

Bedeutung alternativer Antriebe und Kraftstoffe für den Ressourcen- und Klimaschutz

Martin Pehnt, Joachim Nitsch

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt; Pfaffenwaldring 38-40, 70569 Stuttgart
Tel. 0711-6862-642; e-Mail: martin.pehnt@ifeu.de

Einführung

Der Verkehrssektor expandiert. Allein die Anzahl der Kraftfahrzeuge hat sich von 8 Millionen (1960) auf fast 51 Millionen (2000) erhöht. Die Verkehrsleistung im *Personenverkehr* hat sich im selben Zeitraum fast vervierfacht. 534 Mrd. Fahrzeugkilometer wurden 1999 allein mit Pkw und Kombis zurückgelegt (**Abbildung 1**). Im *Güterverkehr* hat die Verkehrsleistung innerhalb der letzten 40 Jahre von 142 auf 491 Mrd. tkm zugenommen. In dieser Expansion finden das ausgeprägte Bedürfnis der Menschen nach Mobilität, ihr wachsender Wohlstand und der anschwellende Warenstrom einer expandierenden, globalisierten Wirtschaft ihren unübersehbaren Ausdruck. Auch zukünftig werden weiterhin wachsende Fahrzeugzahlen und Verkehrsleistungen erwartet [1, 2].

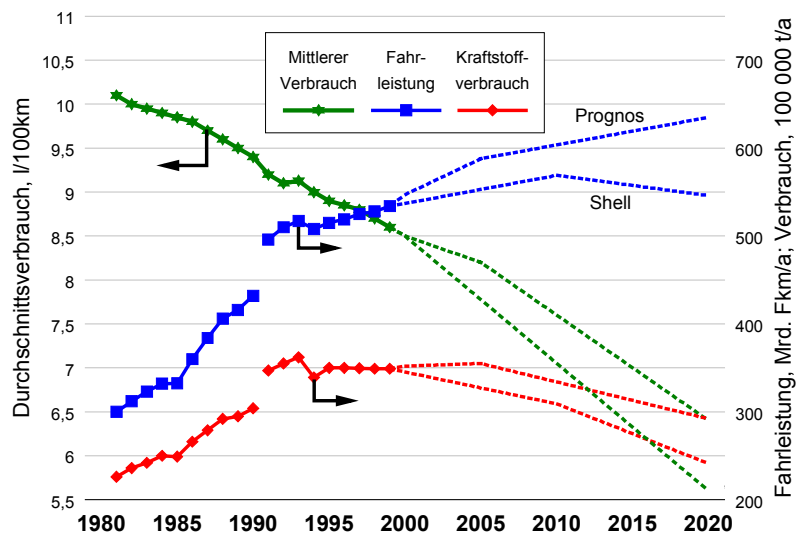


Abbildung 1 Verlauf von Fahrleistung, Durchschnittsverbrauch und Kraftstoffverbrauch der deutschen PKW (und Kombi) zwischen 1980 und 1999 und Tendenzen für die nächsten 20 Jahre [1-3]. Obere Linie jeweils Prognos, untere Linie Shell "Kreative Vielfalt"

Diese Wachstumstendenzen sowie höhere Fahrzeuggewichte und größere Motorleistungen führten trotz erzielter Erfolge beim Verbrauch der Fahrzeuge zu ansteigendem Verbrauch und Treibhausgas-Emissionen. Knapp 3.300 PJ/a Primärenergieverbrauch und 190 Mio. t CO₂/a (1999) (22 % der deutschen Kohlendioxidemissionen) kennzeichnen den Verkehrsbereich. Hinzu kommen ca. 1600 PJ/a für die Herstellung von Fahrzeugen bzw. Bau, Wartung und Betrieb von Verkehrsinfrastruktur. Greift die Selbstverpflichtung der deutschen Automobilindustrie, bis zum Jahr 2008 den durchschnittlichen Normverbrauch aller neuen PKW um 25 % gegenüber dem Stand von 1990 zu reduzieren, so ist trotz deutlich

wachsender Fahrleistung immerhin nur mit einem schwachen Anstieg [1], möglicherweise sogar leichten Rückgang des Kraftstoffverbrauchs [2] und damit auch der CO₂-Emissionen in den nächsten Jahren zu rechnen. Dies reicht jedoch nicht aus, um den vom Sektor Verkehr zu erbringenden Beitrag einer deutlichen Reduktion von CO₂-Emissionen zu leisten, zumal im Güterverkehr vorerst ähnliche Tendenzen nicht zu erwarten sind.

These 1: Der Einsatz regenerativer Kraftstoffe ist für den Klima- und Ressourcenschutz sinnvoll und möglich. Der großflächige Einsatz im Verkehrsbereich sollte jedoch erst in einigen Dekaden erfolgen.

Die Endlichkeit von Rohöl als Primärenergiequelle für die meisten Kraftstoffe kann nicht in Frage gestellt werden. In den letzten Jahrzehnten hat die Zahl der Neufunde kontinuierlich abgenommen. Lediglich der Zeitpunkt der Ressourcenerschöpfung ist Gegenstand der aktuellen Diskussion. Die meisten Studien gehen davon aus, dass der Mid Depletion Point, also das Maximum der weltweiten Rohölproduktion, in fünf bis spätestens 15 Jahren erreicht sein wird. Neben der begrenzten Reichweite erweist sich zudem die Konzentration der Vorkommen auf OPEC-Länder als brisant vor allem vor dem Hintergrund ressourcenorientierter Konflikte. In einer langfristig orientierten Kraftstoff-Strategie ist der Einsatz von erneuerbaren Primärenergieträgern daher in spätestens zwei bis drei Dekaden unvermeidbar.

Zur Einführung erneuerbarer Primärenergieträger in den Verkehrssektor bieten sich eine Reihe unterschiedlicher Umwandlungsketten auf Basis erneuerbar erzeugten Stroms, auf Basis von Biomasse und Kombinationen von beiden an. Die Herstellung erneuerbarer Kraftstoffe zeichnet sich durch einen sehr geringen Verbrauch erschöpflicher Ressourcen und damit korrespondierend niedrige Emissionen von Treibhausgasen aus [4, 5].

