SRU Sachverständigenrat für Umweltfragen

Potenziale und Instrumente zur CO_2-Verminderung von PKW

Auszüge aus dem Sondergutachten Umwelt und Straßenverkehr

August 2005

Inhaltsverzeichnis

Vorwort 1

Executive Summary 1

1 Einleitung 2

2 Stand und bisherige Entwicklung 3

3 Reduktionspotenziale 6

3.1 Konventionelle Motortechnik 6

3.2 Alternative Kraftstoffe 16

3.2.1 Biokraftstoffe 17

3.2.2 Erdgas 32

3.2.3 Wasserstofftechnologie und Verkehr 35

3.3. Bewertung 39

4 Umsetzungsmöglichkeiten 40

4.1 Freiwillige Selbstverpflichtung der Automobilindustrie 42

4.2 Emissionshandel 49

4.3 CO_2-orientierte Kraftfahrzeugsteuer 60

5. Empfehlungen 63

Literatur 67

Quellenbezogene Maßnahmen zur Minderung der verkehrsbedingten CO_2-Emissionen

Vorwort

Trotz Fortschritten in Teilbereichen insbesondere durch technische Maßnahmen bei den klassischen Luftschadstoffen hat sich die Umweltproblematik im Verkehrssektor bisher nicht entspannt. Die durch den Straßenverkehr verursachten Folgeschäden an Gesundheit und Umwelt sind nach wie vor unakzeptabel hoch. Der deutsche Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU), der als unabhängiges Gremium bestehend aus sieben Universitätsprofessoren verschiedener Fachdisziplinen die Bundesregierung seit 1972 zu Fragen der Umweltpolitik berät, hat deshalb im Juni 2005 ein umfangreiches Sondergutachten zur Umweltproblematik des motorisierten Straßenverkehrs vorgelegt (SRU, 2005). Neben einer umfassenden Bestandsaufnahme der Umweltfolgen des Straßenverkehrs enthält dieses Sondergutachten zahlreiche Vorschläge für eine integrierte Verkehrsumweltpolitik, mit der es gelingen würde, den motorisierten Straßenverkehr deutlich umweltverträglicher zu gestalten, ohne hierbei auf ein hohes Niveau an Mobilität zu verzichten. Diese Vorschläge umfassen Maßnahmen

- in der Fahrzeugtechnik für saubere, leisere und effizientere Fahrzeuge,
- in der Planung für eine gesamthafte Integration von umwelt- und verkehrspolitischen Zielen und ihre effektive Umsetzung,
- in der Verkehrslenkung durch ökonomische und ordnungsrechtliche Instrumente,
- zur Korrektur verkehrserzeugender Anreize in anderen Politikbereichen.

Einer der Schwerpunkte der vorgeschlagenen Maßnahmen in der Fahrzeugtechnik betrifft die Minderung der verkehrsbedingten CO_2-Emissionen und ihre umweltpolitische Umsetzung. Um diese Empfehlungen einem breiteren Fachpublikum auf europäischer Ebene zugänglich zu machen, legt der SRU hiermit einen englischsprachigen Auszug seines Sondergutachtens vor. Das gesamte Sondergutachten mit einem Umfang von knapp 600 Seiten steht in deutscher Sprache als Download auf der Homepage des SRU zur Verfügung (www.umweltrat.de).

Executive Summary

Obwohl alternativen Kraftstoffen (Biomasse, Wasserstoff) zumindest in der längerfristigen Perspektive ein erhebliches Minderungspotential beizumessen ist, erscheint dem SRU eine weitergehende Ausschöpfung der technischen Potenziale zur CO_2-Minderung bei Kraftfahrzeugen mit konventioneller Antriebstechnik als vordringlich. Technisch ist bereits heute eine Reduzierung des derzeitigen durchschnittlichen Kraftstoffbedarfs neu zugelassener PKW um über 40 % bei Benzin-

PKW und um bis zu 40 % bei Diesel-PKW möglich. Damit kann der durchschnittliche spezifische CO_2-Ausstoß neu zugelassener Fahrzeuge auf circa 100 g/km gesenkt werden. Ansatzpunkte hier liegen einerseits in einer Verbesserung der spezifischen Motortechnologie, einem Betrieb des Motors im optimalen Kennfeldbereich durch Downsizing und Getriebespreizung, einem optimalen Energiemanagement bis hin zur Hybridisierung und einer Reduzierung des Fahrzeuggewichts und des Rollwiderstandes. Maßnahmen, die ein verändertes Käufer- und Fahrverhalten bewirken, sind ebenfalls von hoher Bedeutung. Zur Ausschöpfung dieser Reduktionspotenziale sollten in einem ersten Zwischenschritt die durchschnittlichen spezifischen CO_2-Emissionen der neu abgesetzten PKW-Flotte durch Einführung eines Emissionshandels, der bei den Fahrzeugherstellern ansetzt, bis zum Jahr 2012 auf 100 g CO_2/km gesenkt werden; als längerfristige Zielsetzung ist eine weitere Senkung anzustreben. Zur nachfrageseitigen Stützung dieses Systems sollte die Kfz-Steuer auf eine CO_2-orientierte Bemessungsgrundlage umgestellt, progressiv ausgestaltet und bei Neuzulassung eines Fahrzeugs für mehrere Jahre im Voraus erhoben werden. Um zu vermeiden, dass die steigende Energieeffizienz der Fahrzeuge einen Anreiz zur Ausdehnung der Fahrleistung gibt, sind weitere Erhöhungsstufen der Kraftstoffpreise im Rahmen der ökologischen Steuerreform unabdingbar.

1 Einleitung

1. Neben den Partikel- und NO_x-Emissionen stellen vor allem die CO_2-Emissionen des Verkehrssektors ein besonderes Problem dar. Um langfristige Klimaschutzvorgaben erreichen zu können, muss auch der Verkehrssektor zu einer Minderung seines absoluten CO_2-Ausstoßes beitragen. Klimaschutzszenarien gehen davon aus, dass der CO_2-Ausstoß des Verkehrs bis zum Jahre 2050 um 34 bis 55 % gegenüber 2002 sinken müsste, wenn bis zur Mitte dieses Jahrhunderts ein CO_2-Minderungsziel in der Größenordnung von 80 % angestrebt wird (Enquete-Kommission, 2002). In Bezug auf technische Maßnahmen an der Quelle soll ein Teil dieser Emissionsminderungen durch den verstärkten Einsatz alternativer Kraftstoffe erreicht werden, ein weiterer Teil durch Minderungen des spezifischen CO_2-Ausstoßes herkömmlicher Fahrzeuge.

Die von der Enquete-Kommission des Deutschen Bundestages (2002) "Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und Liberalisierung" in Auftrag gegebenen Szenariorechnungen zur Erreichung des 80 %-Klimaschutzziels ergeben für den durchschnittlichen Verbrauch der zugelassenen Flotte im Jahre 2050 je nach Szenario Werte zwischen 2,5 und 4,1 l/100 km (IER, WI und Prognos, 2002). In einer Studie im Auftrag des Umweltbundesamts wird für das Jahr 2030 unter der Maßgabe einer 80 %-CO_2-Minderung ein mittlerer Verbrauch der Flotte von

4,7 l/100 km für Ottokraftstoff bzw. 3,8 l/100 km für Diesel errechnet. Für das Jahr 2050 wird für Diesel-PKW ein Verbrauch von 1,6 l/100 km und für Otto-PKW von 2 l/100 km für denkbar gehalten (FISCHEDICK et al., 2002, S. 358 ff.). Das entspräche einer spezifischen Emission von circa 40 g CO_2/km für Diesel-PKW und von circa 50 g CO_2/km für Benzin-PKW.

Die Vereinbarung des Verbands der Europäischen Automobilhersteller (ACEA) über einen mittleren CO_2-Ausstoß neu zugelassener PKW von 140 g/km bis 2008 bildet demnach nur ein Zwischenziel. Weiterführende Vorschläge zielen auf eine Absenkung der spezifischen CO_2-Emissionen der neu zugelassenen PKW-Flotte auf 120 g CO_2/km im Jahre 2012 (EU-Kommission, 2004a). Die britische Regierung hat im Oktober 2004 das offizielle Ziel formuliert, dass bis 2012 10 % der in Großbritannien neu gekauften PKW weniger als 100 g CO_2/km emittieren (Department for Transport, 2004). Bei einer Begrenzung der spezifischen CO_2-Emissionen auf 120 g/km ab 2010 und 100 g CO_2/km ab 2015 würden bei gleich bleibenden Neuwagen-Verkaufszahlen die CO_2-Emissionen der PKW um etwa 10 Mio. t bis zum Jahre 2020 abnehmen (KOLKE et al., 2003). Das entspricht bei 165,9 Mio. t circa 6 % der CO_2-Emissionen des Straßenverkehrs im Jahre 2002 (vgl. SRU, 2005, Abb. 2-7).

2. Im Folgenden wird zunächst in Kapitel 2 die bisherige Entwicklung der verkehrsbedingten CO_2-Emissionen dargestellt und es werden in Kapitel 3 die verfügbaren technischen Reduktionspotenziale sowohl in der konventionellen Motortechnik als auch durch alternative Kraftstoffe aufgezeigt. Anschließend werden in Kapitel 4 umweltpolitische Maßnahmen zur Ausschöpfung dieser Reduktionspotenziale dargestellt. Im Einzelnen handelt es sich dabei um eine Umwandlung der freiwilligen Selbstverpflichtung der europäischen Automobilindustrie in ein Emissionshandelssystem, das am Flottenverbrauch ansetzt, sowie eine stärker als bisher an den CO_2-Emissionen orientierte Kraftfahrzeugsteuer. In Kapitel 5 werden die wesentlichen Empfehlungen noch einmal zusammengefasst.

2 Stand und bisherige Entwicklung

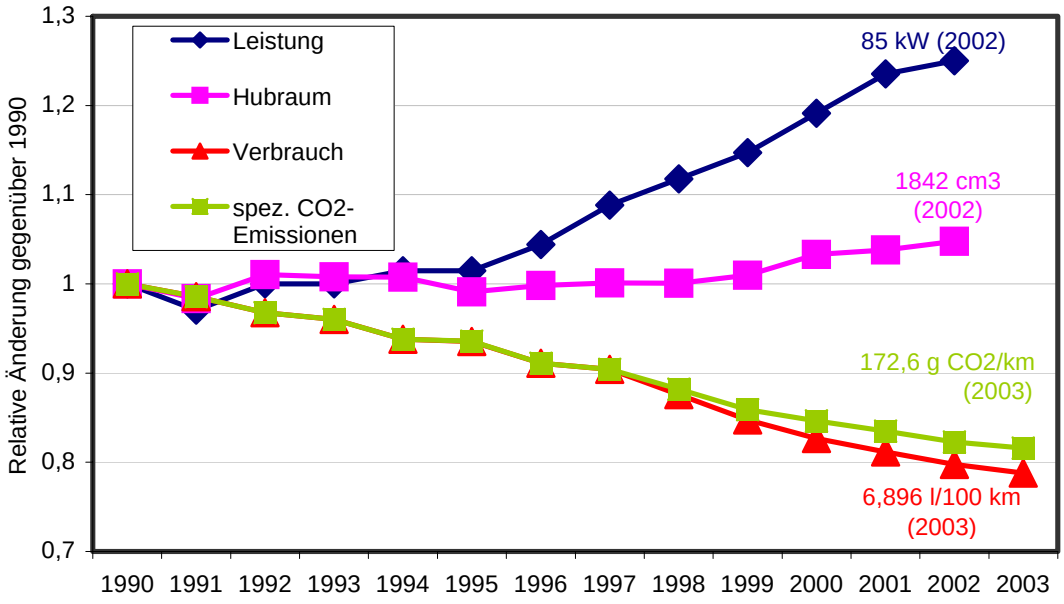
3. Der durchschnittliche Kraftstoffverbrauch des PKW-Fahrzeugbestandes in Deutschland sank zwischen 1991 und 2002 von 8,3 l/100 km um 6 % auf 7,8 l/100 km (UBA, 2004). Der marktgewichtete Verbrauch neu zugelassener PKW lag in Deutschland im Jahre 2003 gemäß dem Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) bei 6,9 l pro 100 km (VDA, 2004a). Der NEFZ ist das seit 1996 in der Europäischen Gemeinschaft vorgeschriebene standardisierte Testfahrprogramm (Kaltstart und Warmlaufphase, 4-maliger Stadtfahrzyklus, außerstädtischer Fahrzyklus) zur Ermittlung der Abgas- und Verbrauchswerte auf dem Rollenprüfstand. Zu

berücksichtigen bleibt, dass ein unter realistischeren Bedingungen gemessener Kraftstoffverbrauch von PKW etwa 0,5 bis 1 l/100 km über dem mit Hilfe des NEFZ gemessenen Normverbrauch liegt (RIEKE, 2002).

Infolge des Verbrauchsrückgangs sanken auch die spezifischen CO_2-Emissionen neu zugelassener PKW. Sie reduzierten sich bspw. für neu zugelassene PKW deutscher Hersteller von 187 g CO_2/km im Jahre 1998 auf durchschnittlich 173 g CO_2/km im Jahre 2003 (Abb. 1; VDA, 2004b). Dies ist sowohl auf eine Verbesserung der Antriebstechniken als auch auf einen höheren Anteil von Diesel-PKW an Neuzulassungen zurückzuführen, der sich in Deutschland von 9,8 % im Jahre 1990 auf über 40 % im Jahre 2003 vervierfacht hat (Pressemeldung des Kraftfahrt-Bundesamtes vom 29.03.2004). Auf europäischer Ebene ist ebenfalls eine deutliche Steigerung des Anteils dieselbetriebener Neufahrzeuge von 23,1 % im Jahre 1994 auf 40,9 % im Jahre 2002 zu beobachten (ACEA, 2005).

Abbildung 1

Entwicklung von CO_2-Emissionen (g/km), Verbrauch (l/100 km), Hubraum (cm^3) und Leistung (kW) neu zugelassener PKW in Deutschland



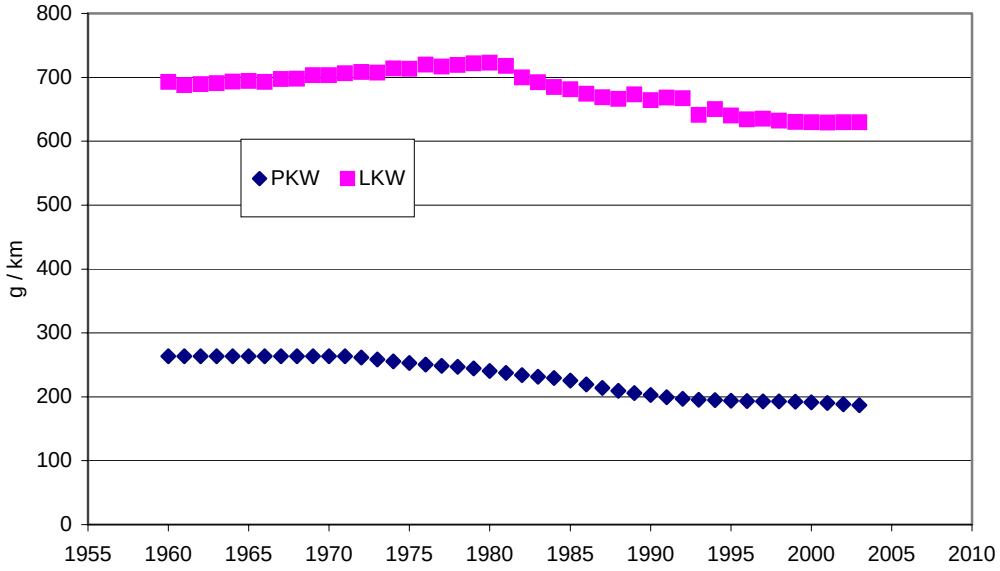
SRU/EA SG 2005/Abb. 7-5; Datenquelle: ACEA, 2003 und VDA, 2004a,b

Die spezifischen CO_2-Emissionen der zugelassenen PKW-Flotte nahmen nicht in demselben Maße ab wie die der neu zugelassenen Fahrzeuge (Abb. 1), weil der Bestand an PKW nur nach und nach erneuert wird (das durchschnittliche Alter eines PKW beträgt in Deutschland etwa 6,6 Jahre (EEA, 2003)). Dennoch ist bei der zugelassenen PKW-Flotte seit 1960 ein Rückgang der spezifischen CO_2-Emissionen

um 29 % zu verzeichnen (Abb. 2) der allerdings bei gleich bleibender Leistungsstärke der Fahrzeuge (vgl. Abb. 1) sicher noch größer ausgefallen wäre.

Abbildung 2

Entwicklung der spezifischen CO_2-Emissionen der in Deutschland zugelassenen PKW-und LKW-Fahrzeugflotte



SRU/EA SG 2005/Abb. 7-6; Datenquelle: UBA, schriftliche Mitteilung vom 01.09.2004, Schadstoffberechnungsmodell TREMOD, Version 3.1.

Auch bei den LKW konnte eine Minderung der spezifischen CO_2-Emissionen erreicht werden; sie betrug für die zugelassene LKW-Flotte zwischen 1960 und 2003 9 %. Der spezifische Ausstoß an CO_2 sank damit bei LKW auf 629 g/km (Abb. 2). Nach Angaben des Verbandes der deutschen Automobilindustrie konnte der spezifische Kraftstoffverbrauch von Nutzfahrzeugen von 1970 bis 2003 um 30 % gesenkt werden und liegt heute bei einem 40 t-LKW durchschnittlich bei etwa 33 l/100 km (VDA, 2003). Durch im gleichen Zeitraum jedoch stark steigende Fahrleistungen sowohl bei PKW als auch bei LKW stiegen die absoluten CO_2-Emissionen der PKW zwischen 1960 und 2002 um den Faktor 6,4 und die absoluten CO_2-Emissionen der LKW um den Faktor 5,2 an (vgl. SRU, 2005, Abb. 2-8). Der Kraftstoffverbrauch im Güterverkehr – der 2002 circa ein Drittel der gesamten im Straßenverkehr eingesetzten Kraftstoffmenge verbrauchte – stieg von 1991 bis 2002 um 37,6 % an (MWV, 2003).

Um die oben genannten Ziele des Klimaschutzes (Tz. 1) zu erreichen, ist es daher weiterhin notwendig, die bei Kraftfahrzeugen vorhandenen technischen Potenziale zur CO_2-Minderung auszuschöpfen.

3 Reduktionspotenziale

4. Der Ausstoß von Kohlendioxid ist proportional zum Kraftstoffverbrauch des Fahrzeugs: bei der vollständigen Verbrennung eines Liters Benzin entstehen etwa 2,28 kg CO_2, bei der vollständigen Verbrennung eines Liters Diesel rund 2,58 kg CO_2. Daher kann eine Minderung der spezifischen CO_2-Emissionen nur auf zwei Wegen geschehen:

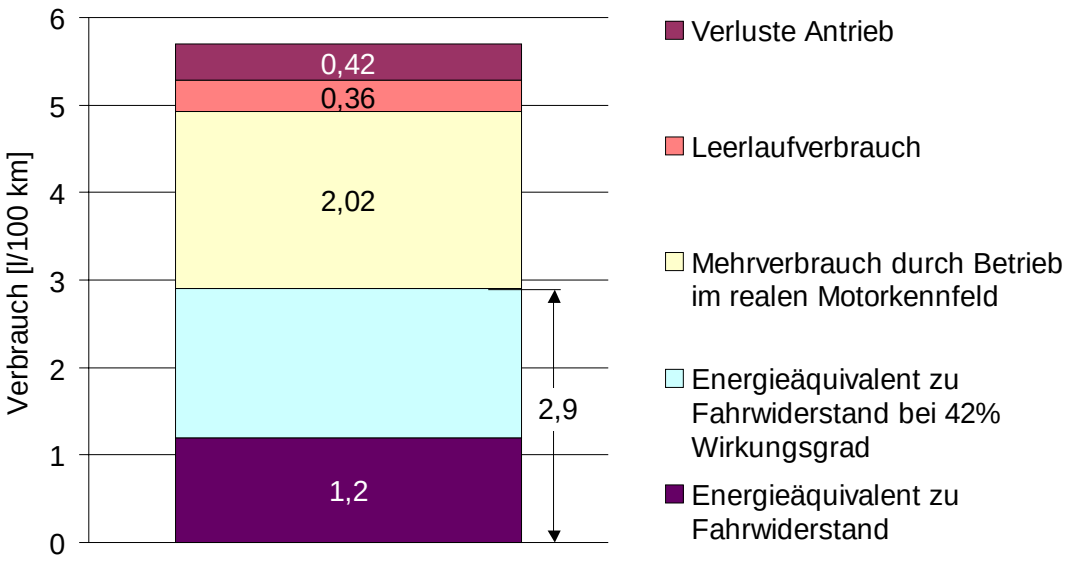
- bei Fahrzeugen mit herkömmlichen Verbrennungsmotoren durch Senkung des Kraftstoffverbrauches (vgl. Kap. 3.1),
- oder durch den Einsatz alternativer, CO_2-ärmerer Kraftstoffe, zum Teil in Verbindung mit neuen Antriebstechniken (vgl. Kap. 3.2).

3.1 Konventionelle Motortechnik

5. Die technischen Maßnahmen zur Verringerung des Kraftstoffverbrauches von klassischen Verbrennungsmotoren, die im Folgenden dargestellt werden, lassen sich grob in eine Verbesserung der spezifischen Motortechnologie, das Betreiben des Motors im effizienten Kennfeldbereich und ein optimiertes Energiemanagement unterteilen. Ergänzt werden diese Maßnahmen in der Antriebstechnik durch eine Reduktion der Masse und des Roll- und Luftwiderstandes) sowie schließlich durch Maßnahmen, die ein verändertes Käufer- und Fahrverhalten bewirken können. Der Energiebedarf eines PKW im NEFZ ist in Abbildung 3 dargestellt.

Abbildung 3

Energiebedarf eines PKW im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ)



Quelle: THIELE und MERKER, 2004

Verbesserung der Motortechnologie

6. Bei einer Optimierung des Verbrennungsprozesses muss zwischen Diesel- und Ottomotoren unterschieden werden. Ansatzpunkte für eine Verbesserung der Technik bei Ottomotoren sind die Direkteinspritzung und ein variabler Ventiltrieb. Beim konventionellen Ottomotor (Saugrohreinspritzung und Vergaser) werden Benzin und Sauerstoff außerhalb des Brennraums gemischt. Große Verluste entstehen beim konventionellen Ottomotor durch die Lastregelung mittels Drosselklappe, die den Kraftstoffverbrauch vor allem im Teillastbereich erhöht. Hier bietet vor allem im ungünstigen Teillastbereich eine Motorsteuerung mittels Direkteinspritzung in Verbindung mit Schichtladebetrieb bzw. mit variablen Ventilsteuerzeiten (8 bis 10 % Minderung) und Zylinderabschaltung (6 % Minderung) sowie einer Absenkung der Leerlaufdrehzahl (1 bis 2 % Minderung) erhebliche Einsparpotenziale (SCHMIDT et al., 1998; SALBER et al., 2001). Damit ergeben sich Verbrauchsminderungen von bis zu 18 % (SCHMIDT et al., 1998; SALBER et al., 2001; MERKER, 2002; MEHLIN et al., 2002; VDA, 2001, S. 22). Allerdings erfordern direkteinspritzende Ottomotoren aufgrund erhöhter NO_x-Emissionen eine Abgasnachbehandlung mit NO_x-Speicherkatalysatoren (NEUMAN und SCHINDLER, 2000) und können ähnlich hohe Partikelemissionen wie Dieselfahrzeuge aufweisen.

Dieselmotoren verbrauchen im Vergleich zu Ottomotoren um 15 bis 20 % weniger Kraftstoff. Allerdings ist der spezifische CO_2-Ausstoß bei der Verbrennung eines Liters Diesel um 13 % höher als bei Benzin. Die geringeren Verbräuche sind auf die deutlich höheren Verdichtungsverhältnisse und die Direkteinspritzung zurückzuführen. Infolge der sehr schnell erfolgenden Kraftstoffeinspritzung kann es jedoch trotz einer Verbrennung mit Luftüberschuss lokal sowohl zu Luftmangel als auch zu hohen Temperaturen kommen, wodurch Ruß bzw. NO_x-Emissionen entstehen. Daher konzentriert sich die Weiterentwicklung von Dieselmotoren vor allem auf bessere Einspritzverfahren, die zu einer homogeneren Gemischbildung und somit zur Schadstoffreduktion beitragen können (THIELE und MERKER, 2004). Geringe Potenziale zur Verbrauchsoptimierung liegen in einer verbesserten Abgasrückführung und in einer weiteren Reibungsminimierung (jeweils rund 2 %) (MEHLIN et al., 2002). Langfristig ist zu erwarten, dass die Brennverfahren von Otto- und Dieselmotor sich angleichen werden (STEIGER, 2003).

Downsizing und verbesserte Getriebe

7. Beide Motortypen besitzen den besten Wirkungsgrad in einem bestimmten Kennfeldbereich. Diesen Bereich möglichst wenig zu verlassen ist das Ziel des Downsizing und verbesserter Getriebe. Beim Downsizing führt die Hubraumreduzierung zu einem Betrieb des Motors bei höheren spezifischen Lasten. Um entsprechende Fahrleistungen zu erhalten, wird Downsizing mit einer Aufladung (Turbolader bzw. elektrisch unterstützte Aufladung) ergänzt (ELLINGER et al., 2002). Automatisierte Schaltgetriebe mit großer Getriebespreizung (6 bis 7 Gänge), bei denen der Schaltvorgang hydraulisch oder elektronisch unterstützt wird, können den Verbrauch um rund 10 % mindern (HOFMANN et al., 2002). Als Weiterentwicklung automatisierter Schaltgetriebe können stufenlose Getriebe (CVT) weitere Einsparungen um bis zu 8 % realisieren (ELLINGER et al., 2002).

Energiemanagement und Hybridisierung

8. Beim Einsatz von Fahrzeugen im Stadtverkehr wird zu etwa 45 % der Zeit die Motorleistung nicht in Anspruch genommen (STEIGER, 2003). Daher lassen sich vor allem im Stadtverkehr mit einer Start-Stopp-Automatik (automatische Motoran- und Abschaltung) in Verbindung mit Schwungnutz-Systemen Kraftstoffeinsparungen von bis zu 25 % erreichen (NEUMANN und SCHINDLER, 2000). Insgesamt kann durch die automatische Motorabschaltung eine Kraftstoffverbrauchsminderung von bis zu 4 % erreicht werden (ELLINGER et al., 2000), beim VW 3 l-Lupo brachte sie eine Einsparung von 3,9 % (Abb. 7; MEHLIN et al., 2002).

Bei einer weiterführenden Hybridisierung ("strong hybrid", Parallelhybrid) wird neben dem konventionellen Verbrennungsmotor ein Elektromotor installiert, der ausreicht, das

Fahrzeug alleine anzutreiben. Damit sind insgesamt drei Betriebsweisen möglich: verbrennungsmotorisch, elektrisch und kombiniert. Der Elektromotor wird in der Regel für den Fahrbetrieb in der Stadt und der Verbrennungsmotor für die Autobahn und Überlandfahrten ausgelegt. Dadurch kann der Betrieb des Verbrennungsmotors im ungünstigen Teillastbereich vermieden werden, indem bei geringer Leistungsanforderung der Verbrennungsmotor dennoch in einem wirkungsgradgünstigen Bereich betrieben wird und die überschüssige Energie zur Aufladung der Batterie genutzt wird. Dies ermöglicht auch ein konsequentes Downsizing des Verbrennungsmotors, da dessen Teillastschwächen durch den Elektromotor kompensiert werden. Weiterhin ermöglicht der Parallelhybrid eine Nutzbremsung, das heißt eine Rückgewinnung der Bremsenergie durch die Speicherfähigkeit der Batterie. Aufgrund dieser Vorteile lassen sich für den Parallelhybrid im Vergleich zu Otto- und Dieselmotoren Minderungspotenziale hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs zwischen 25 und 34 % (ISENSEE, 2002; CONCAWE et al., 2003a) und auch Minderungen der Schadstoffemissionen – mit Ausnahme der NO_x-Emissionen – verzeichnen (WALLENTOWITZ und NEUNZIG, 2001).

Nachteile der Hybridantriebe sind die erforderlichen dualen Speicher und Antriebe im Fahrzeug, die sowohl zu Lasten des Fahrzeuggewichts als auch der Kosten gehen. Durch Weiterentwicklungen (z. B. Starter-Generator-System und dem damit verbundenen Wegfall von Anlasser und Lichtmaschine) verbessern sich jedoch die Chancen für einen Serieneinsatz des Hybridantriebs (WB BMVBW, 2002). Von Toyota wird bereits in der zweiten Generation das Hybridfahrzeug PRIUS mit CO_2-Emissionen von nur 104 g CO_2/km und einem Mehrgewicht von unter 100 kg als Serienfahrzeug angeboten. Einige europäische Hersteller haben neu entwickelte Hybridfahrzeuge vorgestellt und deren Produktion in Aussicht gestellt (VDA, 2004c).

Elektrofahrzeuge

9. Im Gegensatz zum Parallelhybrid, der durch geringen Verbrauch und Schadstoffausstoß, verbunden mit hohen Drehmomenten attraktiv ist, hat ein reiner Elektroantrieb deutliche Nachteile. Zwar ermöglicht er emissionsfreies Fahren (die Betrachtung der Stromerzeugung ist allerdings für die Gesamtbeurteilung zu berücksichtigen), doch sind aufgrund der geringen Energiedichten der Batterien (rund 1/100 jener flüssigen Kraftstoffs) zum Erreichen akzeptabler Reichweiten große Batterien notwendig. Daraus resultieren hohe Fahrzeuggewichte, welche die Energieeffizienz der Fahrzeuge verschlechtern. Derzeitige Elektrofahrzeuge weisen Reichweiten von etwa 100 km auf. Insgesamt sind die Nachteile der Elektrofahrzeuge beim heutigen Stand der Technik so gravierend, dass nur eine Nischenanwendung zu erwarten ist (WB BMVBW, 2002; BIRNBAUM et al., 2002).

