erhöhung des Auslastungsgrades im ÖPNV von derzeit 17 % auf 50 % könnten ca. 2,9 % der heutigen Verkehrsleistung des Individualverkehrs ersetzt werden. Würde man versuchen, diese Auslastungserhöhung durch Einführung eines Nulltarifs zu erreichen, so würde dies zu spezifischen Minderungskosten von ca. 580 DM/t CO₂ führen. Restriktive Maßnahmen im Straßenverkehr wie die Begrenzung der Kapazität des Straßennetzes, Parkraumbewirtschaftung, Straßenbenutzungsgebühren und Verkehrsberuhigung sollen die Attraktivität des ÖPNV steigern und Verkehrsspitzen entzerren. Eine entscheidende Voraussetzung für die Verwirklichung des Verlagerungspotentials ist, daß das im Energieverbrauch günstigere Verkehrsmittel im Hinblick auf die Reisezeit und die Fahrtkosten eine zumindest gleichwertige Alternative darstellt. Gerade in dieser Hinsicht besteht gegenwärtig noch ein erhebliches Defizit. Eine merkliche Veränderung des Modal Split zugunsten des ÖPNV erfordert daher neben einer Attraktivitätssteigerung zusätzlich restriktive Maßnahmen im Individualverkehr.

Durch den Ersatz kurzer Fahrten im motorisierten Individualverkehr durch Wege zu Fuß oder mit dem Fahrrad lassen sich theoretisch zwar viele Fahrten ersetzen, wegen dem kleinen Anteil der kurzen Fahrten an den gesamten Verkehrsleistungen ist das CO₂-Minderungspotential jedoch gering.

Eine bessere Auslastung von Personewagen und damit auf die Verkehrsleistung bezogen geringere spezifische Emissionen lassen sich durch Paratransit, Bildung von Fahrgemeinschaften und Vermittlung von Mitfahrern durch Mitfahrzentralen erreichen. Mit Paratransit - einem Service, bei dem die Fahrtwünsche und freie Kapazitäten von Personewagen über Leitstellen vermittelt werden - lassen sich entsprechend einer Schweizer Modellrechnung die gesamten Personen-

verkehrsleistungen um weniger als 1 % reduzieren. Durch Restriktionen für Alleinfahrer in Verbindung mit Vorteilen für mit mehreren Personen besetzten Fahrzeugen könnte die Attraktivität von Fahrgemeinschaften erweitert werden. Der Förderung von Mitfahrzentralen wird dagegen nur einen sehr geringen Beitrag zur Reduzierung des Gesamtenergieverbrauchs und der Gesamtemissionen beigemessen, da für die Mitfahrer die Mitnahme in der Regel nicht eine eigene Fahrt mit dem Pkw sondern eine Fahrt mit öffentlichen Verkehrsmitteln ersetzt.

Die Verlagerung nennenswerter Anteile des Personenfernverkehrs von der Straße und aus dem Luftverkehr auf die Schiene setzt wesentliche Verbesserungen des Angebots der Deutschen Bundesbahn (DB) voraus. Dies betrifft vor allem die Verkürzung der Reisezeit zwischen den Großstädten, qualitative Verbesserungen im Verkehrsangebot und die Preisgestaltung. Die DB hat ein umfangreiches Maßnahmenprogramm mit Neu- und Ausbaustrecken vorgelegt. Durch die Einführung des ICE (InterCityExpress) sollen die Reisezeiten erheblich verkürzt werden. Ein leistungsfähiges und attraktives Schienenschnellverkehrsmittel ohne Anbindung an die Fläche verliert jedoch seine Vorteile gegenüber dem Pkw. So leben im Einzugsbereich der heutigen IC-Haltepunkte nur 22 % der Bevölkerung. Nach einem Vorschlag von /Schlieba, 1987/ könnten durch die Einbindung von im Zeittakt verkehrenden Interregio- und Regionalerschnellbahnverbindungen sowie Nahverkehrszügen in den Intecity-Verkehr 60 % der Bundesbürger erreicht werden. Es liegen keine Angaben zu den Kosten für eine Umsetzung dieses Vorschlags vor. Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Verkehrsmittelwahl ist der Fahrpreis. So konnte zum Beispiel alleine durch die Einführung "Rosarot 85" die Verkehrsleistungen der DB um 15 % erhöht werden. Das Umweltbundesamt hält unter Berücksichtigung der Planungen der DB einen Zuwachs der Personenverkehrsleistung der Bahn im Jahr 2000 gegenüber 1986 um max. 50 % (13 Mrd. Pkm) für möglich. Dieser Zuwachs markiert die maximal mögliche Modal-Split-Änderung, die nach Ansicht des Umweltbundesamtes angesichts bestehender Kapazitätsreserven und den kurz vor Fertigstellung stehenden Aus- und Neubaustrecken durch erhöhten Personal- und Fahrzeugeinsatz ohne wesentliche Investitionen für neue Schienenwege erreicht werden könnte. Diese Verlagerung würde

20 - 25 % des bis zum Jahr 2000 prognostizierten Personenverkehrszuwaches entsprechen.

Durch neuartige Transportsysteme wie Magnetschnellbahn, Magnetnahverkehrs- und H-Bahn kann die Attraktivität des öffentlichen Verkehrs (ÖV) gesteigert werden. Nach /Steierwald, u. a., 1989/ ist im Nahverkehr für solche Systeme gegenüber Straßen-, S- und U-Bahn mit günstigeren spezifischen Emissionswerten und mit geringeren Betriebs- und Investitionskosten zu rechnen.

Durch den Einsatz von Telekommunikationsmitteln, wie zum Beispiel bei Telekonferenzen, könnten Fahrten im Geschäftsbereich ersetzt werden. Die Angaben zu dem Minderungspotential der Verkehrsleistung durch die weitere Verbreitung der Telekommunikation sind jedoch widersprüchlich. In naher Zukunft ist jedoch mit keinem nennenswerten Einfluß zu rechnen. Für die Schweiz wird im Jahr 2025 durch den Einsatz der Telekommunikation unter optimistischen Annahmen eine Reduktion des Energieverbrauchs im Personenverkehr von 10 % gegenüber heute für möglich gehalten.

/Steierwald, u. a., 1989/ untersuchten die Wirkung von Tempolimit, Lkw-Fahrverboten und Zeitregelungen als ordnungspolitische Maßnahmen. Das Kraftstoffeinsparpotential durch ein generelles Tempolimit von 100 km/h auf den Bundesautobahnen hätte im Jahr 1987 zu einer Kraftstoffeinsparung von 490.000 t geführt. Dies entspricht einem Anteil von 1,3 % an dem gesamten Kraftstoffverbrauch des Straßenverkehrs. Ohne Reduzierung der Transportleistung erfordern Lkw-Fahrverbote oder Einschränkungen im Straßengütertransport über längere Distanzen eine erheblich Ausweitung des Angebots der Schiene.

Der Kraftstoffverbrauch der Fahrzeuge ist stark abhängig von den jeweiligen Verkehrsbedingungen. Verbesserungen im Verkehrsablauf des motorisierten Individualverkehrs durch Neu- und Ausbaumaßnahmen im Straßennetz, die Einführung von Leit- und Steuersystemen, ordnungspolitische Maßnahmen wie Flexibilisierung von Arbeit- und Geschäftszeiten etc. könnten die spezifischen Fahrzeugverbräuche und damit auch die CO₂-Emissionen reduzieren. Die von /Steierwald, u. a., 1989/ aufgeführten Maßnahmen führen bei isolierter Betrachtung

zu Kraftstoffeinsparungen von unter 1 % des heutigen Kraftstoffverbrauchs. Bei allen Maßnahmen, die die Attraktivität der Straße steigern, besteht die Gefahr, daß Verkehrsleistungen vom ÖV auf die Straße verlagert werden und zusätzlich neuer Verkehr erzeugt wird, so daß schließlich die Verbrauchseinsparungen und die CO₂-Minderungen zumindest teilweise wieder kompensiert werden können.

Nicht zuletzt durch die Öffnung der Grenzen zwischen den Mitgliedsländern der EG wird in Zukunft mit einem weiteren starken Anstieg des Straßengüterverkehrs gerechnet. Es sollte daher ein ordnungspolitischer Rahmen geschaffen werden, der eine Optimierung des Auslastungsgrades und eine Reduzierung der Leerfahrten fördert. Ein Schadstoffminderungspotential durch die Verbesserung der Logistik wird von /Steierwald, u. a., 1989/ nicht angegeben. Die durchschnittlichen, durch den Kraftstoffeinsatz verursachten direkten und indirekten CO₂-Emissionen sind im Schienengüterverkehr erheblich günstiger als im Straßengüterfernverkehr (Straße: 207 g je Tonnenkilometer (tkm), Schiene: 41 g/tkm /Waldeyer, u. a., 1989/). /Steierwald, u. a., 1989/ sehen ein wesentliches Verlagerungspotential im Straßengüterfernverkehr. Dieser hatte 1987 einen Anteil von 47 % am gesamten Straßengüterverkehr. Würde diese Verkehrsleistung vollständig durch den Schienenverkehr erbracht, so ließen sich die CO₂-Emissionen um rund 11 Mio. t reduzieren. Das tatsächliche Potential dürfte u. a. wegen der notwendigen Vor- und Rückläufe mit Lkws wesentlich geringer sein. So würde die Substitution der gleichen Transportleistung durch Huckepackverkehr mit Vor- und Rücklauf nach /Steierwald, u. a., 1989/ nur zu einer Reduktion von 1 Mio. t CO₂ führen. Über mögliche Potentiale der Verlagerung von Transportleistungen im Bereich des Wagenladungs- und Ganzzugverkehrs können keine Angaben gemacht werden.

Der Luftverkehr spielt im Zusammenhang mit der Klimaproblematik eine gesonderte Rolle. Obwohl die Gesamtemissionen an Schadstoffen im Vergleich zum Straßenverkehr einen geringen Anteil haben, erhalten sie durch die Emission in großen Höhen eine besondere Bedeutung. Die Wirkung der Schadstoffe - vor allem auch des in Bodenhöhe unproblematischen Wasserdampfs - auf das Klima bedürfen noch der Klärung. In Zukunft ist im internationalen Luftverkehr mit einer

erheblichen Steigerung des Verkehrsaufkommens zu rechnen. Erhebliche Einsparpotentiale ergeben sich innerhalb Europas aus der großen Anzahl von zusätzlichen Flugstunden, die wegen nichteinheitlicher Flugsicherung und ungünstiger Luftstraßenführung unnötigerweise geflogen werden. Durch die Einführung von strengen Abgas-Vorschriften für Flugzeuge, die bundesdeutsche Flughäfen anfliegen, könnte eine schnelle Einführung moderner schadstoffärmerer Flugzeugmuster gefördert werden. Allerdings hat dies nur dann einen globalen Minderungseffekt, wenn alte Flugzeuge nicht - wie es heute die Praxis ist - von anderen Fluggesellschaften gekauft und weiter genutzt werden.

Die Ausnutzung des CO₂-Minderungspotentials durch verkehrliche Maßnahmen erfordert Aktivitäten in vielen Bereichen und ihre Wirkung wird durch lokale Randbedingungen bestimmt. Viele dieser Maßnahmen zeigen für sich alleine betrachtet nur kleine Minderungspotentiale, die Angabe eines Gesamtpotentials der CO₂-Minderung durch verkehrliche Maßnahmen ist den Studien des Studienkomplexes A.5 nicht zu entnehmen. Wesentliche Angebotserweiterungen im öffentlichen Verkehr sind mit langen Realisationszeiten verbunden, so daß die Maßnahme erst langfristig wirksam werden könnte. Kurzfristig könnte eine Vergünstigung der Preise des ÖV gegenüber denen des Individualverkehrs (IV) einen entscheidenden Beitrag zur Umsetzung des Verlagerungspotentials von Verkehrsleistungen des IV auf den öffentlichen Verkehr leisten.

2.3 Speichertechniken, Wasserstoff

Speichertechniken

Energiespeicher können das CO₂-Reduktionspotential durch die Verwendung größerer Anteile nichtfossiler Energie erhöhen. Deshalb wird die Speicherung nichtelektrischer Energie und die Speicherung elektrischer Energie in einem eigenen Studienschwerpunkt untersucht.

Zur Speicherung von nichtelektrischer Energie werden
 - Wärmespeicher unterschiedlicher Temperaturbereiche und
 - thermochemische Energiespeicher
 detailliert betrachtet.

Als Wärmespeicher werden nur solche Speicher verstanden, bei denen sowohl die eingespeiste, die gespeicherte als auch die abgegebene Energie Wärme ist.

Nicht berücksichtigt werden aufgrund dieser Definition die zur Raumheizung verwendeten elektrisch aufgeheizten Feststoffspeicher und elektrisch beheizte Warmwasserspeicher.

Niedertemperaturwärmespeicher mit Temperaturen unter 100 °C dienen in Solarkollektor- und Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen zur kurzzeitigen und saisonalen Speicherung. Wasserspeicher zur Kurzzeit-Wärmespeicherung (d. h. bis etwa 24 h) sind technisch fertig entwickelt. Ihre spezifischen Kosten liegen zwischen 550 DM/m³ (150 m³-druckloser Stahlbehälter) und 3750 DM/m³ Speichervolumen (500 l Brauchwasserspeicher).

