ECONSTOR
Make Your Publications Visible.

A Service of

ZBW Leibniz-Informationszentrum Wirtschaft
Leibniz Information Centre for Economics

Schallaböck, Karl Otto; Fischedick, Manfred; Brouns, Bernd; Luhmann, Hans-Jochen; Merten, Frank

Research Report

Klimawirksame Emissionen des PKW-Verkehrs und Bewertung von Minderungsstrategien

Wuppertal Spezial, No. 34

Provided in Cooperation with:
Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy

Suggested Citation: Schallaböck, Karl Otto; Fischedick, Manfred; Brouns, Bernd; Luhmann, Hans-Jochen; Merten, Frank (2006) : Klimawirksame Emissionen des PKW-Verkehrs und Bewertung von Minderungsstrategien, Wuppertal Spezial, No. 34, ISBN 3929944723, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, Wuppertal,
https://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:101:1-200911022770

This Version is available at:
https://hdl.handle.net/10419/59274

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.

WWW.ECONSTOR.EU

Mitglied der Leibniz-Gemeinschaft

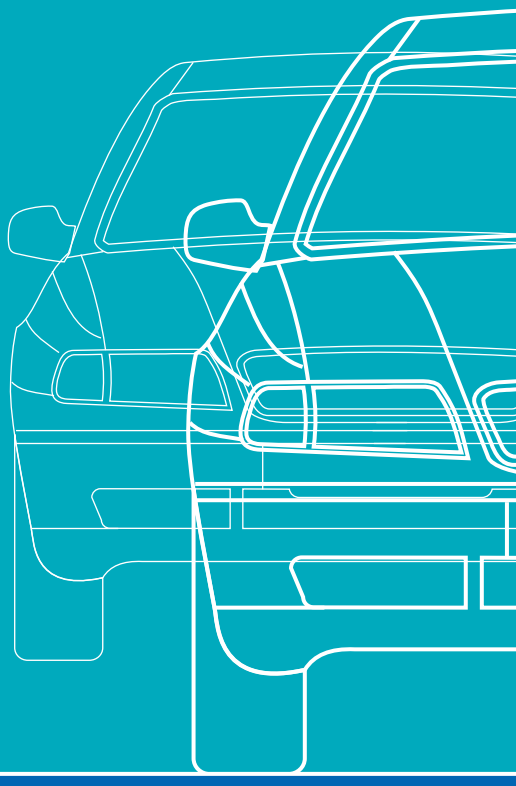
Wissenschaftszentrum Nordrhein-Westfalen
Institut Arbeit und Technik

Kulturwissenschaftliches Institut

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH

Klimawirksame Emissionen des PKW-Verkehrs

und Bewertung von Minderungs-strategien



WUPPERTAL SPEZIAL 34

Karl Otto Schallaböck
Manfred Fischedick
Bernd Brouns
Hans-Jochen Luhmann
Frank Merten
Hermann E. Ott
Andreas Pastowski
Johannes Venjakob

Wuppertal Spezial 34

Klimawirksame Emissionen des PKW-Verkehrs und Bewertung von Minderungsstrategien

Karl Otto Schallaböck
Manfred Fischedick
Bernd Brouns
Hans-Jochen Luhmann
Frank Merten
Hermann E. Ott
Andreas Pastowski
Johannes Venjakob

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH

© 2006 Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH
Grafik, Satz, Gestaltung: VisLab Wuppertal Institut
Druck: Offset Company, Wuppertal
ISBN 3-929944-72-3

Inhalt

Einleitung 5

Kapitel 1: Executive Summary 6
Problemlage 6
Lösungsansätze 8
Maßnahmen 10

Kapitel 2: Das Klimaproblem und der Versuch, es durch Verhandlungen zu lösen 12
Die Theorie vom anthropogenen Treibhauseffekt 12
Veränderungen in der Zusammensetzung der Atmosphäre 14
Beobachtbarer und zukünftiger Klimawandel 16
Internationale Verpflichtungen zum Klimaschutz 20

Kapitel 3: Die Rolle des Verkehrs bei der Klimabelastung 27
Die Situation in Europa 27
Globale Emissionen des Verkehrs im Trend bis 2050 30

Kapitel 4: Der Verkehr in Deutschland und seine Klimabedeutung 34
Übersicht über die klimarelevanten Verkehrsemissionen in Deutschland 34
Bisherige Entwicklung des PKW-Verkehrs in Deutschland 40
Künftige Entwicklung des PKW-Verkehrs in Deutschland 44
Der langfristige Beitrag des Verkehrs zum Klimaschutz 47

Kapitel 5: Technische Einflussfaktoren und Lösungsstrategien im Hinblick auf den Kraftstoffverbrauch und die Treibhausgasemissionen des Straßenverkehrs 49
Kraftstoffe 50
Potenziale zur Kraftstoffeinsparung bei konventionellen Otto- und Dieselmotoren sowie bei alternativen Motorkonzepten 56
Kraftstoffeinsparung durch Getriebe-Optimierung 67
Äußere Fahrwiderstände 69
Zusätzliche Treibhausgasemissionen durch Nebenaggregate im PKW am Beispiel von Klima- und Heizungsanlagen 73
Tagsüber Fahren mit Licht („Tagfahrlicht“) 75
Abschließende Bewertung 76

Kapitel 6: Minderungsansätze für Klimalasten durch den PKW-Sektor 78
Gliederung und mögliche Beiträge von Maßnahmen im PKW-Sektor 79
Spezifische Anreize zur Verbrauchs- und Emissionsabsenkung bei PKW heute 83
Anreize zur Verbrauchsabsenkung bei PKW – zukünftige Maßnahmen 86

Kapitel 7: Ergebnis 96

Literatur 99

Einleitung

Klima und Verkehr ist ein vielfach diskutiertes Thema, und die Vielzahl der geäußerten Ansichten und Vorschläge machen die Sache nicht gerade übersichtlich. Aus diesem Grund hat die Porsche AG das Wuppertal Institut beauftragt, in übersichtlicher und systematischer Form Stand und Perspektiven zusammenzutragen.

Für den eiligen Leser werden gleich zu Anfang in Kapitel 1 maßgebliche Kernsätze und deren Hintergrund zusammenfassend dargestellt. Für eine Begründung im Einzelnen ist allerdings die darauf folgende ausführliche Darstellung unentbehrlich.

Eingeführt in die Fragestellung wird durch eine Analyse des gegenwärtigen Kenntnisstandes des sog. Klimaproblems in Kapitel 2, also der Frage nach der Klimaänderung, der Verursachung der Klimaänderung durch Menschen, sowie der Relevanz dieser Entwicklung; hierzu gehört selbstverständlich auch die Beschreibung, wie bisher politisch mit der Problemstellung umgegangen wurde, welche Ergebnisse erreicht wurden und welche noch offen stehen.

Daran schließt sich in Kapitel 3 der Aufweis an, in welchem Umfang der Verkehr auf nationaler, europäischer und globaler Ebene zu den anthropogenen Klimabelastungen beiträgt und welche Entwicklungstrends hier bestehen.

Kapitel 4 wendet sich in zunehmender Konzentration dem Stand und den Perspektiven des Verkehrs und seiner Emissionen in Deutschland zu. Der besondere Fokus liegt hier beim PKW-Verkehr, ohne dass die anderen Verkehrsbereiche vernachlässigt werden.

Wegen der besonderen Bedeutung technischer Lösungen werden die technischen Potenziale zur Verminderung des Treibstoffverbrauchs und der Treibhausgasemissionen der PKW in Kapitel 5 vertieft betrachtet.

Kapitel 6 widmet sich dann der Frage nach den Maßnahmen, die geeignet sein könnten, die Klimalasten aus dem PKW-Verkehr auch tatsächlich zu senken. Hierzu ist die Selbstverständlichkeit besonders zu betonen, dass zwar die Wirkungsweise und der Wirkumfang einzelner Maßnahmenansätze oder -ausprägungen durchaus der wissenschaftlichen Diskussion zugänglich sind, dass jedoch die Auswahl der Maßnahmen im Kern als gesellschaftlicher Prozess begriffen werden muss.

Abschließend werden die Ergebnisse in Kapitel 7 noch einmal kurz zusammengeführt.

Kapitel 1
Executive Summary

Problemlage

Die durch menschliche Aktivitäten herbeigeführte Klimaänderung stellt nach überwiegender fachlicher Einschätzung ein zunehmend ernstes Problem dar, das zu Handlungsnotwendigkeiten führt.

Die Anzeichen einer globalen Klimaerwärmung sind kaum mehr zu übersehen, auch statistische Auswertungen weltweit erfasster Klimadaten zeigen in den letzten Jahren eindeutige Klimaänderungen, und es festigen sich die Erkenntnisse darüber, dass die menschlichen Aktivitäten, insbesondere die Verbrennung fossiler Energieträger, maßgeblich dazu beitragen. Die vorliegenden Modellrechnungen zeigen, dass die Folgen des Klimawandels in Zukunft äußerst schwerwiegend sein können; es besteht somit dringender Handlungsbedarf, den Klimawandel und seine Folgen abzumildern und abzubremsen, um eine Chance zu eröffnen, sich an den dann noch zu erwartenden Klimawandel anpassen zu können. Als Ziel wird dabei angestrebt, die globale Erwärmung nicht über 2 °C gegenüber der vorindustriellen Zeit ansteigen zu lassen.

Die bisherigen politischen Ansätze zur Behandlung des Klimaproblems gehen in die richtige Richtung, sind aber in ihrem Umfang und in ihrer praktischen Umsetzung noch unzureichend.

Im Vergleich zur Behandlung anderer Weltprobleme ist das bisher in der Klimadiplomatie Erreichte durchaus beachtlich: ein breit getragener Verhandlungsprozess, der mit dem Kyoto-Protokoll auch ein völkerrechtlich bindendes Übereinkommen mit Verfahrensregeln und mit zeitlich fixierten Zielgrößen und Verpflichtungen beinhaltet. Gleichwohl ist die sachliche, zeitliche und räumliche Reichweite der bisherigen Übereinkommen noch absolut unzureichend, und selbst die Umsetzung der bisherigen Vereinbarungen ist aus heutiger Sicht in vielen Ländern kaum in dem zugesagten Umfang zu erwarten.

Eine weitere Fortentwicklung der Klimaforschung und der Klimapolitik ist notwendig und auch wahrscheinlich.

Die internationale Debatte über die Fortführung des klimapolitischen Pfades über das Kyoto-Protokoll hinaus ist im Gange und auch Gegenstand intensiver Forschungstätigkeit. Längerfristig wird es darauf ankommen, im Wege international ausgehandelter Kompromisse eine ausgewogene Kombination von Dämpfungsstrategien für die Klimabelastung („mitigation") und von Anpassungsstrategien an die nicht mehr vermeidbaren Klimaänderungen und deren Folgen („adaptation") anzusteuern. Mit großer Wahrscheinlichkeit werden von beiden Seiten signifikante Änderungsimpulse auf Wirtschaft und Gesellschaft ausgehen.

Der Verkehrssektor ist keineswegs der einzige, jedoch ein wesentlicher Verursacher der Klimaprobleme.

Aufgrund der mittlerweile in zunehmender Qualität vorliegenden Daten zu klimarelevanten Emissionen und einem zunehmenden Verständnis ihrer Bedeutung kann das Gewicht verschiedener „Klimabelaster" sowohl regional als auch sektoral immer besser abgeschätzt werden. Insgesamt dominieren die reichen OECD-Länder die Klimabelastungen; in diesen Ländern stellt der Verkehrssektor zwar nicht die hauptsächliche, jedoch – mit z.B. etwa 20 Prozent in der EU – eine maßgebliche Quelle der Klimalasten dar. Zudem weisen die Verkehrsanteile an den gesamten Klimalasten weltweit generell eine ansteigende Tendenz auf. Der Handlungsbedarf gerade auch im Verkehrssektor erscheint somit evident.

Künftig tragen vor allem auch die Nicht-OECD-Länder mit ihrem Verkehr zur Klimabelastung bei.

Wegen des Bevölkerungswachstums, der weiteren wirtschaftlichen Entwicklung und insbesondere zunehmender technischer Ausstattung steigen die Klimalasten der Nicht-OECD-Länder an und führen zu deutlich steigenden Anteilen dieser Ländergruppe an den globalen Klimabelastungen. Dies gilt in besonderer Weise auch für den Verkehrsbereich, der in vielen dieser Länder bislang noch vergleichsweise schwach entwickelt ist.

Nach einem aktuellen Modell der Internationalen Energieagentur (IEA) werden die Nicht-OECD-Länder die OECD-Länder bis zum Jahr 2050 bei den CO_2-Emissionen des Verkehrs überholen.

Die Entwicklung des Verkehrs und seiner Klimalasten in den OECD-Ländern ist jedoch auch wegen ihres Vorbildcharakters weiterhin maßgeblich.

Auch wenn die Klimabelastungen aus dem Verkehr der OECD-Länder in Zukunft langsamer wachsen als in den Nicht-OECD-Ländern, bleiben sie hier weiterhin pro Einwohner bei einem Mehrfachen der dortigen Beiträge. Eine Angleichung der Werte „von unten" hätte für das Klima erhebliche Folgen. Eine theoretisch denkbare Limitierung der Emissionswerte von Klimagasen der Nicht-OECD-Länder deutlich unter dem aktuellen Wert der OECD-Länder würde von den Nicht-OECD-Ländern als ein Versuch der „Entwicklungsverhinderung" betrachtet und damit nicht akzeptiert werden. Von maßgeblicher Bedeutung ist daher die Rückführung des spezifischen Ausstoßes in den Industrieländern, was zugleich Vorbildfunktion hätte und technische Wegbereitung für die anderen Länder wäre.

Die Klimalasten des Verkehrs gehen vor allem von drei Verkehrsbereichen aus: vom Automobilverkehr, vom Straßengüterverkehr und vom Luftverkehr.

Schon in der Vergangenheit waren der motorisierte Individualverkehr (MIV) vor allem mit Automobilen, der Straßengüterverkehr und der Luftverkehr die wichtigsten Quellen für die Klimabelastungen aus dem Verkehr. In Zukunft werden diese Verkehrssegmente ihre Bedeutung insgesamt eher noch verstärken, wobei sich nach den vorliegenden Abschätzungen allerdings im längeren Zeitverlauf die relativen Gewichte untereinander wesentlich verschieben dürften, nicht zuletzt wegen der auch künftig sehr hohen Zuwachsraten im Luftverkehr.

Der Luftverkehr als möglicher künftiger Hauptbelaster im Verkehrsbereich ist bislang weitgehend unterschätzt und aus den Maßnahmen ausgeblendet.

Der internationale Luftverkehr ist von den Verpflichtungen des Kyoto-Protokolls ausgenommen, und von den berücksichtigten nationalen Luftverkehren wird im Stoffregime des Kyoto-Protokolls nur ein beschränkter Teil der klimarelevanten Emissionen überhaupt berücksichtigt – die dementsprechend geringe Rolle, die bis heute für den Luftverkehr ausgewiesen wird, ist deshalb ein Artefakt; in Deutschland etwa macht der grenzüberschreitende Passagierluftverkehr im Abgang wie in der Ankunft jeweils das 15-fache der allein berücksichtigten innerdeutschen Luftverkehrsleistung aus; die gesamte Klimalast des Luftverkehrs wird bei dem 2- bis 4-Fachen der allein berücksichtigten CO_2-Emissionen abgeschätzt. Entsprechend trägt der Luftverkehr tatsächlich schon heute nennenswert zu den Klimalasten bei; er kann sich – bei allerdings großen Unsicherheiten in der Bewertung seiner Klimarelevanz – innerhalb weniger Jahrzehnte zum hauptsächlichen Klimabelaster im Verkehr entwickeln.

Die Beteiligung des Straßengüterverkehrs an der Klimabelastung steigt weiter an, soweit eine Entkoppelung von Wirtschaftsleistung und Transportaufwand nicht gelingt.

Auch für den Straßengüterverkehr werden auf absehbare Zeit weitere Zuwächse erwartet, wenngleich in Deutschland mit erheblich geringeren Raten als im Luftverkehr. Ursächlich hierfür sind vor allem die Ausweitung der Wirtschaftstätigkeit und die generelle Maßstabsvergrößerung im Netz der Lieferbeziehungen im Zuge der europäischen Einigung und der allgemeinen Globalisierung der Märkte. Bei weltweiter Betrachtung muß die Zunahme der Transportkapazitäten von China, Indien und anderen aufstrebenden Ländern besonders beachtet werden; deren rasantes Wirtschaftswachstum erfordert zwangsweise eine erhebliche Verstärkung der Transportaktivitäten. Da ausreichende kompensative Effizienzsteigerungen innerhalb des Transportwesens nicht verfügbar erscheinen, werden auch die vom Straßengüterverkehr ausgehende Klimabelastung und deren Anteil an den gesamten Klimalasten weiter ansteigen.

Der Automobilverkehr als traditioneller Hauptbelaster im Verkehrsbereich zeigt zwar vergleichsweise positive Tendenzen, trotzdem ist auch hier noch erheblicher weiterer Handlungsbedarf gegeben.

Den größten Teil zu den verkehrsbedingten Klimalasten liefert bislang eindeutig der Automobilverkehr, zumal in den Industriestaaten nach der dort starken Ausweitung in den letzten Jahrzehnten. Aufgrund von bereits erreichten und noch weiter zu erwartenden Effizienzverbesserungen bei den Fahrzeugen und einer Annäherung an Sättigungsgrenzen ist die weitere Entwicklung vergleichsweise günstiger einzuschätzen. Trotzdem stehen die im Trendverlauf prognostizierten hohen Belastungen im Gegensatz zu den Anforderungen einer deutlichen Absenkung der Klimalasten. Weitergehende Maßnahmen erscheinen daher unumgänglich.

Lösungsansätze

Eine ergebnisorientierte Herangehensweise zeigt Freiheitsgrade in der Reduktion der Klimabelastung auf: Lösungsbeiträge sind auch in anderen Sektoren zu finden.

Aus Gründen des Klimaschutzes ist eine deutliche Belastungsminderung erforderlich. Aufgrund des globalen Charakters des Problems ist dabei im Grunde unerheblich, durch wen und wodurch. Im Rahmen des Kyoto-Prozesses ist weltweit zunächst eine regionale Aufgliederung der Zielbeiträge vereinbart, eine sachliche Aufgliederung nach Sektoren jedoch nicht. Auf nationaler Ebene ist diese Zuweisung im Rahmen des nationalen Allokationsplanes in einer ersten Phase abgeklärt. Danach sind Absenkungsziele für die Energiewirtschaft und die Industrie im Rahmen des Emissionshandelssystems festgeschrieben, dem Verkehrsbereich wird hingegen zunächst sogar noch eine geringe Ausweitung seiner Klimalasten im Rahmen des insgesamt limitierten Kontingentes eingeräumt. Für den weiteren Zeitverlauf ist jedoch – durch politische Festlegung, durch gesellschaftliche Vereinbarungen oder durch marktliche Prozesse – festzustellen, welche Sektoren und Subsektoren wie stark zur Klimaentlastung beitragen sollen, damit das Gesamtziel erreicht wird. Dabei sind unterproportionale und für sich genommen unzureichende Entlastungsbeiträge einzelner Sektoren und Subsektoren davon abhängig zu machen, wieweit in anderen Bereichen eine Kompensation erfolgt.

Grundsätzlich erscheint es für eine gesellschaftlich konfliktarme Umsetzung von Lösungsansätzen erforderlich, dass diese Ansätze als ausgewogen und fair wahrgenommen werden können.

Auch wenn teilweise in Win-Win-Situationen die Herausforderungen des Klimawandels zu Lösungsansätzen führen können, die von den Beteiligten als unmittelbare Verbesserung wahrgenommen werden, so muss man doch davon ausgehen, dass die Verwaltung limitierter verträglicher Klimabelastungen auch zu primär unerwünschten Einschränkungen führen wird. Eine als fair und ausgewogen wahrgenommene Lastenverteilung wird deshalb für die gesellschaftliche Akzeptanz der Lösungsansätze von zentraler Bedeutung sein. So wird es künftig bei steigendem Druck zur CO_2-Emissionsminderung wohl wenig Verständnis finden, wenn der Straßenverkehr mit starken Auflagen bedacht wird, jedoch gleichzeitig dem Luftverkehr – etwa durch weitere Freistellung von der Mineralölsteuer – günstigere Konditionen eingeräumt werden. Auch innerhalb des Straßenverkehrs kann die geringere Besteuerung des Dieselkraftstoffs entgegen dessen höherer volumenbezogener CO_2-Emission (gegenüber Ottokraftstoffen) nicht als ausgewogen angesehen werden. Die notwendige Fairness der Lasten-Kosten-Verteilung bei der Emissionsreduktion von Klimalasten muss selbstverständlich auch für alle sonstigen Energieverbraucher (Strom, Gas, Heizöl) aus dem industriellen und privaten Bereich gelten. Im Ergebnis werden sich vermutlich für den Verkehr künftig abnehmende Möglichkeiten ergeben, unterproportionale eigene Anstrengungen zur Klimaentlastung durch Beiträge anderer Sektoren zu kompensieren.

Ungeachtet der erheblichen bisherigen Anstrengungen gibt es auch im Automobilverkehr noch in sehr großem Umfang Möglichkeiten, die Klimalasten zu vermindern.

Als maßgebliche Parameter sind neben der Gestaltung des Fahrzeugs selbst der Umfang und die Form seiner Nutzung anzusprechen, die erst in ihrer Verknüpfung zur Gesamtbelastung führen. Insofern für die Klimabelastungen nicht so sehr deren Zustandekommen von Belang ist wie deren Gesamtbetrag, ist vom Ergebnis her z.B. eine geringere Verwendung eines stärker belastenden Fahrzeugs und eine stärkere Verwendung eines geringer belastenden Fahrzeugs gleichzustellen. Art und Umfang der Nutzung sind deshalb gleichgewichtig mit zu bedenken und im günstigsten Fall in einem Gesamtansatz zu optimieren.

Wenig systematisch wird bislang den Möglichkeiten nachgegangen, den (erforderlichen) Nutzungsumfang der Automobile zu reduzieren.

Auch ohne Einschränkung der Aktivitäten kann der Umfang des Automobilverkehrs etwa durch die Wahl von gleichwertigen Zielen in geringerer Entfernung, bei Bündelung von Aktivitäten im Rahmen von Wegeketten oder durch Verlagerung auf andere Verkehrsarten oder zeitgemäße Telekommunikation verringert werden. Zwar sind die Potenziale dieser Alternativen auch aus der Praxis bekannt, werden jedoch nicht in großem Umfang zielführend aufgegriffen.

Weitere Entlastungspotenziale ergeben sich durch eine energie- und emissionsarme Betriebsweise der Fahrzeuge.

Die insgesamt bedeutsamen Möglichkeiten für Energie- und Emissionseinsparungen durch eine sparsame Betriebsweise werden bislang nur ausschnittsweise wahrgenommen. So ist der Abbau von Verkehrsstauungen trotz seines verhältnismäßig geringen Einsparpotenzials als Ziel weitgehend unstrittig, eine deutliche Einschränkung der Fahrdynamik bei ermäßigten Geschwindigkeitsniveaus dagegen trotz der hohen Einsparpotenziale äußerst umstritten. Die Komponenten einer individuell verbrauchsarmen Betriebsweise sind

zwar im Prinzip gut bekannt, werden in der breiten Praxis jedoch aus Unkenntnis oder Nachlässigkeit nur beschränkt umgesetzt; technische Unterstützung durch (elektronische) Fahrassistenzsysteme können hier zu einer höheren Ausschöpfung der Potenziale beitragen.

Auch die Möglichkeiten zur Klimaentlastung durch Maßnahmen am Fahrzeug sind keineswegs ausgeschöpft und umfassen viele Bereiche.

Besonderes Interesse finden seit langem technische Verbesserungen beim Motor, den Kraftstoffen und im gesamten Antriebsstrang. Die hier bereits erreichten Effizienzverbesserungen sind beeindruckend, wurden in der Vergangenheit jedoch zu großen Teilen durch ein erweitertes Leistungsspektrum, erhöhte Sicherheits- und Komfortstandards usw. wieder kompensiert. In dem gegenwärtig breit bearbeiteten Fragenspektrum gibt es neben mehr perspektivisch interessanten Entwicklungen eine Reihe auch praktisch relevanter Innovationen, die nennenswert zu Energieeinsparung und Klimaentlastung beitragen können. Systematisch sind außer den Maßnahmen bei Motor und Antriebsstrang auch Maßnahmen anzusprechen, die sich auf das Gesamtfahrzeug beziehen, sowie schließlich Maßnahmen, die Nebenverbraucher und Zusatzeinrichtungen im Fahrzeug betreffen und mit dem Fahrbetrieb im engeren Sinn wenig zu tun haben. Verständlicherweise die größten Potenziale können durch abgestimmte Maßnahmen in allen Bereichen realisiert werden. Wegen unterschiedlicher, teils konträrer Anforderungen ist der Optimierungsprozess allerdings schwierig und wird zu unterschiedlichen Lösungen führen.

In der Öffentlichkeit zu wenig beachtet wird, dass bereits die Grundkonzeption des Fahrzeugs und seiner Auslegung den Energieverbrauch maßgeblich bestimmt.

Als einfachste Möglichkeit der Verbrauchs- und Emissionsminderung kann das generelle „Downsizing", also eine Redimensionierung der Fahrzeuge, angesprochen werden: Kleinere, leichtere, leistungsschwächere Fahrzeuge können naturgemäß mit erheblich günstigeren Verbrauchs- und Emissionswerten dargestellt werden als größere, schwerere, leistungsstärkere. Wieweit im Zuge des demographischen Wandels (zu kleineren Haushalten in einer alternden Gesellschaft) und der Wirtschaftsentwicklung (mit möglicherweise steigendem Druck durch dauerhaft hohe Ölpreise) solche Fahrzeuge in Zukunft zunehmende Marktanteile abdecken werden, bleibt abzuwarten. Potenziale in geringerem Umfang und bei höheren Kosten ergeben sich typischerweise, wenn man Größen-, Massen- und Leistungsminderung nicht gekoppelt anstrebt, sondern beispielsweise nur eine Massenreduktion. Dabei erhöht eine Auslegung auf geringere Geschwindigkeiten die Freiheitsgrade bei der Formgebung; bei Hochgeschwindigkeitsauslegung wird dagegen der Luftwiderstand (Stirnfläche mal dem formbestimmten Luftwiderstandsbeiwert) eine zentrale Größe.

Bei sinkenden Gesamtverbräuchen erlangen die steigenden Beiträge der Nebenverbraucher zunehmende Bedeutung.

Im Zuge der fortschreitenden qualitativen Aufwertung der Fahrzeuge mit Komfortmerkmalen und Zusatzeinrichtungen treten die auf diese Nebenverbraucher zurückzuführenden Energieverbräuche und Klimabelastungen zunehmend stärker ins Blickfeld, auch gegenüber den weiterhin dominierenden Verbräuchen und Emissionen für den Antrieb. Insbesondere Klimaanlagen sind hierbei wegen ihrer herkömmlich auch klimarelevanten Arbeitsmedien herauszuheben. Es erfordert erhebliche Anstrengungen, etwa durch motortechnische Maßnahmen Einsparungen und Minderungen der Klimabelastungen in einem Umfang zu erzielen, die dann durch den Einbau einer Klimaanlage wieder aufgezehrt werden. Eine sorgsame Auswahl der Zusatzeinrichtungen und eine Optimierung ihrer Gestaltung eröffnen damit durchaus nennenswerte Potenziale.

Neuartige Antriebsarten dürften in der absehbaren Zeit nur geringe Beiträge leisten, neue, CO_2-ärmere Kraftstoffe sind dagegen nicht zu vernachlässigen.

Am meisten Phantasie in der öffentlichen Diskussion lösen Vorschläge für neuartige Antriebe und alternative Kraftstoffe wie Wasserstoff als Energieträger und Brennstoffzellenantriebe aus. Ohne die Möglichkeit technischer Durchbrüche auszuschließen, werden jedoch – auch aus ökonomischen Gründen – in den nächsten Jahrzehnten wahrscheinlich weiterhin Otto- und Dieselantriebe den Fahrzeugmarkt dominieren. Durch Verwendung CO_2-ärmerer oder -freier Kraftstoffe, etwa durch Erdgas in Ottomotoren oder durch Beimengung oder alleinige Verwendung von Biokraftstoffen, lässt sich jedoch schon bei konventionellen Antrieben eine signifikante Entlastung der CO_2-Bilanz erreichen. Die derzeitigen Konzepte von Wasserstoffantrieben verwenden in der Regel Wasserstoff, der aus Erdgas gewonnen wird. Die dabei zu betrachtende gesamtheitliche Treibhausgas-Bilanz ist deutlich schlechter als von konventionellen Treibstoffen. Eine positive Treibhausgas-Bilanz einer denkbaren künftigen Wasserstoffperspektive ist erst erreichbar, wenn die Herstellung von Wasserstoff vorwiegend auf regenerativer Energie basiert. Da der Bedarf an regenerativer Energie allerdings nicht nur auf den Straßenverkehr beschränkt ist, muss diesbezüglich eher mit einer langfristigen Perspektive gerechnet werden.

Da in den nächsten Jahrzehnten weiterhin Otto- und Dieselantriebe dominieren werden, ist deren Optimierung von bevorzugter Bedeutung.

Die motortechnische Entwicklung ist bei den herkömmlichen Antriebsarten bereits in einem fortgeschrittenen Reifestadium angelangt. Weitere Effizienzerhöhungen sind allerdings durchaus noch möglich, dabei durch verbesserte Verbrennungsführung bei Ottomotoren in größerem Umfang als bei Dieselmotoren. Weil bei sachgerechter Bewertung nach dem Energieeinsatz und den CO_2-Emissionen (und nicht dem Liter-Verbrauch) der Vorteil des Dieselantriebs ohnehin eher beschränkt ist, kann im Ergebnis dieser Entwicklung eine Annäherung der Effizienz beider Antriebskonzepte auf wenige Prozentpunkte erwartet werden. In einem weiteren Schritt versprechen neue homogene Brennverfahren bei Ottomotoren (CAI) und Dieselmotoren (HCCI) weitere Verbesserungen, wobei die Unterschiede zwischen den Antriebskonzepten perspektivisch verschwinden (CCS-Motor). Darüber hinaus kann auch kurzfristig das bereits gut eingeführte Konzept des Motor-Downsizing zusammen mit einer (Teil-)Rückgewinnung der Bremsenergie in Teilsegmenten des Marktes durch – allerdings kostenträchtige – leistungsverzweigte hybridelektrische Antriebe zu weiteren Effizienzgewinnen und Treibstoffeinsparungen weiter entwickelt werden.

Ergänzend können Effizienzgewinne auch im weiteren Weg der Kraftübertragung vom Motor bis zur Straße realisiert werden.

Bescheidene Kraftstoffeinsparungen – stärkere gegenüber Automatikgetrieben – ergeben sich bei Einbau stufenlos verstellbarer Getriebe; aus Kostengründen kommt dies insbesondere für die obere Fahrzeugklasse in Frage. Weitere Potenziale bieten Leichtlaufreifen mit reduziertem Rollwiderstand und – als zusätzlichem positivem Nebeneffekt – reduzierter Geräuschentwicklung; neben der unmittelbaren Nutzung bereits marktgängiger Modelle gibt es auch hierbei noch weitere Entwicklungspotenziale.

Maßnahmen

Zu den Maßnahmen mit höchster Priorität gehört die Beseitigung bestehender Schieflagen, insbesondere hinsichtlich der Besteuerung der Kraftstoffe und des Luftverkehrs.

Anstelle der niedrigeren Besteuerung von Dieselkraftstoff wäre wegen der höheren volumenspezifischen CO_2-Emissionen aus klimapolitischen Gesichtspunkten eine höhere Besteuerung angezeigt; da die ursprünglich beabsichtigte Förderung des Straßengüterverkehrs für das Klima ebenfalls kontraproduktiv ist, sollte eine Bereinigung der Steuersätze entsprechend den CO_2-Emissionen in Angriff genommen werden. Soweit nicht durch einheitliche Abgasgrenzwerte die lufthygienischen Nachteile des Dieselantriebs abgebaut werden können, sind darüber hinaus die höheren Gesundheitslasten dieses Antriebs angemessen zu berücksichtigen. Im Luftverkehr ist die Schieflage fundamentaler; eine den Klimalasten entsprechende Kerosinbesteuerung und eine Einbeziehung des Luftverkehrs in den Emissionshandel, wie kürzlich von der EU vorgeschlagen, stellen positive Ansatzpunkte dar.

Im Rahmen eines systematischen Ansatzes gehört es zu den vornehmsten – und angenehmsten – politischen Aufgaben, positive Entwicklungen anzustoßen und zu fördern.

Anreize für die Entwicklung und Markteinführung emissionsmindernder Technologien sind in Deutschland wie in vielen anderen Ländern im Grundsatz üblich und können auch noch weiterentwickelt werden. Daneben sieht allerdings nicht nur die politische Programmatik, sondern auch die politische Pragmatik regelmäßig einen Ausbau der Verkehrsinfrastruktur vor, im übrigen bei allen Verkehrsträgern, wodurch über verkehrsinduzierende Effekte auch die Emissionen erhöht werden – die politische Kulisse ist somit etwas paradox. Generell sollten die Förderansätze im Zeitverlauf hinterfragt werden, inwieweit sie auf positive Entwicklungen beschränkt bleiben. Die Bestrebungen der jüngeren Zeit, die Pendlerpauschale und die herkömmliche Förderung des flächenverbrauchenden Eigenheimbaus zurückzunehmen, gehen – wenngleich nicht primär durch Klimaschutz motiviert – in die richtige Richtung. Sie zeigen aber auch, wie schwer es ist, die eingefahrenen Gleise wieder zu verlassen.

Daneben bleibt die – häufig weniger populäre – Aufgabe bestehen, gesellschaftlich als notwendig erachtete Entwicklungen auch nachdrücklich zu fordern und gegebenenfalls auch gegen Widerstände durchzusetzen.

Da im Grundsatz ein politischer und gesellschaftlicher Konsens über die Notwendigkeit einer weiteren Minderung der Klimabelastungen unterstellt werden kann, muss dieser Konsens noch in quantitative, zeitliche und sachliche Elemente konkretisiert werden. Während für die großen Emittenten in Industrie und Energiewirtschaft das Verfahren über eine Weiterentwicklung des Emissionshandels in der Tendenz klar

ist, besteht hinsichtlich des Verkehrs noch erheblicher Klärungsbedarf. Unabhängig von der unterschiedlich gestaltbaren Lösung erscheint unzweifelhaft, dass auch der Verkehrssektor einzubinden ist in das Konzept einer grundsätzlichen Limitierung zulässiger Klimagasemissionen. Von den aktuell diskutierten Konzepten, also Weiterentwicklung der Ökosteuer, Einbindung in den Emissionshandel und Grenzwertsetzung, muss sich im politischen Diskurs die tragfähigste Lösung durchsetzen.

Darüber hinaus kann die Politik eine ganze Reihe weiterer Handlungsfelder nutzen, insbesondere in den Bereichen des Verkehrsrechts, der Infrastruktur und der so genannten „soft policies".

Die vielfältigen Möglichkeiten können hier nicht aufgeführt werden; exemplarisch hingewiesen wird auf das durch die Straßenverkehrsordnung und die örtlichen Anordnungen bestimmte Geschwindigkeitsregime und die Gestaltung des Verkehrsflusses im Straßenverkehr, auf die unterschiedlichen Möglichkeiten, die Infrastruktur eines oder eines anderen Verkehrsträgers stärker auszubauen, oder die Aufklärung der Öffentlichkeit über die Möglichkeiten klimaverträglicher Verkehrsstrukturen und Verhaltensweisen.

Die Bedeutung von Politik und Forschung für die Feststellung der sachlichen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen einer klimaverträglichen Verkehrsentwicklung wird weiter zunehmen.

Gerade in Zeiten schnellen Wandels ist ein transparenter und hinreichend zuverlässiger Bezugsrahmen von entscheidender Bedeutung. Bezogen auf das Ziel einer klimaverträglichen Verkehrsentwicklung, bedeutet dies für die Forschung, die sachlichen Rahmenbedingungen der Klimaentwicklung und die Möglichkeiten von Klimabe- und -entlastungen durch eine unterschiedliche Verkehrsgestaltung möglichst klar herauszuarbeiten. Für die Politik ergibt sich die Aufgabe, in einem konsensorientierten Prozess die gesellschaftlichen Rahmenbedingungen so zu definieren, dass eine Verkehrsentwicklung zuverlässig im verträglichen Rahmen gewährleistet wird. In beiden Feldern liegen noch erhebliche Aufgaben vor uns.

Daneben darf aber die zentrale Bedeutung des eigenverantwortlichen Handelns der Industrie bei der Entwicklung klimagerechter Verkehrslösungen nicht übersehen werden.

Es liegt im wohlverstandenen Eigeninteresse und in der ureigensten Kompetenz der Industrie, Produkte und Systemlösungen zu entwickeln, die laufend besser an die langfristigen Erfordernisse angepasst sind. Dabei sind konstruktive eigene Vorschläge, Selbstverpflichtungen und industrieinternes Benchmarking geeignet, die eigenen Gestaltungsspielräume und die langfristigen Marktpotenziale zu sichern. Ein offenes, diskursorientiertes Auftreten auch in der Öffentlichkeit erhöht dabei nicht nur die eigene Glaubwürdigkeit, sondern auch die Urteilsfähigkeit der Verbraucher.

Letzten Endes kommt es in einer freiheitlichen Gesellschaft auf das sachgerechte und verantwortliche Verhalten der Bürger an, einen nachhaltigen Entwicklungspfad mitzutragen.

Ohne damit die Politik und die Industrie aus ihrer spezifischen Verantwortung zu entlassen, ist es der Bürger, der als Kunde und durch sein Verkehrsverhalten, aber auch als Wähler mit seinen politischen Willensäußerungen die Entwicklung bestimmt; er trägt nicht nur die Entwicklung voran, sondern er hat auch die Folgen dieser Entwicklung zu ertragen. Maßnahmen, die die Urteils-, Entscheidungs- und Verhaltenskompetenz der Bürger stärken, müssen daher mit hoher Priorität verfolgt werden. In besonderer Weise ist durch eine kritische Öffentlichkeit sicherzustellen, dass fehlorientierende Tendenzen sich nicht verfestigen, sondern zurückgeholt werden können.

Für die Erreichung der erforderlichen globalen Minderung der Klimabelastungen ist eine Fortentwicklung des international abgestimmten und durch Monitoring und Kontrollen gesicherten Vorgehens unabdingbar.

Das Klimaproblem ist ein globales Problem, an dessen Erzeugung allerdings einzelne Regionen recht unterschiedlich beteiligt sind und dessen Folgen für einzelne Regionen recht unterschiedlich schnell und massiv spürbar sein werden. Für eine friedliche, eine sozial, wirtschaftlich und ökologisch verträgliche Entwicklung bietet es keine Gewähr, wenn einzelne Regionen oder Staaten eher kurzfristige partikulare Interessen durchzusetzen versuchen; vielmehr wird es notwendig sein, den eingeschlagenen mühsamen Weg fortzusetzen, über die Grenzen politischer und kultureller Traditionen hinweg abgestimmte Ziele und Maßnahmen zu definieren und deren Einhaltung gemeinsam zu sichern. Dass dieser Weg auch ungeahnte neue Chancen beinhaltet, sollte uns alle ermuntern.

Kapitel 2
Das Klimaproblem und der Versuch, es durch Verhandlungen zu lösen

Bereits gegen Ende des 19. Jahrhunderts stellte der schwedische Chemiker Svante Arrhenius die Hypothese auf, dass die atmosphärische Kohlendioxidkonzentration Einfluss auf den Wärmehaushalt der Atmosphäre habe (Arrhenius 1896). Befürchtete Arrhenius aufgrund seiner Erkenntnisse die Möglichkeit neuer Eiszeiten bei einem Absenken des Kohlendioxidgehalts der Atmosphäre, so näherte sich die Wissenschaft mehr als sieben Jahrzehnte später der These unter entgegengesetzten Vorzeichen. Nun bestand das Erkenntnisinteresse der Forscher darin, mögliche Folgen der über das 20. Jahrhundert gestiegenen Kohlendioxidkonzentrationen auf das globale Klimasystem zu untersuchen. Da sich in den siebziger und achtziger Jahren des letzten Jahrhunderts die Forschungsergebnisse mehrten, die aufgrund des so genannten anthropogenen Treibhauseffekts für die Zukunft eine Veränderung der globalen klimatischen Verhältnisse erwarteten, gründeten die Weltorganisation für Meteorologie (WMO) und das Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) 1988 auf Vorschlag der UN-Vollversammlung den „Zwischenstaatlichen Ausschuss über Klimawandel“ (IPCC). Dieses Expertengremium fasst seitdem unter Mitarbeit mehrerer hundert Wissenschaftler den Stand der Forschung um den globalen Klimawandel in regelmäßigen Berichten zusammen. Auf der Basis des letzten umfassenden Berichts des IPCC (IPCC 2001a), ergänzt durch aktuelle, dort noch nicht berücksichtigte Forschungsergebnisse, werden im Folgenden Ursachen und Folgen des Klimawandels dargelegt.

Die Theorie vom anthropogenen Treibhauseffekt

Der Erde wird von der Sonne Energie in Form kurzwelliger Strahlung zugeführt. Der größere Teil dieser Strahlung wird von der Erdoberfläche (Landfläche, Ozeane, Eismassen) absorbiert und in Wärmeenergie umgesetzt, der kleinere wird direkt zurück in den Weltraum reflektiert. Die durch die Sonnenstrahlung erwärmte Erdoberfläche strahlt wiederum langwellige Infrarotstrahlung in den Weltraum ab, so dass sich im globalen Mittel über den Jahresverlauf ein Gleichgewicht zwischen eingestrahlter und abgestrahlter Energie einstellt (vgl. Abbildung 2-1). Das Ausmaß dieser langwelligen Strahlung steht in einer funktionalen Abhängigkeit zur globalen oberflächennahen Durchschnittstemperatur.

Ein Teil dieser langwelligen Wärmeabstrahlung wird allerdings durch in der Atmosphäre vorkommende Spurengase (Kohlendioxid/CO_2, Methan/CH_4, Distickstoffoxid/N_2O, Ozon/O_3 u.a.) und durch Wasserdampf absorbiert und zurückgehalten. Dieser Vorgang, der zu einer Erwärmung der unteren Atmosphäre und der Erdoberfläche führt, wird in Analogie zu den Vorgängen in einem Glas- bzw. Treibhaus mit dem Namen „Treibhauseffekt“ belegt. Erst dieser natürliche Treibhauseffekt bildet die Grundlage für die heute vorkommenden Lebensformen auf dem Planeten, da er die globale Durchschnittstemperatur um über 30 °C auf ca. +15 °C im globalen Mittel ansteigen lässt.

Steigt die atmosphärische Konzentration dieser Spurengase oder werden zusätzliche synthetische Substanzen mit treibhausfördernder Wirkung in die Atmosphäre freigesetzt, so resultiert dadurch eine verminderte Infrarotabstrahlung in den Weltraum. Um das dadurch gestörte energetische Gleichgewicht zwischen Sonneneinstrahlung und terrestrischer Abstrahlung wieder herzustellen, steigt die globale oberflächennahe Temperatur so weit an, bis das dadurch bedingte zusätzliche Quantum an langwelliger Abstrahlung das energetische Gleich-

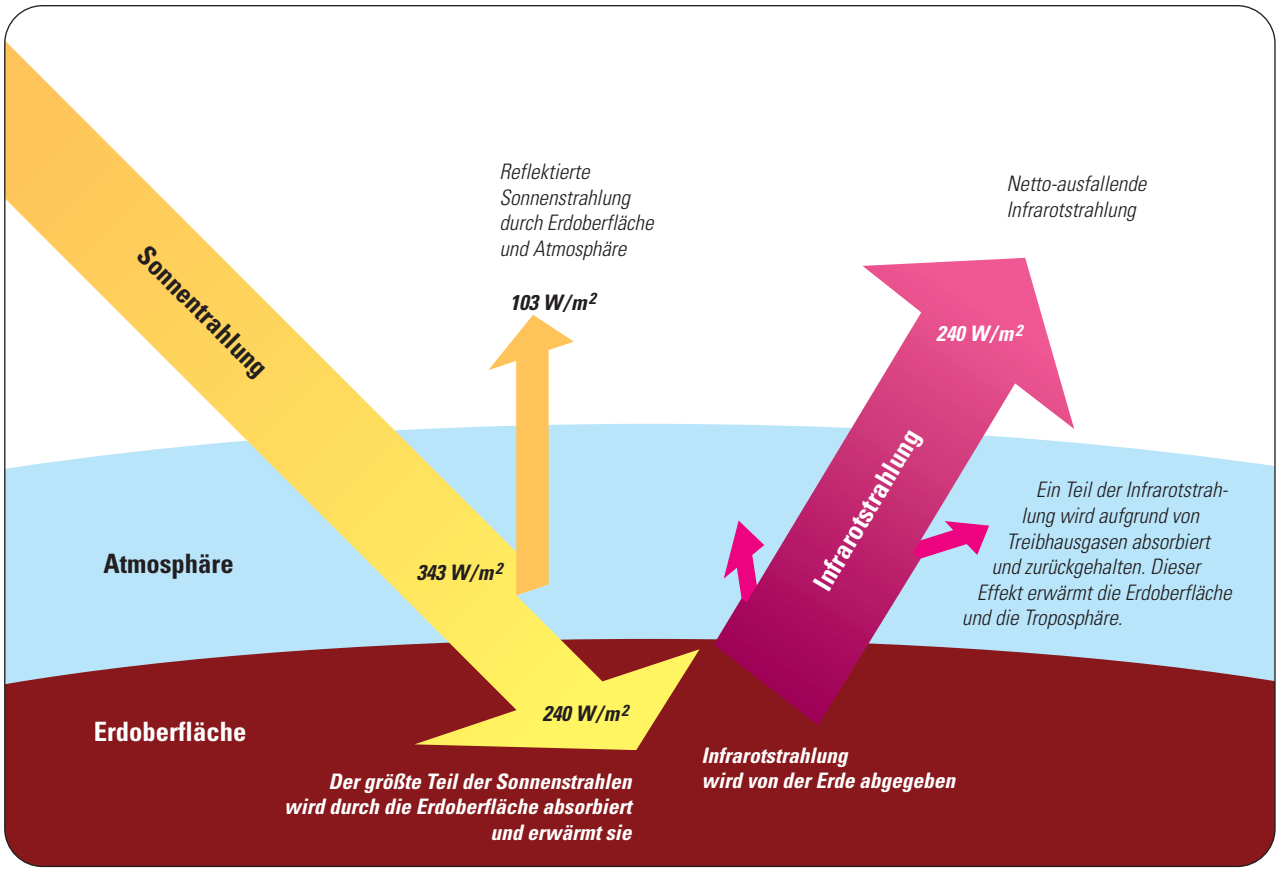


Abbildung 2-1:
Strahlungsbilanz der Atmosphäre
Quelle: Loske (1996), aktualisiert nach IPCC (2001a)

gewicht wieder in Einklang bringt. Jede Änderung in der Strahlungsbilanz der Atmosphäre hat dadurch mittelbar auch Auswirkungen auf den globalen Wasserkreislauf und atmosphärische und ozeanische Zirkulationen, was wiederum Einfluss auf die Höhe regionaler Temperaturwerte und die Intensität wie Verteilung von Niederschlägen hat.

Neben diesen Treibhausgasen haben auch andere Substanzen menschlichen Ursprungs Einfluss auf den Strahlungshaushalt der Atmosphäre. So haben Aerosole, kleine, in der Luft befindliche Partikel, die beispielsweise aus der Verbrennung von fossilen Brennstoffen und Biomasse, aber auch aus Vulkanausbrüchen herrühren, eine temperaturabsenkende Wirkung („cooling effect“) – und dies gleich in zweierlei Hinsicht. Zum einen reflektieren sie die einfallende Sonnenstrahlung in den Weltraum und zum anderen dienen sie als Kondensationskerne der Wolkenbildung, die dann ihrerseits einen Teil der einfallenden Sonnenstrahlung reflektieren, aber auch einen Teil der terrestrischen Wärmeabstrahlung absorbieren. Auch wenn einige Aerosole die kurzwellige solare Strahlung absorbieren können, also eine erwärmende Wirkung haben, wirken sich doch die meisten Aerosole negativ auf die Strahlungsbilanz aus und führen zu einer Abkühlung des Klimas. Im Gegensatz zu den Treibhausgasen, die eine Verweilzeit von Jahrzehnten bis Jahrhunderten in der Atmosphäre haben (vgl. Tabelle 2-1), besitzen Aerosole jedoch eine vielfach kürzere Lebensdauer zwischen einigen Tagen und Wochen, so dass ihre atmosphärische Konzentration schneller auf Änderungen der Menge der freigesetzten Aerosole reagiert.

Einen Einfluss auf den Wärmehaushalt der Atmosphäre haben schließlich auch die zum Teil zyklischen Schwankungen der Intensität der solaren Strahlung. Stellt man Betrachtungen über einen Zeitraum mehrerer zehntausend Jahre an, führten zudem auch leichte Änderungen der Erdumlaufbahn zu einem veränderten Verteilungsmuster solarer Strahlung. Diese beiden Effekte trugen erdgeschichtlich beispielsweise zum Wechsel von Kalt- und Warmzeiten bei.

Treibhausgas	Vorindustrielle Konzentration (in ppmv, 1750)	Konzentration in 1990 (in ppmv)	Konzentration in 2002 (in ppmv)	Anstieg 2002 gegenüber vorindustrieller Konzentration	Verweildauer in der Atmosphäre (in Jahren)	Relatives Treibhauspotenzial (in GWP-100)
Kohlendioxid (CO_2)	280	353	374	+ 34 %	5–200	1
Methan (CH_4)	700	1 700	1 782	+ 155 %	12	23
Distickstoffoxid (N_2O)	270	308	317*	+ 17 %	114	296
Trifluormethan (HFC-23)	–	8	14**	–	260	12 000
Tetrafluormethan (CF_4)	40	70	80**	+ 100 %	> 50 000	5 700
Schwefelhexafluorid (SF_6)	–	3	5,0*	–	3 200	22 200
Difluordichlormethan (CFC-12)***	–	467	535*	–	100	10 600

* Messwerte von der Station Mauna Loa, Hawaii.
** Werte aus dem Jahr 1998.
*** CFC-12 ist nicht über das Kyoto-Protokoll, sondern über das Montreal-Protokoll im Ozon-Regime reguliert.

Tabelle 2-1:
Atmosphärische Konzentration, Verweildauer und Treibhauspotenzial ausgewählter Treibhausgase
Quelle: IPCC (2001a), WDCGG (2005), WDCGG (2004)

Der Grad der Abweichung vom energetischen Gleichgewicht durch die geschilderten Einflussgrößen lässt sich durch das Maß der Strahlungsbilanzstörung („radiative forcing“) quantifizieren. Durch dieses Maß kann der Einfluss der einzelnen Größen und damit deren klimaverändernde Wirkung verglichen werden (vgl. Abbildung 2-2).

Veränderungen in der Zusammensetzung der Atmosphäre

Die industrielle Revolution des 19. Jahrhunderts steht nicht nur für einen Wandel in der Organisation von Produktionsprozessen und damit einhergehenden Veränderungen der Gesellschaftsstruktur, sondern auch für einen Wechsel der energetischen Basis der Gesellschaft: Es begann der Einstieg in die massive Nutzung fossiler Brennstoffe, bei deren Verbrennung Kohlendioxid in die Atmosphäre gelangt. Im Laufe des 20. Jahrhunderts wurden zudem durch veränderte Formen der Landbewirtschaftung sowie durch den „Fortschritt“ in der chemischen Industrie in erhöhtem Umfang weitere klimaverändernde Substanzen freigesetzt.

So überstiegen die bei der Verbrennung fossiler Energieträger, aber auch bei Landnutzungsänderungen freigesetzten Kohlendioxidemissionen in den letzten Jahrzehnten bei weitem die natürliche Absorptionskapazität der ozeanischen und terrestrischen Kohlenstoffsenken. In den so genannten Senken wird das Kohlendioxid in organischen oder mineralischen Verbindungen gebunden und so der Atmosphäre entzogen. So baut beispielsweise jede Pflanze im Rahmen der Photosynthese das atmosphärische Kohlendioxid in organische Kohlenstoffverbindungen und Sauerstoff um. Die Überschreitung der Aufnahmefähigkeit der global verfügbaren Kohlenstoffsenken führte zu einem Anstieg der atmosphärischen Kohlendioxidkonzentration um 34 Prozent auf den momentanen Höchstwert von 374 ppmv. Die Konzentration ist heute höher als während der vergangenen 420 000 Jahre und übersteigt vermutlich sogar alle Werte der zurückliegenden 20 Millionen Jahre. Auch die Konzentrationen der anderen natürlichen Treibhausgase in der Atmosphäre nahmen in den vergangenen Jahrzehnten zu (vgl. Tabelle 2-1). Dazu wurden vom Menschen synthetische Substanzen, v.a. halogenierte Kohlenwasserstoffverbindungen, freigesetzt, die ebenfalls die Strahlungsbilanz der Atmosphäre veränderten. Das „Glasdach“ des atmosphärischen Treibhauses wurde also immer dichter – zum natürlichen gesellte sich ein zusätzlicher, anthropogener Treibhauseffekt.

Vergleicht man die von den verschiedenen Treibhausgasen ausgehende (positive) Strahlungsbilanzstörung – also ihren bisherigen Beitrag zum anthropogenen Treibhauseffekt –, so weist Kohlendioxid mit ca. 60 Prozent mehr als alle anderen Treibhausgase gemeinsam auf (vgl. Abbildung 2-2). Daneben haben insbesondere Methan, die halogenierten Kohlenwasserstoffe

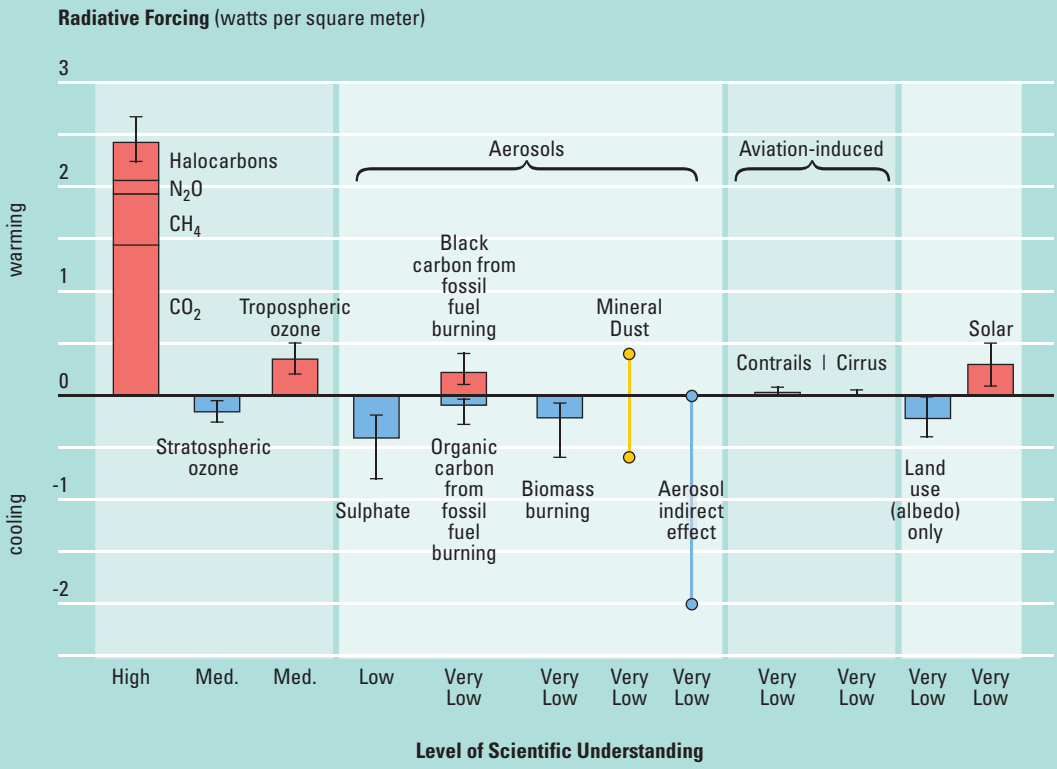


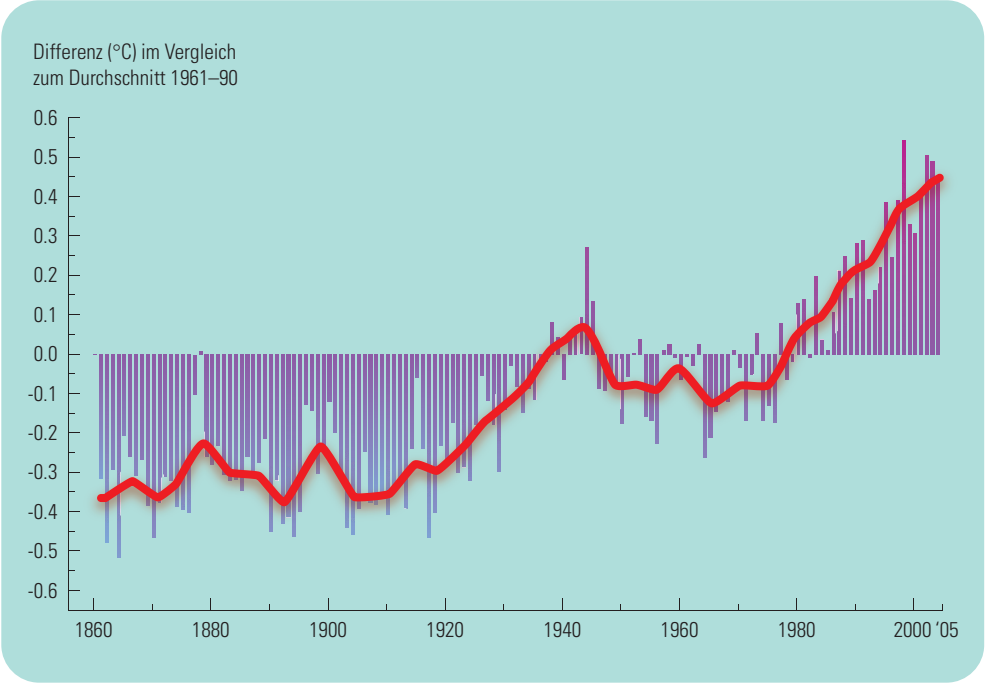
Abbildung 2-2:
Mittlere globale Strahlungsbilanzstörung für den Zeitraum 1750 bis 2000
Quelle: IPCC (2001a)

sowie das nur kurzfristig in der Atmosphäre verweilende troposphärische Ozon während der letzten 250 Jahre maßgeblich zum Menschen gemachten Treibhauseffekt beigetragen. Wie aus Abbildung 2-2 ersichtlich wird, haben sich auch (natürliche) Schwankungen in der Intensität der solaren Strahlung auf die atmosphärische Strahlungsbilanz ausgewirkt – jedoch in einem Umfang, der weit hinter dem der anthropogenen Treibhausgase zurückbleibt. Diese treibhausfördernde Wirkung wurde zu einem gewissen Grad durch den (direkten und indirekten) „cooling effect" (= negative Strahlungsbilanzstörung) der verschiedenen Aerosole ausgeglichen.

Blickt man auf Prognosen der zukünftigen Emissionsentwicklung, so wird das atmosphärische Kohlendioxid in Relationen zu den anderen Treibhausgasen in den kommenden Jahrzehnten voraussichtlich weiter an Gewicht gewinnen. Zudem wird für dieses Jahrhundert aufgrund von Maßnahmen in der Luftreinhaltepolitik mit einer Abnahme des Maskierungseffekts durch die Aerosole gerechnet, so dass künftig relativ zum Treibhausgasgehalt der Atmosphäre mit einer gesteigerten Erwärmungsrate zu rechnen sein wird.

