

Wirkungsanalysen im Hinblick auf CO<sub>2</sub>-Emissionen im Verkehr

WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT BEIM BUNDESMINISTER FÜR VERKEHR

– Gruppe B Verkehrstechnik – Juli 1991

## Gliederung

v. st. a  
v. gg. b

1. Probleme und Ziele
2. Trendszenario
3. Verringerung und Verlagerung von Verkehrsleistung
  - 3.1 Personenverkehr
  - 3.2 Güterverkehr
4. Effizientere Abwicklung und technische Möglichkeiten im Straßenverkehr
  - 4.1 Maßnahmen an Fahrzeugen
  - 4.2 Maßnahmen an der Infrastruktur
  - 4.3 Maßnahmen an der Steuerung
5. Effizientere Abwicklung und technische Möglichkeiten im übrigen Verkehr
  - 5.1 Schienenverkehr
  - 5.2 Luftverkehr
  - 5.3 Binnenschiffsverkehr
6. Zusammenstellung und Rahmenbedingungen für die Erschließung der CO<sub>2</sub>-Reduktionspotentiale

## 1. Probleme und Ziele

In der öffentlichen Diskussion spielt die Problematik des zusätzlichen anthropogen bedingten Treibhauseffekts, durch den eine Erwärmung der Erdatmosphäre im Laufe des nächsten Jahrhunderts erwartet wird, die die üblichen Klimaschwankungen deutlich übertrifft, derzeit eine herausragende Rolle. Zu diesem Treibhauseffekt trägt Kohlendioxid weltweit zu 50% bei. Weitere sogenannte Treibhausgase sind die FCKW (Anteil 22%), Methan (13%), Ozon der Troposphäre (7%), Distickstoffoxid (N<sub>2</sub>O) (5%) und stratosphärischer Wasserdampf (H<sub>2</sub>O) (3%).

Der Beitrag des Verkehrs – und zwar des Straßen-, Schienen-, Luft- und Schiffsverkehrs – an den jeweiligen Gesamtemissionen verschiedener Spurengase in der Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) ist Tabelle 1<sup>1)</sup> zu entnehmen. Von den in dieser Tabelle genannten

Dem Wissenschaftlichen Beirat beim Bundesminister für Verkehr – Gruppe Verkehrstechnik – gehören an: Prof. Dipl.-Ing. Gerhard Voß (Vorsitzender), Hannover, Prof. Dr.-Ing. Manfred Fricke, Berlin, Prof. Dr.-Ing. Gerhard Heimerl, Stuttgart, Prof. Dr.-Ing. Jürgen Helling, Aachen, Prof. Dr.-Ing. Günter Hoffmann, Berlin, Prof. Dr.-Ing. Peter Kirchhoff, München, Prof. Dr.-Ing. Rolf Kracke, Hannover, Prof. Dr.-Ing. Manfred Mutschke, Braunschweig, Prof. Dr.-Ing. Klaus Pierick, Aachen, Prof. Dr.-Ing. Wilfried Ruske, Braunschweig, Prof. Dr.-Ing. Gerd Steierwald, Stuttgart.

1) Alle Aussagen beziehen sich auf das Gebiet der BR Deutschland ohne die neuen Länder.

Spurengasen tragen Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) und Methan (CH<sub>4</sub>) unmittelbar zum zusätzlichen Treibhauseffekt bei, während die Stickoxide (NO<sub>x</sub>), Kohlenmonoxid (CO) und die flüchtigen organischen Verbindungen ohne Methan (NMVOC) neben anderen Spurengasen indirekt wirken, indem sie zur Bildung troposphärischen Ozons (O<sub>3</sub>) beitragen, das wiederum als Treibhausgas wirkt.

Von den letztgenannten Schadgasen rückten vor allem das Kohlenmonoxid und die Stickoxide bereits in früheren Jahren in den Blickpunkt öffentlichen Interesses, da sie – im Unterschied zu Kohlendioxid – in der Atemluft gefährliche Schadstoffe darstellen. Beide Schadstoffe entstehen vor allem bei der motorischen Verbrennung fossiler Energieträger. Entsprechend war bzw. ist der Anteil insbesondere des Straßenverkehrs an den Gesamtemissionen der Bundesrepublik relativ hoch. Während die Kohlenmonoxidemissionen des Straßenverkehrs durch Veränderungen der Motortechnik von ihrem Höchststand von 9,5 Mio t in 1972 auf 6,2 Mio t in 1988 gesenkt werden konnten, stiegen – nicht zuletzt bedingt durch die Maßnahmen zur Reduzierung der Kohlenmonoxidemissionen – die NO<sub>x</sub>-Emissionen des Straßenverkehrs kontinuierlich auf 1,6 Mio t in 1988 an. Für diesen Schadstoff läßt die Einführung des geregelten 3-Wege-Katalysators beim Pkw eine erhebliche Reduktion der Emissionen erwarten. Offen ist allerdings, wie die zunehmend an Bedeutung gewinnenden NO<sub>x</sub>-Emissionen des Straßengüterverkehrs verringert werden können.

Tabelle 1:

Anteil des Verkehrs an den Emissionen einzelner Spurengase in der Bundesrepublik Deutschland bezogen auf das Jahr 1987 (Quelle: Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“)

	Bundesrepublik Deutschland Gesamt		Verkehr	
	(Mio t)	(%)	(Mio t)	(%)
CO <sub>2</sub>	715,0	100	159,0	22
CH <sub>4</sub>	1,8	100	0,2	11
NMVOC	1,5	100	1,2	80
NO <sub>x</sub>	2,6	100	1,8	69
CO	8,0	100	6,4	80

Aufgrund seines hohen Anteils am zusätzlichen Treibhauseffekt wird das Kohlendioxid vielfach als Leitkomponente zur Beurteilung von Maßnahmen zur Reduktion der Emissionen klimarelevanter Spurengase herangezogen. Die verkehrsbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen trugen 1987 mit 22 % (vgl. Tab. 1) zu den energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen bei. Diese 159 Mio t umfassen bereits diejenigen Emissionen, die bei der Erzeugung und der Bereitstellung der Energie anfallen. Die Tabellen 2 und 3 zeigen die Aufteilung dieser Emissionen auf die einzelnen Verkehrsmittel im Personen- und Güterverkehr.

Diesen Angaben zu den Emissionen liegen die folgenden Verkehrsleistungen im Jahr 1987 zugrunde:

– Personenverkehr:	750 Mrd Pkm
davon:	
– Pkw/Kombi/mot. Zweiräder:	533 Mrd Pkm (71 %)
– Busse/Straßen-, Stadt- und U-Bahnen:	79 Mrd Pkm (11 %) <sup>1)</sup>
– Eisenbahnen:	40 Mrd Pkm (5 %)
– Flugzeuge:	98 Mrd Pkm (13 %)
– Güterverkehr:	268 Mrd tkm
davon:	
– Lkw:	145 Mrd tkm (54 %)
– Eisenbahnen:	58 Mrd tkm (22 %)
– Flugzeuge:	5 Mrd tkm (2 %)
– Binnenschiffe:	50 Mrd tkm (19 %)
– Rohrfernleitung:	10 Mrd tkm (4 %)

Tabelle 2:

Emissionen klimarelevanter Spurengase im motorisierten Personenverkehr der Bundesrepublik Deutschland (Quelle: Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“); Zahlen in [] Anteil der Busse

	Pkw/Kombi/ mot. Zweiräder	Busse/Straßen-, Stadt- u. U-Bahnen	Eisen- bahnen	Flugzeuge	Personen- verkehr insges.
CO <sub>2</sub>	97000 (81 %)	4000 [3300] (3 %)	3100 (3 %)	15300 (13 %)	119400
CH <sub>4</sub>	150 (81 %)	6 [5] (3 %)	9 (5 %)	20 (11 %)	185
NMVOC	1080 (97 %)	15 (1 %)	3 (0 %)	10 (1 %)	1108
NO <sub>x</sub>	1120 (89 %)	55 [54] (4 %)	18 (1 %)	69 (1 %)	1262
CO	5960 (99 %)	19 [18] (0 %)	5 (0 %)	27 (1 %)	6011

[kt]

1) Davon 68 Mrd Pkm mit Bussen.

Tabelle 3:

Emissionen klimarelevanter Spurengase im Güterverkehr der Bundesrepublik Deutschland (Quelle: Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“)

	Lkw	Eisenbahnen	Binnenschiffe	Rohrfernleitung	Flugzeuge	Güterverkehr insges.
CO <sub>2</sub>	30052 (75 %)	2364 (6 %)	2071 (5 %)	101 (0 %)	5450 (14 %)	40038
CH <sub>4</sub>	43 (75 %)	4 (7 %)	3 (5 %)	0 (-)	7 (12 %)	57
NMVOG	120 (93 %)	1 (1 %)	4 (3 %)	0 (-)	4 (3 %)	129
NO <sub>x</sub>	516 (89 %)	13 (2 %)	25 (4 %)	0 (-)	25 (4 %)	579
CO	350 (95 %)	3 (1 %)	8 (2 %)	0 (-)	7 (2 %)	368

[kt]

Die der Berechnung der Luftverkehrsleistung zugrunde liegende Definition umfaßt die gesamte Flugstrecke bis zum ersten Zielflughafen bzw. vom letzten Startflughafen im Ausland.

Zur Reduktion der weltweiten Emissionen klimarelevanter Schadstoffe sprach die „World Conference on the Changing Atmosphere, Implications for Global Security“, die im Juni 1988 in Montreal stattfand, die Empfehlung aus, die weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen, bezogen auf 1987 bis 2005, um etwa 20 % und die Emissionen von CO<sub>2</sub> und anderer Spurengase bis 2050 um über 50 % zu reduzieren. Auf der letzten Weltklimakonferenz, die Ende 1990 in Genf stattfand, wurde sogar eine Reduktion um 60 % bis 2050 für notwendig gehalten, um den zusätzlichen Treibhauseffekt zumindest einzudämmen.

Vor diesem Hintergrund fordert die Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ des Deutschen Bundestages, die gesamten energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Bundesrepublik Deutschland bis 2005 um 30 % (215 Mio t) und bis 2050 um 80 % (572 Mio t) zu reduzieren, ebenfalls bezogen auf 1987. Auf der Grundlage des von ihr in Auftrag gegebenen Studienprogramms, in dem aufbauend auf der Ausgangslage des Jahres 1987 in allen Bereichen des Energieverbrauchs der Bundesrepublik Deutschland Maßnahmen zur Reduzierung der Emissionen klimarelevanter Spurengase analysiert wurden, legte die Kommission ein Reduktionsziel für den Verkehr von 10 (Szenario Energiepolitik) bis 16 % (Szenario Kernenergie-Ausstieg) bis zum Jahr 2005 fest. Im Szenario Kernenergie-Ausbau ist keine Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Verkehrsbereich bis 2005 notwendig. Zusätzliche Reduktionen auch im Verkehrsbereich können sich dabei durch Wirkungsgradverbesserungen bei der Energieerzeugung und Energiebereitstellung ergeben.

Das Bundeskabinett hat am 13. Juni 1990 beschlossen, die energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen der Bundesrepublik Deutschland ebenfalls gegenüber 1987 bis zum Jahr 2005 um 25 % zu reduzieren. Eine genauere Aufteilung des Reduktionsziels auf die einzelnen Verursacherbereiche ist dabei noch nicht festgelegt.

Die genannten Zielsetzungen sind durch unterschiedliche Strategien und Maßnahmen zu erreichen. Sie lassen sich im wesentlichen gliedern in

- emissionsarmen Betrieb der Verkehrsmittel durch Verbesserung am Fahrzeug, am Fahrweg und in der Verkehrssteuerung,
- Einführung regenerativer oder CO<sub>2</sub>-freier Kraftstoffe,
- Verlagerung von Verkehrsleistung auf umweltfreundliche Verkehrsmittel und
- Vermeidung von Verkehrsleistung mit motorisierten Verkehrsmitteln.

Nach den bisherigen Untersuchungen werden den Hauptanteil zur Emissionsminderung technische Verbesserungen an den einzelnen Fahrzeugen beitragen. So sieht auch die Enquete-Kommission im Bereich der Pkw und Flugzeuge technische CO<sub>2</sub>-Verminderungspotentiale durch rationelle Energieverwendung von 50 bis 60 %, bei Lkw und Bussen von 15 bis 25 %. Diese technischen Potentiale sind allerdings nur ausschöpfbar, wenn sie durch entsprechende flankierende Maßnahmen unterstützt werden. Andernfalls ist zu befürchten, daß, ähnlich der Entwicklung seit Ende der siebziger Jahre, durchaus beachtliche technische Fortschritte zur Verringerung des Kraftstoffverbrauchs eines einzelnen Pkw durch den Trend zu höher motorisierten Modellen und die wachsende Verkehrsleistung letztendlich nicht zu einer Verringerung des Gesamtverbrauchs an fossilen Energieträgern im Straßenverkehr führen werden.

## 2. Trendszenario

Im Rahmen der Studien für die Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ wurde für das Jahr 2005 ein Trendszenario berechnet, das von einem weitgehend einflusslosen Selbstlauf des Systems ausgeht. Absehbare Entwicklungen wurden jedoch berücksichtigt. Dies umfaßt auch Maßnahmen, die z. T. einen erheblichen Einfluß auf den Energiebedarf und die Emissionen klimarelevanter Schadgase im Verkehrsbereich haben können. Hierzu gehören z. B. die vollständige Einführung des geregelten 3-Wege-Katalysators bei allen neuen Pkw, die Einführung einer Geschwindigkeitsbeschränkung von 130 km/h auf den Bundesautobahnen, eine Erhöhung der Mineralölsteuer um real 50 Pfennige pro Liter gegenüber 1987, der Aufbau eines europäischen Hochgeschwindigkeits-Schienen-Netzes sowie die weitere Förderung des öffentlichen Personennahverkehrs und des Kombinierten Güterverkehrs. Ungeachtet dieser Maßnahmen wird unterstellt, daß die Mobilitätswünsche der Bevölkerung und der Transportbedarf der Wirtschaft ungehindert wachsen. Ausdrücklich ausgeschlossen waren Maßnahmen, denen derzeit ohne Beachtung des Klimaproblems wenig Realisierungschancen eingeräumt werden können (z. B. die Einführung strenger Kraftstoffverbrauchsgrenzwerte für Pkw). Dem Szenario liegt entsprechend der DIW-Prognose eine Bevölkerungszahl von 65 Mio Einwohnern zugrunde.

In diesem Trendszenario 2005 erhöhen sich die Verkehrsleistung des Personenverkehrs gegenüber 1987 um 37 % und dementsprechend der CO<sub>2</sub>-Ausstoß des Personenverkehrs um 23 %. Die Verkehrsleistung des Güterverkehrs wächst bis 2005 gegenüber 1987 um 34 % mit einer Erhöhung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes des Güterverkehrs um 41 %. Insgesamt erhöht sich der CO<sub>2</sub>-Ausstoß im Trendszenario 2005 gegenüber dem Bezugsjahr 1987 um 28 %. Dies ist sowohl im Personen- als auch im Güterverkehr auf den starken Zuwachs der Verkehrsleistung im Straßen- und Luftverkehr zurückzuführen. Die Verkehrsleistung der jeweils alternativen öffentlichen

Verkehrsmittel stagniert auf dem Niveau von 1987 bzw. verzeichnet zum Teil geringe Zuwächse, die aber weit unter dem Gesamtwachstum des Verkehrs liegen. Damit verringert sich der Anteil des Öffentlichen Straßenpersonenverkehrs und der Stadt- und U-Bahnen an der gesamten Personenverkehrsleistung von 11 % in 1987 auf 8 % im Trendszenario 2005. Der Anteil der Eisenbahnen nimmt von 5 % (1987) auf 4 % (2005) ab. Im Güterverkehr sinken der Anteil der Eisenbahnen an der gesamten Güterverkehrsleistung von 22 % in 1987 auf 19 % in 2005 und der Anteil der Binnenschifffahrt von 19 % (1987) auf 17 % (2005).

Gegenüber diesem Trendszenario für das Jahr 2005 wird die Verkehrsleistung durch die Einbeziehung der neuen Länder und die Öffnung der Grenzen nach Osten noch stärker wachsen und sich die Situation in bezug auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen weiter verschlechtern.

Im Unterschied zu den CO<sub>2</sub>- und den Methanemissionen sinken die Emissionen der Kohlenwasserstoffe (ohne Methan) (ca. –40 %, nur Personenverkehr ca. –70 %), der Stickoxide (ca. –40 %, nur Personenverkehr ca. –60 %) und des Kohlenmonoxids (ca. –70 %, nur Personenverkehr ca. –75 %). Dies ist auf die unterstellte fast vollständige Einführung des geregelten 3-Wege-Katalysators bis zum Jahr 2005 zurückzuführen.

### 3. Verringerung und Verlagerung von Verkehrsleistung

#### 3.1 Personenverkehr

Verkehr entsteht, wenn Aktivitäten an unterschiedlichen Orten ausgeübt werden. Die Verkehrsleistung wird dabei sowohl von der Zahl als auch von der Weite der Ortsveränderung bestimmt. Verkehr wird verringert, wenn sich die Zahl der Fahrten und/oder die Weglänge der Ortsveränderungen verringert. Verkehr wird verlagert, wenn ein anderes Verkehrsmittel benutzt wird.

Das Potential für eine Verringerung und Verlagerung von Verkehr ist für die verschiedenen Verkehrszwecke unterschiedlich groß. Aus diesem Grunde muß bei seiner Abschätzung nach Verkehrszwecken differenziert werden. Folgende Verkehrszwecke mit den genannten Anteilen an der Verkehrsleistung (1986, Altländer der Bundesrepublik) werden betrachtet:

- Berufsverkehr (rd. 20 %),
- Ausbildungsverkehr (rd. 4 %),
- Einkaufs- und Erledigungsverkehr (rd. 10 %),
- Geschäfts- und Dienstreiseverkehr (rd. 13 %),
- Freizeitverkehr (rd. 44 %),
- Urlaubsverkehr (rd. 9 %).

