

# Umweltwirkungen von Diesel im Vergleich zu anderen Kraftstoffen

Bewertung der externen Kosten der Dieselseltechnologie im Vergleich zu anderen Kraftstoffen und Antrieben

Matthias Runkel, Alexander Mahler (FÖS)

Johannes Schmitz, Simon Schäfer-Stradowsky (IKEM)

unter Mitarbeit von Sascha Görs (FÖS), Benjamin Zenke (FÖS) und Renée Laes (IKEM)



Kurzstudie  
im Auftrag von

## INHALT

Die Kurzstudie „Umweltwirkungen von Diesel im Vergleich zu anderen Kraftstoffen“ im Auftrag der Bundestagsfraktion Bündnis 90/Die Grünen betrachtet die Umwelt- und Klimawirkung der Dieselsechnologie im Vergleich mit anderen Kraftstoffen und Antrieben im Straßenverkehr. Hierfür wird in Kapitel 2 zunächst die Etablierung der Technologie in Deutschland erläutert und der vermeintliche Klimavorteil des Diesels genauer betrachtet. Kapitel 3 beschreibt die staatlichen Rahmenbedingungen, die die Wahl der Kraftstoffe und Antriebe beeinflussen und lenken. Kapitel 4 stellt eine Berechnung der externen Kosten auf, um einen ökonomischen Vergleich der Dieselsechnologie bzw. des -kraftstoffes mit ihren Alternativen vorzunehmen. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse findet sich auf Seite 4.

## IMPRESSUM

**Forum Ökologisch-Soziale Marktwirtschaft e.V.**  
**Green Budget Germany**  
Schwedenstraße 15a  
13357 Berlin  
Tel +49 (0)30-7623991 - 30  
Fax +49 (0)30-7623991 - 59  
[www.foes.de](http://www.foes.de) • [foes@foes.de](mailto:foes@foes.de)

**Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität -  
Recht, Ökonomie und Politik e.V.**  
Magazinstraße 15-16  
10179 Berlin  
Tel +49 (0)30-4081870 - 10  
Fax +49 (0)30-4081870 - 29  
[www.ikem.de](http://www.ikem.de) • [info@ikem.de](mailto:info@ikem.de)

Foto Titelseite: @ Kara / fotolia.com

---

Das **Forum Ökologisch-Soziale Marktwirtschaft e.V. (FÖS)** ist ein überparteilicher und unabhängiger politischer Think-Tank. Wir setzen uns seit 1994 für eine Weiterentwicklung der sozialen Marktwirtschaft zu einer ökologisch-sozialen Marktwirtschaft ein und sind gegenüber Entscheidungsträger\_innen und Multiplikator\_innen Anstoßgeber wie Konsensstifter. Zu diesem Zweck werden eigene Forschungsvorhaben durchgeführt, konkrete Konzepte entwickelt und durch Konferenzen, Hintergrundgespräche und Beiträge in die Debatte um eine moderne Umweltpolitik eingebracht. Das FÖS setzt sich für eine kontinuierliche ökologische Finanzreform ein, die die ökologische Zukunftsfähigkeit ebenso nachhaltig verbessert wie die Wirtschaftskraft.

Das **Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität - Recht, Ökonomie und Politik e.V. (IKEM)** ist eine unabhängige, gemeinnützige Forschungseinrichtung. Es genießt den Status eines An-Instituts der Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald und steht unter der wissenschaftlichen Leitung von Prof. Dr. Michael Rodi, Inhaber des dortigen Lehrstuhls für Öffentliches Recht, Finanzrecht, Umwelt- und Energierecht. In enger Zusammenarbeit mit Vertretern aus Politik und Praxis sowie anderen Forschungsinstitutionen beschäftigt sich das IKEM wissenschaftlich mit den drei namensgebenden Themengebieten im Sinne einer zukunftsfähigen Wirtschafts- und Gesellschaftsordnung und legt dabei stets interdisziplinäre, integrative und internationale Perspektiven zugrunde. Im Zentrum steht die Analyse, Bewertung und Fortentwicklung des Rechts-, Wirtschafts- und Politikrahmens, um politische Maßnahmen und wirtschaftliche Investitionen zu ermöglichen und zu fördern.

# Umweltwirkungen von Diesel im Vergleich zu anderen Kraftstoffen

INHALT	SEITE
ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE.....	4
<b>1 Ausgangslage und Fragestellung.....</b>	<b>5</b>
<b>2 Bedeutung der Dieseltechnologie im Pkw-Sektor und ihre Auswirkungen auf Klimaschutz und Industriepolitik.....</b>	<b>5</b>
2.1 Etablierung der Dieseltechnologie in Deutschland .....	5
2.1.1 Neuregistrierungen und Bestand von Diesel-Pkw.....	5
2.1.2 Gründe für die Etablierung der Dieseltechnologie .....	6
2.2 Der Beitrag der Dieseltechnologie zum Klimaschutz.....	7
2.2.1 Vermeintlicher Klimavorteil der Dieseltechnologie.....	7
2.2.2 Entwicklung der CO <sub>2</sub> -Emissionen im Diesel-Benzin-Vergleich .....	7
2.2.3 Steigende Durchschnittsleistungen, -gewichte und -fahrleistungen der Dieselflotte .....	8
2.2.4 Zukünftige Potenziale der konventionellen Antriebstechnologien.....	11
2.2.5 Geringe Aufmerksamkeit für emissionsarme Antriebsalternativen .....	13
2.2.6 Auswirkungen der erhöhten Dieselnachfrage auf Produktion und Klimabilanz.....	14
2.3 Zwischenfazit.....	15
<b>3 Steuerliche, regulatorische und gesetzliche Anreizstrukturen .....</b>	<b>16</b>
3.1 Übersicht der Instrumente.....	16
3.1.1 Die europäischen Flottengrenzwerte .....	16
3.1.2 Energie- und Stromsteuer .....	17
3.1.3 Kraftfahrzeugsteuer.....	20
3.1.4 Emissionshandel .....	21
3.1.5 Dienstwagensubvention.....	21
3.1.6 Treibhausgasminderungsquote und Biokraftstoffquotengesetz .....	22
3.1.7 Euro-Norm .....	22
3.2 Bewertung .....	23
<b>4 Kraftstoffbedingte Emissionen und externe Kosten .....</b>	<b>24</b>
4.1 Gegenüberstellung der kraftstoffbedingten Folgekosten.....	25
4.2 Detailanalyse: Externe Kosten der Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen.....	28
4.2.1 Treibhausgase .....	28
4.2.2 Stickstoffoxide .....	31
4.2.3 Feinstaub .....	33
<b>5 Fazit .....</b>	<b>36</b>
<b>ANHANG.....</b>	<b>38</b>
<b>LITERATUR .....</b>	<b>39</b>

## ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE

Der Anteil der Dieseltechnologie im deutschen Pkw-Markt steigt seit Jahren an. Befürworter\_innen argumentieren bis heute, dass Diesel-Pkw so zum Klimaschutz im Straßenverkehr beitragen, da sie aufgrund effizienterer Motoren weniger CO<sub>2</sub> emittieren würden. Die vorliegende Studie zeigt jedoch, dass der vermeintliche Klimavorteil bei der Senkung der durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen der gesamten Pkw-Flotte nicht mehr existiert.

1. Die durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen aller Diesel- und Benzin-Neuwagen in der EU liegen nahezu gleichauf, in Deutschland sind Benzin-Neuwagen im Schnitt bereits heute klimafreundlicher. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Leistungsstärke und Fahrzeuggewicht von Diesel-Neuwagen seit Jahren überdurchschnittlich stark steigen, was den Vorteil effizienterer Motoren aufzehrt. Ohnehin sind wesentliche Emissionsminderungspotenziale beim Diesel weitestgehend gehoben, wohingegen die Effizienz benzinbetriebener Pkw noch erheblich gesteigert werden kann. Auch die durchschnittlichen Fahrleistungen von Diesel-Pkw sind unter anderem wegen einer für sie vorteilhaften Steuerstruktur höher, was einer nachhaltigen Mobilitätspolitik widerspricht und zusätzliche Emissionen erzeugt. Die erhöhte Dieselnachfrage verschlechtert die CO<sub>2</sub>-Bilanz durch Ineffizienzen in Kraftstoffproduktion und -transport weiter. Eine Abkehr von diesem nicht zukunftsfähigen Pfad bleibt bislang aufgrund der Abhängigkeit deutscher Automobilhersteller von konventionellen und insbesondere dieselbetriebenen Pkw aus.
2. Die Bewertung der Dieseltechnologie fällt auch bei einer Betrachtung der externen Kosten negativ aus. Bereits heute existieren Alternativen, wie z. B. viele Erdgas- und Elektrofahrzeuge, die der Dieseltechnologie in puncto Klimaschutz überlegen sind. Darüber hinaus verschlechtert sich die Bilanz zusätzlich, wenn weitere Schadstoffemissionen in der Analyse berücksichtigt werden. Die Betrachtung der externen Kosten zeigt, dass die kraftstoffbedingten Schäden der Dieselnutzung für Klima, Mensch und Umwelt, insbesondere aufgrund der Stickoxidemissionen, im Vergleich zu anderen Kraftstoffen und Antrieben am schwersten wiegen. Klima- und Umwelt-, aber auch Gesundheitspolitik, dürfen an dieser Stelle nicht unabhängig voneinander betrachtet werden.
3. Dennoch wird speziell der Einsatz der Dieseltechnologie weiterhin über die steuerlichen, regulatorischen und gesetzlichen Rahmenbedingungen der Politik gefördert. Die politischen Rahmenbedingungen, welche die Wahl der Kraftstoffe und Antriebe beeinflussen und lenken, sind derzeit weder technologieneutral, noch werden die externen Kosten der Kraftstoffe bzw. Antriebstechnologien berücksichtigt. Insbesondere die reduzierte Energiesteuer sowie die unzulänglichen Kontrollverfahren zur Einhaltung der Euro-Norm gewähren dem Diesel einen ökologisch nicht zu begründenden Vorteil. Darüber hinaus wird in der Analyse deutlich, dass viele Instrumente noch nicht für den Einsatz alternativer Technologien ausgelegt sind und teils inkohärente Anreize geben.

