

Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland

Eine Studie von McKinsey & Company, Inc.,
erstellt im Auftrag von „BDI initiativ – Wirtschaft für Klimaschutz“

Sektorperspektive Transport

Die vorliegende Sektorperspektive Transport ist Teil der sektorübergreifenden Studie „Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland“, die McKinsey & Company, Inc., im Auftrag von „BDI initiativ – Wirtschaft für Klimaschutz“ erstellt hat. Sie enthält eine detaillierte Darstellung der Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen im Transportsektor in Deutschland. Die Ergebnisse der Studie wurden separat in einem Gesamtbericht veröffentlicht. Die Sektorperspektive enthält ergänzend eine detaillierte Darstellung der Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen im Transportsektor in Deutschland.

Insgesamt waren mehr als 70 Unternehmen und Verbände an der Bewertung von über 300 Hebeln zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland beteiligt. Im Transportsektor waren dies die deutschen Automobilhersteller und -zulieferer BMW Group AG, DaimlerChrysler AG, Volkswagen AG, Robert Bosch GmbH und Siemens AG, der Verband der Automobilindustrie (VDA), der Mineralölwirtschaftsverband (MWV), Lufthansa AG, sowie weitere Experten aus der deutschen Automobil-, Schienenverkehrs- und Luftfahrtindustrie sowie aus der Mineralölindustrie. Wir danken allen beteiligten Unternehmen, Verbänden und Experten für die konstruktive Zusammenarbeit und den unermüdlichen Einsatz über die vergangenen Monate. Die breite Unterstützung von allen Beteiligten war eine zentrale Voraussetzung für das Gelingen der vorliegenden Studie.

Der BDI dankt den folgenden Sponsoren herzlich für ihre finanzielle Beteiligung:

5



Inhaltsverzeichnis

Vorwort	3
Glossar	9
Zusammenfassung der Studienergebnisse für den Transportsektor	13
Herkunft der Treibhausgasemissionen im Transportsektor	19
Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Transportsektor seit 1990	23
Zukünftige Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Transport- sektor mit heutigem Stand der Technik („Stand der Technik“-Projektion)	27
„Stand der Technik“-Projektion: Methodik	27
„Stand der Technik“-Projektion: Annahmen und Ergebnisse für den Transportsektor	28
Hebel zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen im Transportsektor	31
Bewertung von Hebeln zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen: Methodik	31
Hebel zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen im Transportsektor bis 2020	35
<i>PKW: Technische Vermeidungshebel</i>	36
<i>LKW: Technische Vermeidungshebel</i>	38
<i>PKW und LKW: Einsatz von Biokraftstoffen</i>	40
<i>PKW und LKW: Weitere Hebel</i>	44
<i>PKW und LKW: Zusammenfassung</i>	46
<i>Schiene</i>	47
<i>Luftverkehr</i>	48
Weitere Entwicklung nach 2020 – Vermeidungspotenziale und -kosten 2030	50
Voraussetzungen für die Umsetzung und Implikationen	53
Anhang: Detailzahlen Vermeidungskostenkurve	59

Glossar

Basisjahr	Basisjahr zur Messung der erreichten Reduzierung von Treibhausgasemissionen im Sinne des Kyoto-Protokolls (1990 für CO ₂ -Emissionen; 1995 für eine Reihe weiterer Treibhausgase); vgl. Nationaler Inventarbericht des UBA (Dessau, März 2007) für Details
BTL	<i>Biomass-to-Liquid</i> – Gewinnung von synthetischem Diesel aus Biomasse über Vergasung und anschließende Verflüssigung nach Fischer-Tropsch-Verfahren
CO₂	Kohlendioxid
CO₂e	Kohlendioxid-Äquivalent, d.h. Kennzahl für die Intensität eines Treibhausgases, gemessen an der Treibhauswirkung von Kohlendioxid, z.B. 21 für CH ₄ (Methan), 310 für N ₂ O (Lachgas)
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
Entscheider	Derjenige, der über die Durchführung einer Investition entscheidet, d.h. das Unternehmen (z.B. für Industrieanlagen) bzw. die Privatperson (z.B. der Auto- oder Hausbesitzer)
EUR	Euro
Gt	Gigatonne(n), d.h. eine Milliarde [10 ⁹] Tonnen
(Vermeidungs-) Hebel	Technischer Ansatzpunkt zur Verminderung von Treibhausgasemissionen, z.B. Verwendung effizienterer Prozesse oder Materialien
kWh	Kilowattstunde(n)
l	Liter
LKW	Lastkraftwagen
Mt	Megatonne(n), d.h. eine Million [1.000.000] Tonnen
PJ	Petajoule, d.h. eine Trillion [10 ¹⁵] Joule
Pkm	Personenkilometer
PKW	Personenkraftwagen
Referenztechnologie	Technologie auf dem Stand der Technik, mit der eine treibhausgaseffiziente Lösung im Hinblick auf Vermeidungspotenzial und -kosten verglichen wird

Sektor	Im Rahmen dieser Studie vorgenommene Gruppierung von Wirtschaftszweigen¹, und zwar Energie: Emissionen aus zentraler, industrieller und dezentraler Stromerzeugung sowie aus der Erzeugung von Nah- und Fernwärme Industrie: Direkte und indirekte Emissionen aller Industriezweige mit Ausnahme der Stromerzeugung und des Transportsektors; inklusive industrieller Wärmeerzeugung Gebäude: Direkte und indirekte Emissionen aus privaten Haushalten und dem tertiären Sektor (GHD, öffentliche Gebäude, Gebäude in der Landwirtschaft) Transport: Emissionen aus dem <i>Straßenverkehr</i> (Personenverkehr: kleine, mittlere und große Personenkraftwagen (PKW), Güterverkehr: leichte Nutzfahrzeuge („Sprinterklasse“), mittlere und schwere Lastkraftwagen (LKW), Busse), dem <i>Schienenverkehr</i> (Personennah- und -fernverkehr, Güter), dem innerdeutschen <i>Luftverkehr</i> (ziviler Personen- und Frachtverkehr), inklusive Effekte durch Veränderungen im Kraftstoffmix (Mineralölindustrie) Entsorgungswirtschaft: Emissionen aus der Deponierung von Abfällen und aus der Behandlung von Abwasser Landwirtschaft: Emissionen aus Viehhaltung und Bewirtschaftung von Böden
Stand der Technik	Durchschnittliche Energie- bzw. Treibhausgas-effizienz im heutigen (2006) Verkaufs- bzw. Investitionsmix
„Stand der Technik“-Projektion	Projektion der Entwicklung von Treibhausgasemissionen in Deutschland auf Basis des heute erwarteten Wirtschaftswachstums und bei allmählicher Durchdringung des Bestands mit dem Stand der Technik (für Details vgl. unten Seite 27ff.)
t	Tonne(n)
tkm	Tonnenkilometer
Treibhausgas	Treibhausgas im Sinne des Kyoto-Protokolls, d.h. CO ₂ (Kohlendioxid), CH ₄ (Methan), N ₂ O (Lachgas), HFC/PFC (Fluorkohlenwasserstoffe) und SF ₆ (Schwefelhexafluorid)

¹ Die Sektoren Energie, Industrie, Gebäude und Transport wurden im Rahmen der Studie jeweils in speziellen Arbeitsgruppen bearbeitet, an denen Vertreter von Unternehmen und Verbänden teilnahmen, die in den Sektoren als Akteure und/oder Zulieferer aktiv sind. Die Entsorgungswirtschaft und die Landwirtschaft wurden jeweils in einer Reihe von Einzelinterviews mit Experten und Vertretern von Unternehmen und Verbänden diskutiert, jedoch nicht durch eigene Arbeitsgruppen abgedeckt.

TWh	Terawattstunde(n), d.h. eine Milliarde [10 ⁹] kWh
Vermeidungshebel	S. „Hebel“
Vermeidungskosten (in EUR/t CO₂e)	Zusätzliche Kosten (bzw. Ersparnisse), die sich durch den Einsatz einer Technologie mit geringerer Treibhausgasintensität gegenüber dem jeweils vorherrschenden Stand der Technik ergeben (ohne Berücksichtigung von Sekundäreffekten aus volkswirtschaftlicher Sicht), in der vorliegenden Studie aus Sicht des jeweiligen Entscheiders bewertet, d.h. unter Berücksichtigung der jeweils spezifischen Diskontierungsraten und Amortisierungszeiträume
Vermeidungs- kostenkurve	Zusammenstellung von Vermeidungspotenzialen und -kosten für einen Sektor
Vermeidungs- potenzial (in Mt CO₂e)	Potenzial zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen, das sich durch die ambitionierte, aber in der Praxis realisierbare Umsetzung eines Vermeidungshebels ergibt
(Aus Entscheider- sicht) Wirtschaftlicher Vermeidungshebel	Vermeidungshebel, bei dessen Umsetzung für den Entscheider unter Berücksichtigung der jeweiligen Amortisierungszeiträume und Diskontierungsraten Einsparungen entstehen



Zusammenfassung der Studienergebnisse für den Transportsektor

Das Verkehrsaufkommen in Deutschland wird bis 2020/2030 weiter anwachsen, insbesondere im Güterverkehr auf Straße und Schiene sowie im Luftverkehr. Durch die weitere Einführung effizienter Technologie mit Vermeidungskosten von bis zu 20 EUR/t CO₂e in den Bestand sowie durch den verstärkten Einsatz von Biokraftstoffen (mit deutlich höheren Vermeidungskosten) können die Treibhausgasemissionen des Sektors gegenüber dem heutigen Stand dennoch um 11 Prozent gesenkt werden. Gegenüber dem Basisjahr entspricht dies einer Senkung um 7 Prozent. Hebel zur technischen Optimierung, von denen 14 Mt CO₂e für den Entscheider wirtschaftlich sind, leisten bei allen Verkehrsträgern einen wichtigen Beitrag; den größten Anteil stellt dabei die weitere Optimierung von Benzin- und Dieselfahrzeugen (PKW) mit 8 Mt CO₂e. Der von politischer Seite avisierte Ausbau der Nutzung von Biokraftstoffen trägt weitere 14 Mt CO₂e bei. Darüber hinaus existieren weitere technische Hebel, die allerdings mit erheblich höheren Vermeidungskosten verbunden sind.

Im Jahr 2004 wurden 182 Mt CO₂e – das waren 18 Prozent aller Treibhausgasemissionen in Deutschland – vom Transportsektor emittiert. Die CO₂-Emissionen im Transportsektor stammen aus dem Straßenverkehr (PKW und LKW), dem Schienenverkehr (inklusive indirekter Emissionen aus dem Stromverbrauch), dem Inlandsflugverkehr sowie aus sonstigen Verkehrsmitteln, z.B. Binnenschiffen. Fast 90 Prozent entfielen auf den Straßenverkehr.

Zwischen 1990 und 2004 nahmen die Treibhausgasemissionen im Transportsektor um insgesamt 5 Prozent zu (von 174 auf 182 Mt CO₂e). Nach der Wiedervereinigung sowie aufgrund der Osterweiterung der EU und der Öffnung der Ländergrenzen stieg die Verkehrsleistung in Deutschland. Betroffen waren vor allem der Straßengüterverkehr (plus 130 Prozent) und der motorisierte Individualverkehr (plus 87 Prozent). Entsprechend wuchsen die Treibhausgasemissionen des Sektors zwischenzeitlich auf 193 Mt CO₂e (2000) an. Seitdem sind sie wieder rückläufig (182 Mt CO₂e für 2004), da deutliche Effizienzsteigerungen den Anstieg der Treibhausgasemissionen durch das erhöhte Verkehrsaufkommen überwiegend kompensieren konnten. Wesentlich hierfür waren vor allem der rückläufige Treibstoffverbrauch bei PKW und LKW sowie die Erhöhung der Energieeffizienz im Schienenverkehr durch flächendeckende Einführung von neuer Zugtechnologie und von Drehstromtechnologie mit Energierückspeisung.

In den Jahren bis 2020/2030 wird weiterhin ein starkes Wachstum der Transportleistung erwartet, insbesondere im Straßengütertransport und im Schienengüterverkehr (um jeweils 2,8 Prozent pro Jahr) sowie in der Luftfahrt (um 3 Prozent pro Jahr). Im Straßenpersonenverkehr wird dagegen nur ein geringfügiges Wachstum von 0,4 Prozent pro Jahr erwartet. Diesem Wachstum stehen bei allen Transportmitteln Effizienzverbesserungen durch Austausch der Bestandsflotte gegenüber, deren Effekte allerdings bei Berücksichtigung des Durchschnittsalters der Flotte und der heutigen Austauschgeschwindigkeit in Summe nicht ausreichen, um den Mengenanstieg vollständig auszugleichen. Die Treibhausgasemissionen des Transportsektors in Deutsch-

land wachsen deshalb in der „Stand der Technik“-Projektion – also ohne Umsetzung weiterer Vermeidungshebel – von 182 Mt CO₂e (2004) auf 190 Mt CO₂e (2020) bzw. 207 Mt CO₂e (2030)².

Im Transportsektor wurden die Potenziale pro Verkehrsträger (Straße, Schiene und Luftfahrt) jeweils separat bewertet. Über alle Verkehrsträger hinweg wurden Vermeidungshebel mit einem Potenzial von 37 Mt CO₂e (2020) betrachtet.

Das Gesamtpotenzial der technischen Maßnahmen für PKW lässt sich in mehrere Maßnahmenbündel unterteilen, welche die Emissionen insgesamt um 15,6 Mt CO₂e verringern könnten. Davon wäre gut die Hälfte (8 Mt CO₂e) aus Sichtersicht wirtschaftlich.

- Durch die Optimierung von *Motoren und Getrieben* ergeben sich Potenziale von 6,7 Mt CO₂e. Gut die Hälfte der Maßnahmen ist wirtschaftlich, hierzu gehören z.B. Maßnahmen zur Reduzierung der innermotorischen Reibung oder das Thermomanagement. Andere Maßnahmen sind mit signifikanten Vermeidungskosten verbunden, z.B. der Einbau eines Doppelkupplungsgetriebes mit mehr als 1.000 EUR/t CO₂e.
- Durch Optimierungen am *Gesamtfahrzeug*, z.B. durch Verbesserung der Aerodynamik, Optimierung des Gewichts und Reduzierung des Rollwiderstands der Reifen lassen sich 1,2 Mt CO₂e (2020) an Treibhausgasemissionen vermeiden, zu Kosten von etwa 250 EUR/t CO₂e.
- Durch die Einführung von *Hybriden (Mild/Full)* lassen sich weitere 3 Mt CO₂e einsparen. Eine forcierte Einführung über alle Fahrzeugsegmente hinweg würde allerdings zu hohen Kosten führen, beim *Mild Hybrid* von mehr als 3.000 EUR/t CO₂e und beim *Full Hybrid* von fast 5.000 EUR/t CO₂e. Ein Teil der Verbrauchsvorteile lässt sich allerdings auch über eine *Micro-Hybridisierung*³ zu geringeren Kosten realisieren, wenn beispielsweise Start-Stop-Systeme einen entsprechend hohen Marktanteil erlangen. Im unterstellten Szenario liegt das weitere Vermeidungspotenzial für Micro-Hybride bei 1,7 Mt CO₂e.
- Durch weitere Maßnahmen, deren Effekt derzeit nicht im Fahrzyklus (Normverbrauchstest) erfasst wird, lässt sich der Verbrauch weiter reduzieren. Hierzu zählen *Schaltpunkt- und Verbrauchsanzeige, Reifendruckkontrollsysteme und eventuell optimierte Klimaanlage*. Insgesamt ergibt sich hierbei ein Potenzial von 3 Mt CO₂e.
- Im Rahmen der Untersuchung wurden die alternativen Antriebstechnologien Erdgas, Wasserstoff und Brennstoffzelle betrachtet. Auf Grund fehlender belastbarer industrieübergreifender Kostendaten und weil signifikante Vermeidungspotenziale für die innovativen Antriebstechnologien erst im längerfristigen Zeithorizont erwartet werden, wurden diese jedoch nicht detailliert quantifiziert.

2 Jeweils inklusive indirekte Emissionen aus Stromverbrauch von Schienenfahrzeugen, und zwar 9 Mt CO₂e (2004), 11 Mt CO₂e (2020), 12 Mt CO₂e (2030).

3 Mikro-Hybridisierung umfasst die sukzessive Elektrifizierung der Nebenaggregate und die Einführung eines Start-Stop-Systems mit Rückgewinnung der Bremsenergie kombiniert mit einem verbesserten Energiemanagement.

Ob sich für den Entscheider – in diesem Fall den Autokäufer – die zusätzlichen Kosten über die durchschnittliche Nutzungsdauer von 4,5 Jahren in Form von Verbrauchsreduzierungen amortisieren, hängt jeweils vom spezifischen Technikpaket ab. Allerdings sind die identifizierten technischen Maßnahmen für die Endkunden mit höheren Preisen verbunden, die eine Anschaffungshürde bedeuten können. Beispielsweise würden für PKW bei Einführung aller technischen Maßnahmen außer dem *Mild/Full Hybrid* und unter Berücksichtigung von Kostendegressionseffekten die durchschnittlichen Kosten von Neuwagen im Jahr 2020 um 1.250 EUR steigen. Bei einem zusätzlichen (teilweisen) Umstieg auf Hybridfahrzeuge (*Mild/Full Hybrid*) würde sich der durchschnittliche Neuwagenpreis im Jahr 2020 um mehr als 3.000 EUR erhöhen.

Bei den LKW wurden die technischen Maßnahmen für leichte Nutzfahrzeuge und mittelschwere/schwere Nutzfahrzeuge (inkl. Busse) getrennt bewertet. Insgesamt können über beide Segmente hinweg 3 Mt CO₂e (2020) vermieden werden. Bei leichten Nutzfahrzeugen unterstützen die Reduzierung der innermotorischen Reibung durch Einsatz von Leichtlaufölen, eine verbesserte Aerodynamik und Start-Stop-Systeme die Verbrauchsreduktion. Bei mittelschweren/schweren Nutzfahrzeugen wurde unter Abwägung zwischen Abgas- und Verbrauchsreduktion ein Maßnahmenbündel definiert, das vor allem an der Optimierung des Antriebsstrangs ansetzt. Weitere Vermeidungspotenziale aus einer deutlichen aerodynamischen Verbesserung von schweren Langstreckenfahrzeugen sind zwar wirtschaftlich, aber nur nach Anpassung der Gesetzeslage realisierbar. Insgesamt rechnen sich aus Entscheidersicht 1,6 Mt CO₂e, z.B. verschiedene motorseitige Maßnahmen bei den leichten LKW. Die weiteren 1,4 Mt CO₂e Potenzial sind kostenintensiv, so z.B. das Maßnahmenpaket für die schweren LKW mit Vermeidungskosten von mehr als 1.000 EUR/t CO₂e.