#### *Berufsverkehr*

Potential für eine Verringerung der Zahl der Fahrten von Personen im Berufsverkehr ist kaum vorhanden:

- Eine Verringerung der Zahl der Fahrten von Personen im Berufsverkehr durch teilweises Arbeiten zu Hause mit neuen Kommunikationstechniken ist kaum zu erwarten; die Führungsvorteile der Arbeit am bisherigen Arbeitsplatz überwiegen die Vorteile eines kurzen Weges bei weitem.

- Die Verkürzung der Arbeitszeit kann zu einer Verringerung der Zahl der Fahrten führen. Es ist denkbar, daß es zu einer 4-Tage-Woche kommt, bei der die 4 Tage im Wechsel an 6 Tagen (freier Sonntag) abgeleistet werden. Damit würden sich mehrere Erwerbstätige einen Arbeitsplatz teilen. Rechnerisch führt dies zu einer Verringerung der Wege um 20 % und einem Abbau der täglichen Verkehrsspitze. Aufgrund von Veränderungen in der Erwerbsstruktur (mehr 1-Personen-Haushalte, stärkere Erwerbstätigkeit der Frauen) wird es jedoch zu einer Zunahme der Erwerbstätigen bei einer gleichbleibenden oder sogar abnehmenden Anzahl von Arbeitsplätzen kommen. Der Einsparungseffekt durch die verringerte Wochenarbeitszeit geht damit weitgehend wieder verloren. Eine wenn auch geringe Einsparung von Fahrten wird es durch weniger Arbeitstage infolge noch zunehmenden Urlaubs geben. Die heute zu beobachtende Abnahme der Lebensarbeitszeit (längere Ausbildung, frühere Pensionierung) dürfte zukünftig eher wieder rückläufig sein.

Ebenso ist das Potential für eine Verringerung der Weglängen im Berufsverkehr gering:

- Durch die Verlagerung von Wohnstandorten an den Stadtrand und ins Umland der Städte sowie die berufliche Spezialisierung sind die Wege zwischen Wohnung und Arbeitsstätte immer größer geworden. Die steuerliche Absetzbarkeit der Kosten für den Weg zur Arbeit hat diese Entwicklung unterstützt. Die Verlängerung der Arbeitswege ist noch nicht zum Abschluß gekommen und läßt sich in absehbarer Zeit auch nicht rückgängig machen. Eine Siedlungspolitik, die das Wohnen in der Stadt fördert, kann die zentrifugale Entwicklung der Wohnstandorte nur geringfügig kompensieren. Eine etwaige Streichung der steuerlichen Absetzbarkeit der Wegekosten, die vor allem die Bewohner im Umland treffen würde, wird diese Entwicklung kaum oder nur in längeren Zeiträumen beeinflussen.
- Durch eine Verstärkung des Mitfahrens und Mitnehmens kommt es zu einer Verringerung der Zahl der Kfz-Fahrten. Mit Hilfe steuerlicher Anreize kann diese Entwicklung gefördert werden. Insgesamt darf die Wirkung dieser Entwicklung auf den Gesamtverkehr aber nicht überschätzt werden.

Eine Verlagerung des Pkw-Verkehrs auf den ÖPNV erscheint dagegen möglich:

- Aufgrund der zunehmenden Schwierigkeiten im fließenden und ruhenden Straßenverkehr und bei einem gleichzeitig guten Angebot im ÖPNV wird im Berufsverkehr in die Kernzonen der Innenstadt heute teilweise schon ein ÖPNV-Anteil von 80 % erreicht. Ein derart hoher Anteil ist jedoch nur in einigen weiteren sehr großen Städten erreichbar; der ÖPNV-Anteil und damit das Verlagerungspotential in den kleineren Großstädten und in den Mittelstädten ist geringer. Diese Entwicklung kann durch eine Parkraumbewirtschaftung, eine Begrenzung der zulässigen Parkdauer, eine Verringerung der Zahl der Stellplätze und eine generelle Verbesserung des ÖPNV-Angebots unterstützt werden. Eine Verlagerung im Berufsverkehr vom Pkw auf den ÖPNV erfordert jedoch eine erhebliche Erhöhung der Leistungsfähigkeit im ÖPNV. Probleme bereiten die privaten Stellplätze in den Innenstädten. Bei generell hohen Kosten für das Parken in der Innenstadt ist jedoch zu erwarten, daß die Parkplätze den Berufstätigen nicht mehr ohne weiteres kostenlos zur Verfügung gestellt werden. Außerdem erscheint es möglich, die kostenlose Bereitstellung von Parkplätzen als geldwerten Vorteil zu versteuern. Maßnahmen im fließenden Straßenverkehr (z. B. Zufahrtssperren, Zuflußdosierungen) wirken nicht allein auf den Berufsverkehr, sondern

treffen auch andere Verkehrszwecke, die nicht oder nur begrenzt auf den ÖPNV verlagert werden können (Wirtschafts- und Einkaufsverkehr). Durch die Einrichtung von P + R-Anlagen am Stadtrand im Schnittpunkt von Einfallstraßen und ÖPNV-Linien mit hoher Bedienungshäufigkeit läßt sich ein Teil des Berufsverkehrs aus der Region, für den eine attraktive Haus-Haus-Bedienung im ÖPNV nicht geschaffen werden kann, auf einem Teil des Weges auf den ÖPNV verlagern. Bei einem schlechten ÖPNV-Angebot im Umland besteht aber die Gefahr, daß es in einem gewissen Umfang auch zu Verlagerungen vom ÖPNV zum Pkw kommt.

- Die Einführung gleitender Arbeitszeiten fördert die Benutzung des Pkw, da der Berufstätige dadurch in die Lage versetzt wird, den Verkehrsspitzen auszuweichen und zu verkehrsrärmeren Zeiten zu fahren. Dieser möglichen Rückverlagerung vom ÖPNV auf den Pkw kann ebenfalls durch eine Parkraumbewirtschaftung begegnet werden.
- Die Maßnahmen Verbesserung des ÖPNV-Angebots und Restriktionen gegenüber dem Pkw-Verkehr müssen durch Maßnahmen der Bewußtseinsbildung unterstützt werden, damit die Betroffenen die Restriktionen verstehen und akzeptieren.

#### *Ausbildungsverkehr*

Im Ausbildungsverkehr erscheint eine Verringerung der Verkehrsleistung wie auch eine Verlagerung vom Pkw auf andere Verkehrsmittel in bedeutsamem Umfang nicht möglich.

Durch die Bildung von Mittelpunktschulen und Ausbildungszentren sind die Wege im Ausbildungsverkehr länger geworden. Diese Entwicklung ist noch immer nicht zum Stillstand gekommen und läßt sich kaum rückgängig machen. Eine Verringerung des Ausbildungsverkehrs ergibt sich daher lediglich durch eine mit den geringen Geburtenraten verbundene Abnahme der Zahl der Auszubildenden.

Bei der Verkehrsmittelbenutzung ist zu unterscheiden zwischen Personen unter 18 Jahren (Schüler, Lehrlinge), die keinen Pkw benutzen dürfen (ab einem Alter von 16 Jahren darf allerdings Moped gefahren werden) und Personen über 18 Jahren (Studenten), die zu einem großen Teil motorisiert sind.

Schüler mit kurzen Schulwegen gehen entweder zu Fuß oder fahren Fahrrad. Schüler mit längeren Schulwegen sind auf die Benutzung des ÖPNV angewiesen. Mit der fortschreitenden Zweitmotorisierung nimmt der Schüler-Bringdienst mit Pkw zu. Damit entstehen auch im Schülerverkehr Pkw-Fahrten, die allerdings häufig durch Mitnahmegemeinschaften begrenzt werden. Hier ist in Zukunft eher mit einer Zunahme als mit einer Verringerung zu rechnen. Ursache für den Bringdienst sind häufig ein schlechtes ÖPNV-Angebot oder ein schlechtes Angebot an sicheren Fahrradwegen. Verbesserungen bei diesen Angeboten können die Zunahme des Schülerbringdienstes begrenzen. Von Auszubildenden über 18 Jahren wird schon deshalb häufig der Pkw benutzt, weil dadurch eine neu gewonnene Freiheit demonstriert werden kann.

#### *Einkaufs- und Erledigungsverkehr*

Eine Verringerung des Einkaufs- und Erledigungsverkehrs ist angesichts des hohen und immer noch steigenden Lebensstandards nicht zu erwarten. Unwahrscheinlich ist aber auch eine stärkere Zunahme der Zahl der Einkaufs- und Erledigungsvorgänge.

Im Hinblick auf die Weglänge und die Verkehrsmittelwahl muß zwischen folgenden Gewohnheiten unterschieden werden:

- Einkauf von Gütern des täglichen Bedarfs und Durchführung kleinerer Erledigungen im Wohngebiet; überwiegend zu Fuß oder mit dem Fahrrad.
- Einkauf des Wochenbedarfs an Lebensmitteln sowie von Möbeln und von Baubedarf in Verbrauchermärkten am Stadtrand oder im Umland; die Benutzung des Pkw ist nahezu immer zwingend.
- Einkauf von höherwertigen Gütern und Durchführung größerer Erledigungen im Zusammenhang mit der Berufstätigkeit in der Innenstadt; Benutzung desselben Verkehrsmittels wie beim Weg zur Arbeit.
- Einkauf von höherwertigen Gütern und Durchführung größerer Erledigungen in der Innenstadt durch gesonderte Fahrten; hier stehen ÖPNV und Pkw im Wettbewerb.

Infolge der Konzentration von Einkaufs- und Dienstleistungseinrichtungen auf größere Einheiten und der schlechten Erreichbarkeit der Innenstadt mit dem Pkw sind Verbrauchermärkte am Stadtrand und im Umland entstanden. Diese Entwicklung ist noch nicht zum Abschluß gekommen. Dadurch steigen die Weglänge und die Benutzung des Pkw. Der Entwicklung, daß auch höherwertige Güter in die Verbrauchermärkte eindringen, muß durch eine Attraktivitätssteigerung des Zentrums Einhalt geboten werden.

Einkäufe und Erledigungen im Zentrum werden häufig mit der Berufstätigkeit verbunden, so daß keine gesonderten Wege entstehen und in stärkerem Maße der ÖPNV benutzt wird. Zur Stärkung des Standorts Innenstadt ist jedoch erforderlich, die Zugänglichkeit der Geschäfte und Dienstleistungseinrichtungen für den Einkaufs- und Erledigungsverkehr mit dem Pkw in vertretbarem Rahmen aufrecht zu erhalten (gegenteilige Strategie wie im Berufsverkehr).

Die Benutzung des ÖPNV für Einkäufe scheitert oft an der Schwierigkeit des Gepäcktransports. Hier müssen die Lieferdienste, die heute schon teilweise vorhanden sind, verbessert werden. Dabei ist es notwendig, kostengünstige Kettendienste einzurichten, damit nicht gleich viel Kfz-Verkehr in umgekehrter Richtung entsteht.

Das Maß der möglichen Verlagerung vom Pkw auf den ÖPNV hängt von der Größe der Städte ab: In kleineren Städten ist die mögliche Verlagerung wegen der geringen Zentralität der Innenstadt sowie der konkurrierenden Standorte im Umland und in den Nachbarstädten nur gering. Hinzu kommt, daß der Verbesserung des ÖPNV enge Grenzen gesetzt sind. In größeren Städten kann eine Verlagerung von bis zu 20 % gegenüber heute erreicht werden, weil die entgegenstehenden Faktoren eine geringere Wirkung haben.

#### *Geschäfts- und Dienstreiseverkehr*

Dienstliche und geschäftliche Erledigungen werden im Nah- und im Fernverkehr zum überwiegenden Teil mit dem Pkw durchgeführt. Nur ca. 20 % der Verkehrsleistung entfallen auf die öffentlichen Verkehrsmittel, einschließlich Luftverkehr. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, daß ein großer Teil von Fahrten sowohl im Nah- wie im Fernverkehr im Rahmen von Fahrtenketten durchgeführt wird, bei denen in aller Regel heute nur der Pkw benutzt wird. Er bietet sich im Rahmen dienstlicher und geschäftlicher Erledigungen vor allem auch dann an,

wenn gleichzeitig kleinere Güter mittransportiert oder Mitfahrer mitgenommen werden müssen.

Die zunehmende Arbeitsteilung wird den Umfang der Fahrten zur dienstlichen und geschäftlichen Erledigung sowohl hinsichtlich der Anzahl als auch hinsichtlich der Fahrtweite erhöhen. Die Kompensation durch Telekommunikation wird nur gering sein. Im Nahverkehr sind keine größeren Vermeidungs- und Verlagerungspotentiale zu erwarten.

Im Fernverkehr haben die schlechten Übergangsmöglichkeiten zwischen den Verkehrsmitteln eine maßgebende Bedeutung für die Benutzung des privaten Pkw als dem flexibelsten Verkehrsmittel. Wenn es gelingt, die Übergangswiderstände drastisch zu reduzieren, lassen sich Geschäfts- und Dienstreisen mit mittleren und großen Reiseweiten den Verkehrsmitteln je nach ihrer Leistungscharakteristik besser zuordnen. Große Knotenpunktsentfernungen werden dann vorrangig mit der schnellen Eisenbahn überbrückt. Ein einfaches und kostengünstiges Umsteigen am Einstiegs- und Ausstiegsbahnhof erhöht die Akzeptanz der Eisenbahn. Ein solches Angebot muß selbstverständlich auch für andere Reisezwecke zur Verfügung stehen.

Das einfache Umsteigen bezieht sich hierbei nicht nur auf das Auto, sondern auch auf den öffentlichen Personennahverkehr. Ergänzt werden muß ein solches Angebot durch eine verbesserte Information über den ÖPNV sowie eine einfache Erhebung der Beförderungsentgelte.

Es kann festgehalten werden, daß eine Verringerung der Zahl der Geschäfts- und Dienstreisen weder im Nah- noch im Fernverkehr zu erwarten ist. Eine Verlagerung von Anteilen des MIV und des Flugzeuges auf die umweltschonendere Eisenbahn wird für den Fernverkehr als relativ bedeutend eingeschätzt. Wie hoch solche Verlagerungen sein können, läßt sich am Beispiel des französischen TGV vermuten, dessen Fahrgäste zu zwei Dritteln frühere Pkw- und Flugzeugbenutzer waren. Ob ein solches Potential genutzt werden kann, hängt ganz wesentlich von Qualitätsverbesserungen bei der Eisenbahn („doppelt so schnell wie das Auto und halb so schnell wie das Flugzeug“) und erheblichen Zugangs erleichterungen ab.

#### *Freizeit- und Urlaubsverkehr*

Unter Freizeitverkehr wird der Freizeitverkehr an Werktagen und Wochenenden verstanden, während der Urlaubsverkehr Freizeifahrten mit fünf und mehr Tagen Dauer umfaßt.

Der *Freizeitverkehr* konzentriert sich vornehmlich auf den Pkw-Verkehr: 88 % aller motorisierten Fahrten werden hierbei mit dem Pkw durchgeführt, was einer Verkehrsleistung von 84 % entspricht. Eine Zunahme der Mobilität ist insbesondere im Freizeitverkehr zu beobachten. Besuche von Veranstaltungen, Verwandten- und Bekanntenbesuche sowie Wochenenderholungsfahrten konzentrieren sich mengenmäßig auf den Nahbereich und die Region. Wegen der Dispersität der meisten Ziele kann der ÖPNV in aller Regel kein geeignetes Angebot bieten, das der freizügigen Disposition des Pkw nahe kommt. Durch Förderung von Naherholungsgebieten können allerdings Fahrtweiten verkürzt und teilweise sogar die Pkw-Benutzung durch das Fahrrad und durch zu-Fuß-Gehen ersetzt werden. Auch die Einschränkung der Zugänglichkeit bestimmter Zielgebiete aus ökologischen Gründen kann zu einer geringfügigen Veränderung der Verkehrsmittelnutzung führen. Insgesamt sind jedoch Potentiale zur Verringerung

oder Verlagerung von Fahrten durch eine andere Organisation (z. B. Mitnahme von Bekannten ins Theater, Theatersammeltaxen, Disco-Busse, P + R) kaum in nennenswertem Umfang gegeben.

Im *Urlaubsverkehr* sind einer Verringerung und Verlagerung von Fahrten ebenfalls enge Grenzen gesetzt. Es ist davon auszugehen, daß sich die Zahl der Urlaubsfahrten nur unwesentlich in Zukunft erhöhen wird. Diese Stagnation auf hohem Niveau ergibt sich durch eine zunehmende Verwendung von Teilen der Jahresfreizeit auf die Wochenfreizeit, wodurch sich beim Freizeitverkehr weitere Zuwächse ergeben.

Wegen der großen Bedeutung des Urlaubs für die Bevölkerung sowie vorhandener Präferenzen für Urlaubsorte bzw. -länder, die relativ stabil sind, erschließt sich bei diesem Reisezweck praktisch kein Potential zur Verringerung und Verlagerung des Verkehrs. Die Eisenbahn stellt nur bedingt Konkurrenz zum Pkw oder zum Flugzeug dar.

#### 3.2 Güterverkehr

Der Güterverkehr ist Teil des gesamten Produktions- und Konsumtionsprozesses. Produktionsprozesse und auch Verbrauchergewohnheiten haben sich im Laufe der Zeit erheblich verändert. Unterscheidet man den Güterverkehr nach der Art der Güter, so haben sich deutliche Umschichtungen von Massengütern, wie z. B. Kohle, Steine und Erden, Erze, Düngemittel zu kleineren und in der Regel hochwertigeren Stückgütern ergeben. Dieser Veränderungsprozeß ging zu Lasten der Eisenbahn und hat die Flexibilität des Straßengüterverkehrs voll ausgenutzt. Der Transportkostenanteil an den Kosten der Güter ist ständig gesunken. Hierdurch wurde die Arbeitsteilung in der Produktion zusätzlich begünstigt, bei der erhebliche Teile der Lagerhaltung auf viele Standorte (der Zulieferer) und auf die Straße (den Transportweg) verlagert werden. Die Just-in-time-Produktion erfordert ein leistungsfähiges Verkehrssystem sowie eine funktionierende Logistikunterstützung. Ein preisgünstiges Verkehrssystem Straße und eine schon weitreichende Ausschöpfung der logistischen Möglichkeiten haben bei der Flexibilität des Lastkraftwagens den Straßengüterverkehr überproportional ansteigen lassen.