Niedertemperaturlangzeitspeicher befinden sich noch in der Entwicklung. Die in Schweden verwendete Technik von bergmännisch erstellten Kavernen in Granit (z. B. Lyckebo-Speicher mit 100 000 m³), bei der der Granit als Wärmedämmung fungiert, sind aus geologischen Gründen in der Bundesrepublik nicht anwendbar. Hier werden Erdbeckenspeicher untersucht und zu Testzwecken betrieben. (Beispielsweise wird der 1053 m³ Speicher der Universität Stuttgart im Sommer mit Solarwärme aufgeladen und im Winter über eine Wärmepumpe entladen).

Mitteltemperaturspeicher von etwa 100 °C bis etwa 500 °C Speichertemperatur finden in der bisherigen Energieversorgung

wenig Verwendung; gelegentlich werden sie zur kurzfristigen Abwärmenutzung bei industriellen Prozessen eingesetzt. Da Dampf bei Prozeßwärmanlagen der vorherrschende Wärmeträger ist, handelt es sich meist um Dampfspeicher.

Solarthermische Kraftwerke benötigen einen Wärmespeicher um ein von den Änderungen der Sonneneinstrahlung unabhängiges Energieangebot zur Verfügung zu stellen. Es sind bisher nur Kurzzeitspeicher (d. h. für mehrere Stunden) realisiert worden. Für Temperaturen bis 300 °C ist Mineralöl das kostengünstigste Speichermedium, bis etwa 400 °C können noch synthetische Öle und Silikonöle verwendet werden.

Latentwärmespeicher, die den theoretischen Vorteil hoher Speicherdichte und konstanter Arbeitstemperatur aufweisen, sind praktisch noch nicht einsatzreif.

Hochtemperaturspeicher, etwa 500 °C bis etwa 1300 °C, sind aus keramischem Material ausgeführt, beispielsweise MgO, Al₂O₃, SiO₂. Als "Winderhitzer" in der Stahlindustrie sind sie Stand der Technik.

Forschungsarbeiten verfolgen die Entwicklung kleinerer Speicher infolge höherer Speicherdichte durch Verwendung von Keramik-Salz-Gemischen.

Wärme kann auch dadurch gespeichert werden, daß sie zur Durchführung einer chemischen Reaktion eingesetzt wird: Die Reaktionsprodukte werden gespeichert, in der Rückreaktion wird die Wärme wieder abgegeben. Die Vorteile dieser thermochemischen Speicher sind höhere Energiedichten gegenüber Wärmespeichern auf Wasser- oder Ölbasis und kein Energieverlust während des Lagerns.

Praktisch untersucht werden Metallhydridspeicher, bei denen sich durch Wärmezufuhr das Medium in Metall und Wasserstoff zerlegt und bei der Umkehrreaktion wieder Wärme abgibt. Weitere Speichermedien sind Zeolithe und Aluminium. Zeolithe sind Alumo-Silikate, die eine kristalline Struktur mit Mikroporen aufweisen. Zeolithe können deshalb Wasser aufnehmen, welches durch Wärmezufuhr wieder ausgetrieben werden kann. Mit dem System Al/O₂ kann ein wärmeabgebender Energiespeicher erstellt werden. Da für den Ladevorgang, der elektrolytischen Reduktion

von Al_2O_3 zu Al, elektrische Energie gebraucht wird, handelt es sich um einen gemischt elektrisch/thermischen Speicher.

Da thermochemische Speicher komplex sind und die Speichermaterialkosten teilweise hoch sind, gibt es bisher nur wenige Prototypanlagen und noch keine kommerzielle Anwendung.

Ein CO_2 -Minderungspotential für Wärmespeicher kann nur in Abhängigkeit von der Einsatzart und der jeweiligen Zahl der Systeme, in die sie integriert werden, ermittelt werden. Dies ist nicht Gegenstand dieses Studienpaketes, es werden jedoch einige Beispiele - anlagenbezogen - genannt: Durch Einsatz eines Wärmespeichers in einem solar unterstützten Nahwärmenetz kann der Deckungsanteil von 23 % bei kleinen Speichern auf 45 % bei kostenoptimalem Speichervolumina gesteigert werden. Vergleichbares gilt für den Einfluß eines Wärmespeichers einer Kollektoranlage zur Warmwasserbereitung. Geeignete Speicherauslegung lassen den solaren Deckungsanteil von 25 % auf 60 % steigen.

Im Studienkomplex A 2 /Nast/ wird ein durch Solarkollektoren und solare Nahwärmesysteme erschließbares technisches CO_2 -Minderungspotential von ca. 59 Mio t CO_2 /a genannt. Die dort untersuchten solaren Warmwasserbereitungssysteme, die Heizungs- und Prozeßwärmesysteme sowie die solaren Nahwärmesysteme sind mit Speicher unterschiedlicher Größe (z. B. $0,4 \text{ m}^3$ bei Warmwasserbereitung, 150 m^3 für Prozeßwärmebereitung und $27\,000 \text{ m}^3$ für solare Nahwärme) ausgestattet. Das jeweils berücksichtigte Speichervolumina wird aus der Kostenminimierung für das jeweilige Einzelsystem errechnet.

Welcher Anteil der CO_2 -Minderung durch die berücksichtigten Speicher zustande kommt und welche zusätzlichen CO_2 -Minderungen durch vergrößerte Speichervolumina möglich sind, geht aus A 2 nicht hervor. Hier besteht weiterer Untersuchungsbedarf.

Anzumerken ist, daß die derzeit weltweit größten Solarkraftwerke in Kalifornien zum Teil mit Thermoölspeichern und zum Teil ohne Speicher betrieben werden. Dieser Verzicht kommt daher, daß ein Wärmespeicher zwar technisch sinnvoll zur Erhöhung der Stromlieferungen eingesetzt werden könnte, daß derzeit dieses Ziel aber mit Gasfeuerung billiger erreichbar ist.

Das über Speicher für industrielle Prozeßabwärme erreichbare CO₂-Minderungspotential wird auf 1,1 Mio t CO₂/a geschätzt. Dabei wird die Annahme gemacht, daß die in Prozeßwärmeanlagen anfallende Abwärme bei der Glaserzeugung, bei der Zellstoff-, Papier- und Pappherstellung, bei der Zementherstellung und in der chemischen Industrie in ein Fernwärmenetz eingekoppelt wird und fossile Brennstoffe ersetzt.

Als Speicher für elektrische Energie werden

- elektrochemische Speicher (Batterien),
- Pumpkraftwerke,
- Schwungradspeicher,
- Druckluftspeicher und
- supraleitende Magnetfeldspeicher

untersucht.

Die möglichen Einsatzbereiche von Speichern elektrischer Energie sind

- die Sekundenreserve in Verbundnetzen (Frequenz/Wirkleistungsregelung),
- in Kleinversorgungssystemen zum Ausgleich von tageszeitlichen Schwankungen von Erzeugung und Verbrauch,
- der Ausgleich tageszeitlicher Schwankungen von Erzeugung und Verbrauch im Verbundnetz,
- Antrieb von Fahrzeugen.

Stand der Technik bei elektrochemischen Speichern sind die Blei-, Ni/Cd- und Ni/Fe-Batterie. Trotzdem besteht im Detail noch Entwicklungsbedarf im Sinne von Systemoptimierungen. Dies gilt insbesondere für den Einsatz in Photovoltaikanlagen mit relativ niedrigen Lade- und Entladeleistungen. Bei der Na/S-Batterie steht die Entwicklung eines Modells, das eine serienreife Lebensdauer aufweist, im Vordergrund der Arbeiten. Pumpspeicherkraftwerke sind Stand der Technik. Allein in der Bundesrepublik Deutschland sind Speicherkraftwerke mit einer gesamten Bruttoengpaßleistung von 2,55 GW_e installiert.

Schwungradspeicher speichern Energie in Form von kinetischer Energie. Der speicherbare Energiebetrag ist proportional dem Massenträgheitsmoment und dem Quadrat der Geschwindigkeit. Daraus resultiert, daß der spezifischen Speicherkapazität

mechanische Grenzen gesetzt sind. Schwungradspeicher haben sich bis heute keinen wesentlichen Einsatz in der Energiewirtschaft erschließen können. Die Anwendungen sind nicht über das Versuchsstadium, hier insbesondere als Kurzzeitspeicher bei Fusionsanlagen, hinausgekommen. Ein Entwicklungspotential zu höheren Energiedichten hin besteht noch durch den Einsatz glasfaserverstärkter Werkstoffe.

Bisher existiert weltweit nur eine einziges Druckluftspeicherkraftwerk, das 1977 in Betrieb genommene Kraftwerk Huntorf in Niedersachsen.

Da die supraleitenden Magnetfeldspeicher bisher nur in wenigen Versuchsexemplaren gebaut wurden, ist der Entwicklungsbedarf noch sehr groß. Konkrete Einsatzpläne sind noch nicht erstellbar.

Die Einsatzbereiche der elektrischen Energiespeicher konzentrieren sich gegenwärtig auf den Einsatz in Kleinversorgungssystemen und auf den Antriebsbereich. Die Sekundenreserve im Verbundnetz wird dagegen - mit Ausnahme des Inselnetzes Berlin - durch angedrosselte Wärmekraftwerke sichergestellt. Für die bisher am Netz befindlichen Photovoltaik- und Windenergieanlagen ist eine Speicherung nicht erforderlich. Welcher Anteil der Stromerzeugung durch Photovoltaik- und Windenergieanlagen bei unveränderter Versorgungs- und Nachfragestruktur ohne Speicherung ins Verbundnetz gespeist werden kann, ist offen. Die Untersuchungen im Studienkomplex A 5 geben keine Zahl an. Im Studienkomplex A 2 /Koordinatorenbericht/ werden sowohl 15 % - 17 % Anteil genannt, der sich bei "intelligentem" Lastmanagement im Bereich der privaten Haushalte noch vergrößern ließe. Es werden aber auch alleine für die Windenergie 10 % bis 40 % Anteil an der Stromerzeugung genannt. Hier besteht noch weiterer Untersuchungsbedarf.

Wichtig ist, darauf hinzuweisen, daß die im Studienkomplex A 2 angegebenen Potentiale für Photovoltaik- und Windenergieanlagen eine zusätzliche Speicherung außer Betracht lassen.

Im Studienkomplex A 5 wird eine Größenordnung für das CO₂-Minderungspotential durch Speicher beispielhaft genannt: Unter der Annahme, daß beispielsweise 5 % der heutigen jährlichen Nettostromerzeugung durch dezentrale Photovoltaikanlagen mit 2-

Tagesspeichern gedeckt werden, wobei die Hälfte dieser Erzeugung den Speichern zuzurechnen ist, beträgt die Stromerzeugung rund 19 TWh/a. Gerechnet gegen eine alternative Stromerzeugung aus Braunkohle beträgt das speicherbedingte CO₂-Reduktionspotential rund 10,9 Mio t CO₂/a. Die Kosten der durch die Speicherung ermöglichten Erzeugung betragen etwa 55 DPf/kWh.

Wasserstoff

Wasserstoff als Sekundärenergieträger ist im strengen Sinne des Wortes kein Energiespeicher. Zweck der Einführung von Wasserstoff in die Energiewirtschaft ist jedoch die verbesserte Speicher- und Transportfähigkeit von Primärenergie. Vor diesem Hintergrund wird die Erzeugung, der Transport, die Speicherung und die Nutzung von Wasserstoff in diesem Studienpaket mituntersucht.

Da auf absehbare Zeit nur die Wasserelektrolyse eine großtechnische Erzeugung nichtfossilen Wasserstoffs zuläßt, interessiert vor allem die Frage der Verknüpfung von Elektrolyseanlagen mit nichtfossilen Kraftwerken. Die Einkopplung von Elektrizität aus Kraftwerken mit gesicherter stetiger Stromproduktion (Wasserkraftwerke oder Kernkraftwerke mit Vollastbetrieb) ist technisch unproblematisch. Auch ein tageszyklischer Betrieb mit überwiegend stetigem Leistungsverlauf (Schwachlastbetrieb von Kernkraftwerken, solarthermisches Kraftwerk mit Speicher) läßt keine besonderen Probleme erwarten.

Entwicklungsarbeit muß jedoch noch hinsichtlich des kurzzeitig intermittierenden Betriebs von Elektrolyseanlagen, wie er bei Verschaltung mit Windenergiekonvertern und Photovoltaikanlagen, üblich ist, geleistet werden.

Der Transport und die Speicherung von Wasserstoff werfen zwar grundsätzlich keine neuen technischen Probleme auf. Erfahrungen im Umgang mit so großen Wasserstoffmengen, wie sie benötigt würden, sind jedoch weltweit nicht vorhanden.

Die wichtigste Nutzung von Wasserstoff liegt im Wärmemarkt. Neben der bereits technisch verwirklichtten Flammverbrennung ist die schadstofffreie Katalyse besonders interessant, befindet

sich aber noch in der Entwicklung. Die Verstromung von Wasserstoff kann neben der konventionellen Verbrennung in Kondensationskraftwerken und in Blockheizkraftwerken auch über Brennstoffzellen erfolgen. Letztere haben noch einen beträchtlichen Entwicklungsbedarf.