Ein Anstieg des Anteils der Biokraftstoffe am gesamten Kraftstoffverbrauch im Straßenverkehr (PKW und LKW) von heute 5 Prozent (2006) auf 17 Prozent (energetisch) bis 2020, entsprechend der diskutierten Zielvorgaben der Bundesregierung, bringt ein zusätzliches Potenzial von 14 Mt CO₂e für PKW und LKW⁴. Bei Benzin kann das Potenzial über Ethanol der 1. Generation, Importe aus Brasilien sowie ab 2015 zum Teil über Ethanol der 2. Generation erreicht werden. Unter Berücksichtigung der heute geltenden Importzölle von 19 Cent/Liter liegen die Vermeidungskosten 2020 zwischen 130 und 320 EUR/t CO₂e. Bei Diesel erfolgt der Anstieg der Biokraftstoffe hauptsächlich über hydriertes Pflanzenöl. Biodiesel aus transesterifiziertem Pflanzenöl wächst nur geringfügig und *Biomass-To-Liquid* (BTL) erreicht lediglich einen kleinen Marktanteil. Die Vermeidungskosten liegen hier zwischen 190 und 240 EUR/t CO₂e (2020).

Im Straßenverkehr insgesamt kann der CO₂-Ausstoß in Ergänzung zu den technischen Hebeln durch eine verbrauchssenkende Fahrweise der Fahrzeugführer (*Eco-Driving*), eine optimierte Verkehrslenkung (Infrastruktur und Verkehrsmanagement) sowie durch ein verbessertes Flottenmanagement bei LKW um zusätzliche 4 Mt CO₂e gesenkt werden. Eine umfassende und detaillierte Kostenbewertung steht hierfür aber noch aus. Zur Realisierung dieser Maßnahmen ist ein integrierter Ansatz der Automobilhersteller, der Verkehrsteilnehmer, der Infrastrukturhersteller/-betreiber⁵ und der Mineralölindustrie erforderlich, d.h. ein Zusammenwirken aller Teile der Mobilitätskette.

4 Die 17 Prozent Biokraftstoffanteil werden in der Kalkulation gleichberechtigt auf Benzin und Diesel angewendet.

5 Die Untersuchung geht von der Annahme aus, dass das gegenwärtige Qualitätsniveau der Infrastruktur für alle Verkehrsträger auch in Zukunft erhalten wird.

Im Schienenverkehr stellt die Steigerung der Auslastung des Personennah- und -fernverkehrs angesichts des prognostizierten Verkehrswachstums einen wesentlichen Hebel bis 2020 dar, der einen Beitrag von 1,6 Mt CO₂e (2020) leisten kann. Technologische Verbesserungen der Zug- und Betriebstechnik⁶ können die Emissionen um 1,8 Mt CO₂e senken. Die Vermeidungskosten für das Gesamtpotenzial von 3,4 Mt CO₂e wurden auf Null gesetzt, da detaillierte Kostenberechnungen noch nicht vorliegen⁷. Eine zusätzliche Reduzierung der Emissionen im Schienenverkehr kann sich durch die Senkung der CO₂-Intensität der Stromerzeugung nach Umsetzung der Maßnahmen im Energiesektor ergeben; gegenüber dem Stand von 2004 bedeutet dieser Effekt eine weitere Senkung der spezifischen Emissionen auf der Schiene um rund 10 Prozent (bezogen auf den Personen-/Tonnenkilometer).

Im Luftverkehr sind wesentliche Hebel die weitergehende Optimierungen im Flugzeugneubau über den Stand der Technik hinaus (z.B. Werkstoffeinsatz, Triebwerksoptimierung), die technische Verbesserung der bestehenden Flugzeugflotte (z.B. Nachrüsten von Winglets, Einbau leichter Stühle), die Verbrauchsoptimierung beim Flugeinsatz (z.B. durch Gepäckoptimierung) sowie die Vermeidung von Zusatzdistanzen (u.a. Reduzierung Normaldistanzen, verbessertes *Air Traffic Management*). Alle bewerteten Hebel sind mit einem Vermeidungspotenzial von 0,6 Mt CO₂e für den Entscheider wirtschaftlich⁸.

Absolut gesehen sinken die Treibhausgasemissionen des Transportsektors bei forcierter Einführung von Biokraftstoffen und Umsetzung der Vermeidungshebel mit Kosten von bis zu 20 EUR/t CO₂e gegenüber der „Stand der Technik“-Projektion um 28 Mt CO₂e. Dies entspricht einer Senkung um 15 Prozent. Im Vergleich zum Niveau von 2004 reduzieren sich die Treibhausgasemissionen des Sektors damit um 11 Prozent; im Vergleich zum Basisjahr um 7 Prozent.

6 z.B. Maßnahmen zur verbesserten Energieverwendung/-rückgewinnung, Leichtbau durch modulare Bauweise, Doppelstockfahrzeuge.

7 Derzeit erfolgt eine detaillierte Kostenbewertung im EU-Projekt „Rail Energy“.

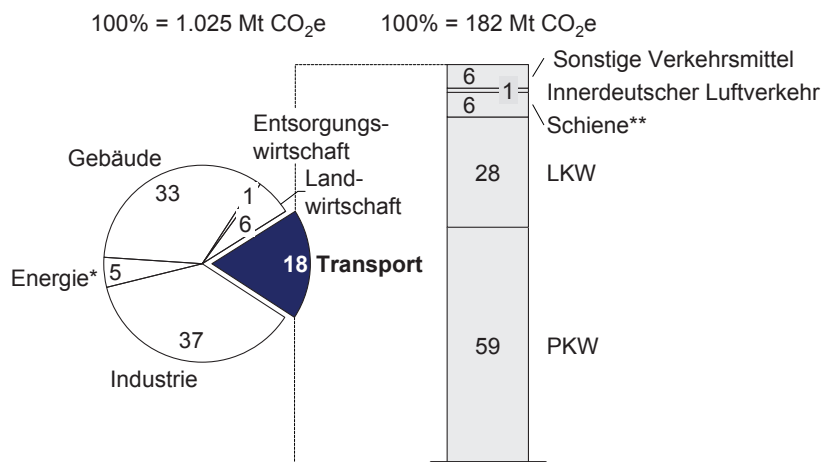
8 Zusätzliches Potenzial kann sich zukünftig auch aus einer Beimischung von Biokraftstoffen ergeben, wobei die Konkurrenzkraft der knappen Ressource Biokraftstoff zu berücksichtigen ist.



Herkunft der Treibhausgasemissionen im Transportsektor

Im Jahr 2004 wurden 182 Mt CO₂e – das waren 18 Prozent aller Treibhausgasemissionen in Deutschland – im Transportsektor emittiert. Die CO₂-Emissionen im Transportsektor stammen aus dem Straßenverkehr (PKW und LKW), dem Schienenverkehr (inklusive indirekter Emissionen aus dem Stromverbrauch), dem Inlandsflugverkehr sowie aus sonstigen Verkehrsmitteln, z.B. Binnenschiffen. Fast 90 Prozent entfielen auf den Straßenverkehr.

Transportsektor: Anteil an Treibhausgasemissionen – Deutschland 2004
in Prozent



* Nur Eigenverbrauch der Kraftwerke und Netzverluste; andere Emissionen (313 Mt CO₂e) sind den Stromabnehmern zugeordnet

** Inklusive Emissionen durch Stromverbrauch von Schienenfahrzeugen (10 Mt CO₂e)

Quelle: UBA, Studie „Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland“ von McKinsey & Company, Inc. im Auftrag von „BDI initiativ – Wirtschaft für Klimaschutz“ – AG Transport

Schaubild 1

- **Straßenverkehr:** 87 Prozent aller Emissionen des Transportsektors entstehen auf Deutschlands Straßen. Von den insgesamt 158 Mt CO₂e, die 2004 durch Fahrzeugemissionen verursacht wurden, entfielen 107 Mt CO₂e auf PKW und 51 Mt CO₂e auf Nutzfahrzeuge (inklusive Busse). Dies entspricht einem Kraftstoffverbrauch von ca. 65 Milliarden Litern. Die vorliegende Untersuchung bildet die Methodik des Kyoto-Reporting ab, das nur Emissionen aus Kraftstoffen berücksichtigt, die in Deutschland getankt wurden.
- **Schienenverkehr:** Sechs Prozent der Treibhausgasemissionen im Transportbereich entstehen auf der Schiene (12 Mt CO₂e). Die Verkehrsleistung umfasst den gesamten Inlandsverkehr ab/bis Grenze sowie den Durchgangsverkehr. Hierzu gehören jeweils die Verkehrsleistung von Personennah- und -fernverkehr, Güterverkehr sowie U- und S-Bahnen. Im deutschen Schienenverkehr entstehen etwa

85 Prozent der Emissionen indirekt durch den Strom, mit dem Schienenfahrzeuge betrieben werden. Im Jahr 2004 lag der gesamte Stromverbrauch der Schiene bei 16 TWh. Legt man den durchschnittlichen Mix der Stromerzeugung in Deutschland zu Grunde, so ergeben sich daraus 10 Mt CO₂e, der Rest kommt durch den Einsatz von Dieselmotoren zustande (rund 2 Mt CO₂e).

- **Luftverkehr:** Gemäß der Kyoto-Logik steht ausschließlich der inländische Flugverkehr im Fokus (ziviler Personenverkehr und Fracht). Im Kyoto-Reporting, das den innerdeutschen Anteil der Emissionen über den Anteil der Flugpassagiere abschätzt, werden 20 Prozent des gesamten Kerosinverbrauchs pauschal dem innerdeutschen Luftverkehr zugerechnet. Demnach beliefen sich 2004 die Emissionen auf 4,4 Mt CO₂e. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurden die Emissionen induktiv mit unterschiedlichen Berechnungsmethoden validiert⁹. Dabei ergab sich für 2004 einheitlich ein geringeres Emissionsvolumen von 2,2 Mt CO₂e, das für alle weiteren Berechnungen zu Grunde gelegt wurde¹⁰.
- **Sonstiges:** Alle weiteren Verkehrsmittel, wie z.B. Motorräder, Binnenschiffe oder Sonderfahrzeuge, verursachen gemeinsam etwa 6 Prozent der Treibhausgase im Transportsektor. Motorisierte Zweiräder als größter Teilbereich kamen 2004 auf ein Emissionsvolumen von ca. 1,5 Mt CO₂e, die Schifffahrt auf 1 Mt CO₂e. In der Untersuchung lag der Schwerpunkt auf dem Straßen-, Schienen- und Inlandsflugverkehr; weitere Transportmittel wie z.B. Binnenschiffe, Motorräder oder Sonderfahrzeuge wurden in einer gemeinsamen Kategorie zusammengefasst und nicht detailliert untersucht.

Transportsektor: Übersicht Subsektoren*

Personenverkehr Straße	Güterverkehr Straße	Schienenverkehr	Innerdeutscher Luftverkehr
			
• Personenkraftwagen (PKW) nach verschiedenen Fahrzeugsegmenten	• Leichte Nutzfahrzeuge („Sprinterklasse“) • Mittlere und schwere Lastkraftwagen (LKW)	• Personenverkehr – Nahverkehr (inkl. U- und S-Bahnen) – Fernverkehr • Güterverkehr	• Ziviler Personenverkehr • Ziviler Frachtverkehr

* Gemäß des Kyoto-Reportings Betrachtung der innerdeutschen Treibhausgasemissionen. Kategorie „Sonstige“ (z.B. Binnenschiffe, Motorräder) wurden in der Untersuchung nicht detailliert betrachtet

Schaubild 2

Quelle: Studie „Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland“ von McKinsey & Company, Inc. im Auftrag von „BDI-Initiative – Wirtschaft für Klimaschutz“ – AG Transport

- 9 Die Emissionen innerdeutscher Flüge wurden über drei verschiedene Analyseansätze berechnet, alle mit dem gleichen Ergebnis (Hochrechnung auf Basis der Flugpläne, „bottom-up“-Berechnung durch Verknüpfung der Emissionstreiber, Zuschlüsselung des gesamten Kerosinverbrauchs).
- 10 Es wurde nicht berücksichtigt, dass Treibhausgasemissionen, die vom Luftverkehr in großer Höhe ausgestoßen werden, mit größeren Treibhauseffekten in Verbindung gebracht werden.

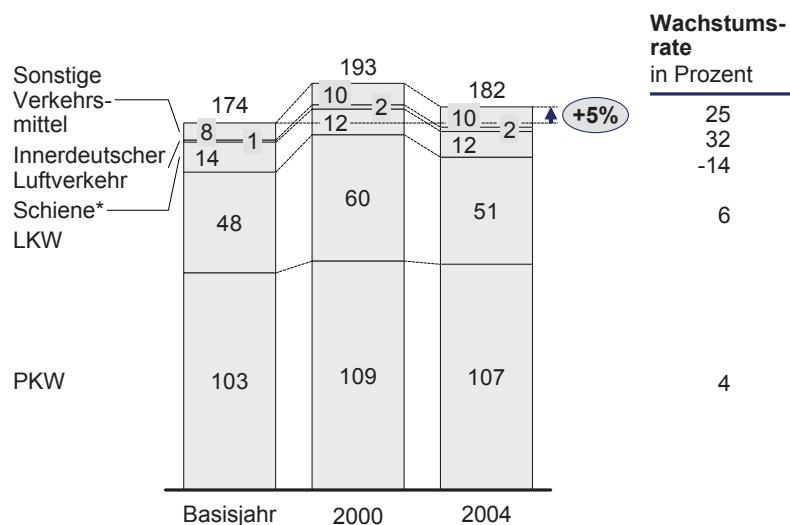


Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Transportsektor seit 1990

Im Transportbereich nahmen die Treibhausgasemissionen zwischen 1990 und 2004 um insgesamt 5 Prozent zu (von 174 auf 182 Mt CO₂e)¹¹. Nach der Wiedervereinigung sowie auf Grund der Osterweiterung der EU und der Öffnung der Ländergrenzen stieg die Verkehrsleistung in Deutschland. Betroffen waren vor allem der Straßengüterverkehr (plus 130 Prozent) und der motorisierte Individualverkehr (plus 87 Prozent). Entsprechend wuchsen die Treibhausgasemissionen des Sektors zwischenzeitlich auf 193 Mt CO₂e (2000) an. Seitdem sind sie wieder rückläufig (182 Mt CO₂e für 2004), da deutliche Effizienzsteigerungen den Anstieg der Treibhausgasemissionen durch das erhöhte Verkehrsaufkommen überwiegend kompensieren konnten. Wesentlich hierfür waren vor allem der rückläufige Treibstoffverbrauch bei PKW und LKW sowie die Erhöhung der Energieeffizienz im Schienenverkehr durch flächendeckende Einführung von neuer Zugtechnologie und von Drehstromtechnologie mit Energierückspeisung.

Transportsektor: Historische Entwicklung Treibhausgasemissionen – Deutschland Basisjahr bis 2004

in Mt CO₂e



* Inklusive Emissionen durch Stromverbrauch von Schienenfahrzeugen (Basisjahr 10 Mt CO₂e, 2000/2004 9 Mt CO₂e)

Quelle: Studie „Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland“ von McKinsey & Company, Inc. im Auftrag von „BDI initiativ – Wirtschaft für Klimaschutz“ – AG Transport

Schaubild 3

- Die Verkehrsleistung im *Straßenpersonenverkehr* (PKW) hat im Untersuchungszeitraum um ca. 50 Prozent von 600 auf fast 900 Milliarden Personenkilometer (Pkm) zugenommen. Bis zur Jahrtausendwende betrug der durchschnittliche Anstieg pro Jahr ca. 3,5 Prozent, danach verlangsamte sich das Wachstum infolge zunehmender

¹¹ Jeweils inklusive indirekte Emissionen aus dem Schienenverkehr von 10 Mt CO₂e (Basisjahr) bzw. 9 Mt CO₂e (2000/2004).

Marktsättigung auf zuletzt weniger als 1 Prozent jährlich. Die Zahl der Personenkilometer entwickelte sich nahezu proportional zur Zahl der zugelassenen Personenkraftwagen, deren Bestand von 31 Millionen (1990)¹² auf 45 Millionen (2004) wuchs. Dennoch konnte der Gesamtkraftstoffverbrauch und damit auch der Treibhausgasausstoß im gleichen Zeitraum fast konstant gehalten werden. Grund hierfür sind Effizienzsteigerungen in der Fahrzeugtechnik – vor allem Verbesserungen im Antriebsstrang – und eine veränderte Modellpolitik, die den Anteil von Dieselmotoren am Bestand von 9 Prozent auf über 20 Prozent ansteigen ließ. Insgesamt sind die Emissionen aus dem Straßenpersonenverkehr seit 1999 leicht rückläufig.

- Die Verkehrsleistung im *Straßengüterverkehr* (LKW) hat sich seit 1990 mehr als verdoppelt und lag 2004 bei fast 400 Milliarden Tonnenkilometern (tkm) gegenüber 170 Milliarden tkm zu Beginn des Betrachtungszeitraums. Nahezu verdoppelt hat sich auch der LKW-Bestand (inkl. Busse): von 1,5 Millionen Fahrzeugen im Jahr 1990 auf 2,9 Millionen. Die vergleichsweise geringe Steigerung der Treibhausgasemissionen von 6 Prozent sowie der Rückgang seit 2000 sind auf mehrere Faktoren zurückzuführen. Hierzu gehören die verbesserte Energieeffizienz der Fahrzeuge, weiter verbesserte Logistikkonzepte (z.B. Reduzierung von Leerfahrten sowie die Vernetzung von Verkehrsträgern), der verstärkte Einsatz schwerer Nutzfahrzeuge sowie die vermehrte Betankung im Ausland. Leichte Nutzfahrzeuge (kombiniertes Gesamtgewicht < 6t) stellen zurzeit etwa 80 Prozent des LKW-Bestands und sind für knapp die Hälfte der Emissionen im Straßengüterverkehr verantwortlich. Mittelschwere und schwere Nutzfahrzeuge bzw. Sattelzugmaschinen machen zwar nur ein Fünftel des Bestands aus, erzeugen aber wegen ihrer hohen jährlichen Fahrleistungen und dem mit dem hohen Gesamtgewicht einhergehenden höheren Kraftstoffverbrauch mehr als die Hälfte der CO₂-Emissionen.
- Die Verkehrsleistung des *Schienenverkehrs* ist im Zeitraum 1990 bis 2004 im Personenverkehr um durchschnittlich 3,5 Prozent pro Jahr und im Güterverkehr um durchschnittlich 0,8 Prozent pro Jahr gestiegen. Über den gleichen Zeitraum sind die Treibhausgasemissionen seit 1990 von 14,4 auf 11,7 Mt CO₂e (2004) gesunken. Dies entspricht einem Rückgang um 1,5 Prozent pro Jahr. Im betrachteten Zeitraum wurde ein Großteil der Triebwagen erneuert oder technisch überholt. Eine Reihe von Innovationen ermöglichten weitere Effizienzsteigerungen. Dazu zählen vor allem die flächendeckende Einführung der Drehstromtechnik sowie die Energierückspeisung bei Rückgewinnung von Bremsenergie, eine optimierte Leichtbauweise der Züge und eine Verbesserung der Antriebstechnik. Zusätzlich stieg die Auslastung der Züge. Im gleichen Zeitraum hat sich zudem die CO₂-Intensität der Stromerzeugung verringert.
- Die Transportleistung im innerdeutschen *Luftverkehr* ist von 1990 bis 2004 um durchschnittlich 6,8 Prozent pro Jahr angestiegen (Passagierwachstum von 9,3 auf 23,5 Milliarden Pkm)¹³. Die Treibhausgasemissionen wurden im gleichen Zeitraum zu einem großen Teil durch Effizienzverbesserungen aufgefangen (Weiterentwicklung der Triebwerke, Optimierung von Aerodynamik und Gewicht) sowie in jüngster Zeit auch durch die höhere Auslastung der Maschinen im „Billigflugsegment“. Insgesamt sind die Emissionen des innerdeutschen Luftverkehrs durchschnittlich um 3 Prozent pro Jahr angestiegen.