Das Maß der Strahlungsbilanzstörung betrachtet die Wirkung der kumulierten Menge eines in der Atmosphäre befindlichen Treibhausgases. Bei der Freisetzung bzw. Vermeidung zukünftiger Treibhausgasemissionen ist dagegen die *zukünftige* Klimawirkung einer noch nicht emittierten Einheit eines Gases von Bedeutung. Die jeweilige Klimaschädlichkeit kann je nach Absorptionseigenschaft und atmosphärischer Verweilzeit eines Gases erheblich variieren, hängt aber auch von der bereits bestehenden atmosphärischen Konzentration des jeweiligen Gases ab. Alle diese Parameter fanden daher Eingang in das Maß des „relativen Treibhauspotenzials" („Global Warming Potential"/GWP). Dieses ermöglicht Aussagen über die von einer Einheit eines Gases verursachte Strahlungsbilanzstörung in einem bestimmten Zeitraum ab dessen Freisetzung.

Abbildung 2-3:
Globale oberflächennahe Durchschnittstemperatur
Quelle: Hadley Centre (2005)



Zwecks besserer Vergleichbarkeit werden das „relative Treibhauspotenzial" eines jeden Treibhausgases in Relation zum Referenzgas Kohlendioxid gesetzt und in der Regel ein Zeitraum von hundert Jahren betrachtet. Insbesondere die halogenierten Kohlenwasserstoffe weisen demnach eine wesentlich höhere Klimaschädlichkeit je Molekül auf als Kohlendioxid (vgl. Tabelle 2-1). Auch wenn diese synthetischen Substanzen im 21. Jahrhundert in ihrer Gesamtwirkung auf die Strahlungsbilanz der Atmosphäre aufgrund der geringeren absoluten Menge an Emissionen weiterhin hinter der von Kohlendioxid zurückstehen, werden sie durch ihre lange Verweilzeit in der Atmosphäre, die im Falle von Perfluormethan mehr als 50 000 Jahre beträgt (vgl. Tabelle 2-1), auch in den nächsten Jahrtausenden noch atmosphärische Vorgänge beeinflussen.

Beobachtbarer und zukünftiger Klimawandel

Es gibt bereits heute viele Anzeichen dafür, dass die Folgen des anthropogenen Treibhauseffekts nicht allein ein Problem einer fernen Zukunft sind, sondern schon seit Jahren voranschreiten. Ein besonders aufschlussreicher Indikator dafür ist die globale, oberflächennahe Durchschnittstemperatur, die sich seit Beginn der instrumentellen Messung gegen Mitte des 19. Jahrhunderts relativ verlässlich darstellen lässt. Diese erhöhte sich seit Ende des 19. Jahrhunderts um 0,6 bis 0,7 Grad Celsius, wobei für diesen Anstieg insbesondere die zurückliegenden vierzig Jahre Ausschlag gebend waren (WMO 2004; vgl. Abbildung 2-3). Auf der Nordhalbkugel war die Geschwindigkeit und Dauer der Erwärmung im 20. Jahrhundert größer als jede andere Entwicklung während der letzten tausend Jahre.[1] So waren denn auch die neunziger Jahre des letzten Jahrhunderts das wärmste Jahrzehnt und die letzten zehn Jahre mit Ausnahme von 1996 die wärmsten Jahre seit Beginn der instrumentellen Messungen (Hadley Centre 2004). Das Jahr 1998 wies im globalen Mittel wahrscheinlich sogar eine höhere Temperatur auf als irgendein anderes Jahr während der vergangenen tausend Jahre.

1 Aufgrund mangelnder Datenverfügbarkeit über die jährliche Temperaturentwicklung lassen sich für die Zeit davor und für die südliche Hemisphäre bisher keine vergleichbaren Aussagen treffen (IPPC 2001a).

Spätestens seit Mitte der neunziger Jahre besteht bei der überwiegenden Mehrheit der Klimawissenschaftler ein Konsens darüber, dass diese massiven Temperaturanstiege nicht allein auf natürliche Faktoren wie Schwankungen in der Intensität solarer Strahlung zurückgeführt werden können. Der IPCC fasste damals in seinem zweiten Sachstandsbericht den Stand der Klimaforschung in der Formulierung zusammen, dass es einen erkennbaren menschlichen Einfluss auf das globale Klima gebe (IPCC 1996). Seitdem haben Untersuchungen Ungewissheiten bezüglich der Ursachen globaler Temperaturveränderungen weiter minimiert, so dass der letzte Sachstandsbericht des IPCC an zentraler Stelle die für ein solches Gremium erstaunlich klar formulierte Aussage enthielt:

> „There is new and stronger evidence that most of the warming observed over the last 50 years is attributable to human activities." (IPCCa 2001)[2]

Auch wenn man andere Indikatoren heranzieht, so lässt sich eine Veränderung der klimatischen Verhältnisse beobachten. So hat sich in den vergangenen Jahrzehnten die jahreszeitliche und räumliche Verteilung der Niederschläge auf der Nordhalbkugel verändert. Während das Niederschlagsaufkommen in mittleren und hohen Breitengraden zugenommen hat, ist es in subtropischen Regionen zurückgegangen.[3]

Satellitendaten wie auch Beobachtungen vor Ort belegen zudem einen Rückgang der Schneebedeckung auf Landflächen und einen massiven Rückzug von Gletschern während des 20. Jahrhunderts. Laut eines kürzlich erschienenen Berichts des Arctic Council, in dem die acht Anrainerstaaten der Arktis und sechs Organisationen indigener Bevölkerungsgruppen zusammengeschlossen sind, sind die Wintertemperaturen in Alaska und Kanada in den letzten 50 Jahren um 3 bis 4 °C angestiegen und die Ausdehnung der ozeanischen Eisflächen ist im Jahresmittel während der letzten 30 Jahre um 8 Prozent, eine Fläche größer als Norwegen, Schweden und Dänemark zusammen, zurückgegangen (ACIA 2004).

Überdies ist ein vermehrtes Auftreten von extremen Wetterlagen und -ereignissen festzustellen. In den mittleren und hohen Breiten der nördlichen Hemisphäre sind in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts vermehrt große Niederschlagsereignisse zu verzeichnen gewesen, wohingegen es in Teilen Afrikas und Asiens in den letzten Jahrzehnten immer häufiger zu immer gravierenderen Dürreperioden kam. Der europäische Hitzesommer 2003, der sich allein in Frankreich in zusätzlichen 14 000 Toten in den Sterbestatistiken widerspiegelte (Kovats/Haines 2005), war der wärmste seit Beginn der Aufzeichnungen. Das Risiko für das Eintreten einer solchen Hitzewelle, so eine kürzlich erschienene Studie, hat sich aufgrund des menschlichen Eingriffs in das Klimasystem verdoppelt und wird in den nächsten vier Jahrzehnten womöglich sogar um den Faktor 100 steigen (Stott/Stone/Allen 2004).

Denn diese Veränderungen des globalen Klimas während der letzten Jahrzehnte sind erst der Anfang. Laut des letzten Sachstandsberichts des IPCC werden sich die globalen Durchschnittstemperaturen bis zum Jahr 2100 um weitere 1,4 bis 5,8 °C erhöhen, wenn keine klimapolitischen Maßnahmen ergriffen werden (vgl. Abbildung 2-4). Kürzlich erschienene Studien zur Klimasensitivität[4] schließen eine noch höhere Erwärmung nicht aus bzw. halten eine Temperaturzunahme im oberen Bereich des IPCC-Spektrums für wahrscheinlich (Schrag/Alley 2004; Stainforth et al. 2005). Welche schwerwiegenden Konsequenzen sich hinter solchen Durchschnittswerten verbergen, offenbart ein Blick in die Erdgeschichte. Ein Temperatur-

2 Diese Aussage wird im übrigen auch von allen einschlägigen wissenschaftlichen Vereinigungen der USA mitgetragen. Eine Analyse der mit dem Schlagwort „climate change" versehenen Artikel in wissenschaftlichen Zeitschriften im Zeitraum 1993–2003 zeigt zudem, dass kein Beitrag der Theorie des anthropogenen Klimawandels explizit widerspricht (Oreskes 2004).

3 Auf der Südhalbkugel wurden hingegen bisher keine vergleichbaren Niederschlagsänderungen für bestimmte Regionen gleicher Breitengrade verzeichnet.

4 Die Klimasensitivität ist definiert als der Anstieg der globalen, oberflächennahen Durchschnittstemperatur bei einer Verdopplung der vorindustriellen Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre.

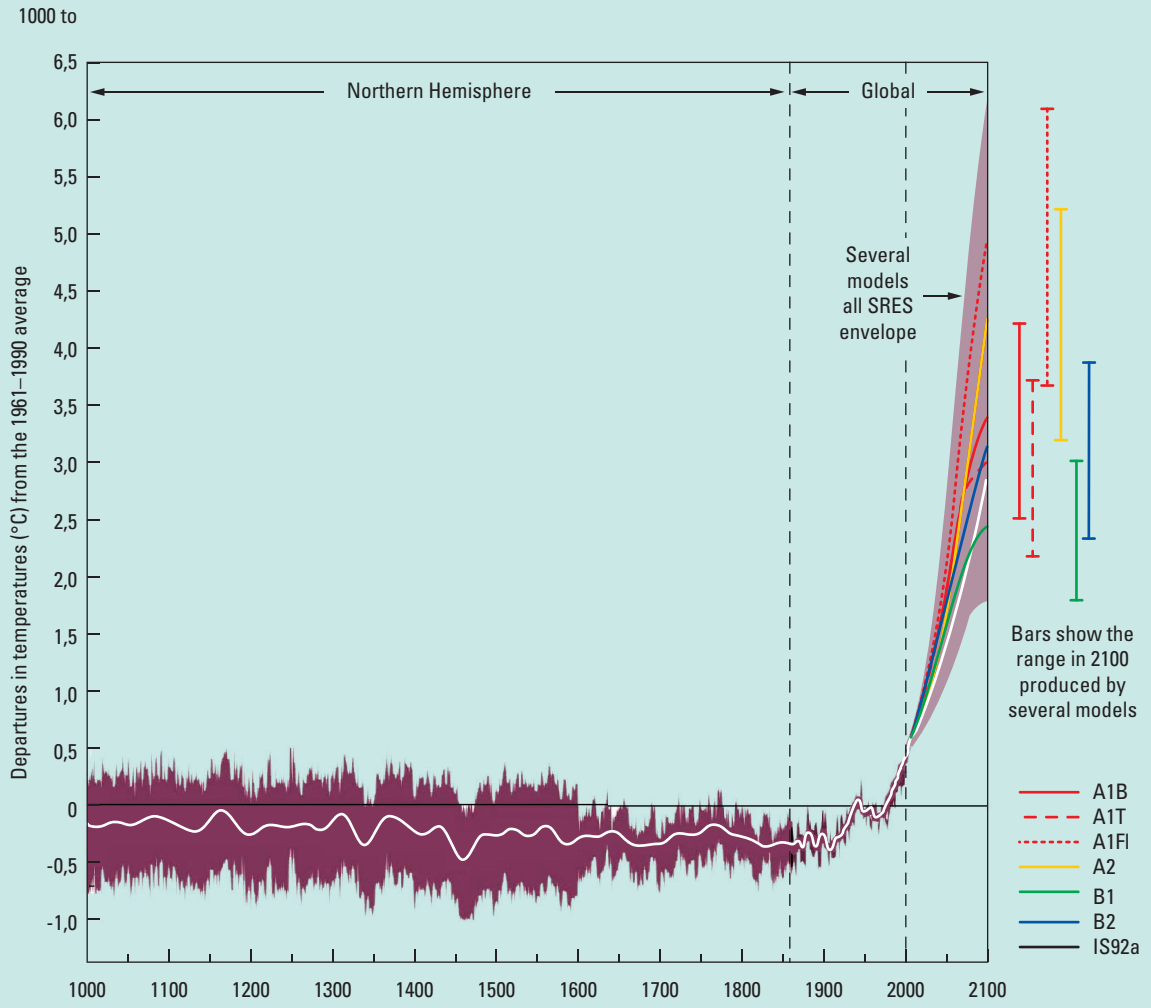


Abbildung 2-4:
Vergangene und prognostizierte Änderungen der globalen oberflächennahen Durchschnittstemperatur (1000–2100)
Quelle: IPCC (2001a)

unterschied von 5 Grad war zuletzt vor 10 000 Jahren während des Übergangs von der letzten Eis- zur Warmzeit zu verzeichnen – und exakt in dieser Periode relativer Stabilität der zurückliegenden 10 000 Jahre ist die menschliche Zivilisation entstanden.

Die Temperaturprognosen basieren auf einem Set von 40 Emissionsszenarien, die für einen Sonderbericht des IPCC zusammengestellt wurden (IPCC 2000). In den Szenarien werden erwartbare Pfade der globalen Emissionen abhängig von verschiedenen demographischen, ökonomischen und technologischen Entwicklungen der Menschheit in diesem Jahrhundert dargestellt – ohne explizit klimapolitische Maßnahmen einzubeziehen. Auch wenn in einigen Szenarien die Emissionen ab Mitte des Jahrhunderts rückgängig sind (vgl. Abbildung 2-5), so führen sie doch alle zu einer Steigerung der atmosphärischen Treibhausgaskonzentrationen. Für Kohlendioxid beispielsweise werden für das Jahr 2100 Konzentrationen zwischen 540 und 970 ppmv prognostiziert – 90 bis 250 Prozent über dem vorindustriellen Konzentrationsniveau. Gleichzeitig kristallisiert sich in der Wissenschaft in den letzten Jahren ein Konsens darüber heraus, dass eine globale Erwärmung von mehr als 2 Grad kaum tragbare Folgen für einzelne Regionen und die dort lebenden Menschen nach sich ziehen würde (Hare 2003). Dies wurde durch den Wissenschaftlichen Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) bestätigt, der eine ausführliche Bewertung potenzieller Folgen einer Erwär-

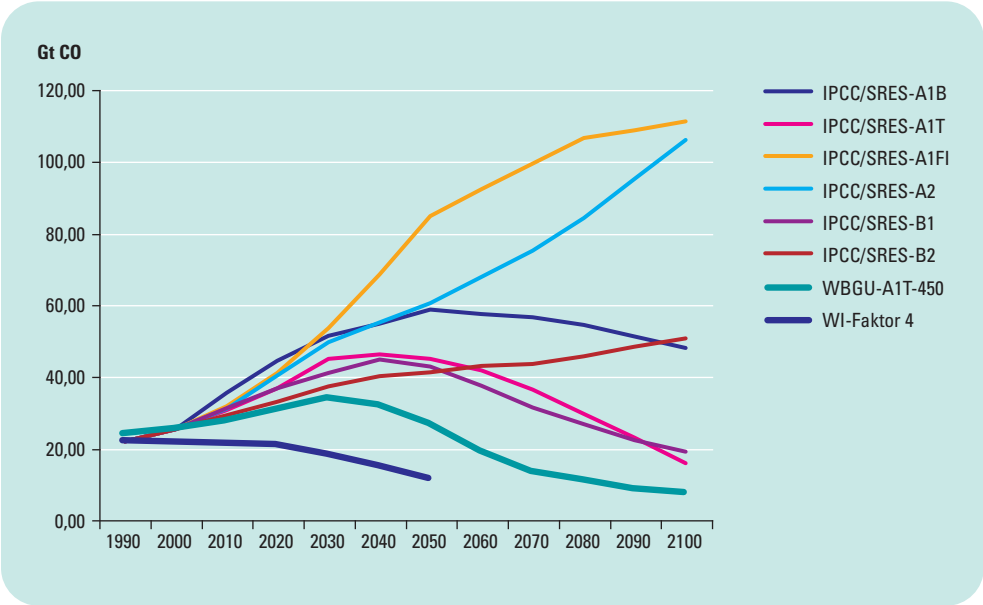


Abbildung 2-5:
CO_2-Emissionspfade ausgewählter Szenarien
Quelle: Hennicke/Fischedick/Wolters (2000), IPCC (2000), WBGU (2003)

mung für die Nahrungsmittelsicherheit, Wasserverfügbarkeit, die menschliche Gesundheit und für einzelne Ökosysteme unternommen hat (WBGU 2003).[5] Neben zahlreichen Akteuren aus der Zivilgesellschaft hat sich auch die Europäische Union die Einhaltung dieser 2-Grad-Obergrenze zum Ziel gesetzt (CAN 2002; EU 2005; vgl. auch Brouns/Ott/Joester 2005).

Ein solches 2-Grad-Ziel würde eine Stabilisierung der atmosphärischen Treibhausgaskonzentration auf einem Niveau unter 550 ppmv CO_2 equiv. erforderlich machen.[6] Lässt man die anderen Treibhausgase außer Acht und betrachtet nur das für den Verkehrssektor besonders relevante Kohlendioxid, so müsste eine Stabilisierung unterhalb eines Konzentrationsniveaus von 450 ppmv CO_2 eintreten – ein Stabilisierungsniveau, das weit unter dem „klimafreundlichsten" Business-as-usual-Szenario des IPCC liegt. Und doch ist das Einhalten eines für ein solches Stabilisierungsziel erforderlichen Emissionspfades sowohl technologisch wie wirtschaftlich möglich, wie so genannte normative Szenarien zeigen. Diese gehen von einem Klimaschutzziel aus und prüfen, ob dieses mit klimapolitischen Maßnahmen erreichbar ist.

Der WBGU hat beispielsweise derartige Szenarien entwickelt, die auf CO_2-Stabilisierungsniveaus von 400 bzw. 450 ppmv hinauslaufen (WBGU 2003; vgl. Abbildung 2-5). Die dafür erforderlichen Minderungsmaßnahmen lassen sich in drei Gruppen einteilen: verstärkte Energieeinsparung, strukturelle Veränderungen (v.a. Einsatz erneuerbarer Energieformen und kohlenstoffarme konventionelle Technologien) und geologische Kohlenstoffspeicherung. Die prognostizierten Kosten sind für alle Szenarien gegen Mitte des Jahrhunderts am größten, für das 450 ppmv-Szenario belaufen sie sich im Jahre 2050 im Mittel auf unter 0,7 Prozent des globalen Bruttoinlandsprodukts und gehen bis 2100 auf Null zurück. Die vermiedenen externen Kosten einer Klimaänderung (Klimaschäden und Anpassungskosten) sind in diesen Kalkulationen nicht erhalten.

Zu ähnlichen Ergebnissen kommt das „Faktor 4"-Szenario des Wuppertal Instituts, das auf eine Halbierung der globalen CO_2-Emissionen bis 2050 abzielt (vgl. Abbildung 2-5). Erforderliche Maßnahmen liegen hier insbesondere im Bereich der Energieeffizienzsteigerung (Steigerung

5 Doch auch eine globale Erwärmung um 2 Grad zieht bereits signifikante Auswirkungen nach sich (Thomas et al. 2004; Hare 2003; IPCC 2001b) und macht Anpassungsmaßnahmen in besonders durch den Klimawandel verwundbaren Regionen der Welt erforderlich.

6 Die neuen Erkenntnisse zur Klimasensitivität legen sogar noch niedrigere Stabilisierungsniveaus nahe (Schrag/Alley 2004).

der Energieproduktivität von 1 auf 2 Prozent pro Jahr), der Förderung von Kraft-Wärme/Kälte-Kopplung sowie einem breiten Mix erneuerbarer Energien.

Die Differenz zwischen den „Business-as-usual"-Szenarien des IPCC und den normativen Szenarien von WBGU und Wuppertal Institut zeigt die Herausforderung auf, vor dem die internationale Klimapolitik steht. Erste Schritte, die die Staatengemeinschaft bereits ergriffen hat, werden im Folgenden dargestellt.

Internationale Verpflichtungen zum Klimaschutz

Wissenschaftliche Forschungen über den anthropogenen Klimawandel existieren schon seit mehreren Dekaden. Erst seit den siebziger Jahren des letzten Jahrhunderts jedoch beschäftigt diese „größte Herausforderung der Menschheit im 21. Jahrhundert" (so der britische Premier Tony Blair) die Entscheidungsträger in internationalen Regierungsorganisationen und nationalen Behörden. Meilensteine beim Wissenstransfer von der Wissenschaft hin zu den politischen Entscheidungsträgern waren die Erste Weltklimakonferenz 1979 in Genf und die Konferenz „The Changing Atmosphere: Implications for Global Security", veranstaltet 1988 in Toronto. Diese Konferenz in Toronto gilt allgemein als das Ereignis, welches den Klimawandel zum Gegenstand der internationalen Politik werden ließ. Die Konferenz versammelte Wissenschaftler, Politiker und Nichtregierungsvertreter und endete mit einer Schlussdeklaration. Darin wurde den Politikern empfohlen:

- die globalen CO_2-Emissionen bis 2005 im Vergleich zu 1988 um 20 Prozent zu senken,
- eine völkerrechtliche Konvention auszuhandeln, die den Rahmen für konkrete Protokolle zum Klimaschutz bieten soll, und
- einen „Weltatmosphärenfond" einzurichten (Bodansky 1994).

Nach dieser Konferenz begannen umfangreiche internationale Verhandlungen, moderiert durch die Vereinten Nationen. Zwei völkerrechtliche Verträge sind seitdem ausgehandelt worden: das Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen (1992) und das Kyoto-Protokoll zum Rahmenübereinkommen (1997).

Das Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen
Die Klimarahmenkonvention (UNFCCC) bildet die Basis des globalen Klimaregimes, errichtet verschiedene Organe und Grundregeln sowie rudimentäre Verpflichtungen der Vertragsstaaten (Ott 1996). In mancher Hinsicht kann die Rolle der Klimarahmenkonvention im Klimaregime mit der einer Verfassung im Nationalstaat verglichen werden: Durch sie werden Recht setzende Organe (Conference of the Parties, Subsidiary Body for Implementation, Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice) geschaffen und Ausführungsorgane (Global Environment Facility, IPCC) benannt. Weiterhin werden gewisse Grundsätze formuliert, die beim Aushandeln konkreter Vereinbarungen beachtet werden müssen. Die strukturell sicherlich bedeutsamsten Grundsätze der Klimarahmenkonvention betreffen die Differenzierung der Verpflichtungen der Länder entsprechende Kategorien:

- Alle Vertragsparteien, die im Anhang I der Konvention aufgelistet sind, müssen im Klimaschutz vorangehen, d.h. stärkere Anstrengungen zum Klimaschutz unternehmen als die übrigen Staaten (Artikel 4.2 UNFCCC). Dies sind die traditionellen Industriestaaten in West und Ost, also neben der OECD (außer Mexiko und Südkorea) auch die Staaten des ehemaligen Warschauer Paktes („countries with economies in transition").
- Alle Vertragsparteien, die im Anhang II aufgelistet sind, müssen darüber hinaus besondere finanzielle Mittel für die übrigen Staaten bereitstellen (Artikel 4.3 UNFCCC). Dies sind lediglich die westlichen Industriestaaten außer Mexiko und Südkorea.

Die Klimarahmenkonvention enthält noch keine quantitativen Verpflichtungen zur Minderung von Treibhausgasen, sondern lediglich eine allgemeine Zielsetzung, eine „Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen auf einem Niveau zu erreichen, auf dem eine gefährliche anthropogene Störung des Klimasystems verhindert wird“ (Artikel 2 UNFCCC). Folgerichtig verpflichteten sich die Vertragsparteien der Konvention dazu, a) Treibhausgasinventare systematisch aufzubauen, b) die Emissionen von Treibhausgasen aus anthropogenen Quellen zu reduzieren und c) den Abbau solcher Gase durch direkte anthropogene Senken zu fördern (Artikel 4.1 UNFCCC).

Genauere Regelungen, dies sieht die Klimakonvention ausdrücklich vor, sollen in Protokollen festgeschrieben werden. Schon auf der ersten Konferenz der Vertragsparteien 1995 in Berlin wurde beschlossen, ein Protokoll auszuhandeln, welches konkrete quantitative Minderungsziele für Industriestaaten fixiert.

Das Kyoto-Protokoll zur Klimarahmenkonvention

Nach nur dreijähriger Verhandlungszeit wurde ein solches Protokoll 1997 in der alten japanischen Kaiserstadt Kyoto abgeschlossen und angenommen (Oberthür/Ott 2000). Es definiert das erste Mal verbindliche Obergrenzen für die Treibhausgasemissionen von Industriestaaten, führt eine Reihe so genannter „flexibler Instrumente“ für die Umsetzung der Verpflichtungen ein und enthält Elemente für die Überprüfung der Umsetzung dieser Verpflichtungen sowie ein Verfahren zur Konfliktlösung und Streitbeilegung.

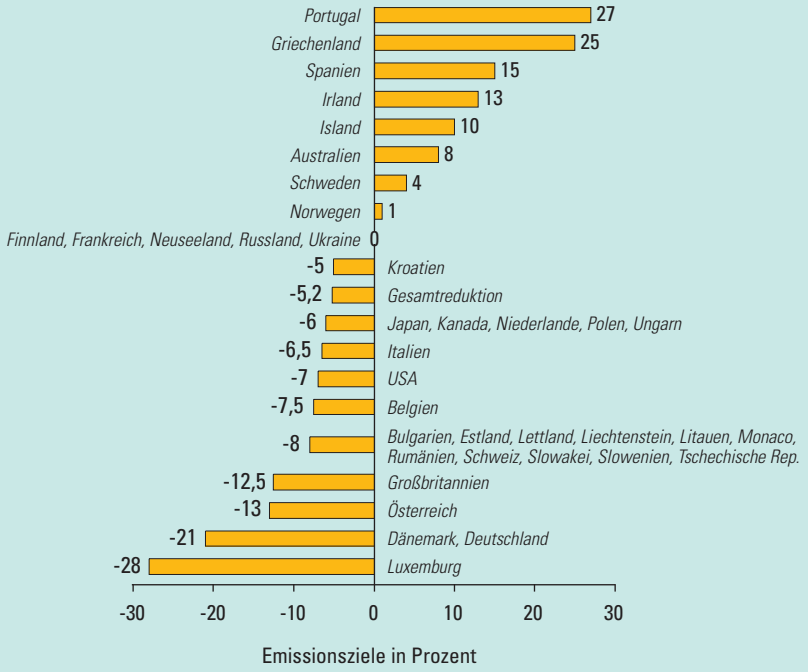
Als zentrales Element setzt das Kyoto-Protokoll (KP) den Anhang I-Vertragsparteien Obergrenzen für die Emissionen von Treibhausgasen aus anthropogenen Quellen. Konkret gelten diese Obergrenzen für alle in Anhang A des Kyoto-Protokolls aufgelisteten Gase (jeweils umgerechnet in Kohlendioxidäquivalente):

- Kohlendioxid (CO_2),
- Methan (CH_4),
- Distickstoffoxid (N_2O),
- Schwefelhexafluorid (SF_6),
- die Gruppe der perfluorierten Kohlenwasserstoffe (PFKW) und
- die Gruppe der teilhalogenierten Fluorkohlenwasserstoffe (HFKW).

Praktisch berechnen sich die Obergrenzen wie folgt: Die Emissionen einzelner Treibhausgase werden durch Multiplikation mit dem relativen Treibhauspotenzial (GWP) in Kohlendioxidäquivalente umgerechnet. Der erlaubte Ausstoß von Treibhausgasen in den Jahren 2008 bis 2012 (der so genannten Verpflichtungsperiode) beträgt das Fünffache des Jahresausstoßes 1990, multipliziert mit dem in Anhang B eingetragenen Minderungsfaktor (Artikel 3.1 KP). Nach den dort festgelegten Reduktionszielen müssen die Mitgliedstaaten der Europäischen Union ihre Treibhausgasemissionen in den Jahren 2008 bis 2012 um durchschnittlich 8 Prozent gegenüber 1990 vermindern (vgl. Abbildung 2-6).

Allerdings hat die Europäische Union (EU) die Einführung der „gemeinsamen Erfüllung“ in Artikel 4 des Kyoto-Protokolls durchgesetzt. Diese Bestimmung erlaubt es einer Anzahl von Staaten, oder auch „Organisationen der regionalen Wirtschaftsintegration“ wie im Falle der EU, ihre Verpflichtungen gemeinsam zu erfüllen. Innerhalb eines so genannten bubbles dürfen einzelne Mitgliedstaaten der EU von ihren völkerrechtlichen Verpflichtungen abweichen, solange die Gruppe als Ganzes das vereinbarte Minderungsziel erreicht. Die EU-Mitgliedsstaaten einigten sich bereits 1998 auf eine EU-interne Neuverteilung ihrer Gesamtreduktionspflicht von acht Prozent, welche eine große Bandbreite von länderspezifischen Minderungszielen vorsieht, die von einer erlaubten Steigerung der Emissionen um 27 Prozent (Portugal) bis hin zu einer Reduktion von 28 Prozent (Luxemburg) reicht (UNFCCC 2002a; vgl. Abbildung 2-6).

Abbildung 2-6:
Emissionsziele gemäß Kyoto-Protokoll und EU-interner Lastenverteilung
Quelle: UNFCCC (1998), UNFCCC (2002a)



Die Reduktionsverpflichtung der einzelnen Staaten wird in diesem Abkommen analog zum Kyoto-Protokoll berechnet. Wie die vereinbarten Ziele innerhalb der jeweiligen Staaten erreicht werden, ist nicht Gegenstand der „burden sharing"-Vereinbarung der EU. Jedem Staat bleibt mithin im Rahmen des jeweiligen nationalen Zieles die Aufteilung der Minderungsbeiträge auf die verschiedenen Verursachersektoren (z.B. Verkehr, Industrie, Energieumwandlung) und eventuelle Kompensationen zwischen den Sektoren selbst überlassen.

Die bisher erzielten Reduktionserfolge halten sich allerdings, verglichen mit den jeweiligen Emissionszielen, in Grenzen. Verglichen mit einem (hypothetischen) linearen Emissionstrend zwischen Referenz- (1990) und Zielzeitraum (2010), sind nur Deutschland, Großbritannien, Frankreich, Luxemburg und Schweden bisher auf einem sicheren Weg zur Zielerfüllung (vgl. Abbildung 2-7). Die EU-15 insgesamt wird hingegen nach bisheriger Datenlage ihr Minderungsziel verfehlen.

Die Hauptstoßrichtung des Kyoto-Protokolls ist die Reduktion der Emissionen aus anthropogenen Quellen in den Anhang I-Vertragsparteien. Allerdings verfolgt das Kyoto-Protokoll einen umfassenden Ansatz und erlaubt auch die Anrechnung von Minderungen der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre durch Maßnahmen im Bereich der biotischen Senken (Artikel 3.3 und 3.4 KP). In Artikel 3.3 werden zwei Maßnahmen im Bereich der anthropogenen Senken aufgeführt, die sich die Vertragsparteien als Beitrag zur Erfüllung ihrer Verpflichtungen unter Artikel 3.1 anrechnen lassen können: die Aufforstung und Wiederaufforstung. Auf der Klimakonferenz in Marrakesch (COP 7; 2001) wurden zudem Regelungen über die Anrechenbarkeit von weiteren Maßnahmen wie der Wald-, Feld- und Grünlandbewirtschaftung getroffen (UNFCCC 2002b).

Die Vertragsparteien haben dabei eine Reihe von Einschränkungen vorgenommen, um die Integrität des Protokolls sicherzustellen. So sind Maßnamen der Waldbewirtschaftung nur bis zu einer bestimmten Höhe anrechenbar, es müssen einheitliche Methodologien verwendet werden und die generierten Emissionsrechte verlieren ihre Gültigkeit mit Ablauf der Verpflichtungsperiode. Dennoch würde sich, wenn alle Staaten die ihnen erlaubten Möglichkeiten nutzen,

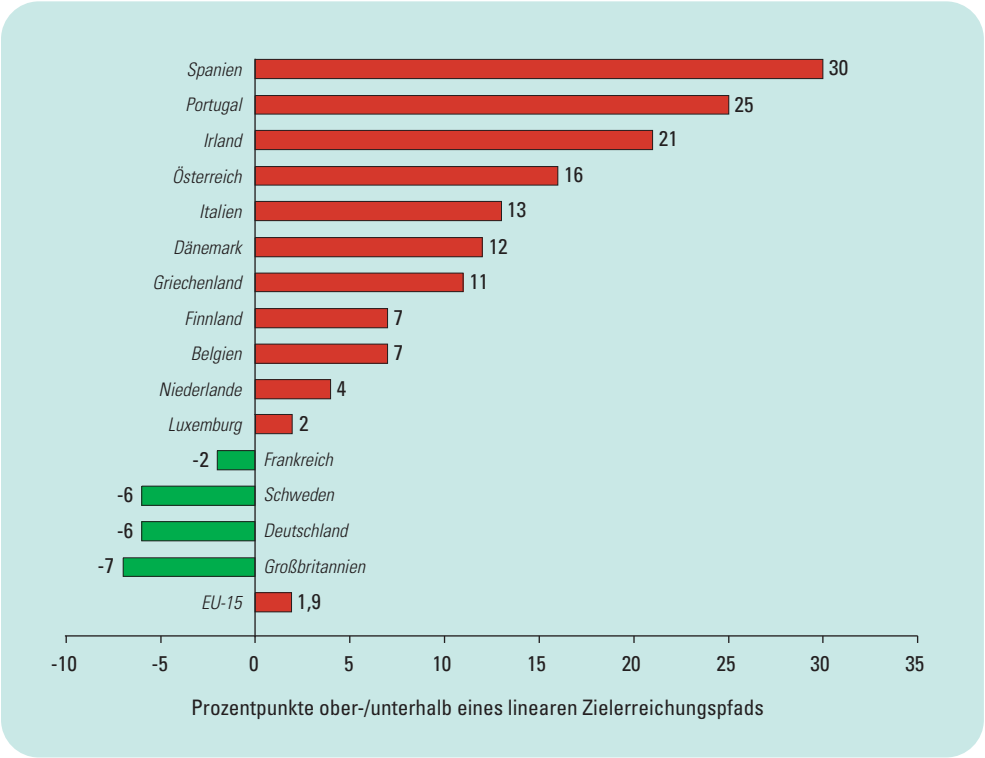


Abbildung 2-7:
Abweichung der Treibhausgasemissionen der EU-Mitgliedsstaaten in 2002 von einem (linearen) Zielerreichungspfad
Quelle: EEA (2005)

die angestrebte Minderung der Treibhausgasemissionen für den Verpflichtungszeitraum um „mindestens fünf Prozent“ auf ca. 2,5 Prozent vermindern (Brouns/Santarius 2001).

In der öffentlichen Wahrnehmung wird das Protokoll meist mit den so genannten „flexiblen Mechanismen“ assoziiert. Insgesamt gibt es drei dieser Mechanismen: a) den zwischenstaatlichen Emissionshandel (Artikel 17 KP), b) Joint Implementation (Artikel 6 KP) und c) den Clean Development Mechanism (Artikel 12 KP).

Der Emissionshandel ist seit der Einführung des EU-internen Emissionshandelssystems in das Zentrum der öffentlichen und unternehmerischen Aufmerksamkeit gelangt. Beide Systeme sind jedoch deutlich zu unterscheiden: Der EU-interne Emissionshandel begrenzt die Kohlendioxidemissionen der auf dem Territorium der EU gelegenen Unternehmen, während der Emissionshandel im Rahmen des Kyoto-Protokolls die Möglichkeit des Handels mit Emissionsrechten zwischen den Staaten eröffnet. Dieser Austausch von Teilen der zugeteilten Menge an Emissionsrechten muss nicht unbedingt nach marktwirtschaftlichen Grundsätzen erfolgen, sondern kann auch in einem Tauschgeschäft bestehen. Erwirbt eine Vertragspartei des Kyoto-Protokolls eine bestimmte Menge an Emissionsrechten, werden diese dem erwerbenden Staat zugerechnet (Artikel 3.10 KP) und dem übertragenden Staat abgezogen (Artikel 3.11 KP). Das nähere regeln Artikel 17 des Kyoto-Protokolls bzw. die in Marrakesch Ende 2001 angenommenen Ausführungsbestimmungen (UNFCCC 2002c).

Der als Hauptpfeiler des europäischen Klimaschutzprogramms im Jahre 2003 eingerichtete Emissionshandel (EU 2003) ist dagegen ein echtes Marktinstrument. Es ist am 1. Januar 2005 in Kraft getreten, zunächst für eine Pilotphase bis Ende 2007 und danach von 2008 bis 2012 als vollgültiges Programm. Die Emissionshandels-Richtlinie umfasst ca. 50 Prozent der EU-weiten Emissionen, Obergrenzen gelten nicht für einzelne Unternehmen, sondern jeweils speziell für einzelne Anlagen energieintensiver Industrien bzw. Kraftwerke ab einer gewissen Obergrenze. Der Verkehrssektor ist hingegen bisher nicht Teil des EU-Emissionshandelsystems. Die EU-Richtlinie schreibt nicht die konkreten Emissionsobergrenzen für diese Anlagen vor, sondern überlässt dies den Mitgliedstaaten über die Ausgestaltung so genannter Nationaler Alloka-

tionspläne. Bleiben einzelne Anlagen unter den festgesetzten Obergrenzen, können sie die „überschüssigen" Emissionsrechte bilateral oder über eine Börse (z.B. in Leipzig) verkaufen. Fast alle Staaten haben bis zum Ende des Jahres 2004 ihre Allokationspläne verabschiedet, im ersten Quartal 2005 lag der Preis für eine Tonne CO_2 zwischen sieben (Ende Januar) und 14 Euro (Ende März). Dieses europäische Emissionshandelssystem ist formal unabhängig von dem internationalen Klimaregime (abgesehen von der EU-internen Lastenverteilung) und könnte über die Verlinkung mit den Systemen anderer Staaten (Kanada, Schweiz, Japan, Neuseeland, Norwegen) ein wesentlicher Bestandteil der globalen Klimapolitik werden.

Die „Gemeinsame Umsetzung" bzw. Joint Implementation (JI) von Klimaschutzmaßnahmen ist in Artikel 6 des Kyoto-Protokolls geregelt. Sie beruht ebenfalls auf dem klassischen ökonomischen Prinzip, dass Maßnahmen dort durchgeführt werden sollen, wo sie am kostengünstigsten sind. Werden also konkrete Projekte in einem anderen Anhang I-Staat durchgeführt, können die dabei erzielten Emissionsminderungen dem durchführenden Unternehmen bzw. dessen Heimatstaat gutgeschrieben werden. Es kommt dabei zu einer reziproken Buchführung: Dem investierenden Staat werden die zusätzlichen Emissionsrechte (Emissionsreduktionseinheiten) gutgeschrieben, dem Gaststaat werden sie abgezogen. Dies stellt sicher, dass JI-Maßnahmen klimaneutral erfolgen, also das zulässige Gesamtbudget nicht überschritten wird.

Die Anforderungen an die Projekte im Rahmen der Joint Implementation sind relativ unproblematisch zu erfüllen. Erforderlich ist in jedem Fall eine Billigung durch beide Vertragsparteien (investierender und gastgebender Staat), die Erbringung zusätzlicher Reduktionen gegenüber einem Referenzszenario und die Erstellung eines nationalen Systems zur Inventarisierung der Treibhausgasemissionen (Artikel 6 KP). Zusätzlich soll der Erwerb von Emissionsrechten durch JI-Projekte nur zusätzlich zu Maßnahmen im eigenen Lande erfolgen; diese Bestimmung ist jedoch weit auslegbar – so planen die Niederlande, etwa die Hälfte ihrer Verpflichtung mit Hilfe der flexiblen Mechanismen zu erfüllen. Nach den auf der Konferenz in Marrakesch (2001) getroffenen Vereinbarungen sollen Projekte ab dem 1. Januar 2008, also dem Beginn der Verpflichtungsperiode, anrechenbar sein. Ein noch zu errichtendes JI-Supervisory Committee soll die Einhaltung dieser Regeln durch die Projektteilnehmer überwachen.

Durch den Clean Development Mechanism (CDM, deutsch: Mechanismus für umweltverträgliche Entwicklung) können Klimaschutzprojekte in Entwicklungsländern als Beitrag zu den Verpflichtungen der Anhang I-Vertragsparteien angerechnet werden (Artikel 12 KP). Der CDM ist also das Pendant zur Joint Implementation auf der Süd-Nord-Ebene. Es kommt dabei zu Anrechnungen von Emissionsminderungen aus Staaten, die nicht im Anhang B stehen. Folglich sind die erzielten Emissionszertifikate zusätzlich und vergrößern die zulässigen Gesamtemissionen der Industriestaaten – deshalb gelten besonders strenge Regeln hinsichtlich der Projektauswahl, Durchführung und Evaluierung.

Klimaschutzprojekte in Entwicklungsländern haben vielfach auch eine starke entwicklungspolitische Komponente, und folgerichtig ist der CDM laut Protokoll so zu gestalten, dass CDM-Projekte zur nachhaltigen Entwicklung des Gastlandes beitragen. Nach den Entscheidungen von Marrakesch sind für den CDM zum Beispiel nur solche Senkenprojekte zugelassen, die auf die Wiederaufforstung oder Aufforstung degradierter Flächen zielen (UNFCCC 2002a). Der von der EU ursprünglich verfolgte Ansatz, nur klimapolitisch einwandfreie Projekte anhand einer Positivliste zuzulassen, konnte sich allerdings international nicht durchsetzen. Im Gegensatz zu JI-Projekten sind die erzielten Emissionsminderungen aus CDM-Projekten schon seit 2000 anrechenbar. Die Vertragsparteien etablierten auf der Konferenz von Marrakesch ein Executive Board (EB) für den CDM, der nicht nur mit der Durchführung und Auswertung der Projekte befasst ist, sondern auch der Auswahl von Projekten allgemein und im Einzelfall zustimmen muss.

Aufgrund dieser recht komplexen Prozedur und der relativ schlechten Ausstattung des CDM-EB sind bis März 2005 nur vier Projekte im Rahmen des CDM zugelassen worden. Die bisher

in Planung befindlichen Projekte konzentrieren sich größtenteils auf Projekte, die Gase mit hohem Treibhauspotenzial (CH_4, N_2O und F-Gase) betreffen. Diese Projekte ermöglichen hohe Emissionsreduktionen zu einem günstigen Preis, liefern in der Regel jedoch keinen substanziellen Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung des Gastlandes. Darüber hinaus ist die Mehrheit der Projekte bisher in wenigen, wirtschaftlich bereits relativ fortgeschrittenen Ländern geplant und gerade der afrikanische Kontinent ist bisher unterrepräsentiert.

Ausblick nach dem Inkrafttreten des Kyoto-Protokolls

Am 16. Februar 2005, also mehr als sieben Jahre nach seiner Annahme im Jahre 1997, ist das Kyoto-Protokoll für die 145 Mitgliedsstaaten (Stand: März 2005) in Kraft getreten. Nachdem Russland seine Ratifikationsurkunde beim Generalsekretär der Vereinten Nationen hinterlegt hatte, war der erforderliche Anteil an den Emissionen der Industriestaaten in Höhe von 55 Prozent erreicht. Nach der Absage von Präsident Bush an das Kyoto-Protokoll war Russland das Zünglein an der Waage. Der Europäischen Union gelang es, mit Hilfe ihrer selbst definierten „soft power" die Unterstützung der internationalen Klimapolitik durch Russland bzw. Präsident Putin sicherzustellen.

Damit ist die Klimapolitik in ein neues Stadium getreten. Erstmals gelten rechtlich verbindliche Grenzen für den Ausstoß von Treibhausgasen für fast alle Industriestaaten – Kohlenstoff hat einen Preis bekommen. Dies wird durch die Einführung des unternehmensbasierten Emissionshandels der EU auf der betriebswirtschaftlichen Ebene abgebildet, der Emissionshandel wirkt sozusagen wie ein Transmissionsriemen, der die ökologischen Erfordernisse des Klimaschutzes auf die betriebliche Ebene überträgt. Dies wird zu einer gesteigerten Wahrnehmung der Klimaproblematik auf Unternehmensebene beitragen. Und dies birgt auch Chancen für Unternehmen: Die Erfahrungen des Mineralölkonzerns BP mit der Einführung eines unternehmensinternen Emissionshandels waren positiv hinsichtlich Zielerreichung, betriebswirtschaftlicher Rentabilität und Mitarbeitermotivation (Pew Center 2004a).

Vor allem aber sollte durch das Inkrafttreten des Kyoto-Protokolls deutlich geworden sein, dass die Entwicklung in Richtung Klimaschutz nicht aufzuhalten ist. Für jedes Unternehmen mit einem nennenswerten Energieanteil an den Produktionskosten oder mit energieintensiven Produkten ist die Realisierung dieser ökologischen Rahmenbedingung für die zukünftige Unternehmensstrategie von entscheidender Bedeutung. Dies gilt auch und insbesondere für Produzenten von Kraftfahrzeugen. Denn die Erfordernisse des Klimaschutzes werden Fahrzeugkonstruktion, Fahrzeugbau und die Verkehrsinfrastruktur entscheidend verändern.

Diese Erkenntnis bedeutet natürlich nicht, dass die internationale, europäische oder nationale Klimapolitik unabänderlich und ohne größere Verzögerungen in Richtung eines stetig verbesserten Klimaschutzes fortschreiten wird. Die letzten Jahre seit der Annahme des Kyoto-Protokolls haben aber gezeigt, dass der Weg zu einer nachhaltigen Wirtschaft und Gesellschaft bergauf führt und auch weiter führen wird – jedoch mit ab und zu etwas Gegenwind. Die Signale für eine gefährliche Störung des Klimasystems sind kontinuierlich stärker geworden und werden sich in den nächsten Jahren weiter verstärken (vgl. Kapitel „Beobachtbarer und zukünftiger Klimawandel"). Der politische Prozess bildet diese wissenschaftlichen Erkenntnisse ab und versucht im Sinne des Vorsorgeprinzips die Leitplanken so zu setzen, dass die Anpassung an die ökologischen Erfordernisse allmählich erfolgen und eine abrupte Störung wirtschaftlicher Aktivitäten verhindert werden kann. Dabei wird es darum gehen, aktive und passive Klimaschutzmaßnahmen intelligent miteinander zu verbinden. Der Klimawandel muss einerseits durch THG-Minderungsmaßnahmen eingedämmt werden (Mitigation), andererseits ist eine Anpassung an den heute schon unvermeidlichen Klimawandel (Adaptation) unausweichlich. Eine plötzliche Katastrophe im Klimabereich bzw. neue Erkenntnisse über abrupte Klimaänderungen, das hat nicht zuletzt die Wahl entscheidende Elbeflut vom Sommer 2002 gezeigt, könnten einen enormen politischen Aktionismus freisetzen, der die unternehmerischen Entscheidungen in erheblich höherem Maße beeinflussen würde, als dies bei

einer stetigen Klimapolitik der Fall ist. Die Entdeckung des Ozonlochs bedeutete das Ende der FCKW-Ära bzw. der chlorierten oder bromierten Kohlenwasserstoffe – ein gutes Beispiel für die vorgenannte These.

Aus diesem Grunde wird sich auch in den USA ein Wandel vollziehen. Es waren die USA und eine republikanische Regierung, die Mitte der achtziger Jahre des letzten Jahrhunderts aufgrund eines von extremen Wetterereignissen geprägten Jahres die Klimaproblematik zur Chefsache der internationalen Politik erhoben und die Gründung des IPCC betrieben. Und auch gegenwärtig gibt es politische Initiativen in den USA wie den Gesetzentwurf von McCain/Lieberman und die „Regional Greenhouse Gas Initiative", die eine Einführung von Obergrenzen für industrielle Anlagen bzw. Kraftwerke auf dem Territorium der USA vorsehen. Darüber hinaus gibt es bereits in 18 Bundesstaaten verbindliche Vorgaben für Elektrizitätsversorgungsunternehmen hinsichtlich des Anteils erneuerbarer Energien an ihrem Energieportfolio (Pew Center 2004b). Im Verkehrssektor schreitet insbesondere Kalifornien mit anspruchsvollen Grenzwerten für Kraftfahrzeuge voran. Auch die Klage des amerikanischen Verbandes Alliance, dem auch deutsche und amerikanische Hersteller angehören, gegen diese kalifornischen Vorgaben (van de Sand/Bals 2005) werden die Entwicklung zu emissionsarmen oder -freien Fahrzeugen auf Dauer nicht aufhalten können. Der britische Premier Tony Blair hat die Klimapolitik (neben Afrika) zur zentralen Säule seiner Präsidentschaft über die G8 und den Europäischen Rat im zweiten Halbjahr 2005 gemacht. Aus diesen Gründen wird auch die Bush-Administration nicht um nationale Maßnahmen und um eine Teilnahme an den internationalen Bemühungen zur Eindämmung des Treibhauseffekts herumkommen.

In der nahen Zukunft wird der Schwerpunkt der internationalen Klimapolitik auf der Umsetzung des Kyoto-Protokolls liegen, also der Implementierung der flexiblen Mechanismen und der sonstigen Instrumente bzw. Verfahren. Um perspektivisch tatsächlich die globalen Treibhausgasemissionen zu begrenzen, wird es für die Verhandlungen der zweiten Verpflichtungsperiode nach 2012 um zwei Ziele gehen: die Wiedereingliederung der USA in das internationale Klimaregime und die Integration bestimmter Entwicklungsländer in die Verpflichtungen des Kyoto-Protokolls. Bei Letzterem geht es vor allem um quantitativ bedeutsame Staaten wie China, Indien, Brasilien und Südafrika, aber auch um eine Hand voll hoch entwickelter Staaten des Südens wie Singapur, Saudi-Arabien oder Quatar mit hohen Pro-Kopf-Emissionen und/oder hohen Emissionen pro Einheit des Bruttosozialprodukts. Die größte Herausforderung wird darin liegen, zwischen der Verhandlungsgruppe der Entwicklungsländer, der „G77 & China", auf transparente, nachvollziehbare und gerechte Weise zu differenzieren (Ott et al. 2004). Doch die letzte Klimakonferenz in Buenos Aires (2004) hat gezeigt, dass zunehmend die besonders vom Klimawandel verwundbaren Staaten des Südens beginnen, ihre Interessen innerhalb der „G 77 & China" zu artikulieren (Ott et al. 2005). Eine breite Vorreiterallianz von Europäischer Union und diesen Entwicklungsländern könnte zum Motor für zukünftige Verhandlungen werden – und dieser kann kaum leistungsstark genug sein, um die anstehenden Herausforderungen offensiver angehen zu können.

Kapitel 3

Die Rolle des Verkehrs bei der Klimabelastung

Die Situation in Europa

Aufgrund der im Kyoto-Protokoll enthaltenen Berichtspflichten liegen mittlerweile für die maßgeblichen Industriestaaten umfangreiche Daten über deren Klimabelastungen vor (über www.unfccc.int). Abbildung 3-1 zeigt die Aufteilung auf große Sektoren für die Europäische Gemeinschaft (EU-15) und Deutschland für die Jahre 1990 und 2002. Einheitliche Bezugsgröße für die sechs im Kyoto-Protokoll erfassten Klimagase ist der Beitrag von Kohlendioxid (CO_2) zum Strahlungshaushalt, die anderen fünf Gase werden in entsprechende Gleichwerte umgerechnet. Entsprechend der Ausgrenzung bei den Verpflichtungen gemäß dem Kyoto-Protokoll werden die Emissionen aus dem internationalen Luft- und Seeverkehr nicht berücksichtigt.

Den Löwenanteil stellen mit 74 bis 82 Prozent die direkten CO_2-Emissionen aus Verbrennungsprozessen dar. Die übrigen Bereiche beinhalten die Emissionen der anderen Klimagase, andere CO_2-Emissionen (aus Verdunstung) und vergleichsweise geringfügige Auf- und Abschläge

Abbildung 3-1:
CO_2-äquivalente Klimagasemissionen der Europäischen Union (EU-15) und Deutschlands 1990 und 2002 nach großen Bereichen
Quelle: UNFCCC nach www.unfccc.int; eigene Berechnungen

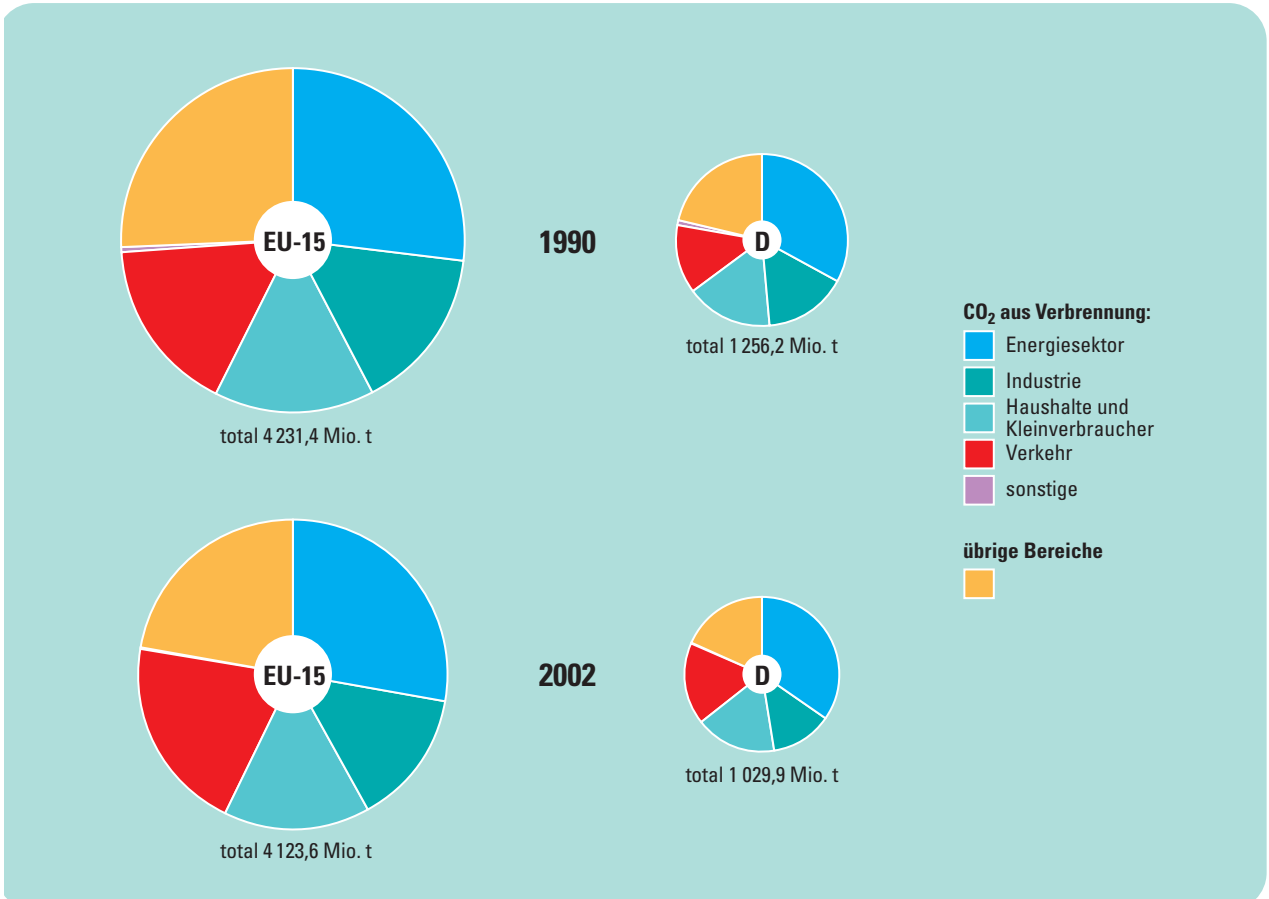


Tabelle 3-1:
CO_2-äquivalente Klimagasemissionen pro Einwohner in der Europäischen Union (EU-15) und in Deutschland 1990 und 2002 nach großen Bereichen in t
Quelle: UNFCCC nach www.unfccc.int; European Commission: Population Statistics, 2004 edition, Luxemburg 2004; eigene Berechnungen

	EU-15		Deutschland	
	1990	2002	1990	2002
1. CO_2 aus Verbrennung:				
Energiesektor	3,133	3,033	5,232	4,328
Industrie	1,792	1,543	2,481	1,602
Haushalte und Kleinverbraucher	1,751	1,667	2,584	2,114
Verkehr	1,916	2,226	2,052	2,140
sonstige	0,056	0,019	0,149	0,024
gesamt (1)	**8,649**	**8,488**	**12,499**	**10,206**
2. übrige Bereiche	**2,985**	**2,424**	**3,379**	**2,287**
Pro-Kopf-Werte gesamt (1 und 2)	**11,634**	**10,912**	**15,878**	**12,493**
Bevölkerung in Mio.	**363,719**	**377,913**	**79,1128**	**82,4403**

zum Strahlungshaushalt aus der Veränderung der Landnutzung. Zu den CO_2-Emissionen aus Verbrennungsprozessen trägt der Energiesektor am meisten bei, vor allem die Kraftwerke, daneben aber auch die Erdölraffinerien. Insofern von diesem Sektor die Energie nicht direkt genutzt wird, sondern in höherwertige und CO_2-freie Energie umgewandelt wird, könnten die zugehörigen CO_2-Emissionen auch den jeweiligen Letztverbrauchern zugeordnet werden, im wesentlichen der Industrie, dem Gewerbe und den privaten Haushalten.

Die direkten CO_2-Emissionen aus dem Verkehrsbereich bilden einen veritablen, jedoch nicht dominierenden Anteil zwischen 13 und 20 Prozent. Da die Energieverbräuche und Emissionen der internationalen Luft- und Seefahrt hierbei ausgeblendet und die Emissionen aus der Stromerzeugung für den Eisenbahnverkehr dem Energiesektor zugerechnet werden, ist es nicht verwunderlich, dass die ausgewiesenen Klimabelastungen des Verkehrs fast ausschließlich dem motorisierten Straßenverkehr zuzuordnen sind. Dieser Eindruck ist allerdings trügerisch, da allein die CO_2-Emissionen aus den internationalen Verkehren zu Luft und zu Wasser Aufschläge von 241,7 Mio. t CO_2 (EU-15, 2002) bzw. von 22,6 Mio. t CO_2 (Deutschland, 2002) ausmachen würden, entsprechend 6,1 (EU-15) bzw. 2.2 (Deutschland) Prozent der einbezogenen Größen; die gesamten Klimalasten aus diesen Verkehrsbereichen liegen noch erheblich höher. Aus diesem Grund wird speziell der Luftverkehr weiter unten noch etwas detaillierter betrachtet. Andererseits können die ausgewiesenen Verkehrsbeiträge, gerade insofern sie fast nur den Straßenverkehr umfassen, doch als bedenklich hoch angesehen werden.

Im Vergleich von 1990 und 2002 ist insgesamt eine Abnahme festzustellen, bei zunehmenden Anteilen der Sektoren Energie und Verkehr. Im Vergleich von Deutschland und der Europäischen Gemeinschaft zeigt sich in Deutschland ein höherer Anteil des Energiesektors und ein geringerer Anteil des Sektors Verkehr und der übrigen Klimalasten außerhalb von CO_2 aus Verbrennungsprozessen.

Ein etwas modifiziertes Bild erhält man bei einer Pro-Kopf-Darstellung der Klimagasemissionen in Tabelle 3-1 (hier bezogen auf die Einwohnerzahl zu Beginn des Bezugsjahres nach European Commission 2004, 39). Hieran wird erkennbar, dass die spezifischen Emissionen in Deutschland höher sind als in der EU-15 insgesamt, jedoch – vor allem vereinigungsbedingt – hier auch stärker zurückgehen als dort; Im Jahr 2002 liegen die Pro-Kopf-Emissionen in Deutschland noch knapp 15 Prozent über dem Wert von EU-15 (knapp 20 Prozent über dem Wert der übrigen 14 Länder).