Reine Spitzenlasterzeugung mittels Wasserstoff kann durch Wasserstoff-Luft-Gasturbinen, Brennstoffzellen und mit Wasserstoff/Sauerstoff-Dampferzeugern erfolgen. Letztere sind technisch soweit fortgeschritten, daß ihr Einsatz zur Momentanreserve in Erwägung gezogen wird.

Wasserstoff kann insbesondere als Kraftstoff genutzt werden. Neben Sicherheitsaspekten und Fragen der Verteilungsinfrastruktur ist die Speicherung die entscheidende technische Frage. Versuchsweise finden sich sowohl Fahrzeuge mit Hydridspeichern als auch mit Flüssigspeicherung im Einsatz.

Potentiale können für Wasserstoff als "Sekundärenergieträger" nicht sinnvoll angegeben werden. Naturgemäß sind sie von der Einsatzintensität der eingesetzten Primärenergieträger abhängig. Für regenerative Energiequellen werden diese Potentiale im Studienkomplex A 2, für Kernenergie im Studienkomplex A 4 behandelt.

Die Kosten einer CO₂-Vermeidung bei Einsatz von Elektrolysewasserstoff lassen sich nur als Funktion der Stromgestehungskosten angeben. Die spezifischen Mehrkosten der CO₂-Vermeidung bei Einsatz von Elektrolysewasserstoff zur Wärmeerzeugung betragen beim Stand der Elektrolyse im Jahr 1989 (1000 DM/kW_e, $\eta = 65 \%$) zwischen 262 DM/t CO₂ bei 5 DPf/kWh Stromkosten und 6000 h/a Auslastung der Elektrolyse und 1204 DM/t CO₂ bei 20 DPf/kWh Stromkosten und 2000 h/a Auslastung. Durch erwartete Fortschritte in der Elektrolysetechnik (800 DM/kW_e, $\eta = 71 \%$) reduzieren sich diese Zahlen für das Jahr 2005 auf 158 DM/t CO₂ und 970 DM/t CO₂.

2.4 Neue Sekundärenergieträger und Nutzungssysteme

In diesem Studienpaket wurde zum einen die Herstellung von Wasserstoff und Methanol aus verschiedenen fossilen Ausgangsenergieträgern bei Anwendung unterschiedlicher Herstellverfahren untersucht. Zum anderen wurden ergänzende Systeme zur Fernwärmeversorgung betrachtet wie

- "kalte Fernwärme", d. h. Nutzung von Niedertemperaturwärme (etwa 60 °C) aus Kühltürmen, Industrieanlagen mit Hilfe von Wärmepumpen,
- "mobile Fernwärme", d. h. Transport von Wasser geeigneter Temperaturen zu Fernwärmenetzen hin mit Eisenbahn, Schiff und Lkw,
- Wärmetransport mit Salz-Ammoniak-Gemischen und
- nukleare Fernenergie, d. h. Gasspaltung mit Hilfe von Hochtemperaturreaktoren, Transport der Gase zu Fernwärmenetzen und Einbringen der nuklearen Energie durch Gassynthese ("Adam-Eva-Prinzip").

Wasserstoff kann grundsätzlich aus allen fossilen Energieträgern und verfügbaren Kohlenwasserstoffen hergestellt werden. In das Erzeugungsverfahren geht jeweils das Wasserstoff zu Kohlenstoffverhältnis (H/C-Verhältnis) des Ausgangsrohstoffes als wichtiges Kriterium ein. Tabelle 2.1 enthält eine Übersicht über die Wasserstoffherstellungsverfahren und ihre Eignung für verschiedene Ausgangsenergieträger.

Die angegebenen H/C-Verhältnisse sind typische Richtwerte, in der Praxis können sie je nach Vorkommen des Energieträgers oder der Herkunft des Beiprodukts erheblich differieren. Auch muß je nach Grundverfahren der Sauerstoffgehalt des Ausgangsrohstoffs noch berücksichtigt werden. Die drei angegebenen Grundverfahren sind in der Praxis in weitere Verfahrensvarianten umgesetzt, die zum Teil auch einzelne Verfahrensschritte aus Dampfreforming- und Partialoxidationsverfahren enthalten. Vor dem Hintergrund von Wasserstoff als Energieträger, d. h. in großen Mengen, sind nur die Primärenergieträger Öl, Gas und Kohle hier von Bedeutung: Beiprodukte als Ausgangsstoff scheiden wegen der geringen Menge aus, regenerative Energie-

träger sind nicht Gegenstand dieses Studienpaketes; ebenso wie die Wasserstoffherzeugung mit Hilfe von Kernenergiestrom.

Tab. 2.1: Mögliche Ausgangsrohstoffe zur Wasserstoffherstellung, ihr Wasserstoff zu Kohlenstoff-Verhältnis (H/C) und Eignung der drei Hauptverfahren /aus: A 5.2.b (2)/ (xx = sehr gut geeignet, x = gut geeignet, o = nicht geeignet)

	1)	H/C	DR	PO	Py
Erdgas	ET	4	xx	x	x
Abgas	BP	3-5	x	x	x
LPG	BP	2,6	xx	x	xx
Erdöl	ET	2,5	0	0	0
Naphthz	BP	2,3	xx	x	xx
Ölschiefer	ET	2,0	-	0	0
Biomasse	RT	1,5 2,0	-	x	x
Schweröl	ET	1,5	0	0	0
Gasöl	BP	1,5	0	x	x
Teersand	ET	1,4	-	0	0
Rückstandsöl	BP	1,3	0	xx	0
Torf	(ET/RT)	1,2	-	x	x
BK	ET	0,9	-	x	x
SK	ET	0,8	-	xx	x
Koks	BP	0,6	-	x	-

1) ET Energieträger, BP Beiprodukt, RT Regenerativer Rohstoff, DR Dampfreformierung, PO Partialoxidation, Py Pyrolyse

Wasserstoffherzeugung aus fossilen Energieträgern, insbesondere aus Erdgas ist Stand der Technik. Wasserstoff ist ein wichtiger Grundstoff für die Synthese von chemischen Verbindungen und bei Reduktionsprozessen z. B. in der Metallurgie. Er wird auch bei der Verarbeitung von Mineralöl eingesetzt. Derzeit werden in der Bundesrepublik Deutschland etwa 16 Mrd Nm³ pro Jahr verbraucht, weltweit sind es 350 Mrd Nm³ pro Jahr.

Diese Wasserstoffmengen bedeuten energetisch rund 6 Mio t SKE/a bzw. 130 Mio t SKE/a. Wasserstoff als Energieträger hätte somit eine erhebliche Steigerung der Produktionskapazitäten zur Voraussetzung. Nur wenige Prozent der industriell verwendeten Wasserstoffmengen werden mit Hilfe von Strom über Elektrolyse erzeugt; nur dort wo hochreiner Wasserstoff (z. B. in der Herstellung von elektronischen Schaltungen) erforderlich ist. Aus Kostengründen bedient man sich ansonsten der fossilen Herstellung - ebenfalls aus Kostengründen wurde Wasserstoff bisher noch nicht in nennenswerten Mengen energiewirtschaftlich verwendet.

Fossil erzeugter Wasserstoff ist nur am Ort der Verwendung CO₂ frei.

Tab. 2.2: Kosten der Vermeidung der CO₂-Emissionen beim Endnutzer und zur Deposition anfallende CO₂-Menge /aus A 5.2.b (2)/

Technologie	CO ₂ -Vermeidung kg/GJ	CO ₂ -Depot kg/GJ	Mehrkosten in DM pro t CO ₂ -Vermeidung	
			1987	2005
Erdgas-Reformierung	56	76	102	115
Partielle Oxidation	78	126	135	158
Texaco Steinkohle- Vergasung	92	173	220	227
Koppers/Totzek- Steinkohle-Vergasung	12	187	262	271
Winkler Braunkohle- Vergasung	111	202	162	162
Erdgas-Cracking	57	23	151	182
Kohle-Cracking	92	55	652	690

Insgesamt gesehen, entsteht über den Wasserstoffweg mehr CO_2 als bei direkter Verbrennung der Ausgangsenergieträger. Dafür entsteht das CO_2 aber "konzentriert" am Ort der Wasserstoff-erzeugung. Die Verfahren haben aus reiner CO_2 Sicht nur dann einen Sinn, wenn CO_2 deponiert werden kann, d. h. anstelle vieler dezentraler CO_2 -Quellen (z. B. Hausheizungen) nur wenige zentrale CO_2 -Quellen (Wasserstoff-Herstellverfahren) mit zudem höheren CO_2 -Konzentrationen im Abgas entsorgt werden müssen.

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung weist Wasserstofferzeugungskosten für das Jahr 1987 von etwa 4,5 DPf/kWh bis 12,5 DPf/kWh aus, je nach Verfahren. Entsprechende Werte für das Jahr 2005 lauten etwa 5,5 DPf/kWh bis 13 DPf/kWh. (Zum Vergleich: Erdgas/Industrie 2,7 DPf/kWh bzw. 5 DPf/kWh).

Tabelle 2.2 zeigt die Menge an CO_2 , die vermieden wird, und die Menge an CO_2 , die deponiert werden müßte. Gerechnet wurde unter der Voraussetzung, daß eine Energieeinheit Wasserstoff eine Energieeinheit des zur Wasserstofferzeugung eingesetzten Primärkohlenwasserstoffs substituiert. Mit Ausnahme der Crackingverfahren muß wesentlich mehr CO_2 deponiert werden als vermieden wird. Bei allen Technologien entstehen bei diesem gedachten Substitutionsprozeß Mehrkosten zur CO_2 -Vermeidung. Die Kosten in Tabelle 2.2 gelten im Geldwert 1987 und mit den im Analyseraster festgelegten Preissteigerungsraten. Diese Kosten beinhalten nur die Substitution. Hinzu kommen noch die Kosten für die Entsorgung des am Ort der Wasserstofferzeugung anfallenden Kohlendioxids.

Ebenso wie (gasförmiger) Wasserstoff läßt sich auch Methanol als flüssiger Energieträger aus Erdöl, Erdgas und Kohle herstellen. Im Gegensatz zu Wasserstoff entsteht jedoch auch bei der Verbrennung von Methanol CO_2 . Vor dem Hintergrund der Annahme von Deponierungsmöglichkeiten für CO_2 ist die Frage wichtig, wie das Verhältnis der dezentral anfallenden Emissionen bei der Methanolverbrennung (Stufe I) und der

zentral und damit für eine Abscheidung zur Deponierung besser geeigneten Emissionen bei der Methanolherstellung ist (Stufe II). Diese CO₂-Emissionen müssen jeweils ins Verhältnis gesetzt werden zu denen bei der direkten dezentralen Verbrennung von Heizölen und Benzin zur Raumwärme- und Prozeßwärmebereitstellung sowie zur Verbrennung von Benzin und Diesel als Kraftstoffe für Fahrzeuge.

Aus der Tabelle 2.3 und den Ausführungen in Kapitel 2.1 geht hervor, daß mit Ausnahme der Methanolerzeugung aus Erdgas in allen Fällen insgesamt (Stufe I plus Stufe II) nennenswert höhere CO₂-Emissionen pro genutzter Energieeinheit entstehen. Bei der Methanolerzeugung aus Erdgas sind die Gesamtemissionen nur geringfügig geringer. In allen drei Anwendungsbereichen Raumwärme, Prozeßwärme und Verkehr ist jedoch der dezentral anfallende CO₂-Emissionsanteil (Stufe I) bei Methanolverwendung um etwa 20 % niedriger als bei der direkten Verwendung von Mineralölprodukten.

Methanol - erzeugt aus fossilen Energieträgern - trägt somit zur "Konzentrierung" der CO₂-Emissionen bei, führt jedoch nur dann zu einer nennenswerten Emissionsminderung, wenn eine CO₂-Deponierung möglich ist.

Tab. 2.3: Energieaufwand zur Bereitstellung einer kWh Raumwärme und Prozeßwärme und spezifische CO₂-Emission /aus A 5.2 c) (Stufe I: beim Verbraucher, Stufe II: Herstellung der Energieträger)

	Raumwärme				Prozeßwärme			
	Heizöl t		Methanol		Heizöl S		Methanol	
	kWh	kg CO ₂ kWh	kWh	kg CO ₂ kWh	kWh	kg CO ₂ kWh	kWh	kg CO ₂ kWh
Stufe I	1,18	0,33	1,18	0,295	1,11	0,333	1,1	0,275
Stufe II	0,06	0,016	Erdgas 0,64 Öl (HS) 0,93 Steinkohle 1,23 Braunkohle 1,23	0,061 0,342 0,502 0,668	0,06	0,015	Erdgas 0,59 Öl (HS) 0,87 Steinkohle 1,14 Braunkohle 1,14	0,0572 0,319 0,468 0,623
Gesamt	1,24	0,346	Erdgas 1,82 Öl (HS) 2,11 Steinkohle 2,41 Braunkohle 2,41	0,356 0,637 0,797 0,963	1,17	0,348	Erdgas 1,69 Öl (HS) 1,97 Steinkohle 2,24 Braunkohle 2,24	0,332 0,594 0,743 0,898

Die Herstellung von Methanol ist Stand der Technik. Die Verwendung von Methanol in Kraftfahrzeugen wurde in Flottenversuchen erprobt, die Verbrennung zur Wärmeerzeugung ist technisch möglich. Jedoch ist insbesondere bei der letzten Anwendungsart noch Entwicklungsarbeit zur Optimierung der Systeme zu leisten, so daß ggf. noch einige Jahre Vorleistung bis zur Markteinführung erforderlich sind. Aus Kostengründen hat sich Methanol als Treibstoff in Europa bisher nicht durchgesetzt.