Trotz der guten ökologischen Ausgangssituation stellt sich die Frage nach Kriterien für die *Sinnhaftigkeit eines Einsatzes erneuerbarer Energieträger im Verkehr* bzw. für eine unter Berücksichtigung der Potenziale und Kosten optimale Zeitstrategie. Neben den – vor allen Dingen langfristigen – Erfordernissen der Einführung regenerativer Kraftstoffe gibt es auch Argumente gegen ihre zu rasche Einführung, d. h. für eine zeitlich abgestimmte Nutzungsstrategie:

Potenziale und Nutzungskonkurrenz. Die genaue Analyse der Potenziale regenerativer Energien offenbart, dass es zwar ein bedeutendes Potenzial für den Einsatz regenerativer Energien gibt (**Abbildung 2**).

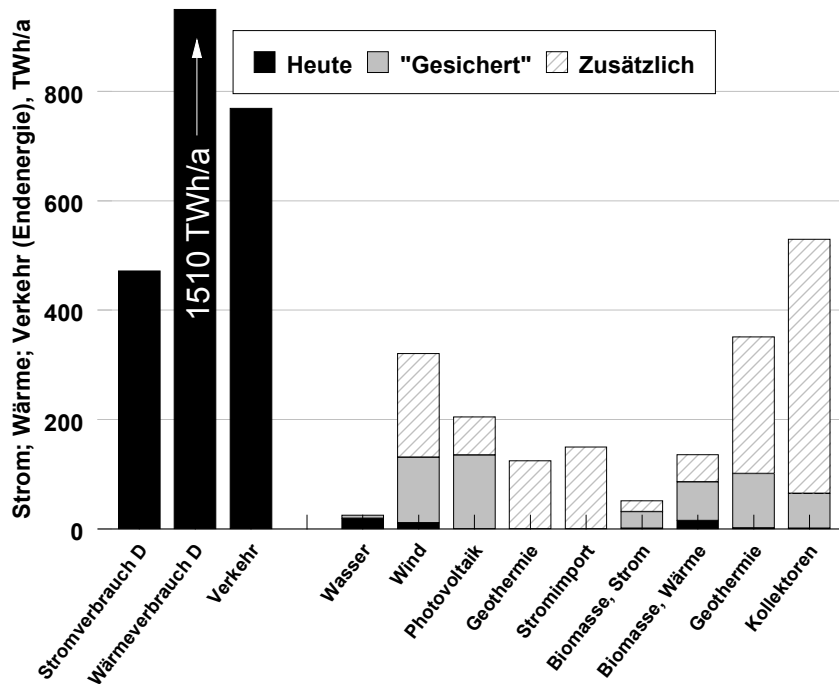


Abbildung 2 Technisches Referenzpotenzial für die Nutzung erneuerbarer Energiequellen [6]

Das Potenzial an Biomasse, das für den Kraftstoffbereich von besonderem Interesse ist, teilt sich auf in Restholz zur energetischen Nutzung (120 bis 230 PJ/a), Stroh (120-300 PJ/a), Landschaftspflegeheu (10 PJ/a) und organische Rest- und Abfallstoffe zur Vergärung (80 PJ/a) (z. Vgl. Endenergieverbrauch des Verkehrs 1999: 2775 PJ). Hinzu kommt der mögliche Beitrag von Energiepflanzen, dessen Höhe stark von agrarpolitischen und ökologischen Vorgaben abhängt. Für die regenerative Kraftstoffbereitstellung ebenfalls interessant ist regenerativ erzeugter Strom, der via Elektrolyse in Wasserstoff umgewandelt werden kann. Innerhalb Europas ist hier insbesondere das hohe Windkraftpotenzial (v. a. off-shore) zu nennen. Außerdem bestehen vor allem im Sonnengürtel enorme, auch entwicklungspolitisch interessante Solarstrompotenziale (> 1.000.000 TWh/a), die insbesondere durch solarthermische Kraftwerke und Stromimport via Hochspannungsgleichstromübertragung erschlossen werden könnten [6].

Bei den Potenzialbetrachtungen gilt es aber gleichfalls abzuwägen

- zwischen der regenerativen Kraftstoffherzeugung und dem Einsatz regenerativer Energieträger in der stationären Strom- und Wärmeversorgung, also etwa der Substitution von Heizöl durch Biomasse oder von Kohlestrom durch regenerativ erzeugte Elektrizität;
- zwischen der Kraftstoffherzeugung auf Energiepflanzenbasis und der Extensivierung/Ökologisierung (Freiflächen, Vermeidung von Monokulturen) der Landwirtschaft.

Hinzukommt, dass nicht nur der motorisierte Individualverkehr Kraftstoff in Form von Benzin und Diesel nachfragt. Auch andere "Kraftstoffe" werden eingesetzt. Der Fahrstrombedarf von Bundesbahn, S- und U-Bahnen beträgt rund 50 PJ. Zusätzlich fließt Strom in Form "grauer Energie" auch in die Herstellung der Fahrzeuge (150 PJ), in die

Kraftstoffbereitstellung und in Vertrieb und Wartung von Straßenfahrzeugen [4], so dass ein bedeutendes Potenzial zur Senkung der mit Mobilität verbundenen Umwelteinwirkungen allein durch eine "Ökologisierung" der Strombereitstellung erfolgen kann.

Auch der oft propagierte Einsatz von Wasserstoff zur Dämpfung der Fluktuation regenerativer Energiebereitstellung ist ein langfristig relevanter Aspekt (regenerative Anteile > 30 %), da zuvor eine Reihe von Maßnahmen ergriffen werden können, um den Überschuss/Speicherbedarf bzw. den zu deckenden Reststrombedarf zu mindern [6, 7].

"Ökoeffizienz". Ein wesentlicher Faktor für den Zeitpunkt des Einsatzes regenerativer Kraftstoffe ist der ökoeffiziente Einsatz der regenerativen Primärenergieträger. Dieser hängt von der Substitutionswirkung des gewählten Einsatzsegmentes ab. Mit anderen Worten: wieviel CO₂-Emissionen oder andere Umweltwirkungen können vermieden werden, indem regenerative Energieträger verwendet werden?