Da der Lkw am CO<sub>2</sub>-Ausstoß im Verkehrsbereich erheblichen Anteil hat, ist eine Ausschöpfung möglicher Vermeidungs- und Verlagerungspotentiale vordringlich. Hierbei ist zwischen Nah- und Fernverkehr zu unterscheiden.

Im *Güter-Nahverkehr* ist ein hohes Potential zur Vermeidung von Fahrten vorhanden. Durch Verpackungen einerseits – hierfür wäre die Industrie zuständig – und durch betriebliche Organisation, zwischenbetriebliche Kooperation sowie Logistikeinsatz, aber auch durch andere Fahrzeuge (spezielle Verteil-Lkw) lassen sich noch erhebliche Fahrtenanteile einsparen. Dabei muß der Nahverkehr im Zusammenhang mit dem Güterfernverkehr, der sich zur besseren Abwicklung künftig verstärkt auf Güterverkehrszentren abstützen wird, gesehen werden. Solche Güterverkehrszentren können zudem die zwischenbetriebliche Kooperation fördern und durch ihre Eigendynamik erst ermöglichen.

Faßt man alle Möglichkeiten zur Vermeidung von Straßengüternahverkehr zusammen, so dürften die höchsten Potentiale im Ausbau der zwischenbetrieblichen Kooperation, beispielsweise durch Kooperationsgesellschaften (verantwortlich für Entwicklung, Planung, Koordinierung, Organisation und Betreuung des gesamten Transportes), Pools für optimalen Fahrzeug-Einsatz, bessere Verkehrsinformation in der City-Logistik und durch angepaßte Maßnahmen der

Verkehrsteilnehmer (insbesondere Fahrpersonal) liegen. Die erzielbaren Potentiale liegen in Ballungsgebieten im allgemeinen höher als in den weniger dicht besiedelten Gebieten.

Im Güter-Nahverkehr lassen sich dagegen praktisch keine Fahrten vom Lkw verlagern.

Im *Straßengüterfernverkehr* sind sowohl bei der Vermeidung wie auch bei der Verlagerung erhebliche Potentiale vorhanden. Alle Vermeidungsstrategien laufen auf überregionale Kooperationen hinaus, die zusätzlich durch innerbetriebliche Organisation in der transportierenden wie in der verladenden Wirtschaft gestützt werden müssen. Auch hier kommen Kooperationsgesellschaften, die organisierte Poolung von Laderaumangeboten für Großbetriebe wie auch Liniennetzorganisationen (Betriebe, die ihre Güter in einem abgestimmten Liniennetz nach Fahrplan transportieren) in Frage, die in Zukunft stärker als bisher entwickelt und umgesetzt werden müssen. Hierfür sind auch Maßnahmen einzusetzen, die Einzel- oder Gruppenunternehmen zu solchen Netzorganisationen zusammenfügen. Hinzu kommen betriebsinterne Optimierungen von Warentransporten durch Konzentration von Strömen auf zentrale Sammel- und Verteilzentren und durch verbesserte Tourenplanung. Durch ordnungs- und finanzpolitische Maßnahmen, die auf eine leistungs- und beanspruchungsgerechte Anlastung der Logistikkosten an den Gesamtkosten eines Gutes hinauslaufen, lassen sich weitere Fernfahrten auf der Straße vermeiden.

Die Verlagerung von Fernverkehrsströmen von der Straße auf die Eisenbahn erfordert eine Steigerung der Strecken- und Knotenkapazitäten ebenso wie veränderte angepaßte Betriebsstrategien. Insgesamt sind neue Angebotskonzepte bei der Eisenbahn nötig, die den gesamten Transportvorgang: Zufahrt, Umschlag, Beförderung, Umschlag und Abtransport zum Ziel in seiner Qualität erheblich verbessern müssen. In dieser Transportkette spielen die „Übergabepunkte“ eine besondere Rolle. Sie können auch in Güterverkehrszentren integriert werden, wodurch das Rationalisierungspotential vergrößert wird.

Insgesamt läßt sich für den Fernverkehr festhalten, daß durch den Einsatz und das Zusammenwirken aller hier angedeuteten Maßnahmen die Zahl der Lkw-Fahrten im Vergleich mit heute stark reduziert werden kann.

#### 4. Effizientere Abwicklung und technische Möglichkeiten im Straßenverkehr

##### 4.1 Maßnahmen an Fahrzeugen

###### *Zur Berechnungsmethode*

Zur Berechnung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von Kraftfahrzeugen und der Auswirkung der verschiedenartigen technischen Maßnahmen zur Reduktion dieser Emissionen werden aufgrund der formelmäßigen Zusammenhänge sechs Einflußfaktoren definiert:

- Faktor 1: Verkehrsleistung [Pkm/a] bzw. [tkm/a]
- Faktor 2: Gewichtsaufwand (Gesamtgewicht/Zuladung) [-]
- Faktor 3: Bezogene Fahrwiderstände: Luftwiderstand, Rollwiderstand, Beschleunigungswiderstand [-]
- Faktor 4: Antriebswirkungsgrad (von Antriebsrädern bis Energiespeicher) [-]
- Faktor 5: Energiebedarf der Nebenaggregate [kJ]
- Faktor 6: Kohlenstoffanteil bei der Engieverorgung [-]

In welcher Weise sich jeder dieser sechs Faktoren und damit die resultierende CO<sub>2</sub>-Emission der 2005 im Verkehr befindlichen Kraftfahrzeuge entwickeln wird, hängt neben dem technisch möglichen Reduktionspotential entscheidend von der Gestaltung der Rahmenbedingungen in Form von Restriktionen und Anreizen ab. Diese können miteinander gekoppelt sein; so kann eine höhere Mineralölsteuer über höhere Kraftstoffpreise einerseits technische Reduktionskonzepte wirtschaftlich werden lassen. Andererseits kann das aus der Erhöhung resultierende zusätzliche Steueraufkommen zur Förderung von Entwicklung und Anwendung derartiger Technologien eingesetzt werden.

Die folgende Ermittlung der voraussichtlichen CO<sub>2</sub>-Emission der 2005 im Straßenverkehr befindlichen Kfz-Flotte zielt darauf ab, die maximal mögliche Reduktion zu ermitteln, die sich einstellen würde, falls durch gravierende Veränderungen der Rahmenbedingungen das verfügbare technische Reduktionspotential (Faktoren 2 bis 6) voll ausgeschöpft würde (Reduktions-Szenario). Für jede der Fahrzeugarten Pkw, Lkw und Busse werden dabei jeweils charakteristische Fahrzyklen zugrundegelegt.

Zur Berechnung der CO<sub>2</sub>-Gesamtemissionen dieser Fahrzeugarten werden die Einzelfahrzeuge zu typischen Gewichtsklassen zusammengefaßt und die auf diese entfallenden Anteile der gesamten Transportarbeit berücksichtigt. Eine Validierung ergibt sich über die Ermittlung des jährlichen Kraftstoffverbrauches aller Fahrzeugarten in der bisherigen Bundesrepublik.

Zur näherungsweise Ermittlung des maximalen CO<sub>2</sub>-Reduktionspotentials im Straßenverkehr werden für jeden der fünf im wesentlichen fahrzeugtechnischen Faktoren alle jeweils relevanten Einflußgrößen betrachtet, ihre voraussichtliche Entwicklung analysiert sowie plausible Werte ermittelt und eingesetzt. Dieses Verfahren ist insofern relativ genau, als zu den einzelnen Faktoren in der Regel nicht nur Entwicklungstrends, sondern für viele der in den nächsten Jahren in den Verkehr kommenden neuen Fahrzeugtypen entsprechende Daten heute schon – zumindest näherungsweise – bekannt sind. Kfz-Modelle, die z. B. ab 1993 produziert und verkauft werden, bleiben unter üblichen Bedingungen bis etwa 2000 in der Fertigung und bilden 2005 noch einen wesentlichen Bestandteil der dann im Verkehr befindlichen Kfz-Flotte.

###### *Maßnahmen an Pkw*

Für die Ermittlung des CO<sub>2</sub>-Reduktionspotentials bei Pkw wird die Fahrzeugpopulation abhängig von Gewicht, Fahrleistungen und Verbrauch in fünf Klassen eingeteilt. Die maximalen CO<sub>2</sub>-Reduktionspotentiale werden im folgenden anhand der Faktoren 2 bis 6 dargestellt.

Bei der Verringerung des Gewichtsaufwandes von Pkw (Faktor 2) wird unterschieden zwischen einer Verringerung des Fahrzeugleergewichtes und einer Verbesserung der Auslastung.

Durch weitergehende Leichtbaumaßnahmen (Konstruktion und Werkstoffe) wird sich – allerdings mit zusätzlichem Entwicklungs- und Kostenaufwand – das Pkw-Leergewicht im Klassendurchschnitt wieder reduzieren lassen. Dem können zusätzliche sicherheits- und komfortrelevante Maßnahmen und Komponenten entgegenwirken, wenngleich auch bei diesen noch Gewichtsreduzierungen möglich sind. Resultierend wird mit der Möglichkeit einer klassen-

durchschnittlichen Verringerung des Pkw-Leergewichtes gerechnet. In der Annahme, daß sich verkehrspolitische Rahmenbedingungen und damit insbesondere die Betriebskosten von Pkw verändern, wird zudem unterstellt, daß sich die Pkw-Population etwas zugunsten leichterer Klassen verschiebt (Down-Sizing). Darüber hinaus wird angenommen, daß sich künftig ein kleiner Teil der Pkw-Verkehrsleistung auf eine neue, leichte Klasse subkompakter City-Pkw verlagert. Beide Maßnahmen können zu einer weiteren Verbesserung des Gewichtsaufwandes führen.

Die durchschnittliche Pkw-Auslastung verringert sich gegenwärtig noch geringfügig. Gleichwohl wird – unter veränderten verkehrspolitischen Rahmenbedingungen – künftig beispielsweise durch Car-Pooling und Fahrgemeinschaften, insbesondere im Berufs- und Ausbildungsverkehr mit einem leichten Anstieg der Auslastung und einer resultierenden Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen gerechnet.

Zusammenfassend lassen sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen durch fahrzeugtechnische Maßnahmen zur Verringerung des Gewichtsufwandes um etwa 12 % und durch unmittelbar zugeordnete verkehrliche Maßnahmen (Down-Sizing, Auslastung) um etwa 8 % verringern. Insgesamt wird angenommen, daß sich durch gewichtsreduzierende Maßnahmen (Faktor 2) die CO<sub>2</sub>-Emissionen um maximal etwa 19 % senken lassen.

Die bezogenen Widerstände (Faktor 3) beinhalten ein Optimierungspotential in den Einflußgrößen Rollwiderstand, Luftwiderstand und Beschleunigungswiderstand. Die rollwiderstandsabhängigen CO<sub>2</sub>-Emissionen lassen sich durch Reifen mit kleineren Walkverlusten sowie durch eine konsequent gewichts- und fahrleistungsangepaßte Bereifung (z. B. Verzicht auf sehr hohe Auslegungsgeschwindigkeiten und auf Breitreifen aus optischen Gründen) geringfügig senken.

Der Luftwiderstand von Pkw wurde in den vergangenen Jahren durch drastische Verringerung des Luftwiderstandsbeiwertes  $c_w$  fast halbiert. Künftig wird sich der  $c_w$ -Wert nur noch wenig reduzieren lassen, zumal dem Nutzwert-Aspekte entgegenstehen. Der Luftwiderstand ist neben dem  $c_w$ -Wert proportional vom Pkw-Hauptspantquerschnitt abhängig. Durch konstruktive und konzeptionelle Maßnahmen sowie durch die angenommene Verschiebung der Pkw-Population hin zu kleineren Klassen ist eine geringfügige Querschnittsverringerung zu erwarten. Dieser wirken allerdings höhere Sicherheitsanforderungen beim Seitenaufprall sowie der Trend zu Großraumlimousinen (Van) entgegen.

Maßnahmen der Verkehrsbeeinflussung (z. B. Tempolimit BAB) können die Fahranteile im Bereich hoher Geschwindigkeiten und damit den mit dem Quadrat der Geschwindigkeit wachsenden Luftwiderstand reduzieren. Im Falle der Einführung einer allgemeinen Geschwindigkeitsbegrenzung auf Autobahnen kann unterstellt werden, daß durch eine Reduktion der durchschnittlichen Motorleistung, entsprechend modifizierte Antriebsstrukturen sowie andere Getriebekonzepte (z. B. cvt) Emissionsminderungen möglich sind. Voraussetzung dafür wäre eine frühzeitige Bekanntgabe, um geeignete Konzepte rechtzeitig bis zur Einsatzreife entwickeln zu können. Eine Übersicht über die Auswirkung von Geschwindigkeitsbeschränkungen bei heutigen und bei dafür speziell konzipierten Pkw gibt Tabelle 4.

Tabelle 4:  
Einfluß ordnungspolitischer Maßnahmen auf CO<sub>2</sub>-Emissionen von Pkw (z. B. Geschwindigkeitsbegrenzung auf Autobahnen)

	ohne Technologie-Anpassung	mit Technologie-Anpassung
Maßnahmen	— —	— reduzierte Motorleistung — Kennfeld-Umorientierung — modifizierte Antriebs-Strukturen — andere Getriebeauslegung — andere Getriebe-Konzepte (z. B. cvt)
Primär-Effekt auf BAB (30 %)	ca. 9 % bei Tempo 100 ca. 4 % bei Tempo 120 ca. 2 % bei Tempo 130	ca. 10 % bei Tempo 120
Sekundär-Effekt übriger Verkehr (70 %)	— —	max. 15 %
Summe (100 %)	ca. 1,4 % (bei 120)	max. 13 % (bei 120)

Durch weitere verkehrliche Maßnahmen (z. B. im Bereich der Lichtsignalsteuerung), die zu einem gleichmäßigeren Verkehrsfluß führen, und eventuell künftig auch durch teilweise regeneratives Bremsen (z. B. bei Hybrid- oder Elektro-Pkw) wird sich auch der Beschleunigungsanteil an den Fahrwiderständen etwas reduzieren lassen.

Der Beschleunigungswiderstand wird sowohl von technischen Parametern beeinflusst als auch von solchen, die den Fahrzyklus (Funktion der Fahrgeschwindigkeit über der Zeit) beeinflussen. Dazu gehören insbesondere:

- externe Beeinflussung des Verkehrsflusses z. B. durch geeignete Steuerung von Signalanlagen,
- Fahrweise, d. h. Fahrverhalten (eher gleichförmig oder eher dynamisch/hektisch).

Diese Parameter wirken sich nicht nur auf den Beschleunigungswiderstand, sondern über das Motorkennfeld auch auf den Antriebswirkungsgrad aus.

Neben direkten Reduktionsmaßnahmen im Bereich dieser Parameter besteht eine wichtige indirekte Reduktionsmaßnahme darin, Kraftfahrzeuge und ihre Antriebe so auszulegen, daß sich z. B. eine instationäre Fahrweise weniger ungünstig auf Beschleunigungswiderstand und Antriebswirkungsgrad auswirkt. In dieser Hinsicht verhalten sich beispielsweise Dieselmotoren günstiger als Ottomotoren mit Turboaufladung; „intelligent programmierte“ automatische Getriebe mit ausreichend hohem Wirkungsgrad verhalten sich günstiger als handgeschaltete Getriebe.

Zusammengefaßt können durch die fahrzeugtechnische Reduktion der Fahrwiderstände die CO<sub>2</sub>-Emissionen um etwa 4 % verringert werden. Darüber hinaus lassen sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen



sionen durch unmittelbar zugeordnete verkehrliche Maßnahmen (Tempolimit BAB) um maximal etwa 13 % reduzieren. Insgesamt kann eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Maßnahmen zur Reduzierung der bezogenen Fahrwiderstände (Faktor 3) um maximal etwa 16 % angenommen werden.

Im Hinblick auf künftige potentielle Entwicklungen der Antriebsstrukturen werden die Reduktionsmöglichkeiten durch Verbesserung des Antriebs-Wirkungsgrades (Faktor 4) nach Antriebsarten getrennt untersucht.

Der Wirkungsgrad konventioneller Antriebe kann verbessert werden durch Maßnahmen am Motor und an der Kraftübertragung. Durch innermotorische Maßnahmen (Verdichtung, Gaswechsel, Gemischaufbereitung etc.) sind noch Emissionssenkungen gegenüber heutigen Aggregaten um ca. 20 bis 25 % möglich. Bei der vollständigen Ausnutzung dieses Potentials würden physikalisch gegebene Grenzen erreicht.

In der Annahme, daß zukünftig (z. B. aufgrund von Flottenverbrauchsvorschriften) der Anteil an Dieselmotoren wieder ansteigen wird, kann dadurch eine Emissionsminderung von etwa 3 bis 6 % erwartet werden. Der höhere Wert gilt eher für den gegenwärtigen Entwicklungsstand von Otto- und Diesel-Pkw-Motoren, der niedrigere Wert würde gelten, falls künftig das gesamte Entwicklungspotential beider Motorarten vollständig ausgeschöpft würde. Gegenwärtig werden in Pkw als Kennungswandler im wesentlichen manuell schaltbare 5-Gang-Getriebe sowie 4-Stufen-Automaten eingesetzt, mit dem Trend zur Verwendung mehrstufiger Getriebe. Die Auslegung der Kraftübertragung orientiert sich dabei an fahrdynamischen oder verbrauchssenkenden Gesichtspunkten. Durch den weiter zunehmenden Einsatz emissions-optimierter Konzepte, wie automatisierte Stufengetriebe, Vielganggetriebe und stufenlose Getriebe können die CO<sub>2</sub>-Emissionen gesenkt werden. Ein automatisches Abschalten des Verbrennungsmotors im Schubetrieb und im Leerlauf (z. B. Schwung-Nutz-Automatik) kann die CO<sub>2</sub>-Emissionen deutlich reduzieren. Bei Kaltstart sind durch Motorisolierung und externe Vorheizung Emissionssenkungen möglich. Für konventionelle Antriebskonzepte wird durch derartige Verbesserungen des Antriebs-Wirkungsgrades (Faktor 4) eine resultierende CO<sub>2</sub>-Reduktion von maximal etwa 35 % angenommen.