Die betrachteten zu Beginn dieses Kapitels erwähnten ergänzenden Systeme zur Fernwärme reduzieren die dezentral anfallenden Emissionen beim Endverbraucher auf Null. Sie reduzieren auch die zentral anfallenden Emissionen gegenüber der klassischen Fernwärmeversorgung, weil bisher nicht genutzte niedertemperaturige Abwärmequellen (z. B. Kühltürme) genutzt werden können. Im Falle der nuklearen Fernenergie ist die CO₂-Gesamtemission Null, wenn man von den indirekten Emissionen durch den Bau der Anlagen absieht.

Kalte Fernwärme erfordert aber - wenn die Vorteile hinsichtlich der Emissionsminderung nicht durch den Wärmepumpenbetrieb aufgehoben werden soll - eine Reduzierung des Wärmebedarfs der Gebäude (z. B. durch Wärmedämmung). Hier liegt das eigentliche CO₂-Minderungspotential.

Technisch realisiert sind die betrachteten ergänzenden Systeme der Fernwärme sowie die Verwendung von Aluminium als metallischer Brennstoff bisher nicht. Für die kalte Fernwärmeversorgung wurden Planstudien durchgeführt, für die mobile Fernwärmeversorgung wurden Transportfahrzeuge entwickelt, die nukleare Fernenergie wurde ebenfalls in der Vergangenheit in ihren wichtigsten Komponenten im Prototypmaßstab erprobt. Die Nutzung von Aluminium als metallischer Energieträger ist Gegenstand von Forschungsarbeiten.

Das technische CO₂-Minderungspotential der in diesem Studienpaket betrachteten Techniken ergibt sich bei Wasserstoff und

Methanol aus den Substitutionsmöglichkeiten. Technisch könnte mit Wasserstoff und Methanol der gesamte Endenergieeinsatz von Mineralölprodukten und Erdgas abgedeckt werden. Das so ermittelte technische CO₂-Minderungspotential ist jedoch wenig aussagefähig.

Die Einführung der betrachteten ergänzenden Systeme der Fernwärme bestimmt das Maß der möglichen technischen CO₂-Minderung. Da es nicht Aufgabe des Studienpaketes war, konsistente Energieszenarien zu erarbeiten, und keine Markteinführungsuntersuchungen vorliegen, ist die Angabe eines technischen Potentials für die ergänzenden Systeme der Fernwärme nicht möglich.

2.5 CO₂-Entsorgungstechniken

Entschließt man sich weltweit - oder ist es aus irgendeinem Grunde unvermeidlich - fossile Brennstoffe in Zukunft weiterhin in großem Maßstab für die globale Energieversorgung einzusetzen, so kann dies in einem klimaverträglichen Sinn nur dann erfolgen, wenn das entstehende Kohlendioxid weitgehendst aus den entsprechenden Prozessen abgetrennt und außerhalb der Erdatmosphäre endgelagert wird. Im Rahmen des Studienkomplexes A.5 werden die folgenden Möglichkeiten der CO₂-Abtrennung und -Entsorgung untersucht /Seifritz, 1989/: Bindung von bereits in der Atmosphäre befindlichem CO₂ durch große Aufforstungsprogramme oder durch eine großmaßstäblich durchzuführende Atmosphärenwäsche. Verhinderung der Freisetzung von CO₂ aus fossil befeuerten Großfeuerungsanlagen durch Rauchgaswäschen, die Verbrennung mit reinem Sauerstoff, die Kohlenstoffabspaltung bei fossilen Brennstoffen vor deren Verbrennung sowie die Erzeugung von Synthesegas und Abtrennung des CO₂ vor der Verbrennung. Als Inventarisierungsmöglichkeiten von abgetrenntem CO₂ werden im Rahmen des Studienkomplexes A.5 betrachtet: die Verwendungsmöglichkeiten in der Chemie und Technik, die Bindung an Festkörper zu einem endlagerfähigen Material, die Deponierung im Weltall, im Meer und in leeren Erdgasfeldern sowie anderen natürlichen und künstlichen Hohlräumen.

Möglichkeiten der Entsorgung von Kohlendioxid

Bei den Rückholtechniken aus der Atmosphäre unterscheidet man zwei Ansätze: die natürliche Photosynthese durch Aufforstung mit anschließender Endlagerung der erzeugten Biomasse sowie die künstliche Photosynthese durch eine technische Atmosphärenwäsche, bei der das CO₂ aus der Atmosphäre abgetrennt und anschließend endgelagert oder in einen neuen Kohlenwasserstoff-Brennstoff umgewandelt wird. Im ersten Fall sind sehr große Landflächen nötig, im zweiten Fall sehr große Mengen an CO₂-freier Fremdenergie. Die Rezyklierung des abgetrennten CO₂ in Form eines wasserstoffangereicherten Kohlenwasserstoffs ist im allgemeinen ein endothermer Prozeß und bringt keine CO₂-Reduktion in der Atmosphäre, solange große Mengen fossiler Brennstoffe auf die bisherige Art genutzt werden. Eine Rückho-

lung des CO_2 aus dem verdünnten atmosphärischen Zustand stellt somit keinen sinnvoll nutzbaren Weg dar, da entweder riesige Flächen oder große Fremdenergiemengen eingesetzt werden müssen.

Die Bindung des abgetrennten CO_2 an einen Feststoff zur Bildung eines festen Endlagergutes scheidet aus energetischen Gründen aus: der Energieaufwand ist im allgemeinen höher als der Heizwert des Energieträgers, aus dem das CO_2 entstanden ist, so daß diese Art der Endlagerung ein endothermer Prozeß darstellen würde. In diesem Zusammenhang wurden sowohl anorganische als auch organische feste Substanzen untersucht, wie Soda, Ammoniumhydrogenkarbonat, Harnstoff, Oxal- und Ameisensäure, Amine usw. Es ergibt sich, daß lediglich ein Prozeß in der Natur geeignet erscheint, das CO_2 exotherm binden zu können: die Nachahmung der natürlichen Silikatverwitterung. Dabei wird das CO_2 in wasserlösliches Hydrogenkarbonat umgewandelt, das im Meer entsorgt werden könnte. Der Nachteil dieses Verfahrens ist die langsame Kinetik der Umwandlung und es muß betont werden, daß diese Methode zunächst nur als Konzeptidee aufzufassen ist.

Auch die Inventarisierung von CO_2 in Form nützlicher Gebrauchsgüter des Alltags (z. B. Getränkeindustrie, Kühlsysteme, Feuerlöscher, Dünger, tertiäre Ölgewinnung, Pipelinetransport von Kohlenstaub in flüssigem CO_2 , Arzneimittel usw.) kann aufgrund der relativ geringen Potentiale gegenüber den großen Mengen an zu entsorgendem CO_2 nicht als großtechnische Möglichkeit zur CO_2 -Entsorgung betrachtet werden.

Die pyrolytische Abtrennung des Kohlenstoffs aus Kohle und Kohlenwasserstoffen in Form von Ruß (der sogenannte HYDROCARB-Prozeß) und dessen Endlagerung erscheint nicht sinnvoll, weil dadurch zuviel Energie in Form des energetisch nicht genutzten Kohlenstoffs verloren geht. Im Falle der Kohle ($\text{CH}_{0,8}$) können beispielsweise nur noch ca. 18 % des Energieinhaltes genutzt werden und im Falle des wasserstoffreichen Methans (CH_4) sind es knapp 50 %.

Alle sonstigen Verfahren der CO_2 -Entsorgung, die auf der Separierung des CO_2 in Energiewandlungsanlagen beruhen und die später noch

zu diskutieren sind, sind auf eine klimaverträgliche Endlagerung (Deponierung) des CO_2 angewiesen. Deshalb sollen zunächst die Endlagermöglichkeiten von CO_2 beschrieben werden. Prinzipiell existieren nur drei Möglichkeiten, um CO_2 in großem Umfang endzulagern. In der Reihenfolge steigenden Energieaufwandes (für die Endlagerung) sind dies:

1. Das Zurückpumpen von gasförmigem CO_2 in leere Erdgasfelder (Aufwand: ca. 26,4 $\text{kWh}_{0,1}/\text{t CO}_2$);
2. Das Verpressen von flüssigem CO_2 in Küstennähe im Meer (Aufwand: ca. 106 $\text{kWh}_{0,1}/\text{t CO}_2$);
3. Die Meeresversenkung von festem CO_2 -Eis auf hoher See (Aufwand: ca. 375 $\text{kWh}_{0,1}/\text{t CO}_2$).

Die eleganteste Methode, das Zurückpumpen in leere Erdgasfelder, leidet darunter, daß es zur Zeit keine großen leeren Erdgasfelder gibt (sie stehen erst ab etwa dem Jahr 2020 zur Verfügung, wenn die großen Erdgasfelder in den Niederlanden und in Westsibirien geleert sein werden) und daß darin theoretisch nur das aus Erdgas erzeugte CO_2 "Platz" finden würde. Das "Kohle- CO_2 " und das "Erdöl- CO_2 " müßte aber ebenfalls endgelagert werden können. Dies gilt insbesondere dann, wenn die Kohle als am reichlichsten vorhandene fossile Ressource vermehrt genutzt werden sollte. Zur Aufnahme sehr großer Mengen an CO_2 käme als Deponie nur das Meer in Frage.

Das Prinzip der Meeresendlagerung beruht darauf, daß unterhalb einer Tiefe von 3000 m die Dichte von flüssigem CO_2 höher ist als jene des Meerwassers, so daß dieses von selbst auf den Meeresgrund absinkt. Der natürliche hydrostatische Druck des Meeres und sein natürlich-großes "Druckgefäßvolumen" wird als vorgegebenes Behältnis für das Kohlendioxid benutzt. Die ozeanographischen Verhältnisse in der Tiefsee sind so, daß ein horizontaler Masseaustausch relativ rasch erfolgt, während aber der vertikale Austausch aufgrund des anisotropen turbulenten Diffusionskoeffizienten relativ langsam stattfindet, so daß mit Rückhaltezeiten für das CO_2 in der Größenordnung von 500 bis 1000 Jahren gerechnet werden kann. Dies ist hinreichend für eine weitere Nutzungsphase für fossile Brennstoffe in der Größenordnung von 50 bis 100 Jahren. Nach einigen Jahrtausenden würde sich dann asymptotisch eine Gleichgewichtskon-

zentration mit der Atmosphäre einstellen, die von der insgesamt durch die Verbrennung fossiler Energieträger erzeugten CO_2 -Menge abhängt.

Die Einbringung von CO_2 in die Tiefsee kann einmal durch eine Verpressung von flüssigem CO_2 , oder durch eine CO_2 -Eisversenkung erfolgen. Die Injektion von flüssigem CO_2 in die Tiefsee ist nur an Steilküsten mit der notwendigen Meerestiefe möglich, gegebenenfalls ließen sich auch natürliche Meeresströmungen (Fallströmungen) für die Verbringung des flüssigen CO_2 nutzen.

Die CO_2 -Eisversenkung kommt dann in Frage, wenn keine Steilküsten in angrenzenden Ozeanen vorhanden sind und das CO_2 per Schiff auf die offene See transportiert werden muß. Für Westeuropa ist die nächstgelegene potentielle Endlagerstätte für CO_2 in der Biskaya (ca. 300 km westlich von Bordeaux). Des weiteren finden sich noch im Mittelmeer (zwischen Sardinien und Italien) sowie im östlichen Becken nahegelegene Stellen, bei denen eine CO_2 -Endlagerung möglich wäre. Die Nord- und Ostsee sind für diese Zwecke nicht tief genug. Die für eine CO_2 -Endlagerung geeigneten Stellen liegen folglich alle relativ weit weg, so daß der CO_2 -Eisversenkung für die Deposition eine wichtige Rolle zukommt. Ein Pipeline-Transport von flüssigem CO_2 an die Küsten von Frankreich und Spanien wäre vorstellbar, wo dann die Vereisung stattfindet und Entsorgungsschiffe das CO_2 -Eis im Atlantik versenken.

Um beurteilen zu können, ob die Meeresendlagerung von CO_2 ein zeitlich befristeter, für einige Jahrzehnte gangbarer und verantwortbarer Weg wäre, den Anstieg der atmosphärischen CO_2 -Konzentration zu begrenzen, sind weitergehende Untersuchungen zu eventuellen ökologischen Nebenwirkungen durch die Erhöhung der Kohlenstoffkonzentration sowie zur Pufferwirkung und zum Rückhaltevermögen der Tiefsee notwendig. Daneben wären auch die Entsorgungstechniken noch zu entwickeln und zu erproben.