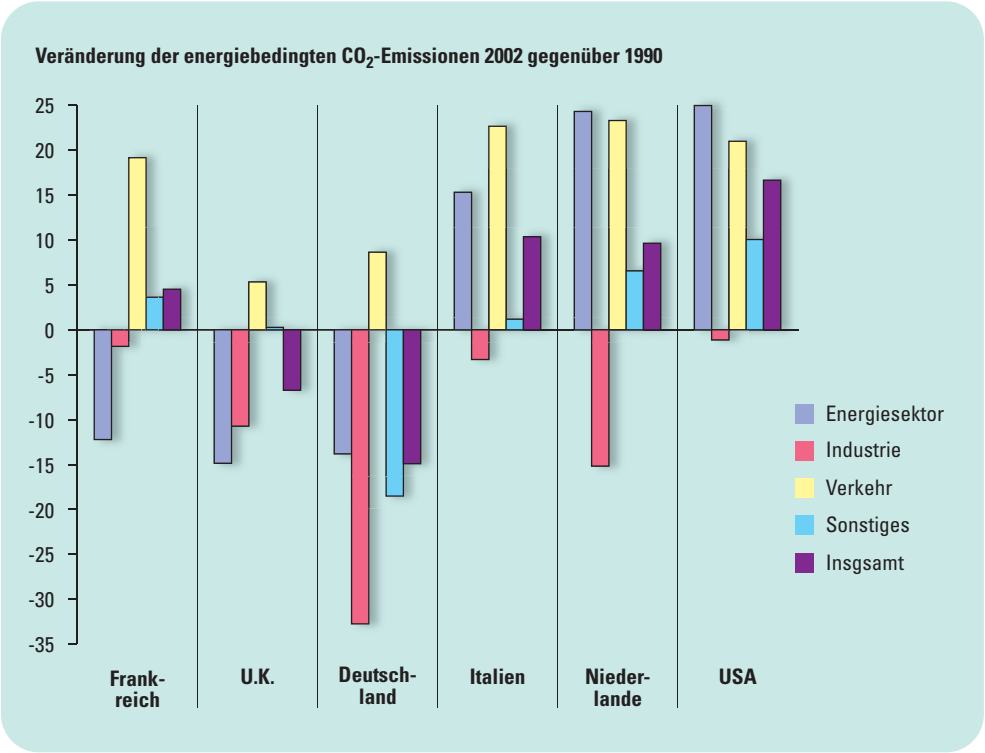


Abbildung 3-2:
Veränderung der energiebedingten CO_2-Emissionen 2002 gegenüber 1990
Quelle: UNFCCC nach www.unfccc.int; eigene Berechnungen

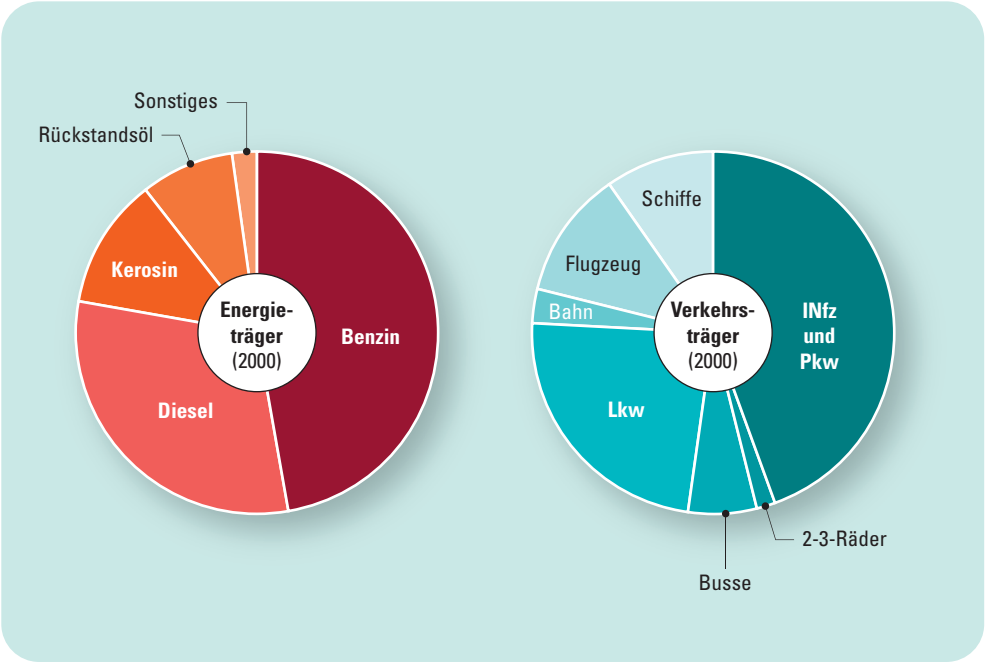
Im Verkehrssektor ergaben sich entgegen der Gesamtentwicklung Zuwächse, die in der übrigen EU stärker ausfielen als in Deutschland; dadurch haben die übrigen EU-Länder (Abgrenzung alte EU, ohne die jüngsten Erweiterungen) mittlerweile Deutschland im Verkehrsbereich sogar in bescheidenem Umfang überholt.

Die problematische Entwicklung im Verkehrsbereich wird in Abbildung 3-2 noch genauer beleuchtet. Für unterschiedliche europäische Länder zeigt sich dabei, dass die Veränderungen im Zeitraum 1990 bis 2002 in den Sektoren Energie, Industrie, Haushalte und Kleinverbraucher durchaus unterschiedlich verlaufen und insgesamt mäßige Ab- bis Zunahmen aufweisen; lediglich im Verkehrssektor ergeben sich einheitlich Belastungserhöhungen in mäßigem bis deutlichem Umfang. Speziell in Deutschland konnten in allen Bereichen, insbesondere in der Industrie, ganz achtbare Emissionsreduktionen in der Gesamtbilanz erzielt werden, während der Verkehrssektor mit seiner Zunahme einen Teil der Erfolge wieder kompensiert hat.

Demgegenüber ist für die zu Vergleichszwecken angeführten USA festzustellen, dass trotz der bereits recht hohen Ausgangsbasis die Emissionen, abgesehen vom Industriesektor, deutlich angestiegen sind, insbesondere auch in dem dort hoch relevanten Verkehrssektor. Zu beachten ist dabei allerdings, dass in den USA der Luftverkehr, da zum Großteil innerstaatlich, in erheblichen Teilen eingeschlossen ist, während er in den europäischen Ländern, da weitgehend grenzüberschreitend, nur zu geringen Anteilen enthalten ist.

Insgesamt ergibt sich, dass bei der gegebenen Entwicklung der Verkehrssektor einer besonderen Betrachtung bedarf, freilich ohne das Gewicht der anderen Bereiche und die dort ablaufenden Entwicklungen zu vernachlässigen.

Abbildung 3-3:
Weltweiter Energieverbrauch 2000 nach Energie- und Verkehrsträgern
Quelle: IEA (2004)



Globale Emissionen des Verkehrs im Trend bis 2050

Im Rahmen des Sustainable Mobility Project (SMP) des World Business Council for Sustainable Development wurde seitens der Internationalen Energieagentur (IEA) ein einfaches Modell erstellt, um damit die globale Entwicklung des Verkehrs und seiner Begleiterscheinungen im Trend bis 2050 abzuschätzen (Fulton, Eads 2004). Die Modellergebnisse gingen in den Endbericht des Projektes „Mobility 2030: Meeting the Challenges to Sustainability" ein (WBCSD 2004). Dieses Modell enthält weder ökonomische Modellelemente wie Preiselastizitäten noch mögliche Kostenänderungen etwa beim Rohöl, sondern basiert allein auf dem so genannten ASIF-Ansatz. Dieser Ansatz fasst die für Wirkungen des Verkehrs wie etwa die CO_2-Emissionen relevanten Einflussfaktoren zusammen. Diese sind:

- Aktivität (Personen- und Güterverkehr in Pkm und tkm),
- Struktur (Anteile der Verkehrsträger),
- Intensität (spezifischer Energieverbrauch),
- Fuel type (Anteile und CO_2-Intensität der Treibstoffe).

Das Modell kann zur Ursachenanalyse, für Projektionen und zum Aufzeigen von Handlungsmöglichkeiten dienen.

Gemäß den IEA-Statistiken entfiel der weltweite Energieverbrauch des Verkehrs im Jahr 2000 auf die in Abbildung 3-3 dargestellten Treibstoffe, Verkehrsträger und Fahrzeuge. Allein drei Viertel des gesamten Treibstoffverbrauches im Verkehr entfielen auf Benzin und Diesel, wobei darüber hinaus noch das im Luftverkehr überwiegend verwendete Kerosin und Schwer- oder Rückstandsöl in der Seeschifffahrt nennenswerte Anteile ausmachten. Zugleich wurde der Energieverbrauch des Verkehrs fahrzeugseitig von den zu einer Kategorie zusammengefassten PKW und leichten Nutzfahrzeugen (lNfz) und den schweren Nutzfahrzeugen (LKW) dominiert (etwa zwei Drittel), wohingegen über den Luftverkehr und die Seeschifffahrt hinaus die sonstigen Verkehrsträger und Fahrzeuge weit gehend unbedeutend waren.

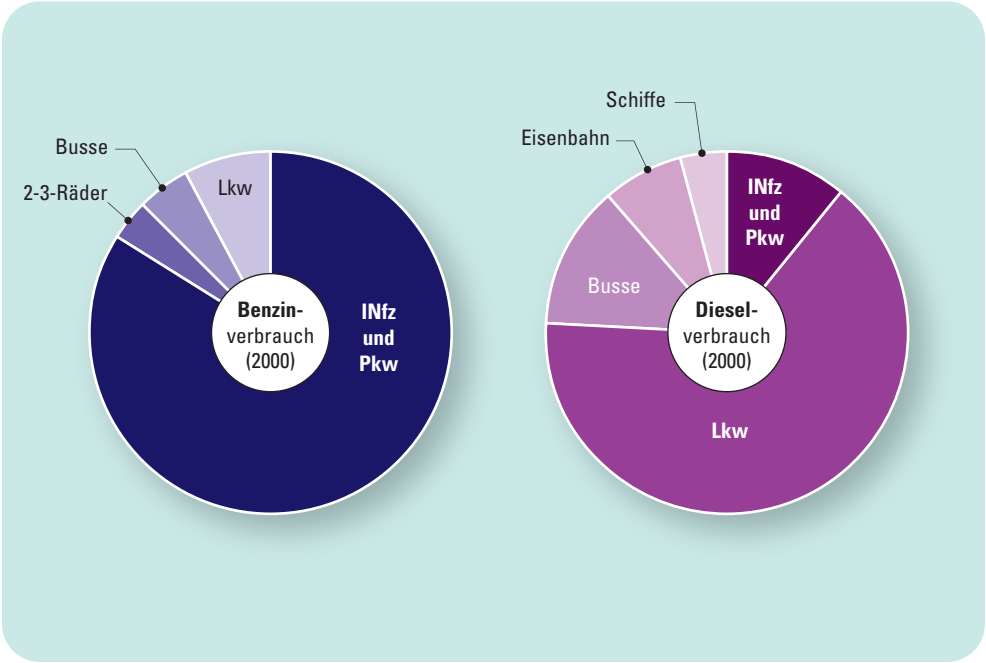


Abbildung 3-4:
Globaler Kraftstoffverbrauch nach Verkehrsträgern
Quelle: IEA (2004)

Hinsichtlich der im Verkehr überwiegend eingesetzten Benzin- und Dieselkraftstoffe ergibt sich in globaler Betrachtung ein gegensätzliches Bild (siehe Abbildung 3-4). Der globale Verbrauch an Vergaserkraftstoffen ging zu über drei Viertel auf den Einsatz von PKW und leichten Nutzfahrzeugen zurück, während beim Diesel über zwei Drittel des Verbrauches auf LKW entfielen.

Im Trend geht die IEA bis 2050 auf der Grundlage ihres Modells von einem weiteren erheblichen globalen Zuwachs des Energieverbrauches im Verkehr und der daraus resultierenden CO_2-Emissionen aus. Bei den Treibstoffen konzentriert sich dieser auf Vergaserkraftstoffe, Diesel und Kerosin (Abbildung 3-5).

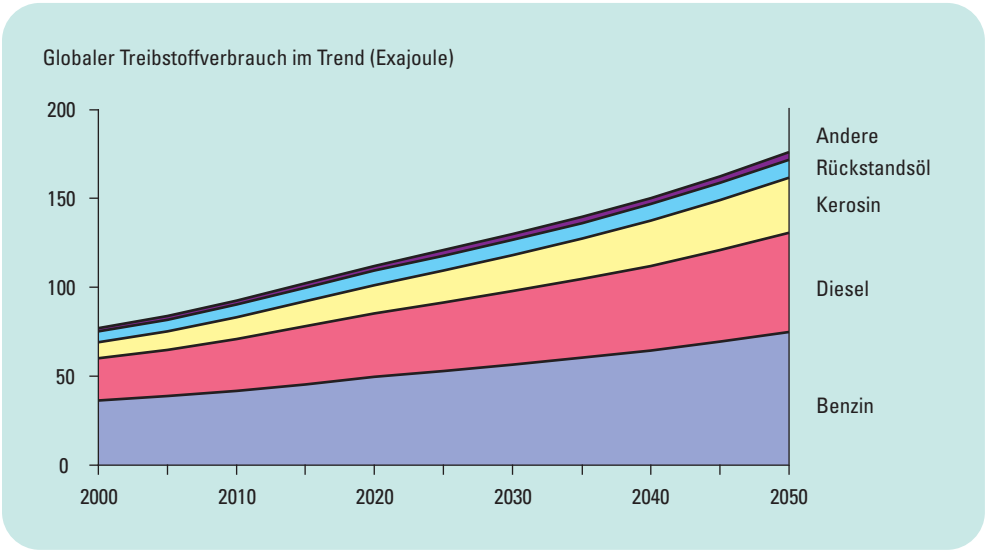
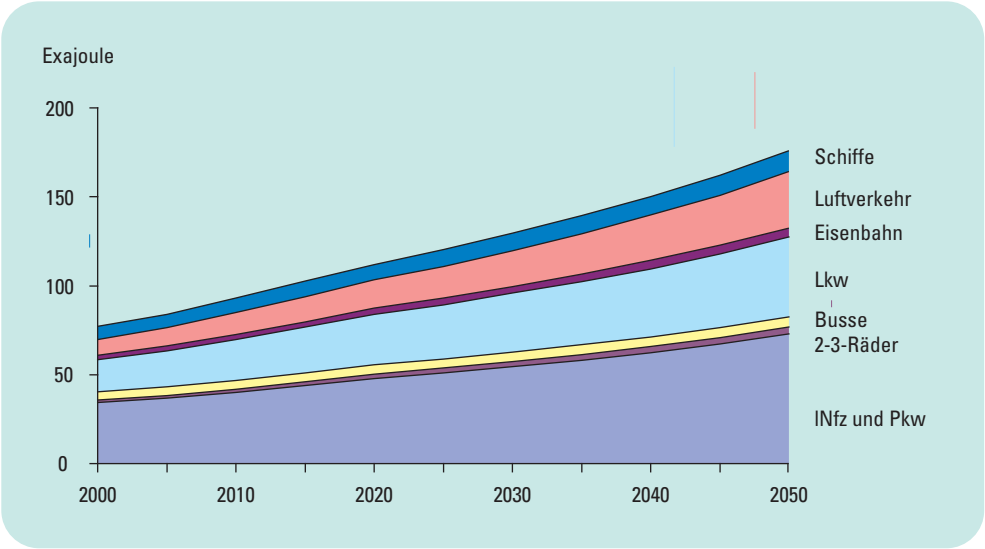


Abbildung 3-5:
Globaler Treibstoffverbrauch im Trend (Exajoule).
Quelle: IEA (2004)

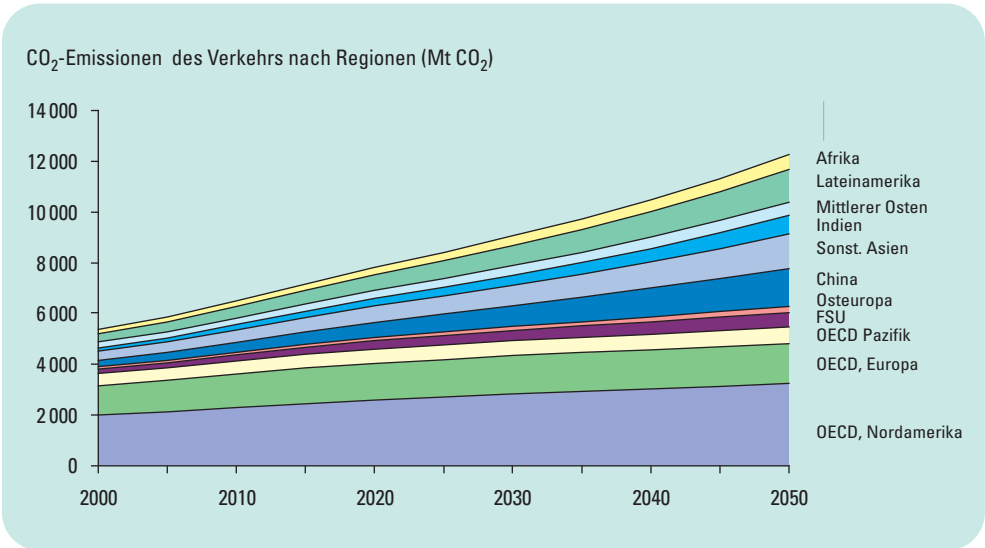
Abbildung 3-6:
Treibstoffverbrauch nach Verkehrsmitteln (Exajoule)
Quelle: IEA (2004)



Der größte Zuwachs entsteht durch die PKW und leichten Nutzfahrzeuge, die im Betrachtungszeitraum fast 40 Prozent der gesamten Zunahme des Energieverbrauches des Verkehrs um 99 Exajoule auf sich vereint, vgl. Abbildung 3-6. Obwohl der Luftverkehr die höchsten Zuwachsraten aufweist und seinen Treibstoffverbrauch mehr als verdreifacht, ist der absolute Verbrauchsanstieg mit 22,6 Exajoule geringer als die 38,5 Exajoule Verbrauchszunahme der PKW und leichten Nutzfahrzeuge. Deutliche Zuwächse verzeichnen zudem die schweren Nutzfahrzeuge mit 26,8 Exajoule.

In räumlicher Gliederung (Abbildung 3-7) fällt auf, dass für die OECD-Länder ab 2020 mit relativ kleinen Zunahmen bei den CO_2-Emissionen des Verkehrs gerechnet wird, wohingegen die Zuwächse vor allem in den Schwellen- und Entwicklungsländern stattfinden sollen. Aufgrund der vergleichsweise geringen Bevölkerung und der schwachen Bevölkerungsentwicklung werden danach jedoch die OECD-Länder weiterhin vielfach höhere Pro-Kopf-Verbräuche aufweisen als die übrige Welt.

Abbildung 3-7:
CO_2-Emissionen des Verkehrs nach Regionen (Mt CO_2)
Quelle: IEA (2004)



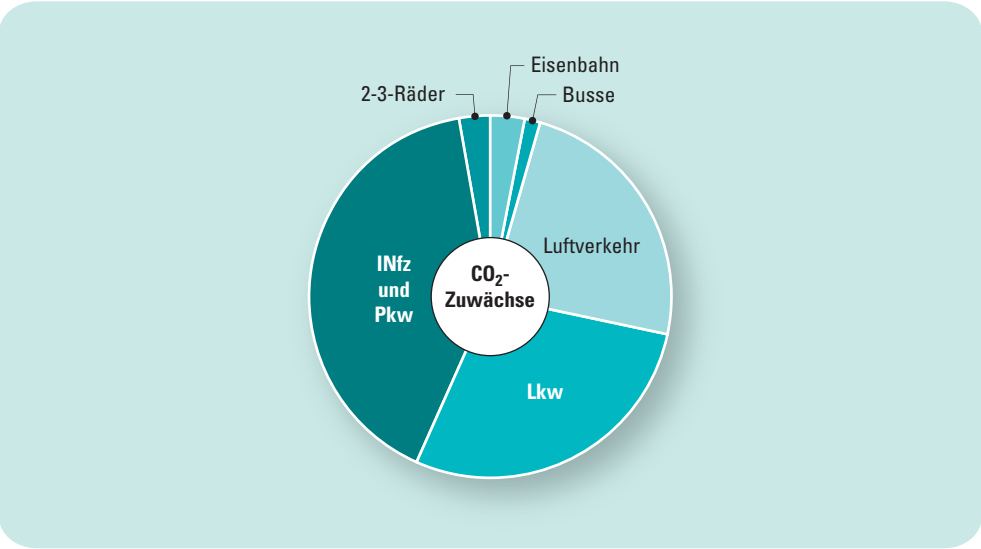


Abbildung 3-8:
Anteile der Verkehrsträger an den Zuwächsen der CO_2-Emissionen bis 2050
Quelle: IEA (2004)

Wie für den Energieverbrauch des Verkehrs wird seitens der IEA erwartet, dass die CO_2-Emissionen des Treibstoffverbrauchs um einen Faktor 2,3 von 5,4 Gigatonnen in 2000 auf 12,3 Gigatonnen in 2050 zunehmen. Im Jahr 2002 betrugen die globalen Energie bedingten CO_2-Emissionen 24,5 Gigatonnen (IEA 2004). Die weltweiten CO_2-Emissionen des Verkehrs würden also gemäß dieser Projektion in 2050 etwa die Hälfte sämtlicher Energie bedingten CO_2-Emissionen des Jahres 2002 ausmachen. Die Abbildung 3-8 zeigt, auf welche Verkehrsträger die größten Anteile an den gesamten Zuwächsen entfallen sollen.

Kapitel 4
Der Verkehr in Deutschland und seine Klimabedeutung

Übersicht über die klimarelevanten Verkehrsemissionen in Deutschland

Im Auftrag des Bundeswirtschaftsministeriums wurde kürzlich der Energiereport IV (EWI/Prognos 2005) abgeschlossen, der die Entwicklung der Energiemärkte bis 2030 beschreibt und für die nächste Zeit in großem Umfang als maßstabsbildend eingeschätzt werden kann. Die Darstellung des Verkehrsbereichs in dieser Untersuchung[7] kann hier – mit einer Ausnahme – zugrundegelegt werden. Bevor auf den PKW-Verkehr genauer eingegangen wird, soll zunächst eine Übersichtsbetrachtung des Gesamtverkehrs erfolgen.

Die Untersuchung beschreibt insgesamt einen mittleren, positiv-plausiblen Pfad. Die Gesamtentwicklung ist u.a. geprägt durch eine mäßige Bevölkerungsabnahme insbesondere nach 2020 auf 79,3 Mio. im Jahr 2030 bei einer gleichzeitig noch immer gering zunehmenden Zahl von Haushalten (Maximum 2020 bei 40 Mio., in 2030 dann 39,7 Mio.); das Bruttoinlandsprodukt wächst jahresdurchschnittlich um 1,4 Prozent, insgesamt um die Hälfte von 2000 bis 2030.

Im Verkehr setzen sich die laufenden Entwicklungstrends weiter fort, insbesondere kommt es zu einer weiteren Ausweitung der PKW-Flotte, während die durchschnittlichen Jahresfahrleistungen weiter sinken; im Straßengüterverkehr steigen Fahrzeuganzahl, Fahr- und Verkehrsleistung weiter an; insgesamt finden Verkehrsverlagerungen zwischen den Verkehrsträgern nur in geringem Umfang statt, während generell die Energieeffizienz gesteigert wird. Im Straßenverkehr finden zunehmend Biokraftstoffe und Gas als Antriebsenergie ihre Märkte, wenngleich diese selbst im Jahr 2030 nur etwa 10 Prozent ausmachen. Deutlicher wird im PKW-Sektor die Verschiebung von Otto- zu Dieselantrieb eingeschätzt. Wasserstoff und Brennstoffzellenantriebe spielen 2030 eine Nischenrolle, während herkömmliche Elektro-PKW noch weit darunter auf dem jetzigen irrelevanten Niveau stagnieren. Selbstverständlich wären zu den einzelnen Entwicklungen auch geringfügig abweichende Einschätzungen nicht unplausibel, insgesamt jedoch ergibt sich ein recht stimmiges Bild.

Etwas anders sieht es beim Luftverkehr aus. Dort werden – wie auch in einigen anderen Untersuchungen – die Inlandsmarktabgabe nach der Abgrenzung der Energiebilanz und der inländische Luftverkehr nach der üblichen verkehrsstatistischen Abgrenzung (ohne Überflüge) aufeinander bezogen, was ein reichlich schiefes Bild ergibt: Der Kerosinabsatz im Inland umfasst auch die Auslandsabschnitte der abgehenden Flüge, die in der Territorialabgrenzung nicht enthalten sind; umgekehrt beinhaltet der inländische Verkehr nach verkehrsstatistischer Abgrenzung auch die Inlandsabschnitte des hereinkommenden grenzüberschreitenden Verkehrs, dessen Treibstoffverbrauch naturgemäß in aller Regel nicht durch inländische Betankung gedeckt wird. Die nicht zueinander passenden Abgrenzungen führen zu einer Ableitung von spezifischen Energieverbrauchswerten, die auf etwa dreifacher Höhe der tatsächlichen Werte liegen. In der vorliegenden Darstellung wird daher – den Energiewerten der Energiebilanz weitgehend entsprechend – der inländische Luftverkehr und der ins Ausland abgehende (bis zur nächsten Landung) berücksichtigt, für den im Personenverkehr auch gut gesicherte Daten vorliegen. Neben der unterschiedlichen Abgrenzung wird – insbesondere im Passagierflug – auch eine

7 Herrn Schlesinger von der Prognos AG danken wir herzlich für die Überlassung des Verkehrskapitels dieser Untersuchung schon vor dem Erscheinen der Buchpublikation des Gesamtreports.

	1995	2000	2002	2010	2015	2020	2025	2030
MIV	836	855	884	905	892	861	850	831
Eisenbahn	74	75	71	77	81	83	84	85
ÖSPV	78	77	76	77	78	78	78	77
Luft	107	142	135	200	255	325	415	530
Insgesamt	**1095**	**1150**	**1166**	**1259**	**1305**	**1347**	**1427**	**1523**
zum Vergleich:								
Luft (n. EWI/Prognos)	33	43	41	51	59	67	67	67
Insg. (n. EWI/Prognos)	1021	1051	1072	1110	1109	1089	1079	1060

Tabelle 4-1:
Personenverkehrsleistungen 1995 bis 2030 in Mrd. Pkm
Quelle: EWI/Prognos 2005, eigene Berechnungen

stärkere Expansion hinterlegt, als bei EWI/Prognos angenommen: Nachdem der Einbruch der Vorjahre bereits 2004 weitgehend aufgeholt wurde, zeigen die neuesten Ergebnisse für das 1. Quartal 2005 in der Passage eine weitere Erhöhung um 6 Prozent gegenüber dem Vorjahr (Inlandsverkehr +3 Prozent, Auslandsverkehr +10 Prozent, vgl. Statistisches Bundesamt 2005). Der im Energiereport IV für das Jahr 2010 vorgesehene Wert wird bei Ansatz dieser Zuwachsraten im gesamten laufenden Jahr bereits in 2005 erreicht; die Unterschätzung des laufenden Expansionstrends im Luftverkehr liegt somit auf der Hand. Orientiert an den Perspektiven der EU (Group of Personalities 2001) und den aktuellen Prognosen von Airbus (2004) und Boeing (2004), wird deshalb hier alternativ ein Wachstumspfad von jährlich 5 Prozent angesetzt; wichtiger im vorliegenden Zusammenhang ist die jährliche deutliche Effizienzverbesserung von etwa 2 Prozent, die dazu führt, dass der jährliche Energieverbrauchsanstieg nur 3 Prozent beträgt. Denkbar ist, dass sich sowohl die Verkehrszunahme als auch die Effizienzgewinne gegen Ende des Betrachtungsraumes abschwächen; in diesem Falle würde sich die unterstellte Verbrauchsentwicklung nur wenig ändern. Für ein etwas differenzierteres Verständnis des Luftverkehrs sind in einem ergänzenden Kasten weitere Ausführungen vorgesehen.

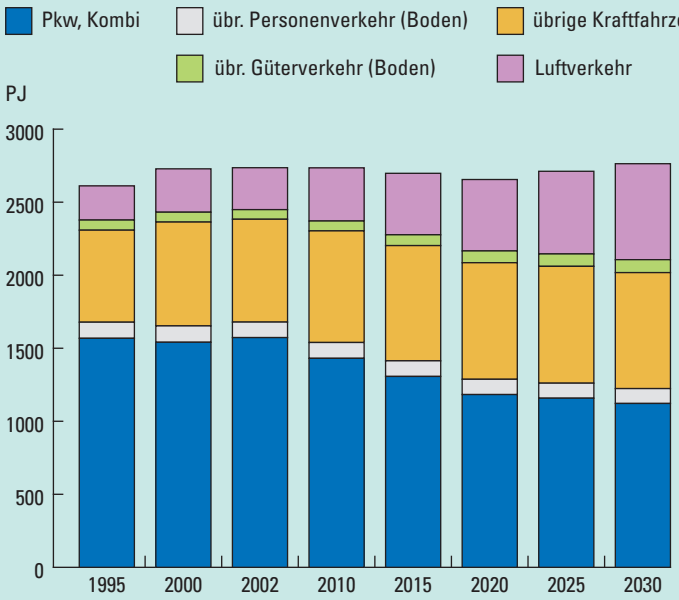
Eine Übersicht über die Entwicklungen im Personenverkehr gibt Tabelle 4-1. Zu erkennen ist, dass die Verkehrsleistungen im motorisierten Individualverkehr (MIV) und im öffentlichen Straßenpersonenverkehr (ÖSPV) von 1995 bis 2030 stagnieren, während – mit einem gewissen Optimismus – die Verkehrsleistungen der Eisenbahn als steigend angenommen werden. Der maßgebliche Zuwachs jedoch erfolgt durch die Ausweitung des Luftverkehrs, der sich zwischen 2005 und 2030 etwa verdreifacht.

Im Güterverkehr, Tabelle 4-2, ergeben sich dagegen generell Zunahmen, die in tonnenkilometrischer Betrachtung vor allem auf den Straßengüterverkehr entfallen; die relativen Zuwächse werden allerdings bei der Eisenbahn noch höher eingeschätzt. Im Luftverkehr ist bei der Fracht (einschließlich Post) mit ähnlichen Zuwachsraten zu rechnen wie bei der Passage, insgesamt etwa einer Verdreifachung von 2005 bis 2030.

	1995	2000	2002	2010	2015	2020	2025	2030
LKW	282	346	355	440	484	515	541	560
Eisenbahn	71	78	76	85	100	115	125	134
Binnenschiff	64	66	64	72	77	82	86	89
Luft	0,5	0,8	0,8	1,2	1,5	1,7	2,0	2,2
Insgesamt	**417**	**491**	**496**	**598**	**663**	**715**	**754**	**785**

Tabelle 4-2:
Güterverkehrsleistungen 1995 bis 2030 in Mrd. tkm
Quelle: EWI/Prognos 2005

Abbildung 4-1:
Energieverbrauch des Verkehrs, PJ
Quelle: EWI/Prognos 2005, eigene Berechnungen



Der Energieverbrauch im Verkehr wird sich bei dieser Entwicklung im Betrachtungszeitraum nur verhältnismäßig wenig ändern, vgl. Abbildung 4-1; anders als im Energiereport IV wird bei modifizierten Annahmen zum Luftverkehr nicht eine geringe Abnahme, sondern eine geringe Zunahme bis 2030 erwartet werden können. Deutlich jedoch ist die Anteilsverschiebung zwischen den einzelnen Verkehrsbereichen. Weiterhin sind es drei Bereiche, die den gesamten Energieverbrauch bestimmen: der Personenverkehr mit Automobilen, der Güterverkehr auf der Straße und der Luftverkehr. Obwohl für die übrigen Bodenverkehrsarten verhältnismäßig positive Annahmen zugrundegelegt wurden, kommen sie im Energieverbrauch über eine Größenordnung von jeweils etwa 10 Prozent beim (bodengebundenen) Personen- und Güterverkehr nicht hinaus. Von den drei maßgeblichen Bereichen verbraucht der PKW-Verkehr trotz signifikanter Verbrauchsabnahmen noch immer am meisten; der LKW-Verkehr nähert sich jedoch stark an, weil dort in der Gesamtentwicklung bis 2030 noch eine Erhöhung des Energieverbrauchs zu erwarten ist. Die entscheidende Anteilsverschiebung verläuft allerdings zugunsten des Luftverkehrs (Passage und Fracht), der sich in seinem Energieverbrauch schrittweise den dominanten Bodenverkehrsarten mit PKW und mit LKW annähert.

Deutlich unterschiedlich stellt sich die Entwicklung der Belastung mit Klimagasen dar (Abbildung 4-2). Zwar ergibt sich bei den CO_2-Emissionen allein eine geringfügige Abnahme bis 2030. Dies ist das Resultat einer zunehmenden Verwendung von Biokraftstoffen und (vergleichsweise CO_2-armem) Gas bei gleichzeitig leichter Zunahme des Stromeinsatzes und geringen Mengen von Wasserstoff (dessen Produktion hier auf Erdgasbasis unterstellt wird); bei Elektrizität und bei Wasserstoff werden für die vorliegende verkehrssektorale Betrachtung auch die CO_2-Emissionen der Herstellung dieser Energieträger einbezogen, um eine faire Vergleichsbasis zwischen den unterschiedlichen Antriebsenergien zu stützen. Bei einer Gesamtbetrachtung wie dem Energiereport IV werden diese Emissionen dem Energiesektor zugeordnet, deswegen ist eine unmittelbare Vergleichbarkeit mit den dortigen Ergebnissen nicht gegeben.

Die Entwicklung der verkehrsbedingten Klimabelastung insgesamt wird jedoch maßgeblich über die Klimawirkungen des Luftverkehrs beeinflusst, die über die der CO_2-Emissionen hinausgehen. Wie in dem Kasten 1 zu Luftverkehr (Seiten 38, 39) näher erläutert, werden die gesamten Klimalasten des Luftverkehrs gegenwärtig ohne abschließendes Urteil bei dem Zwei- bis Vierfachen der CO_2-Emissionen allein eingeschätzt und sind entsprechend mit dieser

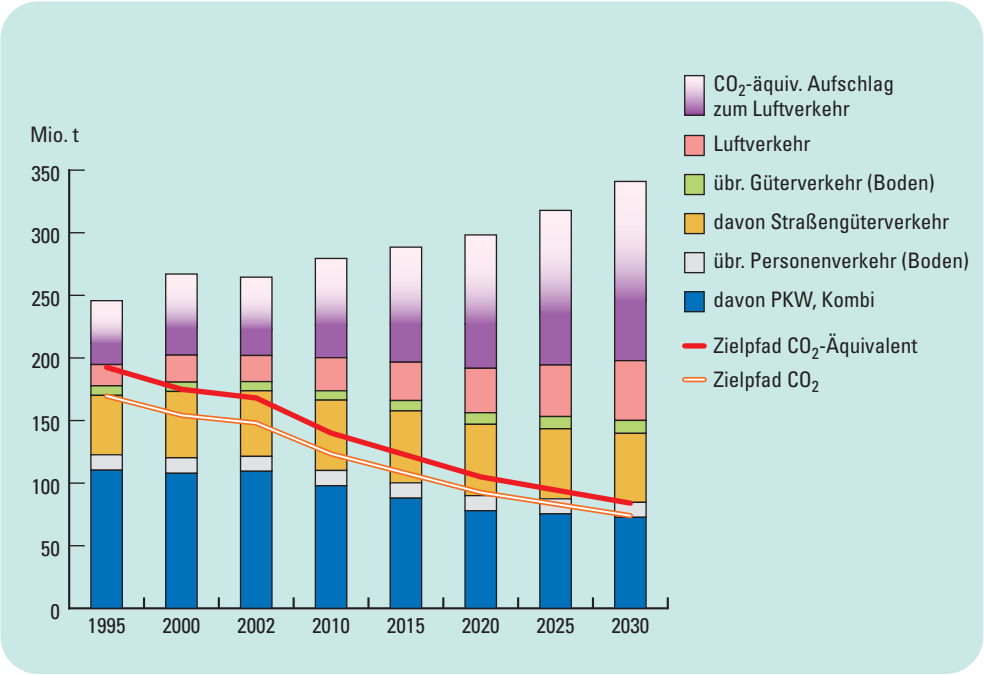


Abbildung 4-2:
CO_2(äquivalente)-Emissionen des Verkehrs, Mio t
Quelle: EWI/Prognos 2005, eigene Berechnungen

Bandbreite hier aufgenommen. Daraus ergibt sich für die Zukunft in jedem Falle eine deutliche Erhöhung der verkehrsbedingten Klimalasten, auch wenn der Umfang dieser Erhöhung nicht genau bestimmbar ist. Auch in den anderen Verkehrsbereichen gibt es Klimalasten neben den CO_2-Emissionen, wegen deren ganz erheblich geringerer Bedeutung im Vergleich zu den Verhältnissen beim Luftverkehr wird jedoch darauf nicht eingegangen.

Dieser Entwicklung gegenübergestellt werden Zielpfade für die Belastungsentwicklung, die den Vorgaben der Klima-Enquete-Kommissionen des Deutschen Bundestages entsprechen. Gegenüber dem Startwert von 1990 wurden hier für 2005 eine Absenkung um 25 Prozent, für 2020 um 50 Prozent sowie für 2030 entsprechend dem Zielwert für 2050 (–80 Prozent) eine Absenkung um 60 Prozent markiert. Diese Zielpfade wurden seinerzeit mit großer Einigkeit als angemessen erachtet, und es gibt keine Hinweise, dass die fachliche Begründung dafür substantiell zu revidieren wäre. Auf eine sektorale Zuweisung von Zielbeiträgen wurde jedoch verzichtet.

Die dramatisch steigende Differenz zwischen den Zielpfaden und den realen Entwicklungen ist daher nur beschränkt als definitive Zielverfehlung zu interpretieren: Die Differenz gibt vielmehr an, in welchem Umfang Handlungsbedarf besteht, sei es, dass die verkehrsbedingten Belastungen selbst reduziert werden, oder sei es, dass in anderen Verursacherbereichen durch überproportionale Absenkungen der Klimalasten Unterdeckungen der Klimaziele im Verkehr aufgefangen werden. Allerdings macht es der schiere Umfang der dargestellten Differenz zunehmend unwahrscheinlich, dass in anderen Bereichen zureichende Entlastungen aktiviert werden.

Kasten 1: **Luftverkehr**

Besonderheiten des Luftverkehrs

Die Behandlung des Luftverkehrs im Rahmen von Klima- und Umweltszenarien ist mit einer Reihe besonderer Probleme behaftet. Diese behindern bislang eine ausgewogene Berücksichtigung des Luftverkehrs bei den Maßnahmen.

Abgrenzung des Luftverkehrs

Die Berichterstattung und Absenkungsstrategien für die Klimagase des Luftverkehrs im Rahmen des Kyoto-Prozesses beschränken sich auf den Inlandsluftverkehr. Damit fällt für Europa und insbesondere auch für Deutschland der weit überwiegende Teil des Luftverkehrs und seiner Belastungen aus der Betrachtung heraus. Eine solche Beschränkung war vor einigen Jahrzehnten noch ohne Belang, da der Luftverkehr damals nur eine Randgröße darstellte. Schon jetzt aber – und erst recht in der Zukunft – führt eine derart verkürzte Betrachtung zu einem ausgesprochen schiefen Bild.

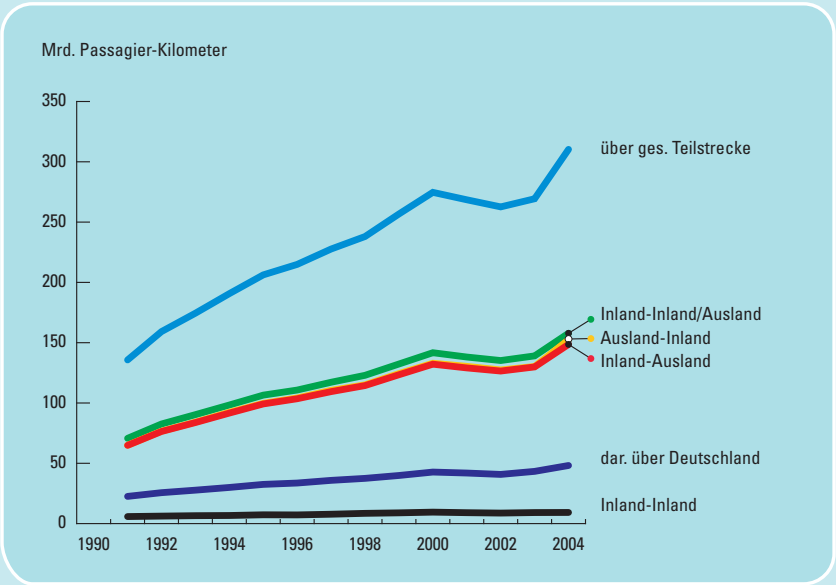
Die Grafik (Abbildung 4-3) zeigt die Entwicklung der Luftverkehrsleistung (Passagier-Kilometer) im Zusammenhang mit deutschen Flughäfen in unterschiedlichen Abgrenzungen nach Angaben der Bundesstatistik (Werte für 2004 tw. geschätzt). Die in den Klimavereinbarungen berücksichtigten Inlandsluftverkehre stellen mit derzeit rd. 10 Mrd. Passagier-Kilometer nur einen unwesentlichen Teil des gesamten Luftverkehrs dar. Der in Verkehrsstatistiken häufig berichtete Umfang des Luftverkehrs über deutschem Territorium in Verbindung mit deutschen Flughäfen macht mit etwa 50 Mrd. Passagier-Kilometer schon erheblich mehr aus, beinhaltet jedoch auch nur einen geringen Teil der grenzüberschreitenden Luftverkehrsleistung von jeweils rd. 150 Mrd. Passagier-Kilometer sowohl im ausgehenden wie auch im einkommenden Luftverkehr. Die in der Energiebilanz erfassten Betankungsmengen decken ziemlich genau den gesamten abgehenden Verkehr von deutschen Flughäfen ab, also den Inlandsverkehr und den ausgehenden grenzüberschreitenden Luftverkehr; darauf entfallen etwa 160 Mrd. Passagier-Kilometer. Der gesamte Luftverkehr in Verbindung mit deutschen Flughäfen beträgt demgegenüber über 300 Mrd. Passagier-Kilometer. Offensichtlich spielt der Luftverkehr – gemessen an der Verkehrsleistung – auch im Vergleich mit dem PKW-Verkehr eine nennenswerte Rolle. Die derzeit durch die vergleichsweise geringe Häufigkeit des Luftverkehrs (je Einwohner im Durchschnitt gut eine halbe Flugreise pro Jahr) und die eingeschränkte Berichterstattung begründete andere Einschätzung ist daher korrekturbedürftig.

Bewertung der Klimawirkung des Luftverkehrs

Nach erheblichen Absenkungen in den vergangenen Jahrzehnten liegt der Energieverbrauch je Passagier-Kilometer im Luftverkehr auf einem ähnlichen Niveau wie im PKW-Verkehr je Personen-Kilometer – bei im Übrigen erheblichen Spannweiten in beiden Bereichen; aufgrund der Verwendung recht ähnlicher Energieträger bewegen sich auch die CO_2-Emissionen in ähnlicher Größe.

Davon abweichend müssen die spezifischen Klimalasten des Luftverkehrs als deutlich höher eingeschätzt werden. Dies liegt insbesondere daran, dass die neben CO_2 emittierten Mengen von Wasser und Stickoxiden im Luftverkehr eine signifikante Klimawirkung entfalten, während die Emission spezifisch ähnlicher Mengen von Wasser und Stickoxiden aus den Automobilen eine vergleichsweise vernachlässigbare Wirkung aufweist. Unglücklicherweise reicht der gegenwärtige Kenntnisstand der sehr komplexen atmosphärenchemischen und -physikalischen Prozesse im Zusammenhang mit den Wasser- und Stickoxidemissionen des Luftverkehrs nicht aus, die Klimawirkung in dem allgemein üblichen Index, dem Global Warming Potenzial (GWP), relativ zu CO_2 auszudrücken. Vorläufig stehen nur Angaben zur unmittelbaren Strahlungswirkung (entsprechend dem Radiation Forcing Index, RFI) zur Verfügung; danach ist der Luftverkehr etwa zwei- bis viermal so klimabelastend (rechnerischer Wert: 2,7), wie es allein der CO_2-Emission entsprechen würde (IPCC 1999), vgl. Abbildung 4-4. Ungeachtet der zu erwartenden Modifikationen und Präzisierungen im Rahmen der weiteren Erforschung wird man deswegen der Klimabelastung durch den Luftverkehr nicht gerecht, wenn man sich nur auf die Betrachtung von CO_2 beschränkt und die Wasser- und Stickoxid-Emissionen mit ihrer Klimawirkung außer Acht lässt. Genau dies jedoch wird in der Berichterstattung und bei den Absenkungsstrategien im Rahmen des Kyoto-Prozesses betrieben. Damit wird dort der Luftverkehr sowohl in Bezug auf den berücksichtigten Umfang des Verkehrs selbst als auch in Bezug auf die berücksichtigten Klimawirkungen dieses Verkehrs nur sehr eingeschränkt aufgenommen.

Abbildung 4-3:
Verkehrsleistungen im deutschen Luftverkehr
Quelle: Statistisches Bundesamt: FS 8, R 6.1, 2003 und 2004; FS 8 R 6.2, 2004; eigene Berechnungen; 2004 tw. geschätzt



Künftige Entwicklung im Luftverkehr

Anders als der PKW-Verkehr, der sich in Deutschland bereits einigermaßen in der Sättigungsphase befindet, weist der Luftverkehr noch einen deutlichen Wachstumstrend auf. Selbst gegenüber dem LKW-Verkehr, der als deutlich zunehmend empfunden wird, bewegen sich die Wachstumspotenziale des Luftverkehrs in anderen Größen, und auch zwischenzeitliche Einbrüche wie in den letzten Jahren ändern an der generellen Wachstumsperspektive wenig.

Weltweite regionalisierte Prognosen des Luftverkehrs werden in der Regel jährlich von den großen Flugzeugherstellern Boeing („Current Market Outlook") und Airbus („Global Market Forecast") mit einer Reichweite von zwanzig Jahren bereitgestellt. Über die Erstellungsjahre der Prognosen hinweg und untereinander recht einheitlich wurden dort jährliche Zuwachsraten bei den Passagier-Kilometer in Höhe von etwa 5 Prozent prognostiziert. Von dem – aktuell durch 9/11, SARS und den Irakkrieg geschwächten – Ausgangspunkt 2003 aus werden die durchschnittlichen Wachstumsraten bis 2023 global mit 5,2 Prozent (Boeing) bzw. 5,3 Prozent (Airbus) pro Jahr angegeben; die Anzahl der Passagier-Kilometer nimmt in dieser Zeit entsprechend von etwa 3,3 auf 9,0 Bill. Passagier-Kilometer zu. Qualitativ einheitlich werden auch die drei maßgeblichen Verkehrsregionen in ihren Perspektiven angesetzt: Nordamerika und seine Verbindungen werden vergleichsweise etwas schwächer zunehmend eingeschätzt, Europa und seine Verbindungen ziemlich durchschnittlich und der durch Asien/Pazifik geprägte Rest mit seinen Verbindungen als überproportional wachsend. Im Detail ergeben sich allerdings durchaus Unterschiede, wobei jeder Hersteller seinen Heimatmarkt und seine (künftig erwartete) Marktdomäne besonders positiv beschreibt; bei Boeing sind dies Nordamerika, Direktverbindungen und Standardrumpf-Flugzeuge, bei Airbus sind dies Europa, Hub-and-Spoke-Netze und Großflugzeuge.

Aufgrund der selbst unter diesen Wachstumsannahmen noch geringen Zahl von Flügen pro Kopf und Jahr sind auch über die aktuell betrachteten Prognosehorizonte hinaus deutliche weitere Steigerungen zu erwarten. Nach einer Erhöhung auf das Dreifache bis 2025 (entsprechend dann knapp zwei Flugreisen je Einwohner und Jahr) könnte für Deutschland bis 2050 eine weitere Verdoppelung oder Verdreifachung denkbar sein. Auch der Umfang dieser Steigerungspotenziale kann leicht übersehen werden.

Ergebnis

Unter Klimagesichtspunkten ist einem Land zumindest der Luftverkehr entsprechend der dortigen Betankungsmenge zuzuordnen (Energiebilanzabgrenzung); in dieser Abgrenzung beträgt der Deutschland zuzurechnende Luftverkehr etwa 160 Mrd. Passagier-Kilometer. Bis 2025 kann eine Ausweitung auf etwa 400 bis 500 Mrd. Passagier-Kilometer erwartet werden, bis 2050 eine weitere Erhöhung auf etwa 900 bis 1 300 Mrd. Passagier-Kilometer. Für die – hier wegen ihrer geringeren Bedeutung nicht einzeln dargestellte – Luftfracht werden allgemein leicht höhere Expansionsraten angesetzt als in der Passage.

Der Energieverbrauch des Deutschland zuzurechnenden Luftverkehrs (in der Abgrenzung der Energiebilanz) beträgt derzeit etwa 7 Mio. t. Aufgrund der Erhöhung der Energieeffizienz um etwa 1 bis 2 Prozent jährlich wird die Verbrauchssteigerung geringer ausfallen als das Verkehrswachstum; bis 2025 ist allerdings trotzdem mit einer Verdoppelung auf dann etwa 14 Mio. t zu rechnen. Aufgrund der weiteren Ausweitung des Luftverkehrs könnte bis 2050 dann ein Jahresverbrauch von etwa 20 bis 30 Mio. t erreicht werden.

Die mit dem Luftverkehr verbundenen Klimabelastungen gehen weit über die CO_2-Emissionen aus der Kerosinverbrennung hinaus, ist aber noch nicht abschließend bestimmbar. Vorläufig könnte man die Mehrwirkung zurückhaltend durch eine doppelte Gewichtung des Flugtreibstoffs gegenüber den Bodentreibstoffen abbilden, wie bereits früher vorgeschlagen (Schallaböck 1993) und mittlerweile u.a. auch vom MIT vertreten. Der Luftverkehr als klimabelastender Teilsektor des Verkehrs und seine Entwicklung gewinnen dadurch weiter an Bedeutung und erfordern entsprechend auch höhere Beachtung. Selbstverständlich wird man den Luftverkehr künftig in ein ernsthaftes Klimagas-Management vollständig einbeziehen müssen – d.h. in vollem Umfang des Verkehrs und in vollem Umfang der klimarelevanten Emissionen. Der seit langem – auch bei den deutschen Regierungen – bestehende Vorschlag einer Kerosinbesteuerung und der jüngste Vorschlag der EU, den Luftverkehr in den Emissionshandel einzubeziehen, sind viel versprechende Ansätze. Man wird allerdings sehr aufmerksam zu beobachten haben, zu welchem Zeitpunkt in welchem Umfang diese Vorschläge umgesetzt werden.

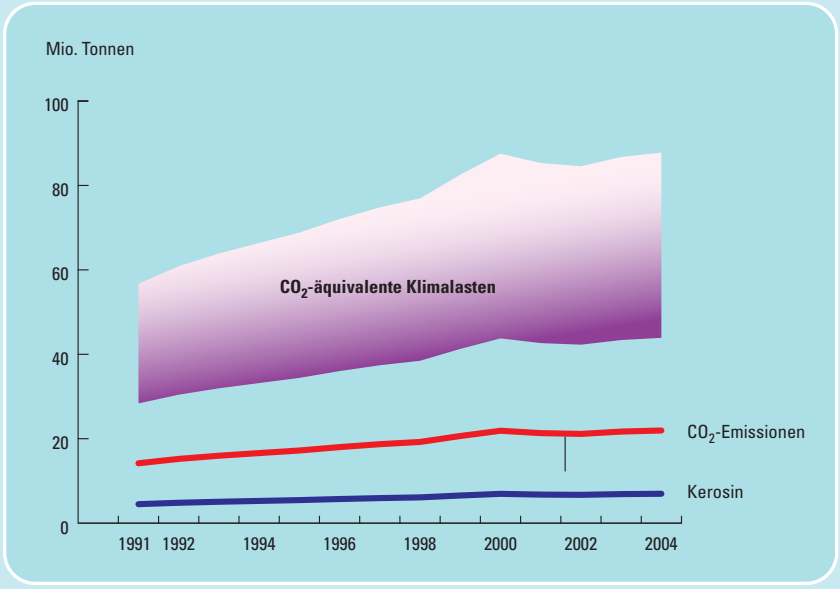


Abbildung 4-4:
Luftverkehr: Treibstoffverbrauch und Klimalasten
Quelle: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen; Wittke, Ziesing (2005); eigene Berechnungen

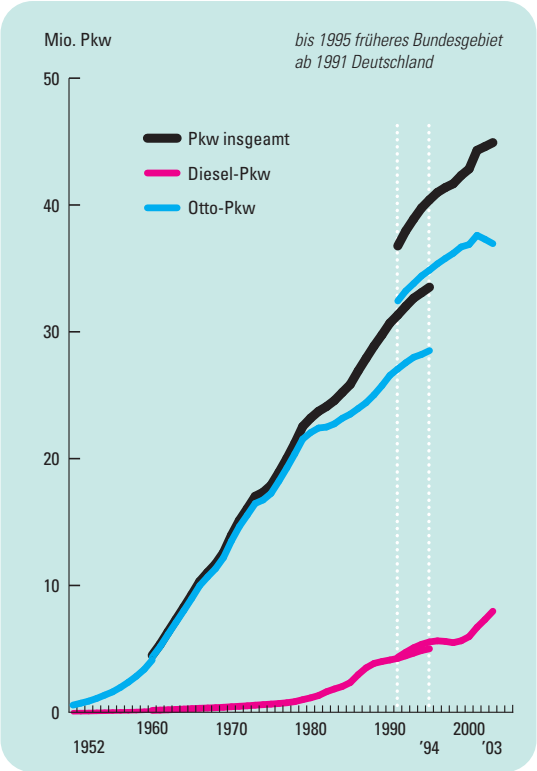


Abbildung 4-5:
PKW-Bestand in Deutschland
Quelle: KBA; DIW: Verkehr in Zahlen, versch. Ausgaben

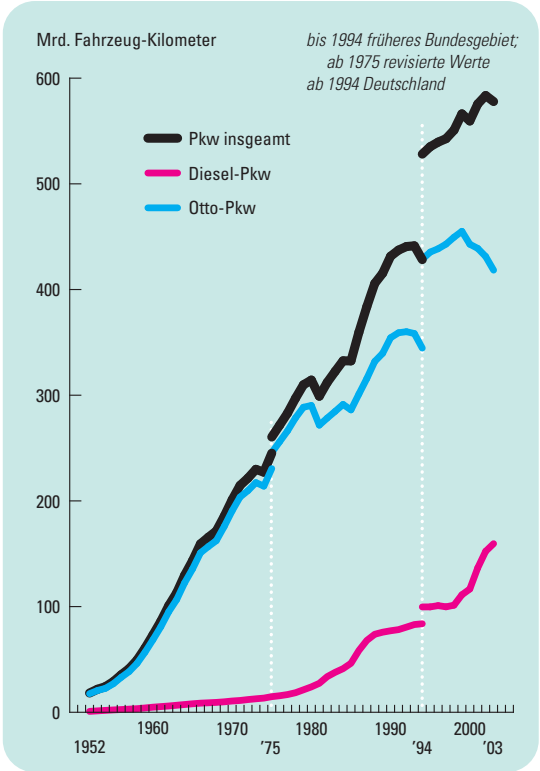


Abbildung 4-6:
Fahrleistung der PKW in Deutschland
Quelle: DIW, Verkehr in Zahlen; versch. Ausgaben

Bisherige Entwicklung des PKW-Verkehrs in Deutschland

Der PKW-Verkehr in Deutschland seit 1950 ist durch ein dynamisches Wachstum gekennzeichnet, das im wesentlichen bis heute anhält. Die Expansion betrifft in ähnlicher Größenordnung die PKW-Bestände und die jährlichen PKW-Fahrleistungen (vgl. Abbildung 4-5 und 4-6).

Im Zuge der Entwicklung stieg der spezifische Treibstoffverbrauch zunächst an, sinkt jedoch nach einer langen Plateauphase seit den achtziger Jahren – zunächst bei den Neufahrzeugen, dann auch in der Bestandsflotte – wieder ab; mittlerweile ist wieder das Niveau der fünfziger Jahre erreicht. Die noch immer übliche Darstellung in Liter pro 100 km unterschätzt den Energieverbrauch und die CO_2-Emissionen der Diesel-PKW. Aufgrund des höheren Kohlenstoffgehalts ist Dieselkraftstoff schwerer, enthält pro Liter mehr Energie und emittiert etwa 14 Prozent mehr CO_2 je Liter. Bei Betrachtung der spezifischen CO_2-Emissionen je 100 km relativiert sich daher der Vorteil des Dieselantriebs in der Praxis deutlich, vgl. Kasten 2 Diesel (Seiten 41–43).

Insgesamt stiegen die CO_2-Emissionen aus dem PKW-Verkehr zunächst stark an: Steigende Fahrleistungen und steigende Verbrauchszahlen verstärkten sich. In den letzten Jahren gehen die Emissionen an CO_2 zunehmend in eine stagnative Entwicklung über, da die leicht steigenden Fahrleistungen nunmehr durch die leicht sinkenden spezifischen Verbräuche praktisch kompensiert werden, vgl. Abbildung 4-7 und Abbildung 4-8.

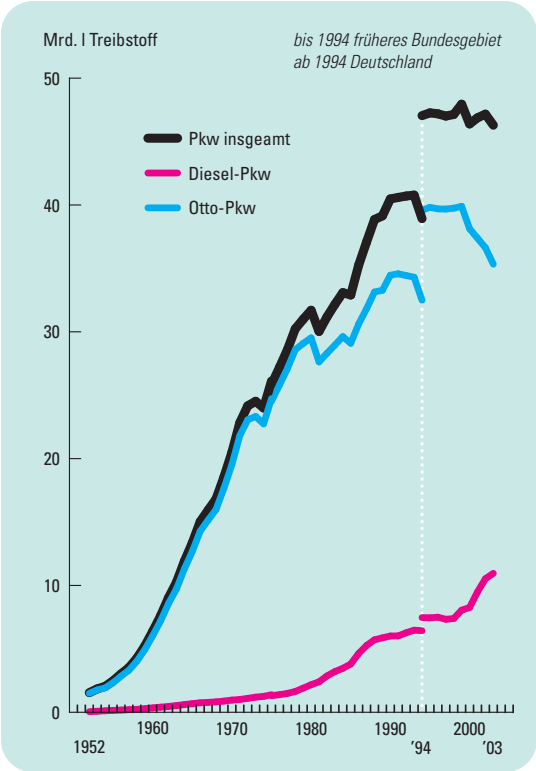


Abbildung 4-7:
Gesamter Treibstoffverbrauch der PKW, Mrd. Liter.
Quelle: DIW, Verkehr in Zahlen, versch. Ausgaben; eigene Berechnungen

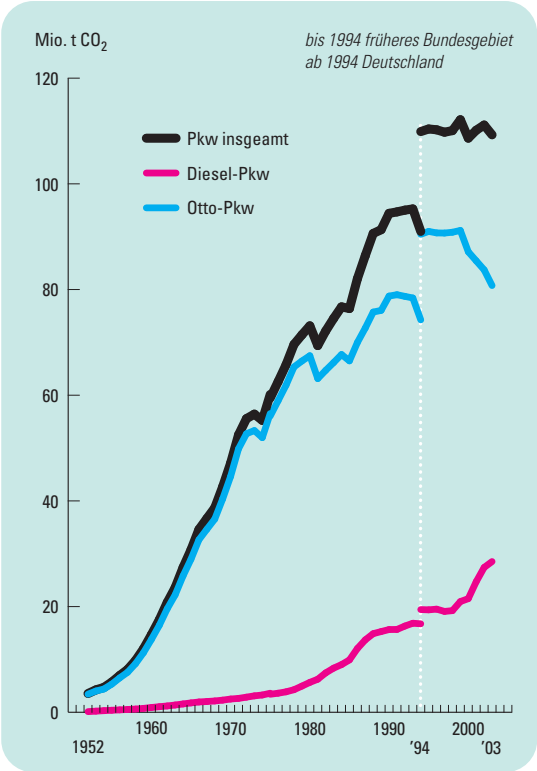


Abbildung 4-8:
Gesamte CO_2-Emissionen der PKW, Mio. Tonnen.
Quelle: DIW, Verkehr in Zahlen, versch. Ausgaben; eigene Berechnungen

Kasten 2: Diesel

Ist der Dieselantrieb der Antrieb der Zukunft?

Der Anteil der Diesel-PKW an den gesamten PKW-Zulassungen ist in den letzten Jahren auch in Deutschland stark angestiegen, zuletzt (2004) auf 44 Prozent (KBA, Reihe 1, Heft 12/2004, 72). Es erhebt sich daher die Frage, wieweit der Dieselantrieb unter Umweltgesichtspunkten der Antrieb der Zukunft sein soll, zumal nach verbreiteter Auffassung Diesel-PKW deutlich weniger Kraftstoff verbrauchen.