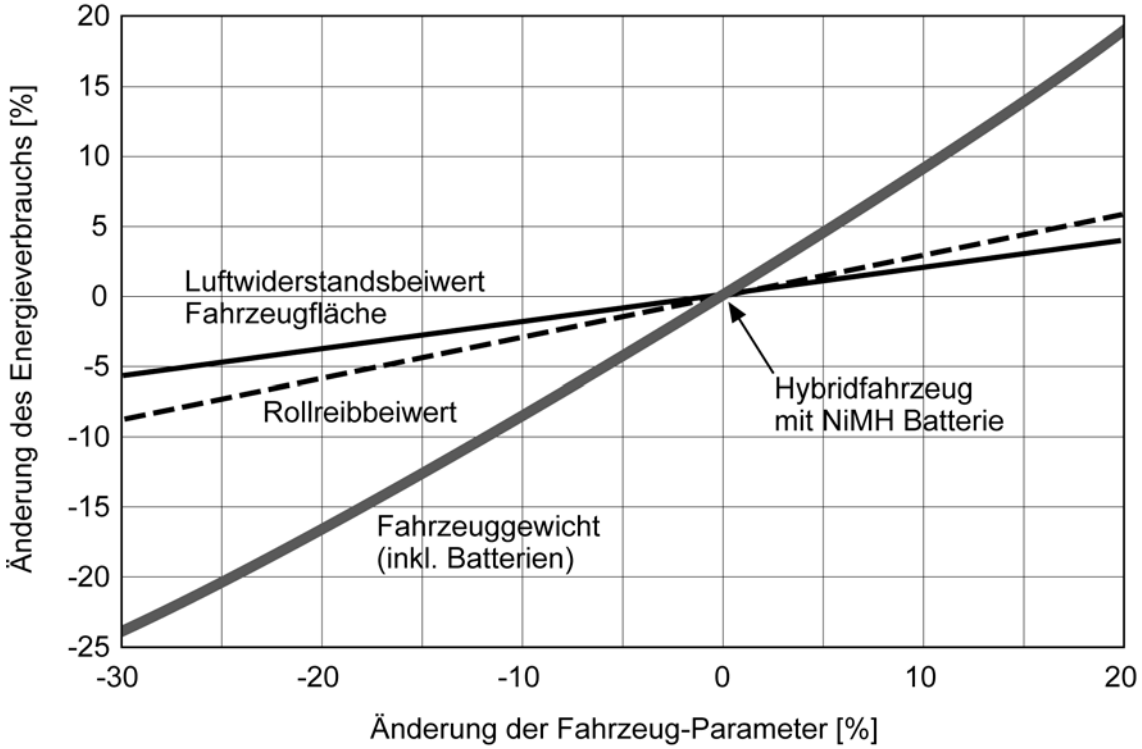
Der Elektroantrieb hätte zukünftig großes Potenzial, wenn es gelänge, die Energiedichten der Batterien zu vervielfachen. Grundsätzliche Vorteile gegenüber Verbrennungsmotoren (samt ihren Hilfsaggregaten) bestehen in der vergleichsweise einfachen Technik und der Vermeidung der großen Mengen an Abwärme, die bei mobilen Verbrennungsmotoren (wie auch Brennstoffzellen) zwangsweise ungenutzt abgegeben werden. Schon bei heutigen Batterien wäre der Elektroantrieb bezüglich der Primärenergieausnutzung bei Stromerzeugung in hocheffektiven Gas-Dampf-Kraftwerken dem Verbrennungsmotorantrieb gleichwertig, bei Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen (KWK-Anlagen) sogar überlegen. Hingegen ist beim derzeitigen Energiemix die Energie- und CO_2-Bilanz des Elektroantriebs ungünstig.

Fahrzeugkonstruktion (Masse, Roll- und Luftwiderstand)

10. Ergänzend zu Maßnahmen am Antriebsstrang und einem optimierten Energiemanagement können zur Minderung des spezifischen Kraftstoffbedarfs eines Fahrzeuges die Fahrzeugmasse, der Luft- und der Rollwiderstand gemindert werden. Der Einfluss dieser Fahrzeugparameter auf den Kraftstoffverbrauch eines Hybridfahrzeugs ist in Abbildung 4 dargestellt. Eine Verminderung der Fahrzeugmasse weist das weitaus größte Potenzial zur Verbrauchsminderung auf.

Abbildung 4

Hybridfahrzeug: Einfluss der Fahrzeugparameter Masse, Roll- und Luftwiderstand auf den Kraftstoffverbrauch

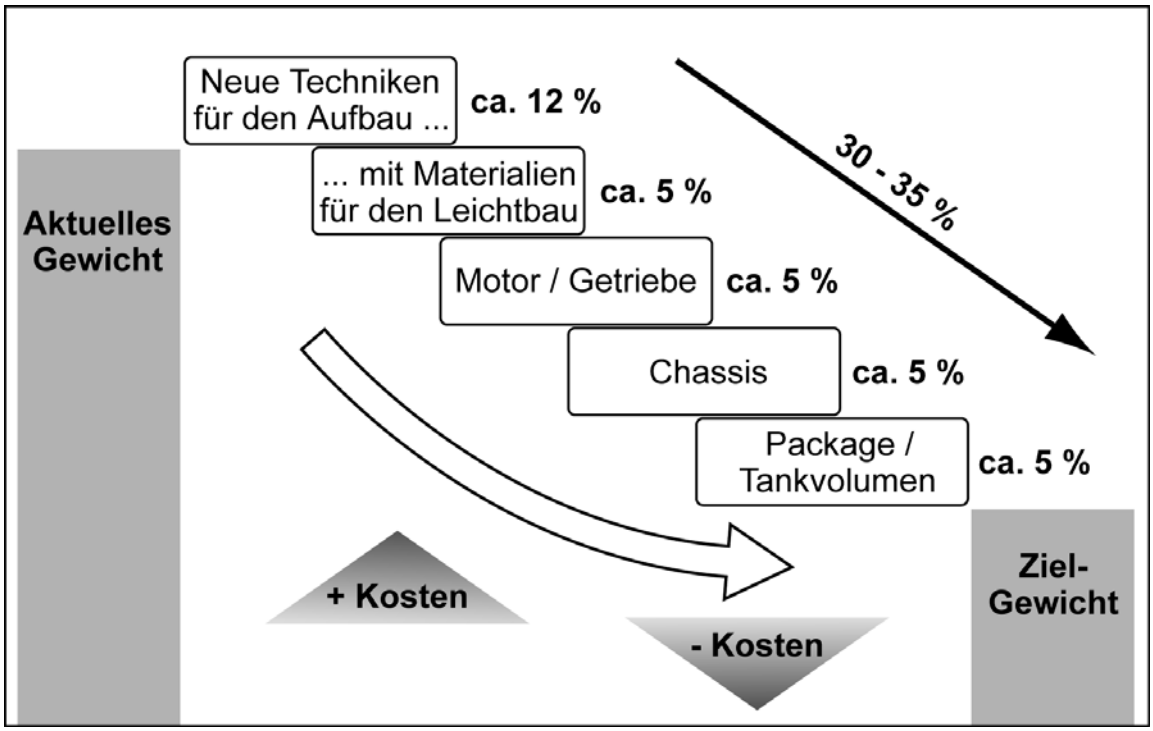


Quelle: JOSEFOWITZ und KÖHLE, 2002

In der Vergangenheit ist eine stetige Zunahme der Fahrzeugmasse zu beobachten gewesen: steigende Anforderungen an Komfort, Sicherheit, Leistung und Vielseitigkeit der Fahrzeuge haben zu erhöhtem Gewicht geführt. Um die Gewichtszunahme auszugleichen wurden stärkere Motoren installiert, die oft ein größeres Tankvolumen nach sich zogen und ihrerseits wiederum zu höherer Masse führten. So stieg seit 1995 die durchschnittliche Fahrzeugmasse um rund 100 kg und betrug im Jahre 2002 1 214 kg (ACEA und Dienststellen der EU-Kommission, 2001; 2003). Diese Gewichtsspirale kann durch den Einsatz neuer Werkstoffe und neuer Aufbautechniken aufgebrochen werden (Abb. 5). Insgesamt erwartet VW mögliche Reduzierungen der Fahrzeugmasse in einer Größenordnung von 30 bis 35 % (NEUMANN und SCHINDLER, 2000). In einer Studie von Arthur D. Little, in der die Konsequenzen der Einführung eines CO_2-Minderungszieles von 120 g/km bis 2012 untersucht werden, werden mögliche Gewichtsreduktionen von 15 % bei Kleinwagen, 18 % bei Mittelklassewagen und 30 % bei Oberklassewagen aufgeführt (Arthur D. Little, 2003, S. 26).

Abbildung 5

Potenziale der Gewichtsreduktion bei PKW



Quelle: NEUMANN und SCHINDLER, 2000

Die mit der Massereduktion verbundene Verbrauchsreduzierung liegt im Bereich von 0,3 bis 0,8 l/100 km pro 100 kg Massereduktion (MEHLIN et al., 2002; ISENSEE, 2002). Beim VW Lupo konnten 8 % Kraftstoff durch 10 % weniger Gewicht eingespart

werden. Andere Studien gehen deutlich konservativer von 3,5 % Kraftstoffeinsparung pro 10 % Massereduktion aus (Arthur D. Little, 2003, S. 116).

11. Durch die Reduzierung des Rollwiderstands der Reifen um 30 % können in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit zwischen 2 und 6 % Kraftstoff eingespart werden (SCHEDEL, 2001). Das Umweltbundesamt schätzt, dass durch den Einsatz von Leichtlaufreifen ein CO_2-Minderungspotenzial von 2 bis 5 % bei PKW und von 3 bis 9 % bei LKW besteht (KOLKE et al., 2003). Zusätzlich erscheint eine Reduzierung des Luftwiderstands durch aerodynamischere Karosserieformen um 10 bis 20 % möglich, ohne den Komfort der Passagiere wesentlich einzuschränken (Enquete-Kommission, 2002, S. 216 f.). Das dadurch erschließbare Kraftstoffeinsparpotenzial bei leichten Nutzfahrzeugen liegt bei etwa 4 % (EU-Kommission, 2004b).

Käuferverhalten (Motorleistung und Nebenaggregate) und Fahrverhalten

12. Erheblichen Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch und die CO_2-Emissionen haben die Motorleistung und elektrische Nebenaggregate, wie Klimaanlagen, Bord- und Unterhaltungselektronik sowie weitere zahlreiche Komponenten zur elektrischen und hydraulischen Energieversorgung der Fahrzeugsysteme, die maßgeblich vom Käuferverhalten determiniert sind. Der Anteil von Neufahrzeugen, die mit Klimaanlagen ausgestattet waren, stieg innerhalb einer Dekade von 15 % im Jahre 1992 auf 72 % im Jahre 2002 an (Arthur D. Little, 2003). Der Einfluss solcher Nebenaggregate auf den Kraftstoffverbrauch eines Mittelklassewagens im Neuen Europäischen Fahrzyklus kann einen zusätzlichen Kraftstoffbedarf von bis zu 17 % erforderlich machen (Sommerfahrbetrieb mit Klimaanlage; WALLENTOWITZ und NEUNZIG, 2001, S. 34). Allein der von Klimaanlagen induzierte Mehrausstoß an CO_2 liegt bei 3 bis 8 % (EU-Kommission, 2004b).

Insgesamt schätzt die EU-Kommission den Einfluss von Klimaanlagen auf die Treibhausgas-Emissionen von Fahrzeugen auf 16 bis 28 g CO_2eq/km. Davon sind etwa ein Drittel auf den mit höheren CO_2-Emissionen verknüpften Mehrverbrauch und zwei Drittel auf das Entweichen des Klimagases HFC 134a zurückzuführen (ECCP, 2003). Aus diesem Grund ist in dem Vorschlag für eine Verordnung über bestimmte fluorierte Treibhausgase (EU-Kommission, 2003) ein Stufenplan für den Ausstieg der Verwendung von HFC 134a in mobilen Klimaanlagen vorgesehen. Danach dürften ab dem Jahr 2014 Neufahrzeuge nicht mehr mit Klimaanlagen ausgestattet werden, die HFC 134a enthalten (Art. 10). Zudem dürften ab 2005 bestimmte Leckageraten nicht mehr überschritten werden (Art. 9).

13. Die durchschnittliche Motorleistung neu zugelassener Fahrzeuge in Deutschland stieg von 69 kW im Jahre 1995 auf 85 kW im Jahre 2002 (vgl. Abb. 1). Hält dieser Trend zu leistungsstärkeren Fahrzeugen an, wird eine Reduktion der CO_2-

Emissionen erschwert. Eine Leistungsminderung um 30 % könnte dagegen die CO_2-Emissionen bei Ottomotoren um 13 bis 19 % und bei Diesel um 5 bis 15 % reduzieren. Eine Leistungsminderung um 50 % könnte die CO_2-Emissionen um 25 bis 32 % mindern (KOLKE et al., 2003).

14. Die Potenziale eines veränderten Käufer- und Fahrverhaltens zur Minderung der CO_2-Emissionen des Straßenverkehrs sind 2003 in einem Sachstandsbericht des Umweltbundesamtes zusammengefasst worden (KOLKE et al., 2003). Demnach könnte durch die Einführung eines Tempolimits (s. a. SRU, 2005, Kap. 9.2) eine Senkung der CO_2-Emissionen außerorts um 8 % und auf Autobahnen um 9 % (Tempo 120) bzw. 19 % (Tempo 100) erreicht werden. Über die Bereitstellung von Verbraucherinformationen (z. B. über eine entsprechende, ohnehin durch die EU-Richtlinie zur Verbrauchskennzeichnung geforderte, anschauliche Kennzeichnung von PKW) sollte dem Verbraucher die Auswahl eines verbrauchsarmen Fahrzeugs erleichtert werden. Auch das Kraftstoff sparende Fahren kann durch verschiedene Maßnahmen gefördert werden, zum Beispiel über Fahrerschulungen oder Informationen über die Verwendung von Leichtlaufölen. Bei Unternehmen mit Fuhrpark könnten zusätzliche Anreize bspw. über firmeninterne Prämien eingeführt werden, bei Privatpersonen über finanzielle Zuschüsse, zum Beispiel über einen bei jedem Autokauf erhältlichen Gutschein zur Schulung für eine verbrauchsarme Fahrweise. Wichtig wäre auch eine standardmäßige Ausstattung von Fahrzeugen mit Verbrauchsanzeige. Das Umweltbundesamt schätzt, dass sich durch solche Maßnahmen, die eine verbrauchsarme Fahrweise fördern, ein zusätzliches CO_2 - Minderungspotenzial von 6 bis 17 % ergibt.

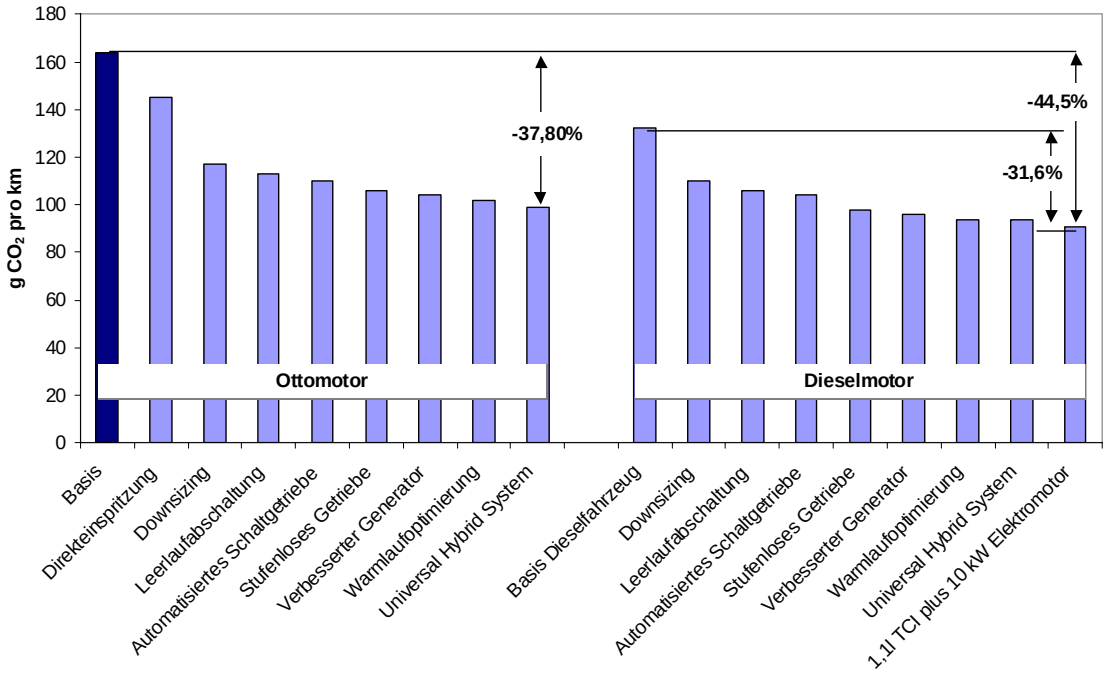
Zusammenfassung der Potenziale zur Verbrauchsminderung bei PKW und LKW

15. Verbrennungsmotoren haben noch ein erhebliches Potenzial an Verbrauchseinsparungen und einer damit verbundenen Reduzierung des CO_2-Ausstoßes. Beim Ottomotor werden für ein Mittelklassefahrzeug (mit einem CO_2-Ausstoß von 164 g/km) durch Maßnahmen am Antriebsstrang Einsparungen des spezifischen Verbrauchs von rund 38 % für realisierbar gehalten (Abb. 6; ähnlich auch ELLINGER et al., 2002; LANG et al., 2004; Enquete-Kommission, 2002, S. 216 ff.; KOLKE, 1999, S. 47). Mit weiteren Maßnahmen wie Gewichtsreduktion, Verringerung des Roll- und Luftwiderstandes sowie der Unterstützung einer Kraftstoff sparenden Fahrweise sind Verbrauchsreduktionen von insgesamt mehr als 40 % möglich (s. a. JOSEFOWITZ und KÖHLE, 2002). Die bei Dieselmotoren zu erwartenden zukünftigen Einsparpotenziale sind im Vergleich zu Ottomotoren deutlich geringer, da Dieselmotoren im häufig vorkommenden Teillastbetrieb niedrigere Wirkungsgradverluste als Ottomotoren aufweisen (FISCHER, 1998). Zudem konnten

bei Dieselmotoren bereits in der Vergangenheit deutliche Effizienzsteigerungen durch eine elektronisch geregelte Direkteinspritzung mit extrem hohen Ladedrücken erzielt werden. Trotzdem sind auch hier über eine Hybridisierung und ein verbessertes Getriebe noch Einsparungen von rund 32 % möglich (Abb. 6; s. a. JOSEFOWITZ und KÖHLE, 2002). Zusätzliche Einsparungen sind auch hier durch eine Verringerung der Masse und des Roll- und Luftwiderstandes sowie der Unterstützung einer Kraftstoff sparenden Fahrweise möglich. Damit wird auch in den nächsten Dekaden der optimierte Verbrennungsmotor das dominierende Antriebsaggregat bleiben und nicht von Elektrofahrzeugen mit Batterien bzw. Brennstoffzellen in großem Maßstab abgelöst werden. Lediglich Hybridfahrzeuge könnten einen größeren Marktanteil gewinnen (CHRISTIDIS et al., 2003; MERKER, 2002).

Abbildung 6

Einsparpotenziale am Antriebsstrang bei Otto- und Dieselmotoren gegenüber einem PKW mit 164 g CO_2/km

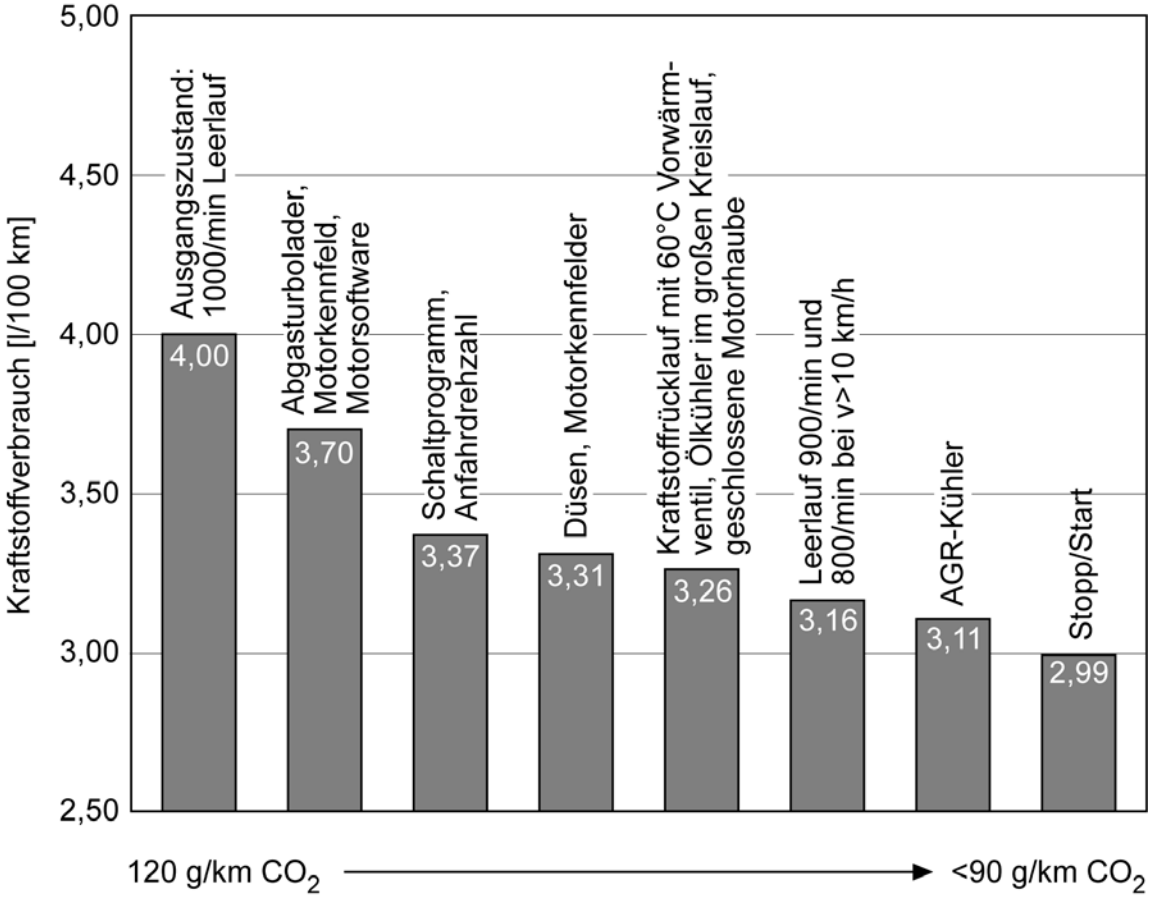


SRU/EA SG 2005/Abb. 7-10; Datenquelle: ELLINGER et al., 2000

16. Bereits heute haben Automobilhersteller die Möglichkeiten erheblicher Verbrauchsverbesserungen mit Serien- und Versuchsmodellen unter Beweis gestellt. In Abbildung 7 ist am Beispiel des VW 3 l-Lupo gezeigt, mit welchen bereits heute verfügbaren technischen Mitteln der Kraftstoffverbrauch gegenüber dem Basismodell um mehr als 1 l gesenkt wurde. Dabei trug der verbesserte Antrieb zu etwa 60 % der Kraftstoffeinsparung bei, 20 % war auf die Massenreduktion, weitere 20 % auf Maßnahmen zur Verringerung des Luft- und Rollwiderstands zurück zu führen (PEHNT, 2001, S. 89 ff. m. w. N.).

Abbildung 7

Wirksamkeit der antriebsseitigen Maßnahmen zur Verbrauchssenkung des 3l-Lupo



Quelle: PEHNT, 2001, S. 89, verändert

Greenpeace hat mit dem Fahrzeug SMILE auf der Basis des Renault Twingo demonstriert, dass eine Halbierung des Kraftstoffverbrauchs durch technische Verbesserungen sofort realisierbar ist, ohne den Front-Querschnitt des Fahrzeugs, der maßgeblich für den Sitzkomfort verantwortlich ist, zu modifizieren (Greenpeace, 2004). VW hat die Machbarkeit eines 1 l-PKW gezeigt, allerdings weicht dieser deutlich von herkömmlichen Fahrzeugkonzepten ab. Der Mittelklassewagen PRIUS von Toyota, ein Hybridfahrzeug, emittiert nur 104 g CO_2/km (Tz. 8) und weist zudem Fahrleistungen auf, die mit anderen Fahrzeugmodellen dieser Klasse vergleichbar sind.

17. Hinsichtlich des Straßengüterverkehrs (LKW) werden die Potenziale zur Reduzierung des spezifischen Kraftstoffbedarfs im Verhältnis zu PKW als geringer eingeschätzt, da die Motoren in Bezug auf die fahrzeugspezifische Transportleistung bereits weitgehend verbrauchsoptimiert sind. Standard sind direkteinspritzende Dieselmotoren mit Aufladung und teils mit Abgasrückführung. Allerdings kann allein durch die Einführung der SCR-Technik eine Minderung des Kraftstoffverbrauchs bei LKW um bis zu 5 % erwartet werden (vgl. SRU, 2005, Abschn. 7.2.2.2). Verschiedene

Prognosen gehen von einer 5- bis 7%igen bzw. 10 %igen Reduktion des durchschnittlichen Kraftstoffverbrauchs bei LKW von 1997 bis 2015 aus (BIRNBAUM et al., 2002, S. 83 f.).

3.2 Alternative Kraftstoffe

18. Als alternative Kraftstoffe werden alle Kraftstoffe mit Ausnahme der Erdölprodukte Benzin und Diesel bezeichnet. Erdgas, Flüssiggas, Wasserstoff und Pflanzenölkraftstoffe fallen ebenso wie synthetische, aus Biomasse, Erdgas oder Kohle hergestellte Kraftstoffe in diese Kategorie. Die Attraktivität dieser Kraftstoffe besteht darin, dass ihre Nutzung im Verhältnis zu Erdölprodukten zur Reduktion der Emissionen an CO_2 und teilweise auch anderer Luftschadstoffe führen kann.

Die Bundesregierung nennt in ihrer Nachhaltigkeitsstrategie für Deutschland als Ziele der Kraftstoffstrategie die Senkung des Verbrauchs fossiler Kraftstoffe mit dem Zweck, die Abhängigkeit vom Öl zu verringern und die Versorgungssicherheit zu verbessern sowie den Ausstoß von Treibhausgasen zu reduzieren. Weiterhin wird in das innovative Potenzial alternativer Kraftstoffe und Antriebstechnologien die Hoffnung auf Impulse für Wachstum und Beschäftigung gesetzt (Bundesregierung, 2004). Als weiteres Ziel für den Einsatz von alternativen Kraftstoffen (z. B. Erdgas) wird oft die Reduktion von lokalen Schadstoffemissionen, bspw. in Ballungsräumen, genannt.

Der Rat für Nachhaltigkeit fordert in seiner Stellungnahme "Effizienz und Energieforschung als Bausteine einer konsistenten Energiepolitik" (RNE, 2004a) einen Beitrag des Verkehrs zur Energie- und CO_2-Einsparung ein. Er schlägt neben einer Reihe von Effizienz steigernden Maßnahmen auch vor, die Anstrengungen zur Nutzung von Erdgas, synthetischen und regenerativen Kraftstoffen zu erhöhen.

Grundsätzlich sind bei Entscheidungen bezüglich des Einsatzes alternativer Kraftstoffe ökologische und ökonomische Aspekte zu bewerten. Für die knappen Güter alternativer Kraftstoffe oder ihrer Ausgangsstoffe müssen konkurrierende Nutzungsmöglichkeiten, sei es zur stationären Strom- und Wärmebereitstellung oder zur rohstofflichen Nutzung, berücksichtigt werden. Auf lange Sicht ist wegen der begrenzten Verfügbarkeit der fossilen Energieträger der Einsatz von Biokraftstoffen wie auch von Wasserstoff aus erneuerbaren Quellen bzw. von anderen regenerativen Energieträgern im Verkehrsbereich notwendig.

Generell muss festgestellt werden, dass im Verhältnis zum Kraftstoffbedarf die aus inländischer Produktion bereitstellbaren Mengen an Biokraftstoffen begrenzt sind. Deshalb werden die möglichen Beiträge der Biokraftstoffe zur Reduzierung der Importabhängigkeit von Erdölprodukten hier nicht weiter untersucht. Auch wird die Nutzungskonkurrenz für Biomasse, Erdgas usw. im mobilen und stationären Bereich hier nicht eingehend diskutiert. Dies wäre nur innerhalb einer Gesamtbetrachtung des

Energie- und Grundstoffmarktes möglich, die nicht Zielsetzung dieses Gutachtens ist und mit großen Unsicherheiten bezüglich zukünftiger Rohstoffpreise, Verfügbarkeiten, Märkte und Technologien behaftet ist.

3.2.1 Biokraftstoffe

19. Als Biokraftstoffe werden Kraftstoffe bezeichnet, die aus Biomasse erzeugt werden. Sie können grob in zwei Kategorien unterteilt werden:

- "konventionelle Biokraftstoffe", die bereits heute im großen Maßstab eingesetzt werden. Hierzu gehören,
  - Pflanzenölmethylester (Biodiesel) in Deutschland vornehmlich Rapsölmethylester (RME),
  - Pflanzenöle,
  - Bioethanol, das aus zucker- und stärkehaltigen Pflanzen, in Europa hauptsächlich Zuckerrüben und Getreide, gewonnen wird.

  Derzeit wird in Deutschland vor allem Biodiesel (RME) eingesetzt. Im Jahre 2003 deckte dieser 0,9 % des Endenergieverbrauchs im Straßenverkehr (BMU, 2004a). Biodiesel kann in allen Fahrzeugen bis zu einem Anteil von 5 % dem mineralischen Diesel zugesetzt werden. Manche Hersteller haben ihre Fahrzeuge für den uneingeschränkten Biodieseleinsatz freigegeben. Kaltgepresste Pflanzenöle können in dafür umgerüsteten Fahrzeugen mit einem Anteil von bis zu 100 % (reines Pflanzenöl) eingesetzt werden. Ethanol kann als Zusatz in Benzin Verwendung finden. Herkömmliche Motoren vertragen eine Beimischung von rund 15 % Ethanol bzw. synthetisches Methanol, umgerüstete Fahrzeuge bis zu 100 %.

- "synthetische Biokraftstoffe", die durch Vergasung von Biomasse und anschließende Syntheseschritte produziert werden. Das Ausgangsmaterial hierfür ist nicht auf öl- oder zucker- und stärkehaltige Pflanzenteile beschränkt. Es können auch ganze Pflanzen sowie pflanzliche Abfälle genutzt werden. Als Endprodukt wird entweder Wasserstoff oder über eine Fischer-Tropsch-Synthese synthetischer Diesel gewonnen (vgl. HAMELINCK et al., 2003). Letztere Technik wird als Biomass-to-Liquid (BTL) bezeichnet, der Kraftstoff der Volkswagen AG auch als Sun Fuel (STEIGER, 2002). Bislang befindet sich diese Technik noch in der Erprobungsphase. Ein Pilotvorhaben "Synthetische Kraftstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen" ist im Jahre 2003 angelaufen. Aufgrund der breiteren Rohstoffbasis gegenüber konventionellen Biokraftstoffen ergibt sich ein größeres Mengenpotenzial. Allerdings treten bei der BTL-Erzeugung systembedingt Energieverluste auf: Ein großer Teil der in der Ausgangsbiomasse enthaltenen Energie fällt im Prozess als Abwärme an. Die Energieausbeute im Kraftstoff beträgt

nur etwa 40 bis 50 % (vgl. Daten von PRINS et al., 2004; HAMELINCK et al., 2003). Im Sinne einer energieeffizienten Nutzung der Biomasse ist daher bei der BTL-Produktion die Verwertung der Prozessabwärme maßgeblich.

20. Im Anschluss an die Wahl der Konzeption starker Nachhaltigkeit formulierte der SRU mehrere Managementregeln für den Umgang mit natürlichen Ressourcen (SRU, 2002a, Tz. 29). Eine dieser Regeln fordert, erschöpfbare Energieträger und Rohstoffe nur in dem Maße zu verbrauchen, wie simultan physisch und funktionell gleichwertiger Ersatz an regenerierbaren Ressourcen geschaffen wird. Diese Regel impliziert einen Ausbau der erneuerbaren Energien, darunter der Biomasse, auf unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Skalen (zur Situation in Deutschland umfassend BMU, 2004b). Der Ausbau der Biomassenutzung ist daher vom Grundsatz her zu begrüßen. Entscheidend ist allerdings die genaue ökobilanzielle Analyse der Vorzüge und Nachteile unterschiedlicher Szenarien und Einsatzvarianten angesichts einer dynamischen Technologieentwicklung, sich verändernder agrarpolitischer Rahmenbedingungen und des absehbaren Strukturwandels der Landwirtschaft.