Während eine kWh Strom im derzeitigen, relativ ineffizienten und kohlelastigen Erzeugungssystem zu 680 g CO₂ führt, verursacht die Produktion und Verbrennung von 1 kWh Benzin lediglich ca. 300 g. Die Substitution konventionellen Stroms durch regenerative Primärenergieträger ist also unter Klimagesichtspunkten mehr als doppelt so effizient wie der Ersatz von Benzin durch diese. Der optimale Einsatz von regenerativ hergestellten Kraftstoffen im Verkehr ist allerdings eine Funktion der Zeit (**Abbildung 3**). Die zunehmende Durchdringung des Kraftwerksparks durch klimaneutrale Primärenergieträger und die Substitution von Kohle durch Erdgas werden zu sinkenden CO₂-Emissionen führen, gebremst jedoch durch den Ausstieg aus der Kernenergie. Andererseits wird die Benzinherstellung durch zunehmende Ressourcenverknappung und die steigenden Reinheitsanforderungen zu wachsenden Emissionen führen. Auch aus Gründen der Ökoeffizienz erweist sich der Einsatz erneuerbarer Energieträger also vor allem auf einer langfristigen Zeitskala als dringend geboten.

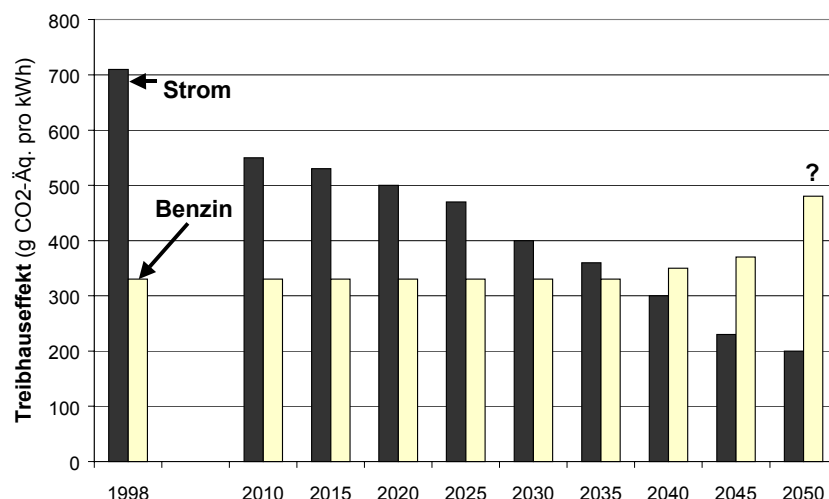


Abbildung 3 Mögliche Entwicklung der CO₂-äquivalenten Emissionen im Strombereich (schwarze Balken) in einem solaren Langfristszenario [8] sowie CO₂-äquivalente Emissionen durch Benzinherstellung (gelbe Balken)

Kosten regenerativer Kraftstoffe. Der Einsatz regenerativer Kraftstoffe muss sich neben den Potenzialen und der ökologischen Substitutionswirkung auch an der Kostensituation orientieren (**Abbildung 4**). Die Umwandlung – in der Regel bereits teurer – regenerativer Primärenergieträger in Kraftstoffe bedeutet auf absehbare Zeit einen deutlichen zusätzlichen Aufpreis. Die Kosten von Kraftstoffen auf Biomasse-Basis (ohne Holz aus Energieplantagen) bewegen sich in einer Bandbreite zwischen 4 und 11 Pf/kWh und sind somit deutlich höher als die Herstellungs-/Verteilungskosten von Benzin. Zukünftiger regenerativer Strom liegt hingegen durchaus im Bereich der Kosten der Endverbraucherebene (Haushalte). Die Kostenschere zwischen regenerativen und fossilen Endenergieträgern ist also bei Kraftstoffen deutlich höher als im Stromsektor.

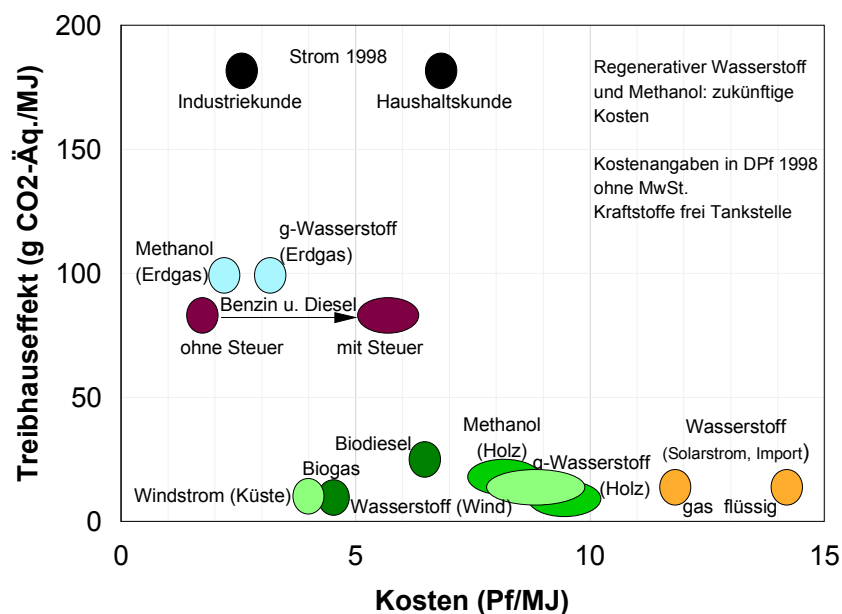


Abbildung 4 Kosten und Treibhausgas-Emissionen verschiedener fossiler und regenerativer Kraftstoffe

Von strategischer Bedeutung für die Bewertung des Einsatzes regenerativer Primärenergieträger im Verkehr ist allerdings die zukünftige Preisentwicklung, da sich durch eine relative Verschiebung der Preisentwicklungen im mobilen und stationären Bereich, also beispielsweise durch einen überproportionalen Anstieg der Rohölkosten, eine Verschiebung des Zeitpunktes ergeben kann, zu dem der Einsatz im mobilen Sektor attraktiver wird. Prognos geht beispielsweise von einer Verdreifachung der Rohölpreise bis 2050 aus, während der Strompreis bis 2010 leicht fällt und dann moderat ansteigt [9]. Damit wird die Substitution von Rohöl-basierten Kraftstoffen attraktiver.

These 2:

Bei der Bewertung neuer Antriebe muss der gesamte Lebenszyklus berücksichtigt werden. Insbesondere die Produktion der Fahrzeuge wird an Bedeutung gewinnen.