Vermeidung von CO₂-Emissionen bei fossil gefeuerten Kraftwerken

Die Konzentration von CO₂ in den Rauchgasen von konventionellen Kohle-, Öl- oder Naturgas-befeuerten Kraftwerken ist relativ niedrig und beträgt je nach Brennstoff zwischen 8 und 15 %. Für diesen Konzentrationsbereich ist eine chemische CO₂-Absorption auf der Basis von Monoethanolamin geeignet. Trotz des relativ hohen Energieverbrauchs (ca. 5 GJ/t CO₂) bei der Desorption wird der Wirkungsgradeinbruch des Kraftwerks dadurch in Grenzen gehalten, daß Niedertemperaturdampf bei ca. 150 °C, der weitgehend seine Arbeitsfähigkeit verloren hat, dem Niederdruckteil der Dampfturbine entnommen wird. Es gelingt so, das CO₂ vom Rauchgas mit einer Abscheideeffizienz von 90 % abzutrennen. Neuere Aminkompositionen der Firma Dow Chemical schützen auch gegen Korrosion bei Anwesenheit von geringen Mengen von Sauerstoff und Wasserdampf. Es zeigt sich, daß die Wirkungsgradeinbußen von 7 %-Punkten (ohne Endlagerung) für ein Naturgas-Kraftwerk geringer sind als für ein Kohlekraftwerk mit 11 %-Punkten (ohne Endlagerung), was im wesentlichen auf den geringeren spezifischen CO₂-Emissionen des ersteren beruht.

Eine andere Möglichkeit der Minderung von CO₂-Emissionen bei fossilen Kraftwerken stellt die Abtrennung von CO₂ vor der Gasverbrennung bei Gasturbinen/Dampfturbinenkraftwerken (GuD) dar. Dabei wird z. B. das durch eine Vergasung von Kohle gewonnene Synthesegas mit Hilfe der CO-Shiftreaktion vollständig in ein H₂/CO₂-Gemisch überführt, worin das CO₂ in weit höherer Konzentration als im normalen Rauchgas vorliegt. Deshalb kann hier eine physikalische CO₂-Wäsche (etwa SELEXOL) angewendet werden, wozu nur relativ wenig elektrische Kompressionsenergie nötig ist, so daß die Wirkungsgradeinbuße auf 6 %-Punkte (ohne Endlagerung) begrenzt bleibt. Der Endwirkungsgrad liegt hier etwa ein Drittel höher als bei der Rauchgaswäsche. Dies zeigt, daß in der GuD-Kraftwerkstechnologie, die ohnehin auf der Entwicklungslinie der zukünftigen Kohleverstromung liegt, die Möglichkeit für eine relativ effiziente CO₂-Entsorgung liegt, mit einer Erhöhung der Stromerzeugungskosten unter Berücksichtigung der Kosten der Deponierung im Bereich von ca. 25 % (heimische Kohle, Verpressung des CO₂ in leeren Erdgasfeldern) bis ca. 80 % (Importkohle, Meeresversenkung von festem CO₂-Eis), wenn eine Kraftwerks-

auslastung von 6000 h/a zugrunde gelegt wird. Erwähnt werden sollte jedoch noch, daß dieses Verfahren auch bei einem Gas- oder Öl-GuD-Kraftwerk Anwendung finden könnte, es liegen jedoch keine näheren Informationen hierzu vor, so daß von einer weiteren Beschreibung abgesehen wird.

Die geschätzten totalen CO₂-Minderungskosten liegen für ein GuD-Kraftwerk mit integrierter Kohlevergasung im Bereich von etwa 32 DM/t CO₂ (Importkohle) bzw. 43 DM/t CO₂ (deutsche Steinkohle) bei einer Verpressung von CO₂ im leeren Erdgasfeld bis ca. 87 DM/t CO₂ (Importkohle) bzw. 129 DM/t CO₂ (deutsche Steinkohle) bei einer Meeresversenkung von festem CO₂-Eis, wenn wiederum eine Kraftwerksauslastung von 6000 h/a angenommen wird. Wird gemäß der Entwicklung im Referenzszenario eine Auslastung der Steinkohlekraftwerke von 4000 h/a angenommen, so steigen die CO₂-Minderungskosten in den entsprechenden Werten auf 43 bzw. 54 DM/t CO₂ bis 112 bzw. 154 DM/t CO₂.

Eine weitere Variante der CO₂-Abtrennung stellt die **allothermische Vergasung** von Kohle mittels CO₂-freier Prozeßwärme in GuD-Kraftwerken dar. Dabei wird CO₂-freie Prozeßwärme eingekoppelt, so daß die Vergasung mit reinem Wasserdampf erfolgt und auf die relativ energieintensive Sauerstoffherstellung, die meist bei autothermischer Vergasung nötig ist, verzichtet werden kann. Ein Hochtemperaturprozesswärmereaktor ist für die Prozesswärmeerzeugung besonders geeignet. Auch hier wird das Synthesegas in ein CO₂/H₂-Gasgemisch überführt und die CO₂-Abtrennung physikalisch durchgeführt. Der untere für die Prozeßwärme nicht mehr nutzbare Temperaturbereich des Heliumgases des Hochtemperaturreaktors wird zur Stromerzeugung benutzt, die in den meisten Fällen für die Entsorgung des abgetrennten CO₂ ausreicht.

Eine Abschätzung des CO₂-Minderungspotentials durch den Einsatz von CO₂-entsorgten GuD-Kohlekraftwerken erhält man, wenn man annimmt, daß der notwendige Erweiterungs- und Ersatzbedarf für Steinkohle- und Braunkohlekraftwerke bis zum Jahr 2005 in der Bundesrepublik Deutschland aus dem Referenzszenario durch die oben beschriebenen GuD-Kraftwerken substituiert wird.

Gemäß PROGNOSE ergeben sich für das Jahr 2005 insgesamt CO₂-Emissionen von 192,6 Mio. t CO₂/a aus der Stromerzeugung in Steinkohlekraftwerken und 111,3 Mio. t CO₂/a aus der Stromerzeugung in Braunkohlekraftwerken. Davon entfallen 91 Mio. t CO₂/a bei der Steinkohle und 68 Mio. t CO₂/a bei der Braunkohle auf nach dem Jahr 1994 zu zubauende Kraftwerke. Zusammengefaßt ließen sich also im Jahr 2005 die CO₂-Emissionen bei der Stromerzeugung um fast 149 Mio. t CO₂/a vermindern, wenn man eine jeweilige Effizienz von 98 % für die CO₂-Abscheidung im GuD-Kraftwerk und bei der Meeresversenkung postuliert und wenn man noch die Wirkungsgradreduktion bei einer entsprechend höheren installierten Leistung des gesamten Kraftwerks-parks mitberücksichtigt. Die erreichbare CO₂-Minderung entspricht rund 21 % der energiebedingten CO₂-Emissionen des Jahres 1987. Im Falle der CO₂-Eisversenkung wären zur CO₂-Entsorgung pro Jahr rund 800 Fahrten von CO₂-Entsorgungsschiffen mit je 200000 t Ladekapazität notwendig.

Eine weitere Möglichkeit zur Minderung der CO₂-Emissionen bei fossil-befeuerten Kraftwerken stellt die Verbrennung mit reinem Sauerstoff dar. Hier wird, um hohe CO₂-Konzentrationen im Rauchgas von konventionellen fossil befeuerten Kraftwerken direkt zu erzielen, der Brennstoff mit reinem Sauerstoff verbrannt, so daß sich kein Stickstoffgas mehr im Rauchgas befindet. Eine Gaswäsche erübrigt sich so. Aus Wärmeübertragungsgründen (eine reine Sauerstoffverbrennung erzeugt eine zu heiße Flamme), wird der Brennstoff in einer Atmosphäre von 30 % O₂ und 70 % CO₂ verbrannt, wobei das CO₂ aus dem Abgas rezykliert wird. Eine 650 kW_e Testanlage existiert in den USA. Es ergibt sich, daß die Sauerstoffverbrennung mit einer Wirkungsgradeinbuße von 13 %-Punkten gegenüber der Rauchgaswäsche (Wirkungsgradeinbuße 11 bzw. 6 %-Punkte) energetisch unterlegen ist. Die Verbrennung mit reinem Sauerstoff kann dann interessanter werden, wenn es gelänge, den energetischen Aufwand für die Lufttrennung merklich zu reduzieren. Es wird deshalb angeregt, verbesserte Lufttrennverfahren zu entwickeln (z. B. das Bariumperoxid-Verfahren).

Zusammenfassend kann man zur Vermeidung der CO₂-Emissionen aus fossil-befeuerten Kraftwerken sagen, daß die Gaswäschen ausgereif-

tere Prozesse sind als die Sauerstoffverbrennung. Sie werden zum Beispiel routinemäßig in Ammoniakfabriken eingesetzt. Die GuD-Technik mit integrierter Kohlevergasung ist der reinen Sauerstoffverbrennung derzeit überlegen. Bei diesem Verfahren muß unter den vorgegebenen Randbedingungen für die CO₂-Entsorgung eine Erhöhung der Stromerzeugungskosten aus Steinkohlekraftwerken in Höhe von rund 7 Pf/kWh_e aufgebracht werden. Einige der CO₂-Abtrennungsvorgänge ließen sich auch auf andere Feuerungsanlagen bzw. Umwandlungsanlagen mit CO₂-Emissionen anwenden. Eine notwendige Voraussetzung für die Anwendung dieser Maßnahmen ist jedoch, daß eine Meeresendlagerung des abgetrennten CO₂ klimaverträglich möglich ist.

3. Gesamtpotentiale und ihre Einordnung

Im Studienkomplex A 5 werden vier mögliche Minderungspotentiale betrachtet:

- CO₂-Deponierung,
- bessere Ausnutzung CO₂-freier oder CO₂-armer Primärenergiequellen mit Hilfe von Energiespeichern,
- technische und verkehrslenkende Maßnahmen im Verkehrsbereich,
- neue Energieträger aus fossilen Primärenergieträgern.

CO₂-Deponierung

Die Untersuchungen zeigen, daß nur drei Möglichkeiten in Betracht kommen, um CO₂ in großem Maßstab endzulagern. In der Reihenfolge steigenden Energieaufwandes sind dies:

- das Zurückpumpen von gasförmigem CO₂ in leere Erdgasfelder
- das Verpressen von flüssigem CO₂ in Küstennähe im Meer
- die Meeresversenkung von festem CO₂-Eis auf hoher See.

Das Zurückpumpen von gasförmigem CO₂ ist in nennenswerten Mengen nach dem Jahr 2020 möglich, wenn leere Erdgasfelder in den Niederlanden und Westsibirien zur Verfügung stehen.

Theoretisch können sie die CO₂-Emissionen, die infolge der Nutzung des Erdgases entstanden sind, aufnehmen. Für die CO₂-Emissionen infolge der Kohle- und der Erdöl-Nutzung fehlen die Kapazitäten. Das Anlagen künstlicher Kavernen ausreichender Größe scheidet aus.

Der zweite Weg - das Verpressen flüssigen CO₂ in der Tiefsee - ist in Europa nur an wenigen Stellen, die tief genug sind, möglich. Es sind dies die Biskaya (ca. 300 km westlich von Bordeaux), das östliche Mittelmeerbecken sowie die Stelle zwischen Sardinien und Italien. All diese Stellen liegen relativ weit weg für die Erschließung mit Pipelines.

Der dritte Weg, die CO₂-Eisversenkung an geeigneten Stellen des Ozeans, ist die geeignetste Möglichkeit im großen Maßstab endzulagern.

Im vorliegenden Studienpaket wird die CO₂-Deponierung ausschließlich unter den Gesichtspunkten Kosten, Potential und Energiebedarf betrachtet, soweit derzeit Quantifizierungen

überhaupt möglich sind. Grundsätzlich vorab zu klärende Fragen, wie Migration, Verweilzeiten, Auswirkungen auf die Ökologie etc. wurden nicht behandelt.

Im Sinne der rein technischen Betrachtungsweise ist das Potential der CO₂-Deponierung in der Tiefsee ausreichend groß zur langfristigen CO₂-Endlagerung. Ob eine ökologische Verträglichkeit gegeben ist, ist offen.

Besonders geeignet zur CO₂-Konzentrierung zwecks Deponierung ist die Stromerzeugung, weil hier im Vergleich zu den anderen CO₂-Emissionsquellen der bestehenden Energieversorgung - bedingt durch den Kohleeinsatz - etwa ein Viertel der bundesdeutschen Gesamtemissionen bei relativ wenigen Emissionsquellen anfallen. Hinzu kommt, daß der CO₂-Gehalt in den Rauchgasen mit bis etwa 14 % Volumengehalt relativ hoch ist und damit eine Abscheidung technisch ermöglicht. Die CO₂-Abscheidung läßt sich je nach Kraftwerkstyp (z. B. Kraftwerke mit Kombiprozessen) und Verbrennungsart (z. B. Verbrennung mit Sauerstoff) von der Kosten- und Verfahrensseite her beeinflussen.

Tabelle 3.1 enthält die im Studienschwerpunkt A5 betrachteten Maßnahmen, die angegebenen CO₂-Minderungspotentiale und die ermittelten Kosten für eine Abscheidung bzw. einer Abscheidung mit anschließender Deponierung. Für die Abscheidung von CO₂-Emissionen aus fossil gefeuerten Kraftwerken eignet sich nach den Übersichten im vorliegenden Studienpaket zum einen eine chemische CO₂-Absorption auf der Basis von Monoethanolamin, des weiteren die Abtrennung von CO₂ vor der Gasverbrennung bei Gasturbinen-/Dampfturbinenkraftwerken und die Verbrennung mit reinem Sauerstoff.