Entscheidende Restriktionen der Biomassenutzung sind zum einen die Zielsetzungen des Naturschutzes, die mindestens dem Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG) und der Flora-Fauna-Habitatrichtlinie (FFH-Richtlinie) entsprechen müssen, aber auch darüber hinausgehen können (hierzu SRU, 2002b), und zum anderen die für die Biomasse jeweilig benötigten Flächen im In- oder Ausland. Werden Importe von Biokraftstoffen aufgrund unzureichender Beachtung des Naturschutzes im Herkunftsland beschränkt, sind mögliche Konflikte mit den Freihandelsabkommen der WTO zu beachten.

Relevant für die Bewertung der Optionen sind demnach die folgenden Kriterien:

- energetische Effizienz,
- Flächenverbrauch und Vereinbarkeit mit Naturschutzzielen,
- verschiedene ökobilanzielle Parameter (Euthrophierung, Versauerung, Erosion usw.),
- ökonomische Rentabilität,
- Struktur- und Arbeitsplatzeffekte.

Im Energiesektor liegt vor dem Hintergrund anspruchsvoller langfristiger energie- und klimapolitischer Zielsetzungen (SRU, 2004, Kap. 2) und des Ausbaus der fluktuierenden Energiequellen (z. B. Windenergie) eine gewisse Priorität der Biomassenutzung im stationären Bereich der Strom- und Wärmenutzung nahe (s. auch BMU, 2004b). Daraus folgt allerdings nicht, dass innovative Technologiepfade im Verkehrssektor (z. B. BTL- oder GTL-Verfahren) nicht weiter verfolgt werden sollten.

Aufgrund des Mengenpotenzials und der Nutzungskonkurrenzen wird die einheimische Biomasse im Verkehrssektor allerdings nur dann eine bedeutende Rolle spielen können, wenn der Energieverbrauch dieses Sektors (wie auch der übrigen Sektoren) insgesamt drastisch zurückgeht.

Der mögliche Einsatz der einheimischen Biomasse im Verkehrssektor sollte sich daher an den aus Naturschutzsicht verfügbaren Anbauflächen orientieren. Weiterhin sind andere Faktoren, wie demographischer Wandel, Ernteerträge usw. zu beachten (BMU, 2004b). Mögliche Importe müssen an klar definierte Bedingungen geknüpft werden, wie dies unlängst der Rat für nachhaltige Entwicklung für die Holzimporte generell gefordert hat (RNE, 2004b). Denkbar ist die Einrichtung eines Zertifizierungssystems für Biomasse und daraus gewonnene Erzeugnisse.

Potenziale in Deutschland

21. Biomasse zur energetischen Nutzung fällt einerseits in Form von Reststoffen an (Stroh, Altholz, Bioabfall etc.), andererseits kann sie auch durch den Anbau von Energiepflanzen erzeugt werden. Die Potenziale der Biomasse zur Energieerzeugung werden umfassend in einer aktuellen Studie "Ökologisch optimierter Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland" (BMU, 2004b) untersucht. In dieser Studie wird zwischen zwei Szenarien unterschieden:

- dem Basis-Szenario, welches naturschutzfachliche Mindestanforderungen berücksichtigt und
- dem NaturschutzPlus-Szenario, welches den Forderungen des Naturschutzes vermehrt Rechnung trägt.

Das Basis-Szenario soll, so die Beschreibung, naturschutzfachliche Mindestanforderungen beinhalten, was jedoch fraglich erscheint. So werden zwar aus Naturschutzsicht wünschenswerte Nutzungen der Biomasse, wie zum Beispiel die Nutzung von Landschaftspflegeholz, im Basis-Szenario berücksichtigt; die gesetzlichen Mindestanforderungen zum Biotopverbund, zu NATURA 2000 und zur guten fachlichen Praxis, die zu einer Verringerung der Biomasseerträge auch im Basisszenario führen würden, werden hingegen außer Acht gelassen.

Das europäische ökologische Netz NATURA 2000 wird nach derzeitigem Stand der Gebietsmeldungen bezogen auf die FFH-Gebiete mindestens 8,6 % der Landesfläche einnehmen (BfN, 2005). Dabei sind die zur Bewahrung der Kohärenz erforderlichen Trittstein-Lebensräume zwischen den Gebieten noch nicht erfasst, ebenso wenig wie die EU-Vogelschutzgebiete, die nur teilweise mit FFH-Gebieten deckungsgleich sind und derzeit bereits 7 % der Landesfläche einnehmen. Gleichzeitig kann nicht davon ausgegangen werden, dass die NATURA 2000-Flächen mit den Flächen des

nationalen Biotopverbundes komplett identisch sind. Deshalb wäre eine Berücksichtigung von Flächen für den Naturschutz von 10 % der Landesfläche, wie es im NaturschutzPlus-Szenario angenommen wird, selbst für das Basis-Szenario nicht ausreichend. Eine weitere Schwachstelle der Szenarien-Konzeption besteht darin, dass Mindestanforderungen für die von Erosion gefährdeten Flächen im NaturschutzPlus-Szenario einberechnet wurden, nicht aber im Basisszenario, obwohl die Erosionsvorsorge Teil der guten fachlichen Praxis der Landnutzung ist (§ 5 Abs. 4 BNatSchG und § 17 Abs. 2 BBodSchG).

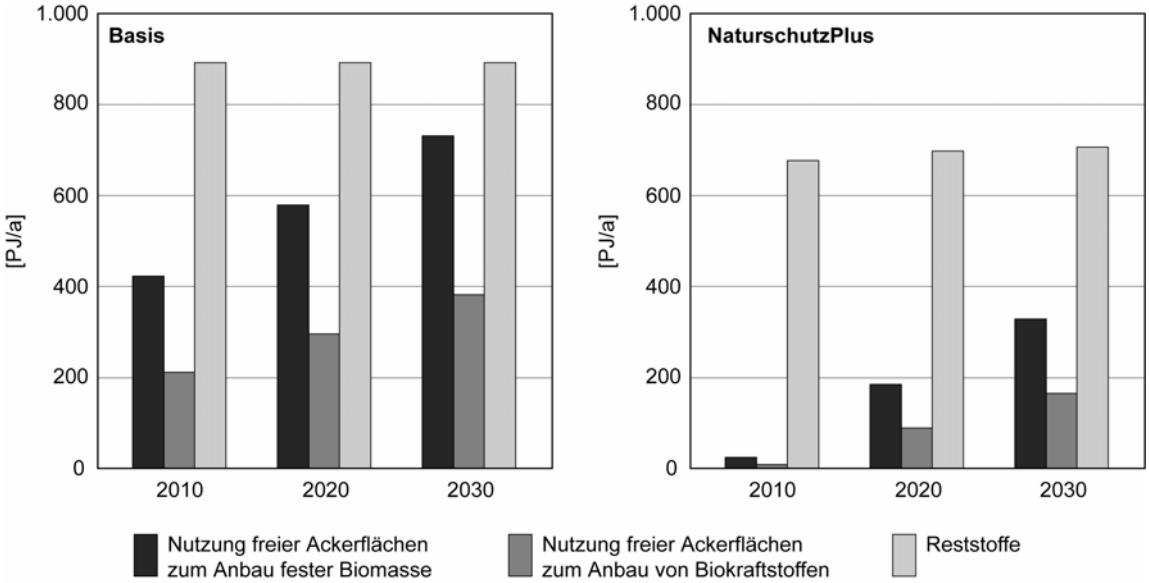
Es ist daher fraglich, ob unter Einhaltung der derzeit geltenden Naturschutzbestimmungen die im Basisszenario ausgewiesenen Mengen an Anbaubiomasse erzielt werden könnten. Vor Überschätzung des tatsächlichen Potenzials aufgrund der Ergebnisse des Basisszenarios wird daher gewarnt.

Das NaturschutzPlus-Szenario berücksichtigt gegenüber dem Basisszenario insbesondere Einschränkungen in der Flächenbereitstellung und -nutzung, die aus dem Biotopverbund, der Erhaltung bzw. Ausdehnung des Grünlandes, der ausschließlichen Nutzung erosionsgefährdeter Flächen für mehrjährige Kulturen und dem Gewässerschutz (z. B. durch Gewässerrandstreifen) resultieren. Wie sich aus der Kritik am Basisszenario ableiten lässt, sind manche der im NaturschutzPlus-Szenario berücksichtigten Maßnahmen ohnehin Gegenstand geltender Naturschutzbestimmungen. Das NaturschutzPlus-Szenario setzt daher – anders als der Name suggeriert – in Teilen keine ambitionierten Ziele für den Naturschutz.

Die in beiden Szenarien abgebildeten Potenziale sind technische Potenziale. Die Preise zur Bereitstellung gehen nicht in die Ermittlung ein. In Abbildung 8 ist einerseits das Potenzial aus Reststoffen dargestellt, wobei davon etwa ein Viertel auf klassische Abfälle zur Entsorgung entfällt, wie zum Beispiel biogene Anteile von Haus- und Sperrmüll, Klärschlamm oder Altholz. Andererseits ist das Potenzial an Anbaubiomasse in zwei verschiedenen Varianten abgebildet. Die beiden Varianten sind (1) die vollständige Nutzung der Anbaubiomasseflächen für die Erzeugung fester Biomasse oder (2) für die Erzeugung von Biokraftstoffen. Das Potenzial des Energieertrags insgesamt ergibt sich somit als Summe aus Reststoffpotenzial und einem der beiden Anbaubiomassepotenziale. Bei der Ermittlung des Potenzials in der Kraftstoffvariante wurde mit einem Jahresertrag von 80 GJ/ha gerechnet (zum Vergleich: RME ca. 45 bis 50 GJ/ha, Bioethanol aus Kombination 50 % Zuckerrübe und 50 % Weizen ca. 87 GJ/ha, BTL-Kraftstoffe 85 bis 90 GJ/ha).

Abbildung 8

Potenziale an Biomasse zur energetischen Nutzung unter verschiedenen Naturschutzanforderungen



Quelle: BMU, 2004b, S. 160, verändert

Die Studie zeigt, dass

- die intensive Produktion von Anbaubiomasse mit Naturschutzbestrebungen in Zielkonflikt steht,
- der Energieertrag auf den Anbauflächen bei Kraftstoffproduktion etwa halb so groß ist wie bei der Erzeugung fester Biomasse und
- das Potenzial für Anbaubiomasse über die Zeit deutlich ansteigen wird, während das der Reststoffe etwa gleich bleibt.

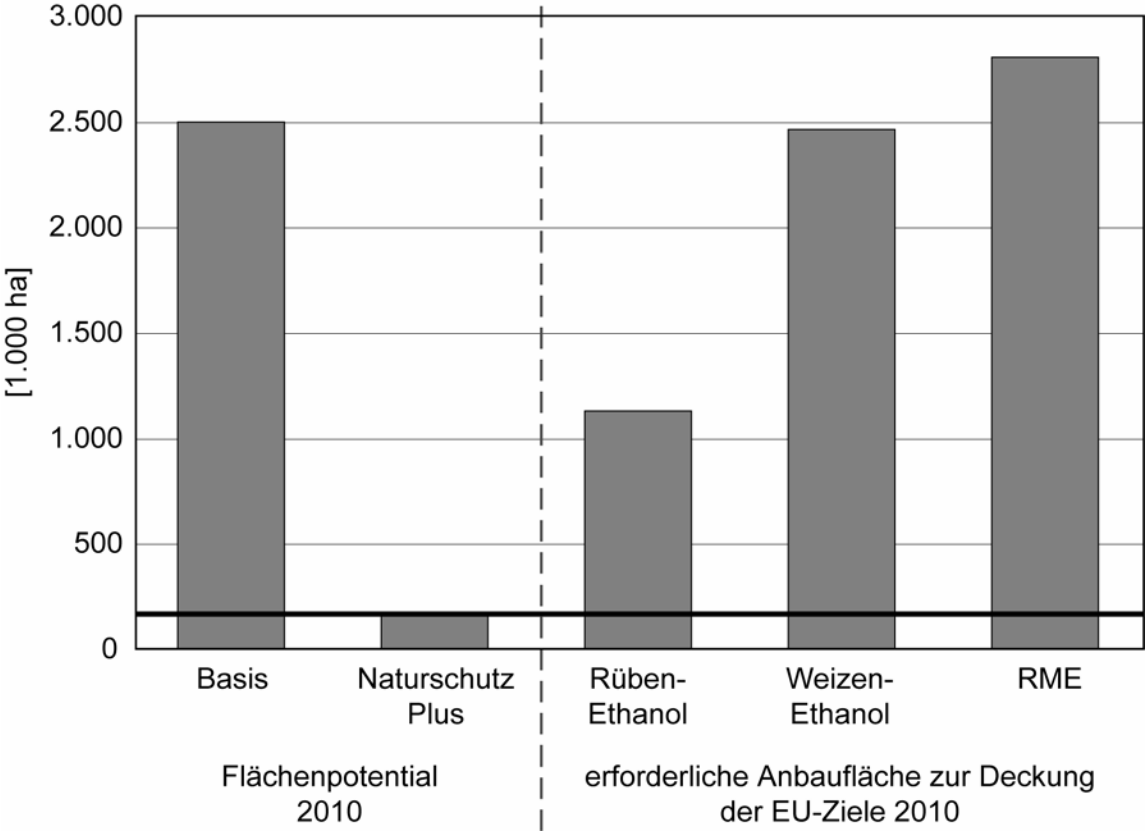
Der prognostizierte Zuwachs beim Anbaubiomassepotenzial ergibt sich aus den erwarteten Zuwächsen bei den Flächenerträgen in der konventionellen Pflanzenproduktion, der angepeilten Senkung der Überproduktion und der schrumpfenden Bevölkerung. Zudem fallen mittel- und langfristig durch Aktivitäten im Rahmen des Naturschutzes erhebliche Mengen energetisch verwertbarer Biomasse an (Holz aus der Waldsaum- und Heckenpflege, Landschaftspflegeheu usw.). Ein großes Potenzial bietet hierbei die Heckenpflege. Allerdings muss hierfür ausreichend Heckenbiomasse pro Fläche produziert werden, um sie rentabel nutzen zu können (zur Rentabilität s. METTE, 2003). In Norddeutschland ist dies nur teilweise gewährleistet (RODE, 1997). Im NaturschutzPlus-Szenario sind die Ziele für die Ausweitung des ökologischen Landbaus berücksichtigt.

In Abbildung 9 ist die im Jahre 2010 verfügbare Fläche für Anbaubiomasse mit der für das EU-Ziel (Richtlinie 2003/30/EG) von 5,75 % Biokraftstoffanteil notwendigen

Flächenbelegung verglichen. Die verfügbare Fläche ist für das Basis- und NaturschutzPlus-Szenario, die erforderliche Flächenbelegung für die Kraftstoffvarianten Biodiesel und Ethanol aus Zuckerrüben oder Weizen angegeben.

Abbildung 9

Erforderliche Anbauflächen zur Deckung des EU-Ziels 2010 von 5,75 % Biokraftstoffanteil und verfügbare Anbauflächen



Quelle: BMU, 2004b, S. 162, verändert

Im Basis-Szenario könnte im Jahre 2010 das EU-Ziel von 5,75 % erreicht werden, wenn die flächenertragsstarke Ethanolerzeugung aus Zuckerrüben die Biodieselerzeugung ergänzt. Mit der Flächenausstattung des NaturschutzPlus-Szenarios würde das EU-Ziel weit verfehlt. Statt der 5,75 % Kraftstoffanteil erreichte man in der Variante Rüben-Ethanol 0,78 %, Weizen-Ethanol 0,35 % und Biodiesel 0,31 % (Linie in Abb. 9). Relativierend muss hinzugefügt werden, dass - wie aus Abbildung 8 ersichtlich - gerade im NaturschutzPlus-Szenario eine Vervielfachung des Kraftstoffpotenzials in den folgenden Jahrzehnten prognostiziert wird.

Auf europäischer Ebene wurden für die Produktion von Biokraftstoffen unter den Bedingungen konventioneller Landwirtschaft ähnliche Mengenpotenziale errechnet. So könnten nach Angaben der EU-Kommission bei einer Nutzung von maximal 10 % der landwirtschaftlichen Fläche die Biokraftstoffe rund 8 % am Kraftstoffmarkt ausmachen (EU-Kommission, 2001).

Die Angaben machen deutlich, dass derzeit die Mengenpotenziale an inländisch erzeugten Biokraftstoffen etwa eine Zehnerpotenz unter der benötigten Kraftstoffmenge liegen. Die Diskussionen über alternative Nutzungsmöglichkeiten der bereitgestellten Kraftstoffe bzw. verschiedener Varianten der Flächennutzung zur Biomasseproduktion sind deshalb mit Rücksicht darauf zu führen, dass gegenwärtig alle Bemühungen nur einen kleinen Teil des Energieträgermarktes betreffen. Diese Aussage relativiert sich, wenn es gelingt, den Kraftstoffverbrauch zu senken (Kap. 7.3) und die prognostizierten Potenziale zu nutzen. Unter diesen Voraussetzungen wären maßgebliche Anteile von einheimischen Biokraftstoffen am Kraftstoffmarkt realisierbar.

Der Import von Biokraftstoffen oder Rohstoffen zu ihrer Erzeugung ist eingehend zu prüfen. FRITSCHE et al. (2004) geben in einem Kurzgutachten über den Pflanzenanbau zur Kraftstoffgewinnung in Entwicklungsländern einerseits Hoffnung angesichts eines überraschenden Mengenpotenzials von der Größenordnung des Bedarfs von EU-25 *und* USA. Andererseits verweisen sie auf mögliche soziale Probleme, erwartete Umweltprobleme und das Defizit, solche Importe nicht umfassend nach Kriterien der Nachhaltigkeit bewerten zu können. Die Autoren sehen kurz- und mittelfristig Biodiesel aus diversen Ölen und Fetten und Bio-Ethanol als mögliche Exportprodukte von Entwicklungsländern, längerfristig auch BTL-Kraftstoffe. Die Folgen des Aufbaus einer solchen exportorientierten Produktion auf die wirtschaftliche Entwicklung einschließlich Nahrungsmittelversorgung und das soziale Gefüge in den Entwicklungsländern werden ähnlich problematisch beurteilt wie die Produktion der übrigen cash crops. FRITSCHE et al. (2004) haben einen Kriterienkatalog als Grundlage entworfen, der soziale und ökonomische Aspekte sowie die Umweltwirkungen enthält. Eventuell könnte dieser Ansatz in ein Zertifizierungssystem münden, das zumindest die umweltverträgliche Erzeugung in den Herkunftsländern garantiert.

Grundsätzlich ist die isolierte Betrachtung der Biokraftstoffe nicht zielführend. Vielmehr ist für die Erzeugung und Verwertung nachwachsender Rohstoffe ein Gesamtkonzept zu erstellen, welches die eingehende Prüfung aller Produktions- und Verwertungspfade (stofflich, rohstofflich und energetisch) umfasst. Nur auf diesem Weg kann die bestmögliche Nutzung der im Vergleich mit Primärenergie- und rohstofflichem Erdöleinsatz kleinen Menge an verfügbarer Biomasse erreicht werden.

22. Dem Einsatz von Biokraftstoffen stehen derzeit vergleichsweise hohe Erzeugungskosten entgegen. So sind die Produktionskosten des gegenwärtig am meisten verwendeten Biokraftstoffs Biodiesel mit 35 bis 49 ct/l deutlich höher als diejenigen des herkömmlichen Dieselkraftstoffs mit 28,6 ct/l (MWV, 2004). Das Umweltbundesamt erwartet, dass Biodiesel auch langfristig nicht wettbewerbsfähig wird, da das Wettbewerbsdefizit struktureller Natur ist (KRAUS et al., 1999, S. 16). Die

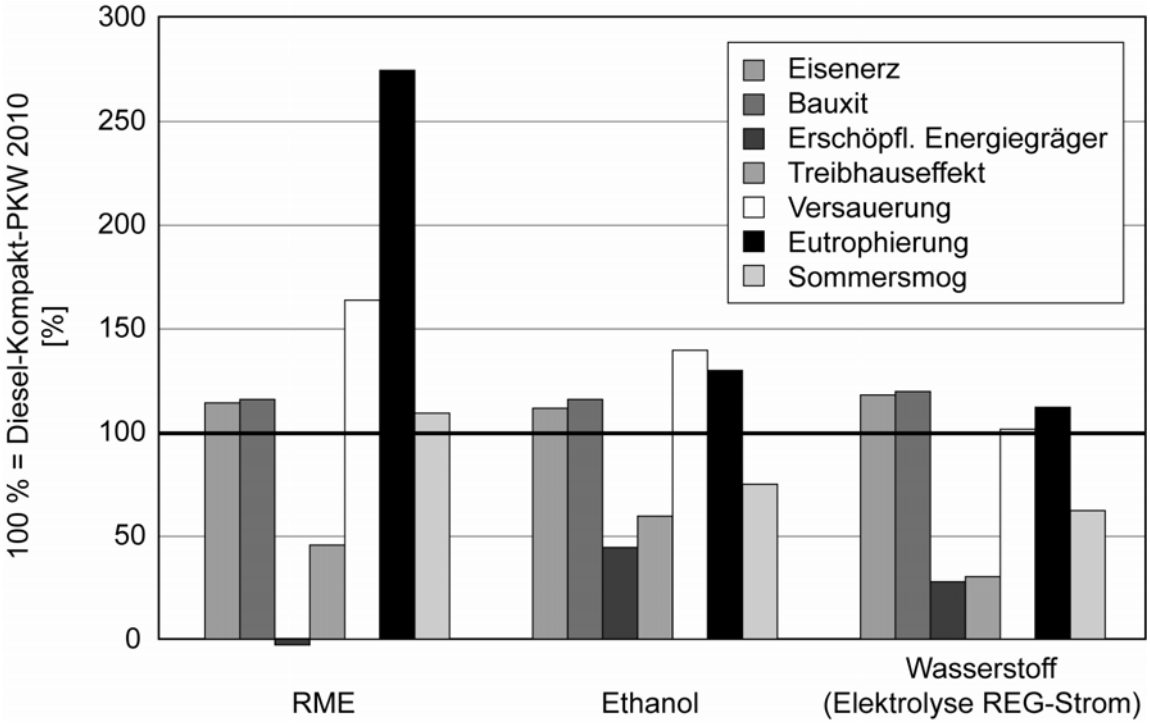
Preise der Kuppelprodukte Rapsschrot und Glycerin haben erheblichen Einfluss auf die Herstellungskosten. Dies ist bei der Produktionsausweitung und der damit verbundenen Unsicherheit über die Vermarktbarkeit der großen Mengen zu berücksichtigen. In Einzelfällen kann Pflanzenöl, das in der Landwirtschaft am Hof erzeugt und verbraucht wird, mit den Bereitstellungskosten für Diesel konkurrieren. Die Produktionskosten für Bioethanol liegen in Deutschland – verglichen mit den Produktionskosten von Benzin von rund 20 ct/l (MWV, 2004) – im günstigsten Fall bei 45 bis 55 ct/l Benzinäquivalent, auch 80 bis 90 ct/l gelten als nicht unwahrscheinlich (HENKE et al., 2002). Die Kosten für die großtechnische Erzeugung von BTL-Kraftstoffen ("Fischer-Tropsch-Diesel") werden mit circa 60 ct/l angesetzt. Die Kosten für die eingesetzte Biomasse bilden etwa ein Drittel der Produktionskosten. Unter Ausschöpfung aller technischen Verbesserungsmöglichkeiten ist zukünftig im besten Fall mit Produktionskosten von etwa 40 ct/l zu rechnen (HAMELINCK et al., 2003).

Umweltrelevanz von Biokraftstoffen

23. Der Anbau und die Gewinnung von Biomasse haben je nach Art der Biomasse, der jeweiligen Bewirtschaftungsform und Flächenausdehnung unterschiedliche Auswirkungen auf die Umwelt, insbesondere auf Natur und Landschaft. Wenn zum Beispiel bisher intensiv genutzte Flächen durch eine neue Niederwaldwirtschaft extensiviert werden, kann der Anbau von Biomasse durchaus positive Auswirkungen auf den Naturschutz haben. Zur Herstellung von Biokraftstoffen werden jedoch zurzeit vorwiegend Rüben, Raps und Getreide verwendet, die normalerweise in intensiver Landwirtschaft produziert werden. Diese führt durch Düngung und den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln zu Eutrophierung und Schadstoffbelastung von Gewässern und angrenzenden Ökosystemen und fördert indirekt die Sommersmogbildung (Abb. 10; vgl. BMU, 2004b; REINHARDT und ZEMANEK, 1999). Neben dem hochwirksamen Klimagas Lachgas (N_2O) wird die Atmosphäre auch mit Ammoniak (NH_3) belastet, das wiederum zur Versauerung und Eutrophierung beiträgt.

Abbildung 10

Ökobilanzen für verschiedene Biomasse-Kraftstoffpfade



Quelle: BMU, 2004b, S. 85

Neben stofflichen Belastungen durch den Anbau von Biomasse muss eine Reihe weiterer naturschutzrelevanter Auswirkungen berücksichtigt werden, die im Folgenden nur stichpunktartig angeführt werden:

- Einfluss der Flächenbewirtschaftung auf die Grundwasserneubildung,
- möglicher Verlust wertvoller Biotope und schutzwürdiger Arten durch die Nutzung bisher brachliegender Flächen,
- möglicher Verlust gefährdeter Arten der landwirtschaftlichen Begleitflora in Folge von Nutzungsintensivierungen,
- Einfluss der Nutzung von Reststoffen der Forst- und Landwirtschaft auf Biodiversität.

Des Weiteren sind noch nicht alle Folgen des Biomasseanbaus geklärt, die bei starker Ausweitung zu negativen Folgen führen könnten. So ist die Auswirkung von Kurzumtriebsplantagen auf Pflanzen- und Tierwelt noch ungewiss (erste Untersuchungen s. LIESEBACH und ZASPEL, o. J.). Durch den Pollenflug aus Kurzumtriebsbeständen könnte es bei den Wildpopulationen der Gehölzarten zu einer Veränderung des Genpools kommen (innerartliche Florenverfälschung). Die Zuchtsorten dieser Gehölze werden meist vegetativ vermehrt. Ein Bestand aus einer Sorte wird daher nur aus einem Genotyp aufgebaut, entsprechend hoch ist der

Nivellierungsdruck auf die umliegende Wildpopulation durch Fremdbestäubung. Die genetische Uniformität solcher Bestände birgt das Risiko plötzlicher Totalausfälle durch Pilz- und Viruskrankheiten. Die massive Ausweitung des Anbaus hochwüchsiger Energiepflanzen würde nicht zuletzt zu starken Veränderungen im Landschaftsbild führen. Eine ausführliche Diskussion der Naturschutzaspekte beim Anbau von Biomasse findet sich bei RODE et al. (2005) und CHOUDHURY et al. (2004).

Für die Herstellung von BTL-Kraftstoffen oder Wasserstoff könnte auch Biomasse aus dem Wald eingesetzt werden. Hierbei ist vor einer Nutzungsintensivierung auf Kosten von Naturschutzansprüchen zum Beispiel durch Herausnahme des für den Biotopschutz wichtigen Totholzes oder einer Übernutzung in Hinblick auf den Nährstoffentzug zu warnen. Eine nicht dem Standort angepasste Entnahme kann zu Ungleichgewichten in der Nährstoffverfügbarkeit führen und zur Bodenversauerung beitragen (s. hierzu RODE, 1999a; RODE, 1999b). Auch die visuellen Qualitäten des Waldes könnten sich durch eine in engen Zeitabständen erfolgende Holzernte stark verändern.

Solche durch die Qualität der Flächennutzung hervorgerufenen Auswirkungen sind kein Spezifikum der Biokraftstoffproduktion, sondern der Biomasseproduktion im Allgemeinen. Im Zuge der Förderung nachwachsender Rohstoffe, unabhängig ob zur stofflichen, rohstofflichen oder energetischen Verwertung, müssen die Konflikte mit dem Umwelt- und Naturschutz rechtzeitig erkannt und entschärft werden. Dazu muss die erforderliche Wissensgrundlage erst geschaffen werden.

Insgesamt zeigen die Ökobilanzen einen erheblichen Vorteil für Biokraftstoffe beim Verbrauch fossiler Energieträger und bei der Reduktion klimaschädlicher Emissionen, sowie einen Nachteil bei den Beiträgen zur Versauerung und Eutrophierung (Abb. 10).

24. Bei der Verbrennung von Biokraftstoffen wird nur die Menge an CO_2 freigesetzt, die der Atmosphäre zuvor von der Pflanze entzogen wurde. Der in Biokraftstoffen enthaltene Kohlenstoff ist damit bei der Verbrennung klimaneutral.

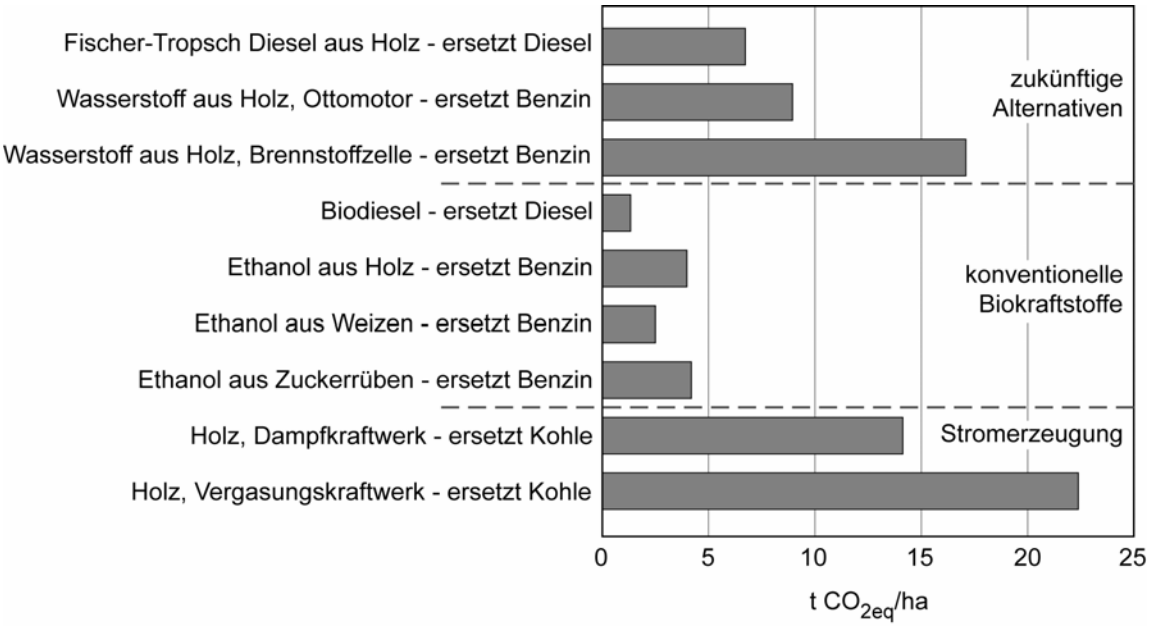
Bei einer Betrachtung der gesamten Klimabilanz von Biokraftstoffen, die dem Energieertrag pro Hektar den Energieaufwand für Pflanzenproduktion, Transport und insbesondere der Weiterverarbeitung gegenüberstellt, werden die Erträge jedoch in Teilen wieder kompensiert. Besondere Beachtung ist dabei den klimaschädigenden Lachgasemissionen (N_2O) zu widmen, die den Netto-Klimaschutzeffekt mindern. So muss hinsichtlich des Netto-Beitrags, den Biokraftstoffe bei der Vermeidung von Treibhausgasemissionen liefern, zwischen den einzelnen Kraftstoffen und den Herstellungsverfahren differenziert werden. Im Extremfall sehr hoher N_2O-Emissionen kann der Nettoeffekt beim Ersatz von Diesel durch Rapsöl gänzlich aufgehoben werden (REINHARDT und ZEMANEK, 1999).