Prinzipbedingt verwertet der Dieselmotor den Kraftstoff etwas besser als der Ottomotor. Ein großer Teil des öffentlich wahrgenommenen Verbrauchsvorteils basiert allerdings auf einem Missverständnis, insofern die üblichen Verbrauchsangaben in Liter je 100 Kilometer zugrundegelegt werden.

Traditionell werden Flüssigkeiten, auch flüssige Kraftstoffe, volumetrisch gemessen, in Litern, in Kubikmetern oder davon abgeleiteten Maßen. Dies ist zwar praktisch, legt aber auch hinsichtlich des Energiegehalts oder der klimarelevanten CO_2-Emissionen der Kraftstoffe eine Gleichheit nahe, die tatsächlich gar nicht besteht. Zwar unterscheidet sich der Energieinhalt je Kilogramm recht wenig zwischen den verschiedenen Kraftstoffsorten, je Liter sind die Unterschiede jedoch beachtlich. Ottokraftstoffe („Benzin") sind verhältnismäßig leichte Flüssigkeiten, Dieselkraftstoff ist schwerer, der im Luftverkehr eingesetzte Jet Fuel liegt dazwischen. Entsprechend sind die in einem Liter Jet Fuel oder Diesel enthaltenen Energiemengen und die – abhängig vom Kohlenstoffgehalt des Kraftstoffs – mit der Verbrennung verknüpften CO_2-Emissionen größer als bei einem Liter Benzin. Einen Zahlenvergleich liefert die folgende Tabelle 4-3.

Die Zahlenwerte mögen im Detail in der Literatur leicht variieren, entsprechend den auch in der Natur variierenden Stoffeigenschaften gibt etwa das Kraftfahrtechnische Taschenbuch von Bosch Bandbreiten für die Kraftstoffdichten bei 15° C an, für Normalbenzin 0,72–0,77 g/ml, für Super und Super Plus 0,735–0,785 g/ml und für Dieselkraftstoff 0,82–0,86 g/ml. Insgesamt wird man jedenfalls damit rechnen können, dass Diesel je Liter etwa 12 bis 14 Prozent mehr Energie enthält und CO_2-Emissionen verursacht als Benzin, der Verbrauchsvorteil ist also dementsprechend zu relativieren.

Hierzu zeigt die Abbildung 4-9 zunächst die Entwicklung der Durchschnittsverbräuche der PKW in der herkömmlichen Größe Liter Kraftstoff/100 Kilometer Fahrt; zugrundegelegt sind dabei die gesamte Fahrzeugflotte und das reale Fahrverhalten im jeweiligen Bezugsjahr. Nicht unerwartet zeigt sich über den gesamten dargestellten Zeitverlauf ein ganz erheblicher Verbrauchsvorteil der Diesel-PKW, bis hin zu einem aktuellen Minderverbrauch von 18,7 Prozent im Jahr 2003. Die Abbildung 4-10 mit den zugehörigen durchschnittlichen CO_2-Emissionen ergibt einen anderen Eindruck:

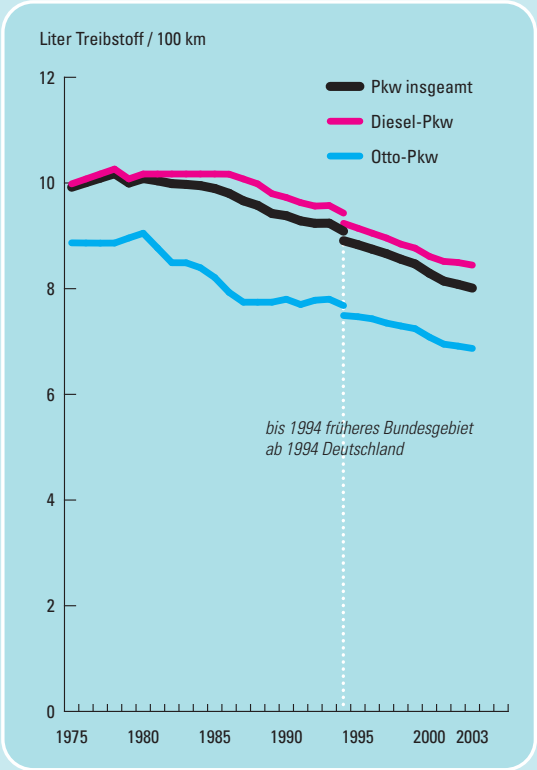


Abbildung 4-9:
Spezifischer Treibstoffverbrauch der PKW, l/100 km
Quelle: DIW, Verkehr in Zahlen, versch. Ausgaben; eigene Berechnungen

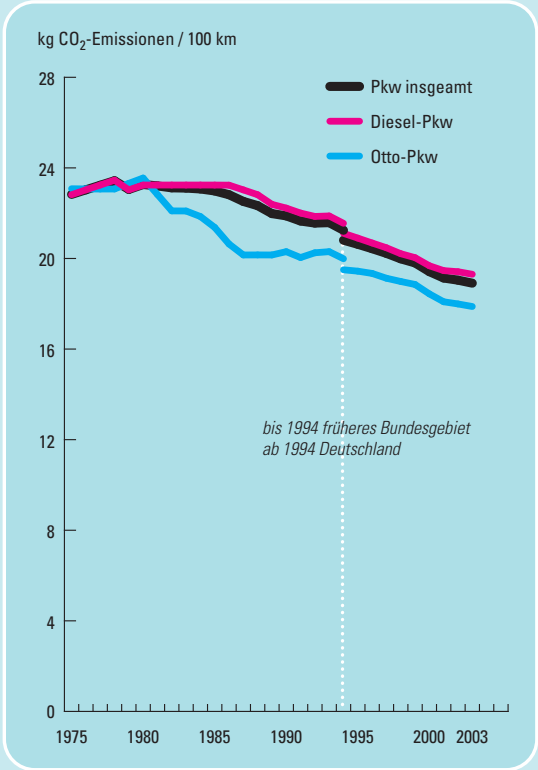


Abbildung 4-10:
Spezifische CO_2-Emissionen der PKW, kg/100 km
Quelle: DIW, Verkehr in Zahlen, versch. Ausgaben; eigene Berechnungen

Wie in der – hier nicht dargestellten – Zeit vor 1975 liegen die spezifischen CO_2-Emissionen der Diesel-PKW bis 1980 auf etwa gleichem Niveau wie jene der Otto-PKW, teilweise sogar höher. Erst nach 1980 mit dem zunehmenden Verkauf kleinerer Diesel-PKW bildet sich ein Vorteil dieser Antriebsart aus, der sich allerdings nach 1986 mit Einsetzen der Verbrauchsabsenkungen bei Otto-PKW wieder etwas abbaut; zuletzt (2003) ist noch eine Minderemission von CO_2 in Höhe von 7,4 Prozent festzustellen.

Erheblich gefördert wird eine übertriebene Wahrnehmung des Dieselvorteils durch die gegenwärtig unterschiedliche Besteuerung der Kraftstoffarten. Entgegen den Verhältnissen bei Energiegehalt und CO_2-Emissionen ist die Abgabenlast auf Ottokraftstoffe deutlich höher als auf Dieselkraftstoffe. Für unverbleites Benzin beträgt der Regelsteuersatz der Mineralölsteuer 0,6698 EUR/l, für Diesel („Gasöl") dagegen nur 0,4857 EUR/l; beide Angaben betreffen verschwefelte und schwefelarme Sorten, sogenannte schwefelfreie Sorten mit weniger als 10 mg Schwefel je kg Kraftstoff sind in beiden Fällen um 0,0153 EUR/l steuerentlastet. Auch auf die Mineralölsteuer wird bekanntlich die Mehrwertsteuer erhoben, mit einem gegenwärtigen Regelsteuersatz von 16 Prozent.

Mineralölsteuer und darauf erhobene Mehrwertsteuer machen entsprechend bei unverbleitem Benzin etwa 0,777 EUR/l aus, bei Diesel dagegen nur 0,563 EUR/l. Würde Dieselkraftstoff dagegen entsprechend dem höheren Energiegehalt und den höheren CO_2-Emissionen 13 Prozent höher besteuert als Benzin, so wären für Mineralölsteuer und darauf entfallende Mehrwertsteuer 0,878 EUR/l zu ermitteln, gut 30 Eurocent pro Liter mehr als gegenwärtig erhoben. Die Tankstellenabgabepreise würden sich vermutlich in einem ähnlichen Maße ändern.

Ein beschränkter Verbrauchsvorteil ist gleichwohl nicht von der Hand zu weisen und insbesondere kleine, besonders sparsame PKW („3-Liter-Autos") mit verhältnismäßig noch ansprechenden Fahrparametern lassen sich entsprechend leichter mit Dieselmotor als mit Ottomotor darstellen. Belastet sind diese PKW wie derzeit ein großer Teil der Diesel-PKW jedoch mit den Gesundheitsrisiken, die von ihren Ruß-Emissionen ausgehen. Partikel stellen nach dem Sachverständigenrat für Umweltfragen derzeit das größte Luftverschmutzungsproblem dar, und Kraftfahrzeuge sind mit etwa 84 Prozent Anteil an partikelförmigem Kohlenstoff die dominante Quelle, worauf das Umweltbundesamt hinweist (UBA 2003, 22); entsprechend deutlich sind seit Jahren die Anstrengungen des Amtes, eine Minderung dieser Emissionen zu erreichen. Die umfangreiche Debatte zu diesem Thema kann hier nicht im Einzelnen nachgezeichnet werden (vgl. UBA 2004a und UBA 2004b), die Bedeutung soll aber durch zwei Ergebnisse der Modellrechnungen verdeutlicht werden: Danach sind etwa 1 bis 2 Prozent der Todesfälle in Deutschland auf die Abgase von Dieselfahrzeugen zurückzuführen; da dies insbesondere Personen in fortgeschrittenerem Alter betrifft, wird bei Einführung von Partikelfiltern eine beschränkte Erhöhung der Lebenserwartung, immerhin aber im Umfang von 1 bis 3 Monaten erwartet (UBA 2003, 24 f., Wichmann 2003). Generell ist darauf hinzuweisen, dass die epidemiologische Untersuchung

Tabelle 4-3: **Kennwerte ausgewählter Kraftstoffe**

Kraftstoff	Dichte kg / l	Spez. CO_2-Emissionen kg CO_2/kg Treibstoff	kg CO_2/l Treibstoff
Ottokraftstoff	0,74	3,0885	2,2855
Dieselkraftstoff	0,835	3,1171	2,6028
Diesel- zu Ottokraftstoff	112,84 %	100,93 %	113,88 %

Quelle: Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs, Version 1.1, Okt. 1995 (CD-ROM), INFRAS AG, Mühlenstraße 45, CH 3007 Bern/Schweiz

solcher Risiken aufgrund der Komplexität der Fragestellung und der Limitiertheit der Daten mit erheblichen Unsicherheitsbandbreiten belegt ist; entsprechend werden fallweise auch deutlich höhere Risikoumfänge behauptet (vgl. WHO 2004 und IIASA 2005).

Die Diskussion über die Durchsetzung schärferer Abgasgrenzwerte für Dieselfahrzeuge im Rahmen der nächsten Stufe der Europäischen Abgasnormen EURO 5 ist noch nicht abgeschlossen. Seitens des Umweltbundesamtes und von Umweltverbänden wird ein Grenzwert von 0,0025 g Partikel/km angestrebt, was eine Absenkung des Grenzwertes nach der Vorgängernorm EURO 4 um 90 Prozent darstellt. Hinsichtlich der zeitlichen Einführung votieren die Umweltverbände für das Jahr 2008. Angesichts der aktuellen Probleme bei der Einhaltung der Immissionsgrenzwerte für Partikel erscheint eine Realisierung der vorgesehenen Emissionsminderung wahrscheinlich. Nach gegenwärtigem Stand ist die Einhaltung der neuen Grenzwerte nur durch den Einbau von Partikelfiltern zu gewährleisten, wodurch sich in der Folge der Energieverbrauch um etwa 1 bis 4 Prozent erhöhen dürfte (UBA/BUWAL/UBA 2004, 93, EUTTW 2003; Pehnt 2001, 107).

Während die allgemeine Aufmerksamkeit noch weitgehend auf die Partikelproblematik gerichtet ist, wird als nächste Klippe bereits die erforderliche Absenkung der Stickoxidemissionen erkennbar. Auch hier wird sich zwingender Handlungsbedarf ergeben; nicht unplausibel erscheint, dass sich in der Folge die Kosten der Diesel-PKW noch einmal etwas erhöhen, während der Verbrauchsvorteil weiter schwindet. Auf der anderen Seite, bei den Otto-PKW, kann durch weitere motortechnische Entwicklungen der Nachteil gegenüber dem Dieselmotor verringert werden, allerdings eben wohl auch zu höheren Kosten. Insgesamt erscheint es wahrscheinlich, dass sich unter zunehmend vereinheitlichten Emissionsgrenzwerten auch die Verbrauchseigenschaften beider Konzepte weiter einander annähern. Abschließend wird deshalb kurz die Entwicklung der Grenzwerte für Diesel- und Otto-PKW gegenübergestellt (Tabelle 4-4).

Darüber hinaus hat die Bundesregierung im Mai 2005 einen Gesetzesvorschlag zur Förderung sauberer Diesel-PKW eingebracht. Dieser sieht vor, neue Diesel-PKW mit Rußfiltern, die im Vorgriff auf die neue EU-Richtlinie bereits heute den Grenzwert von 5 mg/km einhalten, mit 350 Euro über die Kfz-Steuer zu fördern. Die Um- und Nachrüstung von Dieselautos soll mit 250 Euro gefördert werden. Ebenso sollen auch Fahrzeuge, die in diesem Jahr gekauft werden und die Grenzwerte einhalten, einbezogen werden. Als Förderdauer ist der Zeitraum 2006/2007 vorgesehen. Seitens der Automobilindustrie wurde der Bundesregierung zugesagt, dass spätestens ab 2008 alle Diesel-PKW serienmäßig mit einem Rußpartikelfilter ausgestattet sind (vgl.: Pressemitteilung Nr. 117/05 des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit vom 11.05.2005, www.bmu.de). Diese steuerliche Förderung auf Basis des Partikelgrenzwertes von 5 mg/km wird auch seitens des EU-Arbeitsstabs gestützt (vgl.: Commission of the European Communities (2005)).

Als „halbherzig" wird der Gesetzesentwurf durch die Allianz von Umwelt- und Verbraucherschutzverbänden „Kein Diesel ohne Filter" kritisiert. Die Kritik bezieht sich vor allem auf die – aus Sicht der Verbände – zu niedrige Förderung, insbesondere für die Nachrüstung bei gebrauchten Fahrzeugen (vgl.: Pressemitteilung des NABU vom 11.05.05, über: www.nabu.de).

Auf EU-Ebene gehen aktuelle Überlegungen dahin, die Partikel tatsächlich auf 5 mg/km zu limitieren und diesbezüglich den Otto-PKW gleichzustellen; außerdem wird überlegt, zusätzlich zur einfachen Massenbeschränkung auch die Zahl der Partikel zu regulieren. Hinsichtlich der Stickoxide ist bei Diesel-PKW eine Reduktion um 20 Prozent auf 200 mg/km im Gespräch, die wohl keine Abgasnachbehandlung erfordern würde; diesbezüglich wird also gegenwärtig keine Angleichung an Otto-PKW angestrebt, deren NOx-Grenzwert auf 50 mg/km abgesenkt werden soll. Wieweit die zunächst in einem reinen Arbeitspapier enthaltenen Überlegungen durch die nun vorgesehenen weiteren Beratungen modifiziert werden, bleibt allerdings abzuwarten.

Auf die eingangs gestellte Frage wird man daher differenziert antworten müssen: Bei – gegenüber Otto-PKW – gleichwertigen Anforderungen an Diesel-PKW wird man bisherige Vorbehalte gegenüber dem Dieselantrieb zwar aufgeben müssen; wenn dann auch noch die Besteuerung gleichwertig gestaltet wird, dürfte sich allerdings der gegenwärtige Vorteil des Dieselantriebs so weit relativieren, dass es nicht mehr sehr plausibel erscheint, den Dieselantrieb als den künftig maßgeblichen anzusehen. Im übrigen könnte sich die Alternative ohnehin im Rahmen der weiteren motortechnischen Entwicklung zunehmend verwischen, vgl. die Ausführungen im Technikkapitel weiter unten.

Tabelle 4-4: **Entwicklung der Abgasgrenzwerte für PKW**

Stufe	Gültig ab[1]	CO (g/km) Benzin	CO (g/km) Diesel	HC+NOx (g/km) Benzin	HC+NOx (g/km) Diesel	HC (g/km) Benzin	HC (g/km) Diesel	NOx (g/km) Benzin	NOx (g/km) Diesel	Partikel (g/km) Diesel
Euro 1	01.07.1992 / 01.01.1993	3,16	3,16	1,13	1,13	–	–	–	–	0,18
Euro 2	01.01.1996 / 01.01.1997	2,2	1,0	0,5	0,7	–	–	–	–	0,08
Euro 3[2]	01.01.2000 / 01.01.2001	2,3	0,64	–	0,56	0,20	–	0,15	0,50	0,05
Euro 4[2]	01.01.2005 / 01.01.2006	1,0	0,50	–	0,30	0,10	–	0,08	0,25	0,025
Euro 5[3]	2010[4]	1,0	1,0			0,05	0,05	0,08	0,08	0,0025

1 Datum für neue Typgenehmigung / Datum für Inverkehrbringen neuer Fahrzeuge
2 gegenüber Euro I und Euro II geändertes (verschärftes) Prüfverfahren
3 Vorschlag durch das Umweltbundesamt. Quelle: Umweltbundesamt (2003): Future Diesel. Abgasgesetzgebung PKW, leichte Nfz und LKW – Fortschreibung der Grenzwerte bei Dieselfahrzeugen. Berlin
4 Die Einführung dieser Grenzwerte ist ab 2005 technisch realisierbar. Deutschland ist der Auffassung, dass entsprechend den politischen Absprachen mit Frankreich rechtzeitig Standards zur weiteren Senkung von NOx- und Partikelemissionen für Diesel-PKW festgelegt werden und ab 2010 obligatorisch in Kraft treten sollen.

Quelle: Umweltbundesamt, über www.uba.de

Künftige Entwicklung des PKW-Verkehrs in Deutschland

Die Entwicklung des PKW-Verkehrs wird auf der Grundlage der Darstellung im aktuellen Energiereport IV von EWI/Prognos (2005) dargestellt und es werden die dort vorliegenden Ergebnisse kommentiert.

Der Fahrzeugbestand (Tabelle 4-5) wird sich insgesamt nur mehr in bescheidenem Umfang erhöhen und nach 2020 demographiebedingt wieder abnehmen. Dies könnte als eine konservative Abschätzung gelten, bei fortschreitender Mehrfachausstattung der Haushalte könnten auch höhere Zahlen vorstellbar sein; hinsichtlich des Verkehrsumfangs dürfte allerdings der Effekt nur bescheiden ausfallen, da dieser künftig mehr vom Umfang der fahrfähigen Bevölkerung als von der Anzahl der Fahrzeuge abhängt. Sehr auffällig ist dagegen die Umschichtung von Fahrzeugen mit Benzinantrieb zugunsten solcher mit Dieselantrieb. Dieser Vorgang erscheint zwar in der Tendenz plausibel, ist im angesetzten Umfang jedoch möglicherweise überhöht: Im Gegensatz zu der – vor allem treibstoffpreisbedingten – besonderen Hinwendung zu Diesel-PKW in den letzten Jahren signalisiert die allerjüngste Entwicklung in der

	1995	2000	2002	2010	2015	2020	2025	2030
Benzinantrieb	34 855	36 872	37 288	30 975	26 888	24 415	22 567	21 053
Dieselantrieb	5 545	5 961	7 308	15 761	20 180	22 097	22 582	22 325
Gasantrieb	1	3	6	136	517	1 198	2 042	2 712
Elektroantrieb	2	3	3	3	3	3	3	3
Brennstoffzellenantrieb	0	0	0	1	23	155	503	1 142
Insgesamt	40 404	42 840	44 605	46 876	47 611	47 867	47 697	47 235

Tabelle 4-5:
PKW-Bestand 1995–2030 nach Antriebsarten in Tausend
Quelle: EWI/Prognos 2005

	1995	2000	2002	2010	2015	2020	2025	2030
Benzinantrieb	435,4	442,8	431,2	327,7	278,0	247,5	227,7	211,3
Dieselantrieb	99,7	116,6	152,3	281,8	324,6	330,1	334,0	327,4
Gasantrieb	0,0	0,0	0,1	1,4	5,3	12,1	20,6	27,2
Elektroantrieb	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Brennstoffzellenantrieb	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	1,6	5,1	11,5
Insgesamt	535,1	559,5	583,6	611,0	608,2	591,3	587,3	577,4

Tabelle 4-6:
Gesamtfahrleistung der PKW 1995–2030 nach Antriebsarten in Mrd. Fahrzeug-Kilometern
Quelle: EWI/Prognos 2005

Folge der Feinstaubdiskussion wieder ein gewisses Abrücken (vgl. Monatsberichte des KBA); auch diese Bewegung kann sich jedoch als recht kurzlebig erweisen. Insofern sich die Motorkonzepte in ihren Performance-Werten künftig einander annähern dürften, muss man von großen Unsicherheiten hinsichtlich des längerfristigen Splits zwischen Otto-/Dieselantrieben ausgehen. Jedenfalls aber bleibt die Dominanz von Otto- und Dieselantrieben erhalten.

Für die in jüngerer Zeit etwas stärker diskutierten Hybridanteile erwartet EWI/Prognos zwar steigende, insgesamt jedoch nur geringe Marktanteile; diese Antriebe werden nicht getrennt dargestellt, sondern sind in den Zahlen für die jeweiligen Grundantriebe enthalten. Auffällig ist weiterhin das im Vergleich zu gasbetriebenen Fahrzeugen verspätete und ermäßigte Eindringen von Fahrzeugen mit Brennstoffzellenantrieb in den Markt: Für den Gesamtzeitraum bis 2030 wird deren Bedeutung doch als recht gering eingeschätzt. Fahrzeuge mit herkömmlichem Elektroantrieb (Batteriekonzepte) sind offensichtlich lediglich als Merkposten mitgeführt.

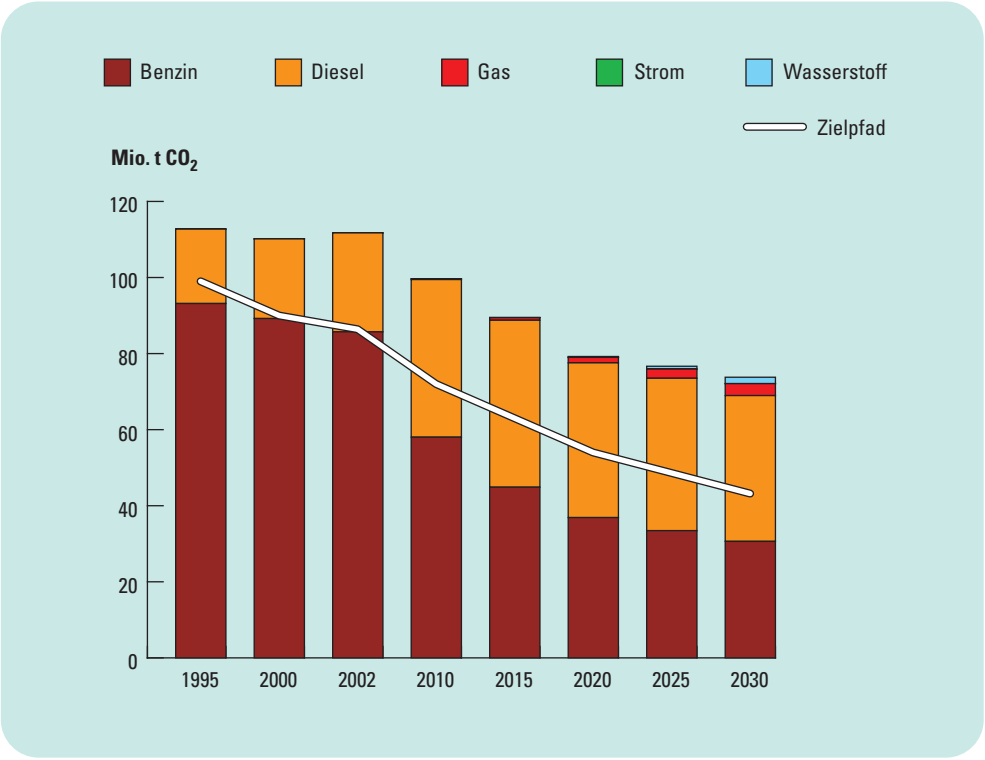
Bei der Fahrleistung (Tabelle 4-6) dominiert ab 2015 der Dieselantrieb; ursächlich hierfür ist die Annahme, dass – bei insgesamt langsam sinkenden Durchschnittswerten je Fahrzeug – weiterhin die Jahresfahrleistungen der Diesel-PKW beträchtlich oberhalb jener der Otto-PKW liegen wird. Während sich die Fahrleistungen der Diesel-PKW bis 2030 verdoppeln, wird für jene der Benzin-PKW eine Halbierung angenommen. Dies könnte sich zumindest in dem angesetzten Umfang als längerfristig überzogen herausstellen. Zur Bewertung der Annahmen von EWI/Prognos vgl. auch die Ausführungen im Kasten zum Dieselantrieb. Fahrzeuge mit Gas- und Brennstoffzellenantrieb spielen – bei Jahresfahrleistungen in gleicher Höhe wie die Benzin-PKW – lediglich eine nachrangige Rolle.

Hinsichtlich der Energieträger (Tabelle 4-7) dominiert entsprechend den Umschichtungen zum Dieselmotor auf längere Sicht der Dieselkraftstoff. Dies gilt aufgrund der höheren Energiedichte des Dieselkraftstoffes naturgemäß noch stärker für den Energiegehalt der eingesetzten Kraftstoffe. Zusätzlich werden auch die nicht unerheblichen Mengen an Biokraftstoffen im wesentlichen als solche für Dieselantriebe zu interpretieren sein, was die Bedeutung dieser Antriebsart weiter unterstreicht. Tatsächlich dürfte es eine größere Offenheit geben hinsichtlich der bevorzugten Motorkonzepte, die allerdings in einem Referenzszenario wie jenem des Energiereports nur beschränkt darstellbar ist. Hinsichtlich des Ergebnisses beim Energieverbrauch könnte der Ansatz insofern etwas zu optimistisch sein, als dem Dieselan-

	1995	2000	2002	2010	2015	2020	2025	2030
Benzin (Mio. l)	39 816	38 129	36 633	24 797	19 178	15 765	14 297	13 091
Diesel (Mio. l)	7 433	7 956	9 887	15 756	16 686	15 464	15 230	14 572
Gas (Tsd. t)	1	2	4	74	250	524	877	1 143
Strom (GWh)	7	8	8	8	8	9	9	10
Biokraftstoffe (Mio. l)	14	304	632	1 555	2 082	2 548	2 787	2 893
Wasserstoff (Tsd. t)	0	0	0	0	4	21	68	153
Insgesamt, PJ	1 568	1 541	1 573	1 431	1 307	1 183	1 158	1 122

Tabelle 4-7:
Energieverbrauch der PKW 1995–2030 nach Energieträgern
Quelle: EWI/Prognos 2005

Abbildung 4-11:
CO_2-Emissionen der PKW und Kombi, Mio. t
Quelle: EWI/Prognos 2005, eigene Berechnungen



trieb weiterhin relevante Verbrauchsvorteile zugemessen werden: Können diese nicht realisiert werden (etwa in der Folge höherer Umweltanforderungen an Diesel-PKW), so ist nicht nur bei den Dieselfahrzeugen von höheren Energiebedarfen auszugehen, sondern möglicherweise auch von geringeren Marktanteilen der Dieselantriebe. Insgesamt jedoch erscheinen die Ansätze durchaus plausibel, insbesondere auch, weil sich die spezifischen Verbrauchswerte der Bestandsflotten im Jahr 2030 mit 6,2 Liter je 100 km (Benzinantrieb) und 5,3 Liter je 100 km (Dieselantrieb) in einem nachvollziehbaren Rahmen bewegen (die Neufahrzeuge des Jahres 2030 weisen mit 5,3 l bei Otto-PKW und 4,3 l bei Diesel-PKW deutlich günstigere Werte auf). Aufgrund der darin und in dem Übergang zu Dieselantrieben zum Ausdruck kommenden Effizienzgewinne sinkt der im Energiereport erwartete Energiebedarf der PKW insgesamt bis zum Jahr 2030 um fast 30 Prozent.

Die mit dieser Energieverbrauchsentwicklung verbundene Entwicklung der CO_2-Emissionen wird in der Abbildung 4-11 gezeigt. Aufgrund der zunehmenden Verwendung von Biokraftstoffen sinken die CO_2-Emissionen noch stärker als die Energieverbräuche, nämlich um nahezu 35 Prozent. Verglichen mit dem Zielpfad, wie er sich aus den programmatischen Absenkungsraten der Klima-Enquete-Kommissionen ergibt, zeigt sich ein weitgehend paralleler Verlauf: Zwar liegt die reale Entwicklung der Verbräuche regelmäßig über den ab 1990 laufenden Reduktionszielen, die Schere zwischen beiden Größen bleibt jedoch weitgehend gleich weit geöffnet. Dies kann einerseits – im Vergleich zu früheren Perspektiven – durchaus als ganz erhebliche Verbesserung angesehen werden; gleichwohl bleibt auch nach dieser Perspektive ein noch immer nennenswerter Betrag von Klimalasten, der entweder durch weitere Reduktionserfolge im PKW-Bereich oder durch Kompensation in anderen Sektoren zu decken ist.

Der langfristige Beitrag des Verkehrs zum Klimaschutz

Die Frage, inwieweit zusätzliche Maßnahmenoptionen im Bereich des Verkehrs im Rahmen einer klimaverträglichen Ausgestaltung des Energie- und Verkehrssystems zur Anwendung kommen müssen, hängt also von zwei maßgeblichen Faktoren ab, nämlich

- der Festlegung der im Zeitverlauf zu erreichenden Klimaschutzziele und
- des relativen Anteils des Verkehrs zur Erreichung dieser Ziele (proportional/unter- bzw. überproportional) im Vergleich zu anderen Sektoren.

Angesichts der dynamischen Entwicklung des Verkehrssektors in den vergangenen Jahren stellt die Anforderung nach einer den anderen Sektoren gleichgerichteten relativen Minderung der Treibhausgasemissionen eine besondere Herausforderung dar. Dies gilt gleichermaßen allerdings auch für andere Treibhausgas emittierende Sektoren wie etwa die Stromerzeugung, wo nicht nur ein Verbrauchsanstieg zu kompensieren ist, sondern zugleich noch der politischen Vorgabe des sukzessiven Ausstiegs aus der Kernenergie folgend ein klimaneutraler Ausgleich für diese geschaffen werden muss.

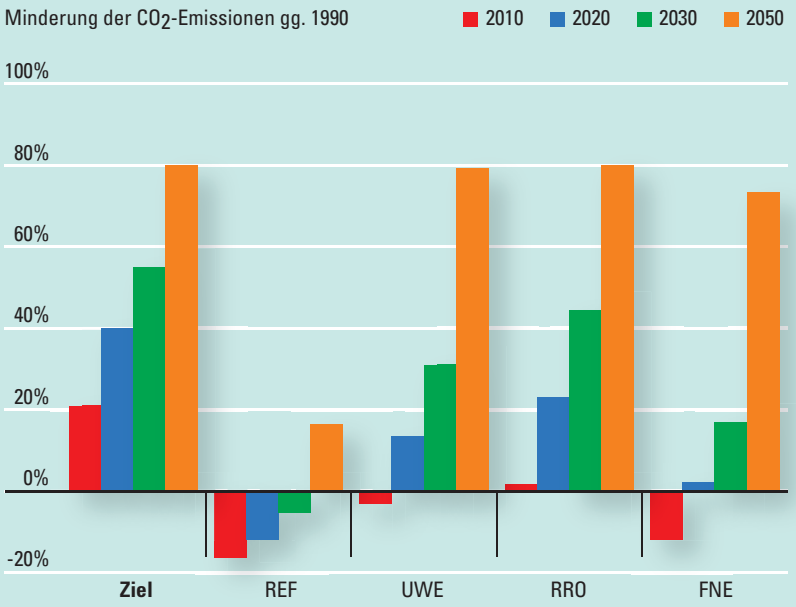
Auch wenn aufgrund der komplexen Fragestellung und insbesondere vor dem Hintergrund der offenen Frage der gesellschaftlichen Akzeptanz verschiedener Klimaschutzmaßnahmen kaum eindeutige Aussagen möglich sind, können doch aus vorliegenden Langfristszenarien Tendenzen für die sektoralen Minderungsbeiträge abgeleitet werden. Derartige Untersuchungen sind u.a. für die Enquete-Kommission „Nachhaltige Energieversorgung“ des Deutschen Bundestages (Enquete 2002) durchgeführt worden. Sie hat versucht, die unterschiedlichen politischen Vorstellungen über die zukünftige Ausgestaltung des Energie- und Verkehrssystems in Szenarien darzulegen. Gemeinsame Vorgabe für alle Zukunftspfade war, dass ein sehr engagierter Treibhausgasminderungspfad eingehalten werden soll (Reduktion der Treibhausgasemissionen um 80 Prozent bis zum Jahr 2050 im Vergleich zum Jahr 1990).

Im Ergebnis trägt der Sektor Verkehr in allen Klimaschutzszenarien der Enquete-Kommission in deutlich höherem Umfang zur Minderung der CO_2-Emissionen bei als unter Trendbedingungen (vgl. Abbildung 4-12). Für die Referenzentwicklung wird bis zum Jahr 2030 sogar noch von einem Anstieg der Emissionen ausgegangen. Im Vergleich zu den Gesamtreduktionszielen werden in den ersten Dekaden allerdings weitaus geringere Minderungssätze realisiert. Der Verkehrssektor leistet in den betrachteten Analysen damit zunächst unterproportional Beiträge zur Reduktion der anthropogenen Treibhausgasemissionen und trägt erst zur Mitte des Jahrhunderts adäquat zur Minderung bei. Ursächlich hierfür ist, dass in den Szenarien zwar unterstellt wird, dass eine deutliche Reduktion des spezifischen Kraftstoffverbrauchs erreicht werden kann und auch unabdingbar ist, dass im Sektor Verkehr aber

- zum einen zunächst eine Trendumkehr erreicht werden muss und
- zum anderen der Anteil fossiler Energieträger über einen langen Zeitraum vergleichsweise hoch bleibt.

Letzteres gilt selbst für die Szenarien, die in besonderer Weise von einem Ausbau der erneuerbaren Energien ausgehen (z.B. Szenario RRO). Während hier unterstellt wird, dass der Anteil erneuerbarer Energieträger in der Stromerzeugung zur Mitte des Jahrhunderts auf bis zu zwei Drittel gesteigert werden kann, liegt diese Marke im Verkehr je nach Randbedingungen zwischen knapp 4 und 44 Prozent. Dabei handelt es sich um den Einsatz von Biokraftstoffen und im späteren Zeitverlauf dann auch von regenerativem Wasserstoff. Noch gravierender fallen die Unterschiede für das Jahr 2030 aus, wo verkehrsseitig von regenerativen Kraftstoffanteilen (primär Biokraftstoffe) von 2 bis 17 Prozent ausgegangen wird, während bei der Stromerzeugung schon Anteile von bis zu 44 Prozent antizipiert werden.

Abbildung 4-12:
CO_2-Minderungserfolge in verschiedenen ausgewählten Klimaschutzszenarien der Enquete-Kommission „Nachhaltige Energieversorgung“ (2002) im Vergleich zur Referenzentwicklung



REF: Referenzentwicklung; UWE: Umwandlungseffizienz; RRO: Offensive Ausschöpfung erneuerbarer Energien (REG) und der Energieeinsparung (REN); FNE: Fossil-Nukleare Renaissance

Maßgeblich ist hierfür die Erkenntnis, dass mit Ausnahme der Biomasse die CO_2-Minderungswirkung des Einsatzes erneuerbarer Energien, die häufig direkt als elektrischer Strom zur Verfügung stehen, im stationären Sektor deutlich höher ist als im mobilen Verwendungsbereich. So kann beispielsweise durch die direkte Einspeisung von Windenergiestrom in das Stromnetz und die damit verbundene Substitution einer Stromerzeugung aus fossilen Kraftwerken eine Minderungswirkung von bis zu 900 g CO_2/kWh (Kohlekraftwerk) erzielt werden, während die indirekte Nutzung (über Wasserstoffelektrolyse) als Kraftstoff lediglich zu einer Minderungswirkung von 180 g CO_2/kWh führt. Anders ausgedrückt heißt dies, dass solange die Verfügbarkeit erneuerbarer Energien begrenzt ist bzw. kein beliebig schneller Ausbau erzielt werden kann, eine Verminderung des stationären Deckungsanteils zu Gunsten des Verkehrs indirekt zu einer zusätzlichen Belastung des Klimas führt.

Kapitel 5

Technische Einflussfaktoren und Lösungsstrategien im Hinblick auf den Kraftstoffverbrauch und die Treibhausgasemissionen des Straßenverkehrs

Der direkte Ausstoß von Kohlendioxid (CO_2) aus Kraftfahrzeugen erfolgt proportional zum Kraftstoffverbrauch und wird damit in technischer Hinsicht durch die folgenden Eigenschaften eines Fahrzeuges bestimmt: Motor, Getriebe und äußere Fahrwiderstände, wozu Roll-, Luft-, Beschleunigungs- und Steigungswiderstand gehören. Die Fahrwiderstände werden maßgeblich durch die Masse, Form- und Oberflächengüte des Autos selbst und die topographischen Gegebenheiten der gefahrenen Strecke bestimmt. Hinzu kommen die individuelle Fahrweise sowie zusätzliche Ausstattungsmerkmale für Fahrkomfort und Sicherheit wie z.B. Klimaanlage oder elektrische Kontrolleinrichtungen. Zusätzlich sind indirekte Emissionen an Treibhausgasen (hierunter werden im folgenden in der Regel auch Methan und Stickstoffdioxid subsumiert), wie sie bei der Herstellung der Kraftstoffe und alternativer Werkstoffe (Leichtbaumaterialien) für den Fahrzeugbau entstehen, zu berücksichtigen (siehe Abbildung 5-1).

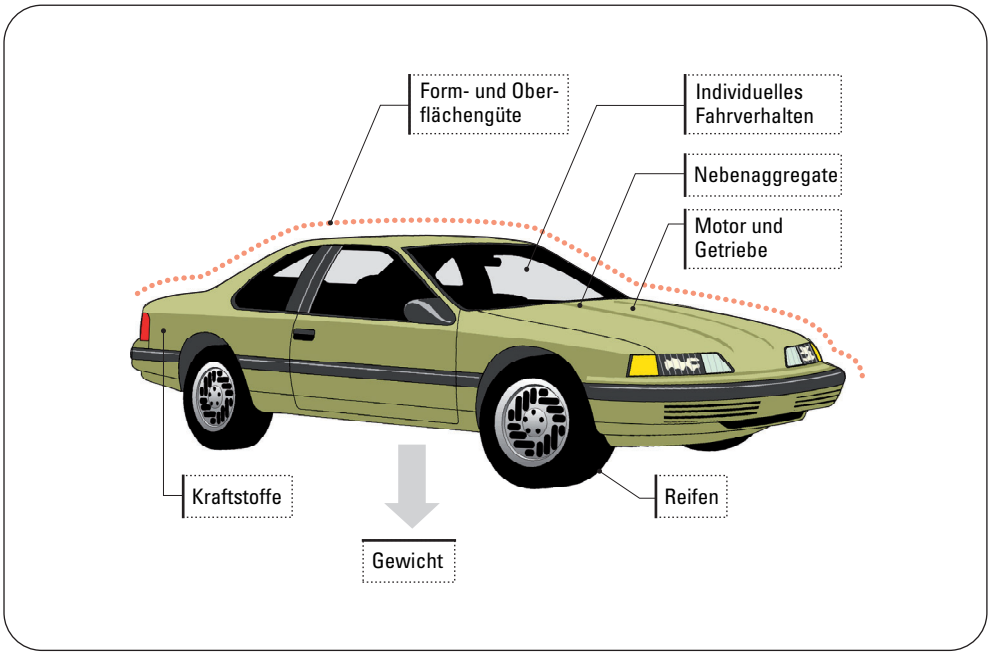


Abbildung 5-1:
Überblick über die relevanten technischen Einflussfaktoren auf Kraftstoffverbrauch und Treibhausgas-Emissionen eines Kraftfahrzeuges

Kraftstoffe

Für den Straßenverkehr in Deutschland werden nach wie vor nahezu ausschließlich (gut 98 Prozent) die fossilstämmigen mineralischen Kraftstoffe Benzin (25,6 Mio. t) und Diesel (27,9 Mio. t) eingesetzt (Stand 2003; MWV 2003). Dabei hat seit 1990 der Absatz von Diesel (+28 Prozent) – aufgrund steigender PKW-Zahlen und Güterverkehrsleistung – deutlich zugenommen, während umgekehrt derjenige für Benzin (–17 Prozent) rückläufig ist. Zusammen ist der inländische Absatz an Benzin und Diesel zwischen 1990 und 2003 damit um nur rd. 0,7 Mio. t oder 1,3 Prozent angestiegen. Und bis zum Jahr 2010 könnte sich nach Prognosen des Mineralölwirtschaftsverbandes der Rückgang bei Benzin (–7,2 Prozent) und die Zunahme bei Diesel (+11,7 Prozent), bei ansonsten nahezu unverändertem Gesamtabsatz, weiter fortsetzen (MWV 2004).

Allerdings lässt sich aus dem inländischen Kraftstoffabsatz allein (aufgrund von Auslandsbetankungen) nicht direkt auf den entsprechenden Endenergiebedarf und die THG-Emissionen des Straßenverkehrs in Deutschland schließen. Letztere haben zwischen 1990 und 2002 im Unterschied zum Kraftstoffabsatz mit etwa rund 11 Prozent weitaus stärker zugenommen (BMWA 2005a). Die unter Trendbedingungen zu erwartende weitere Entwicklung der THG-Emissionen aus dem Straßenverkehr wird im Kapitel 4 eingehender dargestellt.

Auch wenn es eine Vielzahl an alternativen Kraftstoffarten gibt, werden mineralisches Benzin und Diesel ihre dominante Marktstellung (>> 50 Prozent Absatzanteil) zumindest auch in den kommenden Jahrzehnten nach aller Voraussicht nicht verlieren. Gründe dafür sind, dass für die Marktdurchdringung alternativer Kraftstoffe wie Erdgas, Wasserstoff, biogene und synthetische Kraftstoffe zunächst entsprechende Rohstoffquellen erschlossen, Produktionskapazitäten aufgebaut und/oder Infrastrukturen (z.B. Tankstellen) geschaffen werden müssen. Nennenswerte Absatzmengen an alternativen Kraftstoffen werden in Deutschland bisher lediglich bei Biodiesel (genauer: Rapsmethylester – RME) erreicht, der mit etwa 1,2 Mio. t pro Jahr einen Marktanteil von rd. 1,5 Prozent (plus 0,1 Prozent Bio-Ethanol), bezogen auf den Endenergieverbrauch, hat (Stand 2004, BMU 2005a).

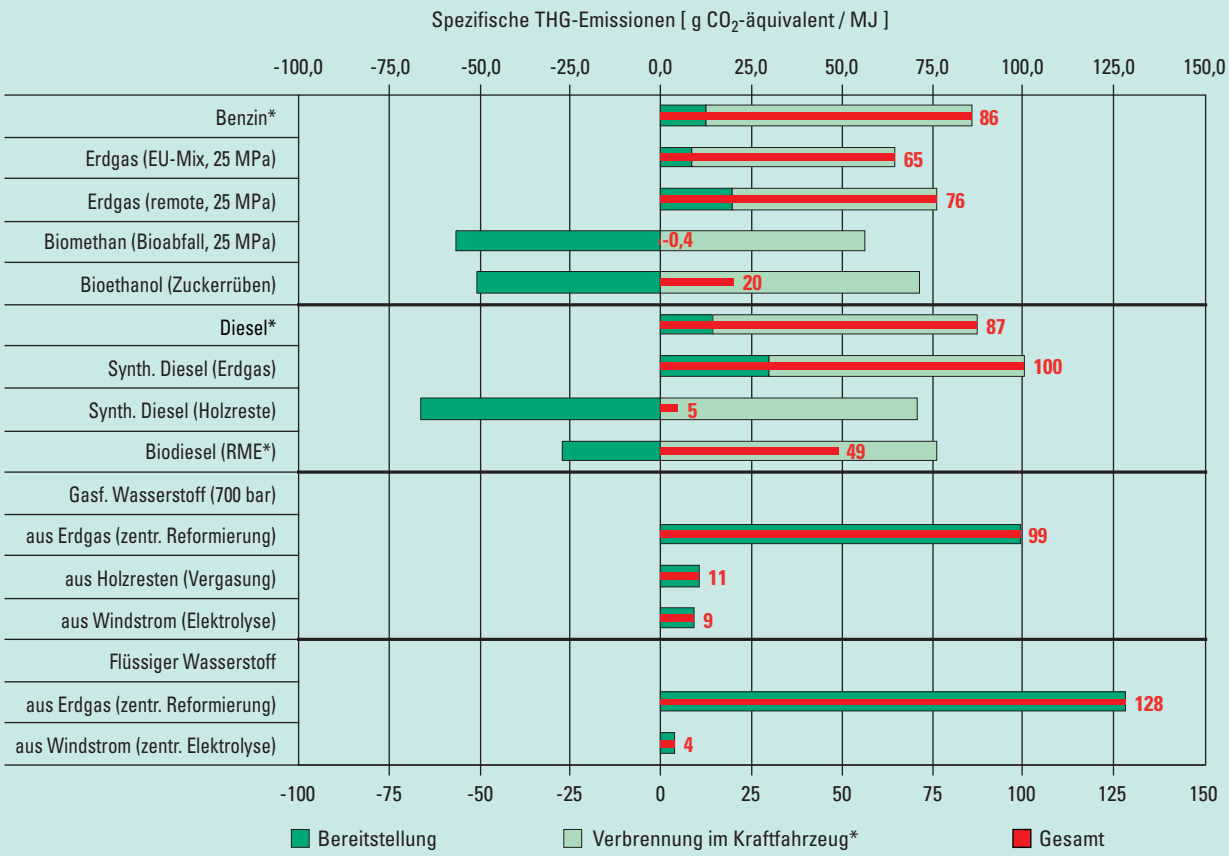
Die Einführung alternativer Kraftstoffe kann also mittelfristig schon allein rein mengenmäßig nur sehr begrenzt Einfluss auf die THG-Emissionen des Straßenverkehrs nehmen. Zudem ist die Einsatzeffizienz regenerativer Primärenergiequellen in anderen Sektoren für die nächsten Dekaden deutlich höher einzuschätzen. Treibende Faktoren für die aktuelle politische Debatte um alternative Kraftstoffe sind daher die Diversifizierung der Rohstoffbasis zur Erhöhung der Versorgungssicherheit und die Verbesserung der Luftqualität. Die Verringerung der THG-Emissionen spielt demgegenüber noch eine vergleichsweise geringe Rolle.

Entwicklungen und Potenziale bei mineralischem Benzin und Diesel

Jedes Kilogramm[8] Benzin und Diesel, das in Kraftfahrzeugen verbrannt wird, führt zu einem CO_2-Ausstoß von etwa 3,17 bzw. 3,16 kg (EUWTT 2003). Der Löwenanteil davon (ca. 85 Prozent) kommt durch die Verbrennung im Kraftfahrzeug zustande, während nur etwa 15 bis 16 Prozent auf die Bereitstellung des Kraftstoffs bis zur Tankstelle (d.h. für Exploration, Raffination und Transporte) entfallen (vgl. Abbildung 5-2). Die Bereitstellung erfolgt derzeit mit sehr hoher Energieeffizienz (≤ 86 Prozent), so dass es hier kaum noch Potenzial zur Verminderung der THG-Emissionen gibt.

Das Hauptaugenmerk der technischen Entwicklung liegt folglich gegenwärtig auch nicht auf der Verbesserung der Energie- oder Klimabilanz von Benzin und Diesel, sondern auf der Verbesserung der verbrennungstechnischen Eigenschaften und der Schadstoffbilanz. So wird u.a. zur Verringerung der Schwefeldioxid-Emissionen gesetzlich gefordert, dass der Schwefelgehalt von Benzin und Diesel spätestens ab 2010 unterhalb von 10 ppm („schwefelfreier“

8 Massen- bzw. energiespezifisch betrachtet, führen Benzin und Diesel zu annähernd gleichen Treibhausgasemissionen (vgl. Kasten 2, Seite 40).



Anm.: Werte für Benzin und Diesel gemäß Kraftstoffspezifikationen für 2010; RME = Rapsmethylester; Angaben für Bereitstellung = beste Schätzwerte; Angaben für Verbrennung ohne lokale Methan- und Di-Stickstoffoxid-Emissionen; Angaben für Biomethan aus (LBSTWTW 2002) und für flüssigen Wasserstoff (Windstrom) nach eigenen Berechnungen, alle anderen Angaben aus (EUWTT 2003)

Abbildung 5-2:
Spezifische Emissionsfaktoren verschiedener ausgewählter Kraftstoffe im Vergleich (in g CO_2-äquivalent pro MJ)

Kraftstoff) liegen muss, was von der Mineralölwirtschaft in Europa allerdings heute schon überwiegend erfüllt wird. Zudem werden neue Additive (Kraftstoffzusätze) entwickelt, die der Motorreinigung, Oktanzahlerhöhung oder Abgasnachbehandlung dienen können. Dadurch erhöhen sich zwar der Energieaufwand und die THG-Emissionen für die Kraftstoffbereitstellung, sie werden aber zum Teil durch die besseren Eigenschaften des Kraftstoffes (günstigeres C/H-Verhältnis bzw. besserer Heizwert) wieder kompensiert, so dass die Auswirkungen auf die Klimabilanz per Saldo vernachlässigbar gering bleiben (Tappe 2000). Aus Klimaschutzsicht ist daher gegenwärtig nicht der Kraftstoff das zentrale Problem, sondern der Umfang (Fahrzeug-Kilometer) und die Qualität (Wirkungsgrad des Kraftfahrzeugs) seiner Nutzung.

Zukünftig könnte sich die Energie- und Klimabilanz von Benzin und Diesel allerdings dadurch verschlechtern, dass zunehmend mehr unkonventionelle Rohölquellen wie z.B. so genannte Ölsande in Kanada erschlossen werden müssen, um den weltweit steigenden Bedarf an Benzin und Diesel weiterhin decken zu können. Die Erschließung unkonventioneller Ölquellen ist um einiges aufwändiger als die heutige Ölgewinnung, so dass sich die Kosten-, Energie- und Umweltbilanz deutlich verschlechtern werden. Zum Beispiel werden im Falle kanadischer Ölsande pro Energieeinheit des Endprodukts nach heutiger Kenntnis etwa 2,5 mal mehr Treibhausgase freigesetzt, als es bei der heutigen Rohölgewinnung für Europa im Mittel (ca. 3,7 g CO_2-äquivalent/MJ; EUWTT 2003) der Fall ist.

Abbildung 5-2 zeigt, wie Benzin und Diesel (gemäß den gesetzlichen Anforderungen für das Jahr 2010) in Bezug auf den Ausstoß von Treibhausgasen pro umgesetzter Energieeinheit im Vergleich zu ausgewählten alternativen Kraftstoffen abschneiden. Der resultierende spezifische Emissionsfaktor (schmaler, roter Balken) ergibt sich dabei als Saldo aus den spezifischen

Emissionsfaktoren für die Bereitstellung (dunkelgrüner Balken) und für die Kraftstoff-Verbrennung (hellgrüner Balken). Dabei werden die THG-Emissionen für die Bereitstellung von Biokraftstoffen mit ihrer zuvor in der Biomasse gespeicherten CO_2-Menge (Gutschrift) verrechnet, die dann erst wieder bei der Verbrennung freigesetzt wird. Daraus folgt eine negative Klimabilanz für die Bereitstellung, wenn der CO_2-Gehalt der Biomasse größer ist als die Klimabelastung durch die Bereitstellung selber. Bei Wasserstoff wird ein direkter Einsatz in Fahrzeugen unterstellt, so dass die entsprechenden Emissionsfaktoren für seine „Verbrennung" mit Null bewertet werden. Dies würde sich bei Fahrzeugen mit Reformern zur bordeigenen Wasserstoffherstellung signifikant ändern.

Aus dem gezeigten Vergleich folgt zunächst, dass Benzin und Diesel in Bezug auf ihren spezifischen THG-Ausstoß nahezu gleich abschneiden, dagegen Bio-Methan, regenerativ erzeugter Wasserstoff und synthetischer Diesel die geringsten spezifischen THG-Emissionen aufweisen. Das mit diesen Kraftstoffen tatsächlich erschließbare THG-Minderungspotenzial ergibt sich allerdings erst unter Einbeziehung weiterer Aspekte wie z.B. Verfügbarkeiten, Primärenergiebedarf, Wechselwirkungen mit anderen Energiesektoren und Fahrzeugwirkungsgraden (vgl. nachfolgende Abschnitte). Von daher liefert dieser Vergleich nur einen ersten isolierten, gleichwohl wichtigen Anhaltspunkt für die klimarelevante Bewertung von alternativen Kraftstoffen.

Fazit: Benzin und Diesel werden voraussichtlich noch jahrzehntelang die dominierenden Kraftstoffe im Straßenverkehrssektor bleiben. Ihre Bereitstellung erfolgt gegenwärtig auf so hohem technischem und energieeffizientem Niveau, dass diesbezüglich kaum noch Potenziale zur THG-Minderung bestehen. Die einschlägige technische Entwicklung wird dementsprechend hauptsächlich durch Aspekte wie z.B. Motortechnik, gesetzliche Anforderungen zur Luftreinhaltung und Aufrechterhaltung bzw. Verbesserung der Versorgungssicherheit geprägt. Letzteres führt zunehmend zur Erschließung und Ausbeutung neuer, unkonventioneller Ölquellen wie z.B. Ölsande, wodurch sich aber in Zukunft die Energie- und Klimabilanz von Benzin und Diesel deutlich verschlechtern werden.

Erdgas

Die Verwendung von Erdgas als Kraftstoff verspricht nennenswerte Potenziale zur Reduktion von Treibhausgasen im Verkehrssektor, da es der kohlenstoffärmste fossile Energieträger ist. Zudem ist die Bereitstellung derzeit energetisch effizienter und verursacht bislang weniger THG-Emissionen als diejenige von Benzin oder Diesel. Von daher werden bei der Verbrennung von einem Megajoule Erdgas in Kraftfahrzeugen derzeit etwa 11 bis 12 g weniger an Treibhausgasen ausgestoßen als bei Benzin und Diesel, was rein kraftstoffseitig einem Minderungspotenzial von etwa 24 Prozent entspricht (vgl. Abbildung 5-2). Ein weiterer wichtiger Pluspunkt ist, dass durch den Einsatz von Erdgas in Kraftfahrzeugen der Ausstoß an den Luftschadstoffen Kohlenmonoxid (–50 bis 75 Prozent), Stickstoffoxid (–20 bis 80 Prozent) und reaktiven Kohlenwasserstoffen (–80 Prozent), bei nahezu vollständiger Vermeidung von Schwefeldioxid- und Partikelemissionen, im Vergleich zu Benzin- und Diesel-PKW erheblich gesenkt werden kann (wvgw o.A.).

Allerdings schneiden Erdgas-PKW gegenwärtig beim Energieverbrauch im Vergleich zu Benzin-PKW etwas (–3 Prozent) und verglichen mit Diesel-PKW deutlich (–25 Prozent) schlechter ab. Im Vergleich zu Diesel-PKW schrumpft daher das derzeit mögliche Einsparpotenzial von Erdgas-PKW in Bezug auf den THG-Ausstoß auf (weniger als) 3 Prozent, im Vergleich zu Benzin-PKW verbleibt aber mit ca. 20 Prozent (auch in Zukunft) ein hohes Einsparpotenzial. Die unterschiedlichen fahrzeugtechnischen Optimierungspotenziale bis 2010 lassen aber erwarten, dass Erdgas-PKW bei der Effizienz gegenüber Diesel-PKW deutlich aufholen können (siehe Seite 66) und demnach künftig auch hier ein nennenswertes Minderungspotenzial (etwa ≤ 16 Prozent) für Treibhausgase bieten können.

Ein verbrauchskritischer Faktor bei Erdgas-PKW ist die Erdgasspeicherung im Fahrzeug. Heutige Druckbehälter für komprimiertes Erdgas (25 MPa) sind häufig aus Stahl und verschlechtern aufgrund ihres relativen hohen Zusatzgewichtes den Fahrzeugwirkungsgrad. Sie sind aber im Vergleich zu den beim zukünftigen Referenz-Erdgas-PKW unterstellten wesentlich leichteren Composite-Druckbehältern deutlich kostengünstiger. Wenn sich die leichten Druckbehälter nicht durchsetzen, dann käme es allein aufgrund der Gewichtszunahme (etwa rd. 70 kg) zu einem leichten Anstieg des Kraftstoffverbrauchs und dementsprechend zu einer leichten Abnahme der genannten THG-Minderungspotenziale.

Einen weiteren kritischen Aspekt stellen die Emissionen des Treibhausgases Methan in der vorgelagerten Prozesskette für die Erdgasbereitstellung (Förderung und insbesondere Transport) dar. Hier wurde bisher vielfach unterstellt, dass sie so hoch seien, dass der eingangs genannte THG-spezifische Vorteil von Erdgas im Vergleich zu Benzin und Diesel (über-)kompensiert würde. Neue empirische Untersuchungen zeigen aber, dass die spezifischen Erdgasverluste selbst bei Importen über größere Transportentfernungen als heute (z.B. aus Russland) sehr begrenzt sind (Lechtenböhmer et al. 2005). So ist zwar langfristig (ab etwa 2020) damit zu rechnen, dass die mittleren Transportentfernungen bei Erdgas, aufgrund schrumpfender Reserven in Europa, zunehmen und zu einem Anstieg der Prozessketten bedingten THG-Emissionen führen werden. Das THG-Minderungspotenzial von Erdgas wird dadurch aber insgesamt nur leicht geschmälert.

Bisher wird Erdgas weltweit nur in sehr wenigen, typischerweise erdgasreichen Ländern in nennenswertem Umfang als Kraftstoff verwendet. Alleiniger Vorreiter in Europa ist seit langer Zeit Italien mit etwa 434 000 Erdgasfahrzeugen (Stand 2003) entsprechend einem Anteil von etwa 1,3 Prozent am gesamten PKW-Bestand (Stand 2002). In Deutschland dagegen ist der Marktanteil von Erdgasfahrzeugen (Anfang 2005: insgesamt rund 27 000, davon gut 21 000 PKW) und damit von Erdgas als Kraftstoff bisher noch vernachlässigbar gering. Unter günstigen Rahmenbedingungen könnte sich der PKW-Anteil bis zum Jahr 2010 auf etwa 1 Prozent oder etwa 400 000 bis 500 000 Erdgasfahrzeuge erhöhen (Erdgasfahrzeuge 2005). Bis 2020 strebt die EU jedenfalls als Zielvorgabe einen Kraftstoffanteil von etwa 10 Prozent an. Dadurch könnten dann im besten Fall – bei Substitution von Benzin-PKW – die THG-Emissionen aus dem Straßenverkehr um überschlägig etwa 2 Prozent p.a. reduziert werden.

Begünstigend für die Markteinführung wirkt in Deutschland die bis zum Jahr 2019 befristet gewährte Steuervergünstigung für Erdgaskraftstoff. Zudem könnte die Markteinführung durch weitere Preissteigerungen bei den herkömmlichen Kraftstoffen und/oder durch spezifische Vorzugsregelungen zu Gunsten von Erdgas-PKW im Rahmen von Luftreinhalteplänen zur Einhaltung der Grenzwerte von Stickoxiden und Feinstaub auch erheblich an zusätzlicher Dynamik gewinnen.