Für einen vollständigen Vergleich neuer Antriebssysteme muss neben der Bereitstellung der Kraftstoffe und der Nutzung des Fahrzeugs auch die Produktion des Antriebssystems und des Fahrzeugs berücksichtigt werden. Bei konventionellen PKW führt dies in der Regel zu

Emissionen, die zwischen zehn und 25 % der gesamten, über den Lebenszyklus ermittelten Emissionen betragen (siehe z. B. [10]). Ökobilanzen von Brennstoffzellenfahrzeugen weisen daraufhin, dass die Aufwendungen, u. a. aufgrund der hohen Umweltrelevanz der Katalysatormaterialien, höher sind als die Aufwendungen für die Herstellung eines konventionellen PKWs [11]. Die Treibhausgasemissionen für die Herstellung eines typischen Brennstoffzellenfahrzeuges sind knapp doppelt so hoch wie für einen Ottomotor-PKW, die Versauerung wegen der SO₂-Emissionen durch die Gewinnung der Katalysatoren aus schwefelhaltigen Erzen noch höher.

Auch aus Ressourcenerwägungen ist ein weitgehendes *Recycling* der Antriebssysteme unerlässlich. Zwar wurde der Gehalt an Platingruppen-Metallen (PGM) seit den 1960er Jahren um einen Faktor 2000 reduziert. Aber dennoch führt eine weitflächige Einführung von Brennstoffzellen-Systemen zu einer erheblichen Bindung dieser Edelmetalle, die auch angesichts der geografischen Konzentration der Reserven (94 % in Südafrika) kritisch ist.

In [12] wird basierend auf relativ optimistischen technischen Annahmen, allerdings hohen Fahrzeugzahlen und einer dynamischen Durchdringung des Pkw-Marktes mit Brennstoffzellenfahrzeugen berechnet, dass bereits in 50 Jahren die Reserven und in 60 Jahren die Ressourcen verbraucht sind (**Abbildung 5**). Eine solche Nachfrage könnte nur unter enormen Anstrengungen der Minenbetreiber mit Wachstumsraten von jährlich 3 % bzw. 32 Mg im kommenden Jahrhundert erfüllt werden. Dieser absolute Zuwachs wäre historisch einmalig (Durchschnitt 1940-2000: 2,6 Mg/a).

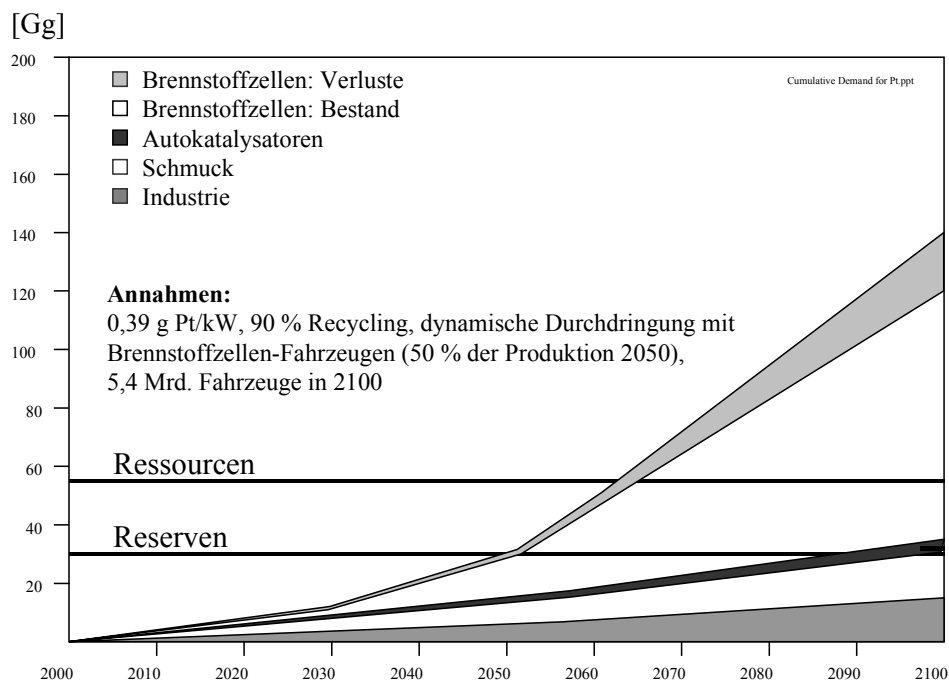


Abbildung 5 Zukünftiger Verbrauch an Primärplatin in einem Szenario nach [12]

These 3:

Das Rennen zwischen den Antriebssystemen bleibt spannend. Brennstoffzellen reduzieren den Kraftstoffbedarf und andere Umweltwirkungen gegenüber heute deutlich. Aber auch Verbrennungsmotoren haben ein beträchtliches Optimierungspotenzial.

In der Vergangenheit hat es erhebliche Weiterentwicklungen im Fahrzeugsektor gegeben. Neben einem sinkendem spezifischen Kraftstoffverbrauch (Abbildung 1) kommt dies vor allem im deutlichen Rückgang der lokalen Emissionen von Luftschadstoffen infolge neuer Motor- und Abgastechnologien und sauberer Kraftstoffe zum Ausdruck. Die weitere Absenkung der Abgasgrenzwerte (Euro 4,5; SULEV) werden diese Emissionen in den nächsten zwei Jahrzehnten auf etwa ein Zehntel ihrer Spitzenwerte von Anfang der 90er Jahre sinken lassen. Die Schadstoffemissionen können dann gegen Null gehen, wenn der Elektroantrieb anstelle des herkömmlichen Verbrennungsmotors eingeführt wird. Seine Nutzung setzt jedoch den Einsatz neuer Energieumwandlungsketten voraus, wie Elektrizität beim reinen Elektroantrieb oder Wasserstoff bzw. Methanol für Brennstoffzellenfahrzeuge. Auf Grund dieser komplexen Wechselwirkungen können neue Antriebskonzepte nicht nur nach der Effektivität des Fahrzeugantriebes („vom Tank zum Rad“) beurteilt werden, sondern es muss die komplette Herstellungskette „neuer“ Kraftstoffe und die Problematik der erforderlichen Änderungen der Infrastruktur in die Betrachtung einbezogen werden.

Der **Kraftstoffbedarf** hängt von verschiedenen Parametern ab. Neben den Wirkungsgraden des Antriebssystems, dem Gewicht des Fahrzeugs und der Auslegung des Systems sind auch nutzerabhängige Parameter relevant für die Beurteilung. So verschieben sportliches Fahrverhalten und häufiges Beschleunigen den Vergleich zu Ungunsten der Brennstoffzelle, weil Brennstoffzellen bei Vollast einen geringeren Wirkungsgrad haben als bei Teillast.