## 1 Ausgangslage und Fragestellung

Die steuerlichen, regulatorischen und gesetzlichen Rahmenbedingungen der Verkehrspolitik schaffen – teils beabsichtigt, teils unbeabsichtigt – Anreize, welche die Wahl des Kraftstoffs bzw. der entsprechenden Antriebstechnologie beeinflussen. Dies kann einzelne Technologien übervorteilen, dadurch den Wettbewerb verzerren und schließlich strukturelle Fehlentwicklungen sowie schwer umkehrbare Pfadabhängigkeiten ganzer Industriezweige nach sich ziehen.

Insbesondere der Absatz von Diesel-Pkw und die Nachfrage nach Dieseldieselkraftstoff werden in Deutschland durch verschiedene Mechanismen angereizt, beispielsweise durch eine geringere Besteuerung von Dieseldieselkraftstoff im Vergleich zu Benzin. Da Diesel jedoch eine höhere Energiedichte besitzt, wird bei der Verbrennung eines Liters mehr CO<sub>2</sub> emittiert. Bereits dieser Steuervorteil ist somit klimapolitisch ungerechtfertigt und muss deshalb als umweltschädliche Subvention verstanden werden. Vor dem Hintergrund aktueller Erkenntnisse zu manipulierten Abgaswerten bei Diesel-Pkw wird allerdings auch über einen weitergehenden, grundsätzlichen Widerspruch der Dieseldieseltechnologie zu klima-, umwelt- und verkehrspolitischen Zielen erneut diskutiert. An dieser Stelle knüpft die vorliegende Studie an und widmet sich der Frage, welche Auswirkung die Förderung der Dieseldieseltechnologie bis heute hat sowie in Zukunft haben wird und vergleicht verschiedene Kraftstoffe auf Basis ihrer externen Kosten.

Dafür wird zunächst die Etablierung der Dieseldieseltechnologie im deutschen Pkw-Markt dargestellt und erklärt. Anschließend wird ihr Beitrag zum Klimaschutz geprüft, indem der vermeintliche Klimavorteil des Diesels den tatsächlichen Emissionswerten, der Entwicklungen von Pkw-Motorleistungen, -gewichten und -fahrleistungen, den Trends in der Kraftstoffbereitstellung sowie den Innovationstätigkeiten der Pkw-Hersteller bei der Hebung von Effizienzpotenzialen und der Entwicklung emissionsarmer Alternativen gegenüber gestellt wird. Daraufhin werden die steuerlichen, gesetzlichen und regulatorischen Anreizstrukturen für Diesel und andere Antriebsarten dargestellt, verglichen und vor dem Hintergrund der klima-, umwelt- und verkehrspolitischen Ziele der Bundesregierung bewertet. Auch die schädlichen Auswirkungen verschiedener Kraftstoffe auf Menschen, Klima und Umwelt werden transparent gegenüber gestellt und lassen somit Schlussfolgerungen auf die Zukunftsfähigkeit der Dieseldieseltechnologie und die Legitimation ihrer Bevorteilung zu. Hierzu werden die externen Kosten verschiedener Kraftstoffarten des Straßenverkehrs dargestellt, die sich durch die Emissionen von Treibhausgasen, Stickoxiden und Feinstaub ergeben.

## 2 Bedeutung der Dieseldieseltechnologie im Pkw-Sektor und ihre Auswirkungen auf Klimaschutz und Industriepolitik

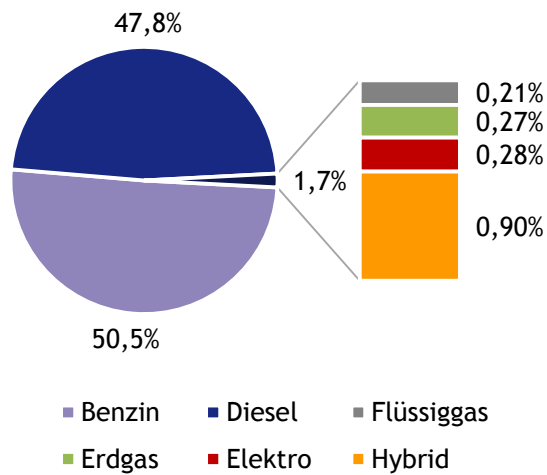
Zunächst wird die Stellung der Dieseldieseltechnologie im deutschen Pkw-Markt diskutiert. Nach einer Betrachtung ihrer Marktanteile und der Gründe für ihre Etablierung wird anschließend hinterfragt, welche Bedeutung sie beim Klimaschutz und bei der Zukunft des Pkw-Verkehrs besitzt.

### 2.1 Etablierung der Dieseldieseltechnologie in Deutschland

#### 2.1.1 Neuregistrierungen und Bestand von Diesel-Pkw

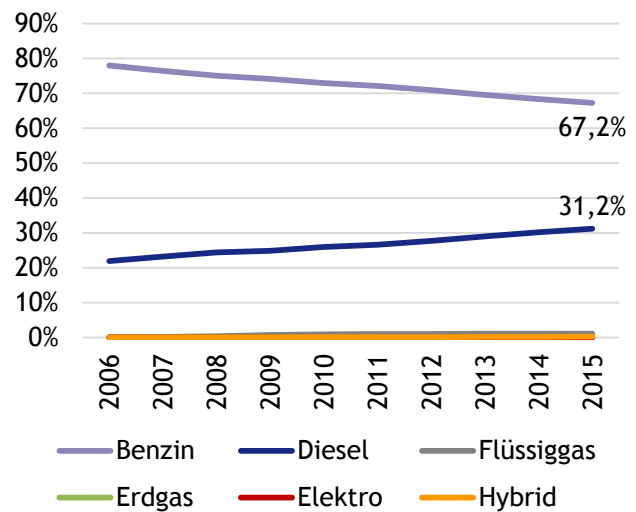
Der Anteil der Dieseldieseltechnologie im deutschen Pkw-Markt steigt seit Jahren. So sind mittlerweile fast die Hälfte aller neu zugelassenen Pkw dieseldieselbetriebene Fahrzeuge (siehe Abbildung 1). Während ihr Anteil im Jahr 1995 noch 14,6 % betrug, liegt er 2014 mit 47,8 % nur noch leicht unter dem Anteil von Benzin-Pkw, die 50,5 % aller Neuzulassungen ausmachen. Alternative Antriebsarten in Form von Flüssiggas, Erdgas oder Strom sind jeweils mit weniger als einem halben Prozent vertreten. Hybrid-Pkw als Mischform zwischen einem elektrischen und einem weiteren Antrieb besitzen mit 0,9 % ebenfalls nur einen kleinen Anteil.

Abbildung 1: Pkw-Neuzulassungen nach Antriebsarten (2014)



Quelle: Eigene Berechnungen nach KBA 2015b, S. 11 ohne Darstellung sonstiger Antriebsarten

Abbildung 2: Pkw-Bestand nach Antriebsarten



Quelle: Eigene Berechnungen nach KBA 2015c, S. 10 ohne Darstellung sonstiger Antriebsarten

Die steigenden Neuzulassungszahlen von Diesel-Pkw verändern auch die Anteile der verschiedenen Antriebsarten im Pkw-Bestand (siehe Abbildung 2). Hatten Benzin-Pkw im Jahr 2006 noch einen Anteil von fast 78 %, fiel dieser bis zum Jahr 2015 auf 67,2 %, sodass Ottomotoren noch gut zwei Drittel des Bestands ausmachen. Der Rückgang ist fast ausschließlich auf ein nahezu lineares Wachstum des Dieselanteils zurückzuführen. Ausgehend von 21,9 % im Jahr 2006 legte er um etwa die Hälfte zu, sodass Diesel-Pkw mittlerweile 31,2 % des Bestands umfassen. Alternative Antriebe konnten sich bislang noch nicht gegen die Dominanz konventioneller Varianten durchsetzen: Pkw mit Flüssiggasantrieb haben mit 1,1 % den größten Anteil, wohingegen Erdgas- (0,18 %), Elektro- (0,04 %) und Hybridantriebe (0,24 %) zurzeit abgeschlagen sind.

### 2.1.2 Gründe für die Etablierung der Dieseltechnologie

Die unterschiedlich starke Durchsetzung der Dieseltechnologie in nationalen Pkw-Märkten ist Gegenstand zahlreicher wissenschaftlicher Untersuchungen. Sie verdeutlichen zunächst, dass insbesondere unterschiedliche Zulassungssteuern auf die vorhandenen Antriebsarten die Durchsetzung bestimmter Technologien fördern oder hemmen können (ETC/ACM 2012, S. 46). In der Literatur wird so auch für die Dieseltechnologie herausgestellt, dass eine relativ niedrige Zulassungsbesteuerung die Anschaffung von Diesel-Pkw attraktiver erscheinen lässt und ihren Anteil am Bestand somit erhöhen kann (ebd.). Da in Deutschland keine Zulassungssteuern erhoben werden, bietet dieser Faktor jedoch keine Erklärungsmöglichkeit.

Insgesamt ergibt sich ein stärkerer Effekt auf die Kaufentscheidung daraus, welche Bedeutung die Pkw-Käufer\_innen der Kraftstoffeffizienz der Fahrzeuge beimessen. Diese Variable kann die Unterschiede zwischen den europäischen Staaten besonders gut erklären (Linn 2015). Insbesondere in Deutschland wurde der Diesel als sparsame Technologie rezipiert und stärker nachgefragt. Roedenbeck und Strobel stellen pointiert heraus, dass die Entwicklung des Diesels den deutschen Leitspruch einer „Freude am Fahren“ mit der Lebensart der „Freude am Sparen“ zusammengebracht habe (Roedenbeck/Strobel 2014, S. 36). Die Etablierung des Diesels fiel zusammen mit einem neuen „Zeitgeist“ in favour of energy- and cost-saving technologies“ (ebd.). Eng verbunden mit der Bewertung des Diesels als kostengünstige Alternative zu Benzin-Pkw ist die - auch in Deutschland bestehende - unterschiedliche Besteuerung von Kraftstoffen (siehe Kapitel 3.1.2). Indem sie in ihrer jetzigen Form maßgeblich zum günstigeren Preis von Dieselmotoren

beiträgt, unterstützt sie die Wahrnehmung des Diesels als kostengünstige Technologie. Verschiedene Studien haben den Einfluss einer begünstigenden Dieselbesteuerung auf die verstärkte Nachfrage nach Diesel-Pkw nachgewiesen (z.B. DIW 2014).