Besondere Berücksichtigung kommt den Erwartungen für die Wirkungsgradverluste durch die CO₂-Abscheidung, Vereisung und den Transport zu. Die Wirkungsgradverluste sind signifikant. Bei der Einordnung der einzelnen Maßnahmen ist zu berücksichtigen, daß wesentliche CO₂-Reduzierungen durch den Übergang von konventionellen Kraftwerken auf GuD-Kraftwerke infolge der Wirkungsgradsteigerungen eintreten. Die Abscheidung von CO₂ kompensiert diese Verbesserungen in allen Fällen. Auch

ist zu berücksichtigen, daß niedrigere Kraftwerkswirkungsgrade bei gleicher Stromnachfrage zu größeren Kapazitäten, höherer Abwärme, mehr Standorte etc. führen.

Alleine aufgrund der ausgewiesenen Wirkungsgradverluste dürfte nur eine CO₂-Abscheidung aus Kombikraftwerken in Frage kommen.

Energiespeicher

Die untersuchten Speicher tragen unmittelbar nicht zu einer CO₂-Minderung bei. Mittelbar ermöglichen sie jedoch einer CO₂-freien Energieversorgungstechnik, wie z. B. Solarkraftwerken, bei geeigneter Auslegung höhere Betriebsstundenzahlen und damit eine Reduzierung von CO₂ durch Minderbetrieb fossiler Energieumwandlungsanlagen, beispielsweise Kohlekraftwerken.

Die betrachteten Speichertechniken lassen erkennen, daß bei der Speicherung elektrischer Energie das Pumpspeicherkraftwerk vom technisch/ökonomischen Standpunkt aus gesehen für einen zentralen Netzspeicher die am besten geeignete Technik ist. Batteriespeicheranlagen als Großspeicher sind teurer, stellen jedoch für dezentrale Inselnetze die einzige Möglichkeit dar. Der Einsatz von Schwungradspeichern, Druckluftspeichern und supraleitenden Magnetfeldspeichern ist zwar denkbar, bedarf aber im Falle der Schwungräder und der Magnetfeldspeicher erheblicher technischer Entwicklungsarbeit; Druckluftspeicher hängen vom Vorhandensein geeigneter geologischer Formationen ab.

Kosten- und entwicklungsbedingt werden in Prototyp- und Versuchsanlagen thermische Speicher als Kurzzeitspeicher eingesetzt. Im Falle der in Tab. 3.1 ausgewiesenen CO₂-Minderungspotentiale durch Solaranwendungen ist zu berücksichtigen, daß die ausgewiesenen Werte für das gesamte solare Wärmeenergieerzeugungssystem gelten. Der Anteil der Speicher daran ist nicht separat ausweisbar.

Inwieweit die dabei unterstellten Marktdurchdringungen solarer Anlagen erreichbar sind, ist nicht Gegenstand dieses Studienpaketes.

Derzeit liegen die Begrenzungen für die Nutzung der Solar- und Windenergie nicht in der Speicherung, sondern in der Wirtschaftlichkeit.

Tab. 3.1: Übersicht über die angegebenen technischen Minderungspotentiale und ihre Kosten

Maßnahme	Potential Mio t CO ₂ /a	Kosten DM/t CO ₂	Anmerkungen
<u>CO₂-Abscheidung aus Kraftwerken</u>			
Konv. Kohle-KW	Abscheide- grad: ca. 90 % der CO ₂ -Emission aus der Stromerzeugung (s. auch Kap. 1)	115 - 305 ¹⁾	$\eta = 40\% \rightarrow 29\%^1) \rightarrow 18\%^1)$
GuD mit Erdgas		91 - 177 ¹⁾	$\eta = 48\% \rightarrow 42\%^1) \rightarrow 35\%^1)$
GuD mit inte- grierte Kohle- vergasung		38 - 129 ¹⁾	$\eta = 44\% \rightarrow 38\%^1) \rightarrow 27\%^1)$
Verbrennung mit O ₂ (Verkl. der Rauchgasmengen)		keine Angabe	Wirkungsgrad hängt von O ₂ -Herstellung ab
<u>Speicher</u>			
Pumpspeicher ²⁾ für nicht- fossile KW	28 ⁴⁾	20 ³⁾ - 60 ³⁾	
Elektrochem. ²⁾ Speicher für nichtfoss. KW		1000 ³⁾ - 2500 ³⁾	Nur kleine Beiträge
Schwungrad- ²⁾ speicher		keine Angabe	Nur kleine Beiträge
Wärmespeicher für solartherm. KW	Wie CO ₂ foss. aus KW heute	500 ³⁾	
Wärmespeicher zur Abwärme- nutzung aus der Industrie	1 ⁵⁾	bis 80 ⁶⁾	

Tab. 3.1: Übersicht über die angegebenen Minderungspotentiale und ihre
Kosten

F o r t s e t z u n g

Maßnahme	Potential Mio t CO ₂ /a	Kosten DM/t CO ₂	Anmerkungen
Niedertemp. Speicher für Solaranlagen	59 ⁷⁾	-55 bis 127 ³⁾⁸⁾	
Neue Sekundär- energieträ- ger, Nutzungs- systeme			
H ₂ mittels Elektrolyse	CO ₂ = alle fossilen Endenergie- träger	260 - 1200 ⁹⁾	
H ₂ aus foss. Energie- trägern		100-650 ¹⁰⁾	
Niedertemp. Fernwärme	150 ¹¹⁾	keine Angaben	
Mobile Fern- wärme	keine Angaben	keine Angaben	
NFE	11	keine Angaben	
Methanol zu Raumwärme	21 ¹²⁾	keine Angaben	
Methanol zu Prozeßwärme	17 ¹²⁾	keine Angaben	
Methanol im Verkehr	13 - 10.5 12)13)	keine Angaben	

Hinweise zu Tab. 3.1

- 1) Erster Wert gilt für die Abscheidung des CO₂ im Kraftwerk, zweiter Wert einschließlich Meeresversenkung. Auslastung der Kraftwerke 6000 h/a.
Mit heimischer Steinkohle gerechnet, bei Annahme von Importkohle gelten folgende Werte:
Konv. Kohlekraftwerk: 88 - 252 DM/t CO₂
GuD mit integr. Kohlevergasung: 28 - 87 DM/t CO₂
Die Kosten sind nach A 5.5, Tab. 3.1 zitiert.
Gegenüber dem Primärbericht A 5.3 sind die Brennstoffpreise und das Kostenberechnungsverfahren des Analyserasters zugrundegelegt.
- 2) zu Erhöhung der Auslastung
- 3) nur Speicherkosten
- 4) davon: 11 Mio t = Kleinversorgung mit Photovoltaik
17 Mio t = Einsatz im elektr. Verbundnetz
- 5) Annahme: Abwärme wird in ein FW-Netz eingekoppelt
- 6) Gegen Öl und Gas gerechnet
- 7) Annahme: Technische Potentialabschätzung aus Studienkomplex A 2, Solarsysteme mit Speicher
- 8) Gegen Öl gerechnet -55 = Deckungsgrad 8 %
(z. B. Schwimmbadbeheizung)
127 = Deckungsgrad 90 %
(z. B. solare Nahwärme)
Deckungsgrad ist auf Einzelsystem bezogen
Negative Kostenzahl bedeutet wirtschaftlich bei heutigen Energiepreisen
- 9) 260 = Stromkosten 5 DPf/kWh, Betriebszeit des Elektrolyseurs 6000 h/a
1200 = Stromkosten 20 DPf/kWh, Betriebszeit des Elektrolyseurs 2000 h/a
Elektrolyseanlage: 1000 DM/kW_e; $\eta = 65 \%$
- 10) 100 = Erdgasreformierung } ohne CO₂-Deponierungskosten
650 = Kohle-Cracking }
- 11) Bei vollst. Nutzung des Abwärmepotentials
- 12) Zentrale CO₂-Mengen werden deponiert (Annahme)
- 13) 13 Mio t = Methanol substituiert Benzin
10.5 Mio t = Methanol substituiert Diesel

Technische und verkehrslenkende Maßnahmen

Nicht in die Tabelle aufgenommen wurden die CO₂-Minderungen durch Verbesserung bestehender Pkw-Antriebe und verkehrslenkender Maßnahmen. Der Grund dafür ist, daß die Ermittlung des absoluten Minderungspotentials nicht Gegenstand des hier betrachteten Arbeitspaketes war. Stattdessen wurden hier - im Studienschwerpunkt A 5 - fahrzeugspezifische Minderungspotentiale ermittelt, unabhängig vom Verbraucherverhalten hinsichtlich der Fahrweise und der Wahl der Fahrzeuggröße. Die Analysen weisen für Pkw aller Größen und Typen ein nennenswertes technisches Einsparpotential bis zum Jahr 2030 - d. h. über vier Fahrzeugzyklen hinweg - aus. Bei Ottomotoren wird die Verbrauchsreduzierung gegenüber 1989 um 25 %, bei Dieselmotoren im Pkw-Bereich mit ca. 20 % beziffert.

Die Vorschläge, Ideen und praktische Versuche durch verkehrslenkende Maßnahmen auch die CO₂-Emissionen zu senken, sind äußerst zahlreich. Aufgrund der Komplexität des Verkehrsgeschehens kann die Wirkung einzelner Maßnahmen nicht theoretisch abgeschätzt werden, praktische Erfahrungen sind aber nur singulär vorhanden.

Die Analyse der technisch bedingten CO₂-Emissionsreduzierungen durch Motorverbesserungen zeigt jedoch ein erhebliches Reduktionspotential durch Verbesserungen des Verkehrsablaufs, wie beispielsweise der Erhöhung der durchschnittlichen Geschwindigkeit durch weniger Wartezeiten. Umgekehrt besteht jedoch die Gefahr, daß bei allen attraktivitätssteigernden Maßnahmen zugunsten der Straße Verlagerungen von an sich CO₂ mindernden öffentlichen Verkehrssystemen zur individuellen Autofahrt erfolgen.

Der Analysestand im Studienschwerpunkt A5 läßt keine eindeutige Aussage hinsichtlich erreichbarer CO₂-Minderung durch verkehrslenkende Maßnahmen zu.

Neue Energieträger

Auch der Übergang auf "alternative" Kraftstoffe - wie Methanol - wurde untersucht. Gegenüber einem Benzinfahrzeug verringern sich durch die Verwendung von Methanol die CO₂-Emissionen des

Fahrzeuges mit Ottomotor um ca. 28 %, gegenüber einem Dieselfahrzeug um 15 %. Der Einsatz von aus fossilen Rohstoffen erzeugtem Methanol ohne CO₂-Entsorgung führt bestenfalls unter Verwendung von Erdgas als Rohstoff zur Methanolherstellung zu einer Minderung der gesamten CO₂-Emissionen (Fahrzeug und Herstellung). Bei allen Methanolerzeugungsverfahren ist mit höherem Primärenergieeinsatz zu rechnen als bei direkter Verwendung von Benzin oder Diesel.

Der Einsatz von Wasserstoff als Kraftstoff bietet im Gegensatz zu Methanol die Möglichkeit eines CO₂-freien Fahrzeugbetriebs. Auch hier gilt - wie im Falle von Methanol als Treibstoff - daß bei allen Wasserstofferzeugungsverfahren aus fossilen Primärenergieträgern die CO₂-Emissionen ohne Deponierung höher liegen als bei Benzin- und Dieselfahrzeugen.

Die Wasserstoffelektrolyse mit Kernenergie und Sonnenenergie - die aber nicht Gegenstand der Betrachtung im Studienschwerpunkt A5 war - bietet dagegen die Möglichkeit, CO₂-freien Wasserstoff zu erzeugen, sofern man von den CO₂-Emissionen durch den Bau der Anlagen absieht.

Elektrofahrzeuge emittieren beim Betrieb keinerlei Schadstoffe. Die Erfahrungen im Einsatz von Prototypen haben jedoch gezeigt, daß die relativ niedrige Speicherkapazität, das hohe Batteriegewicht und die begrenzte Reichweite derzeit keine Konkurrenzfähigkeit zu Benzin- und Dieselfahrzeugen zulassen. Bei einer fossilen Stromerzeugung aus Steinkohle liegen selbst im GuD-Kraftwerk die CO₂-Emissionen über denen von konventionellen Fahrzeugen. Nur bei einer CO₂-Deponierung und/oder einer CO₂-freien Stromerzeugung bieten Elektrofahrzeuge hinsichtlich CO₂-Emissionen Vorteile.

Vor dem Hintergrund einer weitgehenden Treibstoffversorgung mit Ethanol in Brasilien aus Biomasse wurde auch diese Möglichkeit für die Bundesrepublik Deutschland analysiert. Es zeigt sich, daß der Einsatz von Bioethanol wesentlich durch die zur Produktion benötigte landwirtschaftliche Nutzfläche begrenzt wird. Möchte man beispielsweise nur 20 % des im Straßenverkehrs eingesetzten Benzins durch Ethanol ersetzen, so beträgt die benötigte Anbaufläche etwa 2 - 3 Mio ha. Diese Flächen sind in der Bundesrepublik Deutschland nicht vorhanden. Bei der

Herstellung von Ethanol aus Biomasse kann aber ein geschlossener CO₂-Kreislauf erreicht werden.