Mit Biokraftstoffen können gegenüber herkömmlichen Otto- und Dieselkraftstoffen grundsätzlich Treibhausgasemissionen reduziert werden (vgl. Ökobilanzen in CONCAWE et al., 2004; REINHARDT und ZEMANEK, 1999; OERTEL und FLEISCHER, 2001, BMU, 2004b). Unterschieden werden müssen (1) die gegenüber konventionellen Kraftstoffen pro Anbauflächeneinheit erzielten Treibhausgas-Einsparungen (THG-Einsparungen) und (2) die THG-Einsparungen pro Kilometer. In Abhängigkeit der Hektar-Erträge und etwaiger Gutschriften für Kuppelprodukte können sich für einen Kraftstoff in beiden Kategorien unterschiedliche Bewertungen ergeben.

Zum Beispiel erreicht der Ersatz von Benzin durch Ethanol aus Zuckerrüben wegen des vergleichsweise hohen Energieertrags der Zuckerrüben jährliche Einsparungen von circa 12 t CO_2eq/ha, der Ersatz von Diesel durch Biodiesel aber nur etwa ein Sechstel davon (BMU, 2004b). In Abbildung 11 sind aus einer weiteren Studie (CONCAWE et al., 2004) die flächenbezogenen Effekte für verschiedene Varianten dargestellt. Auch hier wird – wenn auch in viel geringerem Ausmaß – der größere Effekt von Rübenethanol gegenüber Biodiesel deutlich (vgl. dazu auch den Flächenbedarf für die Erreichung des EU-Zieles, Abb. 9). Perspektivisch weist die Vergasung von Holz (Kurzumtriebsplantagen) die größten THG-Einsparpotenziale pro Fläche auf. Dies gilt besonders dann, wenn daraus nicht flüssige Kraftstoffe erzeugt werden, sondern Wasserstoff für den Betrieb von Brennstoffzellen (SCHMITZ et al., 2003; CONCAWE et al., 2004).

Abbildung 11

Potenziale zur Reduktion der Treibhausgasemissionen bei verschiedenen Biomasse-Nutzungspfaden



Quelle: CONCAWE et al., 2004 verändert

Pro Fahrzeugkilometer (d. h. Liter Kraftstoff) schneidet Biodiesel als Ersatz für konventionellen Diesel (Einsparung 70 g CO_2eq/km) jedoch besser ab als Zuckerrüben-Ethanol als Ersatz für Benzin (60 g) (CONCAWE et al., 2004). Auch die Ökobilanzen in der Studie des BMU (2004a) kommen zu einem ähnlichen Ergebnis. In der Wirkbilanz verursacht Biodiesel (trotz dreifach höherer Lachgasemissionen) Emissionen von 57 g CO_2eq/km, Rübenethanol hingegen 75 g CO_2eq/km (vgl. Abb. 10). Das gute Abschneiden des Biodiesels beruht auf den Gutschriften für die Kuppelprodukte Rapsschrot und Glycerin. Diese bedingen auch den negativen Saldo (d. h. eine Einsparung) in der Kategorie "Erschöpfliche Energieträger" der Ökobilanz (Abb. 10). Das bedeutet, dass Biodiesel für seine Bereitstellung gegenüber Rübenethanol deutlich weniger Energie aus erschöpfbaren Quellen verbraucht. Bei den auf Kilometer bezogenen Daten muss beachtet werden, dass der Verbrauch der Fahrzeuge Einfluss auf das Ergebnis hat. Je höher der Verbrauch ist, umso höher ist auch das Einsparpotenzial durch einen alternativen Kraftstoff. In der Studie von European Council for Automotive Research and Development (EUCAR), Conservation of Clean Air and Water in Western Europe (CONCAWE) und der EU-Kommission (CONCAWE et al., 2004) wurde beim Vergleich alternativer Antriebstechniken für das Jahr 2010 ein repräsentatives Mittelklasse-Fahrzeug mit einem THG-Ausstoß von 139 g CO_2/km für Otto- bzw. 131 g CO_2/km für Diesel-PKW angenommen. Auch für Benzin-Hybrid-Fahrzeuge wurde für 2010 ein Wert von 118,6 g CO_2/km angenommen, obwohl der bereits heute als Serienfahrzeug erhältliche Toyota Prius mit Fahrleistungen, die den Anforderungen der Studie genügen, einen CO_2-Ausstoß von 104 g CO_2/km erreicht. Die in der Studie für 2010 vorgeschlagenen Werte repräsentieren daher eine wahrscheinliche Entwicklung, nicht aber das technisch Machbare. Die möglichen Fehler aus dieser Prognoseunsicherheit sind für die Aussagen der Studie jedoch von geringer Bedeutung.

Aufgrund der verschiedenen Energieerträge pro Fläche und der verschiedenen Umweltwirkungen einer produzierten Kraftstoffeinheit ist die Auswahl zwischen den Kraftstoffoptionen von den vorgegebenen Rahmenbedingungen (Mengen- und Effizienzvorgaben) abhängig. Wenn die Maximierung der THG-Einsparungen durch die Ausnutzung der verfügbaren Flächen als Ziel gesetzt wird, sind die Varianten zu wählen, die flächenbezogen den größten Effekt bewirken. Nach anderen Kriterien (z. B. Verbrauch erschöpflicher Energieträger bei der Produktion oder Kosteneffizienz) betrachtet, ergibt sich nicht automatisch dieselbe Bewertung.

25. Für die verschiedenen Optionen der Biomassenutzung als Rohstoff, Kraftstoff sowie für die stationäre Strom- bzw. Wärmeerzeugung müssen im Sinne einer gesamtökologischen Optimierung Umweltnutzen und Kosten jeder Verwendungsform analysiert werden. Dies trifft sowohl für eigens angebaute Biomasse wie auch für biogene Reststoffe zu.

Biokraftstoffe besitzen verglichen mit der energetischen Nutzung fester Biomasse als Brennstoff den Nachteil geringerer Energieerträge pro Einheit Rohmaterial bzw. pro Anbaufläche. Dies resultiert aus Umwandlungsverlusten bei der Verarbeitung, außerdem sind bei konventionellen Biokraftstoffen die Erträge an verarbeitbaren Pflanzenteilen geringer als zum Beispiel bei Miscanthus oder Kurzumtriebsplantagen. Je nach Verwendungsart können beim Einsatz von Biomasse zur Strom- und Wärmeerzeugung vergleichbare (EYRE et al., 2002) oder höhere CO_2-Einsparungen (BMU, 2004b; CONCAWE et al., 2004) als beim Einsatz im Verkehr erreicht werden (Abb. 11 und Tab. 1). Die größten flächenbezogenen CO_2-Einsparungen werden beim Einsatz der Biomasse in KWK-Anlagen zur Stromerzeugung erreicht, wenn Kohlestrom ersetzt wird. Die Stromerzeugung aus Kohle verursacht in Abhängigkeit der Kohleart und -herkunft etwa 800 bis 1 000 g CO_2eq/kWh$_{el}$, die Erzeugung aus Gas in Abhängigkeit der Herkunft 350 bis 500 g CO_2eq/kWh$_{el}$ (FRITSCHE, 2003). Strom aus Biomasse, zum Beispiel Kurzumtriebsholz, verursacht etwa 50 bis 100 g CO_2eq/kWh$_{el}$ (BMU, 2004b). Unter diesen Voraussetzungen ergeben sich die in Tabelle 1 dargestellten Einsparungsmöglichkeiten.

Tabelle 1

THG-Vermeidung bei unterschiedlicher Nutzung von einer Tonne Biomasse aus Kurzumtriebsplantagen

Nutzungsart	**THG-Einsparung** kg CO_2eq/t Biomasse
Steinkohleersatz, Kraftwerk ohne KWK	650
Erdgasersatz, GuD-Kraftwerk ohne KWK	270
Dieselersatz (Fischer-Tropsch-Synthese)	290
SRU/EA SG 2005/Tab. 7-6; Datenquelle: BMU, 2004b und FRITSCHE, 2003.	

Nach Gesichtspunkten der THG-Einsparung (noch ohne Berücksichtigung von Kosten) ist demnach der Anbau und Einsatz fester Biomasse zur Stromerzeugung als Substitut für Kohle mit Abstand die wirksamste Maßnahme. Der Vergleich zwischen dem Ersatz von Elektrizität aus Erdgas mit der Biokraftstofferzeugung fällt dagegen nicht eindeutig aus. Sollte langfristig die Kohleverstromung zugunsten von Erdgaskraftwerken aufgegeben werden, bestünde keine Präferenz mehr für den Biomasseeinsatz in der Elektrizitätswirtschaft.

Die CO_2-Vermeidungskosten bei der energetischen Nutzung von Anbaubiomasse als Brenn- oder Kraftstoff sind im Vergleich mit dem Preis eines Emissionsrechts für eine Tonne Kohlendioxid im Rahmen des EU-weiten Treibhausgashandels von rund 8 €/t CO_2 generell hoch (Stand: Februar 2005 an der European Energy Exchange, Leipzig). Dieser Preis entspricht den aktuellen Grenzvermeidungskosten der Emissionsminderung von den am Emissionshandel beteiligten Unternehmen und kann daher als realer Referenzwert der Emissionsminderungskosten im Bereich der

Energiewirtschaft und großer Teile der Industrie herangezogen werden. In Tabelle 2 sind THG-Vermeidungskosten für ausgewählte Biokraftstoffvarianten zusammengestellt.

Tabelle 2

THG-Vermeidungskosten bei unterschiedlichen Biokraftstoffvarianten

Kraftstoff	Vermeidungskosten €/t CO_2eq	Quelle
Biodiesel (Raps)	35 - 1 600 280 - 350(1) 110	QUIRIN et al., 2004 CONCAWE et al., 2004 eigene Berechnung
Biodiesel (Sonnenblume)	0 - 750 220 - 260(1)	QUIRIN et al., 2004 CONCAWE et al., 2004
Rapsöl	- 50 - 1 000	QUIRIN et al., 2004
Sonnenblumenöl	- 50 - 400	QUIRIN et al., 2004
Bioethanol (Zuckerrohr)	20 - 150	QUIRIN et al., 2004
Bioethanol aus Zuckerrüben	90 - 1 100 250 - 560(1) 500 - 1 000 320	QUIRIN et al., 2004 CONCAWE et al., 2004 SCHMITZ et al., 2003 eigene Berechnung
BTL (Holz)	100 - 600 300 120	QUIRIN et al., 2004 CONCAWE et al., 2004 eigene Berechnung
Wasserstoff (Holz)	620 - 650	CONCAWE et al., 2004
Vergleich: Emissionsrecht EU THG-Handel (Februar 2005)	*ca. 8*	*European Energy Exchange, Leipzig*
(1) abh. von Verwendung der Nebenprodukte		

In der "CO_2-Studie" (QUIRIN et al., 2004) sind aus den Ergebnissen aller verfügbaren Studien Bandbreiten zusammengestellt, deren Streubreiten für alle Biokraftstoffe extrem hoch sind. Diese resultieren daraus, dass einerseits zum Beispiel die Preise für Ölsaaten wie auch für die Kuppelprodukte der Biodiesel-Erzeugung Schrot und Glycerin hohen Schwankungen am Weltmarkt unterworfen sind, was je nach Preisgefüge eine Deckung der Rohstoffkosten (Ölsaaten) durch die Kuppelprodukterlöse über die Hälfte zur Folge haben kann. Andererseits sind nicht in allen Studien die Kuppelprodukterlöse berücksichtigt, weil zum Teil die Vermarktung speziell bei starker Ausweitung der Produktion als problematisch eingeschätzt wird. Die niedrigen Vermeidungskosten bei Biodiesel und negativen Vermeidungskosten bei Raps- und Sonnenblumenöl an den unteren Enden der Bandbreiten resultieren aus der Studie von KAVALOV et al. (2003) über das Potenzial von Biodiesel und Bioethanol in den EU-Beitrittsländern von 2005. In dieser Studie werden nicht die Marktpreise für die Ölsaaten sondern Produktionskosten in Abhängigkeit der Hektar-Erträge als Rohstoffkosten herangezogen. In dieser Studie unterschreiten die Produktionskosten für Raps 165 €/t bei Erträgen von circa 2 t/ha, was in der Folge zu Biodieselproduktionskosten von unter 30 ct/l führt. Zieht man die Kosten der

Umesterung ab, resultieren Preise für Rapsöl als Kraftstoff um oder unter 28 ct/l, wodurch die niedrigen oder negativen Vermeidungskosten erklärt werden. Die Vermeidungskosten sind naturgemäß auch von den Bereitstellungskosten der konventionellen Kraftstoffe abhängig. Zum Beispiel wird in der Studie "Bioethanol in Deutschland" (SCHMITZ et al., 2003) für Bioethanol aus Zuckerrüben eine Senkung der Vermeidungskosten um 100 bis 250 €/t CO_2eq bei einer Preissteigerung des Rohöls von 30 auf 50 Dollar angegeben. Die Unsicherheit schwankender Preise für Rohöl, Rohstoffe und Kuppelprodukte ist generell ein Manko der Vermeidungskostenrechnungen. Die in Tabelle 2 angegebenen Werte aus eigener Berechnung basieren auf den derzeitigen Herstellungskosten für Benzin, Diesel und Biokraftstoffe und den Daten der CONCAWE-Studie (CONCAWE et al., 2004) über THG-Einsparungen. Bei der Berechnung für Biodiesel sind die Agrarförderungen unberücksichtigt. Doch ist die Subventionswirkung der Flächenstilllegung bei den aktuellen Preisen für Raps nicht sichtbar (BROCKS, 2001). Die Preise für Raps für Ernährungszwecke ("Food-Raps") und solchen für andere Verwendung ("Non-Food-Raps"), der auf den Stilllegungsflächen angebaut werden darf, unterscheiden sich nur um wenige Euro pro Tonne. Bei einer Preisdifferenz von 25 €/t betrüge die Subventionswirkung circa 5 ct/l Biodiesel.

Verglichen mit den Vermeidungskosten bei der Verstromung in stationären Anlagen von circa 50 €/t CO_2eq (BMU, 2004b) oder dem Preis der Emissionsrechte ist die Erzeugung von Biokraftstoffen derzeit eine teure Maßnahme zur CO_2-Vermeidung. Die Bewertung zukünftiger Entwicklungen ist in hohem Maße von den verfügbaren Technologien und ihren Kosten sowohl im Verkehr als auch im stationären Bereich abhängig. Zum Beispiel könnte derzeit – zwar mit erheblich höheren Vermeidungskosten – mit dem Einsatz von Wasserstoff aus Holz in Brennstoffzellenfahrzeugen ein ähnlicher Vermeidungseffekt wie bei der Stromerzeugung erreicht werden (BMU, 2004b, vgl. Abb. 11). Eine Prognose über den langfristig effektivsten Einsatz von Biomasse ist derzeit sowohl aus Unsicherheit beim zukünftigen Stand der Technik sowie bei den Kosten nicht möglich.

Auf die weiteren Emissionen, die bei der energetischen Verwertung der Biomasse entstehen, wird hier nicht eingegangen. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass beim massiven Ausbau der stationären Biomasseverwertung, insbesondere bei Kleinanlagen, die nicht unter die 13. BImSchV fallen, die Emissionsfrachten kritisch zu beobachten sind.

26. Das Emissionsverhalten von Dieselmotoren verändert sich, wenn konventioneller Dieselkraftstoff durch Biodiesel ersetzt wird. Generell sind die Änderungen vom jeweiligen Motor abhängig. Tendenziell treten bei den durch unvollständige Verbrennung emittierten Schadstoffen Minderungen, bei NO_x

Steigerungen auf. Die Minderungen bei Partikeln, HC und CO belaufen sich üblicherweise auf 30 bis 40 %, die Erhöhungen bei NO_x auf 10 bis 20 %. Bei Mischungen von Biodiesel mit konventionellem Diesel ändert sich das Emissionsverhalten etwa linear mit dem Biodieselanteil (MUNACK et al., 2003). Die mutagene Wirkung von Biodiesel-Ruß ist kleiner als die von konventionellem Dieselruß (BÜNGER et al., 2000; CARRARO et al., 1997).

Bei pflanzenölbetriebenen Motoren sind keine generellen Aussagen möglich, da die Emissionen nicht nur vom Kraftstoff, sondern in erster Linie von der Umrüstung abhängen. Nach Auskunft des Umrüsters Vereinigte Werkstätten für Pflanzenöltechnologie (VWP Allersberg) stellt für die Umrüstung die Einhaltung der geltenden Abgasnormen im Betrieb mit Pflanzenöl kein Problem dar. Die Schwierigkeit besteht derzeit darin, dass aufgrund der Gesetzeslage die Zulassung der umgerüsteten Fahrzeuge mit konventionellem Dieselkraftstoff erfolgt und somit der Umrüster den schadstoffarmen und zuverlässigen Betrieb für beide Kraftstoffe gewährleisten muss.

3.2.2 Erdgas

27. Erdgas kann als Kraftstoff im Verkehr entweder als stark komprimiertes Erdgas oder als verflüssigtes Erdgas eingesetzt werden.

Komprimiertes Erdgas (Compressed Natural Gas – CNG) besitzt den Nachteil einer im Vergleich zu Benzin geringeren Energiedichte und infolgedessen auch einer geringeren Tankfüllungs-Reichweite. Bei der heute üblichen Speicherung von Erdgas bei einem Maximaldruck von 200 Bar muss rund das 4,5fache Volumen gegenüber Benzin bzw. das 4fache gegenüber Diesel mitgeführt werden, um die gleiche Energiemenge wie bei Benzin zu erreichen (BACH, 2002; LEXEN, 2002).

Der Vorteil des verflüssigten Erdgases (Liquified Natural Gas – LNG) besteht in seinem geringen Volumen (Kompression bis zum Faktor 600). Allerdings muss es dazu in hochisolierten Tanks unter - 162º C gehalten werden. Unter Klimagesichtspunkten ist wegen geringerer Umwandlungsverluste die Druckgasoption (CNG) leicht vorteilhaft gegenüber verflüssigtem Erdgas (RAMESOHL et al., 2003). In Deutschland hat sich der Trend zum CNG anstelle des LNG entwickelt. Durch chemische Umwandlungsschritte (Fischer-Tropsch-Synthese) kann Erdgas außerdem zur Produktion synthetischer Kraftstoffe (Synfuel, GTL) oder zur Umwandlung in Wasserstoff genutzt werden (RAMESOHL et al., 2003).

Der Kraftstoff Erdgas kann in Ottomotoren als Benzin-Ersatz eingesetzt werden. Aufgrund der begrenzten Betankungsinfrastruktur setzen dabei die meisten Hersteller auf bivalente Fahrzeuge, die sowohl mit Erdgas als auch mit Benzin betrieben werden können. Erdgasantriebe ermöglichen eine rußfreie Verbrennung, sehr niedrige NO_x-

Werte und ein geruchloses Abgas. Hinsichtlich der THG-Emissionen muss eine differenzierte Betrachtung unter Berücksichtigung der Vorkette angestellt werden.

28. Die kraftstoffspezifischen THG-Emissionen von Erdgas (Well-to-Tank) hängen in hohem Maße von Annahmen bezüglich der Parameter für Herkunft und Transportweg und den dabei angenommenen Leitungsverlusten ab. Unter Berücksichtigung der gesamten Prozesskette können sie im Fall der Annahmen des derzeitigen günstigen EU-Mix um bis zu 30 % unter denen von Benzin liegen. Einige Studien errechnen für den Fall einer 7 000 km-Druckgas-Pipeline oder einer Flüssiggas-Pipeline um 60 bis 85 % höhere THG-Emissionen als bei Benzin (CONCAWE et al., 2003a; RAMESOHL et al., 2003). Neuere Messungen haben hingegen deutlich geringere Leitungsverluste für russische Gas-Pipelines ergeben, welche in zukünftige Berechnungen einbezogen werden sollten (Wuppertal Institut 2005).

Die Verbrennung von Erdgas im Ottomotor erfolgt heute bei bivalenten Fahrzeugen teilweise noch mit einem schlechteren Wirkungsgrad als die von Benzin (RAMESOHL et al., 2003; KOLKE et al., 2003). Bei angepassten Motoren ist aber eine Emissionsminderung bei CO_2 von gut 20 % durch die bessere Klopffestigkeit des Kraftstoffs Erdgas im Vergleich zu Benzin zu erwarten, womit in etwa das Niveau des Dieselantriebs erreicht wird. Für das Jahr 2010 werden spezifische Fahrzeugemissionen ohne Berücksichtigung der Vorkette von rund 110 g CO_2eq/km erwartet (CONCAWE et al., 2003b; LEXEN, 2002), was ebenfalls auf dem Niveau verbesserter Verbrennungsmotoren mit herkömmlichen Kraftstoffen liegt.

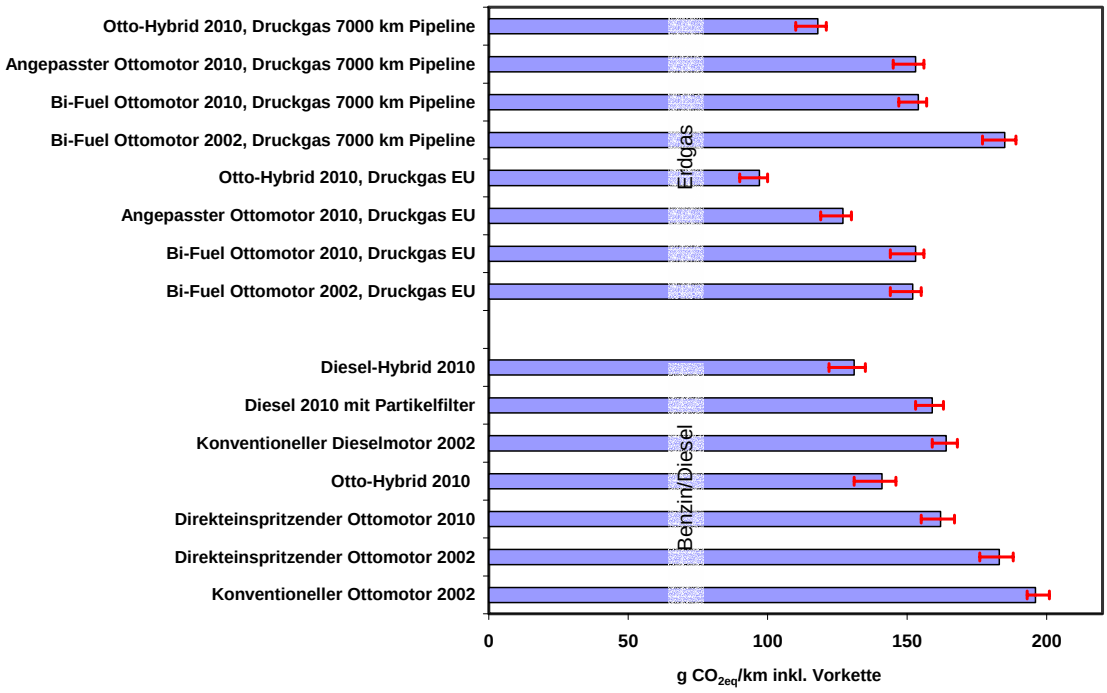
Unter Berücksichtigung der gesamten THG-Emissionen (Well-to-Wheel) besitzt ein erdgasbetriebenes Fahrzeug dann Vorteile gegenüber benzinbetriebenen Fahrzeugen, wenn für Erdgas der heutige EU-Mix angenommen wird; gegenüber Dieselfahrzeugen ist kein Vorteil erkennbar (Abb. 7-14). Wird für die Zukunft von weiteren Transportentfernungen ausgegangen, nimmt die Attraktivität von Gas weiter ab. Letztlich hängt die Bewertung von der Höhe der Leitungsverluste und der Verwendung ab. Aufgrund des relativ geringeren Vorteils von Gas in Bezug auf THG-Emissionen im Verkehrssektor hat die Höhe der Leitungsverluste hier einen größeren Einfluss auf die Bewertung als bspw. in der Energie- und Wärmeerzeugung (SRU 2004, Kap. 2.2.3).

Aus energetischer und ökologischer Sicht hat synthetischer Diesel auf Erdgasbasis keine Vorteile gegenüber dem direkten Erdgaseinsatz. Vielmehr wird durch den zusätzlichen Umwandlungsschritt mehr Energie zur Bereitstellung von synthetischem Diesel benötigt, sodass dieser sogar ökologisch nachteilig ist (RAMESOHL et al., 2003). Ein Vorteil des synthetischen Diesels gegenüber dem direkten Einsatz als Ottokraftstoff ist der Entfall der erst zu schaffenden Gasbetankungsinfrastruktur und der Umstellung der Kraftfahrzeugflotte. Gegenüber konventionellem Diesel bietet

synthetischer Diesel Qualitätsvorteile sowohl betreffend der Zündwilligkeit als auch des Schadstoffgehalts, da dieser frei von Schwefel, Stickstoff und Aromaten ist.

Abbildung 12

Vergleich der totalen THG-Emissionen von mit Erdgas bzw. mit konventionellen Kraftstoffen betriebenen Fahrzeugen (Well-to-Wheel-Analyse)



Quelle: CONCAWE et al., 2004, verändert

29. Hinsichtlich der Emissionen anderer Luftschadstoffe sind mit Erdgas betriebene Verbrennungsmotoren vorteilhaft gegenüber benzinbetriebenen Motoren. Dies hängt vor allem mit der besseren Verbrennung des Erdgases zusammen. So kann es zu keiner Kraftstoffkondensation an kalten Motorenteilen kommen, was die Kaltstartemissionen deutlich verringert (BACH, 2002). Im Vergleich zu einem benzinbetriebenen Ottomotor ist der Ausstoß von Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffen deutlich geringer; Partikel und Benzol werden überhaupt nicht ausgestoßen (PEHNT, 2001). Hinsichtlich der Stickstoffoxidemissionen ist Erdgas im Vergleich zu Diesel vorteilhafter. Während bspw. ein Dieselbus (Euro-III) 60-mal mehr Stickstoffoxide als ein Personenwagen mit Benzinmotor emittiert, stößt ein mit Erdgas betriebener Bus nur noch 8-mal so viel Stickstoffoxide aus (FEISST, 2002).

Diese Vorteile nehmen jedoch mit der Einhaltung der Euro-4-Normen und der breiten Einführung fortgeschrittener Abgasnachbehandlungstechniken (Partikelfilter, NO_x-Speicherkatalysatoren) bei PKW deutlich ab. Würden dagegen zukünftig die technischen Weiterentwicklungen in der Motorsteuerung und Abgasnachbehandlung,

die im Bereich der Benzinfahrzeuge bereits realisiert wurden, auch für die Erdgasantriebe genutzt, so könnten die ohnehin niedrigeren Schadstoffemissionen noch einmal deutlich gesenkt werden (BACH, 2002).

30. Der Einsatz von Erdgas im Verkehr steht in direkter Nutzungskonkurrenz zum Stromerzeugungssektor, der zukünftig stark wachsen wird. Wird bei der Stromerzeugung Kohle durch Erdgas ersetzt, können pro eingesetztem Energieäquivalent bis zu 10-mal mehr THG-Äquivalente eingespart werden als beim Ersatz von Benzin durch Erdgas im Straßenverkehr (CONCAWE et al., 2004). Dem großflächigen Einsatz von Erdgas im Straßenverkehr steht zudem der teure Aufbau einer flächendeckenden Infrastruktur entgegen.

Aus diesen Erwägungen heraus ist ein geeignetes Anwendungspotenzial für erdgasbetriebene Fahrzeuge vor allem im innerstädtischen Bereich zu sehen, wo konzentrierte Emissionen wegen hoher Verkehrsdichten lokal zu direkten Schadwirkungen führen können. Es bietet sich insbesondere die Umstellung des Flottenverkehrs im ÖPNV oder der Taxis an, welche schadstoffseitig schnell erhebliche Reduzierungen bringen würde und weiterhin keinen kostspieligen Ausbau einer großflächigen Betankungsinfrastruktur erforderlich macht. Der Einsatz von Erdgas in verarbeiteter Form als synthetischer Diesel könnte vor allem im Schwerlastverkehr deutlich zur Verringerung klassischer Luftschadstoffe (EYRE et al., 2002), nicht aber zur Reduktion der THG-Emissionen beitragen.

31. Neben Erdgas wird auch Methanol als möglicher Energieträger für eine Übergangsstrategie zum wasserstoffbetriebenen Brennstoffzellenfahrzeug diskutiert (VES, 2001). Der Vorteil von Methanol besteht darin, dass es vergleichsweise einfach aus fossilen Energieträgern und Biomasse gewonnen werden kann und als flüssiger Kraftstoff einfach speicherbar ist. Unter dem Gesichtspunkt der THG-Emissionen hat Methanol die größten Minderungspotenziale, wenn es aus Biomasse erzeugt wird. Allerdings ist in diesem Fall das Potenzial begrenzt (vgl. Tz. 21).

3.2.3 Wasserstofftechnologie und Verkehr

32. Einen Beitrag zur Minderung der Umweltprobleme könnte die Kombination aus Wasserstoff und Brennstoffzellentechnologie sowohl im mobilen als auch im stationären Anwendungsfeld leisten. Daher wird seit geraumer Zeit das "emissionsfreie" Auto propagiert, das mit CO_2-frei erzeugtem Wasserstoff betrieben wird. Die amerikanische Regierung beabsichtigt mit der "President's Hydrogen Initiative" eine Forschungsoffensive auf diesem Gebiet, die mit 1,2 Mrd. Dollar in den nächsten fünf Jahren unterstützt werden soll (US Department of Energy, 2004). Die Internationale Energieagentur der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) räumt dem Einsatz von Wasserstoff im mobilen Bereich ebenfalls

große Chancen ein (vgl. IEA, 2003). Auch auf europäischer Ebene wird eine Wasserstoffoffensive forciert. So haben der Präsident der EU-Kommission und die EU-Kommissare für Transport und Energie sowie Forschung eine Mitteilung für eine europäische Partnerschaft zur Unterstützung der Wasserstofftechnologie vorgelegt (Pressemitteilung IP/03/1229). Eine Expertengruppe zur Wasserstoffeinführung (High Level Group on Hydrogen and Fuel Cells) wurde im Oktober 2002 gegründet und hat im Juni 2003 ihre Vision einer europäischen Wasserstoffwirtschaft vorgestellt (HLG, 2003).

Auch der SRU schätzt die Potenziale der Wasserstofftechnik langfristig als bedeutend ein. Entscheidend für eine Beurteilung dieser Technologie ist jedoch die Analyse der mit der Wasserstoffherstellung verbundenen Emissionen. Würde bspw. zur Herstellung des Wasserstoffs auf fossile Primärenergieträger ausgewichen, ergäbe sich eine nicht zu vertretende Energie- und Klimabilanz, da der Primärenergieaufwand der Wasserstoffherstellung im günstigsten Fall dreimal so hoch liegt wie bei der Benzinherstellung (WALLENTOWITZ und NEUNZIG, 2001, S. 38). Die mancherorts vorgeschlagene Integration der Kernenergie in das System der Wasserstofftechnologie als Baustein zur Wasserstoffherstellung kommt angesichts der Risiken und ungelösten Entsorgungsprobleme nicht in Betracht.