Befördert wurde die Durchsetzung der Dieselsechnologie in Deutschland weiterhin durch ein frühes Engagement heimischer Automobilhersteller bei der Entwicklung des Dieselmotors, sodass die Technologie auch producentenseitig aktiv im Pkw-Markt platziert wurde (Roedenbeck/Strobel 2014, S. 34ff.). Einen übergreifenden Einfluss auf die Durchsetzung des Diesels besitzen zudem Netzwerkeffekte: Durch die Dieselnutzung in Lkw und großen Nutzfahrzeugen bestand in Deutschland zur Einführung des Diesels in den Pkw-Segmenten bereits ein dicht ausgebautes Tankstellennetz, sodass auf Verbraucherseite keine Hürden beim Antriebswechsel bestanden (ebd., S. 40).

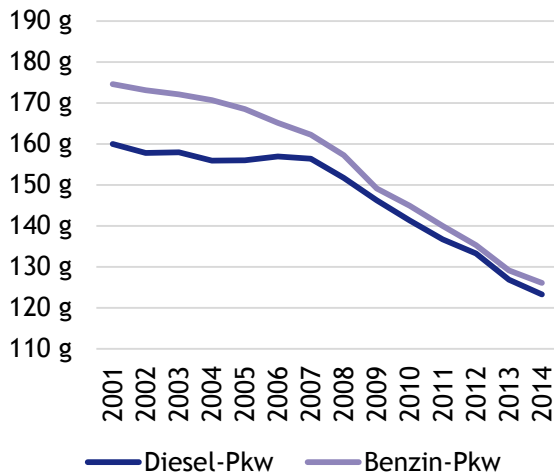
## 2.2 Der Beitrag der Dieselsechnologie zum Klimaschutz

### 2.2.1 Vermeintlicher Klimavorteil der Dieselsechnologie

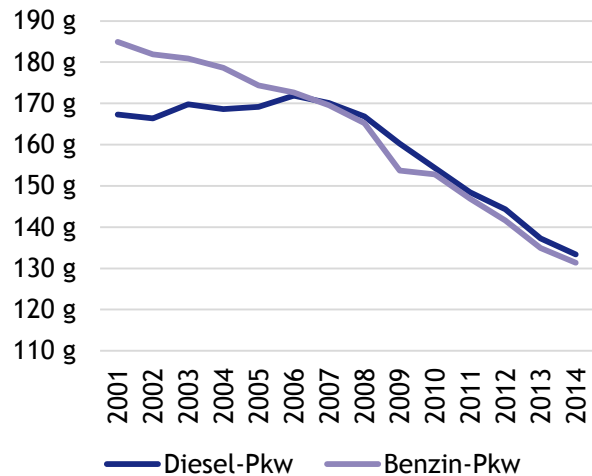
Die aktuellen Erkenntnisse zu manipulierten Abgaswerten bei Dieselfahrzeugen unterstreichen die bereits seit längerem diskutierte, ambivalente Rolle der Dieselsechnologie in der Zukunft des Straßenverkehrs. So bezeichnen Roedenbeck und Strobel (2014) den Dieselantrieb als seit jeher janusköpfig, da den in Kapitel 4.2.2 dargestellten, negativen Umweltwirkungen des Diesels aufgrund drastischer Stickoxidausstöße stets ein vermeintlicher Klimavorteil durch effizientere Motoren und einen so mutmaßlich geringeren Kraftstoffverbrauch ausgleichend entgegen gestellt wurde (ebd., S. 36; Helmers 2010, S. 567; Schipper 2011). Auch die aktuellen Bewertungen der Dieselsechnologie sind von dieser Ambivalenz gekennzeichnet: „Trotz des VW-Skandals sollte man [...den Diesel] nicht abschreiben“, wird so unter anderem mit Verweis auf eine vermeintlich bessere CO<sub>2</sub>-Bilanz des Diesels geschlussfolgert (Holzer 2015). Auch der Verband der Automobilindustrie suggeriert eine Unverzichtbarkeit der Dieselsechnologie bei den Anstrengungen zur Senkung der verkehrsbedingten Treibhausgasemissionen, denn „der Diesel leistet schon heute einen enormen Beitrag zum Klimaschutz“ (VDA 2015). An anderer Stelle heißt es, insbesondere die Erreichung der EU-weiten CO<sub>2</sub>-Ziele bei Pkw-Neuwagen, wie sie in Kapitel 3.1.1 vorgestellt werden, sei „ohne den Diesel gar nicht zu schaffen“ (Haupt 2015). Im Folgenden wird die These eines Klimavorteils der Dieselsechnologie überprüft.

### 2.2.2 Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Diesel-Benzin-Vergleich

Grundsätzlich emittieren die innerhalb der EU neu registrierten Diesel-Pkw im Schnitt weniger CO<sub>2</sub> als solche mit Benzinantrieb. Abbildung 3 zeigt jedoch, dass sich die Emissionswerte bereits bis 2007 stark angenähert haben und seither nahezu deckungsgleich sind: Im Jahr 2014 besaßen neue Diesel-Pkw im Mittel nur noch einen Klimavorteil von rund 2,3 %, während er im Jahr 2001 noch gut 9 % betrug. In Deutschland haben Diesel-Neuwagen seit 2007 sogar einen höheren durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Ausstoß als neue Benzin-Pkw, wie Abbildung 4 verdeutlicht. Dies ist vor allem auf höhere Emissionen von neuen Diesel-Pkw in den Segmenten Utilities und Wohnmobile zurückzuführen (KBA 2015b, S. 32f.). In den anderen Segmenten nähern sich die durchschnittlichen Emissionswerte von Benzin- und Diesel-Pkw jedoch seit Jahren an, sodass auch hier der Klimavorteil des Diesels weiter schwindet.

**Abbildung 3: Durchschnittlicher CO<sub>2</sub>-Ausstoß neu registrierter Pkw in der EU**


Quelle: ICCT 2016a

**Abbildung 4: Durchschnittlicher CO<sub>2</sub>-Ausstoß neu registrierter Pkw in Deutschland**


Quelle: ICCT 2016b, vgl. auch KBA 2015b, S. 32f.

### 2.2.3 Steigende Durchschnittsleistungen, -gewichte und -fahrleistungen der Dieselflotte

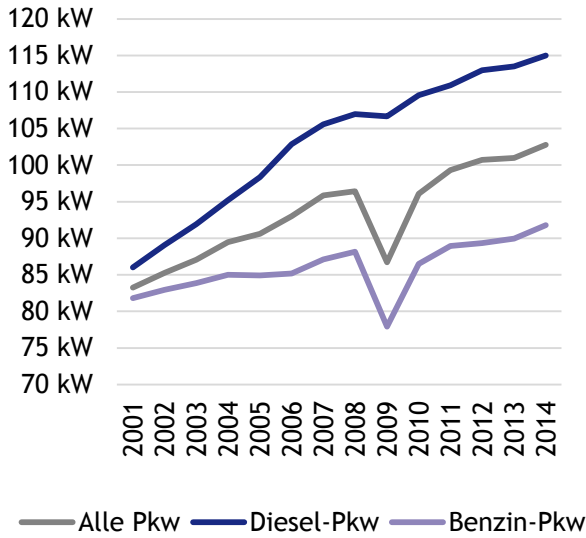
Der schwindende Klimavorteil der Dieselflotte erklärt sich zunächst durch die hohen und übermäßig wachsenden Durchschnittsleistungen und Durchschnittsgewichte neu registrierter Diesel-Pkw, da dies zu einer Steigerung des durchschnittlichen Kraftstoffverbrauchs und damit der CO<sub>2</sub>-Emissionen führt. Die Durchschnittsleistung neuer Diesel-Pkw lag in den letzten Jahren stets über dem Mittel aller neu angemeldeten Pkw, wie Abbildung 5 veranschaulicht. Benziner waren hingegen leistungärmer als der Durchschnitt. Die Diskrepanz zwischen durchschnittlicher Diesel- und Benzin-Pkw-Leistung erhöhte sich zudem in fast jedem Jahr seit 2001. Während neu registrierte Diesel-Pkw im Jahr 2001 nur etwa 5 % leistungstärker waren als Benziner, lag die durchschnittliche Mehrleistung im Jahr 2014 bereits bei 25 %, sodass der effizienzbedingte Klimavorteil des Diesels durch stärker wachsende Motorleistungen geschmälert wird (Schipper/Fulton 2013).<sup>1</sup>

<sup>1</sup>

Die geringeren Leistungen im Jahr 2009 im Vergleich zum Vor- und Folgejahr - insbesondere bei Benzin-Pkw - erklären sich durch die „Abwrackprämie“, die die Anschaffung kleinerer und leistungärmerer Pkw begünstigte.

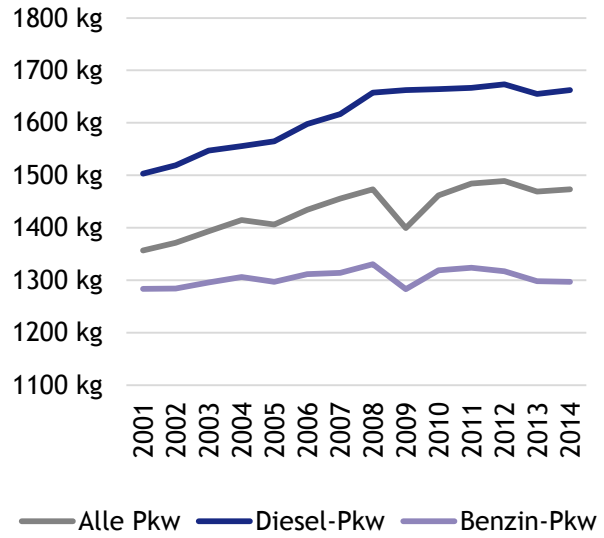


**Abbildung 5: Durchschnittsleistung neu registrierter Pkw in Deutschland**



Quelle: ICCT 2016c

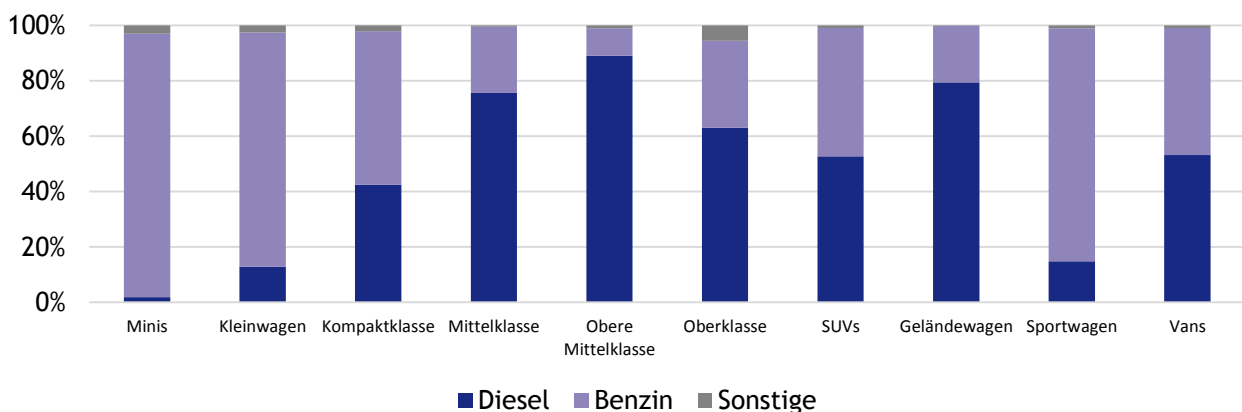
**Abbildung 6: Durchschnittsgewicht neu registrierter Pkw in Deutschland**