Ein Problem bei der Bewertung von Brennstoffzellen-Fahrzeugen ist die Bandbreite der errechneten Kraftstoffeinsparpotenziale, die neben den oben genannten Faktoren vor allem auch von den Annahmen bezüglich des Verbrennungsmotors abhängen. Das Verhältnis des Kraftstoffbedarfs eines Verbrennungsmotors zu dem von Brennstoffzellen ("Kraftstoffbedarfsverhältnis") streut in der Literatur zwischen 1,25 und 3 beim Wasserstoff-Brennstoffzellen-Fahrzeug und zwischen 1,1 und 2,3 beim Methanol-Antrieb (**Abbildung 6**).

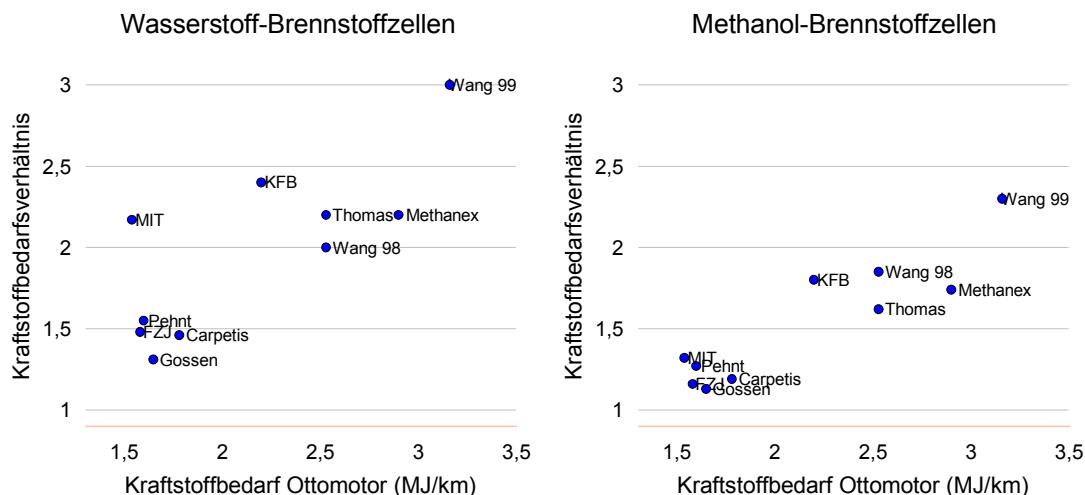


Abbildung 6 Kraftstoffbedarfsverhältnis (Kraftstoffverbrauch Ottomotor/Kraftstoffverbrauch Brennstoffzelle) für Pkws in verschiedenen Studien

Wir gehen in den weiteren Betrachtungen von Berechnungen in [13, 14] aus (**Tabelle 1**). Die über den gesamten Fahrzyklus bilanzierten Wirkungsgrade der Brennstoffzellenantriebe mit Wasserstoff und Methanol liegen deutlich über denjenigen fortschrittlicher Motorantriebe

(Status 2010). Besonders effiziente Antriebssysteme sind autonome (parallele) *Hybridantriebe*, also Kombinationen von Verbrennungsmotor mit Elektromotor und Pufferbatterie, die vorwiegend im optimalen Wirkungsgradbereich bei reduzierten Leerlaufverlusten betrieben werden können und eine einfache Rückgewinnung von Bremsenergie ermöglichen. Für Hybridantriebe mit Brennstoffzellen ist die erreichbare Einsparung weniger ausgeprägt, da das elektrische Wandlungssystem ohnehin schon sehr effizient ist und der Pufferbetrieb der Batterie ebenfalls verlustbehaftet ist.

Tabelle 1 Typische Nettowirkungsgrade des Antriebs im Referenzfahrzyklus und resultierender Kraftstoff- und Primärenergieverbrauch für ein Referenzfahrzeug [13, 14]

Antrieb und Kraftstoff	Wirkungsgrad %	Kraftstoff- bedarf (MJ/km)
Ottomotor (Benzin)	23	1,6
Dieselmotor	26	1,43
Ottomotor (Wasserstoff)	25	1,51
Ottomotor (Methanol)	26	1,44
Dieselmotor Hybrid (mit Bremsenergie­rückgewinnung)		1,12
Brennstoffzelle (Methanol)	33	1,26
Brennstoffzelle (Wasserstoff)	40	1,03
Brennstoffzelle (Wasserstoff mit Bremsrückgewinnung)		0,93
Brennstoffzelle (Methanol; reduzierte Masse)	35	1,13
Brennstoffzelle (Wasserstoff, reduzierte Masse)	41	0,93
Brennstoffzelle (Wasserstoff mit Bremsrückgewinnung; reduzierte Masse)		0,85

Fahrzeug: 750 kg Leergewicht ohne Antrieb; Fahrzyklus: NEFZ plus Autobahnfahrt gemäß [13].
 Fahrzeuggewichte inkl. Antrieb und Fahrer: Benzin 1030 kg, Diesel 1090 kg, H₂-Otto 1070 kg, MeOH-Diesel
 1110 kg, H₂-BZ 1350 kg, MeOH-BZ 1440 kg. Reduzierte Masse: Antriebsgewicht um ein Drittel reduziert.

Die **Gesamtergebnisse** eines ökobilanziellen Vergleichs (Herstellung, Entsorgung und Betrieb der Fahrzeuge, Kraftstoffbereitstellung) verschiedener Antriebs- und Kraftstoffoptionen zeigt **Abbildung 7** für zwei ausgewählte Umweltwirkungen, nämlich die Treibhausgasemissionen und die Emissionen kanzerogener Schadstoffe (vor allem Dieselpartikel) unter Annahme zukünftiger Fahrzeuge.

Die Klimabilanz macht deutlich, dass der Energieträger einen deutlicheren Effekt bewirkt als der Antrieb. Durch Einsatz von Biomasse, Wasserkraft oder anderer regenerativer Energieträger lassen sich diese Umweltwirkungen deutlich senken. Ein höherer Wirkungsgrad neuer Antriebskonzepte ist bei diesen Primärenergieträgern ökologisch weniger wichtig. Günstig ist der bessere Wirkungsgrad jedoch wegen der höheren Brennstoffkosten und begrenzten Potenziale vieler erneuerbarer Energieträger.