33. Zur Emissionsminderung auf der Basis von Wasserstoff werden als langfristige technische Lösung derzeit zwei Wege untersucht: Die Erzeugung der Antriebsenergie über eine Brennstoffzelle (z. B. Daimler-Chrysler: NECAR 5) und die Verbrennung des Wasserstoffs in einem Verbrennungsmotor (z. B. BMW: 745h, 750hL). Die auf lange Sicht avisierte Lösung für den mobilen Einsatz des Wasserstoffs ist jedoch die Brennstoffzelle (WB BMVBW, 2002) mit dem gegenüber dem Verbrennungsmotor besseren Wirkungsgrad.

Soll ein Brennstoffzellen-Fahrzeug anstelle von Wasserstoff, der aufgrund seiner geringen Energiedichte nur unter einem sehr hohen Druck oder bei sehr niedrigen Temperaturen verflüssigt sinnvoll zu speichern ist, mit Erdgas, Benzin oder Methanol betrieben werden, müssen diese Energieträger im Fahrzeug noch zu Wasserstoff umgewandelt werden, der wiederum vor seiner Zufuhr zur Brennstoffzelle gereinigt werden muss. Eine Brennstoffzelle, die direkt mit Methanol betrieben werden kann, ist in Entwicklung, jedoch noch nicht für den mobilen Bereich einsetzbar (Enquete-Kommission, 2002, S. 219; OERTEL und FLEISCHER, 2001, S. 91).

34. Wesentliche Vorteile der Brennstoffzellentechnologie sind die mechanische Einfachheit, der geringe Wartungsaufwand, die Ölfreiheit und eine leistungsstarke Bordenergieversorgung (STOLTEN et al., 2002, S. 488). Ein wesentliches Problem ist derzeit noch die Speicherung des Wasserstoffs im Fahrzeug. Zur Lagerung von Wasserstoff in Druckbehältnissen bedarf es zum einen eines extrem hohen Drucks

(350 bar und mehr), zum anderen wäre ein mit Wasserstoff gefüllter Tank aufgrund der hohen Diffusionsrate des Gases nach einigen Monaten leer und stellte zudem eine Gefahrenquelle dar. Alternative Lagerungsmöglichkeiten wie die chemische Speicherung in Metallhydridspeichern sind zwar sicherer und kompakter als die Druckbehälter, weisen aber auch noch zu geringe massenspezifische Speicherdichten auf. Ein weiterer Nachteil der Brennstoffzelle sind die hohen Materialkosten. So ist eine Massenproduktion von Brennstoffzellen zu vertretbaren Preisen insbesondere aufgrund des noch nicht substituierbaren Katalysators Platin nicht realisierbar. Ein ebenfalls nicht zu unterschätzendes Hemmnis ist, dass für eine flächendeckende Versorgung einer Fahrzeugflotte mit Wasserstoff der Aufbau einer neuen Infrastruktur erforderlich ist (vgl. auch VES, 2001; WALLENTOWITZ und NEUNZIG, 2001, S. 35).

Energetische Bilanz und Klimarelevanz der (mobilen) Wasserstofftechnologie

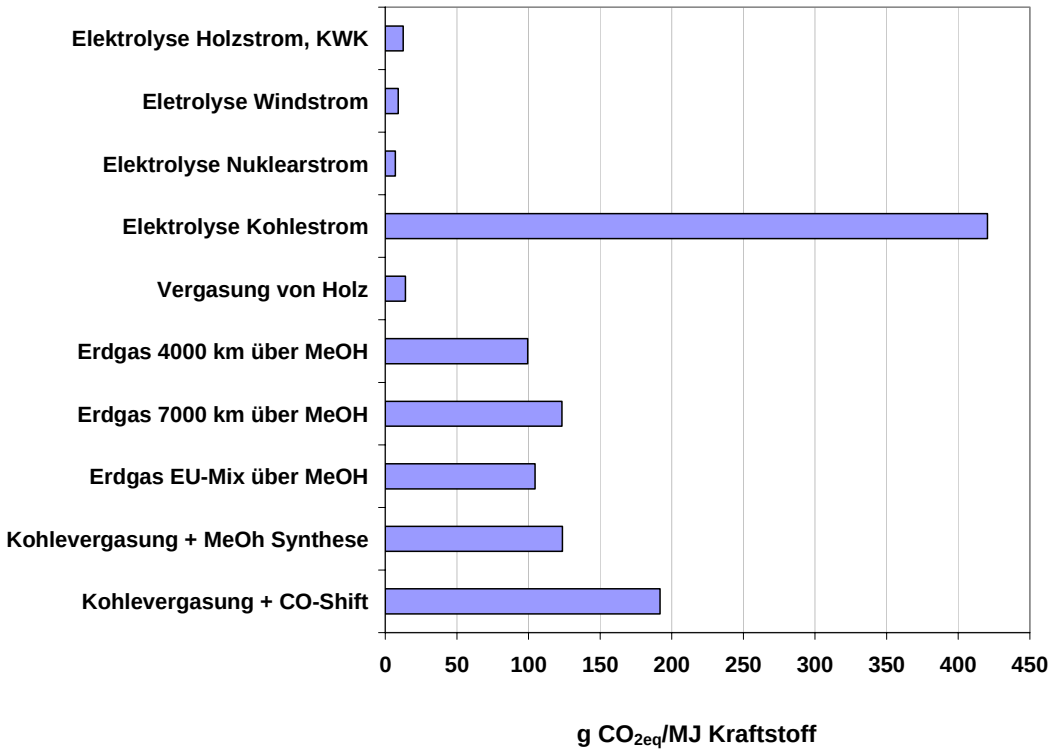
35. Mit Wasserstoff betriebene Fahrzeuge verursachen im Betrieb keine oder nur geringe direkte Emissionen, insbesondere produzieren sie kein CO_2. Eine Beurteilung der Energie- bzw. Ökobilanz von Wasserstoff hängt aber nicht nur von der Wirksamkeit der Energienutzung beim Fahrzeugbetrieb, sondern auch von der vorgelagerten Prozesskette und hier in erster Linie von den zur Wasserstoffherstellung eingesetzten Primärenergieträgern ab.

Zur Gewinnung von Wasserstoff existieren mehrere Verfahren, wie bspw. die Dampfreformierung von Erdgas, die Ölvergasung, die Methanolreformierung, das Kværner-Verfahren (Zerlegung von Kohlenwasserstoffen im Lichtbogen in reinen Wasserstoff und reinen Kohlenstoff), die Vergasung oder Vergärung von Biomasse und die elektrolytische Spaltung von Wasser. CO_2-Emissionen bei der Herstellung von Wasserstoff können demnach sowohl bei der direkten Umwandlung von fossilen oder biogenen Energieträgern als auch bei der Herstellung von Strom, der für die Elektrolyse oder das Kværner-Verfahren benötigt wird, auftreten. Der Energiebedarf zur Erzeugung von Wasserstoff ist deutlich größer als der zur Herstellung von Benzin. Auch die Treibhausgasemissionen von fossil erzeugtem Wasserstoff liegen mit 100 g CO_2eq/MJ (Reformierung von Erdgas aus EU-Mix) bis 190 g CO_2eq/MJ (Kohlevergasung plus CO-Shift) deutlich über denen herkömmlicher Kraftstoffe mit 14,2 g CO_2eq/MJ (Diesel) bzw. 12,5 g CO_2eq/MJ (Benzin; CONCAWE et al., 2003a). Bei der Elektrolyse schneidet der Einsatz von Kohlestrom mit 420 g CO_2eq/MJ bezüglich der THG-Emissionen am schlechtesten ab, Nuklearstrom verursacht etwa 7 g CO_2eq/MJ, Strom aus erneuerbaren Energien 9,1 g CO_2eq/MJ (bei offshore Wind; vgl. Abb. 13). Eine vollständige Umstellung der deutschen PKW-Flotte würde einen Wasserstoffbedarf von 700 PJ bedeuten, zu dessen Herstellung 290 TWh Strom

benötigt würden, was in etwa der Hälfte der heutigen deutschen Brutto-Stromerzeugung entspricht (AGEB, 2004).

Abbildung 13

THG-Emissionen bei der Bereitstellung von Wasserstoff



Quelle: CONCAWE et al., 2004, verändert

Infolge der teils hohen THG-Emissionen bei der Wasserstoffbereitstellung weisen Brennstoffzellen-Fahrzeuge gegenüber optimierten Verbrennungsmotoren mit niedrigem Kraftstoffverbrauch in manchen Fällen keine Primärenergieeinsparung auf (OERTEL und FLEISCHER, 2001, S. 295; KOLKE, 1999; SRU, 2000, Tz. 1397). Der Wirkungsgrad einer Brennstoffzelle vermindert sich im mobilen Einsatz gegenüber einer Nutzung im stationären Bereich, bewegt sich jedoch immer noch zwischen 40 und über 50 %. (KOLKE, 1999, S. 46; auch CONCAWE et al., 2003b). Unter Berücksichtigung der gesamten Energiekette, also einschließlich der aufwändigen Wasserstoffherstellung und -verflüssigung, wird der derzeitige Gesamtwirkungsgrad auf 20 bis 30 % geschätzt (STOLTEN et al., 2002, S. 467).

36. Insgesamt sind durch die Wasserstofftechnologie dann maßgebliche THG-Einsparungen zu erwarten, wenn Wasserstoff aus regenerativen Energieträgern gewonnen und in Brennstoffzellen-Fahrzeugen eingesetzt wird. Die Gesamtemissionen betragen dann nur rund 10 g CO_2eq/km. Bei Brennstoffzellenfahrzeugen mit Wasserstoff aus Gasreformierung liegen die Emissionen je nach Gasherkunft zwischen 93 und 116 g CO_2eq/km. Dies liegt im Bereich der Emissionen, die ein

verbrauchsoptimiertes, mit herkömmlichen Kraftstoffen angetriebenes Verbrennungsmotorfahrzeug erreichen kann.

Bei einer über den Verkehrssektor hinausgehenden Betrachtung ist der Einsatz von regenerativ erzeugtem Wasserstoff als Kraftstoff ökologisch und auch ökonomisch fragwürdig. Es ist derzeit ökologisch zielführender, die erneuerbaren Energieträger in der stationären Stromerzeugung einzusetzen und eine direkte Nutzung des regenerativ erzeugten Stroms vorzunehmen (RAMESOHL et al., 2003; NITSCH et al., 2001; KOLKE, 1999, S. 13; EYRE et al., 2002; vgl. auch Nutzungskonkurrenz von Biomasse Tz. 21).

Auch aus rein wirtschaftlichen Erwägungen heraus bietet es sich an, vor einer Erhöhung des regenerativen Anteils im Verkehrssektor zunächst den Anteil erneuerbarer Energien im Strombereich zu steigern. Grund hierfür ist, dass die Kosten zur Substitution fossiler durch regenerative Energieträger im Stromsektor im Verhältnis zum Kraftstoffsektor deutlich niedriger liegen (NITSCH et al., 2001, S. 366 f.).

3.3. Bewertung

37. Obwohl alternativen Kraftstoffen (Biomasse, Wasserstoff) zumindest in der längerfristigen Perspektive ein erhebliches Minderungspotenzial beizumessen ist, erscheint dem SRU in Anbetracht der beschränkten Potenziale und der bisher noch vergleichsweise hohen Vermeidungskosten zunächst eine weiter gehende Ausschöpfung der technischen Möglichkeiten zur CO_2-Minderung bei Kraftfahrzeugen mit konventioneller Antriebstechnik als vordringlich. Dabei ist technisch bereits heute eine Reduzierung des derzeitigen durchschnittlichen Kraftstoffbedarfs neu zugelassener PKW um über 40 % bei Benzin-PKW und um bis zu 40 % bei Diesel-PKW möglich. Damit kann der durchschnittliche spezifische CO_2-Ausstoß neu zugelassener Fahrzeuge auf circa 100 g/km gesenkt werden. Ansatzpunkte hierfür liegen einerseits in einer Verbesserung der spezifischen Motortechnologie, einem Betrieb des Motors im optimalen Kennfeldbereich durch Downsizing und Getriebespreizung, einem optimalen Energiemanagement bis hin zur Hybridisierung und einer Reduzierung des Fahrzeuggewichts und des Rollwiderstandes.

4 Umsetzungsmöglichkeiten

38. Zur Reduzierung der spezifischen CO_2-Emissionen, und damit zur Reduzierung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs, bestehen derzeit keine ordnungsrechtlichen Vorgaben. Eine ordnungsrechtliche Steuerung ist in diesem Bereich zwar prinzipiell möglich, jedoch weisen ökonomische Instrumente gerade in Bezug auf die Reduzierung von CO_2-Emissionen eine Reihe unbestrittener Vorteile auf, die insbesondere die Frage der gesamtwirtschaftlichen Effizienz betreffen. Aus diesem Grund präferiert der SRU im Rahmen einer quellenbezogenen Strategie zur Verminderung der verkehrsbedingten CO_2-Emissionen grundsätzlich den Einsatz ökonomischer Instrumente. Dabei könnte es auf den ersten Blick ideal erscheinen, verkehrsbedingte CO_2-Emissionen mittels eines einzigen preispolitischen Instrumentes zu regulieren, das möglichst nahe am Kraftstoffverbrauch ansetzt. Eine solche Vorgehensweise erscheint jedoch in Anbetracht der vorliegenden Preiselastizitäten als politisch nicht durchsetzungsfähig. So ist nach HANLY et al. (2002, S. 11) im Personenverkehr davon auszugehen, dass eine Steigerung der Kraftstoffpreise um 10 % in der kurzfristigen Betrachtung einen Nachfragerückgang um lediglich circa 3 % auslöst. Selbst in der langfristigen Betrachtung, also unter Berücksichtigung weiter gehender Anpassungsoptionen, beträgt dieser Wert nur etwa 6 %. Diese Ergebnisse sind im Wesentlichen mit zahlreichen weiteren Studien zur Preiselastizität der Kraftstoffnachfrage im Personenverkehr konsistent (Victoria Transport Policy Institute, 2004; KNIESTEDT, 1999). Die Reaktionsträgheit in Bezug auf die Kraftstoffpreise wird darüber hinaus auch aus einer Umfrage im Auftrag des Umweltbundesamtes deutlich, nach der lediglich 60 % der befragten Fahrzeughalter angeben, dass sie erst bei einer Verdoppelung des Benzinpreises gegenüber dem Niveau des Jahres 2002 ihr Fahrverhalten überhaupt ändern würden (KUCKARTZ und GRUNENBERG, 2002, S. 73). Dabei ist zudem zu beachten, dass nach Erfahrungen aus früheren Umfragen davon auszugehen ist, dass gerade bei einer schrittweisen Preiserhöhung ein Gewöhnungseffekt eintritt, und die tatsächliche Verhaltensänderung weniger deutlich ausfällt, wie die jeweiligen Umfrageergebnisse es nahe legen (DAT, 2002).

Im Bereich des Güterverkehrs sind die Elastizitäten in Bezug auf die Kraftstoffpreise in der Regel noch geringer als im Personenverkehr, denn die Kraftstoffkosten stellen im Durchschnitt über alle Gütergruppen betrachtet nur circa 6 % der Transportkosten im Güternahverkehr und 19 % im Güterfernverkehr dar. Hinzu kommt, dass die Substitutionsmöglichkeiten in Bezug auf den Modal Split im Güterverkehr deutlich schwächer ausgeprägt sind als im Personenverkehr.

39. Die genannten Elastizitäten implizieren, dass die Kraftstoffnachfrage zwar durchaus spürbar aber nur deutlich unterproportional auf entsprechende Preiserhöhungen reagiert. Deshalb würde jeder Versuch, die im Verkehrsbereich

erforderliche Reduktion der CO_2-Emissionen ausschließlich über steigende Kraftstoffpreise zu realisieren, an der Höhe der hierfür erforderlichen Kraftstoffpreise und damit an der Frage der politischen Durchsetzbarkeit scheitern. Dies lässt sich exemplarisch anhand der von der Enquete-Kommission (2002) "Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und Liberalisierung" als notwendig erachteten Senkung der verkehrsbedingten CO_2-Emissionen um bis zu 55 % bis zum Jahre 2050 verdeutlichen. Unter Zugrundelegung einer langfristigen Preiselastizität von - 0,6 und eines Anpassungszeitraumes von 10 Jahren würde diese Zielsetzung erfordern, dass die Kraftstoffpreise bis zum Jahre 2040 inflationsbereinigt etwa auf das 1,9fache ihres heutigen Niveaus ansteigen müssten. Bei einer durchschnittlichen Preissteigerungsrate von 2 % würde dies in etwa erfordern, dass die Kraftstoffpreise bis zum Jahre 2040 um jährlich knapp 10 ct/l angehoben werden, sodass sie im Jahre 2040 nominal eine Höhe von circa 4,70 €/l erreichen. An dieser Größenordnung wird deutlich, dass jeder Versuch, eine hinreichend starke Lenkungswirkung alleine über eine Erhöhung der Kraftstoffpreise zu erreichen, bereits aus Gründen der politischen Durchsetzbarkeit von vorn herein zum Scheitern verurteilt wäre. Deshalb ist zur Regulierung der verkehrsbedingten CO_2-Emissionen eine Kombination ökonomischer Instrumente erforderlich, bei der die Steuerung auf unterschiedliche Anknüpfungspunkte verteilt wird. Dabei entsteht allerdings ein Zielkonflikt: Je mehr verschiedene Instrumente zum Einsatz kommen, umso geringer muss die Eingriffsintensität bei jedem einzelnen Instrument sein und umso höher sind einerseits die politischen Durchsetzungschancen in Bezug auf jedes einzelne Instrument. Allerdings wächst andererseits mit der Anzahl der eingesetzten Instrumente auch die Gefahr, dass es zu Überschneidungen oder gar Widersprüchen kommt und damit Akzeptanz und Durchsetzbarkeit des Policy-Mix insgesamt in Mitleidenschaft gezogen werden (so bereits Wissenschaftlicher Beirat beim Bundesverkehrsministerium, 1992). Deshalb ist eine Kombination ökonomischer Instrumente erforderlich, die sich auf die wichtigsten Anknüpfungspunkte konzentriert und sowohl die Fahrzeughersteller als auch die Fahrzeughalter in die Pflicht nimmt. Dabei handelt es sich im Einzelnen um:

- eine Umwandlung der freiwilligen Selbstverpflichtung der europäischen Automobilindustrie in ein Emissionshandelssystem, das am Flottenverbrauch ansetzt,
- eine stärker als bisher an den CO_2-Emissionen orientierte Kraftfahrzeugsteuer,
- weitere Erhöhungsstufen der Öko-Steuer auf Otto- und Dieselkraftstoffe,
- eine Weiterentwicklung der zum 2. Januar 2005 in Deutschland in Kraft getretenen LKW-Maut,

– sowie gegebenenfalls die punktuelle Einführung von Straßennutzungsgebühren für PKW zur Entlastung von Ballungsräumen und/oder weiter gehende Maßnahmen der Parkraumbewirtschaftung.

Die nachfolgenden Ausführungen beschränken sich auf das Emissionshandelsmodell und die CO_2-orientierte Kraftfahrzeugsteuer, denn diese Vorschläge sind der Eingriffsebene "Maßnahmen an der Schadstoffquelle" zuzuordnen. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass Emissionshandel und CO_2-orientierte Kraftfahrzeugsteuer ihre volle Wirkung nur im Zusammenwirken mit den anderen oben genannten Maßnahmen entfalten können. Bezüglich dieser Maßnahmen, die der Eingriffsebene „Maßnahmen in der Verkehrslenkung“ zuzuordnen sind, sei auf den Originaltext des Sondergutachtens verwiesen (SRU, 2005).

4.1 Freiwillige Selbstverpflichtung der Automobilindustrie

Ausgangssituation

40. Die freiwillige Selbstverpflichtung der europäischen Automobilindustrie stellt neben fiskalischen Anreizen (CO_2-bezogene Kfz-Steuer) und Informationspflichten (Kennzeichnungsrichtlinie) den dritten Pfeiler der "Gemeinschaftsstrategie zur Minderung der CO_2-Emissionen von Personenkraftwagen" (EU-Kommission, 1995) dar. Dabei soll die freiwillige Selbstverpflichtung eine Senkung auf 140 g CO_2/km bis zum Jahre 2008 gewährleisten, während die restliche Verminderung um weitere 20 g CO_2/km durch die anderen beiden Pfeiler der Gemeinschaftsstrategie erreicht werden sollen.

41. Der Dachverband der europäischen Automobilindustrie (ACEA – s. Kasten) gab im Jahre 1998 nach mehrjährigen Verhandlungen die Selbstverpflichtung ab, bis zum Jahre 2003 eine PKW-Flotte mit einem durchschnittlichen CO_2-Emissionswert von 165 bis 170 g CO_2/km und bis zum Jahre 2008 eine PKW-Flotte mit einem durchschnittlichen CO_2-Emissionswert von 140 g CO_2/km anzubieten (letzteres entspricht einem Verbrauchsrückgang an Kraftstoffen um 25 % gegenüber 1995). Darüber hinaus wollen die europäischen Automobilhersteller das Potenzial einer weiter gehenden CO_2-Reduktion mit dem Ziel von 120 g CO_2/km (was einem Verbrauch von 5,16 l Ottokraftstoff bzw. 4,56 l Dieselkraftstoff pro 100 km entspricht) bis zum Jahre 2012 prüfen. Alle genannten Reduktionen beziehen sich auf den Durchschnitt der in der EU von den ACEA-Mitgliedsunternehmen verkauften PKW der Kategorie M1 (definiert in Annex I der Richtlinie des Rates 70/156/EEC).

Verbände der Automobilindustrie

ACEA (Association des Constructeurs Europeens d'Automobiles): BMW AG, DaimlerChrysler AG, Fiat S. p. A., Ford of Europe Inc., General Motors Europe AG, Porsche AG, PSA Peugeot Citroën, Renault SA, AB Volvo und Volkswagen AG.

KAMA (Korea Automobile Manufacturers Association): Daewoo Motor Co. Ltd., Hyundai Motor Company und Kia Motors Corporation.

JAMA (Japan Automobile Manufacturers Association): Daihatsu Motor Corporation Ltd., Fuji Heavy Industries Ltd. (Subaru), Honda motor Corporation Ltd., Isuzu Motors Ltd., Mazda Motor Corporation, Nissan Motor Corporation Ltd., Mitsubishi Corporation, Suzuki Motor Corporation und Toyota Motor Corporation.

42. Die Einhaltung dieser Selbstverpflichtung wurde seitens des Dachverbandes ACEA an die Erfüllung folgender Bedingungen gebunden:

- Zum Ersten muss eine hinreichend hohe Kraftstoffqualität zur Verfügung stehen, die die entsprechende Weiterentwicklung der Motortechnik zur Entfaltung bringt. Die EU-Kommission hat daraufhin 2001 einen Vorschlag zur Änderung der Richtlinie 98/70 vorgelegt (COM(2001)241), der am 5. März 2003 in die Richtlinie 2003/17/EG zur Änderung der Richtlinie 98/70/EG über die Qualität von Otto- und Dieselkraftstoffen mündete.
- Zum Zweiten sollen Nicht-ACEA-Mitglieder insbesondere aus Japan und Korea die gleichen Verpflichtungen eingehen, sodass die europäische Automobilindustrie keine Wettbewerbsnachteile durch Importe erleidet. Die EU-Kommission initiierte daraufhin 1998 ähnliche Selbstverpflichtungen mit den Vereinigungen der koreanischen und japanischen Automobilhersteller (KAMA und JAMA – s. Kasten). Als Zwischenziel wurde für JAMA ein durchschnittlicher CO_2-Emissionswert von 165 bis 170 g CO_2/km im Jahre 2003 festgeschrieben, mit den koreanischen Automobilherstellern wurde dieses Zwischenziel für das Jahr 2004 vereinbart. Der Zielwert von 140 g CO_2/km soll von beiden Verbänden im Jahre 2009 erreicht werden.
- Zum Dritten soll die EU-weite Verbreitung neuer Technologien im Fahrzeugbau nicht durch fiskalische oder andere politische Maßnahmen behindert werden. Darüber hinaus behält sich ACEA vor, die wirtschaftliche Entwicklung zu beobachten und bei ungünstiger Beschäftigungssituation oder Wettbewerbsverzerrungen Anpassungen des Reduktionsziels vorzunehmen.

Im Gegenzug behält sich die EU-Kommission vor, einen verbindlichen Rechtsrahmen zu erlassen, falls ACEA das Emissionsziel für 2008 nicht einhält oder keine hinreichenden Fortschritte bei der Annäherung an das Ziel erreicht werden. Dieser Rechtsrahmen wurde bisher jedoch noch nicht konkretisiert.

43. Um die Entwicklungen der in der Selbstverpflichtung enthaltenen Zusagen und die ihnen zugrunde liegenden Annahmen insbesondere bezüglich der wirtschaftlichen Entwicklung zu überwachen, vereinbarten die EU-Kommission und ACEA ein Monitoring, dessen Ergebnisse in die regelmäßigen Berichte der EU-Kommission einfließen. Die Hauptergebnisse des vierten Jahresberichts (EU-Kommission, 2004b) über den Zeitraum 1995 bis 2002 lauten:

- Unter Berücksichtigung *sämtlicher* Maßnahmen der EU und der Mitgliedstaaten ist der durchschnittliche spezifische CO_2-Ausstoß von Personenkraftwagen in der EU im Zeitraum 1995 bis 2002 von 186 g CO_2/km auf 166 g CO_2/km zurückgegangen. Nach offiziellen Daten der Mitgliedstaaten für das Jahr 2002 betrugen die durchschnittlichen spezifischen CO_2-Emissionen des PKW-Bestands 165 g CO_2/km bei ACEA, 174 g CO_2/km bei JAMA und 183 g CO_2/km bei KAMA. Den Statistiken von ACEA zufolge betrugen die spezifischen CO_2-Emissionen bei diesem Verband 163 g CO_2/km (ausführlich Tab. 3).
- Bei JAMA und ACEA sind gute Fortschritte zu verzeichnen, obwohl die Leistung von ACEA im Jahre 2002 geringer war als in den Vorjahren. ACEA hat jedoch bereits im Jahre 2000 das bis 2003 gesetzte Zwischenziel erreicht (EU-Kommission, 2002a) und befindet sich nun mit 165 g CO_2/km am untersten Ende dieses Zielbereichs. JAMA erreichte 2002 den Zwischenzielbereich. Die Fortschritte von KAMA sind noch immer unbefriedigend, wenngleich KAMA in den letzten zwei Jahren leicht aufgeholt hat.
- Um das Ziel der Selbstverpflichtungen von 140 g CO_2/km zu erreichen, bedarf es weiterer Bemühungen, da die durchschnittliche Minderungsrate aller drei Verbände gesteigert werden muss. Im Durchschnitt über den gesamten Zeitraum von 1995 bis 2008/09 muss die Minderungsrate bei rund 2 % oder etwa 3,5 g CO_2/km pro Jahr liegen. Da die tatsächliche jährliche Minderungsrate bisher weit unter diesem Wert lag, müssten die Vermeidungsanstregungen in den verbleibenden Jahren erheblich ausgeweitet werden, wenn das Ziel von 140 g CO_2/km bis 2008/09 noch erreicht werden soll. So müsste in den verbleibenden Jahren bis 2008/9 die Minderungsrate bei ACEA durchschnittlich 2,5 %, bei JAMA 2,8 % und bei KAMA 3,4 % betragen (EU-Kommission, 2002a).
- Um das – weiter gehende – Ziel der EU-Kommission, bei neu in der EU zugelassenen Personenkraftwagen bis zum Jahre 2005 (spätestens 2010) einen durchschnittlichen spezifischen CO_2-Ausstoß von 120 g CO_2/km zu erreichen, müssten die Emissionen auf EU-Ebene jährlich um durchschnittlich 3,5 % gesenkt werden. Das ist erheblich mehr, als von 1995 bis 2002 durchschnittlich erzielt wurde (ca. 1,5 %). Anfangs gingen ACEA und die EU-Kommission davon aus, dass die Minderungsrate mit der Zeit ansteigen würde. Nun ist jedoch die EU-Kommission

der Meinung, dass weitere Maßnahmen notwendig sind, um das Ziel bis 2010 zu erreichen.

Tabelle 3

Durchschnittliche spezifische CO_2-Emissionen neuer PKW der Jahre 1995 bis 2002 (Angaben der CO_2-Emissionen in g/km)

ACEA	**1995**	**1996**	**1997**	**1998**	**1999**	**2000**	**2001**(3)	**2002**(3)	**Änderung 95/02 (%)**(4)
Benzinfahrzeuge	188	186	183	182	180	177	172	172/171(5)	- 8,5/- 9,0 %(6)
Dieselfahrzeuge	176	174	172	167	161	157	153	155/152(5)	- 11.9/- 13.6 %(6)
Alle Kraftstoffe(1)	**185**	**183**	**180**	**178**	**174**	**169**	**165**	**165/163(5)**	**- 10,8/- 12,1(6)**
JAMA(2)	**1995**	**1996**	**1997**	**1998**	**1999**	**2000**	**2001**(3)	**2002**(3)	**Änderung 95/02 (%)**(4)
Benzinfahrzeuge	191	187	184	184	181	177	174	172	- 9.9 %
Dieselfahrzeuge	239	235	222	221	221	213	198	180	- 24,7 %
Alle Kraftstoffe(1)	**196**	**193**	**188**	**189**	**187**	**183**	**178**	**174**	**- 11,2 %**
KAMA(2)	**1995**	**1996**	**1997**	**1998**	**1999**	**2000**	**2001**(3)	**2002**(3)	**Änderung 95/02 (%)**(4)
Benzinfahrzeuge	195	197	201	198	189	185	179	178	- 8,7 %
Dieselfahrzeuge	309	274	246	248	253	245	234	203	- 34,3 %
Alle Kraftstoffe(1)	**197**	**199**	**203**	**202**	**194**	**191**	**187**	**183**	**- 7.1 %**
EU-15(2*)	**1995**	**1996**	**1997**	**1998**	**1999**	**2000**	**2001**(3)	**2002**(3)	**Änderung 95/02 (%)**(4)
Benzinfahrzeuge	189	186	184	182	180	178	173	172	- 9,0 %
Dieselfahrzeuge	179	178	175	171	165	163	156	157	- 12,3 %
Alle Kraftstoffe(1)	**186**	**184**	**182**	**180**	**176**	**172**	**167**	**166**	**- 10,8 %**

(1) Nur für Fahrzeuge mit Benzin- und Dieselmotoren; andere Kraftstoffe und statistisch nicht erfasste Fahrzeuge werden diese Durchschnittswerte voraussichtlich nicht wesentlich beeinflussen.

(2) Für 2002 wurden Statistiken der Mitgliedstaaten zugrunde gelegt. Bei der Veränderung 1995/2002 wurden Daten der Verbände für 1995 und Statistiken der Mitgliedstaaten für 2002 zugrunde gelegt.

(2*) Neue Personenkraftwagen, die von den Herstellern in der EU in Verkehr gebracht werden und nicht unter die Selbstverpflichtungen fallen, würden den EU-Durchschnitt nicht maßgebend beeinflussen.

(3) Die Zahlen für 2001 und 2002 wurden um 0,7 % korrigiert, um der Veränderung des Fahrzyklus' Rechnung zu tragen.

(4) Die Prozentsätze wurden aus ungerundeten CO_2-Zahlen ermittelt. Für 2002 wurden Statistiken der Mitgliedstaaten zugrunde gelegt.

(5) Die erste Zahlenangabe basiert auf Daten der Mitgliedstaaten, die zweite auf Daten von ACEA.