Quelle: ICCT 2016d

Hinsichtlich des Fahrzeuggewichts zeigen sich ähnliche Entwicklungen wie beim Vergleich der Motorleistung (Abbildung 6). Das Durchschnittsgewicht neu registrierter Diesel-Pkw lag seit 2001 stets über dem Durchschnittsgewicht von Benzin-Neuwagen und dem Schnitt aller neu registrierten Pkw. Während Diesel-Neuwagen im Jahr 2001 etwa 17 % schwerer waren als neue Benzin-Pkw, betrug das durchschnittliche Mehrgewicht im Jahr 2014 bereits 28 %. Die Erhöhung der Motorleistung ist eng mit einer Erhöhung des Fahrzeuggewichts verbunden, da leistungsstärkere Motoren nicht nur ein höheres Eigengewicht besitzen können, sondern auch vor allem in Fahrzeugen eingesetzt werden, die ohnehin schwereren Segmenten (Oberklasse, Geländewagen etc.) zugerechnet werden. Abbildung 7 verdeutlicht diese unterschiedlichen Anteile der Dieseltechnologie in verschiedenen Pkw-Segmenten.

**Abbildung 7: Anteil von Dieselantrieben in ausgewählten Pkw-Segmenten bei Neuregistrierungen in Deutschland im Jahr 2014**



Quelle: Eigene Berechnungen nach KBA 2015b, S. 22ff. ohne die Segmente Utilities, Wohnwagen und Sonstige

Die Gründe für das Wachstum von Gewicht und Motorleistung von Diesel-Pkw sind vielfältig. Zunächst ist die Herstellung eines Dieselmotors im Regelfall teurer als die eines Ottomotors, da beispielsweise die verbauten Teile technologiebedingt höheren Belastungen ausgesetzt sind (Haupt 2013). Die steigenden Anforderungen an die Abgasreinigung lassen auch in Zukunft höhere Kosten erwarten (ebd.). Der Einsatz von teuren Dieselmotoren in preisgünstigen Segmenten kann sich somit rasch durch einen höheren Pkw-Gesamtpreis im Vergleich zu benzinbetriebenen Alternativen bemerkbar machen. Weiterhin können Rebound-Effekte die starken Leistungs- und Gewichtssteigerungen erklären. Dieser Effekt bezeichnet das Phänomen, dass Effizienzgewinne durch Mehrverbrauch an einer anderen Stelle gemindert oder sogar ganz aufgehoben werden. Wenngleich eine Quantifizierung in der Literatur als schwierig angesehen wird, weisen Untersuchungen grundsätzlich darauf hin, dass ein geringerer Kraftstoffverbrauch von Diesel-Pkw zu einer höheren Nachfrage nach leistungsstärkeren Diesel-Pkw führen kann (Ricardo-AEA/TEPR 2015, S. 175f.). Mehrere Untersuchungen bestätigen, dass Autokäufer\_innen bei der Wahl eines Diesel-Neuwagens nicht unbedingt die Dieselvariante eines ansonsten bevorzugten Benzin-Modells nachfragen, sondern gleich leistungsstärkere Pkw-Modelle mit Dieselantrieb wählen (Zachariadis 2013; Schipper/Fulton 2013: 4).

Diese nachfrageseitigen Verschiebungen können offensichtlich weiterhin zu Angebotsverschiebungen auf Seiten der Automobilhersteller führen. Untersuchungen für den deutschen Automobilmarkt zeigen, dass das Angebot von Pkw-Modellen vor allem in leistungsstärkeren und damit CO<sub>2</sub>-intensiveren Bereichen in der Vergangenheit sogar noch größer war als die ohnehin gestiegene Nachfrage (Zachariadis 2013, S. 26f.). Die Platzierung von Fahrzeugen auf dem Markt, die in ihrer Leistungsstärke noch über der Nachfrage liegen, kann die vorhandenen Entwicklungen weiter verstärken.

Wesentliche Gründe beruhen jedoch auf steuerlichen Fehlanreizen, wie sie in Kapitel 3.1.2 dargestellt werden. In der Literatur wurde bereits ein grundsätzlicher Zusammenhang zwischen niedrigeren Treibstoffpreisen, beispielweise durch unterschiedliche Besteuerung der Kraftstoffe, und erhöhten Fahrleistungen festgestellt (Schipper 2011; Hivert 2013). Auch hier kann von einem Rebound-Effekt gesprochen werden. In Deutschland herrscht eine besondere Kombination aus niedrigeren Energiesteuern auf Dieselmotoren und höheren Kfz-Steuern auf Diesel-Pkw vor, sodass eine hohe Fahrleistung bei Dieselfahrzeugen gleich doppelt angereizt wird: So lohnt sich die Nutzung eines Diesel-Pkw auch weiterhin im Wesentlichen für Vielfahrer\_innen (FÖS 2015, S. 3). Lange Strecken werden jedoch im Regelfall nicht mit Kleinwagen bestritten, sondern in Pkw aus höherklassigen Pkw-Segmenten, beispielsweise der Mittelklasse, der Oberen Mittelklasse oder der Oberklasse.<sup>2</sup> Zahlen zu den Fahrleistungen verdeutlichen die Effekte dieser Fehlanreize: Im Jahr 2014 betrug die durchschnittliche Fahrleistung eines Diesel-Pkw rund 20.500 km. Ein Benzin-Pkw wurde mit durchschnittlich rund 11.000 km nur etwa halb so weit gefahren (DIW 2015, S. 309).

Der Klimavorteil des Diesels wird somit bereits aufgrund überdurchschnittlich wachsender Motorleistungen und Fahrzeuggewichten von Diesel-Pkw systematisch überschätzt. So konstatiert auch das Umweltbundesamt, dass „der Trend zu leistungsstärkeren Motoren und schwereren Pkw insbesondere bei Dieselmotoren eine deutlichere Verbrauchsminderung verhindert habe (UBA 2010, S. 46). Das Statistische Bundesamt rechnet vor, dass durch eine Beibehaltung der Leistungsstruktur der konventionellen Antriebe aus dem Jahr 2005 9,5 Mio. t CO<sub>2</sub> im Jahr 2013 hätten eingespart werden können. So wären bei einer Beibehaltung der Leistungsstrukturen die CO<sub>2</sub>-Emissionen durch die Pkw der privaten Haushalte um 12 % zurückgegangen, statt der tatsächlich erreichten Minderung von nur 1,6 % (Statistisches Bundesamt 2015, S. 1).

<sup>2</sup>

Darauf deuten beispielsweise Daten aus dem Bericht 2014/2015 zu Alltagsmobilität und Fahrleistung des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) im Rahmen des Deutschen Mobilitätspanels (MOP) hin. Sie zeigen, dass die durchschnittliche Pkw-Fahrleistung mit zunehmendem Hubraum sowohl bei Diesel- als auch bei Benzin-Pkw steigt. Die höchsten Fahrleistungen werden somit mit Fahrzeugen erreicht, die im Wesentlichen Teil der leistungsstarken Segmente (Mittelklasse bis Oberklasse, aber auch Gelände- und Sportwagen) sind (KIT 2016, S. 58, 62).

Die bestehenden Anreize zur Nutzung leistungsstarker, schwerer Diesel-PKW und zur deutlich höheren Fahrleistung widersprechen zudem der Entwicklung von künftigen Fahrbedarfen, insbesondere bei der weiterhin wachsenden Bedeutung städtischer Verkehre. Kürzere Wege in urbanen Räumen, wachsende Nutzungskonkurrenzen, der Abbau von Parkmöglichkeiten sowie gut ausgebaute Mobilitätsalternativen können zunächst den tatsächlichen und stadtentwicklungspolitisch erwünschten Bedarf an Pkw insgesamt schmälern (Bracher 2011). Insbesondere wird die Urbanisierung jedoch die Nachfrage nach den dieseldominierten und leistungsstarken Pkw-Segmenten vermindern und stattdessen Segmente mit kleineren, leichteren Stadtautos stärken. Das Institut für Kraftfahrzeuge der RWTH Aachen University erkennt im „Megatrend der Urbanisierung“ eine Entwicklung, die „kompaktere Fahrzeugmodelle begünstigt“ (IKA 2014, S. 41). Auch das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) sieht die Notwendigkeit einer Öffnung der Produktstrategien von Automobilherstellern für die kleineren Fahrzeugsegmente. Die fortschreitende Urbanisierung erfordere die „Etablierung von kleinen, leichten und wendigen Stadt- und Regionalfahrzeugen, die neben dem ÖPNV eine stadtverträgliche Mobilität garantieren können“ (TAB 2012, S. 221). Weiterhin böten batterieelektrische Antriebe, aber auch Mobilitätskonzepte wie das Carsharing bereits heute „weitere Chancen, innovative Klein(st)fahrzeuge im Mobilitätsmarkt zu platzieren“ (ebd.). Verkehrserhebungen unterstreichen, dass die Anzahl der mit dem Pkw zurückgelegten Wege in Großstädten mit mehr als 500.000 Einwohnern geringer ist als in Kleinstädten und ländlichen Gemeinden (2,9 vs. 3,2 Pkw-Fahrten pro Person und Tag) (TU Dresden 2015a, S. 37, TU Dresden 2015b, S. 37). Auch die durchschnittliche Fahrweite einer Autofahrt ist mit 10 km in Metropolen kürzer als in kleineren Siedlungstypen, wo sie 13,2 km beträgt (ebd.). Diese Trends stehen im Konflikt zur aktuellen Nutzung der Diesel-Pkw, da diese, wie dargestellt, tendenziell größer und leistungsstärker sind sowie im Schnitt höhere Fahrleistungen aufweisen.