¹² 1990 Angabe nur für Westdeutschland.

¹³ Die Gütertransportleistung beträgt rund 5 Prozent der Personentransportleistung.



Zukünftige Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Transportsektor mit heutigem Stand der Technik („Stand der Technik“-Projektion)

Im Transportsektor wird in den Jahren bis 2020/2030 weiterhin ein starkes Wachstum der Transportleistung erwartet, insbesondere im Straßengütertransport und im Schienengüterverkehr (um jeweils 2,8 Prozent pro Jahr) sowie in der Luftfahrt (um 3 Prozent pro Jahr). Im Straßenpersonenverkehr wird dagegen nur ein geringfügiges Wachstum von 0,4 Prozent pro Jahr erwartet. Diesem Wachstum stehen bei allen Transportmitteln Effizienzverbesserungen durch Austausch der Bestandsflotte gegenüber, deren Effekte allerdings bei Berücksichtigung des Durchschnittsalters der Flotte und der heutigen Austauschgeschwindigkeit in Summe nicht ausreichen, um den Mengenanstieg in der „Stand der Technik“-Projektion vollständig auszugleichen. Die Treibhausgasemissionen des Transportsektors in Deutschland wachsen deshalb von 182 Mt CO₂e (2004) auf 190 Mt CO₂e (2020) bzw. 207 Mt CO₂e (2030)¹⁴.

„Stand der Technik“-Projektion: Methodik

Als Aufsetzpunkt für die Bewertung von technischen Hebeln zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen in Deutschland wurde in der vorliegenden Studie eine „Stand der Technik“-Projektion erstellt. Diese Fortschreibung der Emissionsentwicklung je Sektor beruht auf zwei Grundprinzipien:

- Das derzeit prognostizierte Mengenwachstum (z.B. Bestandswachstum der Transportmittel) wird als gegeben vorausgesetzt. In Summe entspricht das hier angenommene Wachstum einem Wachstum des Bruttosozialprodukts um 1,6 Prozent pro Jahr.
- Angenommen wird, dass alle neu angeschafften Güter jeweils auf dem durchschnittlichen Stand der Technik sind, der im heutigen Verkaufs- bzw. Investitionsmix erreicht ist. Dabei werden für die verschiedenen Wirtschaftszweige jeweils spezifische Lebensdauern für verschiedene Güter berücksichtigt.

In dieser „Stand der Technik“-Projektion durchdringt der heutige Verkaufs- bzw. Investitionsmix über Zeit den Bestand, bis nach komplettem Austausch aller Güter bzw. Anlagen für den gesamten Bestand die Effizienz dieses heutigen Verkaufs- bzw. Investitionsmix erreicht ist. Diese „Stand der Technik“-Projektion erlaubt eine Bewertung von technischen Vermeidungshebeln, bei der Doppelzählungen vermieden werden. Damit unterscheidet sich die „Stand der Technik“-Projektion von einem „Business as usual“-Szenario, das üblicherweise implizit sowohl eine zu erwartende Weiterentwicklung von Technologien als auch eine über den heutigen Verkaufs- bzw. Investitionsmix hinausgehende Durchdringung des Bestands mit der effizientesten Technik annimmt.

¹⁴ Jeweils inklusive indirekte Emissionen aus Stromverbrauch von Schienenfahrzeugen, und zwar 9 Mt CO₂e (2004), 11 Mt CO₂e (2020), 12 Mt CO₂e (2030).

Bei der Bestandserneuerung wurde davon ausgegangen, dass die ausgetauschten Güter jeweils vollständig vom deutschen Markt verschwinden und in Deutschland keine Energie mehr verbrauchen bzw. keine Emissionen mehr verursachen. Emissionen, die durch einen Export „ausgedienter“ Güter (beispielsweise die Weitergabe alter Fahrzeuge oder Flugzeuge ins Ausland) entstehen könnten, wurden – im Sinne der Abgrenzung des Kyoto-Reporting – nicht auf die zukünftigen Treibhausgasemissionen in Deutschland angerechnet. Ferner wurde unterstellt, dass der Umfang zusätzlicher Emissionen, die durch eine Weiterverwendung ausgetauschter Güter innerhalb Deutschlands (z.B. Einsatz alter Kühlschränke oder Fernseher als Zweit- oder Drittgeräte) entstehen könnten, sich nicht signifikant auf den Gesamtenergieverbrauch bzw. die Gesamtemissionen auswirkt.

Bei der Ableitung der „Stand der Technik“-Projektion blieben politische Ziele und Selbstverpflichtungen einzelner Industrien bewusst unberücksichtigt. Gleiches gilt für staatliche Förderprogramme wie den Ausbau erneuerbarer Energien auf Basis des EEG (Erneuerbare-Energien-Gesetz). Hier wurden lediglich Anlagen berücksichtigt, die sich bereits heute im Bau oder in Planung befinden. Der Ausstieg aus der Kernenergie für die Stromerzeugung in Deutschland wurde jedoch als geltendes Recht im Basis-szenario als gesetzt angenommen.

Die „Stand der Technik“-Projektion unterstellt für alle Sektoren bereits ambitionierte Investitionsentwicklungen. Durch den angenommenen Austausch des Bestands im regulären Investitionszyklus und das Vordringen des heutigen Stands der Technik werden damit in vielen Wirtschaftszweigen im Vergleich zur Effizienz im heutigen Bestand deutliche Effizienzgewinne erzielt.

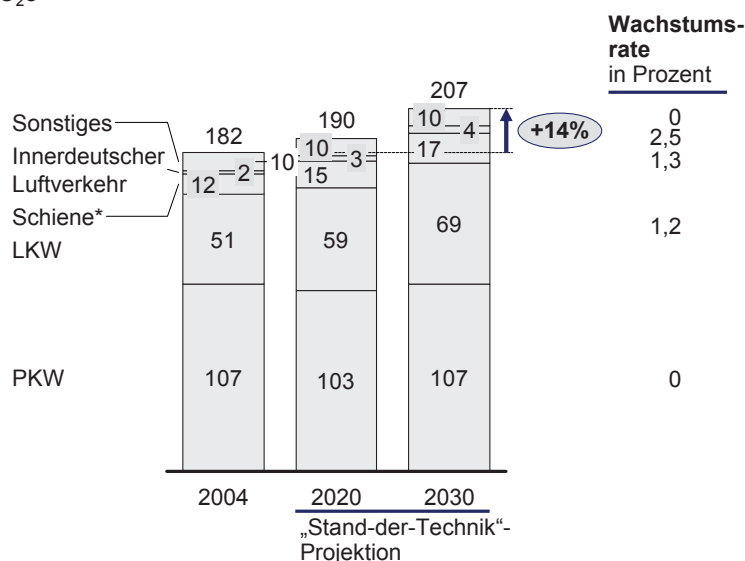
„Stand der Technik“-Projektion: Annahmen und Ergebnisse für den Transportsektor

Für die einzelnen Transportfelder ergeben sich in der „Stand der Technik“-Projektion, d.h. bei sukzessivem Einbau der heute verfügbaren Serientechnik, folgende Entwicklungen:

- Im *Straßenpersonenverkehr* wird der Bestand der PKW bis 2030 von heute 46 auf 50 Millionen Fahrzeuge leicht anwachsen, während die durchschnittliche Fahrleistung mit 13.200 km pro Jahr und PKW unverändert bleibt¹⁵. Damit erhöht sich die Transportleistung um jährlich 0,4 Prozent von derzeit 890 Milliarden auf 970 Milliarden Pkm bis 2030. Die durchschnittliche Sitzplatzbelegung bleibt konstant bei 1,4 Personen je Fahrzeug. Dabei wurde keine Verschiebung der Fahrzeugsegmente unterstellt, da die Marktentwicklung nicht vorhersehbar ist. Prognosen deuten darauf hin, dass Dieselfahrzeuge bis 2030 einen Anteil am Bestand von 50 Prozent erreichen dürften. Die „Stand der Technik“-Projektion geht ferner davon aus, dass jedes Altfahrzeug nach jeweils 12,5 Jahren Lebensdauer durch ein Fahrzeug auf dem heutigen Stand der Technik ersetzt wird. Der durchschnittliche Treibstoffverbrauch heutiger Neuwagen von 7,3 Liter/100 km für Benziner bzw. 6,5 Liter/100 km für Diesel durchdringt somit bis 2020 nach und nach den Bestand. Damit verringert sich allmählich der spezifische Verbrauch der gesamten Flotte, so dass die Emissionen bis 2030 mit 107 Mt CO₂e in etwa konstant bleiben.

15 Alle Angaben zur Marktentwicklung im Folgenden von Polk Marketing Systems und Kraftfahrt-Bundesamt.

Transportsektor: „Stand der Technik“-Projektion Treibhausgasemissionen – Deutschland 2004 - 2030

in Mt CO₂e* Inklusive Emissionen aus Stromverbrauch von Schienenfahrzeugen (2004: 9 Mt CO₂e, 2020: 11 Mt CO₂e, 2030: 12 Mt CO₂e)

Quelle: Studie „Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland“ von McKinsey & Company, Inc. im Auftrag von „BDI initiativ – Wirtschaft für Klimaschutz“ – AG Transport

Schaubild 4

- Im *Straßengüterverkehr* werden 2 Prozentpunkte des insgesamt 2,8 prozentigen jährlichen Wachstums durch einen größeren Fahrzeugbestand und eine leicht höhere Laufleistung verursacht. Der Rest wird über eine bessere Auslastung sowie durch Umstellung auf größere Fahrzeuge im Rahmen der geltenden Gesetzeslage aufgefangen. Damit erhöht sich das Transportaufkommen um 55 Prozent von 400 Milliarden auf 620 Milliarden Tonnenkilometer bis 2020 (820 Milliarden Tkm 2030). Der gegenläufige Effekt – geringerer Kraftstoffverbrauch durch Einsatz effizienterer Technik auf dem Stand von 2004 – verlangsamt das Wachstum der Treibhausgasemissionen auf 1,2 Prozent pro Jahr. In der Summe ergibt sich ein Anstieg der Emissionen um insgesamt 33 Prozent auf 69 Mt CO₂e bis 2030.
- Die jährliche Verkehrsleistung im *Schienenverkehr* wächst zwischen 2004 und 2030 jährlich um 1,3 Prozent im Personenverkehr bzw. 2,8 Prozent im Güterverkehr. Das Emissionsvolumen im Schienenverkehr wird 2030 nach der „Stand der Technik“-Projektion 17 Mt CO₂e betragen, davon stammen gut 80 Prozent als indirekte Emissionen aus dem Stromverbrauch. Das entspricht einer jährlichen Steigerung von 1,5 Prozent gegenüber 2004. Den zunehmenden Emissionen, verursacht durch die steigende Verkehrsleistung, stehen Effizienzgewinne von 0,2 Prozent jährlich durch die flächendeckende Einführung des Stands der Technik von 2004 in der Flotte gegenüber.
- Im innerdeutschen *Luftverkehr* steigt die Verkehrsleistung im Passagierverkehr um jährlich 3 Prozent (von 11 Milliarden auf 24 Milliarden Pkm), bei gleichzeitig konstantem Frachtanteil. Nach der „Stand der Technik“-Projektion im *Luftverkehr* erhöhen sich die Emissionen um jährlich etwa 2,5 Prozent von heute 2,2 auf 4,2 Mt CO₂e im Jahr 2030. Den zunehmenden Emissionen, verursacht durch die steigende Verkehrsleistung, stehen Effizienzeffekte von 0,5 Prozent jährlich gegenüber. Technische Vorteile besitzen die neu in Betrieb genommenen Flugzeugtypen gegenüber der Bestandsflotte vor allem im Hinblick auf Triebwerke, Aerodynamik und Gewicht.



Hebel zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen im Transportsektor

In der vorliegenden Gesamtstudie wurden insgesamt über 300 technische Vermeidungshebel bewertet, davon über 60 im Transportsektor. Damit sind nach Einschätzung der beteiligten Unternehmen und Verbände alle derzeit diskutierten technischen Ansatzpunkte mit mittlerer bis hoher Realisierungswahrscheinlichkeit abgedeckt. Vermeidungshebel, die zu einer Beeinträchtigung der Lebensqualität führen oder die Industriestruktur fundamental verändern, wurden bewusst nicht bewertet.

Bewertung von Hebeln zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen: Methodik

Bei der Bewertung der Vermeidungshebel wurde als Aufsetzpunkt die „Stand der Technik“-Projektion verwendet, die im vorangegangenen Kapitel beschrieben ist. Die Bewertung der Vermeidungspotenziale und -kosten betrachtet neben dem Jahr 2020 auch das Jahr 2030, da im Zeitraum zwischen 2020 und 2030 erhebliche technologische Weiterentwicklungen vor allem im Bereich der Abscheidung und Speicherung von CO₂ zu erwarten sind. Auf eine weitere Ausweitung des Zeithorizonts wurde verzichtet, da die Einschätzung weitergehender technologischer Entwicklungen für die Jahre nach 2030 aus heutiger Perspektive mit zu hohen Unsicherheiten behaftet ist. Allerdings ist davon auszugehen, dass im Zeitraum bis 2030 weitere innovative Technologien auf den Markt kommen können, die gegenüber heute eine weitere Steigerung der Energieeffizienz bzw. eine weitere Senkung von Emissionen bewirken können.

Jede Maßnahme wurde hinsichtlich ihres Vermeidungspotenzials für Treibhausgasemissionen und ihrer Nettokosten im Vergleich zur Referenztechnologie in der „Stand der Technik“-Projektion bewertet.

Die Bewertung des Vermeidungspotenzials erfolgte in drei Schritten:

1. Ermittlung des maximalen technischen Vermeidungspotenzials unter Berücksichtigung von externen Limitationen (z.B. technische Realisierbarkeit, Ressourcenknappheit oder Zyklen der Bestandserneuerung)
2. Festlegung der erwarteten Durchdringungsraten unter der hypothetischen Annahme, dass die Mehrkosten der jeweiligen Maßnahme für den Entscheider kompensiert werden. Die Durchdringung wurde so im Vergleich zum maximalen technischen Potenzial verringert, um beispielsweise nicht ökonomisch motivierten Präferenzen der Entscheider Rechnung zu tragen (z.B. Begrenzung des Potenzials aus starker Verkleinerung des Hubraums). Grundsätzlich reflektieren die Annahmen über die Durchdringungsraten aber ambitionierte und trotzdem in der Praxis realisierbare Umsetzungsvolumina.
3. Berücksichtigung von Interdependenzen mit anderen Vermeidungshebeln. So verringern die technischen Maßnahmen den Durchschnittsverbrauch und damit auch das Potenzial der Biokraftstoffe.

Bei der *Berechnung der Vermeidungskosten* wurde jeweils die Differenz zwischen den Kosten des Vermeidungshebels und den Kosten der jeweiligen Referenztechnologie auf Basis einer Vollkostenrechnung bewertet, die Betriebskosten und Investitionen umfasst. Dabei wurden für neue Technologien jeweils technologiespezifische Lernraten unterstellt, die zu einer allmählichen Kostendegression bis 2020 bzw. bis 2030 führen. An zwei Beispielen aus dem Transportsektor kann das Vorgehen illustriert werden: Wenn beispielsweise durch ein verbessertes Thermomanagement im Jahr 2020 je Fahrzeug 5 EUR gespart werden, weil der geringere Kraftstoffverbrauch die Zusatzkosten überkompensiert, ergibt sich bei einer CO₂-Minderung von 0,05 t CO₂e (das entspricht bei einer jährlichen Laufleistung von 10.000 km einer Verbrauchsreduktion um 0,2 Liter/100 km oder 5 g CO₂e/km) eine Ersparnis von 100 EUR/t CO₂e. Für eine Benzindirekteinspritzung, die 2020 jährliche Zusatzkosten von 100 EUR für den Endkunden bedeutet und gleichzeitig 0,2 t CO₂e einspart, ergeben sich dagegen Vermeidungskosten von 500 EUR/t CO₂e.

Die Berechnung der Vermeidungskosten erfolgte zum einen aus der Perspektive des jeweiligen Entscheiders, zum anderen aus gesamtwirtschaftlicher Perspektive. In der Gesamtbewertung der Vermeidungspotenziale und -kosten ergeben sich hierdurch kaum Unterschiede; einzelne Hebel können aber je nach Perspektive deutlich teurer oder günstiger sein.

In der vorliegenden Sektorperspektive Transport steht die Entscheiderperspektive im Fokus. Bei den PKW sind für die technischen Maßnahmen (abgesehen von den Biokraftstoffen) die Entscheider die Autokäufer, in der Regel Privatkunden, Flottenbetreiber (z.B. für Firmenwagen) und Fahrzeugvermieter. Bei den LKW dominieren die Geschäftskunden. Für die Biokraftstoffe sind die kraftstoffverarbeitenden Unternehmen (Blender) die Entscheider. Für die Schiene sind die Entscheider die Bahnbetreiber (Deutsche Bahn und private Anbieter); in der Luftfahrt sind es die Fluggesellschaften.

Die wesentlichen Unterscheidungsmerkmale zwischen der Entscheider- und der gesamtwirtschaftlichen Perspektive liegen in den Amortisierungszeiträumen, der Kostenbasis der bewerteten Vermeidungshebel, den berücksichtigten Steuern sowie in den Kapitalkostensätzen. Als Beispiel für eine Entscheidersicht ist hier die des PKW-Käufers dargestellt.

- **Amortisierungszeitraum:** Die Entscheiderperspektive betrachtet den Amortisierungszeitraum für die Erstkäufer. Bei Erstkäufern von PKW liegt über die verschiedenen Erstkäufersegmente hinweg die durchschnittliche Haltedauer in Deutschland bei 4,5 Jahren; die durchschnittliche Gesamtlebensdauer für PKW liegt in Deutschland bei 12,5 Jahren. Damit sich die Investition aus Entscheidersicht lohnt, muss ein geringerer Kraftstoffverbrauch bereits während der Ersthaltedauer die Mehrausgaben für effizienzsteigernde Technik aufwiegen¹⁶.
- **Kostenbasis der Vermeidungshebel:** Für eine technische Maßnahme enthält der Nettopreis die anteiligen Kosten für die Entwicklung und die Herstellkosten. Für den Endkunden kommt ein Aufschlag von durchschnittlich 21 Prozent für Verwaltungs- und Vertriebskosten sowie Marge hinzu. Bei den Herstellkosten wurden für neue Technologien jeweils technologiespezifische Lernraten unterstellt, die zu einer allmählichen Kostendegression bis 2020 bzw. bis 2030 führen.

¹⁶ Eine mögliche Steigerung des Wiederverkaufswerts wurde hier nicht berücksichtigt.