Im Falle gravierender verkehrspolitischer Restriktionen (z. B. erhebliche Anhebung der Mineralölsteuer, Einführung von Flottenverbrauch und Tempolimit auf BAB sowie schärferer Limitierung von Luftschadstoffen) kann unterstellt werden, daß sich in den nächsten Jahren neben optimierten konventionellen Antrieben auch weiterreichende Innovationen, wie Modul-Motoren<sup>1)</sup> sowie Hybrid- und Elektrofahrzeuge, etablieren werden. Für Hybridfahrzeuge wird für diesen Fall ein Anteil von etwa 10 % an Neuzulassungen im Jahre 2005 angenommen; der Marktanteil von Elektro-Pkw wird wegen der hohen Kosten, der begrenzten Energie-Speichermöglichkeiten und der zeitaufwendigen Aufladung in Europa wahrscheinlich geringer bleiben (etwa 1 bis 2 %) als z. B. in emissionsintensiven Regionen der USA wie Kalifornien.

Bei Hybrid-Konzepten mit kleinem Verbrennungsmotor und zusätzlichem elektrischen Antrieb (evtl. mit teilweise extern zu ladendem Speicher) ist aufgrund des auch hier ver-

1) Je nach Leistungsbedarf werden nur einzelne Module des Verbrennungsmotors eingeschaltet und so die Betriebsanteile in verbrauchs- und emissionsungünstigen Teillastbereichen verringert.

besserten Antriebs-Wirkungsgrades eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um ca. 15 bis 20 % möglich. Für Elektro-Pkw wird eine Emissionsminderung von 5 bis 10 % angenommen.

Zusammengefaßt ist unter Berücksichtigung der angenommenen Marktanteile für hybride und elektrische Antriebskonzepte in Verbindung mit dem vorstehend behandelten Verbesserungspotential von Verbrennungsmotoren durch eine Verbesserung des Antriebs-Wirkungsgrades (Faktor 4) eine Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen je nach Struktur der Antriebe um maximal etwa 30 % bis 35 % möglich.

Für die Ermittlung des Reduktionspotentials bei der Energieversorgung von Nebenaggregaten (Faktor 5) wird angenommen, daß sich – bedingt durch einen zunehmenden Einbau von Komfort- und Sicherheitselementen (z. B. ABS, ASR, elektrische Handhabungshilfen) – der Energiebedarf von Nebenaggregaten bis zum Jahr 2005 im Klassendurchschnitt noch geringfügig erhöhen wird. Insbesondere im Kurzstreckenverkehr wird daher der Emissionsanteil durch Nebenaggregate in den nächsten Jahren noch etwas zunehmen. Allerdings könnte z. B. durch eine teilweise externe Energieversorgung der Nebenaggregate (während des Parkens oder auf induktive Weise) gleichwohl eine Reduktion dieser Emissionen erreicht werden. Zur Realisierung dieses Einsparpotentials ist eine Versorgung des ruhenden Verkehrs mit Elektrizität bzw. Wärme erforderlich, so daß nur eine allmähliche Marktdurchdringung im Bereich des Nahverkehrs zu erwarten ist.

Auch mit zeitlich oder lastabhängig geregelten Antrieben der Nebenaggregate bei konventionellen Konzepten und integrierten Nebenantrieben bei Hybridfahrzeugen können die CO<sub>2</sub>-Emissionen gesenkt werden.

Insgesamt erscheint die Annahme einer CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung von maximal 5 % durch Verbesserung der Effizienz und der Energieversorgung von Nebenaggregaten (Faktor 5) als plausibel.

Der Einsatz kohlenstoffarmer und -freier Kraftstoffe (Faktor 6) ist technisch sowohl bei Otto- wie auch bei Dieselmotoren möglich. Die Freisetzung von CO<sub>2</sub> aus fossiler Energie würde bei der Erzeugung von Kraftstoffen aus Biomasse (Alkohole, Rapsöl etc.) entfallen, da dann ein geschlossener Kohlendioxid-Kreislauf vorliegt. Auch beim Einsatz von flüssigem oder gasförmigem Wasserstoff wird kein CO<sub>2</sub> emittiert.

Die breite Einführung neuer Treibstoffe wird allerdings vermutlich aufgrund der andersartigen Raffination, der Schaffung einer neuen, zusätzlichen Versorgungstechnologie und -infrastruktur (z. B. für Wasserstoff) sowie der erforderlichen, großen Kraftstoffmengen bis zum Jahre 2005 kaum möglich sein. Insofern ist bis dahin mit einem Anteil von maximal 2 % das Potential alternativer Kraftstoffe wahrscheinlich ausgeschöpft.

Bei Hybrid- und Elektrofahrzeugen, die ganz oder teilweise elektrisch „betankt“ werden, sind mittel- bis langfristig in Verbindung mit kraftwerksseitigen Maßnahmen (Einsatz nichtfossiler Energie) erhebliche Reduktionen des Faktors 6 möglich.

Unter Berücksichtigung der voraussichtlichen Anteile konventioneller und unkonventioneller Kraftstoffe und Pkw-Antriebe ist eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch den Einsatz kohlenstofffreier Energien (Faktor 6) bis 2005 um etwa 4 % zu erwarten.

Zusammenfassend wird angenommen, daß sich für die Pkw-Neuflotte im Jahre 2005 bei einer Emissionsminderung durch fahrzeugtechnische Maßnahmen (Faktor 2 bis 5) um maximal etwa 46 % sowie durch den Einsatz alternativer Energien um 4 % (Faktor 6) eine Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um maximal etwa 48 % ergibt. Durch einige unmittelbar zugeordnete verkehrliche Maßnahmen (Auslastung, Tempolimit BAB einschließlich Down-Sizing) ist eine Emissionssenkung um weitere 18 % möglich.

Unter Berücksichtigung des zeitlich gestaffelten Wirksamwerdens der verschiedenartigen Maßnahmen und einer mit 10 Jahren angenommenen Pkw-Lebensdauer erscheint günstigenfalls für alle im Jahre 2005 im Verkehr befindliche Pkw durch fahrzeugtechnische Maßnahmen resultierend eine durchschnittliche CO<sub>2</sub>-Reduktion um etwa 33 % und durch die Kombination von fahrzeugtechnischen und unmittelbar zugeordneten verkehrlichen Maßnahmen um maximal 41 % als möglich. Dieser prinzipiellen Reduktion wirkt allerdings eine Erhöhung der Verkehrsleistung (Faktor 1) entgegen, die später in die Untersuchung einbezogen wird.

#### *Maßnahmen an Lkw*

Die maximal mögliche CO<sub>2</sub>-Reduktion für Lkw wird auf analoge Weise wie die für Pkw ermittelt. Für eine Betrachtung des im Güterverkehr durch technische Maßnahmen erzielbaren Einsparpotentials werden die Gütertransporte in Nah- und Fernverkehr aufgeteilt. Beide Transportarten haben unterschiedliche Einsatz- und Fahrzyklen. Während im Nahverkehr instationäre Fahrzustände mit häufigen Zwischenhalten sowie zahlreichen Beschleunigungs- und Bremsphasen bei vergleichsweise niedriger Geschwindigkeit dominieren, ist der Fernverkehr durch hohe Reisegeschwindigkeiten mit nur geringer Geschwindigkeitsvarianz gekennzeichnet.

Bei einer Verringerung des Gewichtsaufwandes (Faktor 2) durch kostenaufwendige konstruktive und werkstoffseitige Leichtbaumaßnahmen kann eine Reduzierung der Kohlendioxidemissionen von allenfalls wenigen Prozenten im Nah- und Fernverkehr erzielt werden. In der Annahme, daß auch durch entsprechende verkehrspolitische Maßnahmen Leerfahrten insbesondere im Fernverkehr reduziert werden sowie im Güternahverkehr durch verbesserte Verteiler-Lkw und Logistik die Fahrzeugauslastung verbessert und Umwegfahrten reduziert werden, können durch einen resultierend verbesserten Gewichtsaufwand der Lkw die CO<sub>2</sub>-Emissionen gesenkt werden.

Insgesamt erscheint durch fahrzeugtechnische Maßnahmen zur Verringerung des Gewichtsaufwandes bei Lkw eine Emissionsreduktion von maximal etwa 2 bis 3 % und durch unmittelbar zugeordnete verkehrliche Maßnahmen (Auslastung) von maximal 5 % als möglich. Zusammenfassend kann durch gewichtsoptimierende Maßnahmen (Faktor 2) eine Emissionsminderung von maximal 8 % angenommen werden.

Trotz erheblicher Verbesserungen der Lkw-Transporter-Aerodynamik in den vergangenen Jahren können die luftwiderstandsabhängigen Emissionen (Faktor 3) durch Fahrerhaus-Anbauteile, glattflächige Seitenverkleidungen sowie Detailoptimierung im Fernverkehr mit seinem höheren Geschwindigkeits-Niveau noch um wenige Prozente reduziert werden. Im Nahverkehr ist der Einfluß des Luftwiderstandes weniger ausgeprägt; das mögliche CO<sub>2</sub>-Reduktionspotential ist sehr gering.

Der bei Lkw schon sehr hohe Antriebswirkungsgrad (Faktor 4) kann durch zwei Maßnahmen-Gruppen noch etwas verbessert werden:

- bessere Ausnutzung der Kraftstoffenergie im Verbrennungsmotor,
- bessere Abstimmung der Kraftübertragung auf das Motorkennfeld unter allen Lastzuständen.

Direkteinspritzende Lkw-Dieselmotoren mit Abgas-Turbolader und Ladeluftkühlung erreichen gegenwärtig bereits nahezu Kraftwerks-Wirkungsgrade. Mit optimierten Brennräumen, verbessertem Gaswechsel, Turbocompound-Aufladung und optimiertem Kurbel- und Nockenwellentrieb kann neben einer Senkung des Kraftstoffverbrauches und der CO<sub>2</sub>-Emissionen der Bereich minimalen spezifischen Kraftstoffverbrauches im Motorkennfeld ausgedehnt werden. Die erreichbare Kraftstoff- und Emissionseinsparung liegt bei etwa 10 %. Die Abstimmung der Kraftübertragung auf das Motorkennfeld durch Vielganggetriebe mit 10 bis 16 Gängen (mit Schaltempfehlung für den Fahrer oder mit Automatisierung der Schaltung) ist bei Fernverkehrs-Lkw schon weitgehend optimiert. Im Fernverkehr sind daher durch technische Maßnahmen an der Kraftübertragung kaum noch nennenswerte Emissionssenkungen zu erwarten.

Die Kraftübertragung von Nahverkehrs-Lkw besteht gegenwärtig überwiegend aus manuell schaltbaren Stufengetrieben mit 5 bis 6 Gangstufen. Durch längere Vielganggetriebe und Automatisierung (Entlastung des Fahrers von der Gangwahl) kann die Kraftübertragung besser an das Motorkennfeld angepaßt werden. Insofern kann im Nahverkehr eine nennenswerte Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen angenommen werden.

Bei der Energieversorgung der Nebenaggregate (Faktor 5) ist der Emissionsanteil im Kurzstreckenverkehr, der durch vergleichsweise geringe Antriebs-Wirkungsgrade geprägt ist, besonders hoch. Bei Sonderfahrzeugen, wie Kühlfahrzeugen, Kippern, Baustellenfahrzeugen etc. ist zusätzlich ein hoher Leistungsbedarf im Fahrzeugstillstand erforderlich. Durch Maßnahmen zur Verringerung des Leistungsbedarfes von Nebenaggregaten, einer teilweise externen Versorgung sowie optimierten Nebenantrieben (Hydraulik, Elektrik) werden sich – jedoch bei zusätzlichem Entwicklungs- und Kostenaufwand – die CO<sub>2</sub>-Emissionen geringfügig reduzieren lassen.

Insgesamt wird angenommen, daß durch fahrzeugtechnische Maßnahmen an Lkw (Faktor 2 bis 5) eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um maximal etwa 21 % und darüber hinaus durch unmittelbar zugeordnete verkehrliche Maßnahmen um maximal 5 % möglich ist.

Durch den Einsatz alternativer Kraftstoffe (Faktor 6) können die CO<sub>2</sub>-Emissionen zusätzlich etwas reduziert werden.

Unter Berücksichtigung des zeitlich gestaffelten Wirksamwerdens der verschiedenartigen Maßnahmen und einer mit 10 Jahren angenommenen mittleren Lkw-Lebensdauer erscheint für alle im Jahre 2005 im Verkehr befindliche Lkw, resultierend durch fahrzeugtechnische Maßnahmen, bestenfalls eine Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um etwa 12 % und durch die Kombination von fahrzeugtechnischen und unmittelbar zugeordneten verkehrlichen Maßnahmen um etwa 16 % als möglich. Dieser prinzipiellen Reduktion wirkt allerdings eine Erhöhung der Verkehrsleistung (Faktor 1) entgegen, die später in die Untersuchung einbezogen wird.

### Maßnahmen an Bussen

Zur Ermittlung des Reduktionspotentials im Busverkehr werden Linienbus- und Fernreiseverkehr getrennt betrachtet und untersucht. Der Linienbusverkehr ist gekennzeichnet durch geringe Durchschnittsgeschwindigkeiten, häufige Beschleunigungs- und Bremsphasen sowie längere Stillstandszeiten an Haltestellen und Lichtsignalen. Der Bus-Fernreiseverkehr findet statt bei hohen Reisegeschwindigkeiten mit wenigen Beschleunigungs- und Bremsphasen.

Im Linienverkehr wird von einer erheblichen Kraftstoffeinsparung durch Verringerung des Gewichtsaufwandes (Faktor 2) ausgegangen. Bei einer weitgehenden Substitution der heute üblichen Linienbus-Konzepte in Stahlbauweise durch selbsttragende Karosserien aus wiederverwertbaren Kunststoffen, kombiniert mit kleineren Aggregaten und leichteren Fahrwerken, kann mit einer Emissionsreduktion um ca. 20 bis 25 % gerechnet werden. Bei einem verstärkten Einsatz von Kunststoffen und Leichtmetallen in Reisebussen ist eine Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Fernverkehr um etwa 10 bis 15 % möglich.

Die luftwiderstandsabhängigen CO<sub>2</sub>-Emissionen (Faktor 3) von Reisebussen lassen sich durch aerodynamische Formoptimierungen (Reduktion des c<sub>w</sub>-Wertes) noch wirksam reduzieren.

Optimierte Antriebsstrukturen (Faktor 4) und innermotorische Maßnahmen (analog zu Lkw-Aggregaten) können bei Fernreisebussen die CO<sub>2</sub>-Emissionen deutlich verringern. Bei Linienbussen mit ihrem ausgeprägt instationären Betrieb sind u. a. durch Einführung von Antrieben, die eine Nutzbremmung ermöglichen, Emissionsminderungen von ca. 15 % zu erwarten.

Bei der Energieversorgung von Nebenaggregaten (Faktor 5) kann wie bei Lkw durch verringerten Leistungsbedarf, optimierte Antriebssysteme (z. B. Lichtmaschine, Hydraulikpumpen) sowie eine teilweise externe Energieversorgung im Nahverkehr eine geringe Emissionsenkung erzielt werden.

Zusammenfassend können durch fahrzeugtechnische Maßnahmen an Bussen (Faktor 2 bis 5) die CO<sub>2</sub>-Emissionen um maximal etwa 35 % reduziert werden.

Die Verwendung alternativer Kraftstoffe (Faktor 6) kann die CO<sub>2</sub>-Emissionen von Bussen langfristig senken. Durch verstärkten Einsatz von O-Bussen ist im Linienverkehr eine zusätzliche Substitution erreichbar.

Unter Berücksichtigung des zeitlich gestaffelten Wirksamwerdens der verschiedenartigen Maßnahmen ist für alle im Jahre 2005 im Verkehr befindlichen Busse günstigenfalls eine durchschnittliche Abnahme der CO<sub>2</sub>-Emissionen um etwa 26 % zu erwarten. Dieser prinzipiellen Reduktion wirkt allerdings eine Erhöhung der Verkehrsleistung (Faktor 1) entgegen, die später in die Untersuchung einbezogen wird.

### CO<sub>2</sub>-Gesamtreduktion für Kfz (Straßenverkehr)

Anhand der vorstehend ermittelten bzw. abgeschätzten Daten ergibt sich für Pkw, Lkw und Busse zusammen – d.h. näherungsweise für den Straßenverkehr – bei Beachtung der jeweiligen Anteile an der Verkehrsleistung, einer angenommenen durchschnittlichen Einsatzdauer von 10 Jahren sowie der vollen Ausschöpfung des fahrzeugtechnisch möglichen Reduktionspotentials eine maximal mögliche Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emission um etwa 28 %. Bei der vollen

Ausschöpfung des fahrzeugtechnischen und verkehrlichen Reduktionspotentials kann eine Emissionsminderung um maximal 35 % angenommen werden (Tab. 5)

Tabelle 5:  
Maximale Reduktion CO<sub>2</sub>-Emissionen

	Anteil an CO <sub>2</sub> -Emissionen des Straßenverkehrs 1987	Änderung Neu-fzge. 2005	CO <sub>2</sub> -Emissionen /Pkw bzw. tkm bei durchschn. Kfz-Einsatzdauer 10a	
			fzg.-techn. Maßnahmen alleine	fzg.-techn. und unmittelbar zugeordnete verkehrliche Maßnahmen
Pkw	76 %	– 58 %	– 33 %	– 41 %
Lkw	22 %	– 27 %	– 12 %	– 16 %
Bus	2 %	– 37 %	– 26 %	– 26 %
Summe	100 %	– 51 %		
FLOTTENVERBRAUCH 2005:*)			– 28 %	– 35 %

\*) ohne Berücksichtigung einer Zunahme der Verkehrsleistung

In welchem Maße das verkehrlich und fahrzeugtechnisch gegebene Reduktionspotential ausgeschöpft werden wird, hängt entscheidend von der Gestaltung der Rahmenbedingungen (z. B. Kraftstoffpreis, Anreize zur Entwicklung und Markteinführung umweltfreundlicher Kfz-Technologien), von den Entwicklungen der Antriebs- und Fahrzeugtechnik, von der Verkehrsbeeinflussung sowie von der Akzeptanz durch die Kfz-Nutzer ab. Insofern definiert das skizzierte Reduktionspotential den Maximalwert der erzielbaren Emissionsminderung. Es kann angenommen werden, daß in Abhängigkeit von verkehrs- und ordnungspolitischen Rahmenbedingungen die möglichen Emissionsminderungen bis zum Jahre 2005 nur teilweise umgesetzt werden.