#### 2.2.4 Zukünftige Potenziale der konventionellen Antriebstechnologien

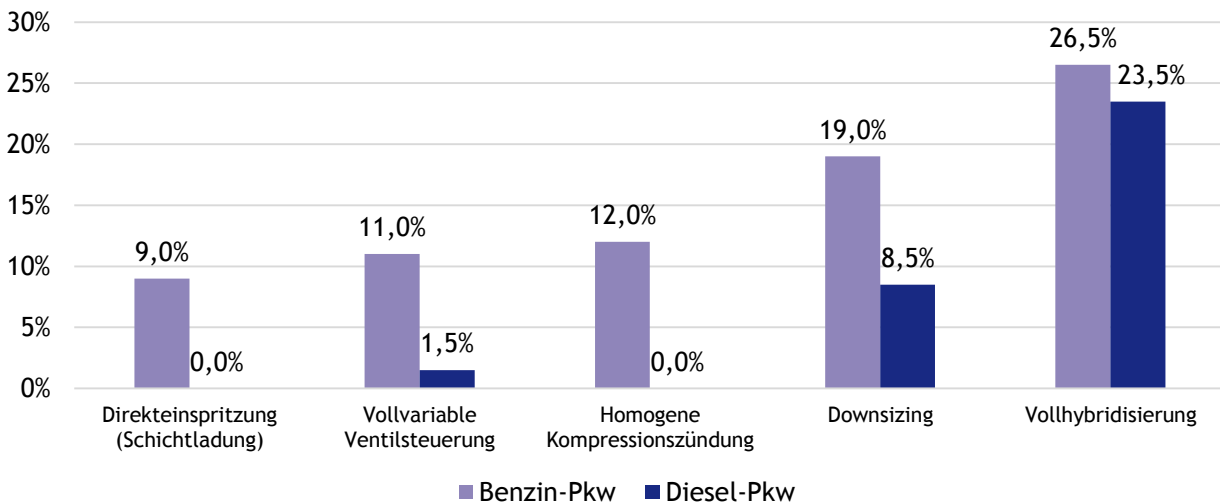
Die zunehmenden Durchschnittsleistungen, -gewichte und -fahrleistungen von Diesel-Pkw, die nicht zuletzt durch regulatorische Fehlanreize verstärkt werden, bilden jedoch nur einen Komplex, der die Bedeutung der Dieseltechnologie für die klimapolitischen Bemühungen schmälert. Der vermeintliche Klimavorteil der Dieseltechnologie schwindet weiter, wenn die bislang asymmetrischen Bemühungen zur Steigerung der Effizienz von Diesel- und Ottomotoren beleuchtet werden. Tatsächlich erhielt die Effizienzverbesserung des Dieselmotors in den vergangenen Jahrzehnten eine übermäßige Aufmerksamkeit, wohingegen die Weiterentwicklung des Ottomotors nur wenig Beachtung fand (Cames/Helmers 2013, S. 5). Das TAB unterstreicht diesen Befund, denn „fast 20 Jahre lang schien der Dieselmotor hinsichtlich des Wirkungsgrads unschlagbar“ (TAB 2012, S. 98), da sich Hersteller erst seit kurzer Zeit der Verbesserung des Ottomotors stärker widmen (ebd.). Aus diesem Grund ist die technologische Entwicklung der Dieseltechnologie nahezu abgeschlossen: Dieselmotoren weisen heute nur noch wenige Effizienzpotenziale auf, wohingegen große Potenziale zur Minderung von CO<sub>2</sub>-Emissionen bei Ottomotoren bislang nicht gehoben wurden.

In einer im Auftrag des Bundeswirtschaftsministeriums erstellten Studie (IKA 2014) wurden mögliche Maßnahmen zur CO<sub>2</sub>-Reduktion bei Pkw mit Otto- und Dieselmotoren, deren Umsetzung bis 2030 erwartet werden kann, nach Technologiebereichen systematisiert (ebd., S. 51). Auch die Autoren dieser Studie erkennen die bereits wesentlich gehobenen Potenziale bei Dieselmotoren an: Bei der Verbesserung der Effizienz des konventionellen Verbrennungsmotors bieten sich „für den Ottomotor mehr technologische Möglichkeiten als für den in den Referenzfahrzeugen bereits vergleichsweise effizienten Dieselmotor, dessen Entwicklungsfokus sich hin zur Verminderung des Schadstoffausstoßes [...] fokussiert“ (ebd.).

Im Folgenden werden einige ausgewählte Technologien dargestellt und mit den maximalen CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenzialen hinterlegt, wie sie für ausgewählte Referenzfahrzeuge in der genannten Studie identifiziert wurden. Dabei handelt es sich weitestgehend um solche Maßnahmen, die auch an anderen Stellen bereits als sinnvoll herausgestellt wurden, beispielsweise durch das Umweltbundesamt, das Öko-

Institut, den Sachverständigenrat für Umweltfragen oder das Wuppertal-Institut für Klima, Umwelt, Energie (UBA 2010, S. 45; Öko-Institut 2014, S. 27; Sachverständigenrat für Umweltfragen 2005, S. 6 ff.; Wuppertal-Institut 2006, S. 56 ff.). Während die Reduzierung von Fahrwiderständen und weitere übergreifende Maßnahmen den Verbrauch bei den Diesel- und Benzin-Referenzfahrzeugen in ähnlicher Weise verbessern können, zeigen sich oft höchst unterschiedliche Potenziale durch motorische Maßnahmen, Elektrifizierung sowie Getriebemaßnahmen und verdeutlichen erhebliche Potenziale bei der Verbesserung von Benzin-Pkw (IKA 2014, S. 133ff.).

**Abbildung 8: Maximale CO<sub>2</sub>-Einsparpotenziale durch verschiedene Technologien bis 2030 in ausgewählten Referenzfahrzeugen**



Quelle: IKA 2014, S. 134ff. Dargestellt sind jeweils die höchsten Potenziale für die in der Studie herangezogenen Referenzfahrzeuge.

Potenziale ergeben sich zum einen durch die Nutzung der **Direkteinspritzung**. Diese ist bei Dieselmotoren bereits üblich, bei Ottomotoren gehört sie im Regelfall jedoch nicht zum Standard. Insbesondere, wenn bei der Direkteinspritzung inhomogene Mischverhältnisse geschaffen werden („Schichtladung“), können in bestimmten Situationen besonders starke CO<sub>2</sub>-Emissionsminderungen erreicht werden, jedoch steigen dadurch andere Emissionswerte an, z.B. NO<sub>x</sub>- und Feinstaubausstöße (Sachverständigenrat für Umweltfragen 2005, S. 7). Durch die Direkteinspritzung mit Schichtladung können bei den Referenz-Benzinern bis zu 9 % CO<sub>2</sub> eingespart werden, während das Potenzial bei den dieselbetriebenen Referenz-Pkw bereits ausgeschöpft ist.

Auch besteht Verbesserungspotenzial im Bereich des **Ventiltriebs**, der den Gasaustausch des Motors steuert. Durch die Einführung variabler Öffnungs- und Schließmechanismen, die sich der aktuellen Auslastung des Motors anpassen, können Effizienz und Leistungsfähigkeit verbessert werden. Bei einer vollvariablen Ventilsteuerung werden auch die Ventilhuben angepasst. Das CO<sub>2</sub>-Minderungspotenzial vollvariablen Systeme bei den Benzin-Referenzfahrzeugen liegt bei maximal 11 %, bei den Diesel-Pkw sind es maximal 1,5 %.

Die **homogene Kompressionszündung** (HCCI) ist noch weitestgehend in der Entwicklungsphase. HCCI-Motoren können je nach Anforderungen als Selbst- oder Fremdzünder betrieben werden, sodass die Technologie die Vorteile von Benzin- und Dieselmotoren vereint (IKA 2014, S. 129). Während die Diesel-Referenzfahrzeuge von der Technik nicht durch Hebung weiterer CO<sub>2</sub>-Minderungspotenziale profitieren, kann sie bei Benzinern bis zu 12 % CO<sub>2</sub> einsparen.

Direkteinspritzung und variabler Ventiltrieb sind oft Teil von **Downsizing**-Konzepten. Unter Downsizing versteht man die Reduzierung des Hubraums, ohne die Leistungsfähigkeit des Motors einzuschränken, z.B. indem die Luft vor Eintritt in den Motor vorverdichtet wird („Aufladung“). In der ausgereiftesten Stufe kann Downsizing die CO<sub>2</sub>-Emissionen bei den benzinbetriebenen Referenz-Pkw um bis zu 19 % senken, während die Diesel-Pkw ein maximales Potenzial von nur 8,5 % besitzen.

Eine technologische Maßnahme mit besonders hohem Potenzial zur Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen besteht in der **Hybridisierung** von Fahrzeugen, also der Kombination aus Elektromotor und einem weiteren Motor. In Abgrenzung zu Mikro- und Mildhybriden sind Vollhybride in der Lage, Teilstrecken alleine mit dem Elektromotor zurückzulegen. In dieser letzten Variante können bei Benzin-Referenzfahrzeugen bis zu 26,5 % CO<sub>2</sub> eingespart werden, bei den Diesel-Pkw sind es bis zu 23,5 %.

Der direkte Vergleich zwischen den Effizienzpotenzialen von Diesel- und Benzin-Referenzfahrzeugen verdeutlicht, dass der Diesel auch technologisch deutlich überschätzt wird. Automobilhersteller haben sich im Wesentlichen der Verbesserung des Dieselmotors gewidmet, sodass große CO<sub>2</sub>-Potenziale bei Ottomotoren heute noch nicht gehoben sind. Cames und Helmers betonen gar, dass Ottomotoren mittlerweile zu vergleichbaren Dieselmotoren aufgeschlossen hätten, wenn ähnliche Bemühungen zur Effizienzverbesserung angewandt worden wären (Cames/Helmers 2013, S. 5).