(6) Die erste Zahlenangabe basiert auf Daten der Mitgliedstaaten für 2002 und Daten von ACEA für 1995, die zweite ausschließlich auf Daten von ACEA.

Quelle: EU-Kommission, 2004b, S. 6

Bewertung

44. Der SRU hat sich in der Vergangenheit bereits mehrfach mit den vielfältigen Problemen freiwilliger Selbstverpflichtungen auseinander gesetzt und einen vorsichtigen, eher restriktiven Einsatz dieses Instruments empfohlen (SRU, 2004, Kap. 13; SRU, 2002a, Tz. 446 ff.; SRU, 1998, Tz. 276 ff.). Dabei wurde insbesondere bemängelt, dass freiwillige Selbstverpflichtungen auf Verbandsebene aufgrund der fehlenden Durchsetzungsmacht des Verbandes gegenüber seinen Mitgliedsunternehmen und dem daraus resultierenden Trittbrettfahrerproblem in der Regel nur die Verfolgung sehr anspruchsloser Zielsetzungen erlauben, die kaum über die business-as-usual-Entwicklung hinausgehen. Des Weiteren wurde gefordert, freiwillige Selbstverpflichtungen durch einen wirksamen Sanktionsmechanismus für den Fall ihres Scheiterns zu flankieren. In Bezug auf diese beiden Punkte weist auch die freiwillige Selbstverpflichtung der europäischen Automobilindustrie gravierende Schwächen auf.

45. Obgleich der Dachverband der europäischen Automobilhersteller einen hohen Organisationsgrad und eine vergleichsweise geringe Mitgliederzahl aufweist, ist das Trittbrettfahrerproblem mit seinen negativen Auswirkungen auf die Zielerreichung und die Wettbewerbssituation keineswegs ausgeräumt: So teilte ACEA am 30. April 2002 der EU-Kommission mit, dass der Automobilhersteller Rover aus dem Verband ausgeschieden ist. Zwar erreicht Rover derzeit nur einen Marktanteil von etwa 1 % der in der Europäischen Union verkauften PKW (VDA, 2002), jedoch könnte das Ausscheiden von Rover insbesondere bei wirtschaftlich ungünstiger Entwicklung weitere PKW-Hersteller veranlassen, aus dem Verbund auszuscheren. Auch existiert zwischen den ACEA-Mitgliedern keine explizite Lastenverteilung. Das heißt, es bleibt jedem Mitgliedsunternehmen selbst überlassen, in welchem Umfang es zur Zielerreichung beitragen möchte. Da dieser vollkommen ungesteuerte Prozess kaum zu einem Ausgleich der Grenzvermeidungskosten zwischen den einzelnen Automobilherstellern führen dürfte, wird das Reduktionsziel nicht zu minimalen Kosten erreicht. Somit ist eine effiziente Lösung nicht zu erwarten (ZERLE, 2004, S. 76 ff.). In diesem Zusammenhang ist auch zu kritisieren, dass im Monitoring weder von ACEA noch von der EU-Kommission (entgegen der ursprünglichen Ankündigung (EU-Kommission, 1998)) die Reduktionsleistungen der einzelnen Automobilhersteller veröffentlicht werden (KÅGESON, 2005). Diese bewusst gewollte Intransparenz verhindert, dass das 'ökologische Engagement' des einzelnen Automobilherstellers in Form erbrachter Reduktionsleistungen nicht in das Nachfrageverhalten potenzieller Käufer einfließen kann.

46. Das gesteckte Ziel der Selbstverpflichtung bleibt deutlich hinter dem technisch Machbaren zurück. Für das Jahr 2010 wäre aus technologischer Sicht in etwa eine

Halbierung des durchschnittlichen Verbrauchs von Neuwagen des Jahres 1990 erreichbar. Eine solche Halbierung des Kraftstoffverbrauchs könnte gemäß der Studie "Flottenverbrauch 2010" zu rund 60 % durch rein technische Einsparmaßnahmen und zu 40 % durch Verschiebung der Marktsegmente (PKW, Geländewagen, Vans etc.) erreicht werden (MEHLIN et al., 2002). Auch andere Studien belegen, dass eine Reduktion des durchschnittlichen Kraftstoffverbrauchs von 40 bis 50 % mit vorhandenen Technologien von Mitte der 1990er-Jahre bis zum Jahre 2010 möglich ist (KEAY-BRIGHT, 2000).

Das Reduktionsziel der ACEA-Selbstverpflichtung liegt im Korridor der allgemeinen Verbrauchentwicklung der VDA-Flotte der 1990er-Jahre (ZERLE, 2004, S. 76 ff.). Insofern muss davon ausgegangen werden, dass die erreichte Verbrauchssenkung durch die bereits bestehenden Anreize initiiert wurde und die Selbstverpflichtung keine darüber hinausgehenden Verbrauchsreduktionen verursacht. Somit wurde 1998 das Reduktionsziel der Selbstverpflichtung im Korridor des business-as-usual festgelegt. Dadurch ist jedoch noch nicht garantiert, dass damit das Ziel erreicht wird. Der in den letzten Jahren zunehmende Nachfragetrend nach höherer Motorleistung und nach Ausstattungen, die sowohl das Fahrzeuggewicht als auch den Kraftstoffverbrauch erhöhen (Tz. 12), wirken einer gesicherten Zielerreichung entgegen (ACEA und Dienststellen der Kommission, 2003, S. 6; Arthur D. Little, 2003). ACEA selbst erkennt die Verfügbarkeit der Technik zur CO_2-Reduktion, sieht aber den Nachfragetrend hin zu größeren Fahrzeugen mit höheren Kraftstoffverbräuchen, den die Automobilhersteller zu bedienen versuchen. So stieg die Zahl der europäischen Automobilhersteller, die die verbrauchsstarken "Sport Utility Vehicles" (SUV) anbieten, von zwei im Jahre 1995 auf sieben im Jahre 2004 (KÅGESON, 2005, S. 20 f.). Der grundlegende Fehler in der Ausgestaltung der Selbstverpflichtung liegt darin, dass ACEA als zu erfüllender Partner der Selbstverpflichtung nur bedingt Einfluss auf die Erreichung der Zielgröße von 140 g CO_2/km hat (ZERLE, 2004, S. 81 f.). Zum einen kann ACEA als Verband den einzelnen Automobilherstellern nicht den CO2-Ausstoß ihrer Modelle vorschreiben; zum anderen entscheiden letztendlich die PKW-Käufer über den durchschnittlichen CO2-Ausstoß der in der EU *verkauften* PKW. Somit sind letztendlich die PKW-Käufer die Normerfüllenden, ACEA ist jedoch gemäß der Selbstverpflichtung der Normadressat. Selbst wenn die Automobilhersteller eine geeignete PKW-Flotte auf dem Markt anböten, ist dadurch nicht gewährleistet, dass auch diejenigen Fahrzeuge nachgefragt werden, die in ihrer Gesamtheit die Zielgröße erfüllen. Obwohl die technische Machbarkeit keinen Engpass darstellt und die Zielgröße aus technischer Sicht im Bereich des business-as-usual-Niveaus liegt, sind bis 2008 noch erhebliche Reduktionen zu erbringen. Dazu muss die bisherige durchschnittliche jährliche Reduktionsrate von 3 g CO_2/km (1,7 %) auf jährlich 4 g CO_2/km (2,5 %) gesteigert werden (EU-Kommission, 2004b). Die

Selbstverpflichtung scheint jedoch ungeeignet, diese weiter gehende Verbrauchsenkung zu initiieren. Insbesondere vor dem Hintergrund, dass die Selbstverpflichtung auf das Nachfrageverhalten und damit auf die Beschaffenheit der tatsächlich verkauften PKW-Flotte nur indirekten Einfluss hat. Insofern ist auch eine weiter gehende Verbrauchsreduktion mit dem Ziel von 120 g CO_2/km bis zum Jahre 2012 nur durch alternative Instrumente zu erreichen, welche die Inkongruenz von Normadressat und –erfüllenden beseitigen.

47. In der Selbstverpflichtung wurde für das Jahr 2003 eine Überprüfung einer weiter gehenden CO_2-Reduktion mit dem Ziel von 120 g CO_2/km bis zum Jahre 2012 vereinbart. Dazu ist 2003 eine Studie erschienen, die von ACEA in Auftrag gegeben wurde und in der die Auswirkungen einer weiter gehenden CO_2-Reduktion von 120 g CO_2/km bis zum Jahre 2012 untersucht wurden (Arthur D. Little, 2003). Darin wurden Zusatzkosten von durchschnittlich 4 000 Euro pro Fahrzeug ermittelt, die bei einer weiteren Reduktion über die gesamte Fahrzeugflotte um 20 g CO_2/km auf 120 g CO_2/km anfällt. ACEA befürchtet bei derart hohen zusätzlichen Kosten pro Fahrzeug eine erhebliche Verschlechterung der Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Automobilhersteller verbunden mit Arbeitplatzabbau und Schließungen von Produktionsstätten.

Der SRU erachtet die von ACEA angeführten Hinderungsgründe einer weiter gehenden CO_2-Reduktion als nicht stichhaltig. Drohende Wettbewerbsnachteile aufgrund einer Verteuerung der Fahrzeuge mit geringerem CO_2-Ausstoß und damit geringerem Kraftstoffverbrauch erscheinen aus zwei Gründen vernachlässigbar: Zum einen haben JAMA und KAMA durch ihre Selbstverpflichtungen auf dem europäischen Markt keine Wettbewerbsvorteile. Auf anderen Märkten wie bspw. auf dem US-Markt werden ohnehin Fahrzeuge angeboten, die insbesondere hinsichtlich der Motoreigenschaften auf die Bedürfnisse der dortigen Nachfrager abgestimmt sind. Sieht ACEA dennoch die Gefahr der Vorteilsnahme durch das Freifahrerverhalten einiger Automobilhersteller, muss ACEA konsequenterweise von dem Instrument der Selbstverpflichtung als solchem Abstand nehmen und für alle Hersteller verbindliche Regelungen fordern. Weiterhin bieten CO_2-arme und damit Kraftstoff sparende Fahrzeuge in Zeiten lang anhaltender hoher Kraftstoffpreise sogar einen Wettbewerbsvorteil gegenüber Fahrzeugen mit höherem Kraftstoffverbrauch.

In der Modellrechnung der Studie von Arthur D. Little (2003), in welcher zusätzliche Kosten von durchschnittlich 4 000 Euro pro Fahrzeug ermittelt wurden um das 120 g CO_2/km-Ziel zu erreichen, wurde von Vermeidungskosten ausgegangen, die anfangs bei 50 €/t CO_2 liegen und bis auf 900 €/t CO_2 ansteigen. In der Gemeinschaftsstudie von EUCAR (European Council for Automotive Research and Development), CONCAWE (Conservation of Clean Air and Water in Western Europe)

und dem Joint Research Centre der EU-Kommission wurden dagegen bei konventionellen Technologien Vermeidungskosten von 200 €/t CO_2 bis 400 €/t CO_2 ermittelt (CONCAWE et al., 2004), wodurch die zusätzlichen Kosten weit unter den von ACEA angeführten Kosten von 4 000 Euro pro Fahrzeug liegen dürften. Um diesen unterschiedlichen Vermeidungskosten auch im Hinblick auf andere emittierende Sektoren unter Effizienzgesichtspunkten Rechnung zu tragen, sollte der CO_2-Ausstoß des motorisierten Individualverkehrs in einem einheitlichen europaweiten CO_2-Emissionshandel reguliert werden (MICHAELIS, 2004). Damit lassen sich die mit der Selbstverpflichtung verfolgten Ziele sicherer und zu geringeren Kosten realisieren.

4.2 Emissionshandel

48. Da der Straßenverkehr in der Europäischen Union über 20 % der CO_2-Emissionen verursacht und unter allen emittierenden Sektoren die größten Zuwachsraten aufweist (EU-Kommission, 2002b), erscheint es sowohl unter Effizienz- als auch unter Effektivitätsüberlegungen sinnvoll, den Straßenverkehr direkt oder indirekt in den Emissionshandel einzubeziehen. In der Literatur finden sich bereits seit Beginn der achtziger Jahre vielfältige Vorschläge hierzu (zu einem Überblick vgl. JUNKERNHEINRICH, 1998). Dabei lassen sich grundsätzlich drei verschiedene Ansatzpunkte unterscheiden: Fahrzeughalter, Kraftstoffhandel und Fahrzeughersteller.

49. Im Rahmen eines Emissionshandelssystems, das direkt bei den Fahrzeughaltern ansetzt, würde jedem Fahrzeughalter ein jährliches Kontingent an Kraftstoff bzw. CO_2-Emissionsrechten zugeteilt, wobei überschüssige Mengen frei handelbar wären. Ein solcher Ansatz würde jedoch bei circa 30 Millionen Fahrzeughaltern in Deutschland (KBA, 2003) zu erheblichen Transaktionskosten führen (DEUBER, 2002, S. 53; KNIESTEDT, 1999, S. 156 ff.). Auch wäre die Festlegung eines geeigneten Zuteilungsschlüssels mit erheblichen Problemen verbunden. Hinzu kommt, dass eine Kontingentierung des Kraftstoffverbrauchs von denjenigen Kreisen, die eine solche Regelung verhindern möchten, leicht als ein an Kriegszeiten erinnerndes System von "Bezugsscheinen" diskreditiert werden könnte, wodurch erhebliche Akzeptanzprobleme zu erwarten wären. Ein Emissionshandel, der direkt bei den Fahrzeughaltern ansetzt, scheidet deshalb aus der folgenden Betrachtung aus.

50. Bei der Wahl zwischen den beiden verbleibenden Ansatzpunkten Kraftstoffhandel und Fahrzeughersteller ist zunächst zu beachten, dass die CO_2-Emissionen des Straßenverkehrs im Wesentlichen von zwei Faktoren abhängen, nämlich vom Fahrverhalten der Fahrzeugnutzer und von der Energieeffizienz der eingesetzten Fahrzeuge. Jegliche Strategie zur Reduzierung der CO_2-Emissionen des Straßenverkehrs sollte zur Entfaltung einer umfassenden Steuerungswirkung

idealerweise beide Anknüpfungspunkte berücksichtigen. Es ist somit eine Instrumentenkombination erforderlich, die sowohl auf die Fahrzeugnutzer als auch auf die Fahrzeughersteller Einfluss nimmt.

51. Ein Emissionshandelssystem, das auf der ersten Stufe des Kraftstoffhandels ansetzt ("Kraftstoff-Ansatz"), wie jüngst auch von BERGMANN et al. (2005) vorgeschlagen, wäre zwar unter dem Aspekt der Transaktionskosten von Vorteil, würde sich aber aufgrund der induzierten Überwälzungsprozesse auf der Ebene der Endverbraucher (Fahrzeughalter) lediglich wie eine Preiserhöhung auf Kraftstoffe auswirken. Da eine "Doppelbesteuerung" von Kraftstoffen im Rahmen der Ökosteuer einerseits und eines wirkungsgleichen Emissionshandels andererseits weder inhaltlich gerechtfertigt noch den Nachfragern gegenüber zu vertreten wäre, würde ein Emissionshandelssystem, das beim Kraftstoffhandel ansetzt, die Ökosteuer auf Kraftstoffe nicht ergänzen sondern ersetzen. Hierdurch ließe sich jedoch keinerlei Lenkungswirkung erzielen, die über die Lenkungswirkung der Ökosteuer hinausginge. Der einzige Vorteil im Vergleich zur bisher eingesetzten Ökosteuer bestünde darin, dass ein solcher Emissionshandel die punktgenaue Realisierung des für den Straßenverkehr vorgesehenen Emissionsziels gewährleistet. Demgegenüber hätten jedoch die Fahrzeughersteller selbst keinen unmittelbaren Anreiz die Energieeffizienz der Fahrzeuge zu erhöhen. Lediglich wäre - wie im Rahmen der bisherigen Ökosteuer auch - zu erwarten, dass die Fahrzeughalter aufgrund der erhöhten Kraftstoffpreise verstärkt verbrauchsärmere Fahrzeuge nachfragen. Diese indirekte Wirkung auf die Fahrzeughersteller verursacht jedoch keine hinreichend starken Anreize, die Energieeffizienz der Fahrzeuge zu erhöhen (HOHENSTEIN et al., 2002, S. 31; DEUBER, 2002, S. 53). Dies begründet sich zum einen mit der vergleichsweise geringen Preiselastizität der Kraftstoffnachfrage (vgl. Tz. 38 f.) und zum anderen damit, dass der spezifische Kraftstoffverbrauch nur einer von vielen Faktoren ist, die die Nachfrageentscheidung der Käufer beeinflussen. Einige dieser Faktoren, wie etwa Sicherheit und Prestige, sprechen eher für ein hohes Gewicht und eine starke Motorisierung, also einen hohen Kraftstoffverbrauch. Diese Auffassung wird gestützt durch die jüngste Umfrage der Deutschen Automobil Treuhand (2004, S. 42), nach der trotz der zwischenzeitlich stark gestiegenen Kraftstoffpreise nur 10 % aller Fahrzeughalter angeben, dass ihr nächstes Fahrzeug eine schwächere Motorisierung aufweisen sollte, während 29 % zukünftig eine stärkere Motorisierung wünschen. Ein Emissionshandelssystem im Sinne des Kraftstoff-Ansatzes würde folglich nicht ausreichen, um die im Fahrzeugbau noch vorhandenen Potenziale für eine Steigerung der Energieeffizienz auszuschöpfen. Gegenüber der bisherigen Ökosteuer hätte ein solches System mit Ausnahme der höheren Zielgenauigkeit keine Vorteile.

52. Ein dritter möglicher Anknüpfungspunkt für einen Emissionshandel im Verkehrsbereich, der kürzlich durch das niederländische Umweltministerium auch in

die politische Diskussion auf EU-Ebene eingebracht wurde (Ends Daily, 17.09.2004), besteht bei den Fahrzeugherstellern. Im Rahmen dieses "Hersteller-Ansatzes" erfolgt eine Lizenzierung der CO_2-Flottenemissionen der von den einzelnen Herstellern während einer Abrechnungsperiode innerhalb der EU auf den Markt gebrachten Fahrzeuge. Auf diese Weise lassen sich die über alle Hersteller aggregierten Flottenemissionen jährlich um einen vorgegebenen Prozentsatz reduzieren, wobei die Handelbarkeit der Emissionsrechte zugleich sicher stellt, dass die Emissions- bzw. Verbrauchsreduzierungen bei denjenigen Herstellern stattfinden, bei denen dies zu den geringsten Kosten möglich ist.

Anders als der oben beschriebene Kraftstoff-Ansatz stellt der Hersteller-Ansatz keine Alternative, sondern eine Ergänzung zur Ökosteuer dar. Im Rahmen einer solchen Instrumentenkombination würde die Ökosteuer direkt bei den Kraftfahrern ansetzen und deren Fahrverhalten beeinflussen, während der Emissionshandel bei den Fahrzeugherstellern ansetzt und den spezifischen Kraftstoffverbrauch bzw. die spezifischen CO_2-Emissionen der Fahrzeuge beeinflusst. Diese Instrumentenkombination ist nach Einschätzung des SRU aufgrund ihrer Wirkungsbreite gegenüber einer Ablösung (oder Ergänzung) der Ökosteuer durch einen Emissionshandel im Sinne des Kraftstoff-Ansatzes vorzuziehen. Dabei ist dem SRU bewusst, dass der Hersteller-Ansatz gegenüber dem Kraftstoff-Ansatz den Nachteil einer geringeren Zielgenauigkeit in Bezug auf letztendlich resultierende Emissionen besitzt (Tz. 58) und möglicherweise auch zu höheren Transaktionskosten führen würde. Diese Nachteile erscheinen jedoch vertretbar vor dem Hintergrund, dass durch den Hersteller-Ansatz direkte Anreize zur Entwicklung verbrauchsärmerer Fahrzeuge gesetzt werden können, sodass dieser Ansatz ein deutlich höheres Innovationspotenzial aufweist, während der Kraftstoffansatz lediglich die Lenkungswirkung der ohnehin bereits eingesetzten Ökosteuer repliziert. Hinzu kommt, dass das Kriterium der Zielgenauigkeit insbesondere in Anbetracht der Erfahrungen mit der Festlegung des nationalen Allokationsplans für den EU-weiten Lizenzhandel zwischen stationären Großemittenten (SRU, 2004) nicht überbewertet werden sollte. Die exakte Realisierung eines Emissionsziels, das zuvor auf der politischen Ebene bereits in zweifelhafter Weise festgelegt wurde, ist kaum geeignet, das ausschlaggebende Kriterium bei der umweltpolitischen Instrumentenwahl darzustellen.

53. Gegenüber der bisherigen Selbstverpflichtung der Automobilindustrie hat ein Emissionshandel, der an den CO_2-Flottenemissionen anknüpft, zwei entscheidende Vorteile in Bezug auf ökologische Effektivität und ökonomische Effizienz:

- Wie in Kapitel 4.1 bereits dargestellt, ist die freiwillige Selbstverpflichtung der Automobilhersteller an vielfältige Klauseln und Konditionen geknüpft, sodass eine Lockerung oder Rücknahme der vereinbarten Ziele durchaus möglich erscheint.

Demgegenüber ergäben sich durch die strikten Mengenvorgaben im Rahmen des Emissionshandels transparentere und langfristig stabilere Rahmenbedingungen, die entsprechende Innovationsaktivitäten seitens der betroffenen Fahrzeughersteller begünstigen.

– Ebenfalls wurde in Kapitel 4.1 bereits darauf hingewiesen, dass die Lastenverteilung zwischen den einzelnen Herstellern im Rahmen der derzeitigen Selbstverpflichtung weitgehend ungeklärt ist, sodass eine effiziente Lösung kaum erwartet werden kann. Demgegenüber würde die Handelbarkeit der Emissionsrechte gewährleisten, dass die erforderlichen Minderungen der spezifischen CO_2-Emissionen sich in einer insgesamt Kosten minimierenden Weise auf die einzelnen Automobilhersteller verteilen.

54. Als mögliche Anpassungsstrategien an einen Emissionshandel, der an den Flottenemissionen ansetzt, stehen der Automobilindustrie neben dem Erwerb von Emissionsrechten im Wesentlichen drei Optionen zur Verfügung, die auch in Kombination angewendet werden können (zum Folgenden vgl. DEUBER, 2002, S. 84 ff.). Diese umfassen die Entwicklung neuer Technologien zur Senkung der spezifischen CO_2-Emissionen, eine Umstrukturierung der angebotenen Produktpalette hin zu kleineren und damit emissionsärmeren Fahrzeugen ("Downsizing") sowie Marketinganstrengungen zur Förderung des Absatzes kleinerer und damit emissionsärmerer Fahrzeuge. Insbesondere die letzte dieser drei Strategien verspricht in der längerfristigen Sicht eine weitaus stärkere Wirkung als es möglicherweise auf den ersten Blick erscheinen könnte. Denn die gegenwärtige Einstellung der Bevölkerung zum motorisierten Individualverkehr insgesamt wird maßgeblich mitgeprägt durch die Marketingstrategien der Automobilhersteller. Sofern es hier zu einem Strategiewechsel kommt, in dessen Rahmen ökologische Aspekte deutlich stärker betont werden, könnte dies insbesondere im Zusammenwirken mit dem vom SRU geforderten Tempolimit (vgl. SRU, 2005, Kap. 9.3) einen bedeutenden Beitrag dazu leisten, die gegenwärtig in Teilen der Bevölkerung noch vorherrschende "PS-Mentalität" zu überwinden.

55. Bis zur Einführung eines Emissionshandels, der an den CO_2-Flottenemissionen der Fahrzeughersteller ansetzt, wären noch zahlreiche Gestaltungsfragen zu lösen. Jedoch stehen teilweise bereits umfangreiche Vorarbeiten zur Verfügung, auf die zurückgegriffen werden könnte (insbesondere DEUBER, 2002; HOHENSTEIN et al., 2002; KNIESTEDT, 1999). Die hierbei im Wesentlichen zu klärenden Fragen beziehen sich auf die vom Emissionshandel erfassten Fahrzeugtypen, die Bestimmung der Bemessungsgrundlage, die Festlegung der Flottenemissionsstandards für die einzelnen Hersteller und ihre Verschärfung im Zeitverlauf sowie die mögliche Verbindung mit dem sektoralisierten Emissionshandel zwischen stationären

Großemittenten gemäß EU-Richtlinie und die Wechselwirkungen mit anderen umweltpolitischen Instrumenten. Vor dem Hintergrund der Erfahrungen mit der Umsetzung der Europäischen Richtlinie zum Emissionshandel verdient darüber hinaus die politische Durchsetzbarkeit eines solchen Systems besondere Beachtung.

Erfasste Fahrzeugtypen

56. In Bezug auf die erfassten Fahrzeugtypen ist vor allem zu entscheiden, ob neben PKW auch LKW in das System des Emissionshandels einbezogen werden sollten. Anders als im PKW-Bereich gilt für den LKW-Bereich, dass der Kraftstoffverbrauch aus wirtschaftlichen Überlegungen neben der Verfügbarkeit eines europaweiten Service-Netzes den dominierenden Faktor bei der Nachfrageentscheidung darstellt. In Bezug auf den LKW-Markt kann folglich davon ausgegangen werden, dass alleine von steigenden Kraftstoffpreisen bereits ein deutlich stärkerer Nachfrageimpuls in Richtung auf eine Steigerung der Energieeffizienz ausgeht (z. B. ALBRECHT, 2000, S. 397). Hinzu kommt, dass im LKW-Bereich im Vergleich zum PKW-Bereich nur noch geringere Spielräume für eine Steigerung der Energieeffizienz bestehen. Dies liegt insbesondere daran, dass durch Gewichtsreduktionen am Fahrzeug nur ein geringerer Einsparungseffekt als bei PKW erzielt werden kann, weil im LKW-Bereich das Gewicht der zu transportierenden Fracht dominiert (ALBRECHT, 2000, S. 397). Die in der Literatur (LEONARDI et al., 2004) berichteten Spielräume zur Erhöhung der Energieeffizienz im Straßengüterverkehr beziehen sich nicht auf die Verbrauchsmerkmale der eingesetzten LKW, sondern auf entsprechende Logistik-Konzepte. Aus diesen Gründen erscheint es aus pragmatischen Erwägungen sinnvoll, den Emissionshandel zunächst auf den Bereich der PKW zu beschränken. Längerfristig sollte jedoch auch eine Einbeziehung des LKW-Bereichs in Betracht gezogen werden.

Bestimmung der Bemessungsgrundlage

57. Die in der Literatur diskutierten Ausgestaltungsmerkmale für den Emissionshandel sehen ein Baseline-and-Credit-System vor, bei dem den verschiedenen Herstellern ein (aus historischen Daten abgeleiteter) Flottenemissionsstandard für die CO_2-Emissionen der im Abrechnungszeitraum innerhalb der EU auf den Markt gebrachten Fahrzeuge vorgegeben wird. Unterschreitet ein Hersteller seinen Flottenemissionsstandard, so erhält er in entsprechendem Umfang Emissionsrechte zugeteilt. Überschreitet er den Standard, so muss er Emissionsrechte in entsprechendem Umfang erwerben. Als Bemessungsgrundlage können hierbei entweder die spezifischen oder die (geschätzten) absoluten CO_2-Emissionen der Fahrzeuge herangezogen werden. Im erstgenannten Fall würde ein spezifischer Grenzwert in g CO_2/km vorgegeben, der von

den im Berechnungszeitraum abgesetzten Fahrzeugen im Durchschnitt eingehalten werden muss. Wird dieser Durchschnittswert unterschritten, so wird die auf Basis der geschätzten Gesamtfahrleistung der Fahrzeuge eingesparte Menge an CO_2-Emissionen berechnet und dem Hersteller werden entsprechende Emissionsrechte zugeteilt. Im umgekehrten Fall müssen entsprechende Emissionsrechte erworben werden. Kritisch ist an diesem Ansatz zu beurteilen, dass er keine Begrenzung der absoluten Emissionsmengen erlaubt. So können die absoluten CO_2-Emissionen selbst bei sinkenden spezifischen Emissionen und konstanter Gesamtfahrleistung steigen, wenn der Motorisierungsgrad der Bevölkerung entsprechend zunimmt. Dem ließe sich zwar entgegenhalten, dass der PKW-Markt in Deutschland und vergleichbaren EU-Staaten bereits weitgehend gesättigt ist. Dies gilt jedoch nicht für die gesamte EU. Insbesondere in den neuen EU-Mitgliedstaaten und Beitrittstaaten ist noch von einem erheblichen Nachholbedarf auszugehen.

58. Aufgrund der oben genannten Probleme ist nach Einschätzung des SRU ein System vorzuziehen, bei dem die absoluten CO_2-Emissionen als Bemessungsgrundlage dienen. In diesem Fall würde den einzelnen Herstellern im Rahmen der Flottenemissionsstandards vorgegeben, welche Menge an CO_2 die in der Abrechnungsperiode innerhalb der EU abgesetzten Fahrzeuge während ihrer voraussichtlichen Lebensdauer emittieren dürfen. Zur Berechnung der während der Lebensdauer eines Fahrzeugs verursachten CO_2-Emissionen ist hierbei der jeweilige spezifische Emissionswert in g CO_2/km mit der geschätzten Gesamtfahrleistung zu multiplizieren. DEUBER (2002) schlägt vor, hierbei pauschal von einer Gesamtfahrleistung von 200 000 km auszugehen. Um eventuelle Abweichungen zwischen den so prognostizierten und den tatsächlichen CO_2-Emissionen während der Lebensdauer des Fahrzeugs so gering wie möglich zu halten, würde es sich jedoch anbieten, verschiedene Größenklassen mit unterschiedlicher angenommener Gesamtfahrleistung zu bilden, denn großmotorige Fahrzeuge erbringen während ihrer Lebensdauer in der Regel eine deutlich höhere Fahrleistung als kleinmotorige Fahrzeuge. Eine weitere in diesem Zusammenhang nahe liegende Differenzierung besteht zwischen Fahrzeugen mit Ottomotor und Fahrzeugen mit Dieselmotor.

Bei der Festlegung des jeweils anzuwenden spezifischen Emissionswertes ist zu beachten, dass Kraftstoffverbrauch und CO_2-Emissionen von PKW derzeit nach EU-Richtlinie 93/116/EWG im Rahmen eines Verfahrens bestimmt werden, das die Auswirkungen leistungsintensiver Nebenaggregate (z.B. Klimaanlagen) nicht berücksichtigt und deshalb zu einer Unterschätzung der spezifischen CO_2-Emissionen führt. Die mit dem erforderlichen Übergang zu realitätsnäheren Messvorschriften verbundenen Transaktionskosten können allerdings nicht dem hier vorgeschlagenen Emissionshandel angelastet werden, denn die gegenwärtigen Messvorschriften bedürfen aus dem oben genannten Grund ohnehin dringend einer Revision.

Werden die absoluten CO_2-Emissionen in der oben vorgeschlagenen Weise als Bemessungsgrundlage gewählt, so hätte dies zur Folge, dass ein Fahrzeughersteller, der seine Verkaufszahlen erhöht, dies durch eine zusätzliche Senkung der spezifischen CO_2-Emissionen kompensieren oder zusätzliche Emissionsrechte hinzu kaufen müsste. Hierdurch könnte sich eine indirekte Beschränkung des PKW-Absatzes insgesamt ergeben, die in Anbetracht der wirtschaftlichen Bedeutung dieses Sektors problematisch sein könnte. Wie sich jedoch unten noch zeigen wird, kann eine beschränkende Wirkung auf den PKW-Absatz insgesamt auch bei Anknüpfung an die absoluten CO_2-Emissionen vermieden werden, wenn der Emissionshandel zwischen den Fahrzeugherstellern mit dem sektoralisierten Emissionshandel zwischen stationären Großemittenten gemäß EU-Richtlinie verknüpft wird.