Einsparungen von ca. 15 % lassen sich bei Einsatz von fossilem Wasserstoff gegenüber Benzin-Ottomotoren erzielen. Hinzu kommt, dass keine CO₂-Emissionen in mobilen Quellen anfallen. Eine eventuelle CO₂-Entsorgung ist dadurch begünstigt. Ähnlich niedrige Emissionswerte erreichen allerdings auch Motor-Hybrid-Fahrzeug (mit

Bremsenergieerückgewinnung) auf Dieselmotorbasis. Deutlich darunter kommt nur die Brennstoffzellen-Hybrid-Version. Dagegen erreichen mit Methanol aus Erdgas betankte Brennstoffzellen-Fahrzeuge keine Vorteile bei Klimagasemissionen gegenüber Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren.

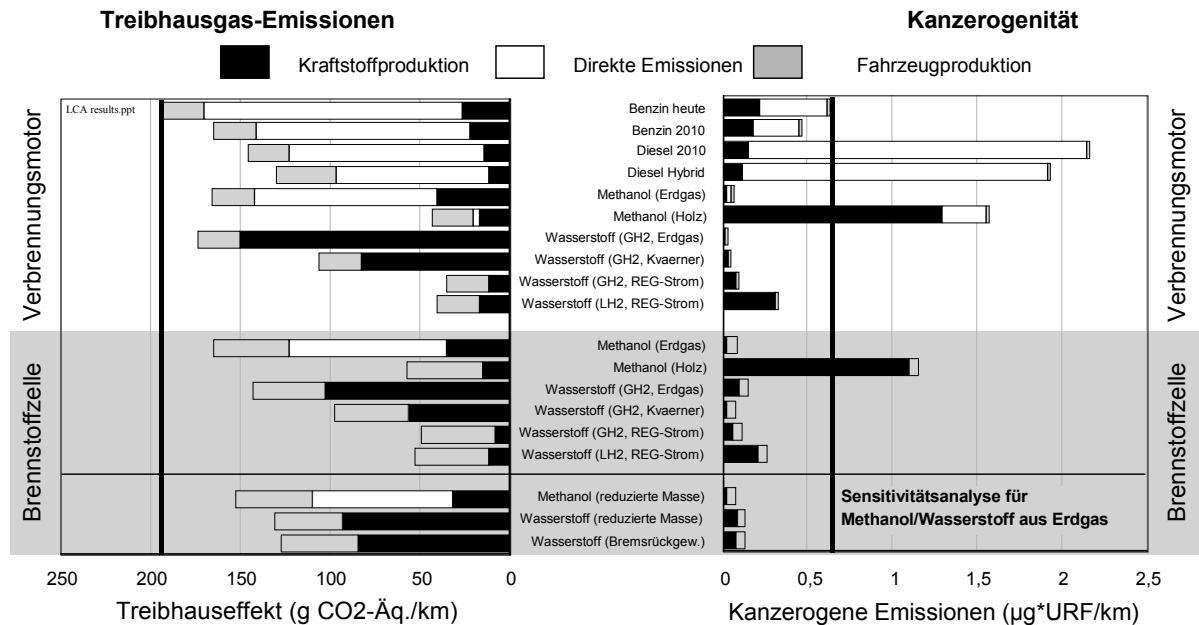


Abbildung 7 Klimarelevante und kanzerogene Emissionen neuer Fahrzeugantriebe

Fahrzeuge gemäss **Tabelle 1**. Emissionsstandard Verbrennungsmotoren: Euro 4. Regenerativer H₂: Elektrolyse aus Wasserkraft. GH₂: Stromtransport mit HGÜ nach Deutschland. LH₂: Wasserstofftransport mit Schweröltanker. Quellen: Bilanz der Kraftstoff- und Fahrzeugproduktion gemäss [14], Brennstoffzellen und Verbrennungsmotor nach [14] außer: Hybrid (abgeschätzt nach [13, 15]) und Diesel-Hybrid [16]. URF: Unit Risk-Faktoren

Allen Brennstoffzellenantrieben ist jedoch gemeinsam, dass sie lokal praktisch emissionsfrei sind. So entstehen beispielsweise NO_x-Emissionen lediglich bei der Herstellung der Kraftstoffe und Fahrzeuge. Die Kanzerogenität (**Abbildung 7** rechts) ist vor allem bei den Dieselfahrzeugen ausgeprägt, insbesondere durch die Partikelemissionen. Partikelfilter für Dieselfahrzeuge sind daher eine vordringliche Maßnahme zur Verbesserung der Umweltbilanz des Dieselfahrzeuges. Brennstoffzellenfahrzeuge zeichnen sich durchgängig durch extrem niedrige kanzerogene Emissionen aus. Die kanzerogenen Emissionen aus der biogenen Methanolkette stammen aus der Holzbereitstellung. Zu berücksichtigen ist, dass das absolute Emissionsniveau bereits sehr gering ist, da die Dieselfahrzeuge den Stand Euro 4 widerspiegeln; die Skala dieser Grafik weist also sehr geringe absolute Werte auf. Eine vollständige Bewertung neuer Antriebssysteme muss auch sehr sorgfältig auf die *zukünftigen Entwicklungspotenziale* der einzelnen Technologien eingehen. Diese sind für die etablierte Technologie des Verbrennungsmotors präziser abschätzbar als für das neuartige, nur in Versuchsträgern vorhandene Brennstoffzellensystem. Z. T. sind die Optimierungsmöglichkeiten in allen Fahrzeugen realisierbar und betreffen den Luft- und Rollwiderstand, die Reduktion der Karosseriemasse und des Verbrauchs der Nebenaggregate u. ä. Die Realisierung dieser Reduktionspotenziale ist für die Brennstoffzelle von besonderer Bedeutung, weil durch kleinere notwendige Antriebsleistung

und -energie die Probleme der Wasserstoffspeicherkapazität, des Gewichts, Volumens und der Kosten des Antriebs an Bedeutung verlieren.