Offen ist noch die Frage des Energiebedarfs zur Herstellung des Ethanols. Eine vergleichbare Aussage gilt für Rapsöl. Technisch ist der Einsatz möglich; das mögliche Potential wird hier wie beim Einsatz von Ethanol durch die Ausbaufäche begrenzt. Bisher war eine Markteinführung aufgrund der fehlenden Wettbewerbsfähigkeit nicht möglich.

Aufgrund des noch vorhandenen Entwicklungsbedarfes von Wasserstoff und Elektrofahrzeugen sowie der begrenzten Verfügbarkeit von Biomasse wird nicht mit einem Marktanteil über 10 % für diese Kraftstoffe gerechnet.

4. Emissionsminderung indirekt wirkender Spurengase aus stationären Quellen

Troposphärisches Ozon trägt nach heutiger Einschätzung zu ca. 8 % zum gegenwärtigen Treibhauseffekt bei. Deshalb sind Möglichkeiten zu untersuchen, anhand derer die Emissionen von NO_x und anderen ozonbildenden Spurengasen, d.h. CO und NMKW (flüchtige organische Verbindungen ohne Methan), gemindert werden können. Auftragsgemäß werden hier nur stationäre Emissionsquellen betrachtet, die dem Bereich der Bereitstellung bzw. Nutzung fossiler Energieträger zuzuordnen sind. Dies sind im einzelnen:

- Feuerungsanlagen in den Sektoren
 - Öffentliche Kraft- und Fernheizwerke
 - Industrie
 - Kleinverbraucher
 - Haushalte
- Anlagen zur Mineralölverarbeitung in Raffinerien (ohne Feuerungsanlagen)
- Lagerung und Umschlag von Ottokraftstoffen

Bezogen auf das Jahr 1986 werden durch diese Quellen ca. 39 % der gesamten NO_x-Emissionen, ca. 14 % der gesamten CO-Emissionen und etwa 11 % der gesamten VOC-Emissionen (der NMKW-Anteil ist hier nicht herausgerechnet) in der Bundesrepublik Deutschland verursacht.

Zieht man für die genannten Schadstoffe zur Untersuchung von Minderungsmöglichkeiten diejenigen Emissionsquellen in Betracht, die im Jahr 1987 mit mehr als 10 % an den jeweiligen energiebedingten Gesamtschadstoffemissionen stationärer Quellen beteiligt sind, so ergibt sich die folgende Auswahl:

- Maßnahmen zur NO_x-Minderung für Feuerungsanlagen der öffentlichen Kraft- und Fernheizwerke und der Industrie, die 1987 mit ca. 780 kt einen Anteil von insgesamt 85 % an den energiebedingten NO_x-Emissionen stationärer Quellen aufweisen,
- Maßnahmen zur NMKW- und CO-Minderung für Feuerungsanlagen von Kleinverbrauchern bzw. Haushalten, die 1987 mit 56 kt bzw.

1150 kt zu 27 bzw. 89 % an den energiebedingten NMKW- bzw. CO-Emissionen stationärer Quellen beteiligt sind,

- Maßnahmen zur NMKW-Minderung bei Prozessen zur Mineralölverarbeitung sowie bei der Lagerung und dem Umschlag von Ottokraftstoffen, die 1987 mit insgesamt 130 kt einen Anteil von ca. 63 % an den energiebedingten NMKW-Emissionen stationärer Quellen aufweisen.

Es ist darauf hinzuweisen, daß in bestimmten Emittentenbereichen, z. B. den Großfeuerungsanlagen, aufgrund von gesetzlich festgelegten Emissionsgrenzwerten verschiedene Maßnahmen zur Emissionsminderung inzwischen bereits verwirklicht sind bzw. in absehbarer Zeit durchgeführt werden, die für einzelne Spurengase zu deutlichen Emissionsminderungen führen werden. Allerdings ist davon auszugehen, daß damit das gesamte technisch mögliche Minderungspotential noch nicht ausgeschöpft wird.

Zur Minderung der NO_x-Emissionen aus Feuerungsanlagen stehen verschiedene Primärmaßnahmen wie z. B.

- NO_x-arme Brenner,
- Stufenverbrennung,
- Rauchgasrückführung,
- ACOM-Verfahren,
- kombinierte Maßnahmen

zur Verfügung, mit denen je nach Anwendungsfall maximale Minderungsgrade zwischen 30 und 70 % erreicht werden können.

Daneben können, alleine oder in Kombination mit Primärmaßnahmen, verschiedene Sekundärmaßnahmen zur NO_x-Minderung wie z. B.

- SCR-Verfahren (Selective Catalytic Reduction),
- SNCR-Verfahren (Selective Non-Catalytic Reduction),
- NO_xOUT-Verfahren,
- Aktivkoksverfahren

eingesetzt werden, die zwischen 45 und ca. 85 % des NO_x im Rauchgas reduzieren.

Das höchste technische Minderungspotential von Einzelmaßnahmen im Bereich öffentlicher Kraft- und Fernheizwerke weist das SCR-Ver-

fahren auf. Bezogen auf das Emissionsniveau im Jahr 1987 beträgt das Minderungspotential dieser Maßnahme ca. 380 kt NO_x/a. Dies entspricht einer 80 %-igen Reduzierung der NO_x-Emissionen in diesem Bereich. Die spezifischen Minderungskosten weisen je nach Feuerungswärmeleistung, Auslastung und Brennstofftyp eine hohe Bandbreite auf. Die Gesamtkosten für diese Maßnahme werden auf ca. 2,2 Mrd. DM/a für das ausgewiesene Minderungspotential geschätzt.

Im Bereich der Feuerungsanlagen der Industrie beinhaltet das SCR-Verfahren ebenfalls das höchste technische Minderungspotential. Wie bei den anderen Minderungsmaßnahmen in diesem Bereich wird davon ausgegangen, daß diese Maßnahme - zumindest gegenwärtig - nicht bei Prozeßfeuerungen eingesetzt werden kann. Mit ca. 110 kt NO_x/a, bezogen auf die Emissionen in 1987, ist das grob abgeschätzte technische Minderungspotential deshalb vergleichsweise gering. Dies entspricht einer NO_x-Minderung von ca. 36 % in diesem Bereich. Die spezifischen Minderungskosten bewegen sich je nach Anlagenart, Feuerungswärmeleistung und Auslastung ebenfalls in einem sehr weiten Bereich. Die Gesamtkosten werden bei Ausschöpfung des hier angegebenen technischen Minderungspotentials für 1987 auf etwa 990 Mio. DM/a geschätzt.

Die gesetzlich festgelegten NO_x-Emissionsgrenzwerte für genehmigungsbedürftige Feuerungsanlagen können in der Regel nur eingehalten werden, wenn entsprechende Minderungsmaßnahmen durchgeführt werden. In manchen Feuerungsanlagen wurden Minderungsmaßnahmen inzwischen bereits verwirklicht, für zahlreiche weitere Anlagen werden sie derzeit vorbereitet. Zur Einhaltung der derzeitigen Emissionsgrenzwerte ist allerdings nicht in jedem Fall diejenige technisch realisierbare Maßnahme bzw. Maßnahmenkombination erforderlich, welche den höchsten Minderungsgrad aufweist.

Bezüglich der NMKW- und CO-Emissionen von kleineren Feuerungsanlagen von Kleinverbrauchern und Haushalten ist festzuhalten, daß gegenwärtig noch keine weitreichenden Konzepte zur Emissionsminderung zur Verfügung stehen. Es können lediglich Hinweise gegeben werden, wie durch ein geändertes Nutzerverhalten in gewissem Umfang Emissionsminderungen zu erzielen sind. Erst die Entwicklung geeigneter,

umfassend durchführbarer Maßnahmen, insbesondere konstruktionsseitiger Verbesserungen bei Feststofffeuerungen, kann hier zu einer deutlichen Verbesserung der Emissionssituation führen.

Verschiedene Maßnahmen zur NMKW-Minderung in den Bereichen Raffinerieprozesse und Benzinverteilung können dagegen als Stand der Technik angesehen werden. Im Raffineriesektor ist durch eine optimale Anlagenwartung und durch die Abdeckung von Ölabscheidern eine Emissionsminderung von ca. 12 kt NMKW/a bzw. 55 %, bezogen auf das Jahr 1987, zu erreichen, wobei durch die Gutschrift des Wertes der zurückgewonnenen Kohlenwasserstoffe unter den zugrunde gelegten Annahmen teilweise auch eine geringe Kostenersparnis mit der Durchführung dieser Maßnahmen verbunden ist.

Bei der Lagerung und Verteilung von Ottokraftstoffen können unter anderem folgende Maßnahmen zur Emissionsminderung beitragen:

- Sekundäre Randabdichtungen in Schwimmdachtanks,
- Anschluß von Festdachtanks an Gassammelleitungen und Dämpferückgewinnungsanlagen,
- Gaspendingung und/oder Dämpferückgewinnung bzw. -verbrennung bei sämtlichen Umschlagvorgängen in der Benzinverteilungskette vom Raffinerieabsatz bis hin zur Kraftfahrzeugbetankung an Straßentankstellen. Beim letzten Schritt dieser Kette, der Kraftfahrzeugbetankung, steht als Alternative der Einsatz von Aktivkohlefiltern im Kraftfahrzeug zur Diskussion, wobei jedoch ein längerer Umsetzungszeitraum als bei der Einführung der Gaspendingung resultieren würde.

In verschiedenen Emittentenbereichen sind diese Minderungsmaßnahmen nach den Bestimmungen der TA Luft künftig erforderlich, zum Teil auch schon eingeführt.

Bei Durchführung der genannten Maßnahmen, wobei eine möglichst weitgehende Dämpferückgewinnung gegenüber der thermischen oder katalytischen Verbrennung bevorzugt berücksichtigt wird, kann, bezogen auf das Emissionsniveau im Jahr 1987, eine Minderung der NMKW-Emissionen um nahezu 100 kt NMKW/a bzw. 92 % in diesem Sektor erzielt werden. Die Minderungskosten belaufen sich, bei Gutschrift

des Wertes der zurückgewonnenen Produkte, grob abgeschätzt auf eine Größenordnung von ca. 250 Mio. DM/a.

In Tabelle 4.1 sind die wesentlichen Ergebnisse für ausgewählte Minderungsmaßnahmen nochmals zusammengefaßt.

Die Frage, inwieweit durch die Ausschöpfung des technischen Minderungspotentials der hier genannten NO_x -, CO- und NMKW-Minderungsmaßnahmen eine Änderung der Immissionssituation von troposphärischem Ozon zu erwarten ist, kann hier nicht quantitativ beantwortet werden. Die Komplexität der luftchemischen Umsetzungen, die unter anderem zur Bildung von Ozon in der Troposphäre führen, erfordert insbesondere eine differenzierte Analyse der räumlichen und zeitlichen Verteilung sowie der genauen Zusammensetzung der Emissionen. Es sei aber darauf hingewiesen, daß eine vergleichsweise einseitige bzw. vorwiegende Minderung der jährlichen NO_x -Gesamtemissionen unter bestimmten Umständen zu einer zeit- und gebietsweise erhöhten Ozonbildung führen könnte.

Die mengenmäßige Bedeutung von klimarelevanten N_2O -Emissionen aus Feuerungs- und De NO_x -Anlagen läßt sich zum gegenwärtigen Zeitpunkt ebenfalls nicht zweifelsfrei klären. Auf der Basis der bisher vorliegenden Meßdaten und Informationen werden die Emissionen aus stationären Feuerungsanlagen in der Bundesrepublik für das Jahr 1987 auf ca. 68000 t N_2O /a geschätzt. Gemessen an den natürlichen und sonstigen anthropogenen N_2O -Emissionen, für die in der Literatur allerdings nur grob geschätzte, weltweite Daten vorliegen, scheinen die N_2O -Emissionen aus stationären Feuerungsanlagen, auch unter Berücksichtigung von NO_x -Vermeidungstechniken, eher von untergeordneter Bedeutung zu sein.

Tabelle 4.1

**Auswirkungen ausgewählter Minderungsmaßnahmen auf die Emissionen
ozonbildender Spurengase (Bezugsjahre 1987¹⁾ und 2005²⁾)**

Maßnahmen	Minderungs-		Minderung der energie-		Minderungs-	
	potential		bedingten Emissionen		kosten in	
	in kt/a		aus stat. Quellen in %		Mio. DM	
	1987	2005	1987	2005	1987	2005
<u>NOx-Minderung:</u>						
SCR in Öff. Kraft- und Fernheizwerken	382	537	42	50	2200	3100
SCR in Industrie- feuerungen	110	114	12	11	990	1030
Gesamt	492	651	54	61	3190	4130
<u>NMNM-Minderung:</u>						
Anlagenwartung und Ab- deckung des Ölabschei- ders in Raffinerien	12	10	6	7	-0,4	-1,7
Minderung von Tankla- geremissionen und Gas- pendelung bzw. Dämpfe- rückgewinnung bei Ben- zinumschlag	99	51	49	36	248	110
Gesamt	111	61	55	43	248	108

¹⁾ Die Angaben beziehen sich auf die Emissionssituation im Jahr 1987.