59. Ein besonderes Problem bei der Bestimmung der Bemessungsgrundlage, das auch in den bereits vorliegenden Vorarbeiten noch nicht berücksichtigt wurde (DEUBER, 2002; HOHENSTEIN et al., 2002; KNIESTEDT, 1999), besteht in der Behandlung alternativer Antriebsarten, bei denen die CO_2-Emissionen im Vergleich zu herkömmlichen Otto- oder Dieselmotoren ganz oder teilweise auf vorgelagerte Produktionsstufen verlagert werden. Dies betrifft Fahrzeuge mit Erdgas- oder Elektroantrieb sowie in der längerfristigen Perspektive auch die Kombination aus Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie. Würde sich bei solchen Fahrzeugen die Bemessungsgrundlage ausschließlich an den im Fahrbetrieb verursachten Emissionen orientieren, so würden diese Fahrzeuge unangemessen begünstigt und zugleich würde die Fortentwicklung konventioneller Otto- und Dieselantriebe zumindest teilweise behindert. Zur Vermeidung derartiger Verzerrungen erscheint es sachgerecht, bei der Bestimmung der Bemessungsgrundlage einen pauschalen Aufschlag auf die durch den Fahrbetrieb selbst verursachten CO_2-Emissionen vorzunehmen. Dabei wäre der im Einzelfall anzuwendenden Aufschlag im Rahmen entsprechender Ökobilanzen bzw. Well-to-Wheel-Analysen noch näher zu bestimmen (vgl. SRU, 2005, Kap. 7.4).

Festlegung der Flottenemissionsstandards

60. Eine weitere Gestaltungsaufgabe betrifft die Frage, auf welcher Basis die Flottenemissionsstandards für die einzelnen Fahrzeughersteller festgelegt werden sollen. Dies entspricht dem Problem der Erstallokation bei kostenloser Zuteilung unter einem klassischen Handelsregime ("Cap and Trade"), bei dem die Emittenten für jede emittierte Schadstoffeinheit ein entsprechendes Emissionsrecht vorhalten müssen (HEISTER et al., 1990, S. 104 ff.). Wie dort stellt sich auch hier das analoge Problem, welche Emissionsmenge den betroffenen Fahrzeugherstellern als kostenfreie Baseline zuzubilligen ist. Um Anpassungsprobleme einerseits und Manipulationsmöglichkeiten andererseits zu vermeiden und um eventuellen jährlichen Schwankungen in der Produktpalette bzw. beim Absatz gerecht zu werden, sollte sich der jeweilige Flottenemissionsstandard bei Einführung des Systems am Durchschnitt der Flottenemissionen der in den letzten drei Jahren vor Einführung des Systems abgesetzten Fahrzeuge orientieren (ähnlich KNIESTEDT, 1999, S. 179). Für eventuell neu am Markt auftretende Fahrzeuganbieter, bei denen auf keine historischen Daten zurückgegriffen werden kann, wäre dagegen ein Flottenemissionsstandard in Anlehnung an den "Stand der Technik" festzulegen (DEUBER, 2002, S. 74).

Nach Einführung des Systems sind die Flottenemissionsstandards jährlich nach einem verbindlich vorgegebenen Zeitplan um einen bestimmten Prozentsatz zu reduzieren. Dabei impliziert die prozentuale Reduzierung, dass die Hersteller großer Fahrzeuge in der absoluten Betrachtung stärkere Reduzierungsbemühungen aufwenden müssen als die Hersteller kleiner Fahrzeuge. Dies ist jedoch insofern gerechtfertigt, als die Reduktionspotenziale bei größeren Fahrzeugen auch entsprechend höher sind (JORDAN-JOERGENSEN et al., 2002, S. 62).

Der Prozentsatz, um den die Flottenemissionsstandards jährlich reduziert werden, sollte spürbar oberhalb der business-as-usual-Reduzierung liegen, die sich bereits heute aus der freiwilligen Selbstverpflichtung der Automobilindustrie ergibt. In Anbetracht der in Abschnitt 3.1 dargestellten Verminderungspotenziale erscheint eine jährliche Reduzierung um 6 % als angemessen und vertretbar. Unter der Annahme eines konstanten Kraftfahrzeugabsatzes würde eine jährliche Reduzierung um 6 % implizieren, dass die spezifischen CO_2-Emissionen im Durchschnitt über die gesamte im jeweiligen Abrechnungsjahr abgesetzte Flotte bis auf circa 100 g CO_2/km im Jahre 2012 abgesenkt werden müssten.

Verknüpfung mit dem Emissionshandel nach EU-Richtlinie

61. Eine solche Verknüpfung würde implizieren, dass Emissionsrechte zwischen dem EU-Handelssystem für stationäre Großemittenten und den Fahrzeugherstellern frei transferiert werden könnten. Soweit die Grenzkosten der CO_2-Reduzierung bei den Fahrzeugherstellern über den entsprechenden Grenzkosten in der Elektrizitätswirtschaft und der energieintensiven Industrien liegen, hätte dies zur Folge, dass Emissionsrechte von den stationären Großemittenten zu den Fahrzeugherstellern transferiert würden. Hierdurch kommt es zu einem Ausgleich zwischen den Grenzvermeidungskosten in beiden Handelssystemen und die angestrebte Emissionsminderung wird in insgesamt kostenminimierender Weise erreicht. Durch diese sektorübergreifende Optimierung der Reduzierungsbemühungen werden die Belastungen für Marktteilnehmer und Volkswirtschaft insgesamt verringert, ohne dass sich hierdurch Einbußen bei dem verfolgten Reduktionsziel ergäben (HOHENSTEIN et al., 2002, S. 107).

Ein zusätzlicher – jedoch weniger bedeutender – Vorteil der Verknüpfung zwischen beiden Handelssystemen besteht darin, dass ein isolierter Emissionshandel zwischen den Fahrzeugherstellern aufgrund des hohen Konzentrationsgrades in der Automobilindustrie (WEIß, 2000) zu einem vergleichsweise "engen" Markt führen würde, sodass die – wenn auch unwahrscheinliche – Gefahr besteht, dass sich für einzelne Automobilhersteller ein Anreiz zu strategischem Horten von Emissionsrechten ergeben könnte. In diesem Fall würde zwar das Reduktionsziel insgesamt noch erreicht, die Effizienz des Systems ginge jedoch verloren. Werden dagegen beide Handelssysteme miteinander verknüpft, so ergibt sich ein hinreichend großer Markt für Emissionsrechte, sodass keine Probleme durch eine möglicherweise marktbeherrschende Stellung einzelner Akteure zu erwarten sind.

62. Eine Verknüpfung beider Handelssysteme weist jedoch auch Nachteile insbesondere in Bezug auf die exakte Realisierung des Emissionsziels auf. Denn die durch die jeweilige Fahrzeugflotte verursachten CO_2-Emissionen können nur auf Basis der spezifischen Emissionswerte und der erwarteten Gesamtfahrleistung während der Lebensdauer der Fahrzeuge prognostiziert werden. In diesem Zusammenhang erscheint es dringend notwendig, nicht wie in der Literatur vorgeschlagen von einer pauschalen Gesamtfahrleistung über alle Fahrzeuggruppen auszugehen, sondern wie oben bereits empfohlen eine Differenzierung nach Größenklassen und anderen geeigneten Fahrzeugmerkmalen vorzunehmen. Im Übrigen sollte jedoch die Gefahr potenzieller Zielabweichungen nicht überschätzt werden, denn in der Praxis ist zu erwarten, dass die prognostizierten Emissionen in einigen Fällen über und in anderen Fällen unter den tatsächlichen CO_2-Emissionen liegen werden, sodass sich diese Abweichungen bis zu einem gewissen Grad gegeneinander kompensieren werden.

Insoweit erscheint es in Anbetracht der genannten Vorteile einer Verknüpfung der beiden Handelssysteme gerechtfertigt, die dann noch verbleibenden geringfügigen Zielabweichungen hinzunehmen.

Wechselwirkungen mit anderen Instrumenten

63. Wie eingangs bereits hervorgehoben, sollte das an den CO_2-Flottenemissionen ansetzende Handelssystem in einen ökonomischen Instrumentenmix eingebettet werden, der insbesondere auch einen Übergang der Kfz-Steuer auf eine CO_2-orientierte Bemessungsgrundlage und weitere Erhöhungsstufen der Ökosteuer auf Kraftstoffe vorsieht. Dabei sind verschiedene Wechselwirkungen zu beachten, die die Wirksamkeit dieses Instrumentenmix verstärken.

Insbesondere sind hierbei mögliche negative Rückwirkungen einer steigenden Energieeffizienz der Fahrzeuge zu beachten. Soweit die Beschränkung der Flottenemissionen dazu führt, dass die spezifischen CO_2-Emissionen der am Markt abgesetzten Fahrzeuge vermindert werden, hätten nämlich die Fahrzeugnutzer bei konstantem Kraftstoffpreis aufgrund der sinkenden Kraftstoffkosten pro km einen Anreiz, die Fahrleistung auszudehnen. Unter Zugrundelegung einer (langfristigen) Preiselastizität von - 0,6 (vgl. Tz. 38) würde eine Steigerung der Energieeffizienz um 10 % zu einer Ausdehnung der Fahrleistung um 6 % führen. Um diesen Rebound-Effekt zu vermeiden, müssten das oben beschriebene System des Emissionshandels durch weitere Erhöhungsstufen der Mineralölsteuer im Rahmen der ökologischen Steuerreform flankiert werden. Um Verzerrungen im Binnenmarkt zu vermeiden, sollte dies vorzugsweise nicht im nationalen Alleingang, sondern auf europäischer Ebene erfolgen (vgl. SRU, 2005, Abschn. 9.3.1).

Darüber hinaus gilt es zu bedenken, dass die Energieeffizienz der am Markt abgesetzten Fahrzeugflotte nicht nur durch die Angebots-, sondern auch durch die Nachfrageseite determiniert wird. So würden alle Anstrengungen der Automobilindustrie CO_2-ärmere Fahrzeuge bereit zu stellen ins Leere laufen, wenn nicht gleichzeitig auch die Nachfrager bereit wären, CO_2-ärmere Fahrzeuge zu erwerben. Zwar würde der Emissionshandel - eine direkte Kostenüberwälzung vorausgesetzt - tendenziell dazu führen, dass insbesondere CO_2-intensive Fahrzeuge verteuert würden, jedoch dürfte dieser Effekt alleine nicht ausreichen, um eine entsprechende Nachfragereaktion hervorzurufen (vgl. Kasten Berechnungsbeispiel). Aus diesem Grund ist es sinnvoll, die Absatzchancen CO_2-ärmerer Fahrzeuge durch nachfrageseitig wirksame Maßnahmen zu stützen. Wie oben bereits erwähnt, ist dies über steigende Kraftstoffpreise nur sehr begrenzt möglich. Deshalb sollte der bei den Automobilherstellern ansetzende Emissionshandel zusätzlich durch eine CO_2-

orientierte Kfz-Steuer flankiert werden, deren nähere Ausgestaltung im Folgenden Abschnitt dargestellt wird.

Berechnungsbeispiel:
Kostenbelastung eines Automobilherstellers durch Emissionshandel

Angenommen sei ein Automobilhersteller, der zur Einhaltung des Flottenemissionsstandards über die gesamte von ihm abgesetzte Flotte einen durchschnittlichen spezifischen Emissionswert von 120 g CO_2/km einhalten müsste. Pro verkaufter Einheit eines großmotorigen Fahrzeugs im oberen Preissegment mit einem spezifischen Emissionswert von 240 g CO_2/km ergäbe sich dann auf Basis einer angenommenen Gesamtfahrleistung von 200 000 km für diesen Hersteller ein CO_2-Defizit in Höhe von 24 t CO_2. Sofern dieses Defizit nicht durch andere Angebote in der Produktpalette ausgeglichen werden kann, müsste der Hersteller in entsprechendem Umfang Emissionsrechte erwerben. Bei einem geschätzten Preis für Emissionsrechte in Höhe von etwa 8 €/t CO_2 errechnet sich hieraus eine zusätzliche Kostenbelastung pro Fahrzeug von etwa 212 Euro, deren Überwälzung im oberen Preissegment keine starke Nachfragereaktion hervorrufen würde.

Politische Durchsetzbarkeit

64. Die Erfahrungen mit der Umsetzung der Europäischen Emissionshandelsrichtlinie und hier insbesondere die Auseinandersetzungen um den nationalen Allokationsplan (SRU, 2004), machen deutlich, dass Emissionshandelssysteme aufgrund ihrer Komplexität stets Gefahr laufen, im politischen Prozess derart verstümmelt zu werden, dass ihre Wirksamkeit in Frage gestellt ist. Dem SRU ist bewusst, dass auch das oben beschriebene Emissionshandelsmodell dieser Gefahr ausgesetzt ist. Komplexe Probleme erfordern jedoch zuweilen komplexe Maßnahmen, die nicht bereits im Vorfeld mit Hinweis auf den politischen Prozess abgeblockt werden sollten. Darüber hinaus haben die Ausführungen im vorliegenden Kapitel hinreichend deutlich gemacht, dass eine Reduzierung der verkehrsbedingten CO_2-Emissionen in der erforderlichen Größenordnung ohne Maßnahmen, die bei den Automobilherstellern ansetzen, kaum möglich ist; es sei denn, eine massive Erhöhung der – bisher weitgehend konstanten – realen Kraftstoffpreise würde als realistische Alternative betrachtet (SRU, 2005, Abschn. 3.1.2). Da die freiwillige Selbstverpflichtung der Europäischen Automobilindustrie, wie oben erläutert, keinen zielführenden Ansatz darstellt, bliebe somit als Alternative nur noch die Vorgabe verbindlicher Flottenverbrauchsstandards, wie sie in Japan und Kalifornien als Beitrag zum Klimaschutz eingeführt wurden. So werden im Rahmen des Top-Runner-Approach in Japan Flottenverbrauchsstandards für Personenkraftwagen unterschiedlicher Gewichtsklassen vorgegeben, die sich am jeweils energieeffizientesten Fahrzeug der entsprechenden Gewichtsklasse orientieren und bis 2010 erreicht werden müssen (vgl. ECCJ, o. J.). Auch mit Hilfe dieses

Ansatzes lässt sich ein entsprechender Innovationswettbewerb unter den Fahrzeugherstellern auslösen. Jedoch führt der Top-Runner-Approach gegenüber dem oben beschrieben Emissionshandel aufgrund seiner geringeren Flexibilität sowohl auf der betriebswirtschaftlichen als auch auf der volkswirtschaftlichen Ebene zu deutlich höheren Kosten. Insbesondere entfällt die Möglichkeit für die Automobilhersteller die Einhaltung ihres Emissionsstandards zumindest partiell auch durch Zukauf von Emissionsrechten aus dem EU-Handelssystem für stationäre Großemittenten zu gewährleisten. Die politische Durchsetzbarkeit des Emissionshandelsmodells wird deshalb entscheidend davon abhängen, ob es gelingt, diese Vorteile im Vergleich zu der ansonsten verbleibenden Alternative nicht-handelbarer Standards gegenüber den Automobilherstellern hinreichend deutlich zu machen.

4.3 CO_2-orientierte Kraftfahrzeugsteuer

65. Im Koalitionsvertrag der 15. Legislaturperiode wurde vereinbart, die Kfz-Steuer ökologisch weiterzuentwickeln und dabei die CO_2-Emissionen als Bemessungsgrundlage zu verwenden. Die bisher gültige Kfz-Steuer wurde zum 1. Juli 1997 auf eine emissionsorientierte Bemessungsgrundlage umgestellt und seither mehrfach an neuere technische Entwicklungen angepasst. Dadurch konnte der Anteil schadstoffreduzierter PKW an den Neuzulassungen kontinuierlich gesteigert werden. Im Jahre 2001 erfüllten bereits über 90 % der neu zugelassenen PKW die Euro-3- bzw. die Euro-4-Norm; im gesamten Fahrzeugbestand erfüllten zum Stichtag 1. Januar 2002 21,9 % der Fahrzeuge die Euro-3/D3-Norm und 9,6 % die noch strengere Euro-4-Norm (KBA, 2003, 2002).

Obgleich diese Entwicklung nicht ausschließlich auf die Kfz-Steuer zurückzuführen ist, sondern auch durch andere Faktoren bedingt wurde, belegt sie dennoch eindrucksvoll, dass die Kfz-Steuer ein hohes eigenständiges Lenkungspotenzial besitzt, das auch künftig genutzt werden sollte. Überlegungen, die Kfz-Steuer als eigenständige Steuer abzuschaffen und auf die Mineralölsteuer-Steuer umzulegen, wie etwa auch durch das Bundesumweltministerium gefordert wird (BMU, 2003b), sind deshalb trotz der damit verbundenen Verwaltungsvereinfachung nicht sachgerecht. Anders als die Mineralölsteuer erlaubt die Kfz-Steuer eine Differenzierung nach den technischen Eigenschaften des betreffenden Kraftfahrzeuges und einen progressiven Steuerverlauf (JORDAN-JOERGENSEN et al., 2002, S. 113). Darüber hinaus ist es bei der Kfz-Steuer sogar denkbar, diese für einen längeren Zeitraum im Voraus zu erheben um damit die Lenkungswirkung zu erhöhen (Tz. 69). Aufgrund dieser Möglichkeiten weist die Kfz-Steuer ein Lenkungspotenzial auf, das über dasjenige der Mineralölsteuer hinausgeht und nicht ohne Not aufgegeben werden sollte. Im Übrigen würde ein Umlegen der Kfz-Steuer auf die Mineralölsteuer auch erhebliche Verwerfungen im

Finanzausgleich zwischen Bund und Ländern verursachen, denn die Kfz-Steuer steht den Ländern zu, während die Mineralölsteuer dem Bund zufließt.

66. Im europäischen Vergleich zeigen sich beträchtliche Unterschiede in der Besteuerung von Personenkraftwagen, die nach Ansicht der EU-Kommission eine entsprechende Harmonisierung erforderlich machen (vgl. KUHFELD und KUNERT, 2002). Nach der im September 2002 von der EU-Kommission vorgelegten Mitteilung "Besteuerung von Personenkraftwagen in der Europäischen Union" (EU-Kommission, 2002c) soll diese Harmonisierung zugleich im Sinne der "Gemeinschaftsstrategie zur Minderung der CO_2-Emissionen von Personenkraftwagen" (EU-Kommission, 1995) genutzt werden, um die Bemessungsgrundlage der nationalen Kfz-Steuern zu vereinheitlichen und an den spezifischen CO_2-Emissionen zu orientieren.

Für Deutschland würde dies bedeuten, dass die derzeitige Bemessungsgrundlage "Hubraum" abgelöst wird durch die Bemessungsgrundlage "spezifische CO_2-Emissionen". Mit der Maßgabe, dass eine zusätzliche Differenzierung der Kfz-Steuer nach sonstigen Schadstoffgesichtspunkten auch in Zukunft möglich bleibt, ist dieser Ansatz grundsätzlich zu begrüßen. Denn wie oben bereits begründet, kann nicht davon ausgegangen werden, dass sich alleine über den Kraftstoffpreis hinreichend starke Anreize zur Anschaffung verbrauchsärmerer Kraftfahrzeuge auslösen lassen.

67. Ein mögliches Argument gegen eine CO_2-bezogene Kfz-Steuer könnte lauten, dass bereits durch die derzeitige auf den Hubraum der Fahrzeuge bezogene Bemessungsgrundlage dem Aspekt der CO_2-Emissionen hinreichend Rechnung getragen würde. Dies ist jedoch unzutreffend, denn der spezifische Kraftstoffverbrauch und damit die CO_2-Emissionen eines Fahrzeugs werden nicht nur durch den Hubraum determiniert, sondern maßgeblich auch durch die Motortechnik und Kraftstoffart, das Fahrzeuggewicht und den Roll- sowie Luftwiderstand (vgl. Kap. 3). Dabei können die spezifischen CO_2-Emissionen bei gleichem Hubraum um mehr als 50 % differieren (RAUH et al., 2001, S. 33). So kommt auch eine Simulationsstudie der Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung (2004) zu dem Ergebnis, dass eine entsprechende Umstellung der Kfz-Steuer zu einer verstärkten Nachfrage nach Fahrzeugen mit geringerem Durchschnittsverbrauch führen würde.

68. Um die Lenkungswirkung der CO_2-bezogenen Kfz-Steuer bei insgesamt aufkommensneutraler Gestaltung der Reform zu erhöhen, empfiehlt der SRU einen progressiv ansteigenden Steuertarif (JORDAN-JOERGENSEN et al., 2002, S. 86 f.). Hierdurch könnte das Preissignal insbesondere im Bereich hochmotorisierter Kraftfahrzeuge deutlich stärker ausfallen, ohne kleine und mittlere Kraftfahrzeuge übermäßig zu belasten. Dies würde die Akzeptanz der CO_2-bezogenen Kfz-Steuer deutlich erhöhen. Auch ließe sich eine solche progressive Ausgestaltung damit rechtfertigen, dass mit großmotorigen Fahrzeugen in der Regel eine deutlich höhere

Fahrleistung pro Jahr erbracht wird, was bei einem linear ansteigenden Tarif unberücksichtigt bliebe.

Ein mögliches Argument gegen einen progressiv ansteigenden Steuertarif könnte darin bestehen, dass hierdurch Firmenwagen überproportional stark belastet würden, da diese im Durchschnitt eine deutlich höhere Motorisierung aufweisen als privat genutzte Fahrzeuge (JORDAN-JOERGENSEN et al., 2002, S. 48). Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass Firmenwagen, die in der Anschaffung ohnehin bereits steuerlich begünstigt sind, in der Regel nach etwa zwei bis vier Jahren in den privaten Sektor verkauft werden, sodass die Anschaffungsentscheidungen der Unternehmen mittelfristig einen hohen Einfluss auf die Zusammensetzung der privat genutzten Fahrzeugflotte haben. Aus diesem Grund ist gerade auch eine entsprechend starke Lenkungswirkung im Bereich der Firmenwagen erforderlich.

69. Eine weitere Steigerung der Lenkungswirkung einer CO_2-orientierten Kfz-Steuer ließe sich erzielen, indem die Steuer bei erstmaliger Zulassung des Fahrzeuges für mehrere Jahre im Voraus erhoben würde. Bei der konkreten Bemessung dieses Vorauszahlungszeitraums ergibt sich allerdings ein Zielkonflikt. Je länger der Zeitraum ist, umso deutlicher fällt einerseits das Preissignal aus, umso geringer dürfte andererseits aber auch die Akzeptanz seitens der betroffenen Kraftfahrer sein. Hinzu kommt, dass durch einen längeren Vorauszahlungszeitraum der Umstieg auf ein neues (und in der Regel verbrauchsärmeres) Fahrzeug insbesondere für einkommensschwache Gruppen erschwert werden könnte, soweit die Fahrzeughersteller ihre Finanzierungskonditionen nicht an die neuen Rahmenbedingungen anpassen. Der SRU empfiehlt deshalb hier einen Mittelweg zu beschreiten und die Steuer lediglich für die ersten vier Jahre der Nutzungsdauer eines neuen Kraftfahrzeuges zu erheben. Ab dem fünften Jahr sollte dann die Erhebung wie bisher auf jährlicher Basis erfolgen. Wird das Fahrzeug vor Ablauf der ersten vier Nutzungsjahre endgültig stillgelegt, so erhält der Fahrzeughalter eine entsprechende Steuerrückerstattung.

70. Als flankierende Maßnahme empfiehlt der SRU, die am 1. November 2004 in Kraft getretene PKW-Energieverbrauchskennzeichungsverordnung (PKW-EnVKV, BGBl 2004 Teil I, S. 1037) dahingehend zu erweitern, dass die Fahrzeuganbieter nicht nur Kraftstoffverbrauch und CO_2-Emissionen, sondern auch die jeweilige Kfz-Steuer auszuweisen haben.

71. Eine Umstellung der derzeitigen hubraumbezogenen auf eine CO_2-bezogene Kraftfahrzeugsteuer würde Dieselfahrzeuge aufgrund ihrer geringeren Verbrauchs- und damit Emissionswerte tendenziell begünstigen. Dies hätte einen steigenden Anteil von Dieselfahrzeugen an der gesamten Fahrzeugflotte zur Folge. In diesem Zusammenhang erscheint es dem SRU wichtig, noch einmal seine Forderung nach

einer nach den CO_2-Emissionen differenzierte Ökosteuer auf Otto- und Dieselkraftstoffe zu bekräftigen (SRU, 2005, Abschn. 9.3.1).

72. Wie oben bereits angemerkt, sollte es auch nach Einführung einer CO_2-abhängigen Kfz-Steuer wie bisher möglich sein, den Steuertarif unabhängig von den jeweiligen CO_2-Emissionen auch nach sonstigen Emissionsgesichtspunkten zu differenzieren, um auch weiterhin Anreize zur Senkung sonstiger Schadstoffemissionen geben zu können. Für den Bereich der Krafträder empfiehlt der SRU darüber hinaus, diesen Spielraum zu nutzen, um eine zusätzliche Differenzierung nach den jeweiligen Lärmemissionen einzuführen. Dabei müsste allerdings im Rahmen der Hauptuntersuchungen sichergestellt werden, dass die Lärmemissionen der Krafträder nicht durch nachträgliche Manipulationen verändert werden.

5. Empfehlungen

73. Durch Verbesserungen in der konventionellen Motortechnik ist bereits heute eine Reduzierung des derzeitigen durchschnittlichen Kraftstoffbedarfs neu zugelassener PKW um über 40 % bei Benzin-PKW und um bis zu 40 % bei Diesel-PKW möglich. Damit kann der durchschnittliche spezifische CO_2-Ausstoß neu zugelassener Fahrzeuge auf circa 100 g/km gesenkt werden. Ansatzpunkte liegen einerseits in einer Verbesserung der spezifischen Motortechnologie, einem Betrieb des Motors im optimalen Kennfeldbereich durch Downsizing und Getriebespreizung, einem optimalen Energiemanagement bis hin zur Hybridisierung und einer Reduzierung des Fahrzeuggewichts und des Rollwiderstandes. Maßnahmen, die ein verändertes Käufer- und Fahrverhalten bewirken, sind ebenfalls von Bedeutung.

Obwohl alternativen Kraftstoffen (Biomasse, Wasserstoff) zumindest in der längerfristigen Perspektive ein erhebliches Minderungspotenzial beizumessen ist, erscheint dem SRU in Anbetracht der beschränkten Potenziale und der bisher noch vergleichsweise hohen Vermeidungskosten zunächst eine weiter gehende Ausschöpfung der technischen Potenziale zur CO_2-Minderung bei Kraftfahrzeugen mit konventioneller Antriebstechnik als vordringlich. In einem ersten Zwischenschritt sollten die durchschnittlichen spezifischen CO_2-Emissionen der neu abgesetzten PKW-Flotte durch Einführung eines Emissionshandels, der bei den Fahrzeugherstellern ansetzt, bis zum Jahre 2012 auf 100 g CO_2/km gesenkt werden; als längerfristige Zielsetzung ist eine weitere Senkung anzustreben. Es ist absehbar, dass verbrauchsoptimierte Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren auch mittelfristig noch preiswerter und ökologisch zumindest gleichwertig mit Brennstoffzellen-Fahrzeuge bleiben werden. Derzeit besitzt die Brennstoffzelle als Antriebsquelle im Fahrzeugbereich weder technische noch ökonomische Marktreife.

74. Die freiwillige Selbstverpflichtung des Dachverbandes der europäischen Automobilindustrie (ACEA) stellt zwar im Grundsatz einen umweltpolitischen Fortschritt dar, im Detail ist sie jedoch in mancherlei Hinsicht unbefriedigend. Insbesondere bleiben die gesteckten Ziele deutlich hinter dem technisch Machbaren zurück. Ein Problem der freiwilligen Selbstverpflichtungen auf Verbandsebene stellt das Durchsetzungsvermögen des Verbandes gegenüber seinen Mitgliedsunternehmen dar. Bisher fehlt jeglicher ordnungsrechtliche Rahmen, der eine Sanktionierung im Falle der Zielverfehlung ermöglichen würde. Dies verstößt einerseits gegen die von der EU-Kommission aufgestellten Richtlinien für die Ausgestaltung freiwilliger Selbstverpflichtungen. Andererseits wurde die Selbstverpflichtung seitens der Automobilindustrie an verschiedene Bedingungen geknüpft, die jederzeit als Begründung für eine einseitige Modifikation oder gar Aufkündigung herangezogen werden könnten. Auch existiert keine explizite Lastenverteilung zwischen den einzelnen Automobilherstellern, sodass aufgrund des Trittbrettfahrerproblems eine effiziente Aufteilung der im Einzelnen zu erbringenden Reduzierungsleistungen erschwert werden kann.

Diese Mängel lassen sich zum Teil durch Nachbesserungen beheben, zum Teil handelt es sich aber auch um nicht behebbare Probleme, die dem Instrument der Selbstverpflichtung per se inhärent sind. Die Selbstverpflichtung sollte deshalb nicht über ihre gegenwärtige Laufzeit bis 2008 hinaus fortgeschrieben werden, sondern in ein EU-weites Modell des Emissionshandels zwischen den Automobilherstellern überführt werden. Als Alternative kommen Höchstverbrauchsstandards in Betracht, wie sie in Japan und Kalifornien als Beitrag zum Klimaschutz eingeführt wurden.

75. Zur Integration des Verkehrsbereichs in den Emissionshandel ist ein Ansatz zu favorisieren, bei dem den einzelnen Fahrzeugherstellern vorgegeben wird, wie viel CO_2 die in der Abrechnungsperiode abgesetzte Fahrzeugflotte während ihrer gesamten Lebensdauer emittieren darf. Unterschreitet ein Hersteller diesen Flottenemissionsstandard, so kann er überschüssige Emissionsrechte verkaufen, überschreitet er ihn, so muss er zusätzliche Emissionsrechte erwerben. Auf diese Weise lassen sich die über alle Hersteller aggregierten Flottenemissionen jährlich um einen vorgegebenen Prozentsatz reduzieren, wobei die Handelbarkeit der Emissionsrechte zugleich sicher stellt, dass die Emissions- bzw. Verbrauchsreduzierungen bei denjenigen Herstellern stattfinden, bei denen dies zu den geringsten Kosten möglich ist. Gegenüber der derzeitigen Selbstverpflichtung ergeben sich hierdurch nicht nur Effizienzgewinne, sondern es werden auch transparentere und langfristig stabilere Rahmenbedingungen gewährleistet, die entsprechende Innovationsaktivitäten seitens der betroffenen Fahrzeughersteller begünstigen. Durch eine Verknüpfung mit dem EU-Handelssystem ist darüber hinaus eine sektorübergreifende Optimierung der Vermeidungsmaßnahmen gewährleistet.

76. Ein an den Flottenemissionen ansetzendes Handelssystem sollte durch nachfrageseitig wirksame Maßnahmen flankiert werden, denn alle Anstrengungen der Automobilindustrie, CO_2-ärmere Fahrzeuge bereit zu stellen, würden ins Leere laufen, wenn nicht gleichzeitig auch die Nachfrager bereit wären, CO_2-ärmere Fahrzeuge zu erwerben. Alleine über steigende Kraftstoffpreise lässt sich ein solcher Anreiz aufgrund der geringen Preiselastizität der Kraftstoffnachfrage nicht auslösen. Hinzu kommt, dass die Nachfrageentscheidung im PKW-Bereich nicht nur vom Kraftstoffverbrauch abhängt, sondern von vielen Faktoren beeinflusst wird, von denen einige eher für ein hohes Gewicht und eine starke Motorisierung, also einen hohen Kraftstoffverbrauch sprechen. Aus diesem Grund wird – wie auch von der EU-Kommission nahe gelegt – eine Reform der Kfz-Steuer zur Verbesserung der Absatzchancen CO_2-armer Kraftfahrzeuge vorgeschlagen.