## 4.2 Maßnahmen an der Infrastruktur

### 4.2.1 Vorbemerkungen

Der Einfluß der Infrastruktur und des Fahrweges auf mögliche CO<sub>2</sub>-Einsparungen läßt sich wegen der vielfachen Verflechtungen und der daraus resultierenden Wechselwirkungen kaum quantifizieren. Es wird daher im folgenden nur eine qualitative Einschätzung vorgenommen.

Generell läßt sich feststellen, daß alle Maßnahmen an der Infrastruktur, die einerseits zu geringeren Fahrtweiten des Kraftfahrzeugverkehrs führen und die andererseits zu einer Reduktion der Staus führen, einen positiven Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Einsparung leisten. Sofern durch Infrastrukturverbesserungen der Verkehrsablauf so günstig beeinflußt wird, daß im städtischen Bereich auf die Alternative ÖPNV verzichtet wird und im Außerortsbereich mit hohen Geschwindigkeiten gefahren werden kann, steigen Kraftstoffverbrauch und damit auch die CO<sub>2</sub>-Emissionen an.

Sowohl im Außerorts- als auch im Innerortsbereich ist zu beachten, daß oftmals bei einer Verbesserung der Infrastruktur im Bereich des Systems „Straße“ neue Fahrten erzeugt werden oder im Rahmen des allgemeinen Zeitbudgets längere Fahrten durchgeführt werden, so daß dadurch insgesamt positive Wirkungen zur CO<sub>2</sub>-Einsparung neutralisiert werden können. Dies gilt vielleicht in stärkerem Maße für den städtischen Bereich, wo dann auf die Alternative ÖPNV-Verkehr aufgrund eines Zeitvorteils bei der Benutzung des Pkw verzichtet wird.

Wegen der unterschiedlichen Wirkungsbereiche wird es als sinnvoll erachtet, die Auswirkungen getrennt nach Außerortsbereich und Innerortsbereich zu beschreiben.

#### 4.2.2 Außerortsbereich

Positiv auf eine Reduktion von Kraftstoffverbrauch und damit auf eine Verringerung von CO<sub>2</sub>-Emissionen wirken alle Maßnahmen zur Netzergänzung und zu Lückenschlüssen im Fernstraßennetz und Kapazitätserweiterungen an bestehenden Straßenanlagen zur Beseitigung lokaler Engpässe.

Infolge der Netzergänzungen im Fernstraßennetz lassen sich Umwegfaktoren zwischen Quelle und Ziel der Fahrt verringern. Durch die dann reduzierten Fahrtweiten kann es zu CO<sub>2</sub>-Einsparungen kommen. Gleichzeitig bewirken derartige Netzergänzungen auch Entlastungen von Teilen des bisherigen Straßennetzes, wodurch Stausituationen – häufig mit weiteren stauerzeugenden Auffahrunfällen als Begleitumstand – vermieden werden können.

Bei den Lückenschlüssen im Bundesfernstraßennetz ist jedoch auf ein ausgewogenes Netz mit ausgewogenen Kapazitäten zu achten, bei dem dann durch die Ergänzungsmaßnahmen nicht die Staubildungen von einem zu beseitigenden Engpaß zu einem entstehenden neuen Engpaß verlagert werden.

Der im Bundesverkehrswegeplan auch weiterhin betonte Bau von Ortsumgehungsstraßen bewirkt eine weitgehend unbehinderte Fahrt auf einem Streckenabschnitt mit nur wenigen Kreuzungen und Einmündungen gegenüber den zuvor starken Behinderungen innerhalb der engen Straßen in den Ortsdurchfahrten. Allerdings ist hier zu beachten, daß ein Teil derartiger CO<sub>2</sub>-Einsparungen eventuell durch entstehende Mehrweglängen und auch durch höhere Fahrgeschwindigkeiten auf der Ortsumgehungsstraße wieder aufgezehrt werden kann.

Zu den Kapazitätserweiterungen an bestehenden Straßen zählen insbesondere die Fahrstreifenenerweiterungen bei Autobahnen (2x3-streifiger Ausbau) und auch die nachträgliche Anordnung von Standstreifen. Während durch das Hinzufügen eines dritten Fahrstreifens je Fahrtrichtung infolge der erhöhten Leistungsfähigkeit Stausituationen seltener auftreten, kann sich dann zusätzlich ein gleichmäßigerer Fahrtverlauf durch eine natürlichere Sortierung der Fahrstreifenbenutzung entsprechend der Wunschgeschwindigkeit bzw. der zugelassenen Höchstgeschwindigkeit bei Lastkraftwagen einstellen. Durch die Aufnahme von verunfallten oder vorübergehend nicht betriebsbereiten Kraftfahrzeugen auf einem vorhandenen Standstreifen lassen sich ebenfalls Stauungen auf der durchgehenden Fahrbahn reduzieren. Weiterhin läßt sich beim Vorhandensein von Standstreifen in einem Autobahnquerschnitt ein besserer Verkehrsablauf bei erforderlichen Reparaturbaustellen organisieren, der dann ebenfalls einen Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Einsparung leisten kann.

Zu den wichtigen Maßnahmen zur Reduktion lokaler Engpässe zählen die Beseitigungen höhengleicher Bahnübergänge. Auch wenn entsprechend der derzeitigen Praxis während der Schrankenschließzeiten von den meisten Kraftfahrern der Motor des Kraftfahrzeugs abgestellt wird, so entstehen bei Staubildung und Stauauflösung zusätzliche Behinderungen mit erhöhtem Kraftstoffverbrauch und erhöhten Emissionen.

Schließlich sei darauf hingewiesen, daß auch der Straßenerhaltung, insbesondere im Hinblick auf die Gewährleistung der Ebenheit der Straßenoberfläche eine gewisse Bedeutung zukommt, um durch einen günstigen Rollwiderstand positiv auf eine Reduktion des Kraftstoffverbrauchs einzuwirken.

#### 4.2.3 Innerortsbereich

Auch im Innerortsbereich kommt der Bereitstellung eines klar gegliederten hierarchischen Straßennetzes mit leistungsfähigen Straßen für die Verbindungsfunktion eine große Bedeutung für die Vermeidung von Stauungen, insbesondere während der Zeiten außerhalb der Spitzenstunden mit Begünstigung des Wirtschafts- und Dienstleistungsverkehrs zu. Dazu gehört auch ein leistungsfähiger Ausbau der Hauptknotenpunkte auf diesem Straßennetz mit Verbindungsfunktion, um an diesen wichtigen „Gelenkpunkten“ Stausituationen zu verringern und damit dem erhöhten Kraftstoffverbrauch mit entsprechender CO<sub>2</sub>-Erzeugung entgegenzuwirken.

In vielen Städten werden gegenwärtig weitgehend flächendeckend Tempo-30-Zonen zum Zwecke der Verkehrsberuhigung eingerichtet. Hierbei ist darauf zu achten, daß diese Zonen mit Geschwindigkeitsbeschränkung nicht so groß werden, daß dadurch Mehrweglängen auf dem umgebenden Straßennetz mit Tempo 50 entstehen. Weiterhin dürfen durch Verdrängungseffekte auf das verbleibende Straßennetz ohne Reduktion der zulässigen Höchstgeschwindigkeit dort nicht zusätzliche Stauungen durch Überlastung verursacht werden. CO<sub>2</sub>-Einsparungen in Tempo-30-Zonen selbst sind nur dann zu erwarten, wenn eine sehr gleichmäßige Fahrweise ohne stärkere Verzögerungen und Beschleunigungen praktiziert werden kann.

Zu den Infrastrukturmaßnahmen in den Innenstädten mit CO<sub>2</sub>-einsparender Wirkung gehört auch, abgestimmt auf die Qualität des Angebots im ÖPNV, die ausreichende Versorgung mit Stellplätzen zur Deckung der Parknachfrage im Dienstleistungs-, Einkaufs- und Besucherverkehr, um hierdurch Parksuchverkehr möglichst zu vermeiden, der zu Mehrweglängen und zu Störungen des übrigen Verkehrsablaufs und damit zu erhöhtem Kraftstoffverbrauch beiträgt.

### 4.3 Maßnahmen der Steuerung

#### 4.3.1 Außerortsbereich

Bei der Steuerung des Kraftfahrzeugverkehrs auf den Straßen außerorts mit Zielrichtung auf eine CO<sub>2</sub>-Einsparung konzentrieren sich die Überlegungen weitgehend auf die Autobahnen und die autobahnähnlichen Bundesstraßen. Hier wiederum kann unterschieden werden in die Verkehrsbeeinflussung im Netz, auf einen zusammenhängenden Streckenabschnitt und auf einer bestimmten örtlichen Stelle.

Ziel im Netz ist es, durch ein verbessertes Informationssystem zusammen mit einer weiterentwickelten Verkehrsleittechnik derartige Routenempfehlungen zu geben, daß eine Entlastung staugefährdeter Strecken erfolgt und eine Minimierung der Gesamtreisezeiten der Kraftfahrzeuge in dem jeweils betrachteten Teilnetz eintritt. Ansatzpunkte hierfür stellen ein verbesserter Verkehrsfunk mit aktuellen Verkehrssituationsmeldungen sowie eine kollektive Alternativroutensteuerung mit Wechselwegweisern dar. Zukünftig ist in die Bemühungen um eine Hinführung der Kraftfahrer zum Ziel auf zeitgünstigen Routen unter Vermeidung von Mehrweglänge durch bessere Orientierung auch die individuelle dynamische Routenempfehlung und Zielführung für speziell ausgestattete Fahrzeuge einzuordnen.

Zu den wichtigsten Steuerungsmaßnahmen längs einer Strecke im Autobahnnetz gehört die situationsangepaßte Geschwindigkeitsbegrenzung mittels Wechselverkehrszeichen. Sie führt im allgemeinen zu einer Vergleichmäßigung des Verkehrsflusses an Engstellen und auf Streckenabschnitten mit hoher Belastung und warnt vor Gefahren bei besonderen Witterungssituationen – wie Regen, Eisglätte, Nebel. Dadurch können teilweise Stauungen reduziert und Verkehrsunfälle mit ebenfalls Stauungen als Folgeerscheinungen vermieden werden, worin dann auch ein Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Einsparung zu sehen ist.

Auf das Ziel zur Vermeidung von Auffahrunfällen und insgesamt zur Warnung vor lokal auftretenden Stausituationen sind auch die gelegentlich im Autobahnnetz eingesetzten automatisch arbeitenden Stauwarnanlagen mit Wechselverkehrszeichen ausgerichtet. Zukünftig ist es denkbar, daß durch in die Kraftfahrzeuge eingebaute automatisch arbeitende Abstandswarngeräte auch ein wesentlicher Beitrag zur Vermeidung von Auffahrunfällen geleistet wird, wodurch dann wiederum zusätzliche Stausituationen infolge verunfallter Fahrzeuge mit einem zeitweilig nur reduziert verfügbaren Straßenquerschnitt vermieden werden könnten.

Zu den lokalen Maßnahmen der Autobahnsteuerung gehören auch die in Deutschland bisher nur in Einzelfällen angewendeten Zufahrtbeschränkungen. Hier nimmt man bewußt Stausituationen oder Umwegfahrten für die zufließenden Kraftfahrzeuge in Kauf, um den Verkehrsfluß auf der Autobahn noch stabil zu halten und dort die Stauungen mit wahrscheinlich weitreichenderen CO<sub>2</sub>-Emissionen zu vermeiden.

Ein gewisses Potential zur Reduzierung von Stauungen und den dadurch verursachten zusätzlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen ist auch noch in einer zu verbessernden Organisation von Autobahnbaustellen sowie bei der Optimierung der Arbeitsabwicklung, z. B. auch durch Nacht- und Wochenendarbeiten zwecks Verkürzung der Bauzeiten vorhanden.

Wie im Abschnitt 4.1 bereits ausgeführt, liefert das Aussprechen einer generellen Geschwindigkeitsbegrenzung auf Autobahnen einen Beitrag für die Kraftstoffeinsparung und die begleitende CO<sub>2</sub>-Reduktion. Neben der Verringerung des Luftwiderstands bei extrem hohen Geschwindigkeiten können durch eine Verminderung des Risikos von Unfällen im Längsverkehr und damit geringerer Stauwahrscheinlichkeit durch derartige Unfälle CO<sub>2</sub>-Einsparungen erzielt werden. Das Maß der Reduktion hängt weitgehend von der Höhe der festgelegten Geschwindigkeitsbegrenzung und von dem Umfang der polizeilichen Überwachung ab.

#### 4.3.2 Innerortsbereich

Das Rückgrat der städtischen Verkehrssteuerung stellt die Lichtsignalsteuerung dar. Hier sind bisher die Möglichkeiten zur Verbesserung des Verkehrsablaufs durch eine verkehrabhängige

Steuerung noch längst nicht ausgehüpft. Durch eine konsequentere Anwendung ließen sich im Einzelfall – insbesondere bei schwächerer Belastung – Halte- und Wartezeiten und damit zusätzlicher Kraftstoffverbrauch mit CO<sub>2</sub>-Erzeugung vermeiden. Bei starker Belastung während der Spitzenzeiten ließe sich durch den Einsatz verkehrabhängiger Steuerungsverfahren in vielen Fällen der Beginn von Stausituationen hinauszögern, wodurch eine Reduktion der gesamten Stauzeit mit erhöhtem Kraftstoffverbrauch einhergeht.

Schließlich ließe sich durch eine Priorisierung von Bussen und Straßenbahnen mit insgesamt kürzeren Reiseszeiten und geringeren Streuungen eine Verbesserung des Fahrtablaufs erreichen. Es ist allerdings darauf hinzuweisen, daß bezüglich der CO<sub>2</sub>-Einsparung hier dann keine günstige Lösung vorliegt, wenn die Priorisierung der öffentlichen Verkehrsmittel in der Weise erfolgt, daß mehr private Kraftfahrzeuge angehalten und gestaut werden, als dies im Hinblick auf den erhofften Fahrgastzuwachs infolge dieser Bevorzugung an Lichtsignalanlagen zu vertreten ist.

Eine über den derzeitigen Stand hinausgehende Koordinierung der Lichtsignalanlagen in zusammenhängenden Straßenzügen und in Teilnetzen kann zu einer weitergehenden Vermeidung von Halten und damit zu einer Reduktion des Kraftstoffverbrauchs in den stärker belasteten Fahrtrichtungen führen.

Manche Straßenzüge sind hinsichtlich ihrer verfügbaren Querschnittsabmessungen und der Struktur der Verkehrsbelastung für eine Fahrstreifensignalisierung unter Einsatz von Dauerlichtzeichen geeignet. Dadurch ist ebenfalls eine bessere Qualität des Verkehrsablaufs infolge des dann möglichen Richtungswechselbetriebs erzielbar.

Wie bereits bei den begünstigenden Steuerungsmaßnahmen für den Außerortsbereich erwähnt, kann insbesondere auch in städtischen Netzen eine individuelle dynamische Routenempfehlung und Zielführung für speziell ausgestattete Kraftfahrzeuge eine Hinführung zum Ziel auf zeitgünstigen Routen und damit mit geringerer Stauwahrscheinlichkeit bewerkstelligen. Darüber hinaus kann durch bessere Orientierung – insbesondere für Ortsfremde – Mehrweglänge vermieden werden.

In Kernstadtgebieten oder in Sekundärzentren lassen sich durch die Einrichtung von Parkleitsystemen in kollektiver Form und zukünftig eventuell auch in individueller Form in ausgerüsteten Fahrzeugen Parksuchfahrten mit Mehrweglänge und mit Störungen des übrigen Verkehrsablaufs vermeiden oder zumindest verringern.

In Annäherung an das Stadtgebiet können situationsabhängige Hinweise auf Park & Ride-Plätze mit verbessertem Informationsangebot über die Fahrgelegenheiten mit den öffentlichen Verkehrsmitteln – entweder durch kollektive Hinweise am Straßenrand oder durch individuelle Informationen im ausgerüsteten Fahrzeug – ebenfalls durch Einsparung an Fahrtweite mit dem privaten Kraftfahrzeug bei entsprechender Fahrtfortsetzung mit dem öffentlichen Verkehrsmittel und mit einem dadurch eventuell bedingten Beitrag zur Reduktion von Engpässen im Straßennetz zu einer CO<sub>2</sub>-Einsparung beitragen. Darüber hinaus entfallen dann auch Parksuchfahrten im Zielgebiet.

Mittelfristig kann die technische Weiterentwicklung, unterstützt durch automatische Datensammlung über die aktuelle Verkehrssituation im Straßennetz durch speziell ausgerüstete

Kraftfahrzeuge, zu einer verbesserten Fahrtenplanung, insbesondere im täglichen Berufsverkehr führen. Denkbare Ergebnisse, nämlich eine Entscheidung zur Fahrt mit dem öffentlichen Verkehrsmittel anstelle mit dem Kraftfahrzeug bei angezeigten Stausituationen oder der Fahrtantritt mit dem privaten Kraftfahrzeug zu einem veränderten Zeitpunkt bei geringerer Stauwahrscheinlichkeit, bieten hier ebenfalls den Ansatzpunkt für eine CO<sub>2</sub>-Einsparung.

Schließlich ist durch entsprechende ordnungspolitische Maßnahmen auch an eine Veränderung der Anlieferungsbedingungen und der Entsorgungsbedingungen für Lastkraftwagen und insbesondere Müllfahrzeuge auf städtischen Hauptverkehrsstraßen zu denken. Durch das Verbot von Halten in zweiter Reihe während der Spitzenzeiten des Kraftfahrzeugverkehrs und dessen Überwachung lassen sich im städtischen Straßennetz daraus resultierende Stauungen mit erhöhtem Kraftstoffverbrauch und vermehrter CO<sub>2</sub>-Erzeugung vermeiden.