### 2.2.5 Geringe Aufmerksamkeit für emissionsarme Antriebsalternativen

Die Verbesserung konventioneller Verbrennungsmotoren ist keine langfristige Lösung zur Reduzierung verkehrsbedingter Treibhausgasemissionen, da ihre absoluten Emissionswerte diejenigen von alternativen Antriebsarten auch weiterhin übersteigen werden. Automobilhersteller sind deshalb im Sinne klimapolitischer Bemühungen gefordert, emissionsarme Alternativen zu fördern und ihren Anteil an allen Neuwagen zu steigern. Als problematisch erweist sich jedoch auch bei diesem notwendigen Strategiewechsel die bestehende Dominanz konventioneller Antriebe: An verschiedenen Stellen werden Anzeichen für einen Lock-In dieser Technologien erkannt. Ein Lock-in droht dann einzutreten, wenn „eine bestimmte Technologie den Markt dominiert, obwohl technologisch überlegene Alternativen verfügbar sind“ (Altfeld/Liesenkötter/Schewe 2014, S. 11). Ein wesentlicher Grund dafür kann sein, dass der Wechsel zu einer anderen Technologie mit höheren Kosten verbunden ist als die Beibehaltung des bisherigen, suboptimalen Zustands.

Bereits auf globaler Ebene zeigt sich eine Renaissance konventioneller Antriebstechnik. Auswertungen des Innovationsverhaltens der Automobilindustrie legen nahe, dass sich „die globalen Hersteller [...] in den letzten Jahren wieder stärker auf konventionelle als auf alternative Antriebe“ konzentriert haben (Center for Automotive Management 2015, S. 5). Insbesondere die deutschen Autobauer fokussieren weiterhin stark auf den konventionellen Verbrennungsmotor als Kern deutscher Automobilkunst, denn sie besitzen „einen Vorsprung bei der Entwicklung hocheffizienter Verbrennungsmotoren“ (TAB 2012, S. 218). Umso fraglicher ist, wie unter diesen Umständen überhaupt neue Antriebstechnologien etabliert werden können. Das TAB spricht weiter von einer „ingenieurkulturellen Pfadabhängigkeit“, die eine „Fixierung der Entwicklungsingenieure auf den Verbrennungsmotor und seine weitere Verbesserung“ (ebd., S. 227) nach sich ziehe. Das Beharren auf konventionellen Systemen könne schließlich dazu führen, dass „alternative Antriebsformen tendenziell ignoriert oder gering geschätzt werden“ (ebd.). Tatsächlich konstatiert das TAB eine Second-Mover-Strategie der deutschen Automobilindustrie im Bereich von Plug-In-Hybridwagen und batterieelektrischen Fahrzeugen (ebd., S. 219). Auch andere Wissenschaftler\_innen erkennen in der Untersuchung der Innovationsaktivitäten von Automobilherstellern Verzögerungen bei der Entwicklung alternativer Antriebe. Deutsche Hersteller bewegen sich offensichtlich zwischen den beiden Motivationen, konventionelle Antriebe weiter zu verbessern und alternative Entwicklungspfade zu beschreiten, wobei diese Pfade „weder eine im Zeitverlauf konstante noch eine klare Richtung der Innovationen“

(Borgstedt/Neyer/Schewe 2015, S. 66) erkennen lassen. Japanische Hersteller wie Toyota oder Honda haben hingegen bereits früh begonnen, alternativen Antrieben größere Aufmerksamkeit beizumessen (ebd., S. 67; Sushandoyo/Magnusson/Berggren 2012, S. 104). Die aktuell niedrigen Ölpreise tragen zudem dazu bei, dass die Total Costs of Ownership von konventionell angetriebenen Pkw sinken, sodass nicht-fossile Antriebe im Vergleich eine geringere Wirtschaftlichkeit aufweisen. Auch dieser Rahmenfaktor kann aktuell dazu beitragen, dass Notwendigkeiten zur Pfadänderung nicht ernst genommen werden.

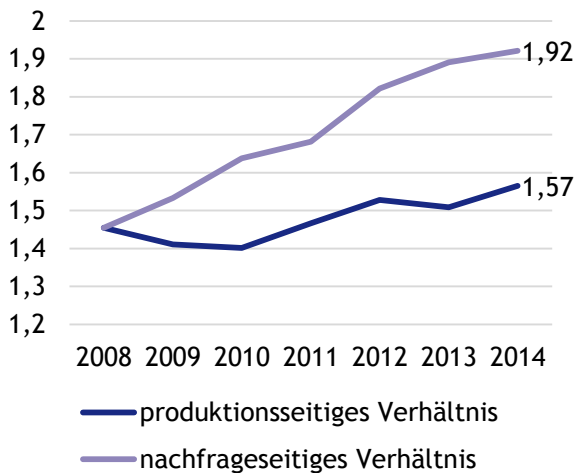
Als besonders problematisch erweist sich die Bedeutung der Dieseltechnologie für den Lock-In: Mit VW, BMW und Daimler haben gleich drei der führenden Entwickler der Dieseltechnologie ihren Sitz in Deutschland (Cames/Helmers 2013, S. 15). Ihre strategische Ausrichtung auf Entwicklung, Produktion und Vertrieb von Diesel-Pkw zeigt sich auch darin, dass die Anteile von Diesel-Pkw an den Neuwagen dieser Hersteller sogar noch größer sind als der Dieselanteil an allen Neuzulassungen in Deutschland. Insbesondere BMW übertrifft diesen Durchschnitt von 47,8 % mit einem eigenen Diesel-Anteil von 74 % deutlich. Doch auch Mercedes mit 59,1 % und VW mit 53,5 % liegen über dem deutschlandweiten Durchschnitt (KBA 2015b, S. 16f.). Zugleich sind deutsche Automobilhersteller Spitzenreiter bei der Herstellung von Fahrzeugen aus den Premiumsegmenten: Weltweit sind vier von fünf verkauften Fahrzeugen der Oberklasse und der oberen Mittelklasse Pkw deutscher Hersteller (TAB 2012, S. 227). Aufgrund des hohen Dieselanteils in den höherklassigen Fahrzeugsegmenten ist zu vermuten, dass auch deshalb nur wenige Anreize bestehen, alternative Antriebsarten durchzusetzen.

### 2.2.6 Auswirkungen der erhöhten Dieselnachfrage auf Produktion und Klimabilanz

In Deutschland übersteigt der Absatz von Dieselkraftstoff den von Ottokraftstoff. Bereits im Jahr 2008 lag das absatzseitige Verhältnis bei einer Quote von 1,45. Mittlerweile wird in Deutschland jedoch fast doppelt so viel Diesel- wie Ottokraftstoff nachgefragt: Die Quote lag im Jahr 2013 nunmehr bei 1,92, wie Abbildung 9 verdeutlicht. Diese Verschiebung ist ein vielfach vernachlässigter Aspekt bei der Betrachtung des vermuteten Klimavorteils der Dieseltechnologie, denn sie führt zu erhöhten Treibhausgasemissionen in der Bereitstellung von Kraftstoffen.

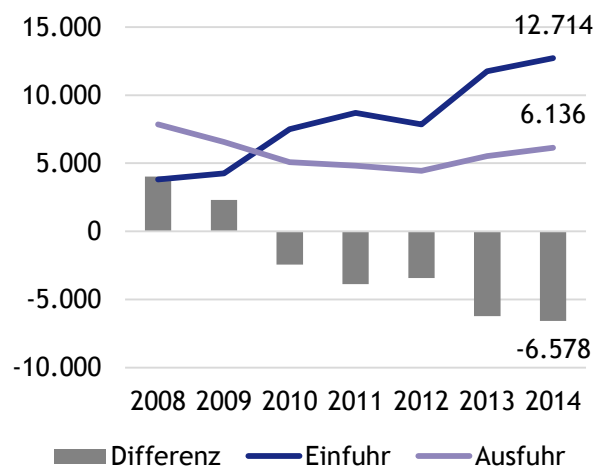
Die negativen Auswirkungen auf die Klimabilanz betreffen zunächst die Raffination von Kraftstoffen in Deutschland. Die deutschen Erdölraffinerien haben sich in der Vergangenheit stark auf bestimmte Produktionsmuster spezialisiert (Deutsche Energieagentur 2011, S. 35). Zudem sind die Verhältnisse der während der Destillation entstehenden Fraktionen zur Weiterverarbeitung zu bestimmten Endprodukten weitestgehend durch eine spezifische Ausbeutestruktur des Rohöls vorgegeben (ebd., S. 41). Wenn sich die Nachfragestruktur durch eine erhöhte Dieselnachfrage nicht mehr grundsätzlich mit diesen Anteilen deckt, sind zusätzliche Konversionsanlagen notwendig. So können die benötigten Anteile hergestellt werden, jedoch erhöht dies den Energieeinsatz in den Raffinerien, da Konversionsanlagen zu den energieintensivsten Produktionsprozessen zählen (ebd.). Untersuchungen zur europäischen Dimension solcher Nachfrageeffekte haben verdeutlicht, dass ein erzeugungsseitiges Verhältnis zwischen Diesel- und Ottokraftstoff von mehr als ca. 1,5, gekoppelt mit einem Rückgang der absoluten Mineralölproduktion, zu einem höheren Energieverbrauch der Raffinerien führt (ebd., S. 42). Eine Steigerung der Quote auf 2,8, wie sie vom Bundeswirtschaftsministerium bis zum Jahr 2030 erwartet wird, kann die Energieintensität der gesamten Mineralölproduktion um ca. 6 % erhöhen (ebd.). Die deutsche Energieagentur resümiert, dass der „steigende Energieaufwand für die Produktion des zusätzlich benötigten Dieselkraftstoffs [...] in diesem Fall die Vorteile der Dieseltechnologie beim fahrzeugseitigen Kraftstoffverbrauch überkompensieren“ könnte (ebd., S. 42). Abbildung 9 zeigt, dass die deutschen Raffinerien tatsächlich auf die geänderte Nachfrage reagieren, indem sie ihre Diesel-Produktion zulasten der Benzin-Produktion ausweiten, ohne jedoch an das verbrauchsseitige Verhältnis heranzureichen.