- **Steuern:** Aus Entscheiderperspektive sind bei der Bewertung des Anschaffungspreises sowie bei den möglichen Kraftstoffeinsparungen Steuern zu berücksichtigen. Zu den Anschaffungskosten eines Neuwagens mit Aufpreis für verbrauchs-senkende Maßnahmen ist die Mehrwertsteuer mit 19 Prozent hinzuzurechnen. Die Verbrauchseinsparungen werden auf Basis des Kraftstoffpreises an der Zapfsäule berechnet: Dem Kraftstoffnettopreis werden die Mineralölsteuer (0,65 EUR/Liter Benzin, 0,47 EUR/Liter Diesel) sowie die Mehrwertsteuer in Höhe von 19 Prozent zugeschlagen. In der vorliegenden Untersuchung wurde die Entwicklung der Mineralölpreise direkt an die Entwicklung der Rohölpreise gekoppelt¹⁷. Für die Mineralölsteuer wurde ein im Vergleich zu heute unverändertes Niveau unterstellt. Damit ergeben sich für 2020 Kraftstoffpreise von 1,10 bis 1,30 EUR/Liter. In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, dass eine unmittelbare Übertragung der erarbeiteten Ergebnisse auf die europäische Flotte bzw. andere europäische Länder auf Grund der unterschiedlichen Steuergesetzgebungen nicht möglich ist.
- **Kapitalkosten:** Bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der technischen Vermeidungs-hebel sind neben den eigentlichen Kosten des Hebels sowie dem entsprechenden Einsparpotenzial auf der Kraftstoffseite die Finanzierungskosten des Erstkäufers für den höheren Anschaffungspreis zu berücksichtigen. In der Endkundenperspektive wurde der marktübliche Kapitalkostensatz von 4 Prozent (Durchschnittssatz für Pri-vatkunden) bzw. 9 Prozent (Unternehmer) unterstellt.

Die Vermeidungspotenziale und -kosten wurden für jeden Sektor in einer Vermeidungskostenkurve zusammengestellt. Diese Kurve zeigt auf der X-Achse, welchen Beitrag jeder einzelne Vermeidungshebel zur Treibhausgasvermeidung liefert. Auf der Y-Achse sind die Vermeidungskosten pro Tonne CO₂e für den jeweiligen Vermeidungs-hebel abgetragen, und zwar jeweils für ein bestimmtes Jahr. Die Vermeidungshebel, die sich auf der bzw. unterhalb der Nulllinie befinden, sind aus Entscheidersicht über die Nutzungsdauer der Maßnahme wirtschaftlich, d.h. entweder kostenneutral oder sogar mit einer Ersparnis verbunden. Von links nach rechts sind die Maßnahmen in aufsteigender Reihenfolge nach der Höhe der jeweiligen Vermeidungskosten sortiert. Dabei sind die Vermeidungshebel jeweils überschneidungsfrei (auch sich gegenseitig ausschließende Maßnahmen), so dass das Vermeidungspotenzial aller Hebel über die Kurve aufaddiert werden kann. Die Reihenfolge impliziert allerdings nicht, dass die Vermeidungshebel in der dargestellten Abfolge umgesetzt werden sollen. Eine Addition der kumulierten Vermeidungskosten über die verschiedenen Sektoren hinweg ist nicht möglich, da es hier – auf Grund der gewählten Entscheiderperspektive – zu Überschneidungen kommt¹⁸.

Im Vergleich mit dem Basisszenario wurde auch ein Ölhochpreisszenario bewertet. In diesem sinken die Vermeidungskosten der meisten Maßnahmen im Vergleich zur jeweiligen Referenztechnologie um 10 bis zu 50 EUR/t CO₂e, da insbesondere durch verbrauchssenkende Maßnahmen bei höheren Ölpreisen höhere monetäre Einsparungen entstehen.

¹⁷ Vgl. Anhang zum Gesamtbericht „Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland“.

¹⁸ Die Kosten der Maßnahmen sind als durchschnittliche Kosten ausgewiesen, d.h., dass beispielsweise im Jahr 2020 nicht die Kosten für die in diesem Jahr neu gekauften PKW ausgewiesen werden, sondern die durchschnittlichen Kosten über alle neu gekauften PKW auch aus den Vorjahren, in denen die gleiche technische Maßnahme eingebaut wurde (sofern die entsprechenden Fahrzeuge noch Teil der Bestandsflotte sind). In der Kostenkurve dargestellt werden immer die Kosten, die der jeweilige Entscheider während der Abschreibungsdauer aufbringen muss. Das gilt auch, wenn in den Jahren 2020 und 2030 die Abschreibungsdauer für Teile des Bestands bereits lange überschritten ist.

Wesentliche makroökonomische Grundannahmen sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Sektorübergreifende Grundannahmen

		Annahmen			Quelle
		2010	2020	2030	
Allgemeine Grundannahmen	• Jährliches Wachstum BIP	1,6%	1,6%	1,6%	Global Insight
	• Bevölkerungsentwicklung in Mio.	82,0	80,7	78,5	DESTATIS
	• Diskontierungsraten (real)				Arbeitsgruppen
	– Energiesektor	7%	7%	7%	
	– Industriesektor	9,5%	9,5%	9,5%	
	– Gewerbe	9%	9%	9%	
	– Privatpersonen	4%	4%	4%	
Energiepreise, real (2005)	• Rohöl in USD pro Barrel*	57	52	59	Annual Energy Outlook 2007 (EIA)
	– Hochpreisszenario	63	66	75	EWI/EEFA**
	• Steinkohle in EUR/MWh	7,2	7,6	8,1	EWI/EEFA**
	• Braunkohle in EUR/MWh	4,3	4,3	4,3	EWI/EEFA**
	• Erdgas*** in EUR/MWh	20,1	18,8	20,3	EWI/EEFA**
	– Hochpreisszenario	22,0	23,0	25,0	EWI/EEFA**

* Umrechnung: 1 EUR = 1,2 USD

** Energiewirtschaftliches Gesamtkonzept 2030

*** Frei Kraftwerk; berechnet auf Basis EIA Ölpreis

Quelle: Studie „Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland“ von McKinsey & Company, Inc. im Auftrag von „BDI initiativ – Wirtschaft für Klimaschutz“

Schaubild 5

In die Untersuchung eingeflossen sind Annahmen über das Verhältnis der Transportvolumina der einzelnen Verkehrsmittel zueinander (Modalsplit) sowie zur Entwicklung der Verkehrsmittelverteilung im Laufe der Zeit (Modalshift). Als Anhaltspunkte dienten zum einen der Modalsplit in den vergangenen Jahren und zum anderen die Prognosen hinsichtlich des Transportvolumens der einzelnen Modi (Verkehrsmittel) für die Zukunft. In der Vergangenheit sind die Anteile der einzelnen Modi im Wesentlichen konstant geblieben¹⁹. Die Prognosen für das zukünftige Transportvolumen in den Jahren 2020 und 2030 deuten auf keine nennenswerten Verschiebungen zwischen den Modi hin: So wachsen beispielsweise die Tonnenkilometer auf der Schiene wie auch für die LKW von 2004 bis 2030 gleichmäßig um jährlich 2,8 Prozent.

Eine potenzielle Verschiebung der Transportmodi würde signifikante Investitionen in die Infrastruktur voraussetzen, insbesondere in das Schienennetz. In der Vergangenheit sind die Ist-Verkehrsausgaben des Bundes für den Verkehr von 1997 bis 2005 leicht abgesunken²⁰. Wenn sich die Mittelverwendung des Bundes nicht ändert, wird von keinen nennenswerten Verschiebungen zwischen den Modi ausgegangen. Ferner geht die vorliegende Untersuchung von der Annahme eines gleichbleibenden Qualitäts-

19 Anteile der Verkehrsbereiche aus: „Verkehr in Zahlen 2005/2006“, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2007.

20 Ist-Ausgaben des Bundes für den Verkehr aus: „Verkehr in Zahlen 2005/2006“, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2007. Mittelverwendung 1997: 57 Prozent Schiene, 24 Prozent Straße, Mittelverwendung 2005: Schiene 46 Prozent, Straße 30 Prozent.

niveaus der Infrastruktur für alle Verkehrsmodi in der Zukunft aus. Dies setzt voraus, dass das erwartete Verkehrswachstum bei allen Verkehrsträgern durch die benötigten Infrastrukturmaßnahmen abgebildet wird, dies gilt insbesondere für Verkehrswegeengpässe.

Die vorliegende Studie berücksichtigt nur Vermeidungshebel, auf die die deutsche Industrie direkten Einfluss hat. Auf eine Bewertung existierender oder möglicher politischer Steuerungselemente wurde ebenso verzichtet wie auf eine Bewertung wesentlicher Änderungen in der Nachfrage und im Kaufverhalten der Endkunden (z.B. eine verlangsamte Bestandserneuerung bzw. ein verändertes Nachfrageverhalten nach Fahrzeugtypen/-klassen bei Preiserhöhungen), da die Industrie auch das Kundenverhalten allenfalls indirekt beeinflussen kann. Im Fokus der Betrachtung steht demnach die Umsetzung von technischen Vermeidungshebeln. Dabei werden Technologien so einbezogen, wie sie heute auf Basis belastbarer Daten und im Industriekonsens beurteilt werden können. Neue Entwicklungen und Technologiesprünge, etwa bei der Batterietechnologie, mit erheblichen Auswirkungen auf die künftige Emissionsentwicklung sind natürlich möglich und auch wahrscheinlich. Sie sind aber heute nicht zuverlässig zu quantifizieren. Flankierend wurden – auf Basis vorhandener Untersuchungen – potenzielle Änderungen im Fahrverhalten sowie Veränderungen im Verkehrsfluss und alternative Antriebstechnologien als zusätzliches Potenzial identifiziert und ausgewiesen.

Hebel zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen im Transportsektor bis 2020

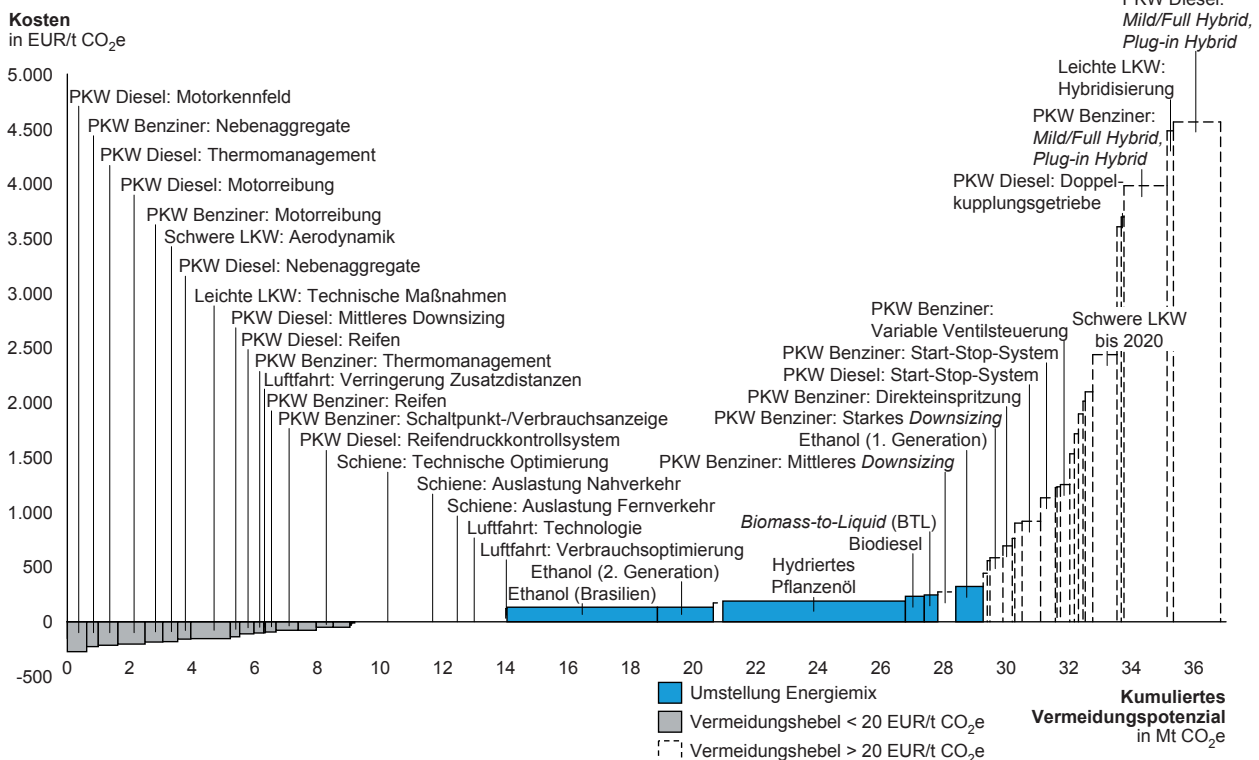
Im Transportbereich liegen wichtige Hebel in der technischen Optimierung, die zum Teil für den Endverbraucher wirtschaftlich ist, und im verstärkten Einsatz von Biokraftstoffen, der mit zusätzlichen Vermeidungskosten verbunden sein wird. Im Straßenpersonenverkehr (PKW) ist der wichtigste technische Hebel die weitere Optimierung der Benzin- und der Dieselmotoren; letztere ist auch der wichtigste Hebel für die leichten LKW. Dabei entstehen für einen Teil der technischen Maßnahmen, insbesondere der forcierten Einführung von Hybridfahrzeugen in allen Fahrzeugklassen, hohe Kosten. Für mittlere und schwere LKW bieten Verbesserungen am Antriebsstrang das höchste Vermeidungspotenzial, allerdings zu hohen Kosten. Darüber hinaus kann im Straßenverkehr ein integrierter Ansatz über alle Teile der Mobilitätskette weitere Beiträge zur Treibhausgasvermeidung leisten. Für Schiene und Luftfahrt liegen die größten Vermeidungspotenziale in der weiteren technischen Optimierung der Flotte und der Auslastungsoptimierung. In Summe sind im Transportbereich etwa 40 Prozent der Vermeidungshebel für den Entscheider wirtschaftlich (14 Mt CO₂e), bedeuten aber häufig zunächst höhere Erstinvestitionen. Durch die Umsetzung dieser Hebel sowie durch die von politischer Seite avisierte Nutzung von Biokraftstoffen mit zusätzlichen Vermeidungskosten können die Emissionen des Transportsektors bis 2020 um insgesamt 28 Mt CO₂e gesenkt werden; dies entspricht einer Senkung um 11 Prozent gegenüber dem heutigen Stand.

Im Transportsektor wurden die Potenziale pro Verkehrsträger (Straße, Schiene und Luftfahrt) jeweils separat bewertet. Über alle Verkehrsträger hinweg wurden Vermeidungshebel mit einem Potenzial von 37 Mt CO₂e (2020) identifiziert. Knapp 40 Prozent dieser Vermeidungshebel (14 Mt CO₂e) sind für den Entscheider wirtschaftlich; weitere

40 Prozent lassen sich bei Umsetzung der Vorgaben zum veränderten Energiemix durch die Einführung von Biokraftstoffen realisieren (14 Mt CO₂e), wobei allerdings für den Entscheider Vermeidungskosten von mehr als 130 EUR/t CO₂e entstehen. Das übrige Vermeidungspotenzial von 9 Mt CO₂e wäre für den Entscheider mit Vermeidungskosten von meist mehr als 300 EUR/t CO₂e verbunden, bei PKW und LKW bis zu mehreren Tausend EUR/t CO₂e.

Transportsektor: Vermeidungskostenkurve – Deutschland 2020

ENTSCHEIDER-PERSPEKTIVE



Quelle: Studie „Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland“ von McKinsey & Company, Inc. im Auftrag von „BDI initiativ – Wirtschaft für Klimaschutz“ – AG Transport

Schaubild 6

Die Ausgangsdaten der Vermeidungskostenkurve sind im Anhang in Tabellenform aufgeführt.

PKW: Technische Vermeidungshebel

Die technischen Vermeidungspotenziale wurden für Diesel- und Benzinmotoren getrennt bewertet. Als Basis dienten Daten, die die Automobilindustrie im Rahmen einer Evaluierung der EU Kommission bzw. deren Beratern zur Verfügung gestellt hat²¹. Die darin enthaltenen 17 Maßnahmen für Benzin- und 14 für Dieselmotoren wurden um

²¹ Daten zur Erstellung des TNO Reports: „Review and analysis of the reduction potential of costs and other measures to reduce CO₂ emissions from passenger cars“, 2006.

5 weitere technische und 3 nicht zyklusrelevante (d.h. nicht im Normverbrauchstest enthaltene) Maßnahmen ergänzt. Die Bewertung von Einsparpotenzial und Vermeidungskosten erfolgte nach verschiedenen PKW-Segmenten. Die Durchdringungsraten der technischen Vermeidungshebel wurden für jedes Segment einzeln festgelegt.

Für die Vermeidungskostenrechnung wurden die Preise der technischen Maßnahmen inklusive Steuern und Kapitalkosten (Zinsen) für die Endkunden ermittelt. Dem gegenüber stehen Einsparungen bei den Kraftstoffkosten (inkl. Mineralöl- und Mehrwertsteuer). Mit der sich aus der Verbrauchseinsparung ergebenden CO₂e-Minderung errechnen sich daraus die Vermeidungskosten je Tonne CO₂e.

Beispielrechnung

Wenn ein *Mild Hybrid* in der Mittelklasse 2020 einen Preisaufschlag von 2.500 EUR verursacht, dann entstehen dem Erstkunden über die durchschnittliche Haltedauer jährliche Zusatzkosten von 600 EUR pro Jahr, inkl. Steuern, Zinsen und Einsparungen durch den geringeren Kraftstoffverbrauch. Die Reduzierung der Treibhausgase entsteht über den reduzierten Kraftstoffverbrauch, der bei einer Laufleistung von 13.000 km/Jahr etwa 0,3 t CO₂e entspricht. Dies führt zu Vermeidungskosten von 2.000 EUR/t CO₂e.

Die PKW-Maßnahmen wurden vereinfachend in fünf technischen Maßnahmenbündeln zusammengefasst.

- **Motorseitige Maßnahmen:** Bei Benzinmotoren lässt sich der Kraftstoffverbrauch durch Direkteinspritzung (homogen oder geschichtet) weiter senken. Durch Verkleinerung des Hubraums in Verbindung mit einer ein- oder zweistufigen Aufladung (*Downsizing*) lässt sich die Effizienz zusätzlich erhöhen. Weitere Maßnahmen sind variable Ventilsteuerung, Reduzierung der innermotorischen Reibung und eine Optimierung des Kühlkreislaufs (Thermomanagement). Ähnliche Veränderungen sind auch beim Dieselmotor möglich, allerdings ist hier die Direkteinspritzung schon Standard. Beim Dieselmotor steckt weiteres Potenzial in einer Verschiebung der Betriebspunkte im Motorkennfeld in Richtung Effizienzoptimum in Verbindung mit einer darauf abgestimmten Getriebeabstufung. Insgesamt ergibt sich daraus 2020 ein Potenzial von 5,6 Mt CO₂e. Für den Endkunden sind gut 3 Mt CO₂e davon wirtschaftlich (z.B. Reduzierung der innermotorischen Reibung, Thermomanagement). Die anderen Maßnahmen sind mit Vermeidungskosten von mehreren hundert Euro je Tonne CO₂e verbunden.
- **Getriebemaßnahmen:** Getriebe können zur Verbrauchsreduktion beitragen durch Erhöhung des Wirkungsgrades, Minimierung von Reibung und Änderung der Übersetzung. Es können dabei Handschalt- bzw. Automatikgetriebe verbessert oder automatisierte Schaltgetriebe bzw. Doppelkupplungsgetriebe verbaut werden. Hierdurch lässt sich bis zu 5 Prozent Kraftstoff einsparen, was 2020 einem Potenzial von 1,1 Mt CO₂e entspricht. Die Getriebemaßnahmen sind für den Endkunden in der Regel mit Vermeidungskosten verbunden, bei den Doppelkupplungsgetriebe sogar im vierstelligen Bereich.