## 5. Effizientere Abwicklung und technische Möglichkeiten im übrigen Verkehr

### 5.1 Schienenverkehr

#### 5.1.1 Vorbemerkungen

Wie die im Abschnitt 1 genannten Zahlen zeigen, steuert der Straßenverkehr zum CO<sub>2</sub>-Ausstoß den überwiegenden Anteil bei. Gleichwohl sollen hier auch die übrigen Verkehrsarten behandelt werden, da auch bei ihnen Verbesserungspotentiale für eine effiziente Energienutzung vorhanden sind. Außerdem wird die Verlagerung von Verkehr von der Straße – und auch vom Flugzeug – zur Schiene und – beim Güterverkehr – zum Binnenschiff um so wirkungsvoller im Hinblick auf die Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen, je günstiger das Verhältnis der spezifischen Werte Primärenergieverbrauch je Personen-kilometer bzw. je Nutztonnenkilometer für die den Verkehr übernehmenden Verkehrsarten bleibt.

Auch beim Schienenverkehr sind Verbesserungsmaßnahmen im Bereich der Fahrzeuge, der Infrastruktur und der Steuerung möglich.

#### 5.1.2 Maßnahmen an den Fahrzeugen

Im elektrischen Bahnbetrieb ermöglichen moderne Triebfahrzeuge mit Drehstromantrieb eine 5% bessere Ausnutzung der Primärenergie, womit der CO<sub>2</sub>-Ausstoß entsprechend vermindert wird, wenn man davon ausgeht, daß der Bahnstrom im wesentlichen in Kohlekraftwerken hergestellt wird. Die elektrische Nutzbremse bei diesen Triebfahrzeugen vergrößert vor allem auf bergigen Strecken und im Personennahverkehr die Energieeinsparung um weitere 3 – 10%. Da der größte Teil der elektrischen Lokomotiven der Bundesbahn mehr als 20, z. T. auch mehr als 30 Jahre in Betrieb ist, wird die Ersatzbeschaffung neuer Fahrzeuge planmäßig bis zum Jahre 2005 durchgeführt werden. Auch bei den Diesellokomotiven ist eine vergleichbare Wirkungsgradverbesserung möglich sowie der Bau von leistungsstärkeren Lokomotiven, mit

denen die weniger wirtschaftliche Doppeltraktion bei schweren Zügen ersetzt werden kann. Die erwartete Verkehrszunahme bedeutet auch auf nicht elektrifizierten Strecken häufiger schwere Güterzüge.

Die im Fernreiseverkehr benutzten Waggons erbringen durch Gewichtsverminderung nur eine geringe Energieeinsparung. Trotzdem sollte der Trend zu höheren Fahrzeuggewichten, bedingt durch hoher Komfortanforderungen, gebrochen werden. Bei Nahverkehrsfahrzeugen, die wegen geringer Haltestellenabstände und hoher Beschleunigungsanforderungen im wesentlichen Anfahrerenergie verbrauchen, ist durch Leichtbau jedoch eine erwähnenswerte Energieeinsparung zu erreichen.

Im Fernreiseverkehr – besonders im Hochgeschwindigkeitsverkehr – ist durch aerodynamisch verbesserte Form eine nennenswerte Energieeinsparung zu erzielen bzw. ein Ansteigen des Energieverbrauchs zu vermeiden, wenn aus Wettbewerbsgründen höhere Fahrgeschwindigkeiten wünschenswert sind. So hat der IC-Express bei 250 km/h keinen höheren Luftwiderstand als ein herkömmlicher IC-Zug bei 200 km/h. Auch bei den in Zukunft in der Regel schneller fahrenden Güterzügen sind vergleichbare aerodynamische Verbesserungen zu erzielen, da sie bisher überhaupt nicht im Hinblick auf den Luftwiderstand optimiert wurden. Bei der Langlebigkeit der Güterwagen wird sich die Verbesserung erst allmählich durchsetzen.

#### 5.1.3 Maßnahmen an der Infrastruktur

Durch den Ausbau von Strecken und Knoten an Engpaßstellen können besonders bei Güterzügen sonst nicht erforderliche Unterwegshalte vermieden und die zugehörigen Anfahreregien eingespart werden. Das macht bei einer einzigen Anfahrt eines 1600 t-Güterzuges von 0 auf 120 km/h bereits über 500 kWh an Primärenergie aus. Darüber hinaus kann die Zahl an Unterwegshalten (Überholungshalten) durch Entmischung des Zugbetriebes reduziert werden, indem verschiedene Strecken innerhalb eines Korridors durch Züge unterschiedlicher Geschwindigkeit genutzt werden. Das Erweitern enger Bogenradien vermeidet Langsamfahrstellen mit dem Zwang zum anschließenden Wiederbeschleunigen und läßt eine hohe Beförderungsgeschwindigkeit erreichen, ohne sehr hohe Höchstgeschwindigkeiten in Anspruch nehmen zu müssen. Beim Neubau von Bahnstrecken kann neben der dabei meistens auch erzielten Verkürzung der Strecken, z. B. NBS Mannheim-Stuttgart 17%, durch die sog. fahrdynamische Trassierung der Streckenverlauf so gewählt werden, daß die in den fahrenden Zügen enthaltene Schwunghenergie in hohem Maße genutzt und Antriebsenergie eingespart wird. Die Anordnung von Weichenverbindungen für Überleitstellen in fahrdynamisch geeigneten Abschnitten hilft ebenfalls, Langsamfahrstellen zu vermeiden. Schließlich dienen auch Ausbaumaßnahmen in Knotenbahnhöfen und Güterverkehrszentren mittelbar der Energieeinsparung, da Rangierfahrten vermieden und die Zugbildungszeiten verringert werden können.

#### 5.1.4 Maßnahmen durch Steuerung

Die netzweite rechnergestützte Steuerung des Zügeinsatzes in Anpassung an die Nachfrage kann die Auslastung der Züge verbessern, womit der spezifische Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Ausstoß je Reisenden-km und je Nutztonnen-km spürbar verringert werden kann. Allerdings sind hier Grenzen gesetzt, wenn die durch Taktfahrpläne gegebene Verfügbarkeit nicht wettbewerbsschädigend beeinträchtigt werden soll. Die Auslastung des TGV der französischen Eisenbahn liegt aber z. B. um 20% höher als die der bisherigen IC-Linien der DB.

Mit einer erweiterten Linienzugbeeinflussung lassen sich die einzelnen Zugfahrten so steuern, daß betriebliche Halte weitgehend vermieden werden. Auch lassen sich die für die pünktliche Betriebsführung zum Ausgleich von Störungen vorgesehenen Fahrplanreserven im Falle ihrer Nichtinanspruchnahme durch gezielt gesteuerte Verringerung der Fahrgeschwindigkeit zur Energieeinsparung nutzen. Simulationsrechnungen haben gezeigt, daß auf bergigen Strecken bis zu 20 % Antriebsenergie eingespart werden kann.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß im Schienenverkehr durch konsequente Ausnutzung aller Maßnahmen an Fahrzeugen, Infrastruktur und Steuerung bis zum Jahre 2005 die Energieausnutzung mindestens in der Größenordnung von 10 % verbessert werden kann, bei gesteigerter Auslastung der Züge auch noch deutlich mehr.

## 5.2 Luftverkehr

### 5.2.1 Grundlagen

Der zivile Weltluftverkehr ist von annähernd 960 Milliarden Personenkilometern (Pkm) im Jahre 1978 auf 1 700 Milliarden Pkm im Jahr 1988 angestiegen. Für das Jahr 2000 wird mit einer weiteren Verdopplung des Luftverkehrsaufkommens gerechnet, bis zum Jahr 2015 gehen Experten sogar von einer Verdreifachung des Luftverkehrs aus.

Gegenwärtig wird nach Angaben der IATA (International Air Transport Association) der Treibstoffverbrauch im zivilen Luftverkehr auf durchschnittlich 120 Millionen Tonnen im Jahr geschätzt.

Aus Kerosin, dem konventionellen Treibstoff im zivilen Luftverkehr, entsteht beim Verbrennungsvorgang im Triebwerk pro kg Treibstoff durchschnittlich 1,24 kg Wasserdampf und 3,15 kg Kohlendioxid. Desweiteren entstehen als Nebenprodukte Stickoxid, Kohlenmonoxid, unverbrannte Kohlenwasserstoffe, OH-Radikale und Ruß.

Bezogen auf den Personenstraßenverkehr werden beim zivilen Luftverkehr 9 % weniger Gewichtsanteile CO<sub>2</sub> pro Pkm emittiert.

Während außerhalb der Flugplatzbereiche die vom Flugverkehr herrührenden Immissionskonzentrationen in Bodennähe weit unterhalb der Nachweisgrenze von Meßgeräten liegen, und bereits durch schwache sonstige Quellen vollständig überdeckt werden, ist dies im direkten Einwirkungsbereich der Flughäfen nicht mehr der Fall. Immissionen sind hier deutlich feststellbar, wobei aber Werte wie in innerstädtischen Hauptverkehrsstraßen nicht erreicht werden.

Zu beachten ist hierbei jedoch die für den Luftverkehr spezifische Variation der Emissionshöhe. Während die anderen Verkehrsbewegungen im bodennahen Bereich stattfinden, erreicht der zivile Luftverkehr Flughöhen bis zu 15 km und verläuft somit teilweise oberhalb der Tropopause. Nach Angaben der Lufthansa wird hier bis zu 20 % der gesamten Treibstoffmenge verbraucht.

Im Gegensatz zur bodennahen Troposphäre, wo verkehrsbedingte Luftverunreinigungen aufgrund der Auswaschvorgänge in der Atmosphäre nur eine Lebensdauer von wenigen Tagen haben und nur regional wirken, haben Schadstoffemissionen in der Stratosphäre globale Wirkungen und Verweilzeiten von mehr als einem Jahr.

Vieles deutet darauf hin, daß von Wasser und Stickoxid im Abgas das größte Gefährdungspotential für den Bereich der Tropopause und der unteren Stratosphäre ausgeht. In dieser Höhe gefriert der das Triebwerk verlassende Wasserdampf zu dünnen Eiswolken, die je nach Höhe und meteorologischen Bedingungen eine relativ lange Lebensdauer haben und den Treibhauseffekt sehr viel stärker beeinflussen als z. B. das Gas CO<sub>2</sub>.

### 5.2.2 Maßnahmen am Fluggerät

Bei den vorstellbaren technischen Maßnahmen zur Reduktion der Schadstoffemission im zivilen Luftverkehr sind die drei folgenden Ansätze zu unterscheiden:

#### ● Triebwerkstechnik

Gegenüber der ersten Turbinenluftstrahl-Triebwerksgeneration, die in den 60er Jahren entwickelt und eingesetzt wurde (z. B. JT3D), weisen die heutigen modernen Triebwerke (V2500 und CFM56) einen um 40 % geringeren Verbrauch an Kerosin auf.

Am Beispiel der Boeing 747 ergibt sich folgendes Bild: Auf der Strecke Frankfurt – Miami benötigte die 1979 eingesetzte B 747-200 ca. 150 000 Liter Treibstoff. Heute benötigt die B 747-400 auf der gleichen Strecke bei gleicher Nutzlast etwas über 120 000 Liter Kerosin, was einer Reduktion um rund 20 % entspricht. Diese eindrucksvolle Verminderung ist sowohl auf die neue TW-Technologie als auch auf verbesserte Aerodynamik zurückzuführen (s. u.).

In gleicher Weise sanken die Emissionen der Treibhausgase Kohlendioxid und Wasserdampf, da sie direkt mit der verbrauchten Brennstoffmenge verknüpft sind.

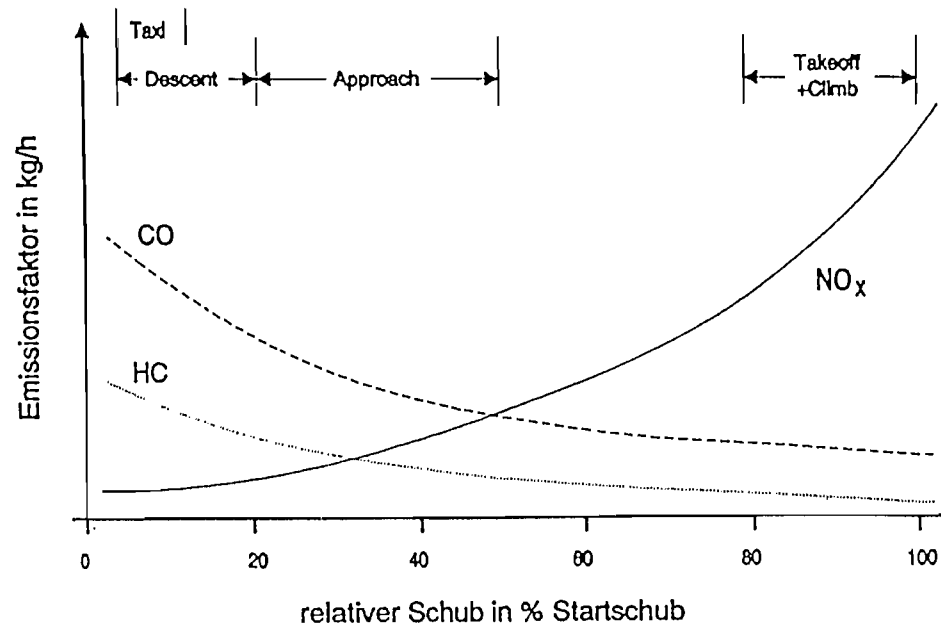
Im Gegensatz dazu hängt die Menge und Zusammensetzung der übrigen Schadstoffe, die wegen unvollständiger Verbrennung entstehen, von der Triebwerkskonstruktion und den daraus resultierenden Verhältnissen in der Brennkammer ab. So reduzierten sich die Schadstoffmengen an Kohlenmonoxid, unverbrannten Kohlenwasserstoffen und Ruß zum Teil um Größenordnungen, während aufgrund der in den heutigen Triebwerken vorherrschenden höheren Brennkammerdrücken und -temperaturen der Anteil des Stickoxid (NO<sub>x</sub>) zum Teil sogar zugenommen hat.

Unabhängig vom Triebwerkstyp ist jedoch zu beachten, daß die Menge und Zusammensetzung der Schadstoffemissionen sehr stark von der jeweiligen Flugphase abhängt. Betrachtet man den Flugverlauf zwischen „Block-Off“ und „Block-On“, d. h. vom Start bis zur Landung im bodennahen Bereich incl. Taxi, in seinen einzelnen Phasen sowie die entsprechenden Schubstellungen der Triebwerke, so zeigt sich, daß während der Flugphasen mit geringeren Triebwerksleistungen, also bei den Phasen Taxi-In, Taxi-Out, Sinkflug und Anflug, der Anteil der emittierten Kohlenwasserstoffe und Kohlenmonoxide wesentlich höher ist als der Stickoxidanteil (TÜV Rheinland). Im Gegensatz dazu nimmt bei hoher Triebwerksleistung, d. h. in der Startphase sowie während des Steigfluges, der Anteil der emittierten Stickoxide sehr stark zu, während der Kohlenmonoxid- und Kohlenwasserstoffanteil abnimmt (s. Abb. 1). Es ist davon auszugehen, daß der Verlauf des Kohlendioxidausstoßes qualitativ dem des Kohlenmonoxids entspricht.

Abb. 1:

Qualitativer Verlauf der CO-, HC- und NO<sub>x</sub>-Emissionsfaktoren, Strahltriebwerke im bodennahen Betriebsbereich

Quelle: TÜV Rheinland



Bei der diskutierten Einführung des Wasserstoffantriebs anstelle der herkömmlichen Triebwerke entsteht bei der eigentlichen Verbrennung kein Kohlendioxid, jedoch wird die zur Erzeugung des Wasserstoffs erforderliche elektrische Energie ihrerseits hauptsächlich durch Verbrennung fossiler Materialien gewonnen. Bei Verwendung von Wasserstoff als Treibstoff entsteht außerdem bei gleichem Energieäquivalent etwa 2,5 mal mehr Wasserdampf als bei der Verwendung von Kerosin. Die hohe Emissivität des Wasserdampfs ist bereits erwähnt worden.

#### ● Aerodynamik

Eine weitere Möglichkeit, Treibstoff einzusparen und damit den Schadstoffausstoß zu reduzieren, liegt in der Verringerung des aerodynamischen Widerstandes von Flügel und Zelle. Eine Verringerung des  $c_w$ -Wertes ist beispielsweise durch eine Laminarisierung der Tragflächen-, Leitwerks- und Triebwerksgondelstörung zu erreichen. Dies kann passiv durch entsprechende Formgebung oder aktiv durch Absaugen innerhalb der Grenzschicht erfolgen. Zudem erscheint eine Reduktion des turbulenten Reibungswiderstandes der Flugzeugoberfläche durch Verwendung von Riblets (Rillenfolie) bis zu 8% möglich.

#### ● Gewicht der Zelle

Das Flugzeuggewicht hat einen direkten Einfluß auf den Treibstoffverbrauch. Moderne Verbundwerkstoffe auf der Basis von Kohlefasern und Aramid besitzen eine Festigkeit, die mit der des Stahls vergleichbar ist, sind jedoch wesentlich leichter. Eine weitere Möglichkeit der Gewichtsreduzierung liegt in der Verwendung moderner Elektronik. So wird im Airbus A320 durch den Einsatz der elektronischen Fly-By-Wire-Steuerung eine Gewichtsreduzierung um 350 kg gegenüber dem herkömmlichen Prinzip der hydraulischen Umsetzung der Steuerkräfte erreicht. Eine weitere Verringerung ist durch den Einsatz der Fly-By-Light-Technologie zu erwarten.

Zu beachten ist hierbei, daß eine Verringerung des Flugzeuggewichtes zu einer Minderung des Verbrauches und damit auch der mitzuführenden Treibstoffmenge führt. Zusätzlich wird somit die für den Transport dieses Treibstoffes benötigte Menge an Kerosin eingespart.