Abbildung 9: Verhältnis zwischen Diesel- und Ottokraftstoff in Produktion und Nachfrage in Deutschland



Quelle: Eigene Berechnungen nach MWV 2015, S. 48, 52

Abbildung 10: Handelsstruktur von Dieselkraftstoff in 1.000 Tonnen



Quelle: Eigene Berechnungen nach MWV 2015, S. 43, 57

Neben einer Anpassung der heimischen Raffinerungsindustrie zur erhöhten Dieselproduktion werden somit Kraftstoffimporte immer wichtiger. Deutschland ist seit 2010 auf den Import von Dieselkraftstoff angewiesen, wie Abbildung 10 verdeutlicht. Im Jahr 2014 wuchs das Defizit auf mehr als 6,5 Mio. t Dieselkraftstoff, wohingegen Ottokraftstoff bereits seit Jahren exportiert wird. Doch auch die Auflösung der Diskrepanz zwischen Dieselproduktion und -nachfrage durch den Handel von Kraftstoffen ist aus klimapolitischer Perspektive höchst ineffizient und insofern bedenklich, denn neben Herkunft und Art des Rohöls beeinflussen vor allem die Effizienz der Raffinerien und die Transportdistanzen die vorkettenbezogenen Treibhausgasemissionen (Cames/Helmerts 2013, S. 6). Tatsächlich erfolgt der Transport raffinierter Produkte im Regelfall nicht wie bei der Anlieferung von Rohöl über Pipelines, sondern im Wesentlichen per Straßen-, Schienen oder Binnenschifftransport, sodass höhere Emissionen als beim Transport über Rohrleitungen anfallen (Deutsche Energieagentur 2011, S. 32). Aufgrund einer hohen Energieeffizienz der deutschen Raffinerieanlagen kann der Import von raffinierten Produkten zudem bedeuten, dass sie mit einem höheren Energieeinsatz und somit einer schlechteren Treibhausgasbilanz hergestellt wurden (ebd., S. 40). Ein Vergleich zwischen deutschem und russischem Diesel hat beispielsweise gezeigt, dass die russischen Dieselprodukte eine um 25 % schlechtere vorkettenbezogene Treibhausgasbilanz als deutsche Produkte besitzen können (Cames/Helmerts 2013, S. 6).

## 2.3 Zwischenfazit

Der Anteil der Dieseltechnologie im deutschen Pkw-Markt steigt seit Jahren an. Befürworter\_innen argumentieren bis heute, dass Diesel-Pkw so zum Klimaschutz im Straßenverkehr beitragen, da sie aufgrund effizienterer Motoren weniger CO<sub>2</sub> emittieren würden. Die bisherige Analyse zeigt jedoch, dass dieser vermeintliche Klimavorteil bei Betrachtung der gesamten Pkw-Flotte nicht mehr existiert. Die durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen aller Diesel- und Benzin-Neuwagen in der EU liegen nahezu gleichauf, in Deutschland sind Benzin-Neuwagen im Schnitt bereits heute klimafreundlicher. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Leistungsstärke und Fahrzeuggewicht von Diesel-Neuwagen seit Jahren überdurchschnittlich stark steigen, was den Vorteil effizienterer Motoren aufzehrt. Ohnehin sind wesentliche Emissionsminderungspotenziale beim Diesel weitestgehend gehoben, wohingegen die Effizienz benzinbetriebener Pkw

noch erheblich gesteigert werden kann. Auch die durchschnittlichen Fahrleistungen von Diesel-Pkw sind unter anderem wegen einer für sie vorteilhaften Steuerstruktur höher, was einer nachhaltigen Mobilitäts politik widerspricht und zusätzliche Emissionen erzeugt. Die erhöhte Dieselnachfrage verschlechtert die CO<sub>2</sub>-Bilanz durch Ineffizienzen in Kraftstoffproduktion und -transport weiter. Eine Abkehr von diesem nicht zukunftsfähigen Pfad bleibt bislang aufgrund der Abhängigkeit deutscher Automobilhersteller von konventionellen und insbesondere dieselbetriebenen Pkw aus.

### 3 Steuerliche, regulatorische und gesetzliche Anreizstrukturen

Die steuerlichen, regulatorischen und gesetzlichen Rahmenbedingungen in Deutschland und der Europäischen Union beeinflussen an vielen Stellen die Wahl der Kraftstoffe und Antriebstechnologien im Verkehrsbereich. Bei Herstellung und Kauf eines Fahrzeugs nehmen die europäischen Flottengrenzwerte, Euro-Norm, Kfz-Steuer und Dienstwagensubventionen Einfluss auf die Wahl der Hersteller und Käufer\_innen. In der Kraftstoffbereitstellung versucht der Staat mittels Europäischem Emissionshandel und Treibhausgasminderungsquote auf das Handeln der Raffinerien einzuwirken. Die Kraftstoffnutzung wird durch Energie- und Stromsteuer mitgelenkt. All diese Instrumente wurden eingesetzt, um das Handeln verschiedener Akteure in bestimmte Richtungen zu lenken. An einigen Stellen existieren dabei jedoch inkohärente Anreize. Diese sollen im Folgenden analysiert werden.

#### 3.1 Übersicht der Instrumente

##### 3.1.1 Die europäischen Flottengrenzwerte

Das zentrale Instrument zur Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bei Neuwagen, die innerhalb der EU registriert werden, sind flottenspezifische Grenzwerte (IW Köln 2013; IKA 2014, S. 13f.). Durch eine 2009 verabschiedete Verordnung<sup>3</sup> wurde das Ziel festgelegt, dass alle ab dem Jahr 2015 registrierten Pkw innerhalb der EU im Schnitt einen spezifischen CO<sub>2</sub>-Ausstoß von 130 g/km nicht überschreiten dürfen. Das Ziel wurde in individuelle, herstellerepezifische Teilziele übertragen, um unterschiedlichen Produktportfolios gerecht zu werden. Dazu wurde das durchschnittliche Gewicht der Herstellerflotte als differenzierender Faktor einbezogen: Bei einer überdurchschnittlich schweren Herstellerflotte liegt auch der zu erreichende Zielwert höher, bei einer unterdurchschnittlich schweren Flotte ist auch der Zielwert niedriger. Nach dieser Regulierung liegt der herstellerepezifische CO<sub>2</sub>-Wert pro zusätzlichen 100 kg Flottendurchschnittsgewicht um 4,57 g höher. Bei Nichteinhaltung der Grenzwerte werden Strafzahlungen in Abhängigkeit der Überschreitung und der Anzahl der verkauften Neuwagen fällig. Ende 2013 einigten sich Europäisches Parlament und Rat auf eine Novellierung der Richtlinie mit dem Ziel von 95 gCO<sub>2</sub>/km, das ab 2021 eingehalten werden muss. Durch die Reform flacht auch der Differenzierungsfaktor ab, da pro zusätzlichen 100 kg Flottendurchschnittsgewicht nur noch 3,33 gCO<sub>2</sub> zusätzlich ausgestoßen werden dürfen.

Automobilhersteller können ihre Grenzwerte im Wesentlichen durch die Verbesserung konventioneller Antriebe oder die Einführung emissionsarmer Alternativenantriebe verbessern. Eine Erhöhung des Durchschnittsgewichts der Herstellerflotte lohnt sich im Regelfall jedoch nicht, da die so entstehenden, zusätzlichen Emissionen diejenigen Emissionen übertreffen, die dem Hersteller durch ein höheres Gewicht zusätzlich zugestanden werden. Bei 100 kg Mehrgewicht entstehen etwa 9 bis 11 g zusätzliche CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Kilometer (IW Köln 2013, S. 25). Der Wert liegt bereits heute über dem Differenzierungsfaktor von zusätzlichen 4,57 gCO<sub>2</sub>/km bei zusätzlichen 100 kg Fahrzeuggewicht. Die Diskrepanz wird sich

<sup>3</sup>

Verordnung (EG) Nr. 443/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen



verschärfen, wenn der Wert ab 2021 auf 3,33 gCO<sub>2</sub>/km sinkt (IKA 2014, S. 14). Dennoch muss festgestellt werden, dass das Fahrzeuggewicht als Differenzierungsfaktor einen Spielraum bei der Gestaltung des Produktportfolios im Sinne höherer Fahrzeuggewichte eröffnet und Verpflichtungen zur Reduktion von Treibhausgasen relativiert. Gänzlich unberücksichtigt lässt dieses Instrument zudem die Anzahl der verkauften Fahrzeuge und die Nutzung der Pkw im Sinne der Fahrleistung, die die absoluten Treibhausgasemissionen jedoch wesentlich beeinflussen.

### 3.1.2 Energie- und Stromsteuer

Energie- und Stromsteuer stellen einen signifikanten Block der Verbraucherpreise für Kraftstoffe dar und haben somit eine direkte Auswirkung auf die Wahl und Nutzung des Kraftstoffs bzw. des entsprechenden Antriebs. Aufgrund der nahezu perfekten Korrelation zwischen CO<sub>2</sub>-Ausstoß und verbrauchter Menge Kraftstoff, stellt die Energiesteuer ein geeignetes Instrument zur Internalisierung der externen Klimakosten fossiler Kraftstoffe dar. Auch die Kosten weiterer Schadstoffe könnten theoretisch adressiert werden. Da der Ausstoß aber von vielen weiteren Faktoren beeinflusst wird, ist die Korrelation deutlich geringer als beim CO<sub>2</sub>.

Der Kraftstoff der Elektromobilität, Strom, wird von der Stromsteuer abgedeckt. Besteuert wird jedoch die Kilowattstunde, unabhängig von ihrem Ursprung. Die Klimakosten des Strommix können also bis zu einem gewissen Maße abgebildet werden, ohne jedoch Anreize für die Wahl eines klimafreundlicheren Energieträgers zu geben. Die derzeitigen Energie- und Stromsteuersätze werden in Tabelle 1 dargestellt.