Fazit: Der Kraftstoff Erdgas bietet prinzipiell ein relativ großes THG-Minderungspotenzial, er wird aber voraussichtlich erst um das Jahr 2020 nennenswerte Marktanteile (ca. 10 Prozent) erreichen können. Sein Beitrag zum Klimaschutz bleibt daher bis dahin gering. Größere bzw. gezieltere Beiträge könnte er dagegen zur Verbesserung der lokalen Luftqualität (Stickoxide, Feinstaub) leisten. Bei weiterem Marktwachstum könnte Erdgas dann als Alternative zu Benzin und Diesel signifikante Beiträge zur THG-Minderung leisten. Die tatsächlich erzielbare THG-Reduktion hängt allerdings insgesamt empfindlich von der technisch-ökonomischen Entwicklung bei Speichern und Infrastrukturen für den Gastransport ab.

Synthetische Kraftstoffe (GTL und BTL)

Synthetische Kraftstoffe sind solche, die auf der Basis von Synthesegas (Hauptbestandteile sind Kohlenmonoxid und Wasserstoff) unter Verwendung geeigneter Katalysatoren erzeugt (reformiert) werden. Für die Erzeugung von Synthesegas sind wiederum prinzipiell alle Kohlenwasserstoffe geeignet. Synthetische Kraftstoffe ermöglichen daher einerseits eine breite Diversifizierung der heute einseitigen Energieträgerbasis für den Verkehr und andererseits eine

gezielte Optimierung bzw. Anpassung der Kraftstoffeigenschaften an die Motortechnik. Diesen Vorteilen stehen allerdings generell ein höherer Energieaufwand und zunächst deutlich höhere Kosten auf der Erzeugungsseite gegenüber.

Im Fokus der aktuellen Diskussion stehen vor allem synthetische Dieselkraftstoffe auf der Basis von Erdgas (insbesondere aus unkonventionellen Quellen) und basierend auf Biomasse. Synthetischer Dieselkraftstoff aus Erdgas – so genannte Gas-To-Liquids, abgekürzt GTL – wird derzeit in Deutschland in geringem Umfang als Zumischung (5 Prozent) in herkömmlichem Diesel (Marke V-Power von Shell) in den Markt eingeführt. Nennenswerte Marktanteile dürfte der neue Kraftstoff jedoch frühestens mittelfristig erreichen, da zuvor noch eine Hochskalierung (und Ausbau) der jetzigen Produktionsanlagen erfolgen muss. Seine Bereitstellung ist jedoch aufgrund der energieintensiven Umwandlung mit etwa doppelt so hohen spezifischen THG-Emissionen (rd. 30 g CO_2-äquivalent/MJ) wie herkömmlicher Diesel belastet (vgl. Abbildung 5-2), womit insgesamt rein kraftstoffseitig THG-Mehremissionen in Höhe von etwa 14 Prozent im Vergleich zu Diesel verbunden sind. Um dennoch eine nennenswerte Verringerung des THG-Ausstoßes mittels GTL erreichen zu können, müssten die Wirkungsgrade von speziell auf GTL abgestimmten PKW um deutlich mehr als 14 Prozent über denen von (fortgeschrittenen) Diesel-PKW liegen. Hierzu liegen zwar bisher keine belastbaren Angaben vor, dennoch erscheint dies aus heutiger Sicht eher unwahrscheinlich. Der Einsatz von GTL-Kraftstoff ist daher unter Klimaschutzgesichtspunkten eher kontraproduktiv. Gleiches gilt in verstärkter Form erst recht für die Erzeugung von synthetischem Kraftstoff aus Kohle, sofern diese nicht mit der noch in Entwicklung befindlichen Technologie der CO_2-Abtrennung und -Speicherung gekoppelt wird.

Synthetische Dieselkraftstoffe aus Biomasse – so genannte Biomass-To-Liquids, abgekürzt BTL – bieten dagegen prinzipiell ein sehr großes spezifisches Potenzial zur Reduzierung der THG-Emissionen aus dem Straßenverkehr. Ihre Produktion – gegenwärtig vorzugsweise via Holzvergasung – befindet sich derzeit in der fortgeschrittenen Forschungs- und Entwicklungsphase sowie parallel in der kleinindustriellen Demonstrationsphase. Mit der Erreichung nennenswerter BTL-Marktanteile (≥ 5 Prozent) ist daher erst langfristig (ab etwa 2020) zu rechnen. Dann aber könnte dieser Kraftstoff aus heutiger Sicht prinzipiell zu einer spezifischen THG-Emissionsminderung in Höhe von bis zu etwa 95 Prozent gegenüber Diesel beitragen (vgl. Abbildung 5-2). Allerdings fällt das absolute Substitutionspotenzial von BTL in Folge des begrenzten Biomasseangebotes (s.u.) in Deutschland, aber auch der EU, im Vergleich zur heutigen Kraftstoffnachfrage eher bescheiden aus. Zudem ist aus heutiger Sicht der Einsatz von Biomasse im stationären Sektor aufgrund der dort hohen Kohlenstoffintensitäten deutlich klimaentlastender als im mobilen Bereich.

Trotz der möglichen Kontraindikationen und Einschränkungen in Bezug auf die Minderung von THG-Emissionen ermöglichen synthetische Kraftstoffe wie GTL nennenswerte Reduktionen bestimmter Luftschadstoffe wie z.B. Kohlenmonoxid (ca. –91 Prozent), Kohlenwasserstoffe (ca. –63 Prozent) und Feinstaub (ca. –26 Prozent; Rabe 2005). Als Dieselkraftstoff kommt ihnen daher aus lufthygienischer Sicht eine besondere Bedeutung zu.

Fazit: Synthetische Dieselkraftstoffe sind vor allem für die Diversifizierung der Energieträgerbasis und die Absenkung mancher Luftschadstoffe, insbesondere von Kohlenwasserstoffen und Kohlenmonoxid, sowie von Feinstaub von Bedeutung. Zudem verspricht man sich emissionsmindernde Synergieeffekte bei der Entwicklung innovativer Motorenkonzepte. BTL-Kraftstoffe können prinzipiell auf ein breites und großes Biomassepotenzial zurückgreifen und nennenswert, aber erst langfristig zur Minderung von THG beitragen. Der Einsatz von GTL dagegen wird insgesamt eher zu signifikanten Mehremissionen an Treibhausgas führen, könnte aber bereits mittelfristig nennenswerte Marktanteile erlangen.

Biokraftstoffe

Allgemein wird mit der Verwendung von Biokraftstoffen ein großes Potenzial zur THG-Minderung verbunden. Allerdings ist das für die biogene Kraftstofferzeugung energietechnisch maximal verfügbare Biomassepotenzial in Deutschland (< 800 PJ/a) im Vergleich zum heutigen Endenergiebedarf des Straßenverkehrs (ca. 2 220 PJ) eher gering (Wuppertal Institut 2003). Darüber hinaus besteht bezüglich der biogenen Primärressourcen eine Nutzungskonkurrenz zu anderen nachfragenden Sektoren (z.B. Strom, Wärme, Chemie). Vor diesem Hintergrund können die von der EU angestrebten Marktanteile von Biokraftstoffen in Höhe von 5,75 Prozent bis 2010 und 8 Prozent bis 2020 als (sehr) ambitioniert betrachtet werden. Zudem ist aus heutiger Sicht der Einsatz von Biomasse im stationären Sektor aufgrund der dort höheren Kohlenstoffintensitäten deutlich klimaentlastender als im mobilen Bereich.

Die Klimabilanz von Biokraftstoffen hängt insgesamt deutlich von ihrer speziellen Prozesskette (z.B. Düngemitteleinsatz, Herstellungsverfahren) und der Verwendung der anfallenden Nebenprodukte (z.B. Verkauf oder Eigennutzung) ab. Aus diesem Grund sind die Angaben z.B. zu Klima- und Ökobilanzen insbesondere bei Biokraftstoffen zum Teil mit relativ hohen Unsicherheiten behaftet. Besonders deutlich tritt dies bisher bei dem hierzulande am meisten verwendeten Bio-Diesel aus Raps (genauer Rapsmethylester, abgekürzt RME) zu Tage. Dessen spezifische THG-Emissionen betragen im Mittel etwa 49 g CO_2-äquivalent/MJ (vgl. Abbildung 5-2), wenn das Nebenprodukt Glycerin in der chemischen Industrie abgesetzt wird (EUWTT 2003). Die Bandbreite allein für diese Prozesskette reicht dabei von rund 29 bis 69 g CO_2-äquivalent/MJ, entsprechend etwa ± 41 Prozent. Wenn das Glycerin jedoch als Tierfutter weiter verwendet (entsorgt) wird, dann erhöht sich der mittlere Emissionsfaktor um rund 10 Prozent auf 54 CO_2-äquivalent/MJ, mit einer Unsicherheit von etwa ± 35 Prozent.

Die Bandbreiten für die angegebenen Werte bei Bio-Methan aus Bioabfall, Bio-Ethanol aus Zuckerrüben und BTL aus Holzresten liegen dagegen mit Werten zwischen etwa ±4 und ±8 Prozent deutlich niedriger. Allerdings ist auch hier, je nach zugrunde gelegter Prozesskette, zum Teil mit erheblichen Veränderungen der spezifischen Emissionsfaktoren und ihren Bandbreiten zu rechnen. Alle drei Biokraftstoffe zeichnen sich im Unterschied zu RME dennoch sowohl durch ein größeres THG-Minderungspotenzial als auch durch ein größeres Angebotspotenzial aus. Dabei spielen Bio-Methan und -Ethanol als auch BTL (s.o.) derzeit noch kaum eine bis keine Rolle auf dem europäischen Markt.

Auf dem Weltmarkt dagegen ist Bio-Ethanol der am meisten (> 90 Prozent) genutzte Biokraftstoff, mit einem Handelsvolumen von knapp 4,9 Mrd. Litern (+32 Prozent gegenüber dem Vorjahr) in 2004 (Martinot 2005). Größter Produzent, Nutzer und Exporteur ist Brasilien, wo Bio-Ethanol aus Zuckerrohr bereits einen Marktanteil von rd. 14 Prozent erreicht hat. Hier bestehen zudem noch große und kurzfristig erschließbare Potenziale zum Ausbau der Produktionskapazitäten, die eine Steigerung der Exporte auf bis zu 6 Mrd. l/a bis 2010 ermöglichen. Bei günstigen handelswirtschaftlichen Rahmenbedingungen könnte der Marktanteil von Bio-Ethanol in Deutschland bzw. Europa durch (relativ billige) Exporte aus Brasilien daher relativ schnell gesteigert werden. Der weitere Ausbau der deutschen Ethanolproduktion – derzeit (Mai 2004) sind drei Produktionsanlagen mit einer Jahreskapazität von insgesamt etwa 590 Mio. Liter (rd. 0,5 Mio. t) Bio-Ethanol im Bau (Bensmann 2004) – könnte dadurch deutlich gebremst werden.

Fazit: Biokraftstoffe bieten prinzipiell große spezifische THG-Minderungspotenziale, die aber je nach Kraftstoff und Prozesskette stark variieren und auch deutlich an „Gewicht" verlieren können. Ihr möglicher absoluter Beitrag (ohne Importe) fällt dagegen – aufgrund der begrenzten Angebotspotenziale und bestehenden Nutzungskonkurrenzen – im Vergleich zur heutigen Kraftstoffnachfrage relativ gering aus. Darüber hinaus können durch den stationären Einsatz von Biomasse noch längerfristig größere Beiträge zur THG-Minderung erzielt werden als bei ihrer Verwendung für Biokraftstoffe. Daher ist ein verstärkter Einsatz von Biokraftstoffen aus Klimaschutzgesichtspunkten erst langfristig empfehlenswert.

Wasserstoff

Wasserstoff gilt allgemein – insbesondere im Zusammenhang mit der Brennstoffzellentechnik – als Hoffnungsträger für eine umweltfreundliche Energienutzung frei von Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen. Dieser Vorteil gilt jedoch zunächst nur am Ort der Nutzung. Entscheidend für die ökologische Gesamtbilanz ist aber die Herkunft des Wasserstoffs, dessen Herstellung energieintensiver ist als für viele andere Kraftstoffe, und seine Verwendungsform als tiefstkalte Flüssigkeit (LH_2) oder hoch verdichtetes Gas (CGH_2). Dabei schneidet fossil hergestellter LH_2 bei der Energiebilanz – für den in Frage kommenden Druckbereich von CGH_2 bis etwa 75 MPa – immer deutlich schlechter ab als CGH_2. Der hohe Energieaufwand für die Wasserstofferzeugung lässt es insgesamt ratsam erscheinen, vor dem breiten Einsatz von Wasserstoff zuerst in nennenswertem Umfang die Fahrzeuge effizienter zu machen.

Bei Verwendung des heute vorherrschenden industriellen Herstellungsverfahrens, der Dampfreformierung von Erdgas, würde die Bereitstellung von Wasserstoff als Kraftstoff im Falle von CGH_2 zu spezifischen Mehremissionen an Treibhausgasen in Höhe von etwa 15 Prozent im Vergleich zu Benzin und Diesel und von etwa gut 50 Prozent im Vergleich zu Erdgas selber führen (vgl. Abbildung 5-2). Bei der Bereitstellung von LH_2 würde sich dieser Malus noch um knapp einen Faktor 1,3 (auf bis zu 97 Prozent Mehremissionen im Vergleich zu Erdgas) erhöhen. Um unter dem Strich eine Reduzierung der Treibhausgase zu erreichen, müssten die Wasserstofffahrzeuge mindestens einen um den Faktor 1,15 bzw. 1,5 besseren Wirkungsgrad erzielen als Benzin- oder Diesel- bzw. Erdgas-PKW. Dies erscheint nur mit Brennstoffzellenfahrzeugen realistisch, die sich noch in der Entwicklung befinden (siehe Seite 65 f.).

Zur umfassenden Reduzierung der THG-Emissionen wird daher auf die Wasserstoffherstellung mittels quasi THG-freier Energiequellen wie erneuerbarer Energien oder auch Kohle (mit CO_2-Abtrennung und Speicherung) und Kernenergie gesetzt. So verspricht die Herstellung mittels Windstrom und Elektrolyse eine nahezu THG-freie Bereitstellung von CGH_2 (rd. –90 Prozent gegenüber Benzin/Diesel-Kraftstoff). Dies gilt – ganzheitlich betrachtet – allerdings erst, wenn der Anteil regenerativ erzeugten Stroms in der stationären Energieversorgung so hoch ist (ab ca. 40 bis 50 Prozent), dass der direkte Einsatz dort nicht mehr höhere Beiträge zur THG-Minderung leisten kann als der indirekte Einsatz via Wasserstoffelektrolyse im Verkehr (vgl. Wuppertal Institut 2003). Mit einer solchen Konstellation ist allerdings erst längerfristig, frühestens etwa ab dem Jahr 2040, zu rechnen. Dies dürfte in vergleichbarem Maße auch für die anderen Wege der „THG-freien" Wasserstofferzeugung mittels Kohlevergasung oder Elektrolyse mit nuklear erzeugtem Strom gelten.

Fazit: Der direkte Einsatz von Wasserstoff ermöglicht es lokal, die Emissionen von Treibhausgasen und in Kombination mit Brennstoffzellen die von Luftschadstoffen vollständig zu vermeiden. Ganzheitlich betrachtet – unter Einbeziehung seiner Herstellung und Bereitstellung –, kann Wasserstoff aber erst dann einen Beitrag zur Treibhausgasminderung leisten, wenn die spezifischen THG-Emissionen des stationären Energiesystems sich denen des Straßenverkehrs angenähert haben. Daher stellt Wasserstoff erst sehr langfristig (ab etwa 2040) eine sinnvolle Option zur Absenkung der THG-Emissionen dar. In Gebieten mit hoher Belastung an Luftschadstoffen (z.B. Kalifornien) kann Wasserstoff jedoch auch schon vorher große Bedeutung erlangen.

Potenziale zur Kraftstoffeinsparung bei konventionellen Otto- und Dieselmotoren sowie bei alternativen Motorkonzepten

Verbrennungsmotoren nach dem Otto- bzw. Dieselprinzip sind nach wie vor die vorherrschenden Antriebssysteme im heutigen Straßenverkehr. Ihre Auslegung (Hubraum und Bauweise) und Betriebsstrategie, ihr Umwandlungswirkungsgrad und Gewicht tragen dabei maßgeblich zum Kraftstoffverbrauch bei. Trotz beständiger technischer Fortschritte in Bezug auf Leistungs- und Verbrauchsoptimierung bestehen aber noch nach wie vor nennenswerte

motortechnische Potenziale zur Kraftstoffeinsparung. Deren (rasche) Erschließung kommt große Bedeutung zu, zum einen, weil – bei unverändertem Mobilitätsverhalten – der heutige Durchschnittsverbrauch von in der EU neu zugelassenen PKW in Höhe von etwa 6,5 l/100 km (entsprechend einer spezifischen Emission von ca. 163 g CO_2 pro km; ACEA 2003) aus Klimaschutzgründen immer noch um gut einen Faktor 2 zu hoch liegt. Zum anderen, weil die Einführung alternativer und effizienterer Antriebe wie z.B. Erdgas-, Hybrid- und Brennstoffzellenantriebe aus infrastrukturellen, technischen und/oder ökonomischen Gründen erst mittel- bis langfristig in der Flotte wirksam werden wird, so dass Diesel- und Ottomotoren noch auf lange Sicht den überwiegenden Anteil der Motoren im Straßenverkehr stellen werden.

Potenziale und Entwicklungen bei Ottomotoren

Der Durchschnittsverbrauch von neuen PKW mit Benzin-Ottomotor, wie sie im Jahr 2002 (2000) von den europäischen Herstellern in der EU verkauft wurden, lag bei ca. 7,2 l (7,5 l) pro 100 km (ACEA 2003). Dies entspricht Wirkungsgraden gemäß NEFZ (Neuer Europäischer Fahrzyklus) in Höhe von rund 13 bis 15 Prozent, gemessen vom Tank bis zum Rad. Technisch machbar waren zu der Zeit Wirkungsgrade von etwa rd. 21 Prozent. Allein aus diesem Vergleich zwischen verfügbarem und dem im Markt realisierten Stand der Technik (dieser Wert bezieht sich auf die verkauften Fahrzeuge und damit auf den Durchschnitt aller noch laufenden Modellreihen und nicht auf die jeweils neueste Modellreihe) ergibt sich noch ein deutliches Einsparpotenzial bei PKW mit Benzin-Ottomotoren, wobei der technisch machbare Wirkungsgrad von Benzinantrieben noch auf 24 bis 28 Prozent gesteigert werden kann (LBST 2002).

Einen wesentlichen Verlustfaktor bestehender Ottomotoren stellt die Drosselung des Motors im Teillastbetrieb dar (Drosselklappenverluste), zu dessen Verringerung bzw. Vermeidung sich mehrere Optionen bzw. Konzepte anbieten (vgl. Tabelle 5-1).

Von diesen Optionen zur alternativen Entdrosselung lässt sich die Abgasrückführung am einfachsten umsetzen, die in erster Linie der innermotorischen Reduzierung von NOx-Emissionen (durch Absenkung der Verbrennungs-Spitzentemperatur) dient. Dazu wird Abgas in Abhängigkeit vom Betriebspunkt des Motors so in das frische Luft-Kraftstoff-Gemisch zurückgeführt, dass der Motor bei gleichem Drehmoment weniger stark gedrosselt werden muss (geregelte äußere Abgasrückführung). Für die Entdrosselung mittels Abgasrückführung in Kombinaton mit variabler Ladungsbewegung via Kanalabschaltung gegenüber fixer Ladungsbewegung werden Kraftstoffeinsparungen im Bereich von etwa 5 Prozent angegeben (Schmid 2004). Deutlich höhere Einsparungen können noch durch Aufladung erzielt werden.

Noch mehr Potenzial bietet die Entwicklung von direkteinspritzenden Ottomotoren (BDE), bei denen das Benzin nicht mehr zentral in das allen Zylindern gemeinsame Saugrohr, sondern jeweils direkt in die Brennräume der Zylinder eingespritzt wird. Von den Herstellern werden verschiedene Konzepte verfolgt, die sich aber nach Betriebsart (Schicht- und Homogenbetrieb) und Einspritzstrategie (wand- oder strahlgeführt) klassifizieren lassen. Wandgeführte

Option	Einsparpotenzial*
Ladungsverdünnung mittels Abgasrückführung bzw. Gemischabmagerung	niedrig
Variable Ventilsteuerung, Zylinderabschaltung	mittel
Direkteinspritzung in Kombination mit Mager-/Schichtbetrieb (1. Generation, wandgeführt)	mittel
Direkteinspritzung in Kombination mit Mager-/Schichtbetrieb (2. Generation, strahlgeführt)	mittel – hoch
Lastpunktverschiebung mittels „Downsizing" bzw. Getriebesteuerung	mittel – hoch

*gegenüber Fahrzeugen ohne diese technische Ausstattung

Tabelle 5-1: Technische Einsparpotenziale zur Verringerung von Drosselklappenverlusten
Quelle: eigene Zusammenstellung

Einspritzsysteme bilden dabei gegenwärtig die Basis für die kommerziell verfügbaren BDE-Motoren. Für solche Systeme wird für Motoren mit Homogenbetrieb und variabler Ventilsteuerung eine Kraftstoffeinsparung im untersten Teillastbereich in Höhe von ca. 12 Prozent angegeben, die zum überwiegenden Teil aus der Entdrosselung durch die variable Ventilsteuerung resultiert. Noch etwas größere Verbrauchsminderungen in diesem Lastbereich (ca. 18 Prozent) lassen sich mit BDE-Motoren im Schichtbetrieb erreichen (Thiele 2004). Allerdings haben diese Motorkonzepte im Vergleich zu denen mit durchgängigem Homogenbetrieb den Nachteil, dass für die Abgasnachbehandlung zusätzlich ein NOx-Speicherkatalysator notwendig wird, was den erzielbaren Verbrauchsvorteil wieder schmälert (ca. ≤ 2 Prozent) und die Systemkosten erhöht. Aus diesen Gründen geht die technische Entwicklung von BDE-Motoren weiter in Richtung strahlgeführter Einspritzsysteme, von denen man sich sowohl noch höhere Einsparpotenziale (ca. 5 bis 20 Prozent) als auch bessere Emissionswerte als bei den wandgeführten Systemen verspricht.

Unabhängig von den technischen Varianten ist aber die mögliche Verbrauchsminderung von BDE-Motoren generell im unteren Teillastbereich am größten und nimmt mit steigender Motorlast ab. Für den NEFZ werden Verbrauchsminderungspotenziale zwischen 10 und 16 Prozent angegeben. Die tatsächlich erzielbare Verbrauchsminderung hängt aber immer vom typischen individuellen Fahrverhalten ab, so dass es bei sehr sportlicher Fahrweise bzw. hohen Geschwindigkeiten sogar auch zu einer leichten Verbrauchszunahme kommen kann (Pehnt 2001, 101 f.). Dennoch ist bei der Verbreitung von PKW mit BDE-Motoren mit einer deutlichen Ausschöpfung der genannten Einsparpotenziale zu rechnen, da der Großteil der Fahrleistung auf innerstädtische Fahrten entfällt.

Darüber hinaus besteht noch eine Reihe weiterer motortechnischer Ansatzpunkte, die eine nennenswerte Verbrauchsoptimierung ermöglichen, auf die hier aber aus Platzgründen nicht näher eingegangen werden kann. Dazu gehören insbesondere Maßnahmen wie die

- Reduzierung der Reibungsverluste im Motor durch Optimierung von Kurbeltrieb, Kolben, Lager, Nebenaggregaten (z.B. Ölpumpe) und Erhöhung der mittleren Betriebstemperatur,
- Gewichtsoptimierung der Motorkonstruktion vor allem bei großvolumigen Motoren (Optimierung der Kurbelwelle, Übergang von Reihen- zu V-Motoren),
- Einführung von Start-Stop-Funktion bei BDE-Motoren, d.h. der Motor wird bei stehendem Fahrzeug abgeschaltet und bei Start oder Weiterfahrt möglichst ohne Anlasser wieder gestartet,
- Einführung von innovativen Einspritz- und Zündtechniken (z.B. Piezo-Injektoren für strahlgeführte Einspritzsysteme, Laserzündung),
- Hybridisierung des Antriebssystems (s.u.).

Insgesamt steht also noch ein vielfältiges Bündel an einzel- und systemtechnischen motorischen Maßnahmen zur Verbrauchsminderung bei Ottomotoren zur Verfügung.

Potenziale und Entwicklungen bei Dieselmotoren

Bei den neuen PKW mit Dieselmotor, wie sie im Jahr 2002 (2000) von den europäischen Herstellern in der EU verkauft wurden, lag der Durchschnittsverbrauch mit ca. 5,7 l (5,9 l) pro 100 km und damit um rund 21 Prozent niedriger als bei den Benzin-PKW. Dies entspricht Wirkungsgraden gemäß NEFZ in Höhe von rund 17 bis 18 Prozent, gemessen vom Tank bis zum Rad. Aus dem Vergleich zum heutigen Stand der Technik (möglich sind Wirkungsgrade von ca. 24 Prozent und mehr) ergibt sich auch bei Diesel-PKW noch ein signifikantes Einsparpotenzial , wobei langfristig als obere Grenze für den Wirkungsgrad von Dieselantrieben 26 bis 30 Prozent für technisch machbar gehalten werden, was nur wenig oberhalb dessen liegt, was für Ottomotoren für machbar gehalten wird (LBST 2002).

Die Ansatzpunkte und Potenziale zur weiteren Verbrauchsminderung bei Dieselmotoren fallen damit im Vergleich zu Ottomotoren deutlich geringer aus, so dass letztere bei entsprechender Potenzialausschöpfung grundsätzlich bis auf wenige Prozentpunkte mit den Dieselmotoren gleichziehen können. Der wesentliche Grund dafür ist, dass ein Großteil des gesamten Potenzials durch die Einführung und Verbreitung von direkteinspritzenden und aufgeladenen Dieselmotoren bereits erschlossen wurde. Neben dem dort verbleibenden, eher geringen Optimierungspotenzial, wie z.B. der Verbesserung des Hochdruckwirkungsgrads und der Flexibilisierung der Turboaufladung, liegen nennenswerte weitere Minderungspotenziale vor allem im „Downsizing" (s.u.), im Bereich der Minimierung der innermotorischen Reibungsverluste und verbesserter Motorenkonstruktion sowie in der Hybridisierung, wie sie in ähnlicher Höhe auch bei Ottomotoren bestehen.

Im Vordergrund der weiteren Entwicklung von Dieselmotoren steht daher vor allem die Emissionsminderung, insbesondere von NOx- und Partikelemissionen. Wenn es nicht gelingt, deren Ausstoß innermotorisch (s.u., HCCI-Konzept) hinreichend zu reduzieren, dann werden Diesel-PKW künftig durchweg mit NOx-Katalysatoren und Partikelfiltern ausgerüstet werden müssen, um die EURO-5-Norm zu erfüllen. Solche zusätzlichen Abgasnachbehandlungssysteme (ANS) tragen in der Regel aber zu einer signifikanten Erhöhung des Kraftstoffverbrauches bei: ca. 1 bis 4 Prozent bei Partikelfiltern und 1 bis 2 Prozent bei NOx-Speicherkatalysatoren (UBA/BUWAL/UBA 2004, 93, EUTTW 2003; Pehnt 2001, 107). Der heutige Vorteil von Diesel-PKW vor Benzin-PKW beim Kraftstoffverbrauch (z.B. 25 Prozent, gemessen in Liter pro 100 km beim DaimlerChrysler A 200 CDI gegenüber dem A 200; Lückert et al. 2005) und beim THG-Ausstoß (ca. 15 Prozent, gemessen in g CO_2/km) würde allein dadurch signifikant reduziert. Dabei verliert insbesondere der klimarelevante Vorteil von Diesel-PKW gegenüber Benzin-PKW an Bedeutung (vgl. Kasten zu Diesel-PKW).

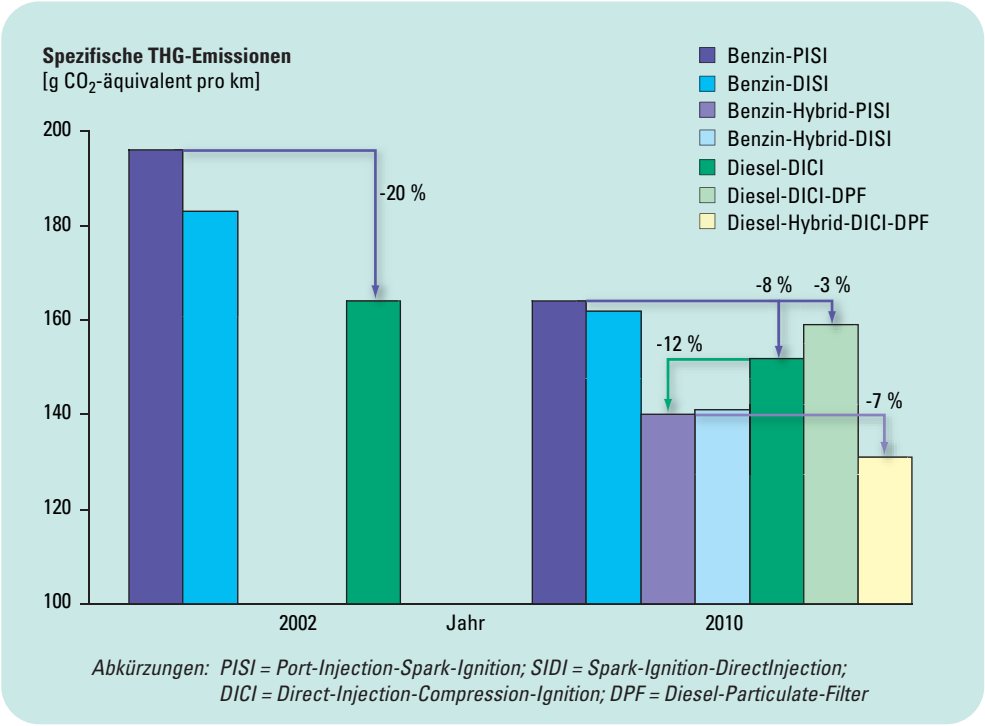
Potenziale und Entwicklungen bei Otto- und Dieselmotoren im Vergleich

Die bisher genannten Verbrauchswerte und technischen Optionen zur Kraftstoffeinsparung bezogen sich auf bestehende PKW (vor allem Neuwagen) und die Angaben von technischen Potenzialen basieren auf dem Vergleich einzelner PKW mit und ohne der entsprechenden technischen Ausstattung. Die Frage, wie die Entwicklungsperspektiven für verbrauchsgünstigere Benzin- und Diesel-PKW im Vergleich aussehen, lässt sich auf dieser Basis (breite Fahrzeugpalette) allerdings nur schwer aufzeigen. Daher wird im Folgenden auf eine aktuelle und umfassende, so genannte „Well-to-Wheel"-Studie (hierin werden die Perspektiven künftiger Fahrzeugtechnik unter Berücksichtigung der Kraftstoff-Bereitstellung analysiert) der europäischen Mineralöl- und Automobilindustrie und der EU-Kommission zurückgegriffen. Deren Ergebnisse beziehen sich auf realitätsnah und praxisgerecht definierte Referenzfahrzeuge der verschiedenen Antriebsarten und sind somit gut vergleichbar; sie basieren zudem auf der gemeinsamen Analyse verschiedener Hersteller und sind daher allgemein anerkannt.

Demnach könnten bei neuen PKW mit Ottomotoren kurz- bis mittelfristig (bis 2010) Kraftstoffeinsparungen zwischen etwa 10 Prozent (bei Direkteinspritzern) und 20 Prozent (bei Motoren mit Saugrohreinspritzungsmotoren) im Vergleich zum jeweiligen Referenz-Benzin-PKW realisiert werden. Im Vergleich dazu wird bei Diesel-PKW im gleichen Zeitraum mit Effizienzsteigerungen in Höhe von etwa 6 Prozent (ohne Partikelfilter) und 1 bis 2 Prozent (mit Partikelfilter), bezogen auf den Referenz-Diesel-PKW (mit Direkteinspritzung), gerechnet (EUTTW 2003; UBA/BUWAL/UBA 2004). PKW mit Ottomotoren können also kurz- bis mittelfristig, insbesondere unter Berücksichtigung erforderlicher Emissionsanforderungen, deutlich zu den heute noch verbrauchsgünstigeren Diesel-PKW aufschließen. Eine entsprechende Verminderung des jeweiligen Durchschnittsverbrauchs im Bestand wird dagegen erst zeitversetzt zur Geltung kommen.

In welchem Umfang sich dementsprechend die spezifischen THG-Emissionen (inklusive der Kraftstoffbereitstellung) von Benzin- und Diesel-PKW bis zum Jahr 2010 einander annähern können, zeigt die folgende Abbildung 5-3. Hiernach hat das Referenzfahrzeug für einen PKW

Abbildung 5-3:
Annäherung der spezifischen THG-Emissionen von zukünftigen Benzin- und Diesel-Referenz-PKW im Rahmen ihrer realen Entwicklungspotenziale bis 2010
Quelle: EUWTW 2003



Abkürzungen: PISI = Port-Injection-Spark-Ignition; SIDI = Spark-Ignition-DirectInjection; DICI = Direct-Injection-Compression-Ignition; DPF = Diesel-Particulate-Filter

der Kompaktklasse mit Ottomotor und Saugrohreinspritzung (Benzin-PISI) des Jahres 2002 einen um etwa 20 Prozent höheren THG-Ausstoß als für einen vergleichbaren Diesel-PKW mit Direkteinspritzung (Diesel-CIDI). Dieser Vorteil schrumpft bereits heute im Vergleich zu einem Benzin-PKW mit Direkteinspritzung (Benzin-SIDI) auf etwa 12 Prozent. Bei Umsetzung der bis zum Jahr 2010 für möglich gehaltenen Optimierungspotenziale bei Benzin- und Diesel-PKW nähern sich beide Konzepte hinsichtlich der THG-Emissionen auf bis zu 2 bis 3 Prozent oder 7 bis 8 Prozent an, je nachdem, ob für die zukünftigen Diesel-PKW der Einsatz von Partikelfiltern notwendig wird oder nicht. Von einer Hybridisierung können Diesel-PKW verbrauchs- und emissionsseitig insgesamt stärker profitieren als Benzin-PKW, so dass sie diesbezüglich selbst mit DPF um mehr als 7 Prozent besser abschneiden als Hybrid-Diesel-PKW des Jahres 2010. Findet die Hybridisierung in der Flotte bei Benzinern allerdings früher statt als bei Diesel-PKW (Beispiel Toyota, s.u.), so könnte sich der heutige Vorteil von Diesel-PKW bei Verbrauch und THG-Emissionen auch umkehren.

Die genannten Zahlen können zwar nicht als repräsentativ für die bestehenden bzw. zukünftigen PKW-Flotten betrachtet werden, dennoch geben sie die Tendenz der Annäherung von Benzin- und Diesel-PKW bei Kraftstoffverbrauch und THG-Ausstoß in der richtigen Größenordnung wieder.

Neue homogene Brennverfahren mit kontrollierter Kraftstoffselbstzündung für Otto- und Dieselmotoren (CAI- und HCCI-Motoren[9])

Eine möglichst homogene und magere Verbrennung des Kraftstoffs im Motor ist die wesentliche Voraussetzung für eine möglichst saubere Verbrennung. Ziel ist es, dadurch den Schadstoffgehalt im Abgas bereits innermotorisch so weit zu senken, dass der Aufwand für die Abgasnachbehandlung deutlich reduziert werden kann oder ggf. sogar ganz auf separate Systeme zur Abgasnachbehandlung (ANS), wie z.B. Partikelfilter oder NOx-Speicherkatalysator, verzichtet werden kann, ohne die geforderten Emissionsgrenzwerte zu verletzen.

9 CAI = controlled auto-ignition; HCCI = homogenous charge compression ignition.

Zu diesem Zweck werden bislang verschiedene Eigenschaften von Diesel- und Ottomotoren, nämlich homogene Verbrennung (Otto) und Selbstzündung (Diesel), jeweils neu miteinander kombiniert und weiterentwickelt. Die entsprechenden Entwicklungsziele lassen sich wie folgt vereinfacht zusammenfassen:

- zum einen ein fortgeschrittener Ottomotor (s.o.), bei dem das homogene, direkt eingespritzte magere Kraftstoffgemisch im Brennraum kontrolliert zur Selbstzündung gebracht wird (CAI²-Ottomotor)
- und zum anderen ein fortgeschrittener Dieselmotor (s.o.), bei dem der unter hohem Druck eingespritzte Kraftstoff mit Hilfe neuer Einspritzstrategien und hoher Abgasrückführungsraten vor der Selbstzündung ausreichend homogenisiert wird (HCCI²-Dieselmotor).

Die prinzipiellen technischen Unterschiede zwischen Otto- und Dieselmotor verschwinden in diesem Fall zunehmend. In einem weiteren Schritt könnten sie dann ggf. zu einem einzigen Motorkonzept (dem so genannten CCS[10]-Motor) zusammengeführt werden. Hierbei verspricht man sich Synergieeffekte bei Verwendung spezieller synthetischer Kraftstoffe wie GTL und BTL (siehe Seite 53 f.). Allerdings ist bis zur Realisierung eines CCS-Motors noch nennenswerter FuE-Aufwand zu betreiben. Dementsprechend mangelt es auch noch an Angaben zum technischen Optimierungspotenzial. Kurz- bis mittelfristig wird diese Entwicklung keinen Beitrag zur Einsparung von Kraftstoff und CO_2-Emissionen leisten können.

Gleiches gilt in abgeschwächter Form aber auch noch für die CAI- und HCCI-Motoren, für die jedoch noch keine belastbaren bzw. einheitlichen Potenzialabschätzungen vorliegen. Demnach sollen mit HCCI-Dieselmotoren die Partikelemissionen nahezu vollständig vermieden, die NOx-Emissionen auf bis zu max. 4 Prozent eines Dieselmotors mit konventioneller Hochdruckeinspritzung abgesenkt und zudem eine mittlere Kraftstoffeinsparung von ca. 5 Prozent erreicht werden können (Thiele 2004). Andere Quellen weisen dagegen bei Dieselmotoren einen signifikanten Anstieg des Kraftstoffverbrauchs aus (s.u.), was den möglichen positiven Beitrag dieser Technik zur Verbrauchsminderung zumindest in Frage stellt. Bei CAI-Ottomotoren wird eine NOx-Absenkung um zwei Größenordnungen im Vergleich zu konventionellen Ottomotoren und eine Kraftstoffeinsparung zwischen 5 und 10 Prozent im NEFZ erwartet (Ogink 2004). Partikelemissionen werden – wie bei heutigen Ottomotoren auch – nahezu vollständig vermieden.

Diesen Vorteilen stehen aber natürlich auch einige Nachteile gegenüber. So kann die homogene Verbrennung in beiden Motoren nur im (unteren) Teillastbereich stabil betrieben werden, was den erzielbaren Nutzen schmälert und den Entwicklungs- und Betriebsaufwand erhöht. Speziell im Dieselmotor steigen außerdem die Bildung von Kohlenmonoxid (CO) und Kohlenwasserstoff (CH) sowie der Kraftstoffverbrauch signifikant an (Enderle et al. 2005). Darüber hinaus sind bis zur Realisierung zudem noch einige anspruchsvolle technische Hürden zu nehmen, wie z.B. die Kontrolle der Verbrennung, die Optimierung der Einspritzstrategien, der Brennraumgeometrie und des Abgasrückführungssystems. Eine vollständig homogene Verbrennung wird zudem voraussichtlich erst nach mehreren Zwischenschritten mit teilhomogenen Motorenkonzepten erreicht werden. Deren Minderungspotenzial für NOx- und Partikelemissionen wird jedoch im Vergleich zu den homogenen Konzepten deutlich geringer ausfallen.

Es bleibt von daher insgesamt sehr fraglich, ob CAI-Otto und HCCI-Dieselmotoren rechtzeitig eingeführt werden können, um die kommenden Anforderungen an den Schadstoffausstoß (wie die EURO-5-Norm, gültig ab 2009) auch ohne (aufwändige) ANS zu erfüllen. Der Handlungsdruck diesbezüglich ist bei Dieselmotoren ungleich größer als bei Ottomotoren, da sie bei NOx- und Partikelemissionen schlechter abschneiden. Ohne ausreichende innermotorische

10 CCS = combined combustion system.

Schadstoffreduzierung werden sie ansonsten kurzfristig mit entsprechenden ANS ausgerüstet werden müssen, wodurch der relative Verbrauchsvorteil um bis zu etwa 6 Prozent gegenüber dem Ottomotor abnehmen kann (vgl. Kasten 2, Seite 41).

Kraftstoffeinsparung und THG-Minderung durch „Downsizing" des Motors

Der Kraftstoffverbrauch eines Verbrennungsmotors hängt vom jeweiligen Betriebspunkt, also von Fahrsituation und -verhalten ab. Er ist hoch im unteren Leistungsbereich, bei hohen Drehzahlen bzw. bei voller Leistung. Die beste Ausnutzung des Kraftstoffes erfolgt dagegen in einem Bereich (b_{emin}), der bei etwa 90 Prozent des maximalen Drehmomentes und bei mittleren Drehzahlen liegt (vgl. Abbildung 5-4). Der Hubraum als ein Maß für die Größe und Leistung des Motors bestimmt dabei, wie gut der typische Bedarfsschwerpunkt mit dem verbrauchsgünstigen Motorbereich übereinstimmt. Der Ansatz von Motor-„Downsizing" ist, den Hubraum so zu optimieren (verkleinern), dass der Bedarfsschwerpunkt möglichst gut mit dem verbrauchsgünstigen Bereich übereinstimmt.

Die Verkleinerung des Hubraumes senkt zudem die erreichbare Höchstgeschwindigkeit ab, was sich insgesamt ebenfalls günstig auf den Kraftstoffverbrauch auswirkt. Die ebenfalls verringerte Leistungsfähigkeit des Motors könnte sich allerdings dann ungünstig auf den Kraftstoffverbrauch auswirken, wenn die Fahranteile mit hoher Drehzahl steigen. Die gewohnte Fahrdynamik kann jedoch über die Gewichtsminderung des kleineren Motors und mittels Turbo-Aufladung relativ einfach aufrechterhalten werden, ohne dass es zu einer signifikanten Schmälerung der Kraftstoffeinsparung kommt. Gerade die Kombination von „Downsizing" und Reduzierung des Fahrzeuggewichtes bietet wiederholt die Erschließung von verbrauchs- und emissionssenkenden Synergieeffekten (weniger Gewicht → kleinerer Motor → weniger Gewicht usw.) und damit insgesamt das größte Einsparpotenzial hinsichtlich Energie und Treibhausgasen.

Das Einsparpotenzial ergibt sich daraus, dass der Hubraum bestehender PKW zu Gunsten (unnötig) hoher Leistungsreserven und Höchstgeschwindigkeiten und in Relation zur überwiegenden Fahrsituation im unteren Leistungsbereich in der Regel deutlich überdimensioniert ist. Zum Beispiel könnte bei einem Mittelklasse-PKW der Kraftstoffverbrauch im Stadtverkehrszyklus des NEFZ um etwa gut 14 Prozent gesenkt werden (von etwa 9,0 l auf 7,7 l pro 100 km), wenn allein der Hubraum des Motors von 1,8 l auf 1,4 l (–22 Prozent) verringert würde (Petersen/Diaz-Bone 1998, 133 f.). Zugleich würde die erreichbare Höchstgeschwindigkeit um 11 Prozent auf 165 km/h abgesenkt und die Beschleunigungszeit, um von 0 auf 100 km/h zu kommen, um 3,2 s auf 14,5 s ansteigen. Der verkleinerte Motor und die geringere Höchstgeschwindigkeit ermöglichen jedoch im Gegenzug signifikante Gewichtseinsparungen bei Motor und z.B. der Karosserie, wodurch die Verringerung der Leistungsfähigkeit (zum Teil) wieder kompensiert werden kann. Alternativ oder ergänzend können die Leistungsreserven des verkleinerten Motors durch die Erhöhung der Verdichtung des Luft-Kraftstoff-Gemisches mit Hilfe von Abgas-Turboaufladung wieder auf das Niveau des größeren Motors angehoben werden. Diese Art von Motor-Downsizing (Hubraumverkleinerung plus Turboaufladung) gehört zwar zur gängigen Praxis, insbesondere bei nahezu allen modernen PKW-Dieselmotoren und haubraumstarken Autos, doch das verfügbare technische Potenzial (inkl. gewichtsmindernder Synergieeffekte) zur Verbrauchsminderung wird bisher oft nicht voll ausgeschöpft.

Das Motor-„Downsizing" vor allem in Kombination mit Gewichtsminderung bietet neben der Direkteinspritzung die größten Potenziale zur Kraftstoffeinsparung bei Verbrennungsmotoren, insbesondere beim Ottomotor. So beruhen die Projektionen von EUCAR, die bei Ottomotoren eine technische Effizienzsteigerung von bis zu 10 Prozent bzw. 15 Prozent bei DISI- bzw. PISI-Motoren im Zeitraum von 2002 bis 2010 für möglich halten, hauptsächlich auf der Umsetzung von „Downsizing". Dazu wird eine Absenkung des Hubraums von 1,6 l auf 1,3 l (–19 Prozent) zzgl. einer Turboaufladung im Verhältnis von 1,2 : 1,0 unterstellt. Allgemeine Angaben sehen mögliche Verbrauchseinsparungen für das „Downsizing" des Motorhubraums inklusive variabler Turboaufladung zwischen 20 und 30 Prozent im NEFZ, wenn überdies

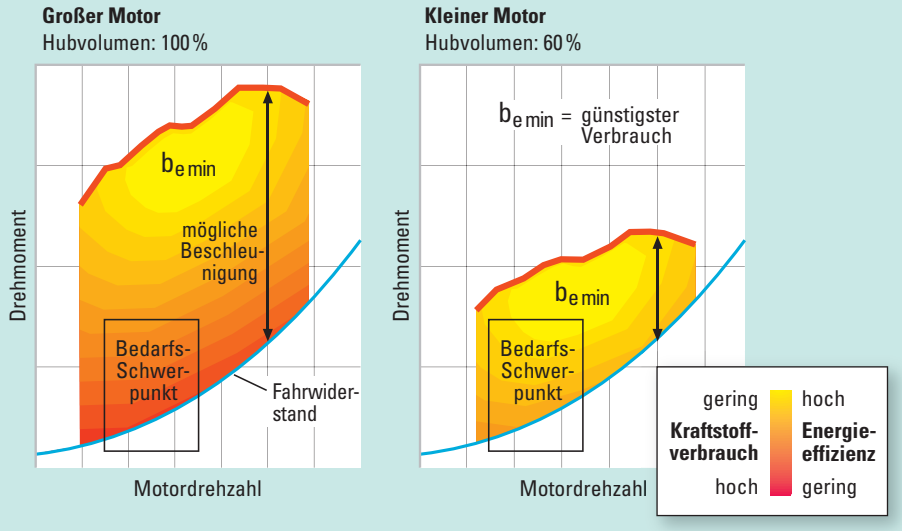


Abbildung 5-4:
Optimierung von Motorauslegung und -betrieb im Hinblick auf den Bedarfsschwerpunkt („Downsizing")
Quelle: Petersen (1998)

die Gewichtsminderung der herunterskalierten Motoren berücksichtigt wird (Pehnt 2001, 102). Allerdings müsste vor der Erschließung dieser Potenziale erst eine Trendumkehr bei der durchschnittlichen Hubraumgröße und Motorleistung der PKW-Flotte erfolgen, da diese zwischen 1995 und 2002 um rund 6 Prozent und mehr als 20 Prozent zugenommen haben (ACEA 2003).

Entwicklungen und Potenziale bei PKW mit Hybridantrieben

PKW mit Hybridantrieben haben generell zwei verschiedene Antriebssysteme, die jeweils unterschiedliche Kraftstoffe nutzen. Dabei handelt es sich in der Regel um mindestens ein elektrisches System (Elektromotor und/oder Batterie). Je nach der Art, wie die beiden Antriebssysteme miteinander gekoppelt sind, unterscheidet man ferner serielle, parallele und split oder leistungsverzweigte Hybridantriebe, die unterschiedliche Minderungspotenziale aufweisen (s.u.).

Hybridelektrische Fahrzeuge (Ottomotor, Elektromotor/-generator und Batterie) gehören zum Stand der Technik. Dennoch werden sie derzeit weltweit nur von zwei Herstellern (Toyota, Honda) in der unteren Mittelklasse kommerziell angeboten. Marktschwerpunkte sind Japan und die USA, der europäische Markt gewinnt aber an Bedeutung. Der Anteil am deutschen PKW-Markt ist noch vernachlässigbar gering. Das – trotz relativ höherer Anschaffungskosten – gestiegene Interesse legt jedoch nahe, dass mittelfristig nennenswerte Anteile an den Neuzulassungen auf dem deutschen Markt möglich sind. Darüber hinaus gibt es nur sehr wenige weitere Hersteller, die Prototypen entwickeln und in Kleinserien fertigen. Ansonsten besteht der Großteil der einschlägigen Forschung und Entwicklung in der Modellierung von Fahrzeugen mit Hybridantrieben. Es handelt sich bei dieser Technik also um einen bestehenden potenten Nischenmarkt, der im Unterschied zu allen anderen Antriebssystemen aktuell nur von zwei Herstellern besetzt wird.

Die Vorteile von hybridelektrischen Antrieben liegen vor allem darin, dass sie die Rückgewinnung von Bremsenergie ermöglichen und den Wirkungsgrad von Verbrennungsmotoren verbessern können. Durch die zusätzliche elektrische Antriebsquelle kann der Verbrennungs-

motor kleiner ausgelegt und häufiger bis ggf. durchgängig – je nach Konzept – verbrauchsoptimal betrieben werden (siehe „Downsizing“). Zudem erleichtern Hybridantriebe den Einsatz von Start/Stop-Funktionen und können die elektrischen Verbraucher effizienter versorgen. Von Nachteil sind dagegen die gestiegene Komplexität, die höheren Anforderungen an das gesamte Antriebssystem (inkl. Steuerung und Regelung), das höhere Gewicht und die höheren Anschaffungskosten. Dennoch können Hybridantriebe unter dem Strich und vor allem im Stadtverkehr in nennenswertem Umfang zur Einsparung von Kraftstoff und Treibhausgasen beitragen.

Die möglichen Einsparungen fallen dabei je nach Hybridantrieb unterschiedlich aus. Mit seriellen Antrieben sind größere Emissionsminderungen möglich als mit der (kostengünstigeren) parallelen Variante, da dort der Verbrennungsmotor quasistationär im verbrauchsgünstigsten Punkt betrieben werden kann (Pehnt 2001, 110 f.). Das größte Minderungspotenzial haben dagegen nach Angaben von Toyota leistungsverzweigte Hybridantriebe mit sehr hoher elektrischer Leistung (Wandt 2004). Dazu gehört der neue Toyota Prius HSD 2003 (57 kWmech und 50 kWel), der nach Herstellerangaben einen Gesamtwirkungsgrad von insgesamt etwa 32 Prozent erreicht, 4 Prozentpunkte mehr als bei seinem Vorgängermodell. Die Steigerung des Wirkungsgrades wird dabei überwiegend auf die Optimierung der Bremsenergierückgewinnung (rd. 1/3; u.a. durch die Einführung eines elektronischen Bremssystems – „brake-by-wire“) und der Systemregelung (rd. 1/4) zurückgeführt. Der Kraftstoffverbrauch des neuen Prius im NEFZ beträgt 4,3 l Benzin pro 100 km und der CO_2-Ausstoß etwa 104 g CO_2 pro km. Dieses Hybridfahrzeug schneidet damit bei Kraftstoffverbrauch und THG-Emissionen im Vergleich zum europäischen Durchschnitt neu zugelassener Benzin-PKW (Stand 2002) um etwa 40 Prozent deutlich besser ab. Selbst im Vergleich zu den sparsameren, zukünftigen PKW mit Ottomotoren (Stand 2010) verbliebe demnach noch ein Vorsprung von etwa 26 Prozent in Bezug auf den Kraftstoffverbrauch und Ausstoß an THG.

Die von EUCAR für realistisch gehaltenen Effizienzsteigerungen bei Benzin-PKW mit parallelem Hybridantrieb bis zum Jahr 2010 fallen dagegen geringer aus als bei der heutigen Toyota Prius Generation. Bei ihrem Kraftstoffverbrauch könnte demnach eine Reduktion um etwa 28 Prozent auf gut 5 l Benzin pro 100 km gegenüber dem Stand von 2002 erreicht werden, woraus ein Ausstoß an Treibhausgasen in Höhe von etwa 120 g CO_2-äquivalent pro km resultiert (EUTTW 2003). Mit der Hybridisierung kann dabei in etwa ein gleich großer, aber zusätzlicher, relativer Minderungseffekt (13 bis 15 Prozent) erzielt werden wie bei der „konventionellen“ Optimierung von Benzin-PKW (s.o.). Noch größere zusätzliche Einsparpotenziale bietet die Hybridisierung von Diesel-PKW (rd. 18 Prozent) und Erdgas-PKW (rd. 24 Prozent). Sie ist für die weitere energetische Optimierung von Diesel-PKW besonders wichtig, da hier die „konventionellen“ Potenziale (z.B. Direkteinspritzung) bereits weitgehend erschlossen wurden. Hybridisierte Diesel-PKW mit Partikelfilter hätten dann einen um etwa 8 Prozent (10 g CO_2-äquivalent pro km) geringeren CO_2-Ausstoß als vergleichbar fortgeschrittene hybridisierte Benzin-PKW. Eine noch größere Reduktion der Treibhausgasemissionen könnte mit der Hybridisierung von Erdgas-PKW erreicht werden, die mit rund 85 g CO_2-äquivalent pro km etwa 22 Prozent weniger Treibhausgase emittieren als die Dieselhybride.

Allerdings stellen die genannten Einsparungen insgesamt eher überschätzte obere Werte dar, die ganzheitlich betrachtet und im Vergleich zur Praxis signifikant schlechter ausfallen. Zum einen, weil Hybrid- und Brennstoffzellen-Fahrzeuge bei der Verbrauchsbestimmung gemäß NEFZ, aufgrund des hohen Stadtverkehranteils, unrealistisch günstig abschneiden. So ist bei Verwendung realitätsnäherer Fahrzyklen wie z.B. MODEM[11] oder HYZEM[12] mit einem vergleichbar hohen Abschlag (Größenordnung 10 Prozentpunkte) wie bei BZ-PKW (s.u.) zu rechnen. Zum anderen ist die aufwändigere Herstellung von Hybrid-PKW im Vergleich zu

11 MODEM = Modelling of Emissions and Fuel Consumption in Urban Areas.
12 HYZEM = Hybrid Technology Approaching Efficient Zero Emission Mobility (nach dem gleichnamigen europäischen Projekt).

konventionellen PKW zu berücksichtigen, wodurch der über den Lebenszyklus kumulierte Energiebedarf und Ausstoß an THG-Emissionen ansteigt. Dennoch dürften Hybrid-PKW (besonders solche wie der Toyota Prius HSD 2003) unter dem Strich insgesamt einen signifikanten Vorteil in Bezug auf Kraftstoff und THG-Emissionen gegenüber heutigen und zukünftigen nicht hybridisierten PKW mit Verbrennungsmotoren behalten.

Entwicklungen und Potenziale bei Brennstoffzellen-Antriebssystemen
PKW mit von Brennstoffzellen (BZ) angetriebenem Elektromotor befinden sich gegenwärtig in der fortgesetzten Demonstrations- und Erprobungsphase. An der entsprechenden Forschung und Entwicklung sowie Markteinführung von Brennstoffzellen-Fahrzeugen arbeiten mittlerweile die meisten Hersteller. Demzufolge gibt es eine Vielzahl an Prototypen aus nahezu allen PKW-Fahrzeugklassen und eine erste Kleinserie an Brennstoffzellen-Bussen, die jeweils in zahlreichen unterschiedlichen Feldtests intensiv erprobt werden. Eine kommerzielle Markteinführung von BZ-PKW könnte nach Angaben von Herstellern kurz- bis mittelfristig (etwa ab dem Jahr 2010) erfolgen. Gleichwohl erscheint eine Relevanz für den Massenmarkt frühestens ab dem Jahr 2020 realistisch. Die Gründe dafür liegen im verbleibenden (fertigungs-) technischen Entwicklungsbedarf bis zur praxistauglichen Serienreife, den noch um mehrere Größenordnungen teuren Antriebs- und Systemkosten im Vergleich zu Verbrennungsmotoren sowie der mangelnden Infrastruktur für den benötigten Kraftstoff Wasserstoff.

Zum Einsatz kommen ausschließlich PEM-Brennstoffzellen (PEM = Polymer Elektrolyt Membran), da sie von ihren Eigenschaften her (niedrige Betriebstemperatur, dynamisches Last- und gutes Teillastverhalten) am besten von allen Brennstoffzellentypen für die Anforderungen des mobilen Einsatzes geeignet sind. Ansonsten liegt der Schwerpunkt der Entwicklung auf BZ-PKW mit Wasserstofftank, deren Elektromotor entweder allein von der BZ oder kombiniert mit einer Batterie (Hybrid-BZ-PKW) angetrieben werden. BZ-PKW mit „konventionellem" Kraftstofftank und Reformer (Reformer-BZ-PKW) zur bordeigenen Wasserstoffherstellung (z.B. aus Benzin oder Erdgas) spielen dagegen eine untergeordnete Rolle. Ihr Vorteil, dass sie auch schon bei einer erst im Aufbau befindlichen Infrastruktur von Wasserstofftankstellen in den Markt eingeführt und genutzt werden können, reicht bisher nicht aus, um die bestehenden Hemmnisse in Form deutlich höherer Kosten, höherer technischer Anforderungen und höherem Kraftstoffverbrauch im Vergleich zu den anderen beiden BZ-PKW-Arten zu kompensieren.

Heutige BZ-PKW mit Wasserstofftank erreichen im NEFZ schätzungsweise Wirkungsgrade von gut 40 Prozent und für die Zukunft werden von der Automobilindustrie Wirkungsgrade bis etwa 50 Prozent erwartet (LBST 2002, 5–38). Zum Beispiel wird von EUCAR in ihren Projektionen für die technische Entwicklung von PKW-Antrieben unterstellt, dass bei BZ-Antrieben bis zum Jahr 2010 Wirkungsgrade zwischen etwa 47 Prozent (Volllast) und 58 Prozent (bei 10-prozentiger Last) erreicht werden können. Der große Charme von zukünftigen BZ-Antrieben liegt also darin, dass sie Wirkungsgrade ermöglichen, die im NEFZ um bis zu etwa 30 Prozentpunkte höher liegen als z.B. bei zukünftigen PKW mit Ottomotoren. Der erreichbare Wirkungsgradvorteil hängt aber neben den unterstellten Erfolgen bei der Antriebsentwicklung auch maßgeblich von denen beim Speichersystem (Reduzierung der Speicherverluste) ab. Ein Verfehlen der Entwicklungsziele bei der Speichertechnik könnte immerhin zu Abstrichen beim Gesamtwirkungsgrad um bis zu gut 10 Prozent führen. Ferner ist die Angabe des Wirkungsgrades vom Fahrzyklus abhängig, wobei der BZ-Antrieb vom hohen, realitätsfernen Stadtverkehranteil des NEFZ profitiert. In realitätsnäheren Fahrzyklen (wie z.B. HYZEM) fällt der Wirkungsgradvorteil von BZ-Antrieben gegenüber konventionellen Antrieben zwar deutlich geringer aus (z.B. um 13 Prozentpunkte bei PKW der Kompaktklasse), bleibt aber dennoch deutlich besser (LBST 2002, 4–15 f.).

In welchem Umfang sich dieser Vorteil zur Reduzierung von Primärenergieeinsatz und Treibhausgasemissionen umsetzen lässt, hängt allerdings von der „Vorgeschichte" des Wasserstoffs ab (vgl. Seite 56). Bei der (heute überwiegend verwendeten) Herstellung aus Erdgas lässt sich

im NEFZ gegenüber zukünftigen Benzin-PKW mit Direkteinspritzung eine Primärenergieeinsparung in Höhe von etwa 20 Prozent (29 Prozent für die Hybridvariante) erreichen. Im Vergleich zu hybridisierten Benzin-PKW könnte die Energieeinsparung mit „nur" noch 6 Prozent (16 Prozent für den Hybrid-BZ-PKW) geringer ausfallen.