#### Zusammenfassung der Maßnahmen am Fluggerät

- Die bisherige Zielsetzung einer fortschreitenden Reduktion der Treibstoffverbräuche durch eine verbesserte Triebwerkstechnologie muß konsequent weiterverfolgt werden, wobei die Problematik der Stickoxidemission berücksichtigt werden muß.
- In der langfristigen Betrachtung müssen alternative umweltfreundliche Treibstoffe für den Luftverkehr entwickelt werden unter Beachtung anderer Gesichtspunkte, wie der Wasserdampfemission in großen Höhen oder der Kohlendioxid-Entstehung beim Erzeugungsprozeß.
- Die Widerstandsminderung durch eine verbesserte Aerodynamik von Tragwerk, Zelle und Triebwerksgondeln ist weiterzuführen.
- Eine weitere Verringerung des Treibstoffverbrauchs durch eine Reduzierung des Flugzeuggewichtes unter Verwendung neuer Werkstoffe und Steuerungstechnologien (Fly-By-Wire, Fly-By-Light) ist anzustreben.

#### 5.2.3 Maßnahmen an der Infrastruktur

Als Infrastruktur für die Luftraumnutzungssteuerung, die Verkehrsflußsteuerung und die Luftverkehrsüberwachung und -lenkung, zusammengefaßt unter dem Begriff Air Traffic Management, sind die Bereiche CNS (Communication, Navigation, Surveillance) zu sehen.

Durch Maßnahmen in diesem Bereich läßt sich die Kapazität des Luftraumes erhöhen und somit der Luftverkehr hinsichtlich des Treibstoffverbrauchs und damit des Ausstoßes an Schadstoffen effizienter gestalten.

#### ● Kommunikation („C“)

Die gegenwärtige Kommunikation in der Luftfahrt beschränkt sich auf die Anwendung von VHF- und HF-Sprechverbindungen, in Abhängigkeit der jeweiligen Lufträume. Die Nachteile der bisher genutzten Kommunikationssysteme lassen sich in der Ausbreitungscharakteristik, der limitierten Anzahl der verfügbaren Kanäle sowie der Störempfindlichkeit gegenüber UKW-Radiosignalen zusammenfassen. Dies führt dazu, daß eine globale



Bedeckung nicht realisiert werden kann und daß in Gebieten mit hoher Verkehrsdichte Kapazitätsprobleme der Flugsicherungskontrolle auftreten können.

Das vom FANS-Komitee (Future Air Navigation Systems) der ICAO (International Civil Aviation Organization) vorgeschlagene zukünftige Konzept sieht neben anderem die Nutzung von Kommunikationssatelliten (AMSS, Aeronautical Mobile-Satellite Service) sowie die Möglichkeit der digitalen Datenübertragung zwischen den Luftfahrzeugen und den Bodenstationen vor (SSR Mode S, Datalink).

#### ● *Navigation („N“)*

Heute ist im zivilen Luftverkehr eine Punkt-zu-Punkt-Navigation auf fest definierten Luftverkehrsstraßen üblich. Dies hat eine Begrenzung der Kapazität zur Folge. Durch den Übergang zur Flächennavigation gestalten sich die Routensysteme flexibler. Dies ermöglicht die optimale Auslegung des Streckensystems unter Abwägung der Forderungen nach kürzesten Streckenverbindungen, Vermeidung bestimmter Lufträume, wie z. B. militärische Übungsgebiete und damit die Verringerung des Treibstoffverbrauches. Durch die so erfolgte Homogenisierung des Luftraumes läßt sich beispielsweise die Zahl der Warteschleifen (Holdings) um Größenordnungen verringern (s. 5.3.3).

Durch die weitere Optimierung der luft- und bodenseitigen Ortungs- und Navigationssysteme können die Staffelungswerte, insbesondere die der vertikalen Staffelung, herabgesetzt und damit die Luftraumkapazität zusätzlich erhöht werden.

#### ● *Luftraumüberwachung („S“)*

Für Flugsicherungszwecke sollen aufgrund internationaler Standardisierung in Zukunft nur noch Sekundärradaranlagen Anwendung finden. Durch die genauere Positionsermittlung von Luftfahrzeugen unter Einsatz technologischer Neuentwicklungen (Monopuls-Technik, LVA-Antennen etc.) konnte die Luftraumüberwachung in einigen Staaten verbessert werden. Dies kann in der Zukunft zu einer Senkung der Staffelungswerte und somit zu einer Erhöhung der Luftraumkapazität führen.

Weitere Möglichkeiten der Reduzierung der emittierten Schadstoffmengen ergeben sich durch eine anzustrebende Homogenisierung der Geschwindigkeiten auf stark beflogenen Strecken sowie in der generellen Neuordnung des Luftraumsystems und der Zuständigkeitsbereiche der Flugsicherungsdienste.

#### *Zusammenfassung der Infrastrukturmaßnahmen*

- Die bisher genutzten, teilweise kapazitätsbegrenzenden Kommunikationssysteme sind durch den konsequenten Einsatz neuer Technologien (AMSS, Datalink) in ihrer Anwendbarkeit zu erhöhen. Zielrichtung ist dabei, wie auch bei den nachfolgend angeführten Maßnahmen, eine stärkere Homogenisierung des Verkehrsflusses.
- Durch den Übergang zur Flächennavigation (RNAV) kann die navigatorische Flugdurchführung flexibler und somit in der Konsequenz auch ökologischer realisiert werden.

- Die Anwendung technologischer Neuentwicklungen auf dem Gebiet der Luftraumüberwachung (Monopuls-Technik, Geschwindigkeitshomogenisierung) sowie die Neuordnung des Luftraumsystems erhöhen die Flexibilität des Systems Luftverkehr.

#### *5.2.4 Maßnahmen der Steuerung*

Air Traffic Management (ATM) setzt sich aus den Komponenten Luftverkehrsüberwachung und -lenkung (Air Traffic Control, ATC), Verkehrsflußsteuerung (Air Traffic Flow Management, ATFM) und Luftraumnutzungssteuerung (Air Space Management, ASM) zusammen. Es dient der Realisierung eines sicheren und homogenen Verkehrsflusses. Das gegenwärtige ATM, das auf der vorhandenen Infrastruktur (s. 5.2.3) von CNS-Systemen beruht, weist beispielsweise folgende Mängel auf:

- Ausbreitungsbeschränkungen der quasioptischen Navigations- und Kommunikationssysteme, Einschränkungen bezüglich der Genauigkeit und Zuverlässigkeit anderer Systeme.
- Mangelnde Kompatibilität in der weltweiten Anwendung heutiger CNS-Systeme.
- Fehlende Möglichkeit des digitalen Datenaustausches zwischen Luftfahrzeug und Bodenstation und dadurch Kapazitätsprobleme bei der Sprachkommunikation.

Dementsprechend kann das gegenwärtige Steuerungssystem des Luftverkehrs (Flugsicherung) den gestellten Anforderungen nicht mehr gerecht werden. Zur Aufrechterhaltung des notwendigen Mindest-Sicherheitsstandards muß immer öfter auf eine planmäßige, flexible und in erster Linie ökonomische Verkehrsabwicklung verzichtet werden, wobei sich die Situation durch die Zunahme des Luftverkehrs weiter verschärfen wird. Eng verknüpft mit der erwähnten zunehmenden Unwirtschaftlichkeit im Flugbetrieb sind die ökologischen Aspekte. Beispielsweise addierten sich die verbrauchten Treibstoffmengen der notwendig gewordenen Warteschleifen allein für die Lufthansa-Flotte im Jahr 1989 auf insgesamt 30.000 Tonnen mit der daraus resultierenden Belastung an CO<sub>2</sub>, wobei die Tendenz weiter steigend ist.

Im Sinne einer Homogenisierung der Steuerungsprozesse, auch unter der Prämisse der Schadstoffminimierung, sind im wesentlichen die folgenden Maßnahmen zu ergreifen.

#### ● *Kopplung von bordseitigem Flight Management System (FMS) und dem Flugsicherungssystem*

In das Flight Management System wird vom Flugzeugführer vor dem Start die vorgesehene Flugstrecke in Form von Wegpunkten bzw. deren Koordinaten eingegeben. Unter Einbeziehung der Wetterdaten, der aktuellen Beladungssituation sowie der Leistungsmerkmale des Luftfahrzeuges ist eine sehr genaue vierdimensionale Vorausplanung (Raum und Zeit) des Flugverlaufes möglich. Wäre es möglich, diesen Plan ohne Störeinflüsse der Flugsicherung durchzuführen, könnte beispielsweise ein 8-stündiger Flug mit einer Vorhersagegenauigkeit von  $\pm 3$  Minuten verwirklicht werden.

Bei Einhaltung des durch das FMS errechneten vierdimensionalen Flugprofils ergäbe sich gegenüber dem tatsächlichen – durch die Flugsicherung beeinflussten – Profil eine Steigerung der Wirtschaftlichkeit und, damit einhergehend, eine Reduktion der Schadstoffemission. Daher ist anzustreben, dem FMS folgende flugsicherungsrelevante Aufgaben zu übertragen:

- Für den beabsichtigten Flug ist ein schadstoffoptimales Profil zu ermitteln und in größtmöglicher Genauigkeit an das Flugsicherungssystem zu übertragen (Datalink, s. o.).
- Die aktuellen Flugverlaufsdaten bzw. auftretende Abweichungen vom geplanten Flugprofil sind an das Flugsicherungssystem mittels Datalink zu übertragen, um auch auf der Bodenseite eine optimale und aktuelle Verlaufsplanung zu gewährleisten.

#### • *Verbesserte Genauigkeit der Flugplandaten*

Durch die Einbeziehung aktueller Wetterinformationen sowie der aktuellen Flugverlaufsdaten, also auch der flugsicherungsbedingten Abweichungen von den vordefinierten Streckenführungen, ist eine wesentlich effizientere und damit auch im Hinblick auf eine CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion optimierte Planung und Durchführung des Luftverkehrs zu erreichen.

Unter der Voraussetzung der Errichtung eines europäischen Hochgeschwindigkeitsnetzes der Eisenbahnen und der Anbindung der Verkehrsflughäfen ist eine Verlagerung des Kurzstreckenverkehrs unter 400 km Luftliniendistanz sowohl aus Gründen der Ökonomie als auch insbesondere der Ökologie auf die Schiene anzustreben. So liegt der spezifische Verbrauch einer B 737-200 (Kurzstreckenmuster) mit etwa 12 Liter Kerosin pro 100 Pkm ca. doppelt so hoch wie der des Langstreckenmusters B 747-200.

#### *Zusammenfassung der Steuerungsmaßnahmen*

- Die Kopplung des bordeigenen Flight Management Systems mit dem Flugsicherungssystem ist im Sinne einer Erhöhung des Wirkungsgrades der Steuerungsprozesse und somit einer Verringerung des Schadstoffausstoßes anzustreben.
- Durch die Einbeziehung verschiedenster Umgebungsparameter (aktuelle Wetterinformationen, etc.) in den Planungsprozess ist die Genauigkeit der Flugplandaten zu erhöhen.
- Der Kurzstrecken-Luftverkehr ist sowohl aus ökologischer als auch aus ökonomischer Sicht, auf die Bahn zu verlagern (Europäisches Hochgeschwindigkeitsnetz).

### 5.3 Binnenschifffahrt\*)

Binnenschiffe sind schon gegenwärtig hinsichtlich ihrer CO<sub>2</sub>-Emissionen besonders umweltfreundliche Güter-Transportmittel. Insofern ist eine Verlagerung von Transportleistung, insbesondere von Schiene und Straße wünschenswert, zumal die CO<sub>2</sub>-Emissionen von Binnenschiffen durch technische, verkehrliche und logistische Maßnahmen noch weiter reduziert werden können.

Die technischen Maßnahmen zur CO<sub>2</sub>-Reduktion werden im folgenden im Hinblick auf die lange Nutzungsdauer der Binnenschiffe von etwa 25 Jahren in Maßnahmen zur Um- bzw. Nachrüstung und für Neubauten getrennt.

#### *5.3.1 Technische Maßnahmen an vorhandenen Schiffen*

Durch häufigere und systematischere Wartung der Schiffsmotoren und durch teilweisen Austausch der Antriebsmotoren und Hilfsmaschinen gegen neue Aggregate erscheint ein CO<sub>2</sub>-

\*) Das Kapitel 5.3 „Binnenschifffahrt“ wurde unter Mitwirkung des Institutes für Schiffbau der RWTH Aachen (Leitung: Professor Dr.-Ing. H.-G. Schultz) ausgearbeitet.

Reduktionspotential von etwa 2 bis 5 % als gegeben. Darüber hinaus erscheinen durch Optimieren der Propulsionsorgane und durch eine im Zusammenhang damit naheliegende Umgestaltung des Hinterschiffsbereiches CO<sub>2</sub>-Reduktionen um jeweils 2 % als realisierbar.

Ein Umbau des Vor- und Hinterschiffsbereiches unter hydrodynamischen Gesichtspunkten läßt eine CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung um etwa 10 % erwarten.

Ob und in welchem Maße derartige Potentiale künftig ausgeschöpft werden, hängt entscheidend von den Rahmenbedingungen ab. Von den ca. 2500 Motor-Güterschiffen befindet sich eine große Anzahl im Partikulier-Besitz mit ca. 1 bis 2 Schiffen pro Eigner.

#### *5.3.2 Technische Maßnahmen an Neubauten*

Binnenschiffsaggregate haben gegenwärtig bereits den geringsten spezifischen Kraftstoffverbrauch aller im Verkehr eingesetzten Motoren. Durch innermotorische Maßnahmen und durch eine Nutzung der Abwärme (nachgeschalteter Rankine-Prozeß) ist noch ein geringes CO<sub>2</sub>-Sparpotential von etwa 9 % erkennbar.

Die Schiffsgröße ist heute durch eine europaweite Regelung – verbunden mit einer Regulierung des Schiffsraum-Angebotes durch nationale Abwrack-Aktionen – begrenzt. Technisch ist eine Vergrößerung der Tragfähigkeit bei Schubleichtern um 50 % und bei Motorgüterschiffen um 35 % realisierbar. Die größere Ladungsmenge erfordert naturgemäß auch eine größere Antriebsleistung, die allerdings deutlich unter der Steigerung der Tragfähigkeit liegt. Die resultierende Emissionsminderung beträgt etwa 20 %.

Selbstfahrende Güterschiffe und Schubleichter werden auf die Minimierung der Fertigungskosten und damit den Anschaffungspreis hin optimiert. Eine Optimierung der Form nach hydrodynamischen Gesichtspunkten läßt eine maximale CO<sub>2</sub>-Minderung von 10 % bei Selbstfahrern und von 15 % bei Schubleichtern erwarten. Im Mittel errechnet sich die günstigenfalls erreichbare Emissionsminderung zu 12 %.

Eine festigkeitgemäße Optimierung der Binnenschiffe und der Schubleichter führt zu einer Reduzierung des Stahlgewichtes und resultierend zu einer Erhöhung der Transportkapazität oder einer Verringerung des Schiffswiderstandes. Mit dieser Maßnahme erscheint eine Emissionsminderung von 10 % als plausibel.

Viele Motorschiffe fahren heute – vor allem in der Leerfahrt und in der Talfahrt – in gekoppeltem Verband, ohne jedoch hierzu besonders ausgerüstet zu sein. Bei einer generellen Auslegung für die Koppelfahrt kann in vielen Relationen – auch in teilbeladenem Zustand und in der Bergfahrt – im Koppelverband gefahren werden. Damit ist eine Emissionsminderung von ca. 10 bis 15 % möglich.

Neubauten wird es in größerem Umfang nur dann im Betrieb der deutschen Binnenflotte geben, wenn zukünftig das Transportaufkommen einen gewinnbringenden Einsatz neuer Schiffe verspricht. Dabei ist zu beachten, daß die Binnenflotte europaweit eingesetzt wird und gegenwärtig nur 45 % des Güterverkehrs auf bundesdeutschen Wasserstraßen mit Schiffen der Bundesrepublik Deutschland abgewickelt wird.

### 5.3.3 Verkehrliche und logistische Maßnahmen

In den folgenden drei Bereichen bestehen nennenswerte CO<sub>2</sub>-Reduktionspotentiale und Möglichkeiten, die Transportleistung zu steigern.

#### Betriebsoptimierung

Eine kontinuierliche rechnergestützte Anpassung der Betriebszustände an die Auslastung und die sich ständig ändernden Streckenparameter bietet künftig ein CO<sub>2</sub>-Reduktionspotential von etwa 15 %.

#### Verbesserung des Auslastungsgrades

Durch verbesserte Disposition kann die durchschnittliche Auslastung erhöht und insbesondere der Anteil der Leerfahrten reduziert werden. Das resultierende CO<sub>2</sub>-Reduktionspotential wird etwa 15 % betragen.

#### Ausweitung des Streckennetzes für die Sechserfahrt

Auf dem Rhein sind Schubverbände mit 6 Leichtern gegenwärtig nur zwischen Rotterdam und Duisburg erlaubt; außerhalb dieser Strecke darf nur mit 4 Leichtern gefahren werden. Der Einsatz von aktiven Gelenken in der Schubschiffahrt kann zu einer Ausweitung des Netzes und somit zu einer erheblichen Steigerung der Transportkapazität um bis zu 50 % auf diesen neuen Strecken führen. Unter Berücksichtigung einer erforderlichen Leistungserhöhung des Schubbootes ergibt sich resultierend eine deutliche Emissionsminderung in diesen Teilbereichen.

Durch technische und verkehrliche Maßnahmen wird sich künftig die vergleichsweise geringe Verkehrsleistung von Binnenschiffen noch wesentlich steigern lassen. Eine maximale CO<sub>2</sub>-Reduktion um etwa 40 % erscheint als möglich. Allerdings werden derartige Maßnahmen wegen der hohen Lebensdauer von Binnenschiffen erst sehr langfristig wirksam werden, sofern nicht durch besondere Rahmenbedingungen Anlaß zu zahlreichen Umbauten und zu rascherer Substitution gegeben wird.

## 6. Zusammenstellung und Rahmenbedingungen für die Erschließung der CO<sub>2</sub>-Reduktionspotentiale

Im Hinblick auf den Beschluß der Bundesregierung vom 13.6.1990, die energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen der Bundesrepublik Deutschland in den Grenzen vor der Vereinigung bis zum Jahre 2005 auf 75 % der Emissionen des Jahres 1987 zurückzuführen, hat sich die Gruppe Verkehrstechnik des Wissenschaftlichen Beirats des Bundesministers für Verkehr mit der Frage befaßt, welches Einsparpotential an CO<sub>2</sub>-Emissionen im Bereich des Verkehrs in dem Zeitraum bis 2005 realisiert werden könnte. Hierbei ist einerseits die mögliche technische Entwicklung im Verkehrswesen, andererseits die durch die Siedlungs- und Wirtschaftsstruktur und durch das Verhalten der Bevölkerung bedingte Veränderung der Verkehrsleistung besonders zu betrachten.