- **Maßnahmen Gesamtfahrzeug:** Durch Verbesserung der Aerodynamik und intelligenten Leichtbau (Reduzierung Gesamtgewicht um 3 bis 4 Prozent) lassen sich 3 Prozent der Treibhausgasemissionen vermeiden, Leichtlaufreifen bringen weitere 2 Prozent. Dadurch lässt sich der Treibhausgasausstoß 2020 um 1,2 Mt CO₂e reduzieren, zu Kosten von etwa 250 EUR je Tonne für den Endkunden.
- **Hybride:** Durch die Einführung von Hybriden (*Mild/Full*) lassen sich weitere 3 Mt CO₂e einsparen. Ein *Full-Hybrid*-Antrieb kann bis zu etwa 25 Prozent des Kraftstoffs eines konventionellen Antriebs einsparen (*Mild Hybrid*: 13 bis 16 Prozent). Eine forcierte Einführung über alle Fahrzeugsegmente mit Marktanteilen von 30 bis 50 Prozent im Jahr 2020 würde allerdings zu hohen Kosten führen. So liegen die Vermeidungskosten des *Mild Hybrid* bei gut 3.000 EUR/t CO₂e und die des *Full Hybrid* bei fast 5.000 EUR/t CO₂e. Trotz der hohen Vermeidungskosten wird hier Entwicklungsarbeit geleistet, da auch andere Faktoren wie z.B. Kundenwünsche oder langfristige technologische Entwicklungen eine Rolle spielen. Ein Teil dieser Verbrauchsvorteile lässt sich auch über eine Micro-Hybridisierung zu geringeren Kosten realisieren. So lässt sich auch schon durch ein Start-Stop-System (ggf. mit Rückgewinnung von Bremsenergie) in Verbindung mit einem verbesserten Energiemanagement und einer Elektrifizierung der Nebenaggregate (Kraftstoff- und Ölpumpe, Servolenkung) ein deutlicher Verbrauchsvorteil erreichen. Im unterstellten Szenario liegt das weitere Vermeidungspotenzial für Micro-Hybride bei 1,7 Mt CO₂e zu Vermeidungskosten von 450 EUR/t CO₂e.
- **Nicht zyklusrelevante Maßnahmen:** Durch weitere Maßnahmen, deren Effekt derzeit nicht im Fahrtzyklus erfasst wird, lässt sich im Straßenverkehr der Verbrauch weiter reduzieren. Hierzu zählen Schaltpunkt- und Verbrauchsanzeige, die den Fahrer zu frühzeitigem Hochschalten bzw. verbrauchssenkender Fahrweise animieren. Ein Reifendruckkontrollsystem kann überdies signalisieren, wenn der Reifendruck zu niedrig ist. Diese Maßnahmen sind für den Endkunden wirtschaftlich. Zusätzlich lässt sich eventuell mit einer optimierten Klimaanlage die Gesamtemission reduzieren. Für die Bewertung wurden die Analysen des TNO Reports zu Grunde gelegt; für 2020 ergibt sich ein Potenzial von 3 Mt CO₂e.

Insgesamt beträgt das so ermittelte Vermeidungspotenzial fast 15,6 Mt CO₂e. Davon sind etwa 8 Mt CO₂e für den Endkunden wirtschaftlich, das restliche Potenzial ist mit Vermeidungskosten von meist mehreren hundert bis zu einigen tausend Euro je Tonne CO₂e verbunden.

LKW: Technische Vermeidungshebel

Nutzfahrzeuge haben in absoluten Zahlen ein geringeres Vermeidungspotenzial als PKW. Gegenüber den Basiswerten aus der „Stand der Technik“-Projektion lassen sich 2020 etwa 3 Mt CO₂e (5 Prozent) zu Kosten von durchschnittlich 900 EUR je Tonne einsparen. Dies resultiert wie bei den PKW aus einer Kombination von Maßnahmen im Antriebsstrang und am Gesamtfahrzeug.

- Da *leichte Nutzfahrzeuge* („Van“) teilweise auf PKW-Bauweise basieren, greifen bei ihnen ähnliche technische Maßnahmen zur Kraftstoffeinsparung. Allerdings ist auf Grund ihres Verwendungszwecks und des höheren Kostenbewusstseins der

Käufer die technische Ausführung schon näher am Verbrauchsoptimum und damit das technisch mögliche Potenzial geringer.

Bei direkt von PKW abgeleiteten Fahrzeugen greifen beispielsweise motorseitige Maßnahmen wie *Downsizing* von (zumeist Diesel-)Aggregaten. Sie senken den Kraftstoffverbrauch um bis zu 4 Prozent. Auch lässt sich die innermotorische Reibung noch weiter reduzieren, was den Verbrauch um ein weiteres Prozent senkt. Je nach Einsatzzweck können optimierte Getriebe den Kraftstoffverbrauch um weitere 3 Prozent senken, eine verbesserte Aerodynamik bringt noch einmal 1 Prozent. Zusammen mit dem Einbau eines Start-Stop-Systems inklusive teilweiser Rückgewinnung der Bremsenergie lassen sich 2020 auf diese Weise 1,3 Mt CO₂e vermeiden, wodurch der Endkunde etwa 160 EUR pro vermiedener Tonne CO₂e einspart.

Bei zusätzlicher Hybridisierung relevanter Fahrzeugklassen vor allem im Verteilerverkehr²² ergibt sich für 2020 insgesamt ein Vermeidungspotenzial von 1,5 Mt CO₂e. Die Vermeidungskosten für den Endkunden liegen bedingt durch die teuren Hybridmaßnahmen im Gesamtdurchschnitt bei fast 500 EUR je Tonne.

- *Schwerere und mittelschwere Nutzfahrzeuge (inklusive Busse)* sind auf Grund der starken Kosten- und Wirtschaftlichkeitsorientierung der Käufer schon heute weitestgehend verbrauchsoptimiert. Dies gilt sowohl für den Verteiler- als auch den Fernverkehr.

Besonderheiten ergeben sich für dieses Segment aber vor allem aus den EU-Abgasregelungen. Die Verschärfung der Abgasvorschriften mit EURO VI und gegebenenfalls weiteren Vorschriften wird Maßnahmen erzwingen, die eher auf eine optimierte Verbrennung und Abgasreinigung durch Partikelfilter und Abgasrückführung zielen als auf geringeren Verbrauch. Die dazu notwendigen technischen Veränderungen steigern den Verbrauch je nach Anforderung um bis zu 6 Prozent und zehren damit mehr als die Hälfte des Reduzierungspotenzials bis 2020 wieder auf. Übrig bleibt eine Verbrauchsreduzierung von etwa 3 Prozent gegenüber heute, dies entspricht einem Potenzial von 0,8 Mt CO₂e im Jahr 2020. Erreicht wird diese Einsparung hauptsächlich durch eine Kombination von Maßnahmen im Antriebsstrang, eine weitere Erhöhung des Einspritzdrucks, die Optimierung der innermotorischen Reibung und die Verminderung des Gegendrucks der Systeme zur Abgasreinigung. Außerdem wird das Energiemanagement der Nebenaggregate optimiert und die Aerodynamik inkrementell verbessert. Insgesamt liegen die Kosten hierfür bei 2.440 EUR/t CO₂e.

Weiteres Einsparpotenzial ergibt sich nicht zuletzt aus der grundlegenden aerodynamischen Optimierung der Fahrzeuge durch Maßnahmen an Front und Heckspoiler. Dies würde einen um ca. 20 Prozent niedrigeren Luftwiderstandsbeiwert ermöglichen, setzt allerdings die Freigabe der maximalen Fahrzeuglängen seitens des Gesetzgebers voraus. Bei Sattelzügen würde dies bei einer konstanten Geschwindigkeit von 80 km/h zu 7 bis 8 Prozent weniger Verbrauch führen. Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Fahrzeugklassen und Anwendungsgebiete ergibt sich eine durchschnittliche Reduzierung von 2 Prozent für den gesamten

22 Kurzstrecken, überwiegend innerorts (z.B. Auslieferung von Waren).

Kraftstoffbedarf der schweren LKW. Daraus errechnet sich ein Potenzial von etwa 0,5 Mt CO₂e im Jahr 2020 mit Ersparnissen von 180 EUR je Tonne für den Endkunden.

Eine weitere technologische Option zu einer möglichen Verbrauchsreduktion ist der Einsatz von sogenannten „EuroCombis“, d.h. Fahrzeugen mit größerem Ladevolumen und höherer Zuladung, deren Einsatz jedoch eine Änderung der Gesetzeslage voraussetzen würde. Eine Ausdehnung der maximalen Gesamtfahrzeuglänge auf 25,25 m und eine Erhöhung der Zuladung (Anhebung des zulässigen Gesamtgewichts) kann die spezifischen Emissionen, d.h. pro Tonnenkilometer, senken. Erste Herstellertests deuten auf eine mögliche Reduzierung des CO₂-Ausstoßes je Tonnenkilometer in Höhe von 10 bis 20 Prozent hin. Dabei erhöhen sich die Investitionskosten je Fahrzeug um 15.000 bis 20.000 EUR, was die Maßnahme bei entsprechenden Streckenprofilen und Gütern für den Entscheider wirtschaftlich macht. Im Güterfernverkehr auf der Straße kann der „EuroCombi“ bis 2030 einen Anteil von 25 Prozent erreichen und damit zu einer Gesamtreduzierung der CO₂-Emissionen beitragen, wenn er einen Teil des für die Straße prognostizierten Güterverkehrswachstums aufnimmt und in den kombinierten Güterverkehr eingebunden wird. Die „EuroCombis“ sind als zusätzliches Potenzial zu betrachten und sind nicht in die Gesamtberechnung eingeflossen.

Omnibusse, also Stadt- oder Reisebusse, bilden eine Sonderkategorie, lehnen sich aber in den zur Verfügung stehenden technischen Maßnahmen stark an die schweren LKW an. Im Jahr 2004 betrug der Bestand an Kraftomnibussen etwa 86.000 Fahrzeuge mit einem Gesamtverbrauch von gut 1 Milliarden Liter (Diesel-)Kraftstoff²³. Daraus ergeben sich CO₂-Emissionen in Höhe von mehr als 2,5 Mt CO₂e. Zusätzlich zu den technischen Maßnahmen, die auch bei schweren LKW zur Anwendung kommen, spielt insbesondere bei Stadtbussen die Hybridisierung eine Rolle. Dadurch kann der Verbrauch um 25 bis 30 Prozent gesenkt werden; auf Grund der geringen Stückzahlen liegt das entsprechende Vermeidungspotenzial bis 2030 allerdings deutlich unter 0,5 Mt CO₂e pro Jahr. Verbunden ist dies mit zusätzlichen Investitionen von 100.000 EUR je Fahrzeug im Jahr 2020 und etwa 60.000 EUR im Jahr 2030. Die Vermeidungskosten je Tonne CO₂e für *Full Hybrids* liegen damit im Jahr 2020 bei deutlich über 500 EUR und sinken bis zum Jahr 2030 auf 100 bis 200 EUR. Berücksichtigt ist dabei neben spezifischer Laufleistung und Verbrauch der Busse ein Abschreibungszeitraum von 6 bis 8 Jahren, der deutlich über den 3 Jahren für LKW liegt. Trotz der hohen Vermeidungskosten wird diese Technologie von Herstellern weiterentwickelt, da Hybridantriebe auch in Bezug auf Geräusch und Fahrkomfort deutlich Vorteile bieten, die insbesondere für den Stadtbus von großer Bedeutung sind.

PKW und LKW: Einsatz von Biokraftstoffen

Als biogener Dieseleratz wird in Deutschland derzeit vornehmlich Biodiesel verwendet. Dieser wird in der Regel aus Raps- oder Sonnenblumenöl durch Umesterung gewonnen. Als benzinähnlicher Biokraftstoff bietet sich derzeit vor allem Ethanol an, das durch Fermentation und anschließende Destillation von Pflanzenzucker gewonnen

23 „Gesamtübersicht über die Entwicklung des Bestandes an Kraftfahrzeugen“, Kraftfahrt-Bundesamt, 2007; „Verbrauchsrechnung für Kraftfahrzeuge“, DIW Berlin, 2005.

wird. Die Quantifizierung kann in der Energieeinheit Joule bzw. Petajoule (PJ) oder in Volumeneinheiten erfolgen.

Derzeit beträgt der energetische Anteil der Biokraftstoffe am gesamten Kraftstoffverbrauch in Deutschland 4,7 Prozent (2006), im Jahr 2004 lag er bei knapp 2 Prozent. Hauptsächlich handelt es sich dabei um Biodiesel, der etwa zur Hälfte aus der Umesterung heimischen Rapsöls stammt. Das Biokraftstoffquotengesetz gibt vor, diesen Anteil bis 2010 auf 6,75 Prozent zu steigern. Darüber hinaus wird vom Gesetzgeber die Zielvorgabe diskutiert, im Jahr 2020 einen Anteil von 17 Prozent (energetisch) zu erreichen. Im Rahmen dieser Untersuchung wurde ein Szenario bewertet, mit dem sich diese Zielvorgabe darstellen lässt. Bioerdgas ist nicht getrennt ausgewiesen, prinzipiell aber eine Möglichkeit, die CO₂-Emissionen von Erdgasfahrzeugen zu senken. Das Ziel von 17 Prozent für 2020 wird sich allerdings nur über signifikante Importe und bei Technologieoffenheit für verschiedene Herstellungsverfahren erreichen lassen.

Im dem zu Grunde gelegten Basisszenario beträgt der Biokraftstoffanteil sowohl bei Benzin als auch Diesel 17 Prozent im Jahr 2020. Bis 2030 wird das Volumen als konstant angenommen, da noch keine Zielvorgaben für 2030 vorliegen. Durch den insgesamt sinkenden Kraftstoffverbrauch wird 2030 mit dem gleichen Biokraftstoffvolumen ein Anteil von 18 Prozent erreicht. Im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen würde der CO₂-Ausstoß durch die Biokraftstoffe 2020 und 2030 um 18,8 Mt CO₂e gesenkt, also um etwa 14,3 Mt CO₂e mehr als heute.

Abweichend von dem als gegeben angenommenen Biokraftstoffanteil von 17 Prozent sowohl bei Diesel als auch bei Benzin ist auch eine andere Verteilung denkbar. So lässt sich ein Anteil von 17 Prozent am gesamten Kraftstoffverbrauch ebenfalls darstellen, wenn der Ausbau der Biokraftstoffe hauptsächlich über Ethanol erfolgt. Dies würde auch unter Betrachtung der Herstellkosten (inkl. Rohstoffe) die kostengünstigste Alternative darstellen. Auf Grund der besseren CO₂-Bilanz von Ethanol aus Brasilien und Produktionsverfahren der 2. Generation²⁴ würden zudem die Vermeidungskosten sinken. Allerdings ist dies nicht vereinbar mit der aktuellen Raffineriestruktur in Deutschland, da das Missverhältnis von Benzin zu Diesel noch weiter verschlechtert würde. Ebenso denkbar ist, dass der Anteil von Biokraftstoffen bei Diesel höher als bei Benzin ausfällt, zumal der Anteil von Dieselfahrzeugen bei PKW und der Güterverkehr nach heutigen Prognosen weiter steigen werden. Allerdings ist bei Herstellung von Pflanzenölen mit einem höheren Flächenbedarf als bei Ethanol aus Zuckerrohr zu rechnen.

Biomassepotenzial

Für die Flächenabschätzung wurde auf das Referenzszenario des Öko-Instituts aufgesetzt²⁵. Dabei wurde die Annahme getroffen, dass landwirtschaftliche Flächen zunächst zur Befriedigung der Nahrungsmittelnachfrage verwendet und erst in zweiter Priorität Flächen zum Anbau von Energiepflanzen genutzt werden. Durch eine stärkere Nutzung geeigneter Anbauflächen und biogener Reststoffe lässt sich der heimische Anteil der Biokraftstoffe bis 2020 auf 120 PJ (ca. 6 Prozent des Kraftstoffverbrauchs) und bis 2030 auf 190 PJ (10 Prozent) steigern.

²⁴ Produktionsverfahren der 2. Generation ermöglichen die Verarbeitung jeglicher zellulosehaltiger Biomasse und damit die Nutzung der gesamten Pflanze.

²⁵ „Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse“, Referenzszenario, Öko-Institut, 2004.

Auf Grund der hohen Zielvorgaben im Kraftstoffbereich und um sicher zu stellen, dass verfügbare Potenziale sektorübergreifend nicht mehrfach vergeben werden, ist die Annahme getroffen worden, dass die in Deutschland zusätzlich zu heute verfügbaren Agrarflächen künftig primär der Produktion von Kraftstoffen dienen. Darüber hinausgehend notwendige Biomasse muss über Importe abgedeckt werden (insbesondere Ethanol sowie Pflanzenöl aus den Tropen). In der Berechnung für 2020 wird davon ausgegangen, dass Deutschland 230 PJ (Endenergie) als Kraftstoff oder Biomasse einführen muss. Das entsprechende Volumen steht nur dann zur Verfügung, wenn der Importbedarf anderer Industrienationen deutlich unter dem von Deutschland liegt. Sollte Deutschland zur gleichen Zeit 10 Prozent des Erdgasbedarfs durch Biogas ersetzen wollen, müsste entweder die landwirtschaftliche Fläche für den Ausbau von nachwachsenden Rohstoffen verdoppelt oder noch mehr Biokraftstoff importiert werden.

Auch bei zurückhaltender Abschätzung der Verfügbarkeit heimischer Biomasse aus der Landwirtschaft ist allerdings nicht auszuschließen, dass es auf Grund der Zahlungsfähigkeit der energetischen Nutzer (teilweise bedingt durch regulatorische Eingriffe) zu einer Verschärfung der Nutzungskonkurrenz mit den klassischen stofflichen Nutzern kommt. Bei der landwirtschaftlichen Biomasse (Getreide, Raps, Energiepflanzen, Stroh) kann die verstärkte Nachfrage zur Verwendung für Biokraftstoffe – auch vor dem Hintergrund einer ohnehin zu beobachtenden globalen Rohstoffverknappung – zu einem Preisanstieg für Rohstoffe in der Nahrungs- und Futtermittelindustrie führen. Entlastend kann hier der Wechsel bei der Biokraftstoffproduktion von Verfahren der 1. Generation zu Verfahren der 2. Generation wirken.

Kraftstoffsplit

Es wird angenommen, dass sich der Einsatz von herkömmlichem Biodiesel aus motor-technischen Gründen in Deutschland nicht signifikant erhöhen wird. Stattdessen wird im Basisszenario der biogene Anteil von 17 Prozent bei Dieselkraftstoffen über die Beimischung hydrierter Pflanzenöle erreicht, die ein qualitativ hochwertigeres Produkt darstellen. Diese müssen z. B. als Soja-, Raps-, Palm- oder Jatrophaöl importiert werden und können dann in Deutschland weiterverarbeitet werden (z.B. Co-Hydrierung in entsprechend ausgerüsteten Raffinerien).