Das Reduktionspotenzial in Bezug auf die THG-Emissionen fällt dagegen jeweils höher aus, da der niedrigere energiespezifische Kohlenstoffgehalt von Erdgas im Vergleich zu Benzin den Wirkungsgradnachteil bei der Kraftstoffbereitstellung überwiegt. Demnach können mittels BZ-PKW etwa 40 Prozent (46 Prozent bei Hybrid-BZ-PKW) der THG-Emissionen von zukünftigen Benzin-PKW mit Direkteinspritzung vermieden werden. Gegenüber parallelen Hybrid-Benzin-PKW sinkt das Potenzial um etwa 10 Prozent (EUWTW 2003). Die THG-Emissionen der BZ-PKW bzw. Hybrid-BZ-PKW (Stand 2010) betragen demnach etwa 98 bzw. 88 g CO_2-äquivalent pro km. Ihre THG-Emissionen lassen sich noch deutlich weiter reduzieren, wenn der Wasserstoff aus erneuerbaren Energien hergestellt wird. Dieser Effekt wird allerdings erst langfristig (ab etwa dem Jahr 2040) tatsächlich zum Tragen kommen können, wenn durch die direkte Nutzung der erneuerbaren Energien im stationären Energiesektor nicht mehr größere THG-Reduktionen erzielt werden können als im Verkehrssektor.

Ganzheitlich betrachtet, wird das klimarelevante Minderungspotenzial von BZ-PKW allerdings noch dadurch geschmälert, dass die Treibhausgasemissionen für ihre Herstellung etwa doppelt so hoch sind wie für einen konventionellen PKW mit Ottomotor (Pehnt 2001, 114). Demgegenüber stehen weitere verbrauchsgünstige Synergieeffekte in Bezug auf den steigenden Verbrauchsanteil von elektrischen PKW-Komponenten. Insgesamt gesehen, bieten BZ-Antriebe für PKW die größten Potenziale zur Reduzierung von THG-Emissionen und zur Diversifizierung der Kraftstoffquellen.

Entwicklungen und Potenziale bei Erdgas- und Wasserstoffverbrennungsmotoren
Mit komprimiertem Erdgas (CNG) betriebene Kraftfahrzeuge gehören zum Stand der Technik, in den meisten europäischen Ländern haben sie aber aufgrund mangelnder infrastruktureller Voraussetzungen derzeit trotzdem nur einen vernachlässigbar geringen Marktanteil. Dabei handelt es sich zum überwiegenden Teil (> 80 Prozent) um PKW mit Ottomotoren. Bei diesen wiederum handelt es sich zum überwiegenden Teil um adaptierte (um- oder nachgerüstete) CNG-PKW und bivalente Antriebskonzepte. Die spezifischen Eigenschaften des Kraftstoffes Erdgas können daher nicht optimal ausgenutzt werden. Demnach weisen solche bivalenten CNG-PKW im NEFZ einen um etwa 3 Prozent höheren energieäquivalenten Kraftstoffverbrauch auf wie konventionelle Benzin-PKW, bei ansonsten vergleichbaren fahrtechnischen Parametern (Stand 2002; EUWTT 2003). Dennoch liegen ihre CO_2-äquivalenten Treibhausgasemissionen mit rd. 150 g pro km – inkl. Vorkette – im Vergleich zu den Benzin-PKW noch um etwa 22 Prozent niedriger. Zudem haben CNG-PKW einen deutlich geringeren Ausstoß an Luftschadstoffen (siehe Seite 52).

Mit monovalenten CNG-Ottomotoren, die im Vergleich zu den bivalenten Motoren mit erhöhtem Verdichtungsverhältnis (12,5 : 1) betrieben werden, können die oben genannten Verbrauchsnachteile gegenüber den Benzin-PKW auf relativ einfache Weise auch heute schon zumindest egalisiert werden. Die Herausforderung hierbei liegt weniger in der Motortechnik als vielmehr in der Optimierung der Speichertechnik zur Realisierung vergleichbarer Reichweiten wie bei bivalenten CNG-PKW. Ansonsten bestehen bei den Antrieben von CNG-PKW grundsätzlich die gleichen Ansatzpunkte sowie vergleichbare bis eher leicht bessere Potenziale zur Verbrauchsminderung als bei den Ottomotoren für Benzin-PKW. Zum Beispiel wird für CNG-PKW mit PISI-Motoren (PISI = Port Injection Spark Ignition) bis zum Jahr 2010 (Bezugsjahr 2002) eine motortechnische Effizienzsteigerung von etwa 16 Prozent für möglich gehalten (EUWTT 2003), ein Prozentpunkt mehr als bei den entsprechenden Benzinmotoren.

PKW mit Wasserstoff-Verbrennungsmotoren befinden sich gegenwärtig in der fortgesetzten Demonstrations- und Erprobungsphase. Ihre Entwicklung wird im Vergleich zu Brennstoffzellenfahrzeugen von deutlich weniger Herstellern betrieben. Demnach gibt es weltweit auch nur eine vergleichsweise geringe Zahl von Prototypen, hauptsächlich aus der oberen Mittelklasse bis Oberklasse Bei den Motorkonzepten handelt es sich überwiegend um bivalent ausgelegte Ottomotoren, die also sowohl mit Wasserstoff als auch mit Benzin betrieben werden können. Damit wird zum einen der fehlenden Infrastruktur für den Kraftstoff Wasserstoff und zum anderen dem geringeren volumetrischen Heizwert von Wasserstoff, d.h. der geringeren PKW-Reichweite, im Vergleich zu Benzin Rechnung getragen. Von Nachteil ist allerdings der prinzipiell höhere Kraftstoffverbrauch im Vergleich zu PKW mit monovalenten Motoren, egal für welchen Kraftstoff. Die Auslegung und der Kraftstoffverbrauch künftiger Wasserstoff-PKW werden also maßgeblich durch den Stand der Infrastruktur (Tankstellendichte) beeinflusst. Mit der Einführung effizienterer (monovalenter) Wasserstoff-PKW ist daher erst dann zu rechnen, wenn es eine hinreichend gute Tankstellendichte für den Kraftstoff Wasserstoff gibt. Aufgrund deutlich höherer PKW-Kaufpreise und Kraftstoffpreise sowie des langen zeitlichen Vorlaufs bis zur Realisierung einer signifikanten Tankstellendichte ist aber generell erst mittel- bis langfristig mit einer spürbaren Markteinführung von PKW mit Wasserstoffmotoren zu rechnen.

Die technischen Ansatzpunkte zur Verbrauchsoptimierung (Direkteinspritzung, „Downsizing“, usw.) sind die gleichen wie bei den Otto- und Dieselmotoren auch (s.o.), nur für einen anderen Kraftstoff. Von daher wird erwartet, dass für PKW mit optimierten monovalenten Wasserstoffmotoren in Zukunft etwa gleich günstige Energie bezogene Verbrauchswerte wie bei zukünftigen fortgeschrittenen Benzinmotoren erreicht werden können (LBST 2002, 5–37). In einer Projektion von EUCAR (European Council for Automotive R&D) wird sogar damit gerechnet, dass bis zum Jahr 2010 Wasserstofffahrzeuge mit „kleinem“ turboaufgeladenem Verbrennungsmotor (1,3 l Hubraum) entwickelt werden können, die im NEFZ einen um ca. 11 Prozent (7 Prozent) geringeren Energie bezogenem Kraftstoffverbrauch als vergleichbar fortgeschrittene künftige Benzin-PKW (Diesel-PKW mit Partikelfilter) aufweisen (EUWTT 2003, 17 ff.). Dieses Ergebnis trügt jedoch, da es den deutlich höheren Primärenergiebedarf für die Wasserstoffherstellung außen vor lässt. Damit PKW mit Wasserstoffmotoren auch primärenergetisch günstiger abschneiden, müsste deren Wirkungsgrad noch um mindestens einen Faktor 7 besser sein als der von Benzin-PKW, wenn der Wasserstoff mit dem heute effizientesten Verfahren der Dampfreformierung aus Erdgas hergestellt wird. Dies erscheint allerdings eher unrealistisch.

Kraftstoffeinsparung durch Getriebe-Optimierung

Es gibt derzeit im wesentlichen vier verschiedene Typen von Schaltgetrieben für das Auto: Handschaltgetriebe, Automatik- und automatisierte Getriebe sowie stufenlos verstellbare Getriebe. Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch haben die jeweiligen Übertragungsverluste und Gewichte der Getriebe sowie die Wahl der Übersetzung für verschiedene Fahrgeschwindigkeiten, d.h. die Fahrstrategie.

Handschaltgetriebe haben sehr hohe Übertragungswirkungsgrade (bis zu 99 Prozent) und sind technisch nahezu ausgereift. Sie sind weniger komplex aufgebaut und leichter als die anderen Getriebearten. Ihr Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch hängt vor allem von dem individuellen Fahrverhalten und der Schaltstrategie des Nutzers ab. Zur Senkung des Kraftstoffverbrauchs bieten sich demnach vor allem entsprechende Schulungen für verbrauchsarmes Fahren an. Technische Optimierungspotenziale bestehen dagegen ggf. nur noch in begrenztem Maße in der Gewichtsreduzierung des Getriebes durch die Verwendung anderer Materialien.

Heutige Automatikgetriebe dienen in erster Linie der Komfortsteigerung und kommen häufig in leistungsstarken Autos zum Einsatz. Sie sind schwerer, teurer und komplexer aufgebaut als Handschalt- und automatisierte Getriebe und haben einen etwas schlechteren Übertragungswirkungsgrad. Der damit verbundene prinzipbedingte Kraftstoffmehrverbrauch kann allerdings durch verbrauchsoptimal ausgerichtete Schaltprogramme wieder kompensiert werden. Dies gilt vor allem im Vergleich zu den Handschaltgetrieben, da (voll-)automatisierte Getriebe ebenfalls den Einsatz entsprechender Schaltprogramme ermöglichen. Im Zuge der Weiterentwicklung der Kfz-Elektronik, insbesondere der elektronischen Mess-, Steuerungs- und Regeltechnik, bieten die Schaltprogramme weitere Potenziale zur Verbrauchsoptimierung.

Automatisierte Getriebe liegen in Bezug auf Kosten, Gewicht und Fahrkomfort zwischen den Handschalt- und Automatikgetrieben, allerdings mit größerer Affinität zu den Handschaltgetrieben. Sie sollen in erster Linie die Bedienung des Schaltgetriebes vereinfachen und die Wirtschaftlichkeit erhöhen. Dazu gibt es sie in zwei Varianten, als (teil-)automatisierte Handschaltgetriebe und (voll-)automatisierte Schaltgetriebe. Erstere sind heute weiter verbreitet und kommen serienmäßig zum Einsatz. Durch die automatisierte Handschaltung, d.h. bessere Anpassung der Gangübersetzung an den jeweiligen Motorbetrieb und schnellere Schaltzeiten, kann der Kraftstoffverbrauch gegenüber konventionellen Handschaltgetrieben bereits signifikant reduziert werden. Für PKW der Kompaktklasse (Citroën C2 und Opel Corsa) wurden so Einsparungen zwischen rund 2 und 3 Prozent erzielt (Schmid 2004). Bei Übergang auf (voll-)automatisierte Schaltgetriebe können weitere Verbrauchseinsparungen realisiert werden. Zudem können Gewicht und Bauraum eingespart werden, indem weitere mechanische Komponenten durch elektronische Komponenten und Mikroprozessoren ersetzt werden können. Allerdings nähern sich die Kosten dann denen für Automatikgetriebe an.

Stufenlos verstellbare Getriebe (SVG) erlauben im Vergleich zu den anderen Getrieben eine kontinuierliche Veränderung der Übersetzung und damit eine optimale Anpassung des Getriebes an den Motorbetrieb. Sie erweitern damit den Spielraum sowohl für verbrauchsoptimiertes Fahren als auch für den Fahrkomfort. Zum Beispiel konnten im Vergleich zu einem 5-Gang-Handschaltgetriebe und einem 5-Gang-Automatikgetriebe Kraftstoffeinsparungen von rund 4 Prozent und 8 Prozent erzielt werden (Schmid 2004). Dabei sind SVG vergleichbar groß und schwer wie Automatikgetriebe, jedoch aufwändiger herzustellen, komplexer aufgebaut und eher teurer. Sie werden daher bislang nur für wenige Fahrzeuge und in begrenztem Umfang angeboten. Am weitesten verbreitet sind derzeit rein mechanische Ausführungen, rein hydraulische oder elektrische sind aber auch möglich (Bosch 2002). Insbesondere bei den elektrischen SVG zeichnen sich für die Zukunft viele Synergieeffekte im Hinblick auf eine zunehmende und sich weiterentwickelnde Elektronisierung der Kraftfahrzeuge (Hybrid- und Brennstoffzellenantrieb, elektronische Steuerung von Getriebe und Motor, Fahrassistenzsysteme usw.) ab, die das technische Potenzial für Kraftstoffeinsparungen deutlich erhöhen können. Zum Beispiel wurde in einer Simulation für ein SVG in Kombination mit einem Assistenzsystem für vorausschauendes Fahren eine Kraftstoffersparnis im Stadtverkehr von bis zu 20 Prozent gegenüber einem automatischen Getriebe ermittelt (Wallentowitz/Neunzig o.A.).

Getriebe-Strategien zur Kraftstoffeinsparung

Unabhängig von der Getriebetechnik kann der Kraftstoffverbrauch durch die Erhöhung der Anzahl von Übersetzungen um ein paar Prozentpunkte gesenkt werden, weil dadurch der Betriebspunkt des Motors in Richtung höherer Wirkungsgrade verschoben wird. Zum Beispiel kann mit einem 6-/7-fachen Automatikgetriebe statt einem 5-Fachen eine Kraftstoffersparnis zwischen 5 und 6 Prozent erreicht werden (Schmid 2004). Diese Option stellt für jeden Fahrzeuganbieter eine relativ einfache, schnell umsetzbare und zugleich wirksame Strategie bei Neuwagen dar.

Für Wagen der Kompaktklasse und Mittelklasse bietet sich zudem zumindest der Wechsel von einfachen zu automatisierten Handschaltgetrieben mit geeigneten Schaltempfehlungen für

den Fahrer an. Im Zuge der fortschreitenden Elektronisierung des Autos empfiehlt sich dann auch der Wechsel zu automatisierten Schaltgetrieben, die, ergänzt durch geeignete Schaltprogramme, den Verbrauch weiter absenken. Durch verschiedene Typen an Schaltprogrammen, von z.B. besonders sparsam bis zu sportlich-dynamisch, kann den individuellen Wünschen ausreichend Rechnung getragen werden. Auf Automatikgetriebe sollte zugunsten von automatisierten Schaltgetrieben eher verzichtet werden.

SVG sind insbesondere für Wagen der oberen Mittelklasse und Oberklasse empfehlenswert, da sie dem weiten Leistungsspektrum des Motors am besten angepasst werden können. Der üblicherweise gehobene Ausstattungsgrad dieser Autos kommt am ehesten den großen technischen Synergie-Potenzialen der (elektrischen) SVG entgegen. Zusammen mit adaptiven Steuer- und Fahrassistenzsystemen lassen sich hier die größten Kraftstoffersparnisse erzielen.

Insgesamt scheinen automatisierte Getriebe in Verbindung mit Schaltprogrammen künftig die größten Potenziale und Gestaltungsspielräume im Hinblick auf Verbrauchsoptimierung, Fahrleistung und -komfort zu ermöglichen. Den Schaltprogrammen kommt dabei eine besondere Rolle zu. Zum einen können sie durch ihre Ausgestaltung ggf. eine eigene, markencharakteristische Note vermitteln. Zum anderen überlassen sie dem Autofahrer durch ein Angebot verschiedener Fahrprofile nach wie vor das Gefühl einer individuell bestimmten Fahrweise und können selbst bei sportlich gewählter Fahrweise noch zur Verbrauchsreduktion beitragen.

Äußere Fahrwiderstände

Beim Fahren treten die so genannten äußeren Fahrwiderstände auf, für deren Überwindung Energie in Form von Kraftstoff benötigt wird. Autoseitig werden sie vor allem durch die Reifen (Rollwiderstand), die Form- und Oberflächengüte (Luftwiderstand) und die Masse (Roll-, -Beschleunigungs- und Steigungswiderstand) eines Autos bestimmt. Die Fahrwiderstände tragen dabei in unterschiedlicher Stärke zum Kraftstoffverbrauch bei.

Kraftstoffeinsparung durch Optimierung des Rollwiderstandes (Reifen, Gewicht)
Der Rollwiderstand eines Autos wird maßgeblich durch die elastische Verformung der verwendeten Reifen bestimmt. Die Verformung wiederum ist abhängig von der Fahrzeugmasse und dem Untergrund sowie von Größe, Aufbau, Material und Luftdruck der Reifen. Der Einfluss eines Reifens auf den Kraftstoffverbrauch wird durch den so genannten Rollwiderstandsbeiwert c_R beschrieben. Die c_R-Werte heutiger PKW-Reifen reichen je nach Typ und Größe von etwa 0,009 bis 0,014 für Sommerreifen und von etwa 0,010 bis 0,014 für Winterreifen (TÜV Automotive 2003). Dabei können die Rollwiderstandsbeiwerte selbst innerhalb einer Reifenklasse, je nach Hersteller, um bis zu 30 Prozent noch beträchtlich voneinander abweichen.

Die Kriterien des Umweltzeichens „Blauer Engel“ für lärmarme und kraftstoffsparende Kraftfahrzeugreifen (RAL-UZ 89), die einen c_R-Wert $\leq$ 0,011 und ein Abrollgeräusch kleiner als 72 dB(A) erfüllen müssen, wurden bei einem Test von insgesamt 82 Markenreifen verschiedener Hersteller von mehr als einem Drittel der Testreifen erfüllt (UBA 2003b). Dagegen lagen rund 30 Prozent der einzelnen Reifen um 10 Prozent und mehr über dem geforderten c_R-Wert des Umweltzeichens. Würden solche Reifen durch Reifen, die die Kriterien des Blauen Engels erfüllen, ersetzt oder würde ihr c_R-Wert entsprechend optimiert, dann ließe sich allein dadurch der Kraftstoffverbrauch eines Autos um wenigstens etwa 2 bis 3 Prozent, in Einzelfällen sogar um mehr als 5 Prozent reduzieren. Darüber hinaus ließen sich die c_R-Werte von PKW-Reifen kurz- bis mittelfristig noch weiter absenken, auf etwa 0,008 bis 0,007 (Schmid 2004), was einer Verbesserung des c_R-Wertes um 12 bis 27 Prozent gegenüber den heutigen Anforderungen des Blauen Engels entspricht. Nimmt man diesen Wert als Maßstab für heutige Reifen, dann ließe sich somit zukünftig eine Kraftstoffersparnis von etwa 3 bis 7 Prozent allein durch den Einsatz optimierter Leichtlaufreifen realisieren. Ein schöner Nebeneffekt ist, dass diese Reifen außerdem einen wesentlichen Beitrag zur Lärmminderung leisten würden.

Der Rollwiderstand eines Autos kann aber nicht nur durch rollwiderstandsärmere Reifen reduziert werden, sondern auch durch die Verringerung des gesamten Fahrzeuggewichtes (s.u.). Hieraus ergeben sich zusätzliche positive Nebeneffekte, wie geringere Belastung und Verschleiß der Reifen sowie bessere Einsatzmöglichkeiten für kleinere Reifengrößen, mit tendenziell kleineren c_R- und c_W-Werten.

Kraftstoffeinsparung durch Optimierung des Luftwiderstandes (Gestalt des Autos, Stirnfläche)

Der Luftwiderstand eines Autos wird maßgeblich durch die Fahrgeschwindigkeit (zum Quadrat), also das individuelle Fahrverhalten, und die effektiv wirksame Querschnittsfläche (Stirnfläche) des Autos und den so genannten c_W-Wert (Luftwiderstandsbeiwert), als Maß für die Form- und Oberflächengüte des Autos, bestimmt. Das Produkt aus Stirnfläche und c_W-Wert ($A \cdot c_W$) dient dabei als technischer Leitindikator für die autospezifische Größe des Luftwiderstandes. Die Stirnfläche eines Autos hängt eng von dem Raum- und Komfortangebot des jeweiligen Fahrzeuges ab und wächst in der Regel mit dem entsprechenden Angebot bzw. mit der Fahrzeugklasse. Als übliche Größen für PKW können heute Stirnflächen von gut 2 m^2 und mehr und c_W-Werte um 0,3 angesehen werden, wobei die Stirnflächen von PKW zu PKW zum Teil deutlich variieren, während die c_W-Werte nahezu gleich beiben. Der entsprechende Leitwert ($A \cdot c_W$) von etwa 0,6 bildet dennoch einen hinreichend guten Vergleichswert zur Abschätzung von Optimierungspotenzialen.

Die Stirnfläche konnte bei 4-sitzigen Konzeptfahrzeugen bis auf etwa 1,7 m^2 reduziert werden, ohne dass mit nennenswerten Komforteinbußen zu rechnen wäre (Schmid 2004). Und in der Kompaktwagenklasse wurden bereits c_W-Werte von 0,25 für den Audi A2 und den von Greenpeace umgebauten Twingo (Smile-Prototyp) erreicht. Dementsprechend könnte der autospezifische Luftwiderstand (Produkt $A \cdot c_W$) prinzipiell um bis zu 30 Prozent abgesenkt werden. Zusätzliche Potenziale zur Reduzierung des c_W-Wertes können ggf. noch durch die Optimierung des Fahrzeugbodens (Glättung) erschlossen werden, was einen c_W-Wert von etwa 0,2 ermöglichen würde (Schmid 2004). Unter Berücksichtigung anderer Einflussfaktoren wie z.B. Komfort- und Sicherheitsansprüche erscheint eine bis zu 10-prozentige Reduzierung des autospezifischen Luftwiderstandes bereits kurz bis mittelfristig umsetzbar. Dadurch könnte der Kraftstoffverbrauch je nach zugrunde gelegtem Fahrzyklus bzw. Durchschnittsgeschwindigkeiten um etwa gut 1 Prozent (bei 40 km/h) oder um etwa 4 Prozent (bei 120 km/h) reduziert werden. Langfristig, bei vollständiger Umsetzung der Optimierungspotenziale, könnten etwa 3 bis 6 Prozent im Stadtverkehr und bis etwa 12 Prozent im Autobahnverkehr an Kraftstoff eingespart werden.

Kraftstoffeinsparung durch Gewichtsreduzierung

Je größer das Gewicht, desto größer werden sowohl der Rollwiderstand als auch der Beschleunigungs- und Steigungswiderstand und damit der Kraftstoffverbrauch. Die Reifen werden stärker belastet und verschleißen ggf. schneller und zur Beibehaltung gleicher Fahrdynamik ist eine größere Motorleistung erforderlich, was wiederum ein Mehr an Gewicht und Verbrauch mit sich bringt. Das Fahrzeuggewicht ist daher neben dem Antriebskonzept mithin einer der entscheidenden Verbrauchsfaktoren.

Aufgrund steigender Anforderungen hinsichtlich Sicherheit und Komfort (Servolenkung, Airbags, Elektronisches Stabilitäts-Programm, verstärkte Karosserie, Klimaanlage usw.) und unverändertem Angebot bzw. Nachfrage nach leistungsstarken Motoren setzt sich der Trend zu immer schwereren PKW weiter fort: „So hat sich das Fahrzeuggewicht [einer Fahrzeugklasse] in den letzten 25 Jahren um durchschnittlich 20 bis 30 Prozent erhöht." (LBST 2002). Anfang 2004 wog der Großteil aller in Deutschland zugelassenen PKW (etwa 38 Prozent) zwischen 1 400 und 1 700 kg (siehe Abbildung 5-5). Insgesamt 41 Prozent waren noch schwerer als 1 700 kg, während nur 1/5 aller PKW ein Gewicht zwischen 1 000 und 1 400 kg hatten. Die „leichte" Gewichtsklasse (unter 1 000 kg) ist dagegen mit einem Anteil von nur etwa 1 Prozent quasi vernachlässigbar klein. Sieht man sich weiter die Gewichtsverteilung der neu zugelassenen PKW

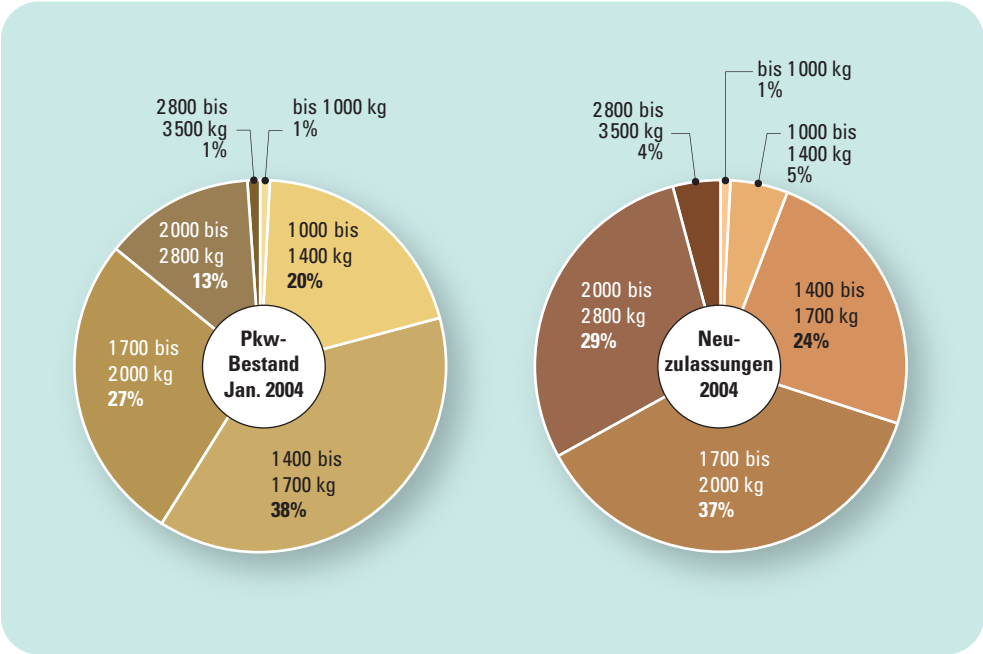


Abbildung 5-5:
Bestand an PKW nach zulässigem Gesamtgewicht Anfang 2004
Quelle: KBA 2004a; KBA 2005a

in 2004 an, dann ist mit einer deutlichen Verlagerung der PKW-Anteile zugunsten höherer Gewichtsklassen zu rechnen: Etwa 70 Prozent aller neu zugelassenen PKW in 2004 wogen mehr als 1 700 kg und ein gutes Drittel sogar mehr als 2 000 kg.

Der Trend zu schwereren PKW wiegt gleich doppelt schwer, da er sich trotz der in der gleichen Zeit bereits vollzogenen technischen und konstruktiven Anstrengungen (z.B. Optimierung der Karosseriestatik, Einsatz von Kunststoffen) zur Gewichtsreduzierung durchgesetzt hat. Die dabei bestehenden Optionen sind allerdings nur zum Teil ausgenutzt worden. Eine Trendumkehr ist aber wohl nur dann zu erwarten, wenn zusätzliche Anreize zu deren Ausschöpfung gesetzt werden. Möglichkeiten hierzu bestehen beispielsweise auf administrativem Wege, z.B. durch Absenken des maximal zulässigen Gesamtgewichts für PKW. In der Praxis wird aber wohl eher auf entsprechende technische Lösungen zurückgegriffen werden. Dafür bieten sich grundsätzlich folgende drei Ansätze mit unterschiedlichem Minderungspotenzial an Kraftstoff und Treibhausgasen an:

- Verstärkter Einsatz von Leichtbau-Materialien, die bei vergleichbaren bis besseren technischen Eigenschaften eine kleinere Dichte als der heute üblicherweise verwendete Werkstoff Stahl haben
- Einführung und Verbreitung neuer gewichtssparender Konstruktions- und Bauweisen
- Downsizing des gesamten Fahrzeugkonzeptes, d.h. bei ausreichender Minimierung des Gesamtgewichtes wird für gleiche Fahrdynamik nur noch ein kleinerer und leichterer Motor mit weniger Leistung benötigt. Dadurch können wiederum auch andere Bauteile „kleiner“ ausgelegt und weiteres Gewicht eingespart werden.

Bei einem Wechsel zu Leichtbaumaterialien bietet sich mit Aluminium, Magnesium, Titan, Faserverbundwerkstoffen (z.B. Kohlenstofffasern oder Carbon), Keramiken als auch höherfesten Stählen eine Vielzahl an Optionen an. Zusammen mit fertigungstechnischen und konstruktiven Verbesserungen und Innovationen (z.B. Laserschweißen, Audi-Space-Frame) ergeben sich insgesamt vielfältige Handlungsmöglichkeiten und nennenswerte Potenziale zur Gewichtseinsparung. Die entsprechenden Ansatzpunkte und Potenziale sind im Fahrzeug allerdings recht unterschiedlich verteilt (siehe Tabelle 5-2). Das größte absolute und direkt erschließbare Potenzial besteht im Bereich der Karosserie. Hier lassen sich allein durch einen

Tabelle 5-2:
Potenziale zur Kraftstoffeinsparung durch Gewichtsreduzierung am Beispiel eines konventionellen PKW der oberen Mittelklasse
Quellen: LBST 2002; Pehnt 2001; eigene Berechnungen

Baugruppen	Konventionelles Gewicht	Realistisches Gewichtsminderungspotenzial	Resultierende Kraftstoffeinsparung[d)]
Karosserie	514 kg	50 %	0,6 l Benzin/100 km
Antrieb	499 kg	10[a)] bis 50[b)] %	0,1–0,6 l Benzin/100 km
Fahrwerk	394 kg	10 bis 50[c)] %	0,1–0,5 l Benzin/100 km
Sonstiges	62 kg	55 %	0,1 l Benzin/100 km
Gesamt	1 470 kg	25 bis 50 %	0,9–1,8 l Benzin/100 km

a) bei unveränderter Leistungsauslegung; b) bei angepasster/reduzierter Leistung; c) technisches Potenzial
d) für Einsparfaktor: 0,25 l Kraftstoff/(100 km•100 kg)

Materialwechsel (z.B. von Stahl zu Aluminium) Gewichtseinsparungen in einer Höhe von 45 Prozent und mehr erreichen (LBST 2002). Ohne Berücksichtigung von Sekundäreffekten wurde für die Karosserie eines gehobenen Mittelklasse-PKW ein Potenzial zur Gewichtsminderung von etwa 50 Prozent ermittelt. Eine ähnlich große Gewichtseinsparung ist auch im Bereich Antrieb (inkl. Getriebe) möglich, wenn der Motor kompakter gebaut und die heute vorherrschende Überdimensionierung (große Hubräume) abgebaut würde. Beim Fahrwerk ist zwar rein technisch ebenfalls eine Minderung um bis zu 50 Prozent möglich, aus Kostengründen wird sie in der Praxis mit etwa 10 Prozent allerdings deutlich niedriger ausfallen. Insgesamt erscheint eine Absenkung des gesamten Fahrzeuggewichtes – je nach Antriebsdimensionierung – in einer Größenordnung um bis zu 25 oder bis zu 50 Prozent realistisch.

Die dadurch tatsächlich erzielbare Kraftstoffeinsparung hängt vor allem von der Fahrweise, genauer von Umfang und Häufigkeit der Beschleunigungsphasen ab. Sie ist daher bei Fahrten in Städten in der Regel größer als bei solchen auf Landstraßen und Autobahnen. Eine Reduktion der Fahrzeugmasse um 100 kg kann schätzungsweise eine Kraftstoffersparnis von etwa 0,4 l Kraftstoff pro 100 km im Stadtverkehr und zwischen 0,25 und 0,3 l Kraftstoff pro 100 km in typischen Fahrzyklen bewirken (Pehnt 2001).

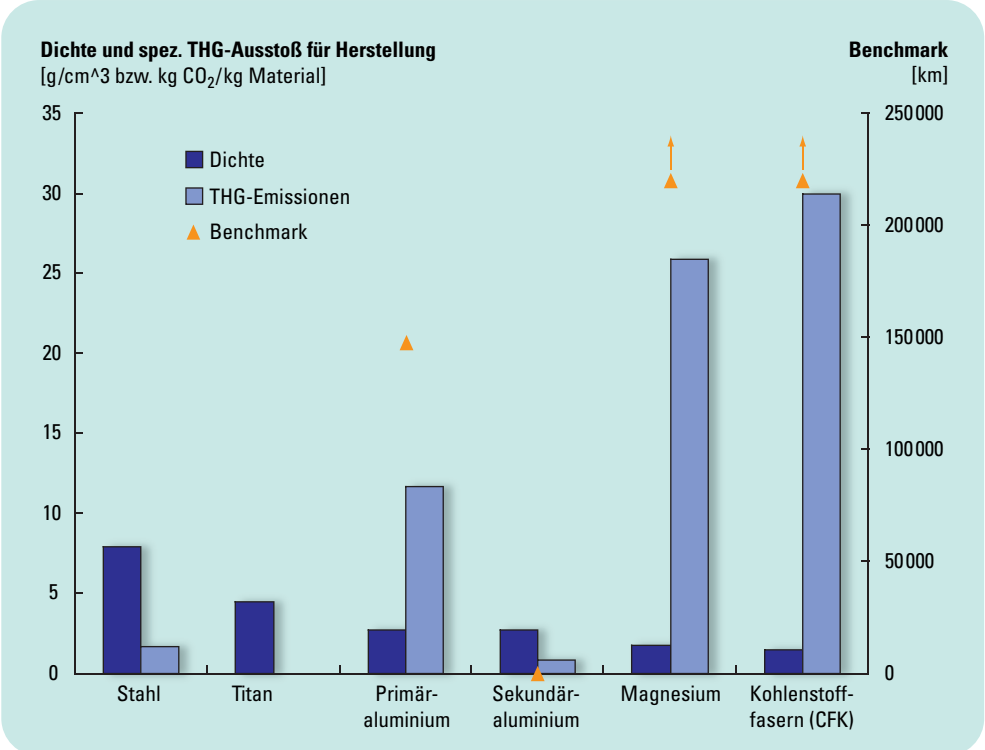


Abbildung 5-6:
Dichte,spezifische Treibhausgasemissionen und Benchmarks für positive Treibhausgasbilanz verschiedener Materialien für den Fahrzeugbau
Quelle: Pehnt 2001; eigene Berechnungen

Bei einer PKW-Fahrleistung von z.B. 12 000 km/a könnten somit durch eine Gesamtoptimierung des Fahrzeuggewichtes Treibhausgasemissionen in Höhe von etwa 255 bis 510 kg im Jahr pro PKW reduziert werden, wovon allein etwa 33 bis 67 Prozent auf das Konto einer „erleichterten" Karosserie gehen. Diese Angaben gelten jedoch nur für die Nutzungsphase des Autos. Für die Treibhausgasbilanz sind aber auch die klimarelevanten Emissionen für die Herstellung der alternativ verwendeten leichteren Werkstoffe zu berücksichtigen, die ohne Recyclingkreisläufe erheblich über denen von Stahl liegen. Das effizientere Auto muss diese zuvor emittierten Mehremissionen erst wieder einfahren, bevor es unter dem Strich tatsächlich zu einem positiven Klimaschutz-Effekt kommt. Die dafür erforderlichen Fahrleistungen sind von Material zu Material sehr unterschiedlich (siehe Abbildung 5-6) und liegen für eine Reduzierung um 100 kg (Substitution von Oxygenstahl) ohne Recycling zum Teil weit über 150 000 km pro Autoleben. Diese Benchmarks verschieben sich umso mehr nach oben, je effizienter das Auto im Fahrbetrieb wird. Aus diesem Grund ist der Einsatz von Leichtbaumaterialien insgesamt sehr kritisch zu sehen. Ganzheitlich betrachtet, ist bislang nur der Einsatz von Aluminium unter der Voraussetzung eines hohen Recyclinganteils positiv zu bewerten. Zur Gewichtsreduzierung von Autos sollten daher in jedem Fall konstruktive und konzeptionelle Maßnahmen – im Sinne von „downsizing" – Vorrang vor dem Einsatz von Leichtbaumaterialien haben. Als Paradebeispiel dafür kann der prototypische Umbau eines Renault Twingo zum Smile von Greenpeace betrachtet werden, bei dem eine 23-prozentige Gewichtsreduzierung allein durch die Optimierung von Motor, Innenausstattung und Rädern realisiert wurde.

Den bisher dargestellten erzielbaren technischen Maßnahmen zur Absenkung des Kraftstoffverbrauches und der Treibhausgasemissionen stehen allerdings auch Entwicklungen (Ausstattung mit Nebenaggregaten, Einführung des Fahrens mit Licht am Tag) entgegen, die sich diesbezüglich ungünstig auswirken.

Zusätzliche Treibhausgasemissionen durch Nebenaggregate im PKW am Beispiel von Klima- und Heizungsanlagen

In diesem Kapitel geht es um einen Teil der Treibhausgas-(THG-)-Emissionen von PKW, nämlich um diejenigen, die auf „Nebenaggregate" zurückgehen, welche für den „eigentlichen" Zweck eines Fahrzeugs nicht notwendig sind. Die Unterscheidung zwischen funktional erforderlichen Aggregaten einerseits und darüber hinausgehenden Aggregaten andererseits prägt das Verständnis der Normierung des gemessenen Verbrauchs eines PKW. Und genau hierin liegt eine Besonderheit von Nebenaggregaten, sie benötigen Energie und tragen zum Kraftstoffverbrauch bei, werden aber bei den Messungen zum Normverbrauch nicht berücksichtigt. Eine weitere Besonderheit liegt darin, dass ein Teil von ihnen andere (viel wirksamere) Treibhausgase als CO_2 emittiert (siehe Kasten 3), die aber in der Öffentlichkeit und zum Teil auch in der offiziellen Berichterstattung häufig keine Berücksichtigung finden. Angaben zum Kraftstoffverbrauch und THG-Ausstoß sind also häufig um den Einfluss von Nebenaggregaten etwas nach oben zu korrigieren. Diese Korrektur wird umso wichtiger, je effizienter die Fahrzeuge gemäß Norm werden.

„Zusätzlich" sind in dem oben genannten Sinne Nebenaggregate wie energieintensive Heizungen und Klimaanlagen oder weitere kaum energieaufwändige Ausstattungen, die den Komfort eines PKW heben. Diese Ausstattungen sollen nicht als einfacher Luxus angesehen werden, sie sind häufig durchaus auch sicherheitsrelevant, erhöhen in aller Regel zugleich die Sicherheit des Fahrens. Sie erfordern, allgemein gesprochen, a) für ihren Betrieb Energie (und stoßen ggf. andere Treibhausgase aus) und bringen zudem b) ein zusätzliches Gewicht mit sich, welches transportiert werden muss bzw. ggf. die Aerodynamik verändert und dadurch zu einem erhöhten CO_2-Ausstoß führt. Der letztgenannte Aspekt der Gewichtszunahme wird bei den Normverbrauchsmessungen allerdings bereits automatisch mit berücksichtigt.

Kasten 3: Treibhausgase im Verkehrssektor

Bedeutung weiterer Treibhausgase für den Verkehrssektor

In diesem Bericht geht es darum, „die" THG-Emissionen von PKW zum Gegenstand der Betrachtung für unternehmensstrategische Zwecke zu machen. Es gibt eine verbreitete Tendenz, „die" Treibhausgase aus dem Betrieb von PKW, also deren „direkte" Emissionen, mit deren CO_2-Emissionen im Betrieb gleichzusetzen. Es lohnt aber, hier genauer hinzuschauen, da die Perspektive der strategischen Unternehmsplanung weit über die für die kurze Frist getroffenen klimapolitischen Regelungen ausgreift.

Treibhausgase gibt es schließlich viele, mit dem bestimmten Artikel wird in der Regel abgestellt auf die sechs anthropogenen THG, die im Kyoto-Protokoll (KP) ausgewählt und mit diesem Rechtsinstitut zum Gegenstand einer multilateralen Regulierung gemacht worden sind. Zugleich mit der Annahme des KP sind zudem Faktoren für die Zeit bis Ende 2012 festgelegt worden, mit deren Hilfe die sechs in ihren Wirkungen doch sehr unterschiedlichen THG für die Zwecke des Kyoto-Protokolls ineinander verrechenbar (CO_2-Äquivalente) gemacht worden sind. Sie können damit zu (kurzfristigen) klimapolitischen Zwecken als äquivalent gelten.

Die mit dem KP getroffene Festlegung der Regulierung auf sechs THG ist lediglich ein augenblicklicher Stand, er muss nicht einen abschließenden Stand der Regulierung darstellen. Das Mandat der Klimarahmenkonvention ist viel weiter gefasst, etliche weitere THG bzw. Vorläufersubstanzen für THG sind dort bereits berichtspflichtig gemacht. Hinsichtlich der typischen PKW-Emissionen sind insbesondere die Vorläufersubstanzen für das THG Ozon, also NOx, CO und NMVOCs, zu nennen. Die weitere regulatorische Behandlung dieser Gase, die bislang in regionalen Luftreinhalteabkommen adressiert werden (UNECE), sind angesichts der physischen Entwicklungen im südostasiatischen Raum und des dortigen Fehlens eines Äquivalents zur UNECE-Regelung sicherlich der Beobachtung wert.

Selbst der sechs Gase integrierende Ansatz von Kyoto ist (bislang) nicht in allen sektoralen Politikbereichen nachvollzogen. So hebt das klimapolitische EU-Mandat zur Minderung vom PKW-Emissionen explizit nur auf dessen Emis-sionen an CO_2 ab. Der Grund ist, dass es 1996, lange vor dem Integrationsbeschluss von Kyoto, erlassen wurde und es seitdem, des integrativen Beschlusses in Kyoto ungeachtet, nicht modifiziert wurde. Folge ist u.a., dass die auf PKW zielenden klimapolitischen Ansätze der EU i.d.R. allein auf CO_2 abzielen. Konsequenterweise stellt das dabei zentrale Maß, die Normierung des spezifischen Treibstoffverbauchs von Kraftfahrzeugen im NEFZ (Richtlinie 93/116 EWG), allein auf CO_2 ab. Dies ist wiederum die orientierende Grundlage der Selbstverpflichtungspolitik, welche die EU-Kommission in Kooperation mit dem Verband von PKW-Herstellern und Importeuren (ACEA, JAMA, KAM) betreibt. Fakt aber ist, dass PKW neben (verbrennungsbedingtem) CO_2 weitere Treibhausgase aus dem Kyoto-Korb emittieren

- teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (HFKW) aus Klimaanlagen,
- Distickstoffoxid (N_2O) aus Katalysatoren,
- Methan (CH_4) aus erdgasbetriebenen Fahrzeugen.

Das erwähnte Maß zur Feststellung der spezifischen Fahrzeugverbräuche bzw. der CO_2-Emissionen, der Neue Europäische Fahrzeugzyklus, deckt aber zudem die CO_2-Emissionen selbst auch nur unvollständig ab. Der Zyklus ist hinsichtlich PKW-Ausstattung und hinsichtlich von Fahrtbedingungen so definiert, dass lediglich die funktional notwendigen THG-Emissionen eines PKW, und das auch nur unter günstigsten Umweltbedingungen (Temperaturen), gemessen werden. Nebenaggregate, wie sie heute üblich sind oder auf dem Wege sind, die Regel zu werden, bleiben im Testverbrauch unberücksichtigt.

Heizung und Klimatisierung

Aggregate zur Heizung bzw. Klimatisierung dienen der Temperierung sowie der Entfeuchtung der Fahrzeugkabine. Beide Betriebszustände dieser „Klimatisierungsaggregate" im weiteren Sinne weisen einen relativ hohen Energiebedarf auf. In Deutschland waren Klimaanlagen noch bis Mitte der 1990er Jahre unüblich, der Bedarf für den Betrieb der Heizung wurde aus der Abwärme des Motors gespeist. Der Bedarf für beide Arten der Kabinentemperierung wird auf (mindestens) je etwa 0,5 l Benzin pro 100 km oder etwa rd. 12 g CO_2 pro km geschätzt. Bei der Heizung ist der Bedarf für Sitzheizungen und Stand(vorwärm)heizungen neuerdings noch hinzugekommen. Gemessen am durchschnittlichen, 2002 neu zugelassenen Benzin-PKW, mit einem Kraftstoffverbrauch von 7,2 l pro 100 km und einem spezifischen THG-Ausstoß von 172 g CO_2 pro km, trägt der Betrieb von Klimaanlagen demnach diesbezüglich zu einer signifikanten Erhöhung um zusätzlich etwa 7 Prozent bei.

Hinzu kommt, dass PKW-Klimaanlagen nicht nur zum Ausstoß von CO_2, sondern auch zu HFKW-Emissionen (auch so genannte F-Gase) führen, die zwar mengenmäßig weniger stark ins Gewicht fallen, dafür aber z.B. um einen Faktor 1.300 (R 134 a) klimawirksamer sind als das Treibhausgas CO_2. Nach Schätzungen der EU-Kommission könnten diese zusätzlichen THG-Emissionen aus PKW-Klimaanlagen (in CO_2-Äquivalente umgerechnet) einen Umfang von jährlich etwa 18 bis 38 Mio. t CO_2-äquivalent in 2010 und 28 bis 58 Mio. t CO_2-äquivalent in 2020 annehmen. Aus diesem Grund befinden sich gegenwärtig unterschiedliche Regulierungsentwürfe für den Einsatz von F-Gasen in PKW-Klimaanlagen in der Verhandlung zwi-

schen EU-Parlament und -Rat. Dabei sind vor allem zwei Punkte strittig: die Fristsetzung für das Auslaufen des heute am meisten verwendeten Kältemittels R 134 a in neuen Fahrzeugen (2014 oder 2017) und die obere Begrenzung des zulässigen klimawirksamen Faktors (Global Warming Potenzial) für zukünftige Kältemittel (50 oder 150). Unabhängig von der Einigung in diesen Punkten wird die Wirkung dieser Regulierung (Inkrafttreten für Anfang 2007 erwartet) allerdings erst mittel- bis langfristig einsetzen.

Optimierungs- bzw. Substitutionspotenzial bei Nebenaggregaten

Der klassischen bzw. herkömmlichen Temperierungstechnik qua Speisung aus der Abwärme des Motors geht mit zunehmender Effizienzverbesserung der Motoren das Angebot aus. Die Bilanztechnik des NEFZ nun verführt zur „Schizophrenie“: Die CO_2-Minderungen aus verbesserter Motorentechnik werden in ihm gespiegelt, der kompensierende Mehrverbrauch durch Einsatz und Nutzung diverser Zusatzheizungen und durch den Betrieb der Klimaanlage dagegen bleibt unberücksichtigt. So scheinen die PKW immer energieeffizienter zu werden, zu einem wesentlichen Teil aber ist dies nur ein scheinbarer Effekt, eine messtechnisch bedingte Illusion. Völlig aus der Betrachtung selbst der Emissionsstatistik des Sektors Verkehr bleibt der Energieaufwand für Vorheiz- bzw. Zusatzheizanlagen, da sie in aller Regel nicht mit Treibstoffen im steuerlichen Sinne betrieben werden, die Verbrauchsstatistik aber auf der steuerlichen Statistik aufsetzt.

Vor diesem Hintergrund befinden sich die Überlegungen dazu, inwiefern Nebenaggregate individuell substituiert oder energetisch optimiert werden könnten, noch am Anfang. Das ist der entscheidende Grund, weshalb hierzu zum gegenwärtigen Zeitpunkt nur wenige und vor allem nur unvollständige Aussagen möglich sind. Im Bereich der Heizung/Klimatisierung gibt es z.B. Überlegungen, ob bei einem Übergang zu einer mit CO_2 als Kältemittel betriebenen Klimaanlage diese auch als Zusatzheizanlage nutzbar zu machen sei und so die Zuheizung mit Thermoelementen substituiert werden könnte. Außerdem ist das Potenzial an „Dämmung“ der Fahrzeugkabine im Hinblick auf die Gestaltung des Wärme- bzw. Kühlungsbedarfs bislang nicht systematisch überprüft worden. Eine weitere Option wäre der Einsatz von mit Photovoltaik betriebener Lüftung in parkenden PKW zur Minderung des Spitzenbedarfs zur Klimatisierung von Fahrzeugen in der Anfahrsituation nach einem Parken in einem sonnenausgesetzten Bereich.

Rechtliche Regelungen hinsichtlich einzelner Aggregate, die deren Emissionsverhalten begrenzen oder bestimmen, gibt es außer der oben genannten Regulierung bezüglich PKW-Klimaanlagen nicht – sieht man davon ab, dass selbstverständlich für PKW-Typenzulassungen umfängliche Regelwerke bestehen. Die in diesem Zusammenhang entscheidende rechtliche Norm scheint die oben erwähnte Normierung des Testverfahrens zu sein, denn diese normierte Zahl ist Voraussetzung sämtlicher Versuche, Transparenz für den PKW-Nutzer herzustellen.

Tagsüber Fahren mit Licht („Tagfahrlicht“)

Zur Verbesserung der Verkehrssicherheit strebt die Europäische Kommission an, dass künftig alle Kraftfahrzeuge durchgängig, also auch tagsüber, mit eingeschaltetem Fahrlicht fahren müssen, wie dies bereits vor allem in den skandinavischen Ländern gesetzlich vorgeschrieben ist. Durch eine solche EU-weite Einführung von – automatisch geschaltetem – Tagesfahrlicht (TFL) wird erwartet, dass im Vergleich zu heute jährlich schätzungsweise etwa 5 500 Verkehrstote und 1,9 Mio. Verkehrsschäden mit entsprechenden Versicherungskosten vermieden werden können (SWOV 2003). Von Nachteil ist dagegen, dass die dauerhafte Nutzung der Kfz-Beleuchtung den Kraftstoffverbrauch und Lampenverschleiß erhöht.

So würde das durchgängige Fahren mit Fahrlicht bei heutigen Kraftfahrzeugen und gemäß NEFZ-Testzyklus einem mittleren Kraftstoffverbrauch von etwa 0,25 l Benzin pro 100 km und einem Verbrauchsanteil von etwa 2,5 Prozent entsprechen (Müller 2001). Für rein innerstäd-

tische Fahrten erhöht sich der Anteil auf etwa 3,1 Prozent, während er bei schnellerem Fahren außerorts auf etwa 1,7 Prozent absinkt. In der Praxis wird der Mehrverbrauch durch Fahren mit TFL allerdings nur auf etwa 1 Prozent oder 0,1 l Benzin/100 km abgeschätzt (LVW-NS 2005). Zudem würde sich die Lebensdauer heutiger Lampen in etwa halbieren und entsprechend zu erhöhtem Materialverbrauch und Kosten führen.

Andererseits würde durch eine TFL-Pflicht zugleich aber auch ein Anreiz für die Einführung und Verbreitung TFL-optimierter Lampen (LED und Xenonlampen) und angepasster Systemtechnik (42 V-Bordnetz, neue/bessere Generatoren) geschaffen. Der zusätzliche Kraftstoffverbrauch ließe sich durch solche Maßnahmen um etwa die Hälfte reduzieren, auf etwa 0,5 l Benzin pro 100 km oder 0,5 Prozent Verbrauchsanteil, bei ansonsten vergleichbarer Leuchtstärke und Lebensdauer der Lampen. Zusätzliche Minderungspotenziale bietet der Verzicht auf Standlicht und Kennzeichenbeleuchtung bei der TFL-Nutzung tagsüber und eine adaptive Beleuchtungssteuerung in Abhängigkeit von der Umgebungshelligkeit. Ein kostenloser Nebeneffekt einer TFL-Einführung wäre, dass unbeabsichtigte Entladungen von Batterien durch Brennen gelassenem Licht bei ausgeschaltetem Motor durch eine automatische Kopplung von TFL mit dem Motorbetrieb vermieden würden.

Abschließende Bewertung

Wie in den vorangegangenen Abschnitten gezeigt wurde, bestehen im Bereich der PKW vielfältige technische Ansatzpunkte mit jeweils signifikanten bis zum Teil sehr großen Potenzialen zur Reduzierung von Kraftstoffverbrauch und damit einhergehenden THG-Emissionen (siehe Tabelle 5-3). Effizienzsteigerungen des Fahrzeuges sollten dabei Vorrang vor der Einführung (und Verbesserung) alternativer Kraftstoffe haben. Zum einen, weil die fahrzeugtechnische Effizienzsteigerung weitaus schneller umgesetzt werden kann als die Kraftstoff-Markteinführung und damit zugleich einen wichtigen Beitrag zur Ressourcenschonung liefert; zum anderen, weil die meisten alternativen Kraftstoffe einen erhöhten Bedarf an Primärenergieträgern haben, deren Einsatz im stationären Sektor im Hinblick auf den Klimaschutz noch längere Zeit wirksamer wäre als im Verkehrssektor.

Bei den Fahrzeugen liegen die größten technischen Potenziale im Bereich bestehender und alternativer Antriebssysteme sowie der Auslegung (Gewicht, Größe usw.) und Gestaltung des gesamten Fahrzeugs und des Motors. Bei der Maßnahmenumsetzung ist allerdings auf diverse Wechselwirkungen zu achten, damit der Erfolg nicht an anderer Stelle wieder aufgezehrt wird. Dies gilt insbesondere beim Einsatz von Leichtbaumaterialien, die in der Regel sehr hohe Anforderungen an die erzielbare Gewichtsreduzierung und Recyclingfähigkeit erfüllen müssen, um unter dem Strich positive Beiträge leisten zu können. Konstruktiven Maßnahmen zur Verringerung des Fahrzeuggewichtes ist daher prinzipiell der Vorzug zu geben. Negative Effekte können sich z.B. auch bei der Optimierung des Luftwiderstandes einstellen, wenn durch eine flachere Neigung der Windschutzscheibe der Wärmeeintrag so stark erhöht wird, dass eine Klimaanlage „notwendig“ würde. Allerdings könnte umgekehrt auch gerade die Tendenz zur Ausstattung mit Klimaanlagen dazu führen, dass der Luftwiderstand dieser Autos stärker abgesenkt werden kann als bei Autos ohne Klimaanlage. Welcher Effekt überwiegt, hängt neben der Technik auch wesentlich vom Nutzerverhalten ab. In jedem Fall bietet eine ganzheitliche Fahrzeugoptimierung eine effizientere und umfassendere Ausschöpfung der vorhandenen Potenziale als eine zu spezialisierte Herangehensweise. Das entsprechend erschließbare rein technische Optimierungspotenzial bei heutigen PKW im Hinblick auf Kraftstoffverbrauch und THG-Ausstoß dürfte insgesamt mehr als 50 Prozent betragen. Hinzu kommen noch nennenswerte Potenziale, die durch die Optimierung des individuellen Fahrverhaltens z.B. mittels Fahrertrainings und automatischer, anpassungsfähiger Assistenzsysteme relativ einfach, schnell und kostengünstig erschlossen werden können.

Einspar-Maßnahmen	Einsparpotenziale für Nutzungsphase[1)]	Externe bzw. sonstige Einflüsse (unvollständig)	Verbrauchszunahme
Gewichtsverringerung (vor allem Karosserie)	≤ 12,5 bis 33%	Einführung von Tagfahrlicht	0,5 bis 1,0 %
„Downsizing“	≤ 30 %	Klimaanlagen-Betrieb	7 %
Antriebs-Optimierung Ottomotor Antriebs-Optimierung Dieselmotor	< 59 bis 69 %[2)] < 36 bis 48 %[2)]	Diesel-Partikelfilter NOx-Speicherkatalysatoren	4 % 1 bis 2 %
Neue/Alternative Antriebe	< 30 %	möglicher Gesamteffekt insgesamt	>12,5 bis 14 %
Getriebe-Optimierung	≤ 8 %		
Leichtlaufreifen	≤ 3 bis 7 %		
Luftwiderstand-Optimierung	≤ 3 bis 12 %		
Alternative Kraftstoffe	–48 % bis 100 %[3)]		
Möglicher Gesamteffekt	> 50 %		

1) Die jeweiligen maßnahmenspezifischen Einsparpotenziale, insbesondere beim Antrieb, beinhalten zum Teil auch Effekte durch andere Maßnahmen und können daher nicht einfach addiert werden.
2) Technisch machbare Obergrenzen.
3) Theoretische Bandbreite der sektoralen Brutto-Potenziale der ausgewählten Kraftstoffe für jeweils maximale Durchdringung.

Tabelle 5-3:
Potenziale zur Senkung von spezifischem Kraftstoffverbrauch bzw. THG-Ausstoß bei neuen PKW und gegenläufige Einflussfaktoren
Quelle: eigene Zusammenstellung

Die bisher genannten Potenziale resultieren allerdings allein aus der Sicht des technisch machbaren Klimaschutzes im PKW-Bereich. Technische Forschung, Entwicklung und Umsetzung werden jedoch in der Praxis mehr durch ökonomische, kundengerechte und gesetzliche Faktoren bestimmt. Dies hat zur Folge, dass die technisch vorhandenen Potenziale in der Realität nicht vollständig und eher schrittweise bzw. mit Verzögerungen erschlossen werden. In diesem Zusammenhang sind auch die so genannten gegenläufigen (externen) Trend-Effekte zu nennen, die den Kraftstoffverbrauch und THG-Ausstoß von PKW in Zukunft erhöhen werden (vgl. Tabelle).

Kapitel 6
Minderungsansätze für Klimalasten durch den PKW-Sektor

In Anknüpfung an die Maßnahmenstrukturierung der Bundestags-Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ aus dem Jahre 1990 sind grundsätzlich folgende Ansätze zur Emissionsreduktion zielführend:

- Verminderung des Verkehrsumfangs, d.h. Reduzierung der mit Klimaemissionen zurückgelegten Fahrzeugkilometer (nicht notwendigerweise eine Verringerung der Anzahl der unternommenen Wege oder Fahrten).
- Verbesserte Ausnutzung der Verkehrsmittel, d.h. Reduzierung der Fahrzeugkilometer bei Beibehaltung des Umfanges der Personenkilometer.
- Verkehrsverlagerung, d.h. Verlagerung von Personenkilometern auf emissionsgünstigere Verkehrsträger – im wesentlichen auf öffentliche Verkehrsmittel oder auf nicht motorisierte Verkehrsarten.
- Verbesserungen an den Fahrzeugen, die eine Reduzierung der Emissionen je Fahrzeugkilometer zur Folge haben, sei es etwa durch eine Absenkung des spezifischen Energieverbrauchs oder den Übergang auf weniger klimaschädliche Energieträger.
- Verbesserungen bei der Fahrzeugnutzung, d.h. Reduzierung der Emissionen je Fahrzeugkilometer, etwa durch eine Optimierung des Verkehrsablaufes (Verkehrsmanagement, Verkehrslenkung) oder auch vom Fahrzeuglenker angesteuerte emissionsärmere Nutzungsformen, etwa günstigere Geschwindigkeits- und Beschleunigungsprofile und optimierte Gangwahl (Verkehrsverhalten).

Einer Ausschöpfung der in den einzelnen Feldern denkbaren Emissionsreduktionen stehen eine Reihe von Akzeptanzproblemen und strukturellen Schwierigkeiten gegenüber, wodurch der im Selbstlauf erreichbare Fortschritt begrenzt wird. Im Einzelnen kann herausgehoben werden:

- Soweit – etwa aufgrund von Straßenausbau – eine kürzere und schnellere Verbindung zwischen A und B bereitgestellt werden kann, dürften viele diese Möglichkeit einer Verkehrseinsparung bereitwillig nutzen; auch der Ersatz einer als unangenehm – etwa zeitraubend oder anstrengend – empfundenen Fahrt durch einen Telefonanruf oder weiter fortgeschrittene Telekommunikationsmittel wird wenig Widerstand gegen „Verkehrsvermeidung“ auslösen. Dem entgegen steht allerdings das allgemeine Bestreben, bei einigermaßen konstantem Aufwand an Verkehrszeit den Aktionsradius, also den Einzugsbereich des persönlichen Lebenszuschnitts, durch Geschwindigkeitserhöhung auszuweiten (Hypothese von der konstanten Verkehrszeit, vgl. Schallaböck 1996, Schafer 2000). Bislang hat diese Tendenz zu einer ungebrochenen Erweiterung der emissionsträchtigen Verkehrsumfänge geführt: mehr Kilometer, mit stärker emittierenden Verkehrsmitteln, bei höheren Geschwindigkeiten.