Durch die im Jahre 1997 erfolgte Umstellung der Kfz-Steuer auf eine – zumindest teilweise – emissionsorientierte Bemessungsgrundlage konnte der Anteil schadstoffreduzierter Personenkraftwagen kontinuierlich gesteigert werden. Diese Entwicklung belegt, dass die Kfz-Steuer ein hohes eigenständiges Lenkungspotenzial besitzt, das sich in Bezug auf die Lenkungswirkung von der der Mineralölsteuer unterscheidet, und auch künftig genutzt werden sollte. Eine Umlegung der Kfz-Steuer auf die Mineralölsteuer wäre nicht sachgerecht. Stattdessen soll, analog den Vorstellungen der EU-Kommission, die hubraumbezogene Bemessungsgrundlage der Kfz-Steuer unter Beibehaltung der bisherigen Differenzierung nach Schadstoffklassen auf die spezifischen CO_2-Emissionen umgestellt werden. Um die Lenkungswirkung der Kfz-Steuer weiter zu erhöhen, sollte sie bei Neuzulassung eines Fahrzeuges für einen Zeitraum von vier Jahren im Voraus erhoben werden und einen progressiv ansteigenden Steuertarif aufweisen. Durch einen solchen Steuertarif könnte das Preissignal insbesondere im Bereich hochmotorisierter Kraftfahrzeuge deutlich stärker ausfallen, ohne kleine und mittlere Kraftfahrzeuge übermäßig zu belasten.

Literatur

ACEA (European Automobile Manufacturers Association) (2005): New PC Registrations in W. Europe. Breakdown by Specifications: Share of Diesel cars (%). Brüssel: ACEA. http://www.acea.be (15.03.2005).

ACEA, Dienststellen der Kommission (2003): Monitoring of ACEA's Commitment on CO_2 Emission Reductions from Passenger Cars (2002). Final Report. Brüssel.

ACEA, Dienststellen der Kommission (2001): Monitoring of ACEA's Commitment on CO_2 Emission Reductions from Passenger Cars (2000). Final Report. Brüssel.

AGEB (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen) (2004): Bruttostromerzeugung in Deutschland von 1990 bis 2004 nach Energieträgern. http://www.ag-energiebilanzen.de/daten/str0205w1.pdf (13. 12. 2004).

ALBRECHT, J. (2000): The diffusion of cleaner vehicles in CO2 emission trading 21 designs. Transportation Research, Part D, Transport and Environment Jg. 5, S. 385-401.

Arthur D. Little (2003): Investigation of the Consequences of Meeting a New Car Fleet Target of 120/km CO_2 by 2012. Final Report. Presentation to EU Commission. Stockholm: Arthur D. Little.

BACH, C. (2002): Erdgas als Treibstoff - Potentiale für eine nachhaltige(re) Mobilität. Gas, Wasser, Abwasser 82 (6), S. 379-384.

BERGMANN, H., BERTENRATH, R., BETZ, R., DÜNNEBEIL, F., LAMBRECHT, U., LIEBIG, L., ROGGE, K. UND SCHADE, W., EWRINGMANN, D. (2005): Emissionshandel im Verkehr. Ansätze für einen möglichen Up-Stream-Handel im Verkehr. Endbericht. Köln, Heidelberg, Mannheim, Karlsruhe: FiFo, IFEU, Fraunhofer ISI.

BfN (Bundesamt für Naturschutz) (2005): Zum Stand der Umsetzung von Natura 2000 in Deutschland. Bonn: BfN. http://www.bfn.de/03/030303.htm (11.02.2005).

BIRNBAUM, K. U., LINßEN, J., WALBECK, M. (2002): Synoptische Analyse vorliegender Studien in Bezug auf den Trend bzw. die Reduktionspotenziale von CO_2-Emissionen im Verkehr. Jülich: Forschungszentrum Jülich. STE-Preprint 19/2002.

BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (2004a): Erneuerbare Energien in Zahlen - nationale und internationale Entwicklung. Stand: November 2004. Internet-Update. Berlin: BMU. http://www.bmu.de.

BMU (2004b): Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland. Berlin: BMU.

BROCKS, F. (2001): Die staatliche Förderung alternativer Kraftstoffe. Das Beispiel Biodiesel. Frankfurt a. M.: Peter Lang.

BÜNGER, J., KRAHL, J., BAUM, K., SCHRÖDER, O., MÜLLER, M., WESTPHAL, P., RUHNAU, P., SCHULZ, T. G., HALLIER, E. (2000): Cytotoxic and mutagenic effects, particle size and concentration analysis of diesel engine emissions using biodiesel and petrol diesel as fuel. Archives of Toxicology 74 (8), S. 490-498.

Bundesregierung (2004): Perspektiven für Deutschland. Fortschrittsbericht 2004. Unsere Strategie für eine nachhaltige Entwicklung. Berlin: Presse- und Informationsamt der Bundesregierung.

CARRARO, E., LOCATELLI, A. L., FERRERO, C., FEA, E., GILLI, G. (1997): Biological Activity of Particle Exhaust Emissions from Light-Duty Diesel Engines. Journal of Environmental Pathology, Toxicology and Oncology 16 (2-3), S. 101-109.

CHOUDHURY, K., DZIEDZIOCH, C., HÄUSLER, A., PLOETZ, C. (2004): Zusammenstellung und Auswertung geeigneter Kriterien, Indikatoren, UVP und dergleichen für die notwendige Berücksichtigung von Biodiversitätsaspekten bei Maßnahmen des Klimaschutzes, insbesondere bei Landnutzungsänderungen. Berlin: Umweltbundesamt. Climate Change 04/2004.

CHRISTIDIS, P., HIDALGO, I., SORIA, A. (2003): Dynamics of the introduction of new passenger car technologies. Sevilla: IPTS.

CONCAWE, European Council for Automotive R&D, Institute for Environment and Sustainability - Joint Research Centre of the European Commission (2004): Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context. Well-to-Wheels Report. Version 1b. Ispra: IES.

CONCAWE, European Council for Automotive R&D, Institute for Environment and Sustainability - Joint Research Centre of the European Commission (2003a): Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context. Well-to-Tank Report. Version 1. Ispra: IES.

CONCAWE, European Council for Automotive R&D, Institute for Environment and Sustainability - Joint Research Centre of the European Commission (2003b): Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context. Tank-to-Wheels Report. Version 1. Ispra: IES.

DAT (Deutsche Automobil Treuhand) (2004): DAT-Report 2004. Würzburg: Vogel.

DAT (2002): DAT-Veedol-Report 2002. Würzburg: Vogel.

Department for Transport (2004): Powering Future Vehicles. The Government Strategy. Second Annual Report. London: Department for Transport.

DEUBER, O. (2002): Einbeziehung des motorisierten Individualverkehrs in ein deutsches CO_2-Emissionshandelssystem. Freiburg: Öko-Institut.

ECCJ (Energy Conservation Center Japan) (o. J.): What is the Top Runner Program. Tokio: ECCJ. http://www.eccj.or.jp/top_runner/index.html (01.03.2005).

ECCP (European Climate Change Programme) (2003): Second ECCP Progress Report. Can we meet our Kyoto targets? http://europa.eu.int/comm/environment/climat/pdf/second_eccp_report.pdf (15.08.2004).

EEA (European Environment Agency) (2003): Indicator fact sheet. TERM 2002 33 EU - Average age of the vehicle fleet. Kopenhagen: EEA. http://themes.eea.eu.int/ (15.11.2004).

ELLINGER, R., KAPUS, P., SCHWEINZER, F., PRENNINGER, P. (2000): Potenziale zur Reduzierung des CO_2-Flottenverbrauchs mittels Downsizing-Konzepten für konventionelle VKM. In: VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik (Hrsg.): Innovative Fahrzeugantriebe. Vorträge 1998-2002. Düsseldorf: VDI-Verlag, CD-ROM.

ELLINGER, R., MEITZ, K., PRENNINGER, P. (2002): Comparison of CO_2 Emission Levels for Internal Combustion Engine and Fuel Cell Automotive Propulsion Systems. SAE Environmental Sustainability Conference, 08.-10.04.2002, Graz.

Enquete-Kommission Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und Liberalisierung (2002): Endbericht der Enquete-Kommission "Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung". Berlin: Deutscher Bundestag. Bundestagsdrucksache 14/9400.

EU-Kommission (2004a): EU strategy on CO2 emissions from passenger cars. Brüssel: EU-Kommission. http://europa.eu.int/comm/environment/co2/co2_home.htm (15.12.2004).

EU-Kommission (2004b): Mitteilung der Kommission an den Rat und das Europäische Parlament. Umsetzung der Gemeinschaftsstrategie zur Verminderung der CO_2-Emissionen von Kraftfahrzeugen: Vierter Jahresbericht über die Wirksamkeit der Strategie (Berichtsjahr 2002). KOM(2004) 78 endg. Brüssel: EU-Kommission.

EU-Kommission (2003): Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates über bestimmte fluorierte Treibhausgase. KOM(2003) 492 endg. Brüssel: EU-Kommission.

EU-Kommission (2002a): Communication from the Commission to the Council and the European Parliament. Implementing the Community Strategy to Reduce CO2 Emissions from Cars. Third annual report on the effectiveness of the strategy (Reporting year 2001). KOM(2002) 693 endg. Brüssel: EU-Kommission.

EU-Kommission (2002b): Bericht der Kommission gemäß der Entscheidung Nr.

93/389/EWG des Rates über ein System zur Beobachtung von Treibhausgasen in der Gemeinschaft, geändert durch die Entscheidung Nr. 99/296/EG. KOM(2002) 702 endg. Brüssel: EU-Kommission.

EU-Kommission (2002c): Mitteilung der Kommission an den Rat und das Europäische Parlament. Besteuerung von Personenkraftwagen in der Europäischen Union. Handlungsmöglichkeiten auf nationaler und gemeinschaftlicher Ebene. KOM(2002) 431 endg. Brüssel: EU-Kommission.

EU-Kommission (2001): Mitteilung der Kommission an den Rat, das Europäische Parlament, den Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen über alternative Kraftstoffe für den Straßenverkehr und ein Bündel von Maßnahmen zur Förderung der Verwendung von Biokraftstoffen. KOM(2001) 547 endg. Brüssel: EU-Kommission.

EU-Kommission (1998): Vorschlag für eine Richtlinie des Rates betreffend die Verfügbarkeit von Verbraucherinformationen über den Kraftstoffverbrauch beim Marketing für neue Personenkraftfahrzeuge. KOM(1998) 489 endg. Brüssel: EU-Kommission.

EU-Kommission (1995): Mitteilung der Kommission an den Rat und das Europäische Parlament. Eine Strategie der Gemeinschaft zur Minderung der CO2-Emissionen von Personenkraftwagen und zur Senkung des durchschnittlichen Kraftstoffverbrauchs. KOM(1995) 689 endg. Brüssel: EU-Kommission.

EYRE, N., FERGUSSON, M., MILLS, R. (2002): Fuelling Road Transport. Implications for Energy Policy. London: Energy Saving Trust.

FEISST, U. (2002): Erdgas als Treibstoff - Erdgasbusse in Liechtenstein. Gas, Wasser, Abwasser 82 (6), S. 397-403.

FISCHEDICK, M., NITSCH, J., LECHTENBÖHMER, S., HANKE, T., BARTHEL, C., JUNGBLUTH, C., ASSMANN, D., BRÜGGEN, T. v. d., TRIEB, F. (2002): Langfristszenarien für eine nachhaltige Energienutzung in Deutschland. Berlin: Umweltbundesamt.

FISCHER, M. (1998): Die Zukunft des Ottomotors als Pkw-Antrieb. Entwicklungschancen unter Verbrauchsaspekten. Berlin: Technische Universität.

FRITSCHE, U. R. (2003): Energiebilanzen und Treibhausgas-Emissionen für fossile Brennstoffketten und Stromerzeugungsprozesse in Deutschland für die Jahre 2000 und 2020. Bericht für den Rat für Nachhaltige Entwicklung. Darmstadt: Öko-Institut.

FRITSCHE, U. R., HÜNECKE, K., WIEGMANN, K. (2004): Kriterien zur Bewertung des Pflanzenanbaus zur Gewinnung von Biokraftstoffen in Entwicklungsländern unter ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Darmstadt: Öko-Institut.

Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung (2004): Schätzung der Wirkung umweltpolitischer Maßnahmen im Verkehrssektor unter Nutzung der Datenbank der Gesamtrechnungen des Statistischen Bundesamtes. Endbericht. Osnabrück: GWS.

Greenpeace (2004): Das Projekt "SmILE" – Technische Details. http://www.greenpeace.org/deutschland/ (09.09.2004).

HAMELINCK, C. N., FAAIJ, A. P. C., UIL, H. d., BOERRIGTER, H. (2003): Production of FT transportation fuels from biomass; technical options, process analysis and optimisation, and development potential. Utrecht: Utrecht University.

HANLY, M., DARGAY, J., GOODWIN, P. (2002): Review of Income and Price Elasticities in the Demand for Road Traffic. London: ESRC Transport Studies Unit. ESRC TSU Publication 2002/13.

HEISTER, J., MICHAELIS, P., KLEPPER, G., KRÄMER, H., MOHR, E., NEU, A., SCHMIDT, R., WICHERT, R. (1990): Umweltpolitik mit handelbaren Emissionsrechten. Möglichkeiten zur Verringerung der Kohlendioxid- und Stickoxidemissionen. Tübingen: Mohr. Kieler Studien 237.

HENKE, J. M., KLEPPER, G., NETZEL, J. (2002): Steuerbefreiung für Biokraftstoffe. Ist Bio-Ethanol wirklich eine klimapolitische Option? Kiel: Institut für Weltwirtschaft. Kieler Arbeitspapiere 1136.

HLG (High Level Group on Hydrogen and Fuel cell Technologies) (2003): Hydrogen energy and fuel cells - a vision of our future. EU-Kommission. HLG draft report v4.8.

HOFMANN, L., STEIGER, W., ADAMIS, P., PETERSEN, R. (2002): Möglichkeiten und Grenzen von Elektromaschinen im Antriebstrang. In: VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik (Hrsg.): Innovative Fahrzeugantriebe. Vorträge 1998-2002. CD-ROM. Düsseldorf: VDI-Verlag.

HOHENSTEIN, C., PELCHEN, A., WIELER, B. (2002): Zertifikatehandel im Verkehrsbereich als Instrument zur CO_2-Reduzierung unter Berücksichtigung von Interdependenzen mit anderen Lenkungsinstrumenten und unter Gewährleistung der Kompatibilität zur EU-Gesetzgebung. Kurz-Studie im Auftrag des Rates für Nachhaltige Entwicklung. Berlin: PricewaterhouseCoopers.

IEA (International Energy Agency) (2003): Transport Technologies and Policies for Energy Security and CO_2 Reductions. Paris: IEA. ETPC Paper 02/2003.

IER (Institut für Energiewirtschaft und rationelle Energieanwendung), WI (Wuppertal Institut), Prognos AG (2002): Szenarienerstellung für die Enquete-Kommission "Nachhaltige Energieversorgung" des Deutschen Bundestages. Bericht. Basel.

ISENSEE, S. (2002): Hybridfahrzeuge - Innovationspotentiale für zukünftigen Verkehr? In: Zentrum für Verkehr der Technischen Universität Braunschweig (Hrsg.):

Hybridfahrzeuge und Energiemanagement. Düsseldorf: VDI-Verlag. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 484, S. 1-4.

JORDAN-JOERGENSEN, J., JESPERSEN, M., OHM, A., KRISTENSEN, N. (2002): Fiscal Measures to Reduce CO2 Emissions from New Passenger Cars. Main report. Kongens Lyngby: COWI. http://europa.eu.int/comm/taxation_customs/resources/documents/co2_cars_study_25-02-2002.pdf.

JOSEFOWITZ, W., KÖHLE, S. (2002): Aktivitäten bei Hybrid Antriebssytemen in Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft und Beschreibung von Schlüsselkomponenten und deren Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch. In: Zentrum für Verkehr der Technischen Universität Braunschweig (Hrsg.): Hybridfahrzeuge und Energiemanagement. Düsseldorf: VDI-Verlag. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 484, S. 40-56.

JUNKERNHEINRICH, M. (1998): Handelbare Emissionsrechte im verkehrspolitischen Instrumentenmix. Zeitschrift für angewandte Umweltforschung, Sonderheft 9, S. 209-221.

KÅGESON, P. (2005): Reducing CO_2 Emissions From New Cars. A progress report on the car industry's voluntary agreement and an assessment of the need for policy instruments. T&E – European Federation for Transport and Environment. Brüssel

KAVALOV, B., JENSEN, P., PAPAGEORGIOU, D., SCHWENSEN, C., OLSSON, J. P. (2003): Biofuel production potential of EU-candidate countries. Sevilla: Institute for Prospective Technological Studies. Report EUR 20836 EN.

KBA (Kraftfahrt-Bundesamt) (2003): Pressebericht 2003. Flensburg: KBA.

KBA (2002): Statistische Mitteilungen, Reihe 1, H. 2. Flensburg: KBA.

KEAY-BRIGHT, S. (2000): A critical analysis of the voluntary fuel economy agreement, established between the European automobile manufacturers and the European Commission, with regard for its capacity to protect the environment. Brüssel. EEB document N° 2000/021.

KNIESTEDT, D. (1999): Anwendungsmöglichkeiten von ökonomischen Instrumenten - insbesondere von Umweltnutzungsrechten - im Verkehrsbereich. Frankfurt a. M.: Peter Lang.

KOLKE, R. (1999): Technische Optionen zur Verminderung der Verkehrsbelastungen. Brennstoffzellenfahrzeuge im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren. Berlin: Umweltbundesamt. UBA-Texte 33/99.

KOLKE, R., JÄCKER, M., RAUTERBERG-WULFF, A., VERRON, H., ZIMMER, W., OSTERMEIER, A., STINSHOF, K., PECH, C. (2003): CO_2-Minderung im Verkehr. Ein Sachstandsbericht des Umweltbundesamtes. Berlin: UBA.

KRAUS, K., NIKLA, G., TAPPE, M. (1999): Aktuelle Bewertung des Einsatzes von Rapsöl/RME im Vergleich zu Dieselkraftstoff. Berlin: Umweltbundesamt. UBA-Texte 79/99.

KUCKARTZ, U., GRUNENBERG, H. (2002): Umweltbewusstsein in Deutschland 2002. Ergebnisse einer repräsentativen Bevölkerungsumfrage. Berlin: BMU.

KUHFELD, H., KUNERT, U. (2002): Große Unterschiede in der Abgabenbelastung von Personenkraftwagen in Europa. DIW-Wochenbericht 47/02, S. 811-819.

LANG, O., YAPICI, K. I., KEMPER, H., PISCHINGER, S. (2004): Downsizing mit variabler Verdichtung - Alternative oder Ergänzung zur Hybridisierung? In: AVL List GmbH (Hrsg.): Motor und Umwelt. Engine and Environment. Graz: AVL List GmbH, S. 175-182.

LÉONARDI, J., BAUMGARTNER, M., KRUSCH, O. (2004): CO2-Reduktion und Energieeffizienz im Straßengüterverkehr. Hamburg: Max-Planck-Institut für Meteorologie. Report 353.

LEXEN, G. (2002): Stadtbusse und Kommunalfahrzeuge mit Erdgasantrieb - Stand der Entwicklung. Gas, Wasser, Abwasser 82 (6), S. 391-395.

LIESEBACH, M., ZASPEL, I. (o. J.): Distribution and genetic diversity of Melampsora willow rusts in Germany. Waldsieversdorf: Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Institut für Forstgenetik und Forstpflanzenzüchtung.

MEHLIN, M., NOBIS, C., GÜHNEMANN, A., LAMBRECHT, U., KNÖRR, W., SCHADE, B. (2003): Flottenverbrauch 2010 – Aktivierung des Reduktionspotenzials und Beitrag zum Klimaschutz. Berlin: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt.

MERKER, G. P. (2002): Hat der Verbrennungsmotor eine Zukunft? Vortrag, Kurzfassung, Klasse für Ingenieurwissenschaften der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft.

METTE, R. (2003): Verwertung von Landschaftspflegeholz. Vortrag, Workshop "Potenziale und Entwicklungen der energetischen Biomassenutzung“ des BfN, 16.-19.06.2003, Internationalen Naturschutzakademie Insel Vilm.

MICHAELIS, P. (2004): Emissionshandel im motorisierten Individualverkehr. In: DÖRING, R., RÜHS, M. (Hrsg.): Ökonomische Rationalität und praktische Vernunft - Gerechtigkeit, ökologische Ökonomie und Naturschutz. Würzburg: Königshausen & Neumann, S. 178-191.

MUNACK, A., CAPAN, E., SCHRÖDER, O., STEIN, H., KRAHL, J. (2003): Untersuchung von Biodiesel und seinen Gemischen mit fossilem Dieselkraftstoff auf limitierte Emissionen. Braunschweig: Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Institut für Technologie und Biosystemtechnik.

MWV (Mineralölwirtschaftsverband) (2004). Zusammensetzung der Kraftstoffpreise. Hamburg: MWV. http://www.mwv.de/Statistiken_Grafiken.html. (15.12.2004).

MWV (2003). Jahresbericht 2003. Hamburg: MWV. http://www.mwv.de/Jahresbericht.html (15.12.2004).

NEUMANN, K.-H., SCHINDLER, K.-P. (2000): Zukünftige Fahrzeugantriebe. In: VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik (Hrsg.): Innovative Fahrzeugantriebe. Vorträge 1998-2002. CD-ROM. Düsseldorf: VDI-Verlag.

NITSCH, J., NAST, M., PEHNT, M., TRIEB, F., RÖSCH, C., KOPFMÜLLER, J. (2001): Schlüsseltechnologie Regenerative Energien. Teilbericht im Rahmen des HGF-Projektes "Global zukunftsfähige Entwicklung - Perspektiven für Deutschland". Stuttgart, Karlsruhe: DLR-Institut für Technische Thermodynamik, Forschungszentrum Karlsruhe.

OERTEL, D., FLEISCHER, T. (2001): Brennstoffzellen-Technologie. Hoffnungsträger für den Klimaschutz. Berlin: Erich Schmidt.

PEHNT, M. (2001): Ökologische Nachhaltigkeitspotenziale von Verkehrsmitteln und Kraftstoffen. Stuttgart: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt.

PRINS, M. J., PTASINSKI, K. J., JANSSEN, F. J. J. G. (2004): Exergetic optimisation of a production process of Fischer-Tropsch fuels from biomass. Fuel Processing Technology 86 (4), S. 375-389.

QUIRIN, M., GÄRTNER, S. O., PEHNT, M., REINHARDT, G. A. (2004): CO_2-neutrale Wege zukünftiger Mobilität durch Biokraftstoffe. Eine Bestandsaufnahme. Endbericht. Heidelberg: IFEU.

RAMESOHL, S., MERTEN, F., FISCHEDICK, M., BRÜGGEN, T. v. d. (2003): Bedeutung von Erdgas als neuer Kraftstoff im Kontext einer nachhaltigen Energieversorgung. Wuppertal: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. Wuppertal: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie.

RAUH, W., STÖGNER, R., KROMP-KOLB, H., PFAFFENBICHLER, P. (2001): Klimafaktor Verkehr - Wege zur klimaverträglichen Mobilität. Wien: Verkehrsclub Österreich.

REINHARDT, G. A., ZEMANEK, G. (1999): Ökobilanz Bioenergieträger. Basisdaten, Ergebnisse, Bewertungen. Berlin: Erich Schmidt.

RIEKE, H. (2002): Fahrleistungen und Kraftstoffverbrauch im Straßenverkehr. DIW-Wochenbericht 51-52/02, S. 881-889.

RNE (Rat für Nachhaltige Entwicklung) (2004a): Effizienz und Energieforschung als Bausteine einer konsistenten Energiepolitik. Berlin: RNE. Texte 14.

RNE (2004b): Waldwirtschaft als Modell für nachhaltige Entwicklung: ein neuer Schwerpunkt für die nationale Nachhaltigkeitsstrategie. Berlin: RNE. Texte 10.

RODE, M. W. (1999a): Influence of forest growth on former heathland on nutrient input and its consequences for nutrition and management of heath and forest. Forest Ecology and Management 114 (1), S. 31-43.

RODE, M. W. (1999b): The interaction between organic layer and forest growth and forest development on former heathland. Forest Ecology and Management 114 (1), S. 117-127.

RODE, M. W. (1997): Fließende Übergänge - Problematik und Chancen von Waldsukzessionsstadien an Waldrändern artenarmer Schutzgebiete. Natur- und Kulturlandschaft 2, S. 118-126.

RODE, M. W., SCHNEIDER, C., KETELHAKE, G., REIßHAUER, D. (2005): Naturschutzverträgliche Erzeugung und Nutzung von Biomasse zur Wärme- und Stromgewinnung. Bonn: BfN. BfN-Skripten 136.

SALBER, W., KEMPER, H., STAAY, F. v. d., ESCH, T. (2001): Der elektromechanische Ventiltrieb - Systembaustein für zukünftige Antriebskonzepte. Teil 2. Motortechnische Zeitschrift 62 (1), S. 44-55.

SCHEDEL, E. (2001): Rollwiderstandsoptimierte, energiesparende PKW-Reifen. In: Umweltbundesamt (Hrsg.): Klimagas-Minderung durch umweltorientiertes PKW-Flottenmanagement. Expertenworkshop im März 2001. Berlin: Umweltbundesamt. UBA-Texte 14/02, S. 133ff.

SCHMIDT, M., ISERMANN, R., LENZEN, B., HOHENBERG, G. (1998): Nebenaggregate und ihr Einfluß auf Verbrauch und Emissionen - Modelle, Simulationen, Messungen. In: VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik (Hrsg.): Innovative Fahrzeugantriebe. Vorträge 1998-2002. CD-ROM. Düsseldorf: VDI-Verlag.

SCHMITZ, N., WILKENING, L., HÖRING, K. (2003): Bioethanol in Deutschland. Verwendung von Ethanol und Methanol aus nachwachsenden Rohstoffen im chemisch-technischen und im Kraftstoffsektor unter besonderer Berücksichtigung von Agraralkohol. Münster: Landwirtschaftsverlag.

SRU (Rat von Sachverständigen für Umweltfragen) (2005): Umwelt und Straßenverkehr. Hohe Mobilität – Umweltverträglicher Verkehr. Sondergutachten. Baden-Baden: Nomos.

SRU (2004): Umweltgutachten 2004. Umweltpolitische Handlungsfähigkeit sichern. Baden-Baden: Nomos.

SRU (2002a): Umweltgutachten 2002. Für eine neue Vorreiterrolle. Stuttgart: Metzler-

Poeschel.

SRU (2002b): Für eine Stärkung und Neuorientierung des Naturschutzes. Sondergutachten. Stuttgart: Metzler-Poeschel.

SRU (2000): Umweltgutachten 2000. Schritte ins nächste Jahrtausend. Stuttgart: Metzler-Poeschel.

SRU (1998): Umweltgutachten 1998. Umweltschutz: Erreichtes sichern - Neue Wege gehen. Stuttgart: Metzler-Poeschel.

STEIGER, W. (2003): Die Antriebs- und Kraftstoffstrategie der Volkswagen AG. Vortrag, Evangelische Akademie Loccum, Energie und Antriebe für die Mobilität der Zukunft, 07.11.2003, Rehburg-Loccum.

STEIGER, W. (2002): SunFuel-Strategie. Basis nachhaltiger Mobilität. Solarzeitalter 14 (3), S. 34-40.

STOLTEN, D., BIEDERMANN, P., HAART, L. de, HÖHLEIN, B., PETERS, R. (2002): Brennstoffzellen. In: REBHAN, E. (Hrsg.): Energiehandbuch. Gewinnung, Wandlung und Nutzung von Energie. Berlin: Springer, S. 446-509.

THIELE, E., MERKER, G. P. (2004): Neue emissionssparende Fahrzeugkonzepte. In: Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (Hrsg.): Auto(mobil) und Umweltschutz. Technik und Fahrverhalten - an welchen Rädern dreht der Fahrer? Fachtagung am 29. Januar 2004. Augsburg: LfU, S. 54-66.

UBA (Umweltbundesamt) (2004): Umweltdaten Deutschland Online. Kraftstoffverbrauch. http://www.env-it.de/umweltdaten (02.12.2004).

US Department of Energy (2004): President's Hydrogen Initiative. Washington, DC. http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/presidents_initiative.html (15.12.2004).

VDA (Verband der Automobilindustrie) (2004a): Marktgewichteter Kraftstoffverbrauch von Pkw/Kombi aus deutscher Produktion (ohne Transporter-Kombi). http://www.vda.de/de/aktuell/kraftstoffverbrauch/ index.html (09.09.2004).

VDA (2004b): Analysis of CO_2-Emissions and Road Fuel Consumption in Germany 2002/2003. Vortrag, Comité des Constructeurs Français d'Automobiles, 18.05.2004, Paris.

VDA (2004c): Auto 2004. Jahresbericht 2004. Frankfurt a. M.: VDA.

VDA (2003): Auto 2003. Jahresbericht 2003. Frankfurt a. M.: VDA.

VDA (2002): Auto 2002. Jahresbericht 2002. Frankfurt a. M.: VDA.

VDA (2001): Mobilität und Klimaschutz. Frankfurt a. M.: VDA.

VES (Verkehrswirtschaftliche Energiestrategie) (2001): Zweiter Statusbericht der Task-Force an das Steering Committee. Berlin: BMVBW.

Victoria Transport Policy Institute (2004): Transportation Elasticities: How prices and other Factors affect travel behavior. Victoria: VTPI. http://www.vtpi.org/tdm/tdm11.htm.

WALLENTOWITZ, H., NEUNZIG, D. (2001): FORFAHRT. Fahrzeugautonome und infrastrukturgestützte Fahrweise mit innovativer Antriebstechnologie. Abschlussbericht. Aachen: Institut für Kraftfahrwesen. ika Bericht 9304.

WB BMVBW (Wissenschaftlicher Beirat beim Bundesminister für Verkehr, Bau und Wohnungswesen) (2002): Ressourcenschonung durch zukünftige Technologien. Potentiale im Straßen- und Luftverkehr. Entwurfsfassung. Berlin.

WEIß, J.-P. (2000): Die Deutsche Automobilindustrie im internationalen Wettbewerb. DIW-Wochenbericht 12/00, S. 168-173.

Wissenschaftlicher Beirat beim Bundesverkehrsministerium (1992): Marktwirtschaftliche Instrumente zur Reduktion von Luftschadstoffemissionen des Verkehrs. Zeitschrift für Verkehrswissenschaft 63 (2), S. 114-133.

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, Max-Planck-Institut für Chemie (2005): Treibhausgasemissionen des russischen Erdgas-Exportpipeline-Systems. Ergebnisse und Hochrechnungen empirischer Untersuchungen in Russland. Wuppertal: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie.

ZERLE, P. (2004): Kooperationslösungen zwischen Staat und Wirtschaft: Selbstverpflichtungen als umweltpolitisches Instrument. Augsburg, Universität, Dissertation. http://www.opus-bayern.de/uni-augsburg/volltexte/2005/95/.