Eine deutliche Erhöhung des Biokraftstoffanteils aus heimischem Anbau ist nur durch Produktionsverfahren fortgeschrittener Generation für Ethanol möglich, die zellulosehaltige Biomasse (z.B. Stroh, Gräser) verwertbar machen. Diese Produktionsverfahren werden frühestens ab ca. 2015 in großtechnischem Maßstab zu Verfügung stehen und bis 2030 allmählich heutige Produktionsverfahren der 1. Generation ersetzen.

Die Gewinnung von synthetischem Diesel aus Biomasse über die Vergasung von Biomasse und anschließende Verflüssigung über Fischer-Tropsch-Verfahren ist aufwendiger und heute deutlich teurer als die Erzeugung von Ethanol. Für eine größere Verbreitung von *Biomass-To-Liquid* (BTL) im Kraftstoffmarkt müssten noch erhebliche Fortschritte beim Hochskalieren dieser Technologie erreicht werden. Gleichwohl ist BTL ein Kraftstoff mit sehr guter CO₂-Bilanz und hervorragenden Eigenschaften, der problemlos in hohen Konzentrationen in heutigen und künftigen Fahrzeugen eingesetzt werden kann. Mittelfristig macht BTL daher etwa 2 bis 4 Prozent der Biokraftstoffe aus. Ein anderes Premiumprodukt im Entwicklungsstadium ist Butanol, das ähnlich wie Ethanol aus der Fermentation von Zucker, Stärke oder lignozellulosehaltiger Biomasse

gewonnen werden kann, allerdings heute wesentlich teurer in der Herstellung ist. Bei verbesserter Kostenposition könnte Butanol eines Tages den Premium-Biokraftstoff für Ottomotoren darstellen und somit einen Anteil des hier ausgewiesenen Ethanolvolumens für sich beanspruchen.

CO₂-Bilanz

Die CO₂-Bilanz der einzelnen Treibstoffe wurde über die gesamte Wirkungskette bewertet (*Well-to-Wheel*). Basis hierfür waren die Untersuchungsergebnisse von Concawe und Eucar für die Europäische Kommission²⁶.

Beim Anbau der Biomasse muss unter allen Umständen auf Nachhaltigkeit geachtet werden, um eine positive CO₂- und Umweltbilanz sicherzustellen. So dürfen z.B. keine zusätzlichen Flächen gerodet werden. Insbesondere beim Import von Palm- und Sojaöl gilt es, dies sicherzustellen und entsprechende Zertifizierungen kritisch zu überprüfen.

Dieser Studie wurden folgende CO₂-Nettoeinsparungen von Biokraftstoffen zu Grunde gelegt: Ethanol der 1. Generation 35 Prozent, Ethanol 2. Generation bzw. aus brasilianischem Zuckerrohr 85 Prozent, Biodiesel 65 Prozent, hydriertes Pflanzenöl 80 Prozent und BTL 85 Prozent.

Kostenbewertung

Für die Bewertung der Vermeidungskosten wurden in Anlehnung an Concawe und andere Studien Marktpreise für die biogenen Rohstoffe angesetzt und detaillierte Herstellkosten sowie Transport und Marge addiert. Außerdem wurden notwendige technische Änderungen an den Fahrzeugen berücksichtigt.

Daraus ergeben sich Kosten von 65 Cent/Liter für Ethanol der 1. Generation, 43 Cent/Liter für Ethanol der 2. Generation und 40 Cent/Liter für Ethanol aus brasilianischem Zuckerrohr. Für Biodiesel und hydriertes Pflanzenöl belaufen sich die Kosten auf 75 Cent/Liter und bei BTL auf 85 Cent/Liter.

Bei der Bewertung der Marktpreise werden die derzeitigen gesetzlichen Rahmenbedingungen fortgeschrieben. Dies umfasst ein Auslaufen der Steuerbefreiung für Biokraftstoffe und den Verzicht auf die Berücksichtigung ihrer spezifischen CO₂-Bilanz bei der Preissetzung. Ebenso wird im Zeitraum bis 2020 ein Fortbestand des Importzolls für unvergälltes Ethanol von 19 Cent/Liter angenommen, der grundsätzlich die heimischen Produktionsverfahren in der 1. Generation schützt.

Es wird angenommen, dass sich der Preis für Ethanol an den Kosten für importiertes Ethanol orientiert. Dadurch entsteht ein Ethanolpreis von 59 Cent/Liter im Jahr 2020, der sich nach einem möglichen Wegfall der Importzölle auf 40 Cent/Liter reduziert (Basisannahme für 2030).

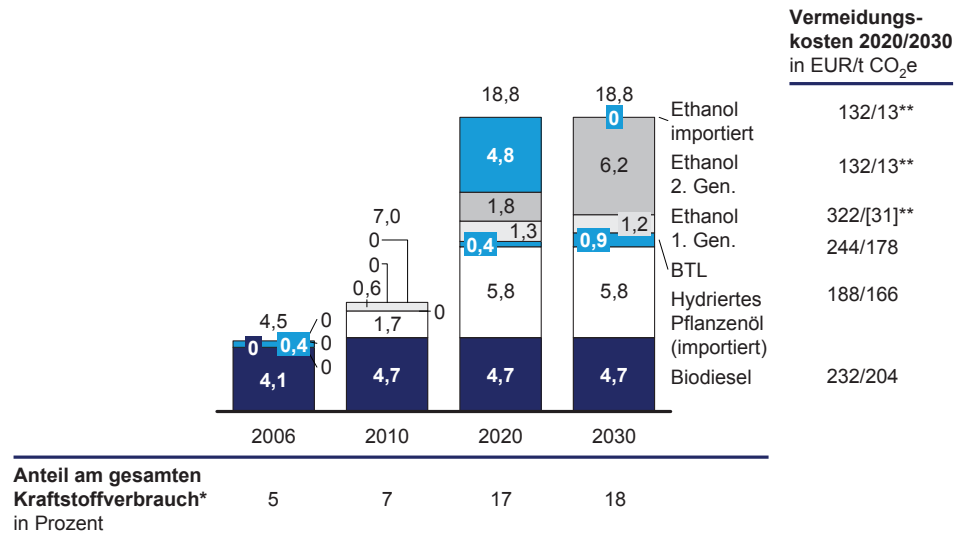
Im Basisszenario ergeben sich auf der Basis der angenommenen Marktpreise insgesamt Vermeidungskosten im Jahr 2020 (2030) von 132 EUR/t CO₂e (13 EUR) für Ethanol der 2. Generation und Importe aus Brasilien, und 322 EUR/t CO₂e (31 EUR/t CO₂e) für

²⁶ „Well-to-Wheel analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context“, Concawe, 2006.

Ethanol der 1. Generation. Es ist anzumerken, dass Ethanol der 1. Generation unter den angenommen Marktbedingungen, insbesondere für 2030, nicht wirtschaftlich herzustellen ist. Biodiesel liegt bei 232 EUR/t CO₂e (204 EUR/t CO₂e), hydriertes Pflanzenöl bei 188 EUR/t CO₂e (166 EUR/t CO₂e) und BTL bei 244 EUR/t CO₂e (178 EUR/t CO₂e).

Vermeidungspotenzial von Biokraftstoffen – Deutschland 2006 - 2030

in Mt CO₂e



* Energetisch

** Kosten für Ethanol orientieren sich an den Preisen für Importe aus Brasilien unter der Annahme, dass Importzölle von 0,19 EUR/Liter bis 2020 bestehen bleiben und anschließend abgebaut werden; Ethanol der 1. Generation insb. in 2030 nicht wirtschaftlich herzustellen

Quelle: Studie „Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland“ von McKinsey & Company, Inc. im Auftrag von „BDI initiativ – Wirtschaft für Klimaschutz“ – AG Transport

Schaubild 7

PKW und LKW: Weitere Hebel

Im Rahmen der Studie wurden auch alternative Antriebstechnologien auf ihre Einsatzmöglichkeit in PKW sowie ihren Beitrag zur Treibhausgasvermeidung untersucht. Dazu zählen Antriebe mit Erdgas- und Wasserstoffverbrennungsmotor, Brennstoffzellen sowie Fahrzeuge, die einen Verbrennungsmotor besitzen aber auch rein elektrisch fahren und ihren Strom über das heimische Netz beziehen können (sogenannte *Plug-in Hybrids*). Mit diesen innovativen Technologien kann der Transportsektor zukünftig einen Beitrag zur weiteren, nicht in der Vermeidungskurve abgebildeten Emissions-senkung leisten. Allerdings ist insbesondere bei Wasserstoff die Sicherstellung der notwendigen Verfügbarkeit mit hohen Kosten für die Infrastruktur verbunden.

- **Erdgasfahrzeuge** bieten eine saubere Verbrennung des Kraftstoffs und können für den Endkunden auf Grund der geringeren Steuerbelastung wirtschaftlich sein. Der dabei entstehende CO₂-Ausstoß unterbietet den von Benzinern heute um bis zu 20 Prozent, gegenüber Dieselfahrzeugen ist der Vorteil geringer. Im Hinblick auf das Verbesserungspotenzial von Benzinmotoren sind auch bei Erdgasfahrzeugen deutliche Optimierungen notwendig, um den relativen Abstand bei den CO₂-Emissionen zu halten. Der ausgewiesene Emissionsvorteil bezieht sich dabei auf den aktuellen Versorgungsmix von Erdgas in Europa. Falls zukünftig importiertes Erdgas zunehmend längere Transportstrecken zurücklegen müsste, würde sich die CO₂-Bilanz

der gesamten Wirkungskette (*Well-to-Wheel*) verschlechtern. Da auch längerfristig nur mit einem kleinen Anteil am Fahrzeugmarkt gerechnet wird, ist das Gesamtpotenzial der Erdgasfahrzeuge im Hinblick auf CO₂-Vermeidung gering.

- Als *Plug-in Hybrids* werden alle Hybride bezeichnet, deren Batterie nicht nur während der Fahrt durch Rückgewinnung von Bewegungsenergie (Rekuperation) bzw. über den Verbrennungsmotor, sondern auch über das elektrische Energieversorgungsnetz (Steckdose) geladen werden kann. Verschiedene Ausführungen mit variierendem Leistungsspektrum sind möglich, je nachdem wie groß Energiespeicher und elektrischer Motor ausgelegt sind. Beispielfähig wird hier ein System berücksichtigt, das rein elektrisches Fahren mit einer Reichweite von 40 km ermöglicht, dabei allerdings nicht die vom Verbrennungsmotor gewohnte Fahrdynamik bietet. Prinzipiell wird ähnlich wie auch bei einem herkömmlichen *Full Hybrid* ein Verbrauchsvorteil von 22 Prozent gegenüber einem nicht hybridisierten Fahrzeug geboten. Durch das rein elektrische Fahren ergibt sich ein zusätzliches Vermeidungspotenzial, dessen Höhe allerdings von den Emissionswerten der Stromproduktion (der CO₂-Intensität des Strommix²⁷) abhängt. *Plug-in Hybrids* können einen Teil des Marktanteils der *Full Hybrids* substituieren und würden deren Vermeidungspotenzial im Jahr 2020 um etwa 15 Prozent erhöhen. Die Vermeidungskosten liegen für den *Plug-in Hybrid* bei etwa 6.000 EUR/t CO₂e im Jahr 2020 und 3.700 EUR/t CO₂e im Jahr 2030, wenn das Basisszenario der Stromerzeugung für Deutschland unterstellt wird²⁸. Ein anderer Erzeugungsmix würde zu veränderten Vermeidungskosten führen.
- Mit Wasserstoff angetriebene *Brennstoffzellenfahrzeuge* bieten die Möglichkeit des emissionsfreien Fahrens. Allerdings müssen die bei der Kraftstoffherstellung entstehenden Emissionen berücksichtigt werden. Bei der Berechnung wurde die derzeit kostengünstigste Methode unterstellt, die Dampfreformierung aus Erdgas. Bei angenommenen Mehrkosten für ein Brennstoffzellenfahrzeug von etwa 15.000 EUR (2020) und 7.000 EUR (2030) gegenüber einem konventionellen Fahrzeug ergeben sich Vermeidungskosten von etwa 7.500 EUR/t CO₂e in 2020 und 3.700 EUR/t CO₂e in 2030. Bei Nutzung regenerativer Energiequellen zur Erzeugung des Kraftstoffs würden diese Kosten sinken. Im Hinblick auf die notwendige Infrastruktur zur Wasserstoffversorgung wurden niedrige Stückzahlen angenommen (weniger als 1 Prozent der Neuwagenverkäufe 2020 und unter 5 Prozent 2030), wodurch das gesamte Vermeidungspotenzial gering ausfällt.
- Darüber hinaus bieten Fahrzeuge mit *Wasserstoffverbrennungsmotor* Potenziale zur Senkung der CO₂-Emissionen. Sie nutzen die bei der Verbrennung des Wasserstoffs entstehende Energie zum Antrieb. Für eine positive CO₂-Bilanz ist allerdings die regenerative Erzeugung des Wasserstoffs notwendig.

Neben den technischen Vermeidungshebeln und dem erhöhten Anteil von Biokraftstoffen gibt es weitere Möglichkeiten zur Treibhausgasvermeidung, die nicht direkt am Einzelfahrzeug ansetzen bzw. eine Verhaltensänderung voraussetzen. Hierzu gehören eine kraftstoffsparende Fahrweise, ein verbessertes Flottenmanagement der Nutzfahrzeuge, die Qualität der Infrastruktur sowie Maßnahmen zur Optimierung des Verkehrsflusses, z.B. in Form von Stauvermeidung.

27 Unterstellte Nettointensität von 0,49 t CO₂e/MWh elektrisch in 2020 und 0,24 t CO₂e/MWh elektrisch in 2030.

28 Vgl. Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland – Sektorperspektive Energie.

- Eine Schulung von Fahrzeugführern in ökonomischer Fahrweise (*Eco-Driving*) kann den Verbrauch von PKW um bis zu 15 Prozent senken. Langfristig führt diese Maßnahme nach aktuellen Studien zu einer durchschnittlichen Verbesserung um 6 Prozent. Die Ausbildung kann für die Führerscheinanwärter in der Fahrschule und für erfahrene Fahrer im Rahmen von Auffrischungstrainings gestaltet werden. Insgesamt lassen sich durch entsprechende Schulungen eines Fünftels aller PKW-Fahrer bis 2020 rund 1 Mt CO₂e vermeiden.
- Im LKW-Segment bildet das optimierte *Flottenmanagement* einen zusätzlichen Hebel zur Treibhausgasvermeidung. Durch den vermehrten Einsatz verbesserter und neuer Technologien, z.B. Software zur Auslastungsplanung und GPS-gestützter Routenplanung, können die spezifischen Treibhausgasemissionen um bis zu 10 Prozent gesenkt werden, was bis 2030 einem zusätzlichen Vermeidungspotenzial in Höhe von 1 Mt CO₂e entspricht.
- Einfluss auf die Treibhausgasemissionen des Straßenverkehrs hat nicht zuletzt die Qualität der *Infrastruktur*. In der vorliegenden Untersuchung wurde als Basisannahme definiert, dass von einer gleichbleibenden Qualität der Infrastruktur für die Zukunft auszugehen ist. Zusätzlich können technische Maßnahmen zur Verbesserung des *Verkehrsflusses* beitragen, insbesondere zur Stauvermeidung. Hierzu gehören z.B. moderne Verkehrsleitsysteme, intelligente Ampelschaltungen und situationsadaptive Geschwindigkeitsvorgaben. Der Gesamteffekt solcher Maßnahmen hängt stark von dem jeweiligen Einsatzgebiet ab. Für Deutschland gibt es noch kein aktuelles Gesamtbild, jedoch lassen Studien für Europa und Japan ein deutliches Vermeidungspotenzial erkennen. Wie beispielhafte Untersuchungen zeigen, können durch eine systematische Anwendung entsprechender Infrastrukturmaßnahmen die Treibhausgasemissionen in abgegrenzten Gebieten um bis zu 10 Prozent gesenkt werden²⁹. Derzeit wird von der Automobilindustrie eine umfassende Untersuchung hierzu durchgeführt.

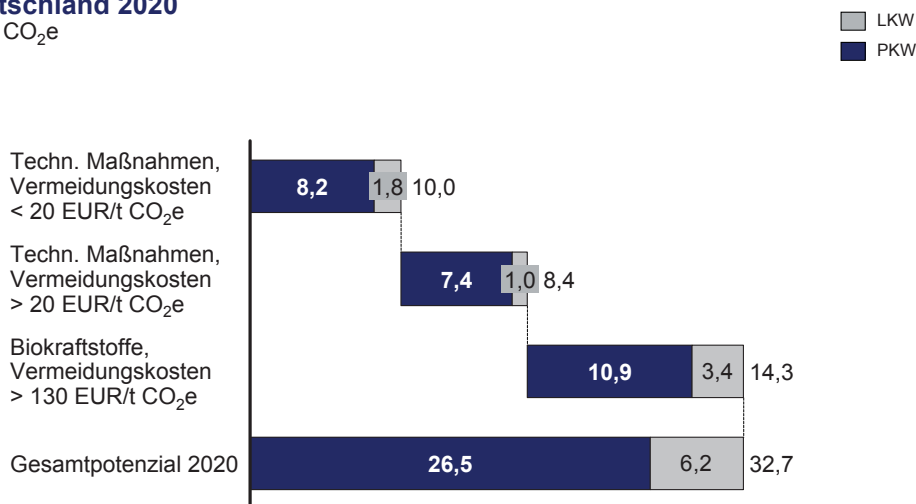
PKW und LKW: Zusammenfassung

Als Zwischenfazit lässt sich für den Straßenverkehr festhalten, dass insgesamt rund ein Drittel des Vermeidungspotenzials durch technische Hebel realisiert werden kann, die sich wirtschaftlich rechnen (31 Prozent). Die weiteren technischen Hebel, ein Viertel des Vermeidungspotenzials, sind mit Kosten verbunden, die höher als 20 EUR/t CO₂e sind. 44 Prozent des Potenzials ergeben sich durch die Erreichung der politischen Zielvorgaben, den Anteil der Biokraftstoffe auf 17 Prozent zu erhöhen. Dies ist mit Vermeidungskosten von mehr als 130 EUR/t CO₂e verbunden. Die Reihenfolge impliziert nicht, dass die Vermeidungshebel in der dargestellten Abfolge umgesetzt werden sollen, allerdings wird unter betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten die Kosteneffizienz ein wesentliches Entscheidungskriterium sein.

29 Vgl. z.B. „Umweltwirkungen von Verkehrsinformations- und -leitsystemen im Straßenverkehr“, Arbeitsgemeinschaft Prognos/Benz Consult/TÜV Automotive/IBV, 1999.