²⁾ Die Angaben beziehen sich auf das Emissionsniveau, das sich im Jahr 2005 ergeben würde, wenn - ausgehend von der Emissionssituation in 1987 - keine Minderungsmaßnahmen durchgeführt würden.

5. Schlußfolgerungen, offene Fragen, Bewertung

Die Studienergebnisse lassen folgende Schlußfolgerungen zu:

- Die fahrzeugspezifische Einsparung beträgt bei Ottomotoren ca. 25 %, bei Dieselmotoren ca. 20 %. Sie ist technikbedingt. Nicht untersucht wird das Verbraucherverhalten hinsichtlich Fahrleistung und Wahl der Fahrzeuggröße. Sogenannte "alternative" Kraftstoffe, wie Ethanol oder Rapsöl, können von der Limitierung der Produktionsfläche her bedingt - nur einen additiven Beitrag zur CO₂-Minderung in der Bundesrepublik leisten. Elektro-, Methanol- und wasserstoffbetriebene Fahrzeuge weisen nur dann eine nennenswerte CO₂-Minderung gegenüber Benzin und Dieselfahrzeugen auf, wenn die Erzeugung mit erneuerbaren Energien oder Kernenergie erfolgt. Keiner der "Alternativtreibstoffe" ist bei derzeitigen Energiepreisen wirtschaftlich.
- Verkehrslenkende Maßnahmen, die u. a. zu einer CO₂-Minderung führen, sind vielfältig. Der gegenwärtige praktische Erkenntnisstand erlaubt jedoch keine Potentialabschätzung
- Energiespeicher tragen durch die Erhöhung der Betriebszeit CO₂-freier oder CO₂-ärmer Energieversorgungssysteme mittelbar zu einem Minderungspotential bei. Die bezifferten CO₂-Minderungspotentiale bei der Solarenergienutzung können jedoch durch Speicher alleine nicht erreicht werden. Vielmehr muß hier neben der Einführung von Saisonspeichern in Solar-systeme ein erheblicher Ausbau von Solaranlagen überhaupt erfolgen.
- Zusätzliche Möglichkeiten der Fernwärmeversorgung, wie "kalte" Fernwärme, "mobile" Fernwärme, nukleare Fernenergie und Aluminium als Energieträger lassen auch gegenüber der "konventionellen" Fernwärmeversorgung noch CO₂-Minderungspotentiale erkennen. Eine Quantifizierung ist aber wegen unzureichender Markt- und Kostenanalyse nicht angebbbar.
- Als langfristig von der Kapazität her ausreichende CO₂-Deponierung wird die Versenkung von CO₂-Eis an geeigneten Stellen des Ozeans herausgestellt. Die ökologische Verträglichkeit ist nicht untersucht. Besonders geeignet zur CO₂-Konditionierung für die Deponierung sind Kombi-Kraftwerke. Die Abscheidung von CO₂ aus Kraftwerken führt aber zu einer

signifikanten Reduzierung des Wirkungsgrades, der auch nicht durch den Übergang zu GuD-Kraftwerken kompensiert werden kann.

- Wasserstoff- und Methanolerzeugung aus fossilen Primärenergieträgern sind, wenn sie nur aus CO₂-Sicht bewertet werden, nur vor dem Hintergrund einer CO₂-Deponierungsmöglichkeit sinnvoll. Sie konzentrieren durch die CO₂-freie Nutzung von Wasserstoff bzw. die CO₂-ärmere Methanolverbrennung die CO₂-Emissionen auf relativ wenige Quellen.

Wesentliche Aussagen des Studienpaketes sind mit der CO₂-Deponierung verbunden. Die Deponierung stellt nicht nur die kapazitätsmäßig größte und langfristige CO₂-„Minderungsmöglichkeit“ dar, sondern beeinflusst auch wesentlich die Methanol- und Wasserstoffverwendung aus fossilen Energieträgern. Deshalb sollen hier die Randbedingungen der CO₂-Deponierung nochmals betont werden:

- Die CO₂-Deponierungsmöglichkeiten werden im wesentlichen nach dem Stand der Literatur abgeschätzt. Sie beinhalten eine erste Quantifizierung des Energiebedarfs, der Kosten und technischen Möglichkeiten.

Hier sind hinsichtlich rechnerischer Auslegung und Wirtschaftlichkeitsanalyse noch weitere Arbeiten erforderlich, um diesen wichtigen Bereich quantitativ zu erfassen. Beispielsweise muß die Geometrieänderung eines absinkenden CO₂-Eiskörpers gemessen werden.

- Fragen des langfristigen Verbleibs von CO₂ in leeren Erdgasfeldern und in der Tiefsee wurden nicht untersucht. Ebenso nicht die Probleme einer ökologischen Auswirkung infolge großer eingepreßter CO₂-Mengen in die Tiefsee. Auf diesen Feldern besteht primärer Forschungsbedarf. Solange die ökologische Verträglichkeit der Einbringung von CO₂ in leere Erdgasfelder und besonders in die Tiefsee nicht geklärt ist, steht die CO₂-Deponie nicht als Handlungsmöglichkeit zur Verfügung. Unter dieser Voraussetzung verliert auch die Verwendung von Wasserstoff und Methanol, die aus fossilen Energieträgern erzeugt wurden, jeglichen Sinn.

Erkenntnislücken bestehen auch in einer Reihe von Detailfeldern, wie beispielsweise den möglichen Marktpotentialen von additiven Fernwärmekonzepten, wie "kalter" oder "mobiler" Fernwärme. Offen ist auch die Frage der CO₂-Minderung durch geänderte Speicherdimensionierung bei solaren Wärmesystemen.

Der Zeithorizont zur Verwirklichung einzelner analysierter Maßnahmen überstreicht mehrere Jahrzehnte. Während beispielsweise Pumpspeicherkraftwerke und Wasserstoffherzeugungsverfahren Stand der Technik sind, existieren supraleitende Magnetfeldspeicher oder die Verpressung von CO₂ in der Tiefsee nur in einem konzeptionellen Stadium. Die Verwirklichung der fahrzeugtechnischen Einsparmaßnahmen benötigt wenigstens zwei Motorgenerationen, d. h. einen Zeitraum von ca. zwei Jahrzehnten. Diese Maßnahme trägt somit bis zum Jahre 2005 zu einer CO₂-Minderung bei, sofern das verbraucherspezifische Verhalten keine Kompensierung der Minderungspotentiale bewirkt.

Verkehrslenkende Maßnahmen könnten ebenfalls bis zum Jahr 2005 einen Beitrag leisten. Neue Energiespeichertechniken sind derzeit nicht erkennbar und deshalb nicht in die Potentialabschätzung einstellbar.

Technisch ausgereifte Speicher tragen aber insbesondere bei verstärkter Einführung von Solaranlagen zur CO₂-Minderung bei. Ihr Beitrag hängt von der Einführung erneuerbarer Energien ab. Die zusätzlichen Systeme zur Fernwärmeversorgung sind praktisch nicht am Markt. Ihr Beitrag zur CO₂-Minderung bis zum Jahr 2005 ist deshalb - selbst bei forcierter Markteinführung - gering. Die Möglichkeit einer CO₂-Deponierung ist von der offenen Frage der ökologischen Verträglichkeit abhängig. Sollte diese innerhalb weniger Jahre positiv geklärt werden können, erfordert der Bau der Abscheideanlagen und der Aufbau der CO₂-Transportinfrastruktur ebenfalls einen Zehnjahreszeitraum, so daß bis 2005 kein nennenswerter Beitrag zu erwarten wäre. Letzteres gilt auch für den Einsatz von Methanol und Wasserstoff aus fossilen Energieträgern.

Hinzuweisen ist darauf, daß die Potentiale in Tab. 3.1 nicht addiert werden dürfen, da sie weitestgehend alternativ sind.

Zur NO_x -Minderung aus stationären Quellen sind derzeit insbesondere im Bereich der genehmigungspflichtigen Feuerungsanlagen der öffentlichen Kraft- und Fernheizwerke und der Industrie schon zahlreiche Maßnahmen verfügbar, die auch bereits im Einsatz bzw. in der Planung sind, um die gesetzlich verankerten Emissionsgrenzwerte gewährleisten zu können. Auszuklammern sind allerdings Prozeßfeuerungen in der Industrie, für die nach dem gegenwärtigen Kenntnisstand noch keine allgemein einsetzbaren Minderungstechnologien existieren. In diesem Punkt wäre weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeit notwendig.

Es ist weiterhin festzuhalten, daß zur Minderung von CO- und NMKW-Emissionen aus kleineren Feuerungsanlagen bisher keine wesentlichen konstruktionsseitigen Maßnahmen verfügbar sind. Die Entwicklung solcher Maßnahmen wäre insbesondere für die in hohem Maße emissionsrelevanten Feststofffeuerungen von Bedeutung. Dagegen sind geeignete Maßnahmen zur Minderung von NMKW-Emissionen im Raffineriebereich und bei der Lagerung und dem Umschlag von Benzin bekannt. Für verschiedene Emittentenbereiche ist die künftige Einführung derartiger Maßnahmen in der TA Luft bereits festgelegt, insbesondere im Raffineriebereich zum Teil auch schon verwirklicht.

In welcher Hinsicht durch die Minderungsmaßnahmen für NO_x und NMKW eine Änderung der Immissionssituation von Ozon zu erwarten ist, kann derzeit nicht angegeben werden. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, daß bei einer zu einseitigen Minderung der NO_x -Emissionen unter bestimmten Voraussetzungen erhöhte Ozonkonzentrationen auftreten können.

Klimarelevante N_2O -Emissionen aus stationären Feuerungs- und DeNox-Anlagen lassen aufgrund der abgeschätzten Gesamtmengen die Entwicklung von entsprechenden Vermeidungstechniken nicht vordringlich erscheinen. Es ist davon auszugehen, daß andere - insbesondere biogene Quellen - in weitaus höherem Maße zu den Gesamtemissionen beitragen.

Methodisch gesehen, ist festzustellen, daß die jeweils ausgewiesenen Kostenangaben nur bedingt vergleichbar sind. Dies ist zum einen durch die Zitierung von Literaturangaben, zum anderen durch verschiedene Rechenmethoden bedingt. Der Vergleich einzelner Studienpakete untereinander erfordert eine methodische Anpassung.

Abschließend sei darauf hingewiesen, daß im Studienpaket A5 - wie in allen anderen Studienkomplexen auch - jeweils Einzelverfahren und Einzelmaßnahmen mehr oder weniger isoliert betrachtet wurden. Ihre Einordnung ist nur möglich, wenn szenariohaft alle denkbaren CO₂-Minderungsmaßnahmen konsistent bewertet werden. Dies steht noch aus und erfordert eine weitere systemare Untersuchung.

Studienverzeichnis zum Studienkomplex A.5**A.5.1: Verkehr**

- a) **Möglichkeiten und Potentiale neuer Kraftstoffe und Antriebe im Verkehr,**
H. Heitland, H. Hiller, H. Menrad, Ingenieurbüro Prof. Dr.-Ing. Heitland, Wolfsburg, 31.10.1989.

- b) **Neue Verkehrssysteme, Substitution bzw. Verlagerung von Verkehrsleistungen, Verkehrsplanung sowie Umlenkung von Verkehrsströmen,**
G. Steierwald, H. Anduszies, Th. M. Frank, W. Vogt, M. Wacker, Institut für Straßen- und Verkehrswesen (ISV) Stuttgart, 31.10.1989.

A.5.2: Energiespeicher, neue Sekundärenergieträger und Nutzungssysteme (stationäre Anwendungen),

- a) **Energiespeicher (ohne Wasserstoff),**
W. Burkner, C. Voigt, Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Kraftwerkstechnik München, Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DLR) Stuttgart, 31.10.1989.

- b) **Wasserstoff**
 - 1. **Erzeugung, Transport, Speicherung, Nutzung,**
J. Nitsch, A. Siegel, C. Voigt, R. Wurster, Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DLR) Stuttgart, Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBS) Ottobrunn, 31.10.1989.
 - 2. **Wasserstoff aus fossilen Energieträgern,**
U. Birnbaum, D. Martinsen, M. Walbeck, Kernforschungsanlage (KFA) Jülich GmbH, 30.10.1989.

- c) **Sonstige Energieträger,**
K. Düring, H.-G. Eickhoff, M. Walbeck, Kernforschungsanlage
(KFA) Jülich GmbH, 30.10.1989.
- A.5.3: Entsorgungsmöglichkeiten von Kohlendioxid,**
W. Seifritz, Institut für Kernenergetik und Energiesysteme
(IKE) Stuttgart, 30.10.1989.
- A.5.4: Möglichkeiten der Emissionsminderung von Stickoxiden und
anderen ozonbildenden Spurengasen,**
A. Obermeier, A. Voß, Institut für Kernenergetik und
Energiesysteme (IKE) Stuttgart, 31.10.1989.
- A.5.5: Systemare Einordnung, Gesamtpotentiale, Hemmnisse,**
U. Fahl, P. Liebscher, W. Seifritz, A. Voß, Institut für
Kernenergetik und Energiesysteme (IKE) Stuttgart,
30.11.1989.