Aber auch antriebsbezogen gibt es Optimierungsmöglichkeiten. Beim Benzin-Verbrennungsmotor sind z. B. durch Direkteinspritzung, variable Ventilsteuerzeiten oder Hubraumverkleinerung mit mechanischer Aufladung Einsparpotenziale zwischen 8 und 15 % erzielbar [4, 17]. Auch beim Dieselmotor dürfte innerhalb einer Dekade eine Verbrauchsreduktion möglich sein (Common Rail, Pumpe/Düse), wobei der Schwerpunkt bei der Reduktion der Emissionen, vor allem der Partikel, liegen wird. Bei der Brennstoffzelle ist neben einer Steigerung der Wirkungsgrade von Stack und Peripherie vor allem durch ein verstärktes Lastmanagement (Abschalten von Teilen der Peripherie im Stillstand etc.) und durch Gewichtsreduktion eine Verbrauchsminderung möglich.

These 4: Brennstoffzellen werden verzögert, dann aber dynamisch in den Markt eintreten. Ausschlaggebend hierfür werden insbesondere auch nicht ökologische Aspekte sein.

Die Ergebnisse des Gesamtvergleichs zeigen also zum einen den engen Zusammenhang zwischen den günstigen Ausgangsbedingungen des alternativen Antriebssystems „Elektromotor mit Brennstoffzelle“, nämlich gute Wirkungsgrade und lokale Emissionsfreiheit, und den Nachteilen, welche bei der Bereitstellung der entsprechenden Kraftstoffe in Kauf genommen werden müssen, solange diese aus fossilen Primärenergien stammen. Zum anderen wird die sehr hoch anzusetzende „Meßlatte“ der konventionellen Antriebe sichtbar. Neben den Umweltvorteilen sind mit Brennstoffzellenfahrzeugen aber auch *andere*, für Elektrofahrzeuge charakteristische *Vorteile* erschließbar, beispielsweise geringere Geräuschemissionen (s. u.), die einfache Integration elektrischer Peripherie und Kompatibilität mit Drive by wire und Autopilot-Technologien, das bessere Fahrverhalten und die höhere Sicherheit aufgrund möglicher Neugestaltungen der Fahrgastzelle und einer dezentralen Massenverteilung. Möglicherweise entscheiden gerade diese Gesichtspunkte maßgeblich über den Eintrittszeitpunkt von Brennstoffzellen in den Automobilmarkt.

Eine rasche und sehr weitgehende Verdrängung des Verbrennungsmotors ist aber nicht zuletzt aus *Kostengründen* unwahrscheinlich. Im Automobilbereich sind die Kostenkriterien für Energiewandler wesentlich schärfer als im Bereich des stationären Einsatzes. Heutige Verbrennungsmotoren kosten 40 bis 70 DM/kW_{mech}, was in erster Linie auf eine ausgereizte Fertigungstechnik und auf jährliche Produktionsvolumina von mehreren Millionen Einheiten zurückzuführen ist. Gegenüber den Zielkosten zeigen Kostenabschätzungen auf der Basis dieser Bottom-up-Modellen Kosten, die einen Faktor 5 bis 10 zu hoch sind, wenn von Großserienfertigung mit heutigen technischen Parametern ausgegangen wird [18].

Bei den erforderlichen großen Stückzahlen für Brennstoffzellen-Fahrzeuge werden gleichzeitig großflächige Umstellungen der heutigen *Kraftstoffinfrastruktur* und Investitionen in neue Produktionsstätten für Wasserstoff oder Methanol erforderlich. Die dazu vorliegenden Kostenabschätzungen sind durch eine sehr große Bandbreite gekennzeichnet und liegen zwischen mehreren Hundert und einigen Tausend DM pro Fahrzeug in Abhängigkeit von der Nachfrage [19, 20]. Diese Kosten können nur sehr begrenzt auf die Verbraucher umgelegt werden, da die Treibstoffkosten sich nicht wesentlich von denjenigen herkömmlicher Treibstoffe unterscheiden dürfen. Je nach anfallenden Zusatzkosten müsste also die Bereitschaft bestehen, durch entsprechend reduzierte Steuern – zumindest für eine

Einführungsphase – einen Ausgleich zu schaffen. Dies lässt sich zwar aus ökologischer Sicht rechtfertigen, würde aber die öffentlichen Haushalte um beträchtliche Einnahmen bringen. Dagegen könnte der Weg einer Mehrbesteuerung der herkömmlichen Kraftstoffe zum Ausgleich von Kostenunterschieden genutzt werden, um alternative Kraftstoffe und damit auch Brennstoffzellenfahrzeuge bevorzugt in den Markt einzuführen.

These 5:

Ökologisch optimierte Antriebe und Kraftstoffe sind möglich und auch notwendig, aber nicht hinreichend für eine nachhaltige Mobilität.

Die vorausgehenden Ausführungen zeigen, dass alternative Antriebe und Kraftstoffe einen deutlichen Beitrag zu einer nachhaltigen Mobilität leisten können, in dem sie insbesondere bei den verkehrsspezifischen neuralgischen Punkten Klimaschutz und Ressourcenverbrauch eingreifen. Allerdings reicht der Beitrag von Technologien allein nicht zur Erreichung der Reduktionsziele aus. Vielmehr sind alle Möglichkeiten der Verringerung von Ressourcenverbrauch auszuschöpfen, also auch die Vermeidung von Verkehrsleistung, die Substitution von Verkehr und die Verlagerung auf andere Verkehrsträger.

Für eine nachhaltige Mobilität ist ein Beitrag zum Ressourcen- und Klimaschutz jedoch noch nicht hinreichend. Neben Ressourcen- und Klimaschutz gibt es eine Reihe weiterer Aspekte, die für eine nachhaltige Mobilität ebenfalls entscheidend sind [4, 21], z. B. die Gewährleistung dauerhaft vergleichbarer Chancen für alle Menschen, Regionen oder Generationen hinsichtlich des Zugangs zu einer Grundversorgung mit Verkehrsdienstleistungen, die Vermeidung von Überlastungen der Regenerations- und Anpassungsfähigkeiten der Ökosysteme und von Gesundheitsgefahren, die Minimierung von Risiken im Zusammenhang mit Mobilität, die Beteiligung aller gesellschaftlicher Gruppen an Entscheidungsprozessen über die Gestaltung der Transportsysteme, oder die Wirtschaftlichkeit von Verkehrs- und Transportsysteme in einem umfassenden Sinn.