Transportsektor: Vermeidungspotenzial Straßenverkehr – Deutschland 2020

in Mt CO₂e



Quelle: Studie „Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland“ von McKinsey & Company, Inc. im Auftrag von „BDI initiativ – Wirtschaft für Klimaschutz“ – AG Transport

Schaubild 8

Schiene

Beim Schienenverkehr lassen sich die Treibhausgasemissionen im Wesentlichen auf drei Wegen reduzieren: durch bessere Auslastung im Nah- sowie im Fernverkehr und durch technische Optimierung von Zugsystem und Infrastruktur. Diese Maßnahmen bewirken gegenüber der „Stand der Technik“-Projektion einen Emissionsrückgang von 3,4 Mt CO₂e im Jahr 2020. Der jährliche Anstieg der Verkehrsleistung auf der Schiene (Personenverkehr 1,3 Prozent und Güterverkehr 2,8 Prozent) kann größtenteils über die Auslastungsoptimierung kompensiert werden.

- **Verbesserung der Auslastung im Nahverkehr:** Durch eine stärkere Zugauslastung im Nahverkehr werden derzeit ungenutzte Transportkapazitäten aktiviert. Die Auslastung der Nahverkehrszüge beträgt aktuell 21 Prozent. Eine Steigerung um 5 Prozentpunkte würde die Emissionen pro Fahrgast um ca. 19 Prozent verringern. Die Steigerung stellt einen mit Detailanalysen plausibilisierten Zielwert dar. Wesentliche Hebel hierfür sind die Anpassungen der Fahrpläne und Zuglängen. Dadurch können im Jahr 2020 etwa 1 Mt CO₂e vermieden werden. Die Vermeidungskosten wurden mit Null angesetzt. Für die Maßnahmen zur Auslastungsoptimierung entstehen u.a. zusätzliche Marketingausgaben, um das Fahrgastverhalten hinsichtlich einer Auslastungsoptimierung zu beeinflussen. Den Zusatzaufwendungen stehen Einsparungen durch reduzierte Stromabnahme für den Schienenverkehr gegenüber.
- **Verbesserung der Auslastung im Fernverkehr:** Die Auslastung der Fernverkehrszüge beträgt aktuell ca. 45 Prozent. Eine Verbesserung der Auslastung um 20 Prozentpunkte ließe die Emissionen pro Fahrgast um ca. 30 Prozent sinken, was einer Einsparung von 0,6 Mt CO₂e im Jahr 2020 entspräche. Die Steigerung stellt einen

mit Detailanalysen plausibilisierten Zielwert dar. Die Optimierungshebel und Vermeidungskosten sind die gleichen wie für den Nahverkehr.

- **Technische Optimierung des Zugsystems:** Die flächendeckende Verbesserung des Zugsystems steigert die Energieeffizienz voraussichtlich um rund 1 Prozent pro Jahr, was in einem Vermeidungspotenzial von 1,8 Mt CO₂e im Jahr 2020 resultiert. Die technischen Optimierungen beruhen hauptsächlich auf Weiterentwicklungen der auch schon in den letzten Jahren verbesserten und verstärkt eingeführten Drehstromtechnik und Energierückspeisung. Zusätzlich können mehr Züge in Leichtbauweise (z.B. modulare Bauweise, Doppelstockfahrzeuge) hergestellt und die Energieeffizienz der Nebenaggregate (z.B. Klimaanlage) verbessert werden. Eine weitere Vermeidung von Treibhausgasemissionen ist aus Gewichtseinsparungen durch eine Vereinheitlichung der europäischen Zugsicherungssysteme (*European Train Control System* = ETCS) zu erwarten. Die Vermeidungskosten für die Optimierung des Zugsystems wurden in der Vermeidungskostenkurve auf Null gesetzt, da detaillierte Kostenberechnungen noch nicht vorliegen. Derzeit werden im EU-Projekt „Rail Energy“ detaillierte Kostenbewertungen zu optimierter Zug- und Betriebstechnologie vorgenommen, die bis Ende 2007 vorliegen sollen.

Eine zusätzliche Reduzierung der Emissionen im Schienenverkehr kann sich durch die Senkung der CO₂-Intensität der Stromerzeugung nach Umsetzung der Maßnahmen im Energiesektor ergeben. Gegenüber dem Stand von 2004 bedeutet dieser Effekt eine weitere Senkung der spezifischen Emissionen (d.h. pro Personen-/Tonnenkilometer) um rund 10 Prozent.

Einfluss auf die Treibhausgasemissionen hat nicht zuletzt die Qualität der Infrastruktur. In der vorliegenden Untersuchung wurde als Basisannahme definiert, dass von einer gleichbleibenden Qualität der Infrastruktur für die Zukunft auszugehen ist.

Luftverkehr

Für den innerdeutschen Flugverkehr können fünf Maßnahmenbündel zur Senkung der Treibhausgasemissionen beitragen: Optimierung des Bodenbetriebs, Vermeidung von Zusatzdistanzen, Verbesserung der Flugzeugtechnologie, Upgrades bestehender Flugzeuge und Verbrauchsoptimierung beim Flugzeugeinsatz. Durch die Umsetzung entsprechender Maßnahmen lassen sich 2020 insgesamt 0,6 Mt CO₂e einsparen. Gegenüber der „Stand der Technik“-Projektion bedeutet dies eine Einsparung von 20 Prozent, gegenüber 1990 allerdings einen Anstieg um über 70 Prozent infolge der deutlich höheren Verkehrsleistung. Darüber hinaus sind zusätzliche Potenziale aus dem Einsatz von Biokraftstoffen möglich.

- **Optimierung des Bodenbetriebs:** Rund 4 Prozent des gesamten CO₂e-Ausstoßes der Luftfahrt entsteht am Boden. Bis 2020 wäre eine Senkung der Emissionen um 0,5 Prozent realisierbar, dies entspricht 0,02 Mt CO₂e. Ermöglicht wird dies durch vermehrte Nutzung von externen Strom und durch die Optimierung von Taxi-Zeiten, z.B. durch Einsatz von *Departure-Management*-Systemen oder Nutzung von einer statt zwei Turbinen auf dem Rückweg vom Rollfeld zum Gate. Da die Implementierung der Maßnahmen mit überschaubarem finanziellen Aufwand möglich ist, kann die Optimierung des Bodenbetriebs mit einer Gesamtersparnis für den Entscheider von 20 EUR/t CO₂e realisiert werden.

- **Vermeidung von Zusatzdistanzen:** Bedingt durch nationale Flugsicherungen und militärische Sperrgebiete fallen auch für einen Teil der innerdeutschen Flüge Zusatzdistanzen an. Sie könnten bei flexibler Flugraumnutzung im Durchschnitt um bis zu 20 Prozent verringert werden, was den erwarteten Kerosinverbrauch im Jahr 2020 um insgesamt 7,7 Millionen Liter verringern könnte mit Einsparungen von 100 EUR/t CO₂e. Wenn durch eine verbesserte Verkehrsplanung die Anzahl und Länge von Warteschleifen bei wachsendem Verkehrsaufkommen auf heutigem Niveau gehalten werden können, senkt dies die Emission um ein weiteres Prozent, dies entspricht 0,05 Mt CO₂e im Jahr 2020.
- **Verbesserung der Flugzeugtechnologie:** Durch die Weiterentwicklung der Flugzeugtechnologie können in den nächsten Jahren Flugzeugtypen zum Einsatz gebracht werden, die gegenüber heute auf Grund ihres verbesserten Designs den Verbrauch um rund 10 Prozent senken können. Über den Austausch der Flugzeuge kann der CO₂-Ausstoß mit der Zeit reduziert werden. Hersteller legen besonderen Wert auf die Verbesserung des Flugzeugkörpers durch leichtere Metalle und den Einsatz von Verbundwerkstoffen sowie durch die Optimierung der Aerodynamik. Hinzu kommen Effizienzsteigerungen beim Flugantrieb. Bis 2020 wird sich die deutsche Flugzeugflotte zur Hälfte erneuert haben, und bis 2030 wird fast kein Flugzeug der heutigen Flotte mehr in Deutschland fliegen. Insgesamt ergibt sich hieraus für das Jahr 2020 ein Vermeidungspotenzial von 0,45 Mt CO₂e.
- **Upgrade bestehender Flugzeuge:** Durch technisches Nachrüsten (*Upgrade*) der Flugzeugflotte könnten bis 2020 insgesamt 1,3 Prozent der Treibhausgasemissionen in der Luftfahrt gesenkt werden. Im Folgejahrzehnt bis 2030 stagniert die Senkung, vorwiegend weil die bestehenden Flugzeuge durch effizientere ersetzt werden. Bis dahin kann das Nachrüsten von Winglets an den Enden der Tragflächen von Flugzeugen die Aerodynamik verbessern und bis zu 4 Prozent Kraftstoff einsparen. Durch den Austausch der Bestuhlung gegen leichtere Modelle könnten bis zu 0,04 Mt CO₂e vermieden werden. Insgesamt spart dies noch einmal rund 30 EUR/t CO₂e.
- **Verbrauchsoptimierung beim Flugzeugeinsatz:** 96 Prozent der Gesamtemissionen in der Luftfahrt entstehen während des Flugs. Trotzdem kann hier mit vertretbarem Aufwand nicht mehr viel CO₂ gespart werden, da Treibstoff einer der Hauptkostentreiber der Fluggesellschaften und die Optimierung schon weit fortgeschritten ist. Bis 2020 lassen sich 0,04 Mt CO₂e zu Kosten von 120 EUR/t CO₂e durch Schwerpunktoptimierungen, Optimierung des Wartungsmanagements und durch Reduzierung des Gewichts (z.B. weniger Bevorratung einschlägiger Verbrauchsgüter) erzielen.

Zusätzliche, über die Vermeidungskostenkurve hinausgehende Potenziale können sich zudem aus der Beimischung von Biokraftstoffen ergeben. Im Luftverkehr wird insbesondere ab etwa 2015/2020 der Einsatz von Biokraftstoffen der 2. Generation (*Biomass-to-Liquid*) diskutiert, da hier eine Beimischung von 10 bis 15 Prozent ohne Veränderung der Antriebstechnologie möglich ist. Angesichts der noch offenen globalen Zieldiskussion über den Einsatz von Biokraftstoffen im Luftverkehr, der Nutzungskonkurrenz der knappen Ressource Biokraftstoff sowie der Wirkung politischer Lenkungsmaßnahmen auf nationaler und internationaler Ebene (z.B. Besteuerung von Flugkraftstoff) wurde von der Ausweisung eines Gesamtpotenzials abgesehen.

Weitere Entwicklung nach 2020 – Vermeidungspotenziale und -kosten 2030

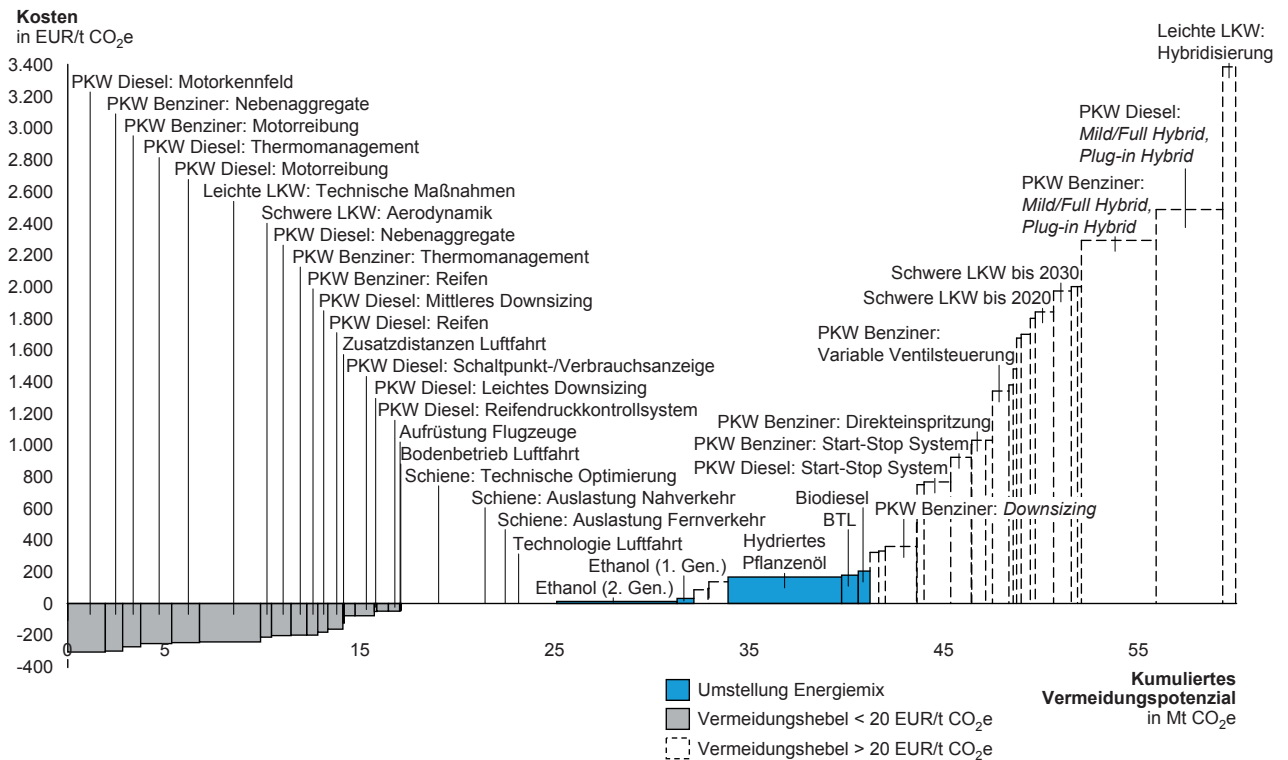
Für den Zeitraum zwischen 2020 und 2030 wurden in der vorliegenden Studie im Wesentlichen die zusätzlichen Vermeidungspotenziale betrachtet, die sich durch eine weitere Umsetzung der bereits bis 2020 einsetzbaren Vermeidungshebel ergeben. Selbstverständlich ist darüber hinaus zu erwarten, dass in den Jahren bis 2030 weitere, neue und innovative Technologien auf den Markt kommen, die ebenfalls einen Beitrag zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen leisten können. Auf eine Abschätzung von Potenzialen aus solchen Technologien wurde jedoch verzichtet. Technologien, die sich noch in der Grundlagenforschung befinden, konnten im Rahmen der vorliegenden Untersuchung nicht bewertet werden.

Im Transportsektor vergrößert sich das Vermeidungspotenzial von 2020 bis 2030 um zusätzliche 23 Mt CO₂e auf 60 Mt CO₂e durch eine weitere Durchdringung mit effizienter Technologie. Zudem werden die eingeführten Vermeidungshebel auf Grund von Produktivitätsfortschritten und Lerneffekten kostengünstiger. Das durch Umsetzung wirtschaftlicher Hebel erreichbare Vermeidungspotenzial erhöht sich in 2030 um fast 12 Mt CO₂e auf knapp 26 Mt CO₂e. Es werden zunehmend auch komplexere und teurere Technologien zum Einsatz kommen, z.B. geschichtete Direkteinspritzung beim Benzin, vollvariable Ventilsteuerung und mehrstufige Aufladung für Benzin- und Dieselfahrzeuge. Die Hybridisierung wird weiterhin für die meisten Anwendungen aus Endkundensicht unwirtschaftlich bleiben. Im LKW-Segment werden die zukünftig erwarteten Verbesserungen in der Antriebstechnologie durch die absehbare weitere Verschärfung der Abgasnormen weitgehend wieder aufgezehrt. Für Schiene und Luftfahrt ist von einer weiteren Ausschöpfung der bisherigen Vermeidungshebel auszugehen.

Für die Biokraftstoffe ist gegenüber 2020 kein Wachstum angenommen worden, denn ein Anteil von 17 Prozent stellt bereits ein ambitioniertes Ziel für 2020 dar, das nur über Importe zu erreichen ist, und über 2020 hinaus sind bisher keine weiter gehenden Ziele bekannt.

Transportsektor: Vermeidungskostenkurve – Deutschland 2030

ENTSCHEIDER-
PERSPEKTIVE



Quelle: Studie „Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland“ von McKinsey & Company, Inc. im Auftrag von „BDI initiativ – Wirtschaft für Klimaschutz“ – AG Transport

Schaubild 9



Voraussetzungen für die Umsetzung und Implikationen

Die Umsetzung der beschriebenen Vermeidungshebel im Transportsektor in Deutschland setzt transparente Investitionsbedingungen für die Entscheider und Technologieanbieter sowie die Schaffung internationaler Rahmenbedingungen voraus. Insbesondere zur Erhaltung der Wettbewerbsfähigkeit deutscher Unternehmen sind international gleiche Bemessungsgrundlagen für gesetzliche Regelungen sicherzustellen.

Transparente Rahmenbedingungen für Investitionen

Für die Umsetzung der technischen Vermeidungshebel nimmt der Entscheider eine Schlüsselrolle ein, da er bestimmt, in welchem Umfang sich eine Maßnahme im Markt durchsetzt.

Bei technischen Maßnahmen zur Verbrauchsreduktion von PKW sind es in letzter Konsequenz die Endkunden (Erstkäufer), die darüber entscheiden, ob sich eine Technologie durchsetzt.

- Wesentliche Implementierungshürden für den Erwerb teurerer, verbrauchoptimierter PKW liegen in der Zahlungsbereitschaft der Kunden sowie der Verfügbarkeit erforderlicher Finanzmittel in Form von Eigenkapital bzw. Zugang zu Finanzierungsangeboten. Beispielsweise würde sich für einen Erstkäufer der durchschnittliche Preis eines Neuwagens unter Berücksichtigung von Kostendegressionseffekten um 250 EUR verteuern, wenn im Jahr 2020 alle technischen Maßnahmen zur Treibhausgasvermeidung bis zu Vermeidungskosten von 20 EUR/t CO_{2e} in einen PKW eingebaut würden. Bei Einführung aller technischen Maßnahmen außer dem *Mild/Full Hybrid* würden die durchschnittlichen Kosten von Neuwagen im Jahr 2020 um 1.250 EUR steigen. Bei einem zusätzlichen (teilweisen) Umstieg auf Hybridfahrzeuge (*Mild/Full Hybrid*) würde sich der durchschnittliche Preis eines Neuwagens im Jahr 2020 um über 3.000 EUR erhöhen. Dabei berücksichtigt sind alle technischen Maßnahmen mit den jeweils angenommenen Marktanteilen. Es handelt sich also nicht um den Preis eines Referenzfahrzeugs, sondern um durchschnittliche Preise über die gesamte Neuwagenflotte.
- Eine weitere Implementierungshürde entsteht dadurch, dass insbesondere Privatkunden bei der Kaufentscheidung für einen Neuwagen die Wirtschaftlichkeit und Wirksamkeit von verbrauchssenkenden Maßnahmen nicht voll ermessen, also nicht rein rational handeln. Zum einen wenden private Käufer nur selten die bei Geschäftskunden übliche Betrachtung der „*Total Cost of Ownership*“ an, d.h. den Vergleich der Zusatzkosten beim Neuwagenkauf mit der Verbrauchersparnis über die Dauer der Fahrzeugnutzung. Zum anderen hat der durchschnittliche Privatkunde keine Detailkenntnisse über das Emissionsvermeidungspotenzial von technischen Einzelmaßnahmen. Dieser Einfluss des Endkunden wurde im Rahmen der Studie allerdings nicht berücksichtigt. Stattdessen wurden aus Industriesicht ambitionierte aber mögliche Marktanteile der einzelnen Technologien unterstellt.