- Einer verbesserten Ausnutzung der Fahrzeuge, insbesondere einer Erhöhung der Besetzungsgrade der Automobile, steht die säkulare Tendenz zur Reduzierung der Haushaltsgrößen und die zunehmende räumliche Komplexität und Individualisierung der täglichen Abläufe entgegen. Die Nutzungsumfänge von Car-Pooling (etwa bei den Arbeitswegen) sind dementsprechend bislang eher beschränkt.

- Einer Verlagerung auf nicht motorisierte oder öffentliche Verkehre ist vielfach wegen der Wegelängen nicht möglich oder wegen erwarteter Geschwindigkeitseinbußen uner-

wünscht, soweit – beim öffentlichen Verkehr – ein Angebot überhaupt besteht oder als solches wahrgenommen wird: Bei fortschreitender Zersiedelung und räumlich vielfältigeren Aktivitätsmustern scheitert ein zureichendes ÖPNV-Angebot zunehmend an den hohen Kosten. Bezeichnenderweise können der im Ausbau befindliche Hochgeschwindigkeitsverkehr auf der Schiene ebenso wie ein verbessertes Angebot im ÖPNV oder eine fußgänger- und fahrradfreundliche Verkehrsgestaltung im Innenstadtbereich durchaus ein Publikum finden, auch unter früheren Autonutzern. In den Innenstädten wird diese Entwicklung durch den Mangel an Parkplätzen unterstützt. Insgesamt jedoch begünstigt die allgemeine Tendenz zu schnelleren Verkehrsmitteln und größeren Distanzen weiterhin den PKW und – zunehmend – das Flugzeug.

- Technische Verbesserungen an den Fahrzeugen, die zu geringeren Energieverbräuchen, Emissionen und Klimalasten führen, sind verständlicherweise aus Verbrauchersicht absolut positiv besetzt: Sie bieten die Aussicht, ohne besonderes eigenes Zutun die Umwelt und – über die Treibstoffkosten – das eigene Budget zu entlasten. Die Fahrzeughersteller kommen entsprechenden Anforderungen durchaus entgegen, sehen sich jedoch einer Gemengelage von teilweise widersprüchlichen Anforderungen gegenüber: Steigende Sicherheits-, Performance-, Komfort- und Ausstattungsansprüche erhöhen den Energiebedarf; die Ansprüche hinsichtlich der Geräuschentwicklung komplizieren die Aufgabenstellung zusätzlich. Technisch höherwertige Lösungen (einschließlich neuer Antriebskonzepte), um dies zu vereinbaren, verteuern das Produkt, was sich nachteilig auf die Nachfrage auswirken kann; kostensenkende Produktvereinfachungen schmälern typischerweise auch die Gewinnmarge und werden bislang nach Herstellereinschätzung auch am Markt nur beschränkt angenommen.
- Effizienzgewinnen durch ein verbessertes Verkehrsmanagement wurde in den letzten Jahren eine wichtige Rolle eingeräumt; soweit es die innerstädtische Verkehrsorganisation betrifft, sind allerdings die durch bauliche Gegebenheiten und die Verkehrsnachfrage gezogenen Grenzen erkennbar; emissionsmindernde Vergleichmäßigung des Verkehrsflusses außerorts und insbesondere auf Autobahnen durch Tempolimits stößt auf erhebliche Widerstände aus dem Kreis der Verkehrsteilnehmer. Eine energieeffizientere Betriebs- und insbesondere Fahrweise hat es schwer, sich gegenüber den im wörtlichen Sinne eingefahrenen Gewohnheiten durchzusetzen.

Für eine bessere Ausnutzung der gegebenen Möglichkeiten ist daher die Entwicklung bzw. Weiterentwicklung von (staatlichen) Maßnahmen erforderlich, die den Handlungsrahmen für die beteiligten Akteure verändern und stärkere Anreize für ein zielentsprechendes Handeln bereitstellen. Allerdings bestehen heute verschiedene Ansätze und unterschiedliche Kombinationen und Mischungen von Konzepten, mit denen hinsichtlich der Klimaentlastung vergleichbare Ergebnisse erzielt werden können, die jeweils spezifische Vor- und Nachteile aufweisen. Die als optimal empfundene Lösung kann damit erst durch einen gesellschaftlichen Findungsprozess ermittelt werden.

Gliederung und mögliche Beiträge von Maßnahmen im PKW-Sektor

Eine Gliederung möglicher Maßnahmen kann einerseits danach erfolgen, in welcher Art die Maßnahmen gestaltet sind, andererseits, an welche Adressaten und auf welche Sachaspekte sie sich beziehen. Hinsichtlich der Art der Maßnahmen wird typischerweise zwischen ordnungspolitischen und fiskalischen Maßnahmen unterschieden, wobei die ersteren mit Ge- und Verboten arbeiten, die letzteren mit monetären Vor- bzw. Nachteilen. In der Praxis ist der Unterschied nicht derart deutlich, insofern die Übertretung ordnungspolitischer Anordnungen häufig mit monetären Strafen sanktioniert wird, die sich in ihrer Wirkung fallweise nur mäßig von Gebühren unterscheiden können; andererseits können fiskalische Maßnahmen

bei eingeschränkter Kaufkraft den formal gegebenen freien Entscheidungsraum tatsächlich weitgehend reduzieren; gleichwohl wird es sinnvoll sein, den unterschiedlichen Zugriff als Merkmal im Auge zu behalten.

Über diese beiden Gestaltungsformen hinaus sind jedoch weitere Maßnahmenarten von Bedeutung. Zum einen liegt bei Gütern wie dem öffentlichen Wege- und Straßennetz der unmittelbare Staatszugriff auf der Hand; zum anderen wird der weite Bereich weicherer, weniger verbindlicher Maßnahmen („soft policies") gerade in besonders konfliktträchtigen Feldern gerne genutzt, um flexible Formen der gesellschaftlichen Anpassung zu ermöglichen.

Seitens der Adressaten stehen die Hersteller und die Benutzer von Fahrzeugen im Mittelpunkt. Unter systematischen Gesichtspunkten ist auch die Bereitstellung und der Betrieb der Infrastruktur ins Auge zu fassen, mit Adressaten vorzugsweise auf staatlicher/politischer Seite; im Fahrzeugbereich geht es nicht nur um Entwicklung, Produktion und den Vertriebskanal von Neufahrzeugen, sondern auch um Ausstattung, Instandhaltung und Nachrüstung und die damit verbundenen Kreise; als weiterer Bereich sind die Adressaten in der Kraftstoffkette anzusprechen; schließlich ist auf Seiten der Fahrzeugnutzer ggf. zu unterscheiden zwischen Anbietern von Verkehrsleistung, Fahrzeugführern und Fahrzeugnutzern.

Ergänzend soll hier die Rolle der vorlaufenden, begleitenden und nachlaufenden Forschung (Entwicklung, Monitoring und Evaluation) nicht übersehen werden, vor allem aber die Ansteuerung von verkehrlichen Effekten durch außerverkehrliche Handlungsansätze: Da Verkehr vorzugsweise Mittel zum Zweck ist, kommt außerverkehrlichen Verkehrsursachen und deren Behandlung eine besondere Bedeutung zu; hingewiesen sei insbesondere auf die Siedlungsstruktur und ihre Entwicklung sowie auf die Freizeitkultur und ihre Organisation.

Sachliche Angriffspunkte bezüglich des Verkehrsumfangs sind neben den durch die räumliche Organisation bedingten Zwängen vor allem Geschwindigkeit und Kosten des Verkehrs. Für die Wahl des Verkehrsträgers ist neben deren grundsätzlichen Zugänglichkeit (der Auto-Führerschein ist erst ab einem bestimmtem Alter zugänglich, die ÖV-Nutzungsmöglichkeit nur bei bestehendem Angebot usw.) die Gestaltung der relativen Opportunitäten entscheidend. Die möglichen fahrzeugbezogenen Ansatzpunkte sind vielfältig und können eher global steuernd oder spezifisch sein; eine besondere Rolle spielen dabei technische Vorgaben oder Vereinbarungen sowie Maßnahmen, die derartige Vorgaben und Vereinbarungen ermöglichen oder flankieren. Hinsichtlich der Maßnahmen, die das Verhalten der Fahrzeuglenker adressieren, ist vor allem auf die hohen Minderungspotenziale durch Geschwindigkeitsbeschränkungen hinzuweisen.

Die Bundesregierung hat jüngst das Nationale Klimaschutzprogramm 2005 beschlossen, das als sechster Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe „CO_2-Reduktion" frühere Beschlussfassungen fortschreibt (IMA CO_2 2005, BMU 2005c). Ein grundlegender Gedanke darin ist, dass nach der Festlegung zulässiger Grenzen für die Klimagasemissionen von Industrie und Energiewirtschaft im Rahmen des Emissionshandels nunmehr für die übrigen Sektoren – einschließlich des Verkehrssektors – noch maximal die Differenz zwischen diesen der Industrie zugestandenen Emissionsmengen und dem verbindlichen Gesamtziel für Deutschland zugestanden werden kann. Für die Sektoren Haushalte + Verkehr wurde ein gemeinsames Ziel von 291 t CO_2-äquivalente Treibhausgase/Jahr für den Bezugszeitraum des Kyoto-Protokolls 2008 bis 2012 definiert; damit wird diesen Sektoren – im Gegensatz zu allen anderen Sektoren – noch eine geringe Erhöhung ihrer Treibhausgasemissionen zugestanden. Insgesamt wird für diese Sektoren noch im Umfang von 16 bis 18 Mio. t/Jahr eine Differenz zwischen den Prognosewerten und der Zielgröße für die Emissionen gesehen und ein entsprechender Handlungsbedarf abgeleitet. Die Zielgröße wurde vom BMVBW aufgeteilt in 120 Mio. t/Jahr für den Sektor Haushalte und 171 Mio. t/Jahr für den Sektor Verkehr (BMU 2005c, 2).

Im Einzelnen quantifiziert das Klimaschutzprogramm folgende Maßnahmen für den Verkehrsbereich zur Erreichung der Minderungsziele von 2008 bis 2012 mit den zugehörigen CO_2-Minderungspotenzialen (IMA CO_2 2005, 59):

• Aufkommensneutrale steuerliche Förderung von PKW mit geringem Verbrauch unter Berücksichtigung entsprechender Aktivitäten der EU-KOM	1 Mio. t
• Einführung emissionsabhängiger Landegebühren auf deutschen Flughäfen	0,5 Mio. t
• Substitution von herkömmlichem Kraftstoff durch Biokraftstoffe	5 Mio. t
• Substitution von F-Gasen in mobilen Klimaanlagen entsprechend der geplanten EU-Richtlinie über Emissionen aus Klimaanlagen in Kraftfahrzeugen und zur Änderung der Richtlinie 70/156/EWG	0,5 – 1 Mio. t
• Verstärkung der Kampagne „Neues Fahren“ (u. a. durch dena-Kampagne „effizient und mobil“)	3 Mio. t
• **Summe der quantifizierbaren Maßnahmen**	**ca. 10 Mio. t**

Bei Realisierung dieser Emissionsminderungen und der analogen Reduktionen im Bereich der Haushalte können nach Ansicht der Bundesregierung die Verpflichtungen des Kyoto-Protokolls erfüllt werden.

Für eine umfangreichere Maßnahmenübersicht, die in ihrer Reichweite auch über den Bezugszeitraum 2008 bis 2012 des Kyoto-Protokolls hinausgeht, können wir den Sachstandsbericht des Umweltbundesamtes zu „CO_2-Minderung im Verkehr“ heranziehen, der ein differenziertes Maßnahmengerüst entwickelt und in seinen Potenzialen (reine CO_2-Minderungen, ohne Berücksichtigung der anderen Klimagase und der Mehrwirkungen des Luftverkehrs) quantifiziert. Die Tabelle 6-1 (UBA 2003, 48) gibt den Gesamtansatz wieder und zeigt die hohe Bedeutung der Maßnahmen, die direkt oder indirekt den PKW-Verkehr betreffen.

Die Einzelmaßnahmen können nicht unabhängig voneinander realisiert und in ihren Teilwirkungen addiert werden, vielmehr sind sie in ihren Wechselwirkungen zu berücksichtigen. Aus diesem Grund entwickelt das Umweltbundesamt ein Gesamtszenario, das sich aus sechs Teilpaketen von Maßnahmen zusammensetzt. Als Grundlage wird ein Basispaket vorausgesetzt, das aus den übergreifenden reaktionsauslösenden Maßnahmen und strukturellen Voraussetzungen für Verkehrsvermeidung besteht, die im Einzelnen teilweise in der Tabelle nicht mit bezifferten Wirkungen versehen sind, nämlich:

- Fortführung der Ökosteuer,
- Schwerverkehrsabgabe,
- Förderung verkehrsvermeidender Siedlungs- und Produktionsstrukturen,
- Regionale Wirtschaftskreisläufe.

Die Gesamtwirkung wird mit einer Emissionsminderung von 40,5 Mio. t CO_2 im Jahr 2010 abgeschätzt, gegenüber einer im Trend erwarteten Menge von 215,9 Mio. t (UBA 2003, 53). Angesichts des beschränkten Zeithorizonts ist die in Aussicht gestellte Reduktion um nahezu 20 Prozent beachtlich, zumal die Erfüllung der Selbstverpflichtung der Autoindustrie (Absenkung der durchschnittlichen spezifischen CO_2-Emissionen auf 140 g/km bis 2008) und deren Fortschreibung (weitere Absenkung bis 120g/km) bereits im Trend unterstellt wird.

Allerdings ist darauf hinzuweisen, dass die Potenziale bei einigen der dargestellten Maßnahmen durchaus kritisch zu hinterfragen sind. Eine erhebliche Wirkung wird beispielsweise der Verbesserung des Schienengüterverkehrs beigemessen. Das DIW merkt hierzu an, dass eine weitere Verlagerung des Verkehrs von der Straße auf die Schiene derzeit durch zahlreiche Hindernisse und Schwachstellen blockiert wird. Eine Verbesserung der Situation und damit eine deutliche CO_2-Minderung in diesem Bereich sind aktuell nicht in Sicht und zudem eng verbunden mit einer Beseitigung der Barrieren auf internationaler Ebene.

Tabelle 6-1:
CO_2-Emissionsminderung – Potenziale bis 2010 zusammengestellt durch das UBA (Minderungspotenziale in Mio. Tonnen CO_2)
Quelle: Umweltbundesamt (September 2003): CO_2-Minderung im Verkehr. Ein Sachstandsbericht des Umweltbundesamtes. Beschreibung von Maßnahmen und Aktualisierung von Potenzialen.

Umweltorientierte Verkehrsplanung		
Förderung regionaler Wirtschaftskreisläufe	k.A.	fehlende Datengrundlage
Verkehrsvermeidende Siedlungsstrukturen	k.A.	komplexe Wechselwirkungen
Verkehrsvermeidende Wirtschaftsstrukturen	k.A.	lokale Beispiele nicht übertragbar
Förderung umweltgerechter Verkehrsträger		
Güterschienenverkehr	8,4	Verkehrsleistung (VL) Schiene +48%, VL Straße –18%
Personenschienen-Fernverkehr	0,6	VL Schiene +11%, VL Straße –2%
Personenschienen-Nahverkehr	0,4	wie Personenschienenfernverkehr
Effizienter ÖPNV	1,3	Verlagerung 5% der PKW-Fahrten Innerorts, 24% Zunahme ÖSPV
Telematikeinsatz, innerorts	1,2	
Telematikeinsatz, außerorts	1,4	Güter-Logistikmanagement
Fahrrad- und Fußgängerverkehr	1,8	5% PKW-Fahrten, innerorts
	3,5	10% PKW-Fahrten, innerorts
Car-Sharing	1,2	Fahrleistungsreduktion 7 Mrd. km
Monetäre Maßnahmen		
Abgaben auf den Flugverkehr	3,5	
Schwerverkehrsabgabe	0,1	15 Cent/km auf BAB
Auf BAB und Landstraße	3,3	SVA nach Schweizer Modell
Ökosteuer (Fortsetzung 2004–2008)	4,0	erste Schätzung
CO_2-bezogene Kfz-Steuer für PKW, LNfz	3,8	
Abbau von Steuervergünstigungen für PKW	k.A.	Quantifizierung nicht möglich
Mineralölsteuerangleichung (Benzin, Diesel)	+/– 0,0	Ausgleich verschiedener Effekte
CO_2-Handel im Verkehr	k.A.	zurzeit noch nicht quantifizierbar
Technische Optimierung der Verkehrsträger		
Verbrauchsminderung bei Bahnen	k.A.	Spez. Emissionsreduktion um 19–27% schon im TREND-Szenario
Verbrauchsminderung bei Bussen	0,3–0,5	Technik, Reifen, Öl, Fahrschulung
Verbrauchsminderung bei PKW, LNfz, SNfz		
Einsatz von Leichtlaufreifen	5,8	
Einsatz von Leichtlaufölen	5,2	
Fortschreibung der Selbstverpflichtung	k.A.	Spez. Emission von 120 g/km (2012) bereits TREND-Szenario
CO_2-Grenzwert ab 2010 (Neuzulassung PKW)	0,0	Potenzial 2020: ca. 10 Mio. t CO_2
Alternative Treibstoffe und Antriebe	<0,1	CO_2-Beiträge nicht vor 2030
Verbraucherverhalten		
Bereitstellung von Verbraucherinformationen	2,9–3,6	nur Energieklassensystem A-G
Förderung des kraftstoffsparenden Fahrens	5,9	
Geschwindigkeitsbeschränkungen		
Außerorts/Autobahn 80/120 km/h	2,7	
Außerorts/Autobahn 80/100 km/h	5,7	

Insgesamt konnten in den letzten eineinhalb Jahren seit der Vorlage des Sachstandsberichtes keine ernsthaften Anstrengungen zur Umsetzung der angeführten Maßnahmen festgestellt werden, eine Realisierung der angegebenen Potenziale wird sich daher jedenfalls um einige Jahre verschieben. Andererseits sind auch für die Folgezeit erhebliche Ausweitungen der Potenziale anzusetzen, da die strukturellen Veränderungen in kleinen Jahresschritten erfolgen und teilweise erhebliche Nachlaufzeiten in der Wirkung aufweisen.

Spezifische Anreize zur Verbrauchs- und Emissionsabsenkung bei PKW heute

Wegen der besonderen Bedeutung der Verbrauchs- bzw. Emissionsabsenkungen bei PKW soll dieser Zielbereich etwas vertieft betrachtet werden. In Deutschland ist hier gegenwärtig insbesondere die Selbstverpflichtung der Automobilindustrie als wirksames Element anzusprechen: Nachdem die Europäische Kommission einen Grenzwert für die durchschnittlichen CO_2-Emissionen der PKW in Höhe von 120 g/km mit Wirksamkeit 2005 in Aussicht gestellt hatte, hat sich der Verband der europäischen Automobilhersteller (ACEA) freiwillig selbst verpflichtet, bis 2008 die Einhaltung eines Emissionswertes von 140 g CO_2 je Kilometer im Durchschnitt der Neufahrzeuge aus ihrer Produktion sicherzustellen; diesem Zielwert sind – wie von ACEA gefordert – in der Folge die Importeure japanischer und koreanischer PKW (JAMA und KAMA) beigetreten. Anders als der eben zitierte Sachstandsbericht des UBA geht das von externen Experten für die Umweltbundesämter Deutschlands, Österreichs und der Schweiz erarbeitete „Handbuch der Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs 2.1" davon aus, dass in Deutschland der Zielwert der Automobilindustrie für 2008 verfehlt und im Mittel der neu zugelassenen PKW statt eines Emissionsfaktors von 140 g CO_2/km lediglich 160 g CO_2/km erreicht wird; eine weitere Absenkung auf 120 g/km wird erst für die Neufahrzeuge des Jahres 2020 angenommen unter der Voraussetzung, „dass der politische Druck, die Emissionen weiter abzusenken, über 2008 hinaus unvermindert weiter bestehen wird" (UBA Berlin/BUWAL Bern/UBA Wien 2004, 78). Die aktuellen Daten bestärken den kritischen Eindruck (vgl. weiter unten). Dies macht zunächst den fortgesetzten Handlungsbedarf deutlich.

Im vorigen Kapitel zur Fahrzeugtechnik wurden der Stand der Entwicklungen und die weiteren Perspektiven dargestellt; dabei hat sich gezeigt, wie komplex die Aufgabenstellung und wie vielfältig die Lösungsansätze sind. Dies macht wohl auch verständlich, dass neben der gezielten Förderung von Forschung und Entwicklung in spezifischen Bereichen und den bestehenden Selbstverpflichtungen der Hersteller und Importeure insbesondere generell steuernde Maß-

USA, Kalifornien	1975 Inkrafttreten des Energy Policy and Conversation Act; darin enthalten die Corporate Average Fuel Economy (CAFE)-Standards mit Verbrauchsgrenzen für PKW und leichte Nutzfahrzeuge auf Basis des Fahrzeuggewichts
	2000 Beschluss zur Reduzierung von NOx, NMHC und Partikeln bei Schwerlast-Dieselfahrzeugen, Implementierung 2007 bzw. 2010
	2002 Start von FreedomCAR (cooperative automotive research) zur Förderung Wasserstoff betriebener Brennstoffzellen und der entsprechenden Infrastruktur
	2002 California Air Resources Board (CARB) mit Emissionsstandards für PKW und leichte bzw. mittelschwere Nutzfahrzeuge, Implementierung geplant für 2006
Europäische Union	1998 Freiwillige Selbstverpflichtung der ACEA zu Verbrauchssenkungen und Emissionsgrenzen; Erweiterung der Selbstverpflichtung auf koreanische und japanische Automobilhersteller
	EURO-4-Standards zu CO-, HC-, NOx und Partikel-Emissionen
	Regulierung von Schwefel- und Benzolgehalt für Benzin und Diesel (2000, 2005 und 2009)
Japan	Verbrauchsstandards für Benzin und Diesel betriebene PKW und Nutzfahrzeuge, basierend auf Fahrzeuggewichtsklassen
China	Verbrauchsstandards für PKW mit Gültigkeit für 2005, 2006, 2008 und 2009, basierend auf Fahrzeuggewichtsklassen

Tabelle 6-2:
Ausgewählte internationale Aktivitäten zur Senkung von Fahrzeugemissionen und Kraftstoffverbrauch
Quelle: OECD (2004): Can Cars Come Clean? Strategies For Low-Emission Vehicles. S. 97–116

Tabelle 6-3:
Übersicht zu Verbrauchsstandards – normalisiert nach CAFE-Standards
Quelle: Pew Center on Global Climate Change (2004): Comparison of Passenger Vehicle Fuel Economy And Greenhouse Gas Emission Standards Around The World. Über www.pewclimate.org; Umrechnung von Miles per Gallon auf Liter je 100 km: eigene Berechnungen

Region	Flottenverbrauch der Neufahrzeuge in 2002	Zukünftige Flottenverbrauchsstandards für Neufahrzeuge	
	Liter je 100 Kilometer		
USA	9,76	9,67	2005
		9,56	2006
		9,45	2007
Kalifornien	9,26	9,41	2009
		9,08	2010
		8,28	2011
		7,40	2012
		7,22	2013
		7,08	2014
		6,84	2015
		6,61	2016
Kanada	9,12	7,35 (beabsichtigt)	2010
Europäische Union[1)]	6,32	5,32	2008
		4,57 (beabsichtigt)	2012
Japan[1)]	5,08	4,90	2010
Australien	8,08	6,84	2010
China	8,03	6,84	2005
		6,41	2008

1) Bei der Umrechnung von nicht amerikanischen Verbrauchsstandards auf CAFE-Standards kommt es teilweise zu deutlichen Abweichungen. Für die EU und Japan sind daher im folgenden zusätzlich die nicht normalisierten Werte angegeben (in l/100 km): EU: 7,15 (2002); 6,00 (2008); 5,16 (2012, beabsichtigt); Japan: 6,90 (2002); 6,61 (2010)

nahmen ins Auge gefasst werden: allgemeine Grenzwerte für die CO_2-Emissionen, sei es über Vorschriften seitens des Staates oder über Selbstverpflichtung der Hersteller eingeführt, sowie allgemeine steuerliche Förderung besonders günstiger Fahrzeuge (gegebenenfalls zusammen mit einer Belastung besonders ungünstiger Fahrzeuge, so genannte Feebates).

Für ein internationales Screening gibt hier Tabelle 6-2 zunächst eine Übersicht über Aktivitäten zur Senkung von Fahrzeugemissionen und Kraftstoffverbrauch in ausgewählten Ländern und Regionen. Es zeigt sich, dass in allen maßgeblichen PKW-Märkten der Aufgabe ein hoher Stellenwert eingeräumt wird, mit allerdings unterschiedlichen konkreten Ansätzen. Eine quantitative Aufschlüsselung von Zielwerten für die Entwicklung der spezifischen Kraftstoffverbräuche ergänzt Tabelle 6-3. Entsprechend einem aktuellen Vorschlag des Pew Center on Global Climate Change (2004) wurden dafür die Werte nach den unterschiedlichen nationalen Testverfahren einheitlich auf Werte entsprechend dem US-amerikanischen CAFE-Testzyklus umgerechnet und anschließend von der in Amerika üblichen Darstellung in mpg (miles per gallon) in die hierzulande übliche Darstellung in Liter je 100 Fahrzeug-Kilometer umgewandelt.

Im Ergebnis zeigt sich die Vorreiterrolle von Europa und Japan. Die vor kurzem angestoßene schrittweise Anhebung der Verbrauchsstandards in Kalifornien stellt zwar eine ganz erhebliche Erhöhung der Effizienzanforderungen dar, bleibt jedoch deutlich hinter den fixierten Zielen in Europa und Japan zurück. Es bleibt deshalb etwas unverständlich, weshalb sich auch europäische PKW-Hersteller dem Widerstand gegen die neuen Kalifornischen Standards anschließen mit der Begründung, dass durch diese Standards die Vielfältigkeit der Anforderungsprofile unzumutbar weiter verschärft würde. Das Gegenteil scheint eher der Fall: Zumal wenn sich – wie zu erwarten – die kalifornischen Standards zunehmend auf den gesamten

Tabelle 6-4: Vergünstigungen für „Low-Emission-Vehicles"

Quelle: OECD (2004): Can Cars Come Clean? Strategies For Low-Emission Vehicles. S. 190–194

	Steuervergünstigungen für „low-emission" Fahrzeuge[1]				Verbrauchssteuervergünstigung für „clean"-fuels									Öffentlich zugängliche Informationen zu „low-emission"-Fahrzeugen (z.B. über Treibstoffverbrauch)
					Schwefelreduzierte Kraftstoffe				Alternative Kraftstoffe[2]					
					Benzin		Diesel							
	ES	KV	AK	AT	50 ppm	10 ppm	50 ppm	10 ppm	LPG	NG	Ethanol	Methanol	Andere	
Australien							reduziert*		frei	frei	frei			
Belgien	x				reduziert		reduziert		frei	frei				x
Dänemark		x					reduziert							
Finnland							reduziert		frei	frei				x
Frankreich			x	x										x
Island			x	x						frei				
Hongkong, VR							reduziert							
Italien				x					reduziert	reduziert			reduziert (Biodiesel)	x
Japan	x	x	x	x							frei	frei		x
Kanada		x	x											x
Malaysia			x											
Niederlande	x	x		x	reduziert		reduziert			frei		frei		x
Norwegen							reduziert			frei				
Österreich		x		x										x
Schweden	x			x	reduziert		reduziert	reduziert						x
Schweiz				x	reduziert	reduziert*	reduziert	reduziert*						
Tschechien	x								reduziert	frei			reduziert (Biodiesel)	x
Ungarn	x													
UK		x	x	x	reduziert		reduziert		reduziert	reduziert			reduziert (Wasserstoff)	x
USA			x	x					reduziert	reduziert	frei	reduziert	reduziert	x

Verschiedene Steuerteilsysteme können Gegenstand der Vergünstigungen sein (Einfuhr, Kauf, …)

Bezugsbasis: ES: Emissionsstandards; KV: Kraftstoffverbrauch; AK: Alternative Kraftstoffe; AT: Alternative Antriebstechnologie. LPG: Liquefied Petroleum Gas; NG: Natural Gas; * beabsichtigt

großen nordamerikanischen Markt ausbreiten, reduziert sich die Spannweite unterschiedlich hoher Anforderungen ganz erheblich. In jedem Fall erfüllt der für den europäischen Markt per Selbstverpflichtung der Automobilindustrie zugesagte Effizienzstandard der Neufahrzeugflotten auch die in Aussicht genommenen Anforderungen in Kalifornien.

In etwas breiterer Form werden in Tabelle 6-4 die steuerlichen Vergünstigungen für niedrig emittierende („low-emission") Fahrzeuge und für weniger belastende („clean") Treibstoffe zusammengestellt.

Anreize zur Verbrauchsabsenkung bei PKW – zukünftige Maßnahmen

Zur Erreichung einer weitergehenden Verbrauchsabsenkung können verschiedene Wege gewählt werden, insbesondere:

- eine Weiterentwicklung der Selbstverpflichtung seitens der PKW-Hersteller und -Importeure,
- eine Gestaltung der Fahrzeugsteuern nach dem Verbrauch der PKW-Modelle,
- Verbrauchsgrenzwerte in unterschiedlicher Form,
- Emissionshandelsmechanismen
- oder andere Optionen, wie z.B. eine Weiterentwicklung der Ökosteuern oder Tempolimits.

Bei Auswahl und Ausgestaltung sind einige grundlegende Gesichtspunkte zu beachten:

- Für die Klimaänderung ist es irrelevant, wodurch und durch wen die Änderungen ausgelöst werden, entsprechend bestehen auch erhebliche Freiheitsgrade bezüglich einer Absenkung der Klimalasten. Hinsichtlich der regionalen Beiträge, hinsichtlich der belastenden Sektoren und Subsektoren sowie hinsichtlich der belastenden Personenkreise sind Substitutionsmöglichkeiten gegeben, auch wenn die Gesamtbelastung wegen der ansonsten drohenden Folgen ein vertretbares Maß nicht überschreiten darf. Die Zuweisung von einzelnen Zielbeiträgen – etwa für den Bereich des motorisierten Individualverkehrs – ist daher nicht naturwüchsig vorgegeben, sondern in einem politisch-gesellschaftlichen Prozess zu bestimmen. Vernünftigerweise wird man allerdings davon ausgehen können, dass auch der Autoverkehr entsprechend seinem Bedeutungsgewicht erheblich in die Pflicht zu nehmen ist.
- Gestaltungsspielräume sowohl seitens der Fahrzeugproduzenten als auch seitens der Fahrzeugnutzer stellen einen hohen Wert dar und eröffnen Optimierungsspielräume. Auch wenn direkte technische Vorschriften häufig einfacher zu administrieren sind, wird man daher in der Regel die Maßnahmen nicht auf die einzusetzenden technischen Mittel, sondern vom Ziel her auf das zu erreichende Ergebnis abstellen. Es ist dann die Aufgabe des Konstrukteurs, aus den im Technikkapitel angerissenen Möglichkeiten Pakete zu schnüren, die zugleich die Anforderungen des Umwelt- und Klimaschutzes, der Verkehrstauglichkeit und der Kostengünstigkeit erfüllen und geeignet sind, die Zustimmung der Käufer zu finden.
- Praktikabilität ist in jedem Fall ein zwingendes Erfordernis. Neben der unmittelbaren Durchführbarkeit, Kontrollierbarkeit und Bewertbarkeit erscheinen dabei zwei weitere Gesichtspunkte von Bedeutung: Die Maßnahmen sollten für die Beteiligten bzw. Betroffenen nachvollziehbar und in ihren Konsequenzen antizipierbar sein; außerdem sollte wegen der zunehmenden räumlichen Verflechtungen die Verträglichkeit im europäischen Kontext ausdrücklich beachtet werden.

- Nicht zuletzt hängt der Wirkungsumfang eines jeden Ansatzes von der Schärfe des Zugriffs und seiner quantitativen Ausprägung ab. Eine sanfte Gestaltung, die niemand spürt, wird auch wenig Wirkung entfalten; umgekehrt wird eine allzu forcierte Gestaltung kaum überwindbare Widerstände provozieren.

Freiwillige Selbstverpflichtungen zur Absenkung der Normverbräuche der Neufahrzeugflotten bzw. analoge Beschränkungen der Klimagasemissionen dürften seitens der Industrie bevorzugt werden. Immerhin ist es der eigene Ansatz, und zwar ein schon bislang nach eigener Wahrnehmung sehr erfolgreicher Ansatz.

Dem kann man allerdings nicht ganz kritiklos zustimmen. Zwar hat sich der CO_2-Emissionswert der Neufahrzeuge durchaus ermäßigt, aber keineswegs so stark, dass die in der Selbstverpflichtung zugesicherte Abnahme in Reichweite erscheint: Die jüngsten amtlichen Berechnungen durch das Kraftfahrtbundesamt bestätigen für das Jahr 2004 eine Reduktion des Emissionswertes um 1,1 g/km gegenüber dem Vorjahr, von 175,9 auf 174,8 g/km. Die Verbesserung geht praktisch ausschließlich von den PKW mit Ottomotor aus (2004: 178,4 g/km), während PKW mit Dieselmotor auf etwas geringerem Niveau stagnierende Emissionswerte aufwiesen (2004: 170,5 g/km); unkonventionelle Antriebe mit günstigeren Werten waren nur in geringen Stückzahlen vertreten. Diese Entwicklung fügt sich bruchlos an jene der letzten Jahre an. Damit kann aus heutiger Sicht als nahezu ausgeschlossen gelten, dass die für das Jahr 2008 zugesicherte mittlere Emission von 140 g/km noch erreicht werden kann – und dieser Selbstverpflichtungswert lag bereits deutlich hinter dem Ziel der EU (bereits in 2005: 120 g/km).

Man kann sicher einräumen, dass eine freiwillige Selbstverpflichtung, auch wenn sie nicht ganz so weitgehend ist wie erwünscht, wegen der geringeren Konfliktträchtigkeit gegenüber einer sturen Vorschrift gewisse Vorzüge bietet. Eine – nach dem aktuellen Eindruck – deutliche Verfehlung der Zielgröße kann dagegen nicht zufrieden stellen; die absolute Höhe der Emissionen liegt gegenwärtig etwa beim Doppelten eines mittelfristig anzustrebenden Wertes (als nächste Stufe des EU-Zielwertes könnte man einen Emissionswert von 90 g CO_2 je Kilometer annehmen), wie er tendenziell auch von Teilen der Mineralölindustrie in ihren Prognosen unterstellt wurde. Es besteht also weiterhin Handlungsbedarf, zunächst, um die bereits zugesicherte Verbrauchseffizienz zu gewährleisten, und im weiteren, um die Effizienz noch darüber hinaus zu steigern. Welche Möglichkeiten bieten sich hierzu?

Eine Besteuerung der Fahrzeugmodelle (jährlich zu entrichtende Kraftfahrzeugsteuer) abhängig von ihrem Energieverbrauch, oder präziser: von ihrem Beitrag zu der Klimabelastung, kann sicherlich in zureichend zielführender Form gestaltet werden. Dann muss man sich allerdings von der Vorstellung verabschieden, dass die Fahrzeugsteuern in jedem Fall zu den eher weniger bedeutenden Nebenkosten der Fahrzeughaltung zählen. Wählt man dagegen einen exponentiellen Verlauf der Steuersätze, so steigen die Grenzkosten mit jeder weiteren Verbrauchserhöhung immer stärker an. Eine PROGNOS-Studie hat schon vor mehreren Jahren plausibel dargestellt, dass ein solcher Ansatz die Energieverbräuche drastisch dämpfen kann.

Während mit einem derartigen Ansatz – je nach der zugrunde gelegten Rechenformel – in beliebiger Präzision die statistische Normverbrauchsverteilung und die Verbrauchshöhe der Fahrzeuge angesteuert werden kann, ergibt sich für das Einzelfahrzeug eine mehr oder weniger ausgeprägte Schieflage: Die dem Einzelfahrzeug zuzurechnende Klimabelastung ergibt sich nicht nur aus dem Normverbrauch, sondern – vereinfacht – aus dem Normverbrauch multipliziert mit dem Nutzungsumfang, der Fahrleistung. Die steuerliche Bewertung allein durch den Normverbrauch führt daher dazu, dass ein wenig gefahrenes Fahrzeug mit hohem spezifischem Verbrauch gegebenenfalls sehr hoch besteuert wird, obwohl es das Klima recht wenig belastet, während andererseits ein mäßig verbrauchendes Fahrzeug mit hoher Jahresfahrleistung wenig besteuert wird, obwohl die davon ausgehenden Klimalasten deutlich größer sind.

Wieweit diese Schieflage hinzunehmen sei, muss gegebenenfalls im politisch-gesellschaftlichen Prozess ausgehandelt werden; da auch in anderen Bereichen fallweise derartige „Ungerechtigkeiten" vorkommen, erscheint das Ergebnis einer Abwägung nicht vorab bestimmbar. Jedenfalls wird man nicht befürchten müssen, dass die angeführte Schieflage in der Wirkweise die Realisierung eines jeweils angezielten Wirkumfangs nennenswert beeinträchtigt.

Der besondere Reiz von Ansätzen zum Emissionshandel und zu Flottenverbrauchslimits dürfte dagegen ausdrücklich in der sehr guten Sicherung eines vorab bestimmten erwünschten Wirkumfangs liegen. Beim Emissionshandel werden nur in dem vorab vereinbarten Umfang Emissionslizenzen ausgegeben; in diesem Fall ist also – jedenfalls der Theorie nach – der Erfolg hinsichtlich des Emissionsumfangs schon vorab gesichert, und die über den Handel freigegebene Allokation der Emissionserlaubnis sichert, dass dies zu den größten Wohlfahrtsbeiträgen bzw. den geringsten Wohlfahrtseinbußen erfolgt.

Flottenverbrauchslimits als möglicher Handlungsansatz werden üblicherweise in Bezug auf die Neufahrzeugflotten (in der Regel die Neuzulassungen eines Jahrgangs) diskutiert. Formal liegt hier eine ähnliche Schieflage wie bei der oben angesprochenen Steuerlösung vor, insofern das Fahrzeug und nicht seine mehr oder weniger belastende Verwendung angesprochen wird. Tatsächlich jedoch dürften die Auswirkungen weniger gravierend sein – in der Praxis kann weitgehend ausgeschlossen werden, dass verbrauchssparsamere Fahrzeuge ihren Vorteil durch größere Jahresfahrleistungen wieder kompensieren, soweit die Treibstoffpreise weiterhin signalisieren, dass das Autofahren viel Geld kostet.

Diese beiden Ansätze, Verbrauchslimits und Emissionshandel, werden in getrennten Betrachtungen etwas mehr im Detail analysiert.

Neben den genannten gibt es eine Reihe weiterer Optionen, von denen wegen ihrer praktischen Bedeutung nur auf Tempolimits und auf einen Fortsetzungspfad für die Ökosteuer eingegangen wird.

Tempolimits als – auch – verbrauchsdämpfende Maßnahme sind spätestens seit der ersten Ölpreiskrise 1973 in der breiten öffentlichen Debatte verankert. In der Tat lässt sich kaum eine einfachere Maßnahme zur schnell wirksamen Verbrauchs- und Emissionssenkung formulieren. Zwar kann man über den genauen Umfang der Verbrauchsminderungen bei unterschiedlichen Maßnahmengestaltungen lange diskutieren, im Grundsatz aber ist die simple Physik der Fahrwiderstände nicht strittig. Dem – seit dem Großversuch zu Tempo 100 – häufig formulierten Einwand, dass die Einhaltung nicht zureichend zu überwachen sei, kann auch auf einfache Weise begegnet werden: indem die zulässige Höchstgeschwindigkeit nicht als Verhaltensvorschrift für die Verkehrsteilnehmer in die StVO aufgenommen wird, sondern als Bauartvorschrift für die Fahrzeughersteller in die StVZO. Dahingehende Vorschriften sind für verschiedene Klassen motorisierter Zweiräder und für schwere LKW eingeführt, sie sind auch bezüglich PKW seit längerem diskutiert.

Während also die Machbarkeit und die Wirksamkeit von Tempolimits nicht ernsthaft kontrovers sein sollte, kann die Wünschbarkeit durchaus kontrovers eingeschätzt werden: Sind die Effekte von Tempolimits, zu denen ja nicht nur Treibstoffeinsparungen gehören, es wert, in einem derartigen kollektiven Akt von Selbstbeschränkung die freie Wahl der Fahrzeuggeschwindigkeit einzuschränken? – offensichtlich nicht eine Frage wissenschaftlicher Erkenntnis, sondern von gesellschaftlicher Entscheidung.

Unter dem Gesichtspunkt des Zusammenwachsens von Europa kann sicher auf die Bedeutung einer Vereinheitlichung der Infrastrukturen hingewiesen werden; im Straßenverkehr wird dazu auf längere Sicht nicht nur die Vereinheitlichung der Verkehrszeichen gehören, sondern etwa auch die Vereinheitlichung der Trassierungselemente für eine weitgehend vereinheitlichte Straßentypologie; in deren Folge könnten sich möglicherweise einheitliche Geschwindigkeitsbestimmungen quasi automatisch anbieten.

Eine Fortsetzung des Pfades einer schrittweisen weiteren Erhöhung der Ökosteuer wird gegenwärtig nicht sehr lautstark gefordert. Dies soll allerdings die Analyse des Instruments nicht behindern. Der Grundgedanke des Ansatzes, durch ein mäßiges, aber regelmäßiges Preissignal die Aufmerksamkeit des Konsumenten aufrechtzuerhalten und ihn zu einer Berücksichtigung dieses Signals anzuhalten, erscheint zunächst durchaus bestechend. In der Tat scheint die gefühlte Härte des Preissignals erfolgreich gewesen zu sein, auch wenn im Einzelnen schwer auszumachen ist, in welchem Umfang die Ökosteuer selbst und in welchem Umfang die Debatte darüber zu der Reaktion beigetragen haben, wieweit darüber hinaus die volatile Rohölpreisentwicklung und wieweit die allgemeine Wirtschaftsentwicklung mit gruppenspezifischen Kaufkrafteinbrüchen und genereller Kaufunlust an dem Gesamteffekt beteiligt sind. Jedenfalls wird man einräumen müssen, dass die Ökosteuer und die gesellschaftliche Diskussion darüber einen nicht unerheblichen Beitrag geleistet haben, dass die Automobilindustrie der Verwirklichung ihrer Selbstverpflichtung näher gekommen ist.

Daneben lassen sich allerdings auch die kritischen Elemente des gegenwärtigen Ansatzes nicht übersehen: Die Tatsache von Ausnahmetatbeständen mag schon als solche verwirrend sein, umso mehr aber ist es deren Gestaltung – selbst innerhalb des Verkehrs. Die Überlagerung der Ökosteuerstufen mit den externen Preisschüben vom Rohölmarkt war zwar so sicher nicht geplant; darauf flexibel zu reagieren, war allerdings ebenfalls nicht vorgesehen – im Ergebnis waren zwischen 1998, dem letzten Preistiefstand, und 2004 nicht bloß Anhebungen der fiskalischen Belastung um insgesamt etwa 0,20 Euro je Liter Treibstoff zu verkraften, sondern noch um etwa 0,15 Euro je Liter darüber hinaus gehende Preisanhebungen (Daten nach www.mwv.de). Auch die Verwendungsseite der Steuererträge (nämlich zur Reduzierung der Beiträge zu den sozialen Sicherungssystemen) stellte sich nicht bloß als erklärungsbedürftig, sondern als schwer vermittelbar heraus.

Gleichwohl sollte man den Ansatz wohl nicht vorschnell verwerfen: Gerade die sprunghaften Ölpreissteigerungen haben – so könnte man argumentieren – gezeigt, dass es sinnvoll war und ist, sich auf steigende Ölpreise einzustellen: Im Jahr 1998 hatte der reale Ölpreis seinen niedrigsten Stand nach dem 2. Weltkrieg erreicht (ähnlich 1972 mit gut 10 $/bbl in 2004er Dollars, vgl. WTRG 2005), nur zur Zeit der großen Weltwirtschaftskrise lag er noch erkennbar niedriger. Unabhängig von dem zurzeit wohl überzogenen Rohölpreis (mit unter 60 $/bbl in 2004er Dollars allerdings noch unter den realen Preisen von 1980/81, vgl. WTRG 2005) wird man im Grundsatz aufgrund der Ressourcenlage von weiteren Preissteigerungen ausgehen müssen, selbst wenn man die Dramatik nicht ganz so hoch einschätzt, wie sie in den laufend fortgeschriebenen Szenarien der „Association for the Study of Peak Oil & Gas“ (vgl. ASPO 2004) zum Ausdruck kommt. Soweit die Preissignale nicht einfach am Treibstoff ansetzen, sondern an den davon ausgehenden Klimalasten, sind darüber hinaus die Streuverluste bei der Wirkung minimal; insofern eignet sich der Ansatz auch ausdrücklich als flankierendes Element zu fahrzeugbezogenen Ansätzen.

Kasten 4: Emmissionshandel im Verkehr

Ausgangslage

Mit dem Emissionshandel kann die exakte ordnungsrechtliche Begrenzung von Emissionen mit einzel- und gesamtwirtschaftlichen Effizienzvorteilen beim Erreichen dieses Ziels kombiniert werden. Der Emissionshandel ist daher prinzipiell besonders geeignet, um einzelstaatliche wie EU-weite Minderungsziele möglichst zielgenau und kostengünstig umzusetzen. Dies ist allerdings an bestimmte Bedingungen gebunden, sofern es praktikabel und zu vertretbaren Transaktionskosten erfolgen soll. Hierbei ist die Einfachheit der technischen Erhebung der Emissionsmengen und eine begrenzte Zahl der am Emissionshandel beteiligten Akteure entscheidend. Beides ist bei der Integration des Verkehrs in den Emissionshandel eine Herausforderung, da hier in Form der Verkehrsmittelnutzer eine Vielzahl von Emittenten vorliegt, deren individuelle Emissionen nur zu relativ hohen Kosten direkt erfasst werden können (Bergmann et al. 2005).

Am 9. Dezember 2002 stimmte der Europäische Rat der Umweltminister für die Einführung der „Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über ein System für den Handel mit Treibhausgasemissionsberechtigungen". Mit der EU-Richtlinie werden stationäre Anlagen ab einer Leistung vom 20 MW in den Emissionshandel einbezogen. Im Rahmen der Beratungen des Europäischen Parlaments wurde eine große Zahl von Änderungsvorschlägen diskutiert. Einige davon mit der Zielsetzung, dass komplementär zur Richtlinie äquivalente Politiken und Maßnahmen u.a. für den Verkehrssektor eingeführt werden sollten. Diese Forderungen sind jedoch nicht in die Richtlinie eingegangen und ihre Umsetzung bleibt daher ungewiss. Der Verkehr wird fast ausschließlich im so genannten Makroplan berücksichtigt, der die nationalen Emissionen, die vom Emissionshandel erfasst werden, ins Verhältnis zu den sonstigen Emissionen setzt, damit die Emissionsminderungsziele insgesamt erreicht werden können. Das Kyoto-Protokoll, in dem einzelstaatliche Minderungsziele festgelegt sind, ist am 16. Februar 2005 in Kraft getreten. Das europaweite System des Emissionshandels ist am 1. Januar 2005 gestartet (DEHST 2004).

Soweit der Verkehr auf Stromtraktion basiert, ist er indirekt in den Emissionshandel einbezogen. Da ausschließlich der elektrisch betriebene Teil des öffentlichen Verkehrs von dem EU-weit geplanten Emissionshandelssystems erfasst wird, ergeben sich daraus Kostenvorteile für die Verkehrsträger, die mit Benzin und Diesel fossile Brennstoffe verwenden. Der Hintergrund für die weitgehende Nichtberücksichtigung des Verkehrs beim Emissionshandel ist der Umstand, dass im Verkehr eine Vielzahl mobiler Emissionsquellen existiert. Dies stellt für die Einführung eines Emissionshandelssystems wegen der damit potenziell verbundenen hohen Transaktions- und Kontrollkosten eine Herausforderung dar. Neuere Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass auch für den Verkehr die Einführung eines Emissionshandelssystems möglich ist, das hinsichtlich der Transaktions- und Kontrollkosten handhabbar bleibt und stärkere Beiträge des Verkehrs wie auch insgesamt geringere Kosten bei der Minderung der CO_2-Emissionen verspricht.

Ansatzpunkte: Up-, Mid- und Downstream-Ansätze

Eine zentrale Frage bei der Ausgestaltung eines Emissionshandelssystems ist die nach dem Ansatzpunkt innerhalb des Systems, dessen Emissionen begrenzt werden sollen. Letztlich geht es darum, welche Akteure die Emissionszertifikate halten und damit gemeinsam die Verantwortung für die Einhaltung des Mengenziels tragen sollen. Ähnlich den Bezeichnungen der Geschäftsfelder der Ölindustrie und der Petrochemie hat sich zwecks Unterscheidung typischer Ansatzpunkte des Emissionshandels die Bezeichnung als Up-, Mid- und Downstream-Ansätze verbreitet. Abbildung 6-1 zeigt die möglichen Ansatzpunkte für den Emissionshandel im Verkehr.

Der überwiegend Mineralölprodukte als Treibstoffe verwendende Verkehr ist bislang vom EU-Emissionshandel ausgenommen. Dies schließt neben den in Abbildung 6-1 dargestellten Verkehrsträgern auch den Straßengüterverkehr sowie die Schifffahrt und die Luftfahrt ein. Letztere sind nur insoweit überhaupt im Kyoto-Protokoll einbezogen, wie es sich um inländische Verkehre handelt. Dagegen ist der elektrische Schienenverkehr über die fossil betriebenen Anlagen zur Stromerzeugung indirekt vom EU-Emissionshandelssystem erfasst.

Grundsätzlich ist der Einsatz des Emissionshandels auf allen Ebenen möglich. Hinsichtlich der Transaktions- und Kontrollkosten ergeben sich allerdings klare Vorteile für einen Upstream-Ansatz und eventuell auch für Midstream-Ansätze bei den Fahrzeugherstellern, weil hierbei die Zahl der in den Zertifikathandel einzubeziehenden Akteure überschaubar bleibt. Im Falle eines Downstream-Ansatzes im Verkehr, der an den Fahrzeughaltern ansetzt, wären diese Kosten dagegen sehr hoch.

Beim Upstream-Ansatz wird für die Menge der verkauften fossilen Brennstoffe die Verpflichtung eingeführt, Emissionszertifikate vorzuhalten. Ein solcher Upstream-Ansatz kann vorzugsweise bei den Mineralölkonzernen ansetzen, wo die für verkehrliche Nutzungen bereitgestellten Mengen einfach zu erfassen sind. Dabei ist zugleich die Zahl der Akteure überschaubar. Nachteilig kann beim Upstream-Ansatz sein, dass die unmittelbaren Anreizwirkungen mit der Mineralölindustrie an einer Stelle ansetzen, an der nur ein sehr geringer Teil der Potenziale zur Minderung der Emissionen des Verkehrs besteht. Für die Fahrzeugindustrie und Fahrzeugnutzer bedarf es daher der Vermittlung der vom Emissionshandel bewirkten Knappheitssignale über die Kraftstoffpreise. Die Kosten werden wie auch bei anderen ökonomischen Instrumenten über die Preise auf nachgelagerte Ebenen fortgewälzt. Ein Upstream-Ansatz kann so theoretisch Anreizwirkungen auf mehreren Ebenen entfalten. Bei den Verkehrsmittelnutzern werden die Kosten eines Upstream-Emissionshandels zusammen mit denen der Besteuerung (Mineralöl-, Öko- und Mehrwertsteuer) sowie marktbedingten Preisschwankungen anfallen und daher kaum differenziert wahrgenommen werden können. Bei den Fahrzeugherstellern ist dies noch ungünstiger, da diese nicht Glied der Überwälzungskette sind. Anreizwirkungen bei den Herstellern können also nur sehr gering ausgeprägt sein und diese haben im Rahmen eines Upstream-Ansatzes nur begrenzte Handlungsoptionen.

Überdies ist ein Midstream-Ansatz denkbar, der zwischen den Mineralölkonzernen und den Verkehrsmittelnutzern ansetzt. So könnten die Tankstellen zertifikatspflichtig gemacht werden, was gegenüber dem Upstream-Ansatz keine Vorteile bietet, sondern lediglich die Zahl der Akteure erhöhte und damit ungeeignet ist. Ein Midstream-Ansatz könnte aber auch die Fahrzeughersteller verpflichten, die beim Upstream-Ansatz eine passive Rolle einnehmen. Bei einem solchen Midstream-Ansatz könnten die Hersteller verpflichtet werden, im Umfang ihres Absatzes von Fahrzeugen in den am Emissionshandel teilnehmenden Staaten Emissionszertifikate vorzuhalten. Allerdings ergibt sich bei einem Hersteller-Midstream-Ansatz das Problem, dass allein aufgrund der Zahl der verkauften Fahrzeuge keine zuverlässige Prognose des tatsächlichen Umfangs

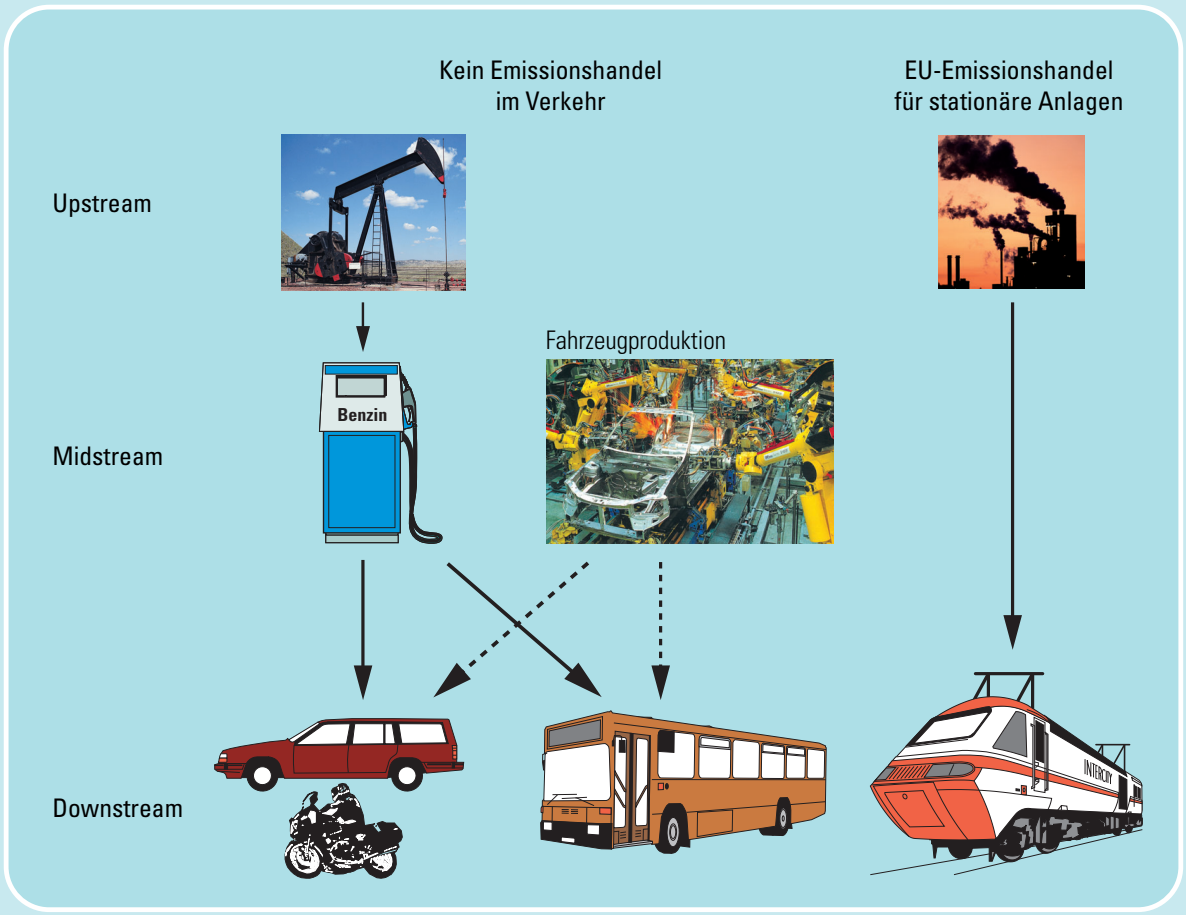


Abb. 6.1 : Ansatzpunkte des Emissionshandels im Verkehr

der CO_2-Emissionen möglich ist, da hierzu u. a. die nicht immer einfach zu verifizierende Fahrleistung einbezogen werden muss. Zudem müssten die durchschnittliche Lebensdauer, die verwendete Kraftstoffart und der Durchschnittsverbrauch ermittelt werden, um als Bemessungsgrundlage zu dienen. Dies bedeutet zwar einen größeren Ermittlungsaufwand als beim Upstream-Ansatz, die genannten Indikatoren werden aber ohnehin bereits für verschiedene Zwecke erhoben, womit der dazu erforderliche Aufwand begrenzt bleibt. Anhand der so abzuschätzenden Emissionen von CO_2 müssten die Fahrzeughersteller Emissionszertifikate vorhalten, was bei diesen zu Kosten führt, die letztlich in die Kalkulation der Fahrzeugpreise einfließen. Die Fahrzeughersteller können dann u.a. durch die Beeinflussung der Kraftstoffart und des Durchschnittsverbrauches sowie über den Zukauf von Emissionszertifikaten eine Optimierung innerhalb des Emissionshandelssystems betreiben.

Der Charme eines Emissionshandels bei den Fahrzeugherstellern besteht darin, dass diese eine im Sinne des Klimaschutzes proaktiv ausgerichtete Rolle einnehmen könnten. Dies könnte zu stärkeren Bestrebungen zur Steigerung der Energieeffizienz der Fahrzeuge Anlass geben, als dies allein durch die reinen Preiswirkungen des Emissionshandels zu erwarten wäre. Zudem könnten die Fahrzeughersteller Ausgleichsmaßnahmen durch JI- und CDM-Projekte in den Blick nehmen und dies bei der Produktwerbung einbeziehen. Denkbar wären etwa Klimaschutz-Ausstattungspakete, mit denen die Kundschaft zu einem vollständigen Ausgleich der Klimawirkungen motiviert werden könnte. Dies könnte sich an das für den Luftverkehr bereits existierende System „atmosfair" anlehnen, bei dem bei Flugreisen freiwillige Zahlungen in einen Fonds getätigt werden, mit dem als Kompensation für die durch den Flug bewirkten Klimaveränderungen zusätzliche Klimaschutzprojekte finanziert werden (http://www.atmosfair.de/).

Die Emissionen würden beim Hersteller-Midstream-Ansatz also geschätzt und die Kosten der Emissionen den Fahrzeugnutzern pauschal über die Fahrzeugpreise angelastet, was individuelle Bestrebungen der Fahrzeugnutzer zur Begrenzung der Emissionen wie eine energiesparende Fahrweise oder den Verzicht auf Fahrten unberücksichtigt ließe. Letzteres ist aber aufgrund der bereits gegebenen fiskalischen Belastung der im Straßenverkehr verwendeten Treibstoffe kein gravierender Nachteil, da diese Anreize aufgrund der gegebenen Abgabenhöhen deutlicher ausfallen, als dies durch die Beteiligung am Emissionshandel denkbar ist.

Ein Downstream-Ansatz stellt hinsichtlich der Verifikation der tatsächlichen Emissionen ähnliche Anforderungen wie der Hersteller-Midstream-Ansatz. Eine Pauschalierung nach Fahrzeugtyp scheidet bei den Fahrzeugnutzern aus, da deren Bemühungen zur Begrenzung der Emissionen bei Nutzungsintensität und Fahrweise dann unberücksichtigt blieben. Zudem wäre die Vergabe sowie das Halten und Handeln von Emissionszertifikaten seitens der großen

Zahl von rd. 50 Millionen Fahrzeughaltern allein in Deutschland mit erheblichen Informations- und Kontrollkosten verbunden. Ein Downstream-Ansatz für den Emissionshandel im Straßenverkehr wird aus diesen Gründen allgemein als nicht praktikabel eingeschätzt. Im Falle von Luftverkehr und Schifffahrt könnte ein Downstream-Ansatz allerdings durchaus umsetzbar sein, weil die Zahl der Akteure dort wesentlich geringer ist.