Die genannte Zielsetzung ist im wesentlichen durch folgende unterschiedliche Strategien und Maßnahmen zu erreichen:

- Emissionsarmer Betrieb der Verkehrsmittel durch Verbesserung an Fahrzeugen, an Fahrzeugen und in der Verkehrssteuerung,
- Einführung regenerativer oder CO<sub>2</sub>-freier Energien,
- Verlagerung von Verkehrsleistung auf umweltfreundlichere Verkehrsmittel und
- Vermeidung von Verkehrsleistung mit motorisierten Verkehrsmitteln.

Den Hauptanteil zur Emissionsminderung werden technische Verbesserungen an den Fahrzeugen und auch an der Infrastruktur beitragen können. Diese technischen Möglichkeiten sind allerdings nur ausschöpfbar, wenn sie durch entsprechende flankierende Maßnahmen, die das Verhalten aller Beteiligten beeinflussen, unterstützt werden.

Voraussetzung zur Beurteilung der Wirkung der einzelnen Strategien und Maßnahmen und ihres Zusammenspiels ist die Kenntnis der zukünftigen Verkehrsleistung. Ausgangspunkt der vorgelegten Betrachtungen sind Prognosen auf der Basis eines Trendszenariums, das im Rahmen der Studien für die Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ erarbeitet wurde. Durch die Öffnung der Grenzen nach dem Osten werden die Verkehrsleistungen auch auf dem Gebiet der Bundesrepublik in den alten Grenzen jedoch deutlich stärker steigen.

Nachfolgend werden die Einsparpotentiale und die wesentlichen Bedingungen, unter denen sie realisiert werden könnten, für die Bereiche

- Verringerung und Verlagerung von Verkehr,
- effizientere Abwicklung und technische Möglichkeiten im Straßenverkehr und
- effizientere Abwicklung und technische Möglichkeiten im übrigen Verkehr

zusammenfassend dargestellt.

#### Verringerung und Verlagerung von Verkehr

Mit Blick auf den Zeithorizont 2005 und die nur langfristig veränderliche Siedlungs- und Wirtschaftsstruktur sowie die Mobilitätswünsche der Bevölkerung ist im Personenverkehr eine Verringerung der Fahrtenzahl oder -länge kaum zu erwarten, im Gegenteil, beim Geschäfts- und Dienstreiseverkehr und beim Freizeitverkehr eher eine Steigerung. Ein Verlagerungspotential vom motorisierten Individualverkehr zum öffentlichen Personennahverkehr im wesentlichen im Bereich der größeren Städte wird beim Berufsverkehr und in geringerem Maße beim Einkaufs- und Erledigungsverkehr gesehen unter der Voraussetzung, daß das Leistungsangebot des ÖPNV spürbar verbessert wird und Engpässe vor allem beim ruhenden Verkehr bestehen bleiben und weiter gegebenenfalls durch Parkraumbewirtschaftung entstehen. Im Fernverkehr sind beim Geschäfts- und Dienstreiseverkehr und in geringerem Maße beim Urlaubsverkehr Verlagerungen vom Pkw und auch vom Flugzeug zu Bahn und Bus möglich.

Im Güternahverkehr ist die Zahl und Länge der Fahrten durch verbesserte betriebliche Organisation und zwischenbetriebliche Kooperation unter Einsatz besserer Logistik zu verringern, insbesondere in Ballungszentren bei zusätzlicher Abstützung auf Güterverkehrszentren. Eine Verlagerungsmöglichkeit auf andere, umweltschonendere Verkehrsmittel besteht praktisch nicht. Im Güterfernverkehr ist sowohl die Verringerung der Zahl der Fahrten wie auch die Verlagerung von Verkehr auf Bahn und Schiff möglich. Alle Vermeidungs- und Verlagerungsstrategien bedingen überregionale Kooperationsformen, gestützt auf ein Netz von Güterverkehrszentren und neue Angebote der Eisenbahn. Bei Nutzung aller Möglichkeiten ließe sich die Zahl der prognostischen Lkw-Fahrten gegenüber heute deutlich reduzieren.

Stellt man die Zahlen für die CO<sub>2</sub>-Emissionen und Verkehrsleistungen, wie sie im Kapitel 1 genannt sind, einander gegenüber, so ergibt sich die Tabelle 6. Daraus lassen sich die auf die Verkehrsleistung bezogenen durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen errechnen. Für den Güterverkehr mit Lkw ergibt sich z. B. durchschnittliche spezifische CO<sub>2</sub>-Emission von 0,21 t je 1000 tkm und für die Eisenbahn 0,04 t je 1000 tkm. Damit läßt sich bei technischen Status quo-Bedingungen der Einfluß der Verlagerung von Güterverkehrsleistung vom Lkw auf die Bahn in bezug auf die CO<sub>2</sub>-Emission bestimmen. Eine Verlagerung von 5% der Lkw-Verkehrsleistung auf die Bahn würde beispielsweise eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emission des Güterverkehrs um 3% bedeuten. Dabei würde die Güterverkehrsleistung der Bahn um 12,5% zunehmen.

Um die angestrebte Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emission des Verkehrs zu realisieren, ist u. a. eine Verlagerung erheblich größerer Verkehrsleistungsanteile auf den Schienenverkehr erforderlich, wofür eine deutliche Steigerung des Leistungsangebotes der Eisenbahn auch unter Nutzung unkonventioneller Lösungen nötig wird.

Tabelle 6: CO<sub>2</sub>-Emission und Verkehrsleistung der Verkehrsmittel im Jahre 1987

PERSONENVERKEHR	CO <sub>2</sub> -Emission		Verkehrsleistung	
	Mio t	%	Mrd Pkm	%
Pkw, Motorräder	97,0	81,2	533	71,1
Busse, Straßen- u. U-Bahnen	4,0	3,4	79	10,5
Eisenbahnen	3,1	2,6	40	5,3
Flugzeuge	15,3	12,8	98	13,1
	119,4	100,0	750	100,0
GÜTERVERKEHR	CO <sub>2</sub> -Emission		Verkehrsleistung	
	Mio t	%	Mrd tkm	%
Lkw	30,0	75,0	145	54,1
Eisenbahnen	2,4	6,0	58	21,6
Flugzeuge	5,4	13,5	5	1,9
Binnenschiffe	2,1	5,3	50	18,7
Rohrfernleitungen	0,1	0,2	10	3,7
	40,0	100,0	268	100,0

#### Effizientere Abwicklung und technische Möglichkeiten im Straßenverkehr

Der effizienteren Abwicklung des Straßenverkehrs kommt wegen seiner weit überwiegenden Anteile an den CO<sub>2</sub>-Emissionen des Verkehrs eine besondere Bedeutung zu. Der Hauptteil seines Einsparpotentials liegt in technischen Maßnahmen an den Kraftfahrzeugen. Ohne Berücksichtigung eines Anstieges der Verkehrsleistung wäre für die Pkw-Neuflotte im Jahre 2005 durch fahrzeugtechnische Maßnahmen, einschließlich erster Anwendungen von alternativen Energien sowie ergänzend durch einige unmittelbar zugeordnete verkehrliche Maßnahmen, eine Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um maximal 55% möglich. Bei Berücksichtigung des zeitlich gestaffelten Wirksamwerdens der Maßnahmen und bei einer durchschnittlich zehn-

jährigen Lebensdauer reduziert sich dieses Einsparpotential auf 41% für die im Jahre 2005 im Verkehr befindliche Pkw-Flotte. Unterstellt man einen Anstieg der Pkw-Verkehrsleistung von 25% bis 2005, so kann eine Emissionssenkung von höchstens 26% im Pkw-Verkehr angenommen werden, sofern alle technischen und diesen unmittelbar zugeordneten verkehrlichen Reduktionspotentiale konsequent ausgenutzt werden.

Für den Lkw-Verkehr wäre durch fahrzeugtechnische und einige unmittelbar zugeordnete verkehrliche Maßnahmen eine maximale Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emission um etwa 25% möglich. Bei dem zeitlich gestaffelten Wirksamwerden der verschiedenartigen Maßnahmen könnte daraus für die Lkw-Flotte im Jahre 2005 eine Emissionsminderung von maximal 15% resultieren. Unter Berücksichtigung eines angenommenen Zuwachses der Lkw-Verkehrsleistung um 30% bis 2005 ergibt sich günstigenfalls ein Anstieg der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Lkw-Verkehr von fast 10%.

Im Busverkehr könnten durch fahrzeugtechnische Maßnahmen die CO<sub>2</sub>-Emissionen bei Neufahrzeugen um etwa 35% bis zum Jahre 2005 reduziert werden. Für die 2005 im Verkehr befindliche Busflotte ergäbe sich somit aufgrund des zeitlich gestaffelten Wirksamwerdens der verschiedenartigen Maßnahmen eine Emissionsminderung von maximal 25%. Bei einer angenommenen Zunahme des Busverkehrs um 50% ist für die im Jahre 2005 im Verkehr befindliche Busflotte günstigenfalls eine Zunahme der CO<sub>2</sub>-Emissionen um etwa 10% zu erwarten.

Zusammenfassend könnte sich für Pkw, Lkw und Busse bei Beachtung der jeweiligen Anteile an den Emissionen ohne Berücksichtigung eines Anstieges der Verkehrsleistung eine Emissionsminderung von 35% ergeben. Unterstellt man einen Zuwachs der Verkehrsleistung in den vorstehend angenommenen Größordnungen, so errechnet sich für den gesamten Straßenverkehr günstigenfalls eine Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 17%.

Der Einfluß der Straßeninfrastruktur auf mögliche CO<sub>2</sub>-Einsparungen läßt sich wegen der vielfachen Verflechtungen und der daraus resultierenden Wechselwirkungen kaum quantifizieren. Generell läßt sich feststellen, daß alle Maßnahmen an der Infrastruktur, die einerseits zu geringeren Fahrtweiten des Kraftfahrzeugverkehrs und andererseits zu einer Reduktion der Staus führen, einen positiven Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Einsparung leisten. Zu vermeiden ist jedoch, daß durch entsprechende Infrastrukturverbesserungen einerseits die Nutzung der öffentlichen Verkehrsmittel geschwächt wird und andererseits beispielsweise auf den Autobahnen mit solch hohen Geschwindigkeiten gefahren werden kann, daß Kraftstoffverbrauch und somit CO<sub>2</sub>-Emissionen wieder ansteigen, falls dies nicht durch technische Verbesserungen an den Kraftfahrzeugen kompensiert wird.

Bei der Steuerung des Kraftfahrzeugverkehrs auf Straßen außerorts kommt der Einflußnahme auf eine gleichmäßigere Fahrt und der Reduktion von Stausituationen durch einen verstärkten Einsatz der Verkehrsleittechnik eine besondere Bedeutung bei der CO<sub>2</sub>-Reduktion zu.

Innerorts kann durch Ausschöpfen aller Möglichkeiten für eine verkehrabhängige Lichtsignalsteuerung mit einer Verringerung von Halten und von Wartezeiten zur CO<sub>2</sub>-Reduktion beigetragen werden. Eine automatisierte Routenempfehlung und Zielführung im städtischen Straßennetz auch bei der Parkplatzsuche kann durch eine Verringerung der Fahrstrecke einen Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Verminderung leisten.

### Effizientere Abwicklung und technische Möglichkeiten im übrigen Verkehr

Trotz der Dominanz des Straßenverkehrs beim CO<sub>2</sub>-Ausstoß sollen hier die übrigen Verkehrsarten angesprochen werden, da auch bei ihnen Verbesserungspotentiale für eine effizientere Energienutzung vorhanden sind. Außerdem wird die Verlagerung von Verkehr von der Straße – und auch vom Flugzeug – zur Schiene und – beim Güterverkehr – zum Binnenschiff um so wirkungsvoller im Hinblick auf die Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen, je günstiger das Verhältnis der spezifischen Werte Primärenergieverbrauch je Personenkilometer bzw. je Nutztonnenkilometer für die den Verkehr übernehmenden Verkehrsarten bleibt.

Im Bereich des Schienenverkehrs kann durch Maßnahmen an den Fahrzeugen die CO<sub>2</sub>-Emission um mehr als 10% verringert werden. Auch Maßnahmen an der Infrastruktur tragen durch Streckenverkürzungen und Vermeiden von Zughalten an Engpaßstellen zur weiteren Einsparung bei. Durch die Steuerung der Züge entlang der Strecke kann eine gleichmäßigere Geschwindigkeit und durch die nachfrageabhängige Disposition der Züge eine bessere Auslastung erreicht werden. Beide Maßnahmen tragen ebenfalls zur Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen bei. Schließlich ließe sich bei der Energieversorgung der Bahnen der Anteil des aus Verbrennung fossiler Brennstoffe erzeugten Stromes verringern.

Im Bereich der Luftfahrt läßt sich durch technische Verbesserungen der auf die Verkehrsleistung bezogene Treibstoffverbrauch erheblich reduzieren, so daß bei der von ICAO, AIRBUS, BOEING u. a. im Luftverkehr prognostizierten Verdoppelung der Luftverkehrsleistung der Treibstoffverbrauch nicht in gleichem Maße, sondern zwischen 60% und 70% im Bezug auf das heutige Niveau ansteigen wird. Dieser Prozentwert basiert auf der Annahme, daß bis zum Jahr 2000 insgesamt eine Reduktion des spezifischen Treibstoffverbrauchs je Sitzplatz von 25% flottenweit durchgesetzt wird. Dies kann jedoch nur durch die konsequente schrittweise Einführung von Maßnahmen realisiert werden, wie weitere Verbesserung der Triebwerkstechnologie mit einer möglichen Verringerung des Treibstoffverbrauchs von bis zu 20%, Widerstandsminderung durch verbesserte Aerodynamik sowie Reduzierung des Flugzeuggewichtes (ca. 15%), Anwendung neuer Technologien im CNS-Bereich, Kopplung des bordeigenen Flight Management Systems mit dem Flugsicherungssystem sowie längerfristiger Übergang zu alternativen Brennstoffen.

Ein großes Potential zur Reduzierung des Schadstoffausstoßes liegt in der möglichen Verlagerung des Kurzstrecken-Luftverkehrs auf ein zu installierendes europäisches Hochgeschwindigkeitsschienennetz.

Im Bereich der schon heute im Hinblick auf CO<sub>2</sub>-Emissionen sehr günstigen Binnenschiffahrt liegen gleichfalls noch beachtenswerte technische und verkehrliche Einsparpotentiale, die allerdings bei der Langlebigkeit und Eigentümerstruktur der Binnenschiffe nur allmählich erschlossen werden können.

Zusammenfassend kann festgestellt werden:

1. Das wesentliche Reduktionspotential für die CO<sub>2</sub>-Emissionen liegt im Bereich der technischen Entwicklung der Fahrzeuge, besonders der Straßenfahrzeuge.
2. Weitere Reduktionspotentiale sind durch die Verringerung von individuellem Straßenverkehr und Luftverkehr und deren Verlagerung auf umweltfreundlichere Verkehrsmittel zu

erschließen. Sie sind jedoch geringer einzustufen und erfordern zu ihrer Erschließung die Anpassung der Infrastruktur, einschließlich der Kommunikationstechnik.

3. Ein zusätzliches Potential besteht in der verbrauchsmindernden Fahrweise der Verkehrsteilnehmer.
4. Die Reduktionspotentiale sind nur auszuschöpfen, wenn durch abgestimmte wirksame Maßnahmen die technischen Entwicklungen und die zusätzlich notwendigen Verhaltensänderungen aller Verkehrsteilnehmer bewirkt werden.

Die erforderlichen Maßnahmen müssen in erster Linie auf eine Verringerung des fossilen, nicht regenerativen Kraftstoffverbrauches je Einheit der Verkehrsleistung zielen, d.h. durch preispolitische Maßnahmen (z. B. Erhöhung der Mineralölsteuer für alle fossilen, nicht regenerativen Energien) die variablen Kosten erhöhen, um damit die Entwicklung und Einführung verbrauchsgünstiger Fahrzeuge bzw. Verkehrsmittel und alternativer Antriebe zu fördern und die Menge der zu leistenden Fahrzeugkilometer zu verringern bzw. ihren Anstieg zu vermindern (Zahl der Fahrten, Auslastung der Fahrzeuge) sowie das Fahrverhalten der Verkehrsteilnehmer entsprechend zu beeinflussen. Durch ergänzende Besteuerung des Verbrauchs bzw. der Abgasemission der Fahrzeuge sind die vorstehend genannten Wirkungen zu verstärken.

In zweiter Linie muß durch den abgestimmten Ausbau der Infrastruktur ein flüssiger Verkehrsablauf netzweit sichergestellt und besonders die Leistungsfähigkeit und Attraktivität der Verkehrsmittel mit niedriger CO<sub>2</sub>-Emission erhöht werden.

Schließlich können durch Festsetzung verschärfter Grenzwerte (Abgas, Höchstgeschwindigkeit, Achslast) die Entwicklungen unterstützt und international vereinheitlicht werden. Zu bedenken ist dabei, daß bei manchen Maßnahmen CO<sub>2</sub>-Reduktionen erst durch Sekundäreffekte zu erzielen sind (z. B. Einführung einer Geschwindigkeitsbegrenzung). Nicht zuletzt sollte durch eine problemorientierte, stetige Öffentlichkeitsarbeit dazu beigetragen werden, eine Bewußtseinsänderung aller Verkehrsteilnehmer herbeizuführen.

Die hier unter dem Hauptgesichtspunkt „CO<sub>2</sub>-Emissionen“ empfohlenen Maßnahmen sind so zu bemessen, daß sie für andere betroffene Bereiche (z. B. Wirtschaft und Industrie, Sozialwesen, Stadtentwicklung) verträglich sind.

Anschließend sei darauf hingewiesen, daß die Verringerung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes nicht ein örtlich oder ein national begrenztes, sondern ein globales Problem ist.