Nicht alle dieser Aspekte werden durch technische Optionen in gleicher Weise in Angriff genommen. Beispielsweise ist mehr als die Hälfte der Bevölkerung durch den *Lärm* des Straßenverkehrs belästigt. Alternative, vor allem Elektroantriebe leisten nur bei geringeren Geschwindigkeiten einen lärmreduzierenden Beitrag [22]. Immer noch ist die Nutzung von Verkehrsmitteln, insbesondere im motorisierten Individualverkehr, mit bedeutenden *Sicherheitsproblemen* behaftet. Die Zahl der Getöteten liegt noch bei 7.800 Personen im vereinigten Deutschland (1999). Auch die Beanspruchung von *Flächen* durch den Straßenverkehr kann durch alternative Antriebe und Kraftstoffe nicht verringert werden. Die Straßennetzlänge und die Siedlungs- und Verkehrsfläche haben in den vergangenen Jahren deutlich zugenommen, seit 1950 einwohnerspezifisch von ca. 350 auf knapp 500 m²/Einwohner [23] (davon 40 % Verkehrsfläche). Die Zahl der nicht durch Verkehrsachsen zerschnittenen Räume (>100 km²) nimmt stark ab, im Zeitraum von 1977 bis 1998 um 18 %. In Nordrhein-Westfalen beispielsweise sind nur noch 3 % der Fläche unzerschnitten. Auch weitere, beispielsweise soziale Indikatoren der Nachhaltigkeit bleiben bei Einsatz technischer Möglichkeiten unverändert.

Alternative Antriebe und Kraftstoffe sind damit für eine nachhaltige Mobilität notwendig. Für eine hinreichende Gewährleistung der Nachhaltigkeit sind jedoch weitere Maßnahmen dringend erforderlich.

Literatur

1. Prognos, Energiereport III. Die längerfristige Entwicklung der Energiemärkte im Zeichen von Wettbewerb und Umwelt. 2000, Stuttgart: Schäffer-Pöschel-Verlag.
2. Shell, Mehr Autos - weniger Emissionen. Szenario des PKW-Bestands und der Neuzulassungen in Deutschland bis 2020. Shell AG, Abt. Energie- und Wirtschaftspolitik, Hamburg (1999).
3. BMVBW, Verkehr in Zahlen 2000. Berlin: Deutscher Verkehrs-Verlag.
4. M. Pehnt, Ökologische Nachhaltigkeitspotenziale von Antrieben und Kraftstoffen. Teilbericht im Rahmen des HGF-Projektes "Global zukunftsfähige Entwicklung. Perspektiven für Deutschland". DLR - Institut für Technische Thermodynamik, Stuttgart (2001).
5. G. Reinhardt und G. Zemanek, Ökobilanz Bioenergieträger: Basisdaten, Ergebnisse, Bewertungen. Berlin: Erich Schmidt (2000).
6. J. Nitsch und F. Trieb, Potenziale und Perspektiven regenerativer Energieträger. Gutachten im Auftrag des Büros für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag. DLR - Institut für Technische Thermodynamik, Stuttgart (2000).
7. V. Quaschnig, Systemtechnik einer klimaverträglichen Elektrizitätsversorgung in Deutschland für das 21. Jahrhundert. Technische Universität Berlin: Berlin (1999).
8. J. Nitsch, M. Nast, M. Pehnt und F. Trieb, HGF-Projekt: Zukunftsfähige Entwicklung - Schlüsseltechnologie Regenerative Energien. DLR- Institut für Technische Thermodynamik, Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse, Stuttgart, Karlsruhe (2001).
9. Prognos und M. Schlesinger, Szenarienerstellung - soziodemografische und ökonomische Rahmendaten. Zwischenbericht für die Enquete-Kommission "Nachhaltige Energieversorgung" des Deutschen Bundestages. Prognos AG, Basel (2001).
10. G.W. Schweimer, Sachbilanz des 3 Liter Lupo. Volkswagen AG, Wolfsburg (1999).
11. M. Pehnt, Life Cycle Assessment of Fuel Cell Stack Production. Int. J. Hydrogen Energy 26 (2001). S. 91-101.
12. I. Råde, Requirement and Availability of Scarce Metals for Fuel-Cell and Battery Elektric Vehicles. Chalmers University of Technology and Göteborg University: Göteborg (2001).
13. C. Carpetis, Globale Umweltvorteile bei Nutzung von Elektroantrieben (mit Brennstoffzellen und/oder Batterien) im Vergleich zu Antrieben mit Verbrennungsmotor. STB-Bericht Nr. 22, DLR-IB-200044417400. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Technische Thermodynamik, Stuttgart (2000).
14. M. Pehnt, Ganzheitliche Bilanzierung von Brennstoffzellen in der Energie- und Verkehrstechnik. VDI-Verlag, Düsseldorf (in Vorbereitung).
15. T. Fleißner, Primärenergetische Optimierung eines autarken Hybridfahrzeuges. IfE Schriftenreihe Heft 40. TU München: München (1999).
16. A. Patyk und U. Höpfner, Ökologischer Vergleich von Krafffahrzeugen mit verschiedenen Antriebsenergien unter besonderer Berücksichtigung der Brennstoffzelle. Studie im Auftrag des Büros für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag. Institut für Energie- und Umweltforschung, Heidelberg (1999).
17. M. Fischer, Die Zukunft des Ottomotors als PKW-Antrieb - Entwicklungschancen unter Verbrauchsaspekten, in Institut für Straßen- und Schienenverkehr. Technische Universität Berlin: Berlin (1998).
18. W.P. Teagan, J.H.J.S. Thijssen, E.J. Carlson und C.J. Read. Current and Future Cost Structures of Fuel Cell Technology Alternatives. in Fuel Cell 2000. Luzern (2000).
19. W.P. Teagan, Cost Reductions of Fuel Cells for Transport Applications: Fuel Cell Options. Journal of Power Sources 71 (1998). S. 80-85.
20. J.M. Ogden, Prospects for Building a Hydrogen Energy Infrastructure. Annual Review of Energy and the Environment (1999).
21. OECD, Pollution Prevention and Control. Environmental Criteria for Sustainable Transport. Report on Phase 1 of the Project on Environmentally Sustainable Transport. OECD/GD(96)136. Paris (1996).
22. R. Kolke, Technische Optionen zur Verminderung der Verkehrsbelastungen. Brennstoffzellenfahrzeuge. Abschlußbericht. Umweltbundesamt, Berlin (1999).
23. BBR, Raumordnungsbericht 2000. Bundesamt für Bauordnung und Raumwesen, Bonn (2001).