Reichweite und Vergabeverfahren

Der Emissionshandel kann international sowie hinsichtlich der einbezogenen Sektoren oder Branchen offen angelegt sein. Er kann aber auch durch Beschränkung auf einzelne Länder oder Sektoren und Branchen geschlossen ausgestaltet und damit in seiner Reichweite begrenzt werden. Im Falle eines geschlossenen Zertifikathandels können die ökonomischen Effizienzvorteile verloren gehen, wenn nur Akteure mit ähnlich hohen Grenzvermeidungskosten teilnehmen. Die ökonomische Effizienz erfordert daher die Beteiligung von Akteuren mit möglichst unterschiedlichen Grenzvermeidungskosten, da nur so mittels Emissionshandels das gesetzte Emissionsminderungsziel zu den geringsten volkswirtschaftlichen Kosten erreicht werden kann. Dies spricht eher für internationale und sektorale Offenheit.

Allerdings kann bei einem offenen Emissionshandel der Verkehrssektor zum Nettokäufer werden. Dies ist im Sinne des Klimaschutzes zunächst kein Problem, da es hierbei allein um die insgesamt vermiedenen Emissionen von Treibhausgasen geht. Allerdings können etwa im Falle des Luftverkehrs oder durch Kältemittel von Klimaanlagen zusätzliche Klimawirkungen auftreten, die nicht in den Emissionshandel eingeschlossen sind, was im Falle einer Nettokäuferposition zu Zielverfehlungen führen würde. Zudem sind im Falle des Verkehrs vielfältige weitere externe Kosten (Flächeninanspruchnahme, Luftschadstoffe, Lärm, Unfälle) zu berücksichtigen, was eine Nettokäuferposition umweltpolitisch unerwünscht erscheinen lässt.

Die Vergabe der Emissionszertifikate kann auf der Basis so genannter „Großvaterrechte" (grandfathering) oder durch Versteigerung erfolgen. Bei den „Großvaterrechten" orientiert sich der Anteil der vergebenen Zertifikate an den Emissionen der Vergangenheit unter Berücksichtigung eventueller Vorleistungen bei der Emissionsminderung. Beide Varianten unterscheiden sich durch die Art und die Höhe der verursachten Kosten. Während bei den „Großvaterrechten" die Zertifikate kostenlos vergeben werden, entstehen gleichwohl bei der Ermittlung der Menge der zuzuteilenden Zertifikate Kosten bei den Unternehmen und den staatlichen Kontrollinstanzen. Bei der Auktion der Zertifikate orientiert sich deren Preis an Angebot und Nachfrage, jedoch fallen die Ermittlungskosten weg. Überdies entstehen bei den Unternehmen noch Kosten des Haltens und Handelns der Zertifikate.

Beurteilung der Ansätze

Umweltpolitische Instrumente und damit auch der Emissionshandel sollen u.a. die folgenden Ziele erfüllen:

- Ökologische Wirksamkeit
- Ökonomische Effizienz und Transaktionskosten
- Praktikabilität und institutionelle Beherrschbarkeit

Für die Einführung im Straßenverkehr weisen der Up- und der Downstream-Ansatz mit absoluten Zielvorgaben die höchste Zielkonformität auf. Tanktourismus in Nachbarländer ohne Emissionshandel könnte allerdings die Zielerreichung beeinträchtigen. Der Upstream-Ansatz erfordert daher eine EU-weite Ausgestaltung des Handelssystems. Ökonomische Effizienz bedeutet, dass ein umweltpolitisches Ziel zu den niedrigsten Kosten erreicht wird.

Tabelle 6-5: Eigenschaften und Kosten ausgewählter Fahrzeugmodelle ohne Emissionshandel

Euro, soweit nicht anders angegeben	Oberklasse	Mittelklasse	Kleinwagen
Eigenschaften			
Neupreis	80 304	22 850	11 850
Leistung (kW)	235	108	40
Verbrauch (Liter pro 100 km)	11,3	8,2	5,8
Jahresfahrleistung (km)	15 000	15 000	10 000
Jährliche Kosten ohne Emissionshandel			
Wertverlust	7 976	3 325	1 625
Finanzierung/Zinsen	2 905	826	428
Versicherung	281	313	224
Kraftstoff	1 964	1 425	672
Kfz-Steuer	242	148	80
Reifen, Inspektionen, Reparaturen	1 417	523	217
Gesamtkosten	14 785	6 560	3 246
Gesamtkosten pro Monat	1 232	547	271
Kosten pro Kilometer	0,99	0,44	0,33
Anteil Kraftstoffkosten (%)	13,3	21,7	20,7

Quelle: http://www.autobudget.de und eigene Berechnungen

Dies gilt nicht allein für die Kosten der unmittelbaren Maßnahmen, die bei den einzelnen Emittenten hierzu ergriffen werden, sondern schließt auch die so genannten Transaktionskosten ein. Die höchste Effizienz besteht beim Upstream-, gefolgt vom Midstream-Herstelleransatz. Hier werden am stärksten technische Innovationen angeregt, die langfristig zu Kostenreduktionen führen. Hinsichtlich der Praktikabilität ist ein Gefälle vom Up- über den Mid- zum Downstream-Ansatz feststellbar. Die Umsetzbarkeit bei den Fahrzeugnutzern ist stark eingeschränkt, beim Midstream-Ansatz bei den Herstellern ist die Zahl der Akteure noch überschaubar, und der Upstream-Ansatz garantiert durch die geringe Zahl der Akteure und das bereits gegebene Verfahren zur Erhebung der Mineralölsteuer eine besonders einfache Umsetzung.

Ein Handel mit Zertifikaten limitiert die Menge der Treibhausgasemissionen und garantiert dadurch das Erreichen der gesetzten ökologischen Ziele. Vorteilhaft ist weiterhin, dass der Zertifikathandel Innovationen und technische Optimierungen fördert.

Der Emissionshandel erfüllt somit die Kriterien der Zielkonformität sowie der Kosteneffizienz. Im günstigsten Fall werden die Zielgenauigkeit ordnungsrechtlicher Instrumente mit den Effizienz- und Innovationswirkungen ökonomischer Instrumente kombiniert. Im Einzelfall hängen die Wirkungen von der Ausgestaltung ab.

Mögliche Kosten des Emissionshandels

Der Emissionshandel wird zu einer Verteuerung der Fahrzeugnutzung führen, deren Umfang im Einzelfall unter anderem von der Art des Ansatzpunktes und der Kostenüberwälzung bestimmt wird. Abhängig von der Art der Vergabe der Zertifikate fallen diese direkt infolge des Kaufs bei einer Auktion oder am Markt sowie im Falle der kostenlosen Erstvergabe indirekt als Opportunitätskosten an, da die Zertifikate alternativ auch am Markt verkauft werden könnten.

Als Basis von Kostenschätzungen können Grenzvermeidungskosten oder die Kursentwicklung der so genannten EU-Allowances (EUA) an den Handelsplätzen für diese Emissionszertifikate herangezogen werden. Emissionsrechte aus CDM (Clean Development Mechanism, einem Instrument des Kyoto-Protokolls) wurden Anfang 2005 zu durchschnittlich rund 4 Euro gehandelt, wohingegen der Kurs der Rechte aus dem EU-Emissionshandel (EUA) im März und April 2005 17 Euro erreichte (Lecocq, Capoor 2005). Schließlich wird für die CO_2-Sequestrierung von Kosten in Höhe von maximal 60 Euro ausgegangen. Diese Größenordnungen können im Falle eines sektoral und international offenen Emissionshandels auch für den Verkehr unterstellt werden und geben einen Eindruck von der Bandbreite der möglichen Kosten pro Tonne CO_2. Setzt man die Bandbreite dieser Kostenschätzungen an, um die potenziellen Kostenwirkungen bei der PKW-Nutzung zu ermitteln, so ergeben sich für drei typische Fahrzeugkategorien die in Tabelle 6-5 dargestellten Auswirkungen.

Wie die Kostenvergleiche zeigen (siehe Tabelle 6-6), ergeben sich durch einen sektoral und international offenen Emissionshandel im Verkehr für die PKW-Nutzung überschaubare Kostensteigerungen. Hierbei wurden drei Fahrzeuge als Vertreter typischer Fahrzeugkategorien ausgewählt. Es ist somit erkennbar, dass die bewirkten Kostensteigerungen durch die Einführung eines solchen Emissionshandels im PKW-Verkehr selbst bei Annahme relativ

Tabelle 6-6: Mögliche Mehrkosten des Emissionshandels für die ausgewählten Fahrzeugmodelle bei unterschiedlichen Handelspreisen für CO_2-Emissionsrechte

Euro, soweit nicht anders angegeben	Oberklasse	Mittelklasse	Kleinwagen
Verbrauch pro Jahr (l)	1 695,0	1 230,0	580,0
Emission CO_2 pro Jahr (t)	4,0	2,9	1,4
Mineralölsteuer bei gleichem Verbrauch (Euro)	1 109,4	805,0	379,6
Jährliche Mehrkosten			
Fall A	16	12	5
Fall B	79	58	27
Fall C	238	173	81
Zunahme der jährlichen Kosten in %			
Fall A	0,1	0,2	0,2
Fall B	0,5	0,9	0,8
Fall C	1,6	2,6	2,5
Mehrpreis bei Abgeltung beim Fahrzeugkauf			
Fall A	254	161	65
Fall B	1 269	806	326
Fall C	3 808	2 418	977
Entsprechender Anteil am Kaufpreis			
Fall A	0,3	0,7	0,5
Fall B	1,6	3,5	2,7
Fall C	4,7	10,6	8,2

Fall A: 4 Euro/t CO_2, entsprechend den aktuellen Handelspreisen nach dem CDM-Schema.
Fall B: 20 Euro/t CO_2, orientiert an den Preisen im EU-Emissionshandel.
Fall C: 60 Euro/t CO_2, entsprechend den erwarteten Kosten der CO_2-Sequestrierung.

Quelle: http://www.autobudget.de und eigene Berechnungen

hoher Grenzkosten der Emissionsminderung und Preise für Emissionszertifikate eher gering ausfallen. Ähnliche Kostenbelastungen könnten aus einem Midstream-Ansatz bei den Fahrzeugherstellern bei voller Überwälzung auf die Fahrzeugpreise erwachsen.

Der Emissionshandel im Straßenverkehr könnte eine sinnvolle Ergänzung des umweltpolitischen Instrumentariums bilden, mit dem bei geeigneter Ausgestaltung Steuerungsansätze verfolgt werden können, die die bislang eingesetzten Instrumente nicht leisten. Dies gilt in begrenztem Umfang für einen Upstream-Ansatz und vor allem für einen Hersteller-Midstream-Ansatz. Bei Letzterem sind allerdings noch Fragen der Ausgestaltung zu klären, da sich allein aus der Zahl der abgesetzten oder zugelassenen Fahrzeuge keine sichere Prognose der tatsächlichen Emissionen ergibt. Ein Downstream-Ansatz bei den Fahrzeugnutzern ist auf Grund der extrem hohen Zahl der einzubeziehenden Akteure nicht praktikabel.

Bezugsgröße in diesem Maßnahmenansatz ist typischerweise der Normverbrauch der PKW, in Europa gemäß dem „neuen europäischen Fahrzyklus" (NEFZ), der volumetrisch pro Entfernungseinheit ausgedrückt wird (l/100 km). Durch Ausmultiplizieren mit den entsprechenden Kenngrößen der Bezugskraftstoffe lassen sich daraus einfach die zugehörigen Energiegehalte und CO_2-Emissionen ermitteln (üblicherweise in g/km ausgedrückt). Soweit ganz herkömmliche Otto- und Dieselkraftstoffe Verwendung finden, sind dabei die Verhältnisse zwischen den Verbrauchswerten und den (klimarelevanten) CO_2-Emissionen eindeutig; im Prinzip gilt dies auch bei Verwendung von Erdgas. Bei Beimengungen oder bei ausschließlicher Verwendung regenerativer Kraftstoffe gehen die Ergebnisse auseinander, weil die CO_2-Emissionen aus der Oxydation von in Biomasse gebundenem Kohlenstoff als klimaneutral gewertet und entsprechend nicht berücksichtigt werden. Bei der Ausformulierung von Maßnahmen ist daher genau zu beachten, ob tatsächlich Verbrauchs- oder Emissionslimits festgeschrieben werden, und die zugehörige Mess- und Berechnungsmethode genau zu bestimmen und so zu gestalten, dass Artefakte vermieden werden.

Der augenscheinliche Vorteil des Maßnahmenansatzes liegt in seiner leichten Verständlichkeit und in der verhältnismäßig einfachen und sicheren Bestimmbarkeit der abzuleitenden Energieverbrauchs- bzw. Emissionsreduktionen. Tatsächlich allerdings ergeben sich zwei Einschränkungen: Zum einen repräsentiert der Verbrauch von Treibstoffen die von den Fahrzeugen ausgehende Klimabelastung nicht vollständig; insbesondere die auch hierzulande in PKW zunehmend eingebauten Klimaanlagen verursachen bislang durch die dort verwendeten Stoffe in der Regel zusätzliche Belastungen. Für eine korrekte Formulierung müssten daher neben den Normverbräuchen auch diese weiteren Belastungen durch fallspezifische Zuschläge Berücksichtigung finden. Die zweite Einschränkung ergibt sich daraus, dass die tatsächliche Klimabelastung von Nutzungsart und -umfang des Fahrzeugs abhängt und somit vom Fahrzeug allein nicht abschließend bestimmt werden kann. Diese grundsätzliche Einschränkung ist nicht ohne weiteres abzufangen, kann jedoch als eher unwesentlich angesehen werden, wenn nicht das Einzelfahrzeug, sondern die gesamte Fahrzeugflotte betrachtet wird. Unter den hier zunächst ohne Bewertung aufgeführten theoretisch denkbaren ordnungsrechtlichen Instrumenten sind zu nennen:

- Einheitliche CO_2-Grenzwerte für alle Neufahrzeuge in Analogie zu den Schadstoffgrenzwerten, gegebenenfalls gestaffelt nach der Fahrzeuggröße (z.B. Innenraumgröße); in diese Kategorie gehört auch der deutsche Vorschlag gegenüber der EU in den neunziger Jahren, bei dem der zulässige CO_2-Ausstoß über der Fahrzeugmasse ansteigt (allerdings in geringerem Umfang, als die Zunahme des Kraftstoffverbrauches ohne sonstige Änderungen am Fahrzeug mit der Fahrzeugmasse ansteigen würde).
- CO_2-Grenzwerte, die im Durchschnitt durch die Neuwagenflotten jedes Herstellers erfüllt werden müssen, in Anlehnung an die US-CAFE-Standards;
- einheitliche prozentuale Absenkungsquoten, ausgehend von den unterschiedlichen Ausgangsgrößen für die Flotten der jeweiligen Hersteller (vgl. NRW-Bundesratsinitiative von 1990);
- CO_2-Grenzwerte, die im Durchschnitt aller Neuwagen erfüllt werden müssen, also mit Ausgleichsmöglichkeiten zwischen den Herstellern; diesem Ansatz kann man auch den EU-Zielwert von 120 g/km zurechnen.

CO_2-Grenzwerte für Einzelfahrzeuge

Typprüfwerte für Einzelfahrzeuge würden in diesem Ansatz entweder analog zu den Schadstoffgrenzwerten im Fahrzyklus einheitlich für alle Fahrzeuggrößen festgelegt oder nach Fahrzeugkategorien (Fahrzeuggrößen) differenziert. Im erstgenannten Fall würden zum Teil extreme Minderungsanstrengungen bei großen, leistungsstarken und verbrauchsungünstigen Modellen erforderlich, wogegen im Segment mit CO_2-Emissionen unterhalb der Grenze keine Veränderungen impliziert würden. Aus heutiger Sicht wäre eine solche Regelungsstrategie unwahrscheinlich, da sie auf eine Vereinheitlichung des Modellangebotes in Richtung auf Kleinwagen-, Kompakt- und Mittelklasse hinauslaufen würde. Neben dem Aspekt der nicht gegebenen Verhältnismäßigkeit wären sowohl die volkswirtschaftliche als auch die ökologische Effizienz einer solchen Strategie fraglich: Ein niedriger Grenzwert dürfte dazu führen, dass Hersteller großer Modelle erhebliche Absatzprobleme bekämen – die Kunden würden auf Ersatzbeschaffungen verzichten und ihre Fahrzeuge einfach weiterhin benutzen –, ein hoher Grenzwert wiederum würde bis hin zur Mittelklasse keine effektive Reduzierung der durchschnittlichen CO_2-Emissionen bewirken. Bei einer Staffelung nach Fahrzeuggröße erscheint es schwierig, den passenden Parameter für „Fahrzeuggröße" einvernehmlich festzumachen: sollte es die Fahrzeugmasse, die Motorleistung, das Innenraumvolumen, die zulässige Zuladung oder eine andere Größe sein. Generell dürfte es schwierig sein, einer unerwünschten Ausweichreaktion in höhere Klassen mit höheren Emissionsgrenzwerten vorzubeugen.

CO_2-Flottengrenzwerte, einheitlich für alle Hersteller

Grenzwerte für den im Fahrzyklus gemessenen durchschnittlichen Kraftstoffverbrauch (und damit indirekt den CO_2-Ausstoß) der in einem Bezugsjahr zugelassenen Fahrzeuge sind in den USA in den siebziger Jahren eingeführt worden (sog. CAFE-Standards); in den Anfangsjahren dieser Maßnahme hat sich im Markt eine deutliche Verschiebung hin zu sparsameren Modellen vollzogen. Aufgrund des Umstandes, dass die Grenzwerte nicht adäquat nach dem technischen Fortschritt angepasst wurden, sowie wegen der Ausblendung der schwereren Pick-up- und Van-Modelle – die vom Markt in zunehmenden Maße präferiert werden –, hat der Minderungseffekt abgenommen. Der positive Effekt in den ersten Jahren ist vor dem Hintergrund des damals extrem ungünstigen Kraftstoffverbrauches im US-Markt zu sehen. Gegenüber dem vorgenannten Ansatz mit einheitlichen modellspezifischen Grenzwerten ergibt sich für die Hersteller mit einem breiten Modellprogramm eine gewisse Flexibilität in der Erfüllung der Anforderungen. Für Hersteller mit

ausschließlich größeren oder aus anderen Gründen CO_2-spezifisch ungünstigeren Modellen würde diese Maßnahme jedoch erhebliche Probleme aufwerfen, da sie CO_2-Emissionen der verbrauchsungünstigeren Modelle nicht mit dem Absatz kleiner Sparkonzepte ausgleichen können. Da die Emissionsbeiträge der von den betroffenen Herstellern hergestellten Fahrzeuge nicht erheblich sind, wäre das Gebot der Verhältnismäßigkeit nicht erfüllt.

Eine wirtschafts- und beschäftigungspolitisch unerwünschte Folge wäre, dass Hersteller von ausschließlich Oberklassefahrzeugen oder leistungsstarken Sportwagen entweder gezwungen würden, ihre Unabhängigkeit aufzugeben oder die Produktion einstellen müssten. Dies wäre in umfassender Bewertung nicht zu rechtfertigen.

Prozentuale Minderungsziele, einheitlich für alle Hersteller

Bei diesem Maßnahmenansatz würde ein prozentualer Minderungspfad hinsichtlich der durchschnittlichen spezifischen CO_2-Emissionen (gemessen im Fahrzyklus) der in Verkehr gebrachten PKW eines Herstellers vorgegeben. Der mittlere Ausstoß beispielsweise im Ausgangsjahr 2000 würde herstellerspezifisch zu 100 Prozent gesetzt; in den Folgejahren müsste ein jeweils um x Prozent niedrigerer Wert erreicht werden. Mit dieser Anforderung würde dem Umstand Rechnung getragen, dass die Modellpaletten der Hersteller unterschiedlich sind und auch weiterhin bleiben können; erforderlich wäre im Falle der Beibehaltung des jeweiligen Modellspektrums eine Fortentwicklung des Standes der Effizienztechnik in allen Modellkategorien. Aus gesellschaftlicher und aus ökologischer Sicht würde diese Regelungsstrategie dem Umstand Rechnung tragen, dass es sich bei der Herausforderung Klimaschutz um eine Gesamtaufgabe handelt, die nur dann Akzeptanz findet, wenn sie dem gesellschaftlichen Grundverständnis wie den ökologischen Anforderungen entspricht: Dem gesellschaftlichen Trend der Ausdifferenzierung von Lebensstilen würde entsprochen und ebenfalls der Tatsache, dass es um die Gesamtemissionen geht und nicht um die Emissionen einzelner Modelle.

Gesamtheitliche Grenzwerte für die Neufahrzeugflotte

Verhältnismäßig hohe Freiheitsgrade ermöglichen gesamtheitliche Grenzwerte, die durch die Fahrzeuge des Neuzulassungsjahrgangs lediglich im Durchschnitt, aber nicht von jedem Einzelfahrzeug eingehalten werden müssen, insofern hier Kompensationsmöglichkeiten zwischen verbrauchsstärkeren und verbrauchsschwächeren Fahrzeugen zugelassen werden. Soweit der auf dem Markt abgesetzte Fahrzeugmix nicht ohnehin im Rahmen der Grenzwerte verbleibt, müssten geeignete Mechanismen sicherstellen, dass verbrauchsstärkere Fahrzeuge nur in dem Umfang in Verkehr gebracht werden, dass der gebotene Durchschnittsverbrauch nicht überschritten wird. Dies ist am einfachsten durch entsprechende Zertifikate (mit Nachweisen von Minderverbräuchen) möglich, die auf die verbrauchsgünstigeren Fahrzeuge ausgegeben werden und die sich jeder in dem erforderlichen Umfang besorgen muss, um ein verbrauchsungünstigeres Fahrzeug zulassen zu können. Soweit solche Zertifikate ein handelbares Gut darstellen, nähert sich dieser Ansatz einer Ausprägung des Emissionshandels.

Zusammenfassende Bewertung

Auf das Einzelfahrzeug zielende Granzwerte erscheinen nur beschränkt zielführend und zudem rechtlich kaum vertretbar. Einheitliche Anforderungen, die von jedem Fahrzeug erfüllt werden müssen, können aus vielen Gründen abgeleitet werden, aber verhältnismäßig schlecht aus den Erfordernissen des Klimaschutzes: Dort kommt es auf den Gesamteffekt an, und nicht sosehr auf die gleiche Größe der Beiträge. Einheitliche Grenzwerte, auch für Flotten nach dem US-Beispiel, würden dagegen bestimmte Hersteller ungleich stärker belasten – bis hin zu der Gefährdung der Existenz eines auf große Modelle oder auf leistungsstarke Sportwagen spezialisierten Unternehmens. Da der Emissionsbeitrag derartiger, in relativ kleinen Stückzahlen verkaufter Modelle nicht erheblich ist, wäre diese Maßnahme weder wirtschaftspolitisch noch rechtlich (nach dem grundgesetzlichen Gebot der Verhältnismäßigkeit) vertretbar.

Soweit eine Grenzwertüberschreitung nicht die Zulassungsfähigkeit eines Fahrzeugs tangiert, sondern – über entsprechende Strafzahlungen – lediglich kostenerhöhend wirkt, kann die Verträglichkeit zwar durchaus gegeben sein; in diesem Fall jedoch muss die zureichende Absenkung der Klimalasten in Frage gestellt werden. Dagegen hat die obige Diskussion der Maßnahmenoptionen im PKW-Subsektor deutlich gemacht, dass unter den ordnungsrechtlichen Instrumenten das Modell relativer Absenkungspfade nichtdiskriminierend im Hinblick auf die Produktionsstrukturen ist. Auch die Vorgabe von einzuhaltenden Durchschnittswerten kann als im Grundsatz unschädlich angesehen werden. Für die Wirkungsumfänge ist in beiden Fällen naturgemäß maßgeblich, welche zahlenmäßigen Vorgaben zu welchen Zeitpunkten erfüllt werden müssen; bei zeitlich gestaffelten Anforderungen können mittelfristig erhebliche Absenkungen von Energieverbrauch und Klimalasten erzielt werden.

Kapitel 7
Ergebnis

Die Untersuchung der Klimaentwicklung und der Klimapolitik haben gezeigt, dass sich die Beweise für eine systematische Klimaerwärmung zunehmend verdichten und mit zunehmender Gewissheit von einer signifikanten menschlichen Verursachung dieser Entwicklung auszugehen ist; die auf der Ebene der Vereinten Nationen angestoßene politische Behandlung der damit verbundenen Aufgaben und Probleme hat mit dem Wirksamwerden der im Kyoto-Protokoll festgelegten Vereinbarungen einen wichtigen Meilenstein erreicht. Weitere Maßnahmen sind jedoch wegen der eingeschränkten Umsetzung und der beschränkten räumlichen, zeitlichen und sachlichen Reichweite dieser Vereinbarungen unumgänglich.

Der Verkehrssektor erweist sich in der Analyse als einer der wesentlichen Mitverursacher der von Menschen verursachten Klimabelastungen, der zwar gegenüber anderen Verursachungssektoren nicht dominant ist, aber eine besonders kritische Entwicklung weiterhin steigender Belastungen aufweist. Die bisherige und bis auf weiteres erwartete Belastungserhöhung durch den Verkehr in den OECD-Ländern wird dadurch weiter verschärft, dass in Zukunft auch von den Nicht-OECD-Ländern stark steigende Belastungen ausgehen dürften, weil sie sich in ihrem Verkehrsverhalten den OECD-Ländern annähern. Eine unter Klimagesichtspunkten vertretbare Gestaltung des Verkehrs in den OECD-Ländern ist somit auch deshalb von Bedeutung, weil damit Standards gesetzt werden.

Für Deutschland konnte festgestellt werden, dass die verkehrsbedingten Klimabelastungen im Gegensatz zu jenen anderer Sektoren weiterhin ansteigen, was insbesondere auf drei Verkehrsbereiche zurückzuführen ist: Der Automobilverkehr als traditionelle Hauptbelastungsquelle weist kaum weitere Wachstumspotenziale aus; zusammen mit dem laufenden Trend zur energetischen Effizienzerhöhung kann erwartet werden, dass die die daraus abzuleitenden Klimalasten in den nächsten 25 Jahren um etwa ein Drittel verringern. Aufgrund der hohen Ausgangsbasis sind auch die reduzierten erwarteten Lasten noch sehr hoch. Der Straßengüterverkehr dagegen wird als weiterhin steigend angenommen; die dort nur geringeren Effizienzpotenziale können die Verkehrsausweitung nicht kompensieren, weshalb der LKW-Verkehr künftig einen steigenden Beitrag zur Klimabelastung liefern dürfte. Der noch vor wenigen Jahrzehnten weitgehend vernachlässigbare Luftverkehr trägt mittlerweile bereits nennenswert zu den verkehrsbedingten Klimalasten bei; bei durchaus relevanten Effizienpotenzialen geht doch der laufende Expansionspfad deutlich über diese Potenziale hinaus, weshalb sich der Luftverkehr binnen 25 Jahren zur stärksten verkehrlichen Klimabelastungsquelle entwickeln könnte. Hier ist deshalb besondere Sorgfalt erforderlich. Die bisherige Übung, den grenzüberschreitenden Verkehr und damit große Teile des Luftverkehrs nicht zu berücksichtigen, hat zu einer bislang unzureichenden Beachtung des Luftverkehrs ebenso beigetragen wie der Ausschluß der Klimawirkungen durch die Wasser- und Stickoxidemissionen des Luftverkehrs.

Bei dem – auch wegen seiner allgemeinen Nutzung – besonders bedeutenden PKW-Verkehr wurden die technischen Perspektiven genauer erörtert. Dabei zeigte sich, dass grundsätzlich neue Antriebsarten, wie etwa Brennstoffzellenantriebe, auf absehbare Zeit keine nennenswerten Beiträge zur Klimaentlastung erbringen dürften. Brennstoffzellenfahrzeuge, deren wirtschaftliche Bereitstellung in großem Umfang noch nicht terminiert werden können, wären im übrigen erst dann deutlich klimaentlastend, wenn der eingesetzte Treibstoff (im wesentlichen Wasserstoff) regenerativ erzeugt würde; eine wirtschaftliche Bereitstellung großer Mengen regenerativ erzeugten Wasserstoffs – gegenwärtig wird Wasserstoff praktisch ausschließlich aus Erdgas gewonnen – erscheint gegenwärtig ebenfalls nicht terminierbar.

Damit dürften auf absehbare Zeit weiterhin Otto- und Dieselmotoren die maßgeblichen in PKW eingesetzten Aggregate sein, deren weitere Optimierung somit eine zentrale Aufgabe darstellt. Bei einem Vergleich dieser beiden Antriebsarten ist zu berücksichtigen, dass der Dieselkraftstoff ein kompakterer Treibstoff ist als Ottokraftstoff (Benzin): Er enthält pro Liter deutlich mehr Energie – und führt zu entsprechend höheren CO_2-Emissionen. Ein großer Teil des in der Öffentlichkeit wahrgenommenen Verbrauchsvorteils des Dieselantriebs beruht wohl auf einer sachlich unangemessenen Zugrundelegung der Verbrauchswerte in Liter je 100 km; die Mineralölsteuersätze unterstützen eine Fehleinschätzung noch dadurch, dass der Kraftstoff mit mehr Energie (Diesel) geringer besteuert wird als der Kraftstoff mit weniger Energie (Benzin). Tatsächlich beträgt der energetische Effizienzvorsprung des Dieselantriebs nur wenige Prozent, die sich bei einheitlichen lufthygienischen Anforderungen (Schadstoff-, Partikelemissionen) weiter reduzieren dürften.

Gleichwohl bestehen für Otto- wie für Dieselantriebe weitere Effizienzpotenziale, dabei durch verbesserte Verbrennungsführung bei Ottomotoren in größerem Umfang. Hybridisierung, also die Kombination von herkömmlichem Verbrennungsmotor mit einem Elektromotor, kann die Energieeffizienz für den Gesamtmix unterschiedlicher Fahrzustände deutlich erhöhen. Klimaentlastend kann neben der effizienteren Verbrennung auch der Übergang zu Treibstoffen mit geringeren CO_2-Emissionen sein, in beschränktem Umfang bei Erdgas oder der Beimengung von Biotreibstoffen (etwa Rapsmethylester, RME, bei Dieselkraftstoffen oder Bioalkohole bei Benzinen), in hohem Maß bei reinen biologisch basierten Kraftstoffen.

Darüber hinaus bestehen Möglichkeiten zur Energieeinsparung und Klimaentlastung bei der Gesamtkonzeption des Fahrzeugs; zu nennen sind hier insbesondere die Fahrzeugmasse und -form, die Geschwindigkeitsauslegung und die Bereifung. Naturgemäß spielen die sog. Nebenverbraucher, also Einrichtungen wie insbesondere Klimaanlagen, die Energie verbrauchen, ohne unmittelbar der Fahrzeugbewegung zu dienen, eine umso größere Rolle im gesamten Energieverbrauch, je weiter der Energiebedarf für den Antrieb vermindert wird.

Generell stehen erhöhte Performance-, Komfort- und Sicherheitsansprüche dem Ziel einer Energieeinsparung entgegen; dabei können die gegenläufigen Effekte teilweise durch die Wahl höherwertiger Materialien oder fortschrittlicherer technischer Lösungen abgefangen werden, allerdings in der Regel zu höheren Kosten. Insgesamt ergibt sich daraus ein weites Feld für unterschiedliche Optimierungsansätze je nach Marktsegment oder Einsatzprofil der Fahrzeuge.

Bei der Diskussion möglicher (politischer) Maßnahmen zur Verminderung der verkehrsbedingten Klimabelastungen wurde zunächst eine Übersicht geboten über mögliche Wirkungsmechanismen und den Stand der Maßnahmenentwicklung insbesondere in Deutschland. Beachtlich erscheint, dass die Deutsche Bundesregierung mit den im Klimaschutzprogramm 2005 vorgelegten Ansätzen von einer Erfüllung der im Kyoto-Protokoll eingegangenen Verpflichtungen ausgeht; nachdem entsprechende Zielpfade für die Großemittenten aus Energiewirtschaft und Industrie bereits über die Einführung der Emissionshandelsmechanismen definiert wurden, enthält das Klimaschutzprogramm zusätzliche Maßnahmen, die im Verkehrssektor die hierfür vorgesehene zusätzliche Absenkung um 10 Mio. t CO_2-äquivalente Emissionen erbringen sollen, insbesondere durch Substitution herkömmlicher durch Biokraftstoffe und Kampagnen zu energieeffizientem Fahren. Einen deutlich erweiterten Maßnahmenkatalog zur CO_2-Einsparung im Verkehr hat das Umweltbundesamt bereitgestellt, darin werden u.a. auch verkehrsvermeidende Siedlungs- und Produktionsstrukturen, Verlagerungen im Güterverkehr von der Straße auf die Schiene oder Abgaben auf Kerosin angeführt.

Im weiteren wurde auch hier der Fokus auf den Bereich des PKW-Verkehrs gelegt. Als gehaltvolle Optionen konnten insbesondere identifiziert werden: eine Weiterentwicklung der Selbstverpflichtung seitens der PKW-Hersteller und Importeure; eine Gestaltung der Fahrzeugsteuern nach dem Verbrauch der PKW-Modelle; Verbrauchsgrenzwerte in unterschiedlicher Form; Emissionshandelsmechanismen. Verbrauchslimits und Emissionshandelsmechanismen

wurden als besonders aktuelle Ansätze etwas vertieft behandelt. Im Grundsatz erscheinen alle genannten Ansätze bei sorgfältiger Gestaltung und insbesondere wirksamen Kontrollen der Umsetzung geeignet, die erforderlichen Klimaentlastungsziele bei hoher gesellschaftlicher und wirtschaftlicher Verträglichkeit zu stützen. Daneben erscheinen auch andere Optionen, wie z.B. eine Weiterentwicklung der Ökosteuern oder Tempolimits, denkbar.

Auch wenn alle Maßnahmen versprechen, geringere gegenwärtige Einschränkungen durch eine stärkere Erweiterung künftiger Freiheitsgrade mehr als wettzumachen, ist gleichwohl die Betroffenheit einzelner oder gesellschaftlicher Gruppen unterschiedlich gestaltbar. Es muss daher der politischen und gesellschaftlichen Diskussion vorbehalten bleiben, die Maßnahmen und deren Ausprägungen zu bestimmen, die im Rahmen eines gesamtheitlichen Konzeptes unter den Gesichtspunkten der sozialen Gerechtigkeit, der individuellen Freiheit und der Absicherung der künftigen Entwicklung vorzuziehen sind.

Literatur

ACEA – Association des Constructeurs Européens d'Automobiles (2003): Monitoring of ACEA's Commitment on CO_2 Emission Reductions from Passenger Cars (2002). Joint Report of the European Automobile Manufacturers Association and the Commission Services. Final Report, 05.09.2003.

ACIA – Arctic Climate Impact Assessment (2004): Impacts of a Warming Arctic: Arctic Climate Impact Assessment. Highlights. Fairbanks: ACIA.

Airbus (2004): Global Market Forecast 2004–2023, Blagnac 2004.

Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB): Energiebilanzen für die Bundesrepublik Deutschland, www.ag-energiebilanzen.de.

Arrhenius, Svante (1896): On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. Vol. 41, No. 251, April 1896, 237–277.

ASPO – The Association for the Study of Peak Oil & Gas (2004): Oil and Gas Liquids 2004 Scenario, updated by Colin J. Campbell, 2004-05-15, www.peakoil.net.

Bensmann, M. (2004): Renaissance für Ökobenzin. In: Neue Energie 05/2004, S. 44 ff.

Bergmann, Heidi; Berthenrath, Roman; Betz, Regina; Dünnebeil, Frank; Ewringmann, Dieter, Lambrecht, Udo; Liebeig, Lars (2005): Emissionshandel im Verkehr. Ansätze für einen möglichen Up-Stream-Handel im Verkehr, Forschungsvorhaben im Auftrag des Umweltbundesamtes, Köln, Heidelberg, Mannheim, Karlsruhe.

Boeing Commercial: Current Market Outlook, Seattle, annual editions 1996–2004.

BMU – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2005a): Erneuerbare Energien in Zahlen – Nationale und Internationale Entwicklung, Stand: Juni 2005. Berlin.

BMU (2005b): Pressemitteilung 117/05. Bund setzt das richtige Signal zur Förderung sauberer Diesel-PKW. Bundesminister appelliert an die Länder, vom 11.05.2005. www.bmu.de.

BMU (2005c): Das Nationale Klimaschutzprogramm 2005. Sechster Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe „CO_2-Reduktion". Zusammenfassung. Berlin.

BMWA – Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit (2005a): Energiedaten – Emissionen von Kohlendioxid, Stickstoffoxiden, Schwefeldioxid, Kohlenmonoxid und Staub nach Emittentengruppen. http://www.bmwa.bund.de. Zugriff am 24.05.05.

BMWA (Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit), Hg. (2005b): EWI/Prognos: Energiereport IV. Die Entwicklung der Energiemärkte bis zum Jahr 2030. Energiewirtschaftliche Referenzprognose. Kurzfassung, Dokumentation 545, Berlin 2005.

Bodansky, Daniel (1994): Prologue to the Climate Change Convention. In: Mintzer, Irving M. und J.A. Leonhard (Hrsg.): Negotiating Climate Change: The inside Story of the Rio Convention. Cambridge: Cambridge University Press and Stockholm Environment Institute, 45–74.

Robert Bosch GmbH (2002): Kraftfahrtechnisches Taschenbuch (24. Auflage). Stuttgart.

Brouns, Bernd; Ott, Hermann E. (2005): Taking the lead: Post 2012 Climate Targets for the North. Towards adequate and equitable future climate commitments for industrial countries. Wuppertal Paper No. 155, November 2005.

Brouns, Bernd, Santarius, Tilman (2001): Die Kyoto-Reduktionsziele nach den Bonner Beschlüssen. Energiewirtschaftliche Tagesfragen, Jg. 51, H. 9, September 2001, 590–591.

CAN – Climate Action Network (2002): Preventing dangerous climate change. CAN Position Paper. http://www.climnet.org/pubs/CAN-adequacy30102002.pdf. Zugriff am 10.01.2005.

Commission of the European Communities (2005): Commission Staff Working Paper. Fiscal Incentives For Motor Vehicles In Advance Of Euro 5. Brüssel, 12.01.2005.

DEHSt – Deutsche Emissionshandelsstelle (2004): Klimaschutz: Der Emissionshandel im Überblick – Grundlagen und Funktionsweise, Berlin

Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (Bearb.): Verkehr in Zahlen (Hrsg.: Bundesministerium für Verkehr), Hamburg (Deutscher Verkehrs-Verlag), jährlich.

EEA – European Environment Agency (2005): Analysis of greenhouse gas emission trends and projections in Europe 2004. EEA Technical report No 7/2004. Kopenhagen: EEA. http://reports.eea.eu.int/technical_report_2004_7/en/Analysis_of_GHG_trends_and_projections_in_Europe.pdf. Zugriff am 28.03.2005.

Enderle, C.; Schnabel, M. (2005): Das Konzept der homogenen Verbrennung. Verband der Automobilindustrie, Technischer Kongress 2005 – Session 1: Umwelt und Energie, 59 ff.

Enquete-Kommission „Nachhaltige Energieversorgung" (2002): Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung. Schlussbericht. Berlin.

Erdgasfahrzeuge 2005: www.erdgasfahrzeuge.de. Zugriffe am 19. und 20.05.05.

European Commission: Population Statistics, 2004 edition, Luxembourg 2004.

EU – (2005): European Council Brussels. 22 and 23 March 2005. Presidency conclusions. 7619/05. Brüssel: EU. http://ue.eu.int/ueDocs/cms_Data/docs/pressData/en/ec/84335.pdf. Zugriff am 23.03.2005.

EU – (2003): Establishing a Scheme for Greenhouse Gas Emission Allowance Trading Within the Community and Amending Council Directive 96/61/C. Directive 2003/87/EC of the European Parliament and of the Council of 13 October 2003. Official Journal of the European Union, L 275/33, 25.10.2003, 32–46. http://europa.eu.int/smartapi/cgi/sga_doc?smartapi!celexplus!prod!DocNumber&type_doc=Directive&an_doc=2003&nu_doc=0087&lg=EN. Zugriff am 28.03.2005.

EUTTW (2003): Well-To-Wheels Analysis Of Future Automotive Fuels And Powertrains In The European Context – Tank-to-Wheels Report, Version 1. Hrsg.: JRC/IES – Joint Research Centre of EU Commission/Institute for Environment and Sustainability.

EUWTT (2003): Well-To-Wheels Analysis Of Future Automotive Fuels And Powertrains In The European Context – Well-to-Tank Report, Version 1. Hrsg.: JRC/IES – Joint Research Centre of EU Commission/Institute for Environment and Sustainability.

EUWTW (2003): Well-To-Wheels Analysis Of Future Automotive Fuels And Powertrains In The European Context – Well-to-Wheels Report, Version 1. Hrsg.: JRC/IES – Joint Research Centre of EU Commission/Institute for Environment and Sustainability.

EWI/Prognos (2005): Energiereport IV. Die Entwicklung der Energiemärkte bis zum Jahr 2030. Energiewirtschaftliche Referenzprognose. Im Erscheinen.

Fulton, L., Eads, G. (2004): IEA/SMP Model Documentation and Reference Case Projection, Paris.

Group of Personalities (2001): European Aeronautics: A Vision for 2020, Luxembourg (Office for Official Publications of the European Communities) 2001.

Hadley Centre (2005): Global Average Near-Surface Temperatures 1861–2004. http://www.met-office.gov.uk/research/hadleycentre/CR_data/Monthly/Hadplot_globe.gif. Zugriff am 31.01.2004

Hadley Centre (2004): 2004: Another warm year. News release, 16 December 2004. Exeter: Met Office. http://www.metoffice.com/corporate/pressoffice/2004/pr20041216.html. Zugriff am 31.01.2005

Hare, William (2003): Assessment of Knowledge on Impacts of Climate Change – Contribution to the Specification of Art. 2 of the UNFCCC: Impacts on Ecosystems, Food Production, Water and Socio-economic System. Expertise for the WBGU Special Report ‚Climate Protection Strategies for the 21st Century: Kyoto and Beyond'. Berlin: WBGU. http://www.wbgu.de/wbgu_sn2003_ex01.pdf. Zugriff am 10.01.2005

Hennicke, Peter, Fischedick, Manfred; Wolters, Dirk (2000): Klimaschutz und Atomausstieg – eine weltweite Perspektive. Energiewirtschaftliche Tagesfragen, Jg. 50, Nr. 3, 140–145.

IEA – International Energy Agency (2004): CO_2-Emissions from Fuel Combustion, Paris.

IIASA – Internationales Institut für angewandte Systemanalyse (2005). Baseline Scenarios for the Clean Air for Europe (CAFE) Programme. Final Report, Laxenburg (IIASA) 2005.

IMA CO_2 – Interministerielle Arbeitsgruppe CO_2-Reduktion (2005): Nationales Klimaschutzprogramm. Beschluss der Bundesregierung vom 13. Juli 2005. Sechster Bericht der interministeriellen Arbeitsgruppe CO_2-Reduktion. Abschlussbericht. www.bmu.de.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2001a): Climate Change 2001: The Scientific Basis. Cambridge. Cambridge University Press.

IPCC (2001b): Climate Change 2001: The Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Cambridge. Cambridge University Press.

IPCC (2000): Emission Scenarios. Special Report of the IPCC. Cambridge. Cambridge University Press.

IPCC (1999): IPCC Special Report: Aviation and the Global Atmosphere, 1999, Summary for Policymakers über: www.ipcc.ch.

IPCC (1996): Climate Change 1995: The Science of Climate Change. Cambridge. Cambridge University Press.

KBA – Kraftfahrt-Bundesamt (2005a): http://www.kba.de; Kraftfahrt-Bundesamt; Zugriff am 31.01.05.

KBA (2005b): CO_2-Ausstoß weiter im Abwind. In: Statistische Mitteilungen des Kraftfahrtbundesamtes, Reihe 1, Februar 2005, S. 66 f.

KBA (2004a): Statistische Mitteilungen, Reihe 1, Kraftfahrzeuge: Neuzulassungen – Besitzumschreibungen – Löschungen – Bestand, monatlich, über www.kba.de.

KBA (2004b): Statistische Mitteilungen, Reihe 2, Kraftfahrzeuge, Jahresband, jährlich, über www.kba.de.

Kovats, R. Sari und Andrew Haines (2005): Global climate change and health: recent findings and future steps. Canadian Medical Association Journal, Vol. 172, No. 4, 14 February, 501–502.

LBST – Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (2002): Vergleich verschiedener Antriebskonzepte im Individualverkehr im Hinblick auf Energie- und Kraftstoffeinsparung – Endbericht. Ottobrunn.

LBSTWTW (2002): GM Well-To-Wheel Analysis of Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Advanced Fuel/Vechicle Systems – A European Study. Ottobrunn.

Lechtenböhmer, S.; Dienst, C.; Fischedick, M.; Hanke, T. (2005): Erdgas als Brückenenergie zu einer nachhaltigen Energiezukunft – empirische Untersuchungen zu den Treibhausgasemissionen aus der Erdgasbereitstellung in Russland. In: Wuppertal Bulletin zu Instrumenten des Klima- und Umweltschutzes, 8 (2005), 1, S. 23–26.

Lecocq, Franck; Capoor, Karan (2005): State and Trends of the Carbon Market 2005, Washington DC.

Loske, Reinhard (1996): Klimapolitik: im Spannungsfeld von Kurzzeitinteressen und Langzeiterfordernissen. Marburg: Metropolis Verlag.

Lückert, P.; Frey, J.; Kemmler, R. et al. (2005): Kunden- und zukunftsorientierte Technologien am Ottomotor – heute und morgen; 26. Internationales Wiener Motorensymposium 2005.

LVW-NS – Landesverkehrswacht (2005): Tagfahrlicht – Häufig gestellte Fragen; Landesverkehrswacht Niedersachsen e.V., www.landesverkehrswacht.de. Zugriff am 05.01.05.

Martinot, E. (2005): Renewables 2005 Global Status Report. 2nd Draft. Worldwatch Institute and Tsinghua University.

Müller (2001): Kraftstoffmehrverbrauch durch Fahren mit eingeschaltetem Abblendlicht. ETH Zürich, Institut für Mess- und Regeltechnik.

MWV – Mineralölwirtschaftsverband (2005): Statistiken, nach www.mwv.de.

MWV (2004): MWV-Prognose 2020 für die Bundesrepublik Deutschland. Hamburg.

MWV (2003): Mineralölzahlen 2003. Hamburg. Download http://www.mwv.de/Download/mz.pdf. Zugriff Mai 2004.

NABU – Naturschutzbund (2005): Pressemitteilung: Bundesregierung beschließt steuerliche Förderung von Dieselrußfiltern. Tschimpke: Länder müssen Farbe bekennen, vom 11.05.2005. www.nabu.de.

Oberthür, Sebastian; Ott, Hermann E. (2000): Das Kyoto-Protokoll. Internationale Klimapolitik für das 21. Jahrhundert. Opladen: Leske & Budrich.

OECD – Organisation on Economic Cooperation and Development (2004): Can Cars Come Clean? Strategies For Low-Emission Vehicles. 97–116.

Ogink, R. (2004): Computer Modelling of HCCI Combustion. Chalmers University of Technology. Göteborg.

Oreskes, Naomi (2004): The Scientific Consensus on Climate Change. Science, Vol. 306, 3 December 2004, 1686.

Ott, Hermann E. (1996): Völkerrechtliche Aspekte der Klimarahmenkonvention. In: Brauch, Hans Günther (Hrsg.): Klimapolitik: naturwissenschaftliche Grundlagen, internationale Regimebildung und Konflikte, ökonomische Analysen sowie nationale Problemerkennung und Politikumsetzung. Berlin et al. : Springer, 61–74.

Ott, Hermann E.; Brouns, Bernd; Sterk, Wolfgang; Wittneben, Bettina (2005): It Takes Two to Tango – Climate Policy at COP 10 in Buenos Aires and Beyond. Journal for European Environmental & Planning Law, No. 2/2005, 84–91.

Ott, Hermann E.; Winkler, Harald; Brouns, Bernd; Kartha, Sivan; Mace, M. J.; Huq, Saalemul; Kameyama, Yasuko; Sari, Agus P.; Pan, Jiahua; Sokona, Youba; Bhandari, Preety M.; Kassenberg, Andrzej; La Rovere, Emilio; Rahman, Atiq (2004): South-North Dialogue on Equity in the Greenhouse. A proposal for an adequate and equitable global climate agreement. Eschborn: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit.

o.V. (2005): Branche fährt Klimaschutzziel hinterher. In: Handelsblatt, 7.4.2005, http://www.handelsblatt.de.

Pehnt, M. (2001): Ökologische Nachhaltigkeitspotenziale von Verkehrsmitteln und Kraftstoffen. STB-Bericht 24; Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Stuttgart.

Petersen, Rudolf; Diaz-Bone, Harald (1998): Das Drei-Liter-Auto. Basel: Birkhäuser Verlag.

Pew Center (2004a): Business Environmental Leadership Council. http://www.pewclimate.org/companies_leading_the_way_belc (01.02.2005).

Pew Center (2004b): Learning From State Action On Climate Change. In Brief, No. 8. Arlington: Pew Center on Global Climate Change. http://www.pewclimate.org/docUploads/States%5FInBrief%2Epdf (25.03.2005).

Pew Center on Global Climate Change (2004c): Comparison Of Passenger Vehicle Fuel Economy And Greenhouse Gas Emission Standards Around The World. Über www.pewclimate.org; Umrechnung von Miles per Gallon auf Liter je 100 km: eigene Berechnungen.

Projektgemeinschaft IFEU, ZEW, Deutsche Lufthansa, Deutsche Bahn (2003): Flexible Instrumente der Klimapolitik im Verkehrsbereich – Weiterentwicklung und Bewertung von konkreten Ansätzen zur Integration des Verkehrssektors in ein CO_2-Emissionshandelssystem. Endbericht im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Verkehr des Landes Baden-Württemberg, Heidelberg, Mannheim, Frankfurt, Berlin.

Rabe, M. (2005): BTL fuels – A View of Volkswagen; in: Synthetische Biokraftstoffe, Techniken – Potenziale – Perspektiven; Kongress 03. bis 04.11.2004, Wolfsburg; Hrsg.: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.; Landwirtschaftsverlag, Münster, 2005.

Schallaböck, Karl Otto (2005): Der Luftverkehr zwischen Verkehrsbedarf und Klimaschutzerfordernissen. In Loske, R.; Schaeffer, R. (Hrsg.): Die Zukunft der Infrastrukturen. Marburg: Metropolis Verlag, S. 289–317.

Schallaböck, Karl Otto (1996): Verkehr und Zeit. In: Rinderspacher, Jürgen P. (Hrsg.): Zeit für die Umwelt. Berlin 1996, S. 175–212.

Schallaböck, Karl Otto (1993): Zur Bedeutung des Luftverkehrs im klimapolitischen Verkehrsdiskurs, in: Verkehrsvermeidung durch Raumstruktur – Materialien –, Studie B „Potentiale an Verkehrsvermeidung durch Raumstruktur“ im Studienprogramm Verkehr der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ des 12. Deutschen Bundestages, Wuppertal, Juni 1993.

Schafer, Andreas (MIT Center for Technology, Policy & Industrial Development) (2000): Modeling Global Mobility: World Passenger Transport; Presentation at the Transportation Vision 2050 Futurist Workshop, Seattle, September 26–27, 2000.

Schmid, S. (2004): Persönliche Informationen im Rahmen einer noch unveröffentlichten Studie für das Umweltbundesamt; Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Stuttgart.

Schrag, Daniel P. und Richard B. Alley (2004): Ancient Lessons for Our Future Climate. Science, Vol. 306, 29 October 2004, 821–822.

Stainforth, D. A.; Aina, T.; Christensen, C.; Collins, M.; Faull, N.; Frame, D. J.;Kettleborough, J. A.; Knight, S.; Martin, A.; Murphy, J. M.; Piani, C.; Sexton, D.; Smith, L. A.; Spicer, R. A.; Thorpe, A. J.; Allen, M. R. (2005): Uncertainty in predictions of the climate response to rising levels of greenhouse gases. Nature, Vol. 433, 27 January 2005, 403–406.

Statistisches Bundesamt (2005): 1 Million mehr Fluggäste im ersten Quartal 2005; Pressemitteilung vom 02.06.2005 über www.destatis.de.

Statistisches Bundesamt: Fachserie 8, Reihe 6.1. Flugverkehr auf ausgewählten Flugplätzen, Jahresausgaben 2003 und 2004.

Statistisches Bundesamt: Fachserie 8, Reihe 6.2, Flugverkehr auf allen Flugplätzen, Jahresausgabe 2003.

Stott, Peter A., Stone, D. A.; Allen, M. R. (2004): Human contribution to the European heatwave of 2003. Nature, Vol. 432, 2 December 2004, 610–614.

Stronzik, M.; Bühler, G.; Lambrecht, U. (2002): Ansatzpunkte für einen Emissionshandel im Verkehrssektor. In: Zeitschrift für Energiewirtschaft 26/3, 193–208.

SWOV – Research Institute for Road Safety Research (2003): Die Sicherheitseffekte des „Tagsüber-Fahrens mit Licht" (TFL). www.swov.nl. NL-Leidschendam.

Thomas, C., Cameron, A.; Green; R:E; Bakkenes, M.; Beaumont, L.J.; Collingham, Y.C.; Erasmus, B.F.N.; de Siqueira, M.F.; Grainger, A.; Hannah, L.; Hughes, L.; Huntley, B.; van Jaarsveld, A.S.; Midgley, G.F.; Miles, L.; Ortega-Huerta, M.A.; Townsend Peterson, A.; Phillips, O.L.; Williams, S.E. (2004): Extinction risk from climate change. Nature, Vol. 427, 8 January 2004, 145–148.

Tappe, M. (2000): Umwelt und Verkehr – rechtliche Rahmenbedingungen, Kraftstoffqualitäten in Europa aus der Sicht des Umweltschutzes. Technische Arbeitstagung Hohenheim, 21.– 23.3.2000; www.umweltbundesamt.de; Zugriff am 27.01.05.

Thiele, E. (2004): Neue emissionssparende Fahrzeugkonzepte. Auto(mobil) und Umweltschutz. Bay. LfU-Fachtagung, 29.01.04.

UBA – Umweltbundesamt, FG Z2.5 (2004a): Dieselruß, Umweltforschungsdatenbank UFORDAT, Erscheinungsjahr 2000–2003, über www.uba.de (Dokumentnummer 2720 v. 21.06.2004).

UBA, FG Z2.5 (2004b): Dieselruß, Umweltliteraturdatenbank ULIDAT, Erscheinungsjahr 2000–2003, über www.uba.de (Dokumentnummer 2721 v. 21.06.2004).

UBA (2003a): Future Diesel: Abgasgesetzgebung PKW, leichte Nfz und LKW – Fortschreibung der Grenzwerte bei Dieselfahrzeugen, über www.uba.de (Dokumentnummer 2353 v. 27.11.2003).

UBA (2003b): Presse Information 17/2003 – PKW fahren mit neuen Reifentypen leiser und sparen Kraftstoff. www.umweltbundesamt.de. Zugriff am 27.01.05.

Umweltbundesamt (2003c): CO_2-Minderung im Verkehr. Ein Sachstandsbericht des Umweltbundesamtes. Beschreibung von Maßnahmen und Aktualisierung von Potenzialen.

UBA (Berlin), BUWAL (Bern), UBA (Wien), Hg. (1995): Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs, Version 1.1, Okt. 1995 (CD-ROM), INFRAS AG, Mühlenstraße 45, CH 3007 Bern/Schweiz.

UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change, Secretariat: Greenhouse Gas Inventory Data, über: www.unfccc.int.

UNFCCC (2002a): Agreement between the European Community and its member states under Article 4 of the Kyoto Protocol. Note by the secretariat. FCCC/CP/2002/2 (12 June 2002). Bonn: UNFCCC-Secretariat.

UNFCCC (2002b): Report of the Conference of the Parties on its seventh session, held at Marrakesh from 29 October to 10 November 2001. Addendum. Part Two: Action taken by the Conference of the Parties. Volume 1. FCCC/CP/2001/13/Add.1 (21 January 2002). Bonn: UNFCCC-Secretariat.

UNFCCC (2002c): Report of the Conference of the Parties on its seventh session, held at Marrakesh from 29 October to 10 November 2001. Addendum. Part Two: Action taken by the Conference of the Parties. Volume 2. FCCC/CP/2001/13/Add.2 (21 January 2002). Bonn: UNFCCC-Secretariat.

UNFCCC (1998): Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. FCCC/CP/1997/7/Add.1 (18 March 1998). Bonn: UNFCCC-Secretariat.

van de Sand, Isabel; Bals, Christoph (2005): Deutsche Autoindustrie klagt gegen Klimaschutzgesetz Kaliforniens – Umweltorganisationen fordern Zurücknahme. Hintergrundpapier zur Pressekonferenz der Umweltverbände am 21.03.05. Germanwatch: Bonn/Berlin. http://www.germanwatch.org/rio/auto05hg.pdf (25.03.2005).

Wallentowitz, H.; Neunzig, D. (o.J.): Anpassungsszenarien zwischen Antrieb, Fahrzeug und Verkehrsfluss. Institut für Kraftfahrwesen, Aachen.

Wandt, H.-P. (2004): Potenziale des Hybridantriebs. 2. Klimaschutzkongress NRW, Nachhaltige Mobilität – Technische Innovationen für den Klimaschutz im Verkehr, Tagungsband, Düsseldorf, 04.11.04.

WHO (World Health Organisation, Regional Office for Europe) (2004): Health aspects of air pollution, Copenhagen (WHO) 2004.

Wichmann, H.-Erich (2003): Abschätzung positiver gesundheitlicher Auswirkungen durch den Einsatz von Partikelfiltern bei Dieselfahrzeugen in Deutschland, Neuherberg 2003, über www.uba.de (Dokumentnummer 2352 v. 27.11.2003).

Wittke, Franz; Ziesing, Hans-Joachim (2005): Primärenergiebedarf in Deutschland von hohen Energiepreissteigerungen und konjunktureller Belebung geprägt. In: DIW-Wochenbericht 72 (2005), Nr. 7, 117–130.

WBCSD – World Business Council for Sustainable Development (2004): Mobility 2030: Meeting the Challenges to Sustainability, Geneva.

WBGU – Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (2003): Über Kioto hinaus denken – Klimaschutzstrategien für das 21.Jahrhundert. Berlin: WBGU. http://www.wbgu.de/wbgu_sn2003.html. Zugriff am 10.01.2005.

WDCGG – World Data Centre for Greenhouse Gases (2005): WMO WDCGG Data. http://gaw.kishou.go.jp/wdcgg/data.html. Zugriff am 01.02.2005.

WDCGG – (2004): WMO WDCGG Data Summary. GAW DATA. Volume IV-Greenhouse Gases and Other Atmospheric Gases. WDCGG No. 28. http://gaw.kishou.go.jp/wdcgg/printedmatter/sum28/sum28contents.htm. Zugriff am 01.02.2005.

WMO – World Meteorological Organisation (2004): WMO Statement on the Status of the Global Climate in 2003. WMO-No. 966. Genf: WMO. http://www.wmo.ch/files/wcp/966_E.pdf. Zugriff am 31.01.2005.

WTRG Economics (2005): Oil Price History and Analysis Updated 5/31/05, nach www.wtrg.com.

Wuppertal Institut (Hrsg.) (2003): Bedeutung von Erdgas als neuer Kraftstoff im Kontext einer nachhaltigen Energieversorgung. Wuppertal.

wvgw o.J.: Fahren mit Erdgas – Na klar! Was Sie schon immer über das Fahren mit Erdgas wissen wollten … Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH. Bonn, o.J.

Klima und Verkehr ist ein vielfach diskutiertes Thema, und die Vielzahl der geäußerten Ansichten und Vorschläge macht die Sache nicht einfacher. Aus diesem Grund hat das Wuppertal Institut hier in übersichtlicher und systematischer Form Stand und Perspektiven zusammengetragen.

Nach einer ausführlichen Einbettung in den Klimadiskurs erfolgt die schrittweise Konzentration auf den PKW-Verkehr Deutschlands. Für diesen Bereich werden im Detail die denkbaren technischen Ansätze und die möglichen Umsetzungsmaßnahmen erörtert.

Wuppertal Institut für
Klima, Umwelt, Energie GmbH
Postfach 100480
42004 Wuppertal
www.wupperinst.org

ISBN 3-929944-72-3