Bei Unternehmen hängt die Umsetzung einer Maßnahme im Wesentlichen davon ab, ob sie aus Entscheidersicht wirtschaftlich ist. Damit eine fundierte Investitionsentscheidung gefällt werden kann, ist die Schaffung transparenter Rahmenbedingungen über Kosten und verfügbare Investitionsanreize eine wesentliche Voraussetzung.

Für LKW gilt – analog zu PKW – ebenfalls die Implementierungshürde der entstehenden Zusatzkosten zum Investitionszeitpunkt; die nicht hinreichende Kostenbewertung trifft bei LKW hingegen nicht zu, da die Mehrzahl der Entscheider im Rahmen ihrer unternehmerischen Tätigkeit mit der Bewertung von Kosten über die gesamte Nutzungszeit von LKW vertraut ist und die Anschaffungsentscheidung ausschließlich nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten trifft.

Bei Schiene und Luftfahrt werden Investitionsentscheidungen ebenfalls aus Unternehmensicht getroffen. Herausforderungen für die Senkung der CO₂-Emissionen sind hier insofern anders gelagert. Auf der Schiene kann die Verbesserung der Auslastungshebel zwar direkt durch die Zug- und Verkehrsplanung ausgestaltet werden, auf das Nutzungsverhalten der Reisenden haben die Schienenverkehrsanbieter durch ihren Marketingmix aber nur mittelbare Einflussmöglichkeiten³⁰. Im Luftverkehr ist insbesondere ein internationaler Ansatz unabdingbar, beispielsweise zur Vereinheitlichung der Flugraumüberwachung.

Für alle Transportmittel wird für die Zukunft mit einem weiteren Anstieg des Transportvolumens gerechnet. Dieses Wachstum kann zum Teil mit der bestehenden Infrastruktur abgefangen werden, jedoch kann es an Knotenpunkten der Verkehrswege zu Engpässen kommen, die Investitionen in Infrastrukturausweitungen erforderlich machen.

Bei den Biokraftstoffen ist eine rasche Weiterentwicklung der Produktionsverfahren eine wichtige Voraussetzung, um die ermittelten Vermeidungspotenziale zu erreichen. Heute in Deutschland produzierte Biokraftstoffe basieren auf der Umwandlung von Rohstoffen, die auch zur Produktion von Nahrungsmitteln dienen (z.B. Getreide, Pflanzenöle), und sind in Flächenausbeute, relativer Treibhausgasvermeidung und Vermeidungskosten noch nicht optimal. Verfahren der so genannten 2. Generation, die als Ausgangsstoffe lignozellulosehaltige Biomasse (z.B. Stroh, Holz oder Gräser) verwenden, sind derzeit in der Entwicklung. Wenn diese Technologien vor dem Hintergrund entsprechender politischer Zielvorgaben und Rahmenbedingungen erfolgreich zur Marktreife gebracht werden, erschließt sich nach heutigen Schätzungen ein globales Potenzial, das – zu niedrigeren Kosten und bei höherer relativer Treibhausgasvermeidung – über 30 Prozent des gesamten Treibstoffbedarfs abdecken könnte.

Wettbewerbsfähigkeit deutscher Unternehmen

Die oben beschriebenen Vermeidungshebel können zu den angeführten Vermeidungskosten nur dann ohne Beeinträchtigung von Wohlstand und Wirtschaftswachstum in Deutschland umgesetzt werden, wenn die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie im internationalen Vergleich nicht beeinträchtigt wird.

³⁰ Darüber hinaus gehende ordnungspolitische Lenkungsmaßnahmen wurden in der vorliegenden Untersuchung nicht betrachtet.

Zwei Arten von deutschen Unternehmen werden in ihrer Wettbewerbsfähigkeit durch die verbrauchssenkenden Maßnahmen berührt: zum einen Transportunternehmer als Käufer und Betreiber von Verkehrsmitteln, zum anderen die Hersteller und Zulieferunternehmen für die entsprechenden Technologien.

Aus Sicht der Transportunternehmer ist zur Beibehaltung bzw. Stärkung ihrer Wettbewerbsfähigkeit darauf zu achten, dass ihnen gegenüber ausländischen Anbietern keine Nachteile entstehen. Vielmehr sollte bei der Ausgestaltung ordnungspolitischer Lenkungsmaßnahmen auf eine europäische bzw. globale Lösung hingearbeitet werden.

Für den Einsatz emissionsoptimierter Transportmittel ist eine wesentliche Voraussetzung, dass deutsche Hersteller- und Zulieferunternehmen unter stabilen Rahmenbedingungen die Entwicklung und Vermarktung von technologischen Lösungen zur Treibhausgasvermeidung vorantreiben können. Wesentlich ist dabei, dass die im deutschen Transportsektor tätigen Unternehmen europaweit bzw. international gleichen Bemessungsgrundlagen für gesetzliche Regelungen unterliegen. Die derzeit, insbesondere in der EU, in Diskussion befindlichen politischen Rahmenbedingungen liegen allerdings außerhalb des Untersuchungsrahmens dieser Studie.

Implikationen: Emissionen nach Umsetzung der Vermeidungshebel

Wenn die geschilderten Voraussetzungen erfüllt und die identifizierten technischen Vermeidungshebel umgesetzt werden, ist ein wesentlicher Beitrag zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen im Transportsektor möglich. Wenn die Umsetzung aller Vermeidungshebel gelingt, die durch die Umstellung des Energiemix bedingt sind bzw. zu Vermeidungskosten von maximal 20 EUR/t CO₂e realisierbar sind, lassen sich im Jahr 2020 die Treibhausgasemissionen insgesamt um 11 Prozent gegenüber heute reduzieren. Dies entspricht im PKW-Segment einer jährlichen Reduzierung von etwa 1 Prozent, bei leicht ansteigender Transportleistung. Damit trägt der Individualverkehr das größte Vermeidungspotenzial bei. Das LKW-Segment und die innerdeutsche Luftfahrt verzeichnen auf Grund des starken Wachstums der Transportleistung eine jährliche Zunahme der Emissionen von 0,3 bzw. 1,5 Prozent. Für die Schiene ergibt sich im Mittel ein Rückgang der Emissionen von etwa 0,2 Prozent pro Jahr.

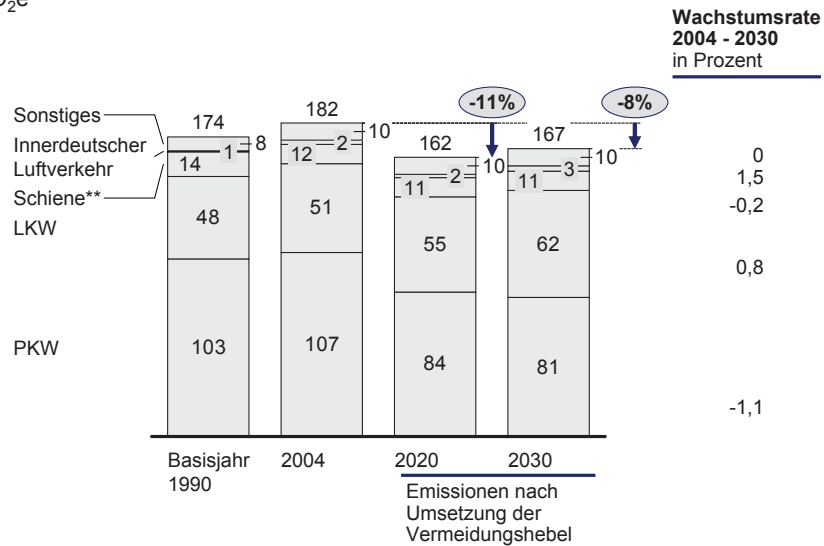
Zur Förderung der Einführung emissionsoptimierter PKW wird derzeit auf europäischer Ebene erörtert, ob für PKW-Neuwagen Zielwerte zum Emissionsausstoß vorgegeben werden sollten. Die genaue Ausgestaltung ist derzeit in Diskussion. Da der Fokus der vorliegenden Untersuchung ausschließlich auf Deutschland lag, lassen sich die vorliegenden Ergebnisse nicht unmittelbar auf eine europäische Zielwertdiskussion übertragen. Ursache dafür ist, dass wesentliche Unterschiede in der Zusammensetzung der deutschen Flotte gegenüber anderen EU-Ländern bestehen und die unterschiedlichen Steuersysteme der Länder Auswirkungen auf die Kostenbewertung haben (z.B. Mehrwertsteuer, Mineralölsteuer).

Trotz dieser methodischen Unterschiede lässt sich aus den Ergebnissen eine Tendenzaussage ableiten. Die Studie zeigt, dass die Technologien zur Verfügung stehen, die benötigt werden, um bei Realisierung aller vorgestellten Maßnahmen im Sinne eines integrierten Ansatzes die anvisierten Ziele von 120 bis 130 g CO₂/km im Zeitraum von 2012 bis 2015 zu erreichen. Für die Zielerreichung sind zwei erschwerende Einflussfaktoren zu berücksichtigen: Zum einen bestehen durch die Entwicklungszyklen zeitliche Re-

striktionen in der Anpassung von Fahrzeugmodellen auf verbrauchssenkende Technologien. Zum anderen müssen die Technologien trotz eventuell erhöhter durchschnittlicher Neuwagenpreise hinreichend schnell zu einer ausreichend starken Akzeptanz im europäischen Markt finden.

Transportsektor: Emissionen nach Umsetzung der Vermeidungshebel 1990 – 2030*

in Mt CO₂e



* Berücksichtigung von technischen Maßnahmen mit Vermeidungskosten bis zu 20 EUR/t CO₂e sowie Anstieg der Biokraftstoffe

** Inklusive Emissionen aus Stromverbrauch von Schienenfahrzeugen, Erzeugungsmix Stand 2004

Quelle: Studie „Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland“ von McKinsey & Company, Inc. im Auftrag von „BDI initiativ – Wirtschaft für Klimaschutz“ – AG Transport

Schaubild 10

Bis 2030 erhöht sich das Vermeidungspotenzial weiter, denn effiziente Technologien steigern ihre Marktanteile. Durch die insgesamt steigende Verkehrsleistung (vor allem im Güterverkehr) ergeben sich bei Umsetzung der technischen Maßnahmen mit Vermeidungskosten von maximal 20 EUR/t CO₂e und der Umstellung auf einen erhöhten Biokraftstoffanteil Gesamtemissionen von 167 Mt CO₂e. Im Vergleich zu heute entspricht dies einem Rückgang um 8 Prozent.



Anhang

Vermeidungshebel 2020 – Transport³¹

	Vermeidungspotenzial (Mt CO ₂ e)	Vermeidungskosten (EUR/t CO ₂ e)
PKW Diesel: Motorkennfeld	0,6	-270
PKW Benzin: Nebenaggregate	0,4	-230
PKW Diesel: Thermomanagement	0,6	-220
PKW Diesel: Motorreibung	0,9	-210
PKW Benzin: Motorreibung	0,6	-190
Schwere LKW: Aerodynamik	0,5	-180
PKW Diesel: Nebenaggregate	0,4	-160
Leichte LKW: Technische Maßnahmen	1,3	-160
PKW Diesel: Mittleres Downsizing	0,3	-140
PKW Diesel: Reifen	0,5	-110
PKW Benzin: Thermomanagement	0,3	-100
Zusatzdistanzen Luftfahrt	0,1	-100
PKW Benzin: Reifen	0,3	-90
PKW Benzin: Schaltpunkt- und Verbrauchsanzeige	0,9	-80
PKW Diesel: Schaltpunkt- und Verbrauchsanzeige	0,8	-80
PKW Benzin: Reifendruckkontrollsystem	0,6	-50
PKW Diesel: Reifendruckkontrollsystem	0,6	-50
Aufrüstung Flugzeuge	0,0	-30
Bodenbetrieb Luftfahrt	0,0	-20
PKW Diesel: Leichtes Downsizing	0,1	-10
Schiene: technische Optimierung	1,8	0
Schiene: Auslastung Nahverkehr	1,0	0
Schiene: Auslastung Fernverkehr	0,6	0
Technologie Luftfahrt	0,5	0
PKW Benzin: Optimierte Klimaanlage	0,1	60
PKW Diesel: Optimierte Klimaanlage	0,1	60
Verbrauchsoptimierung Luftfahrt	0,0	120
Ethanol (Brasilien)	4,8	130
Ethanol (2. Gen.)	1,8	130
PKW Diesel: Starkes Downsizing	0,3	170
Hydriertes Pflanzenöl	5,8	190
Biodiesel	0,6	230
BTL 0,4	240	
PKW Benzin: Mittleres Downsizing	0,6	270
Ethanol (1. Gen.)	0,9	320
PKW Diesel: Gewichtsreduktion	0,1	440
PKW Benzin: Gewichtsreduktion	0,1	560
PKW Benzin: Starkes Downsizing	0,4	590
PKW Benzin: Geschichtete Direkteinspritzung	0,3	690
PKW Benzin: Variable Ventilzeiten	0,1	760
PKW Benzin: Homogene Direkteinspritzung	0,2	900
PKW Diesel: Start-Stop System	0,6	920
PKW Benzin: Start-Stop System	0,5	1.130
PKW Benzin: Schaltgetriebe	0,1	1.230
PKW Diesel: Aerodynamik	0,1	1.230
PKW Benzin: Variable Ventilsteuerung	0,3	1.250
PKW Diesel: Automatisiertes Schaltgetriebe	0,2	1.530
PKW Benzin: Automatisiertes Schaltgetriebe	0,1	1.720
PKW Benzin: Automatikgetriebe	0,2	1.900
PKW Benzin: Aerodynamik	0,1	2.020
PKW Diesel: Automatikgetriebe	0,2	2.100
Schwere LKW bis 2020	0,8	2.440
PKW Benzin: Doppelkupplungsgetriebe	0,2	3.610
PKW Diesel: Doppelkupplungsgetriebe	0,1	3.700
PKW Benzin: Mild/Full Hybrid, Plug-in Hybrid	1,4	3.990
Leichte LKW: Hybridisierung	0,2	4.490
PKW Diesel: Mild/Full Hybrid, Plug-in Hybrid	1,5	4.570
Gesamt	36,9	

31 Hinweis: Potenziale der Hebel können addiert werden, spezifische Vermeidungskosten (und Gesamtkosten) der Hebel nicht.

Vermeidungshebel 2030 – Transport³²

	Vermeidungspotenzial (Mt CO ₂ e)	Vermeidungskosten (EUR/t CO ₂ e)
PKW Diesel: Motorkennfeld	2,0	-310
PKW Benzin: Nebenaggregate	1,0	-300
PKW Benzin: Motorreibung	1,0	-270
PKW Diesel: Thermomanagement	1,6	-250
PKW Diesel: Motorreibung	1,5	-250
Leichte LKW: Technische Maßnahmen	3,2	-240
Schwere LKW: Aerodynamik	0,6	-210
PKW Diesel: Nebenaggregate	1,0	-200
PKW Benzin: Thermomanagement	0,8	-200
PKW Benzin: Reifen	0,6	-200
PKW Diesel: Mittleres Downsizing	0,5	-180
PKW Diesel: Reifen	0,8	-160
Zusatzdistanzen Luftfahrt	0,1	-130
PKW Benzin: Schaltpunkt- und Verbrauchsanzeige	1,0	-80
PKW Diesel: Schaltpunkt- und Verbrauchsanzeige	1,1	-80
PKW Diesel: Leichtes Downsizing	0,2	-50
PKW Benzin: Reifendruckkontrollsystem	0,6	-50
PKW Diesel: Reifendruckkontrollsystem	0,6	-50
Aufrüstung Flugzeuge	0,0	-50
Bodenbetrieb Luftfahrt	0,0	-40
Schiene: Technische Optimierung	3,5	0
Schiene: Auslastung Nahverkehr	1,4	0
Schiene: Auslastung Fernverkehr	0,8	0
Technologie Luftfahrt	0,6	0
PKW Benzin: Optimierte Klimaanlage	0,3	40
PKW Diesel: Optimierte Klimaanlage	0,4	40
Ethanol (2. Gen.)	6,2	10
Ethanol (1. Gen.)	0,9	30
PKW Diesel: Starkes Downsizing	0,7	90
Verbrauchsoptimierung Luftfahrt	0,1	100
PKW Benzin: Mittleres Downsizing	1,0	140
Hydriertes Pflanzenöl	5,8	170
BTL 0,9	180	
Biodiesel	0,6	200
PKW Diesel: Gewichtsreduktion	0,4	320
PKW Benzin: Gewichtsreduktion	0,3	330
PKW Benzin: Starkes Downsizing	1,6	360
PKW Benzin: Variable Ventilzeiten	0,0	510
PKW Benzin: Homogene Direkteinspritzung	0,4	750
PKW Diesel: Start-Stop System	1,4	770
PKW Benzin: Start-Stop System	1,0	920
PKW Benzin: Schaltgetriebe	0,0	1.000
PKW Benzin: Geschichtete Direkteinspritzung	0,7	1.030
PKW Diesel: Aerodynamik	0,4	1.030
PKW Benzin: Variable Ventilsteuerung	0,9	1.340
PKW Diesel: Automatisiertes Schaltgetriebe	0,2	1.380
PKW Benzin: Automatisiertes Schaltgetriebe	0,2	1.480
PKW Benzin: Aerodynamik	0,2	1.680
PKW Diesel: Automatikgetriebe	0,5	1.700
PKW Benzin: Automatikgetriebe	0,2	1.800
Schwere Lkw bis 2020	0,9	1.840
Schwere Lkw bis 2030	0,9	1.970
PKW Benzin: Doppelkupplungsgetriebe	0,3	2.000
PKW Diesel: Doppelkupplungsgetriebe	0,2	2.000
PKW Diesel: Mild/Full Hybrid, Plug-in Hybrid	3,8	2.290
PKW Benzin: Mild/Full Hybrid, Plug-in Hybrid	3,4	2.490
Leichte Lkw Hybridisierung	0,7	3.390
Gesamt	60,0	

32 Hinweis: Potenziale der Hebel können addiert werden, spezifische Vermeidungskosten (und Gesamtkosten) der Hebel nicht.

Ansprechpartner

BDI initiativ – Wirtschaft für Klimaschutz

Joachim Hein

j.hein@bdi.eu

Klaus Mittelbach

k.mittelbach@bdi.eu

Martin Schröder

m.schroeder@bdi.eu

Internet:

www.wirtschaftfuerklimaschutz.eu

McKinsey & Company, Inc.

Gesamtbericht

Leo Birnbaum

leo_birnbaum@mckinsey.com

Daniela Cornelius

daniela_cornelius@mckinsey.com

Anja Hartmann

anja_hartmann@mckinsey.com

Christian Malorny

christian_malorny@mckinsey.com

Jens Riese

jens_riese@mckinsey.com

Thomas Vahlenkamp

thomas_vahlenkamp@mckinsey.com

Impressum

Herausgeber: McKinsey & Company, Inc.

Verantwortlich für den Inhalt: Thomas Vahlenkamp

Redaktion: Leonhard Birnbaum, Daniela Cornelius, Kalle Greven, Anja Hartmann, Christian Malorny, Clemens Müller-Falcke, Thorsten Parr, Jens Riese, Thomas Vahlenkamp, Stephan Weyers

Alle Rechte vorbehalten. Copyright 2007 by McKinsey & Company, Inc. Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung von McKinsey & Company, Inc., unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.