**Tabelle 1: Energie- und Stromsteuersätze**

Kraftstoff	Steuersatz	Einheit	Impliziter CO <sub>2</sub> -Steuersatz	Einheit
Benzin/Ottokraftstoff, Bioethanol	654,50	Euro/m <sup>3</sup>	287,92 430,90	Euro/tCO <sub>2</sub>
Diesel, Biodiesel	470,40	Euro/m <sup>3</sup>	179,08 205,06	Euro/tCO <sub>2</sub>
Flüssiggas (LPG)	180,32*	Euro/t	59,88	Euro/tCO <sub>2</sub>
Erdgas (CNG), Biomethan	13,90**	Euro/MWh	68,95 70,72	Euro/tCO <sub>2</sub>
Strom	20,50***	Euro/MWh	36,67	Euro/tCO <sub>2</sub>

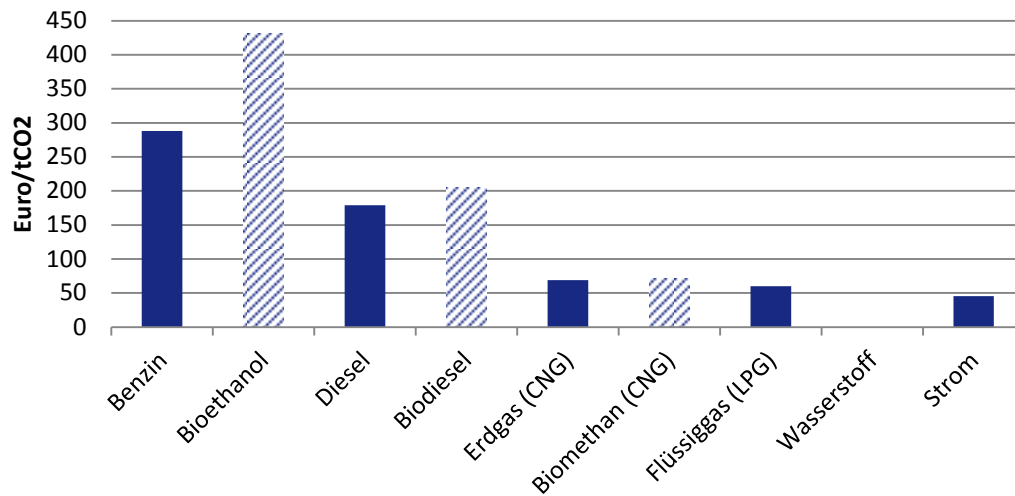
Quelle: EnergieStG, StromStG, eigene Berechnungen gemäß Methodik OECD (2013);

\*reduzierter Steuersatz (aktuell bis 31.12.2018); Regelsteuersatz: 409 Euro/t;

\*\*reduzierter Steuersatz (aktuell bis 31.12.2018); Regelsteuersatz: 31,80 Euro/MWh;

\*\*\*Je nach Ort der Aufladung können Nutzer\_innen von Elektrofahrzeugen von Steuerermäßigungen profitieren, da für einige Unternehmen reduzierte Steuersätze sowie Entlastungen und Ermäßigungen gelten. Strom aus Erneuerbaren Energie ist steuerbefreit.

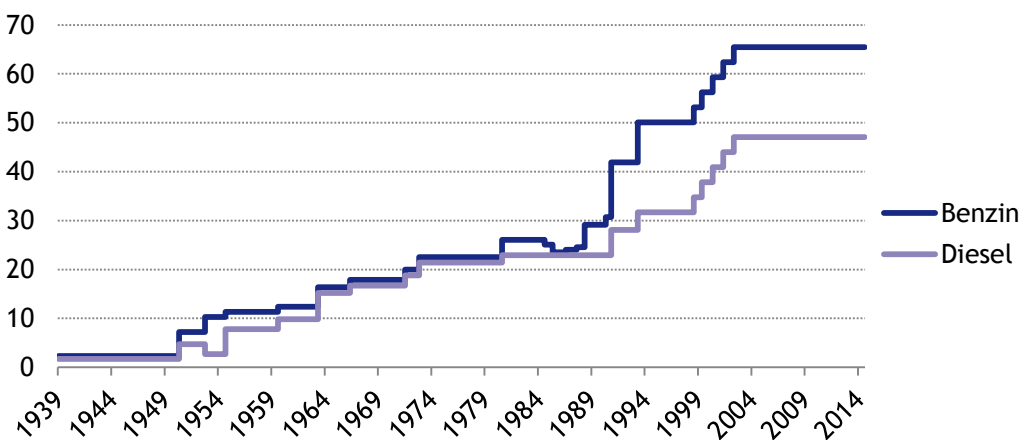
Werden Energie- und Stromsteuer als CO<sub>2</sub>-Steuer betrachtet, so werden Fehlanreize bei der Kraftstoffwahl deutlich (vgl. Abbildung 11). Gemäß der Methodik der OECD (2013) können die Steuersätze auf den CO<sub>2</sub>-Gehalt umgerechnet werden, um einen impliziten CO<sub>2</sub>-Steuersatz zu erhalten (siehe Tabelle 1). Durch dieses Verfahren werden lediglich die Emissionen im Betrieb berücksichtigt.

Abbildung 11: Impliziter Steuersatz in Euro je Tonne CO<sub>2</sub>

Quelle: eigene Berechnungen gemäß der Methodik der OECD (2013) auf Grundlage der Emissionsfaktoren des UBA (2013a).

Der steuerliche Vorteil des Diesels gegenüber Benzin wird in dieser Betrachtung besonders deutlich. Mit 179 Euro/tCO<sub>2</sub> liegt der implizite Steuersatz bei ca. 62 % des Steuersatzes auf Benzin (288 Euro/tCO<sub>2</sub>). Da der Dieselvorteil bereits seit mehr als zwei Jahrzehnten besteht (vgl. Abbildung 12), kann davon ausgegangen werden, dass dies die Zunahme des Dieselanteils am Pkw-Bestand erheblich befördert hat.

Abbildung 12: Entwicklung der Steuersätze auf Benzin und Diesel in Cent pro Liter



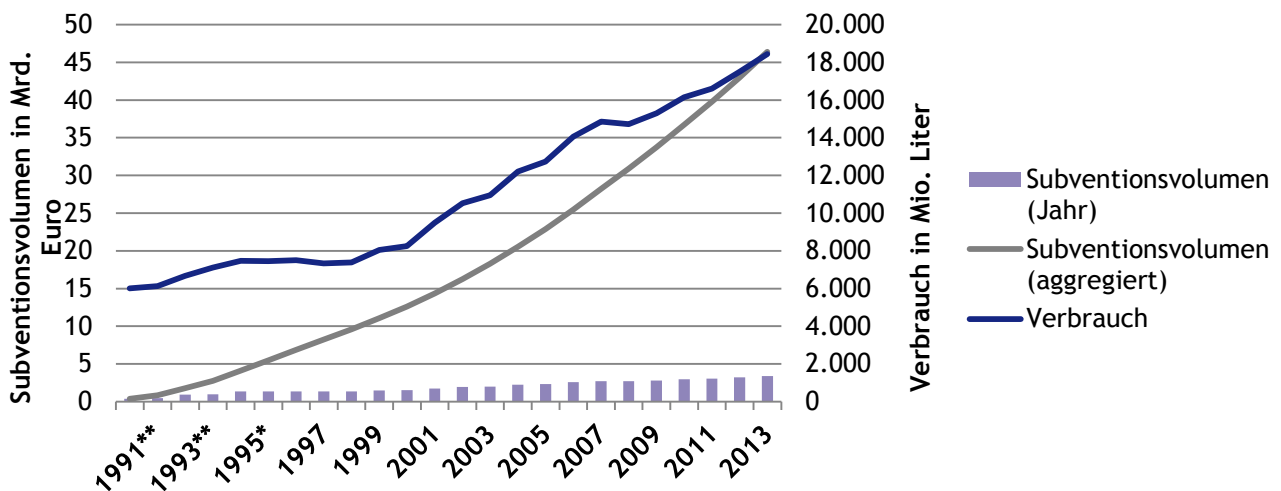
Quelle: BMF 2014

In jedem Fall stellt die Minderbesteuerung eine umweltschädliche Subvention für Nutzer\_innen von Diesel-Pkw dar. Seit der letzten Anpassung der Energiesteuersätze auf Kraftstoffe im Rahmen der letzten Stufe der Ökologischen Steuerreform 2003 beträgt der Steuersatz auf Diesel 47,04 ct/Liter und der auf Benzin 65,45 ct/Liter. Damit beträgt die Differenz zwischen Benzin- und Dieselsteuersatz 18,4 ct/Liter. Die Differenz wurde in der Vergangenheit mit der Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit des deutschen Speditionsgewerbes begründet, etwa bei der Erhöhung zu Beginn der 90er Jahre (BT-Drs. 12/5502; DER SPIEGEL 1994). Zu diesem Zeitpunkt war die Bedeutung von Dieselfahrzeugen sowohl im Flottenbestand (13,4 %) als auch bei den Neuzulassungen (11,1 %) noch weitaus geringer (KBA 2015b; KBA 2015c). Auch wenn eine Unterscheidung zwischen gewerblich und privat genutztem Diesel eine genauere Adressierung des Ziels der Entlastung des deutschen Transportgewerbes erreicht hätte, konnte bei diesem kleinen Anteil von Dieselfahrzeugen in der Pkw-Flotte eine reine Differenzierung nach Kraftstoff als administrativ kosteneffizientere

Second-Best-Lösung betrachtet werden. Gleichwohl wiesen Umweltverbände und Forschungsinstitute auf die negativen Folgen der Steuervergünstigung für Umwelt und Klima hin (Der Spiegel 1994). Wie unter Kapitel 2.1.2 beschrieben, wurde durch diese Steuerpolitik der Grundstein für die Etablierung der Dieseltechnologie im Pkw-Sektor gelegt.

Bei einem Dieselverbrauch (nur Pkw) von 18.439 Mio. Liter in 2013 ergibt sich ein Subventionsvolumen von 3,4 Mrd. Euro (siehe Abbildung 13) gegenüber Benzin als Referenz. Für den Zeitraum 1990–2013 summieren sich die jährlichen Beträge auf 46,4 Mrd. Euro. Die Subventionierung der Dieselnutzung verzerrt den Wettbewerb der konventionellen Kraftstoffe erheblich, weil sie die Nutzungskosten von Diesel-Pkw signifikant reduziert. Dieser Kostenvorteil wirkt sich unweigerlich auch auf Nachfrage und Angebot im Pkw-Markt aus.

Abbildung 13: Subventionsvolumen des Steuervorteils für Diesel-Pkw (1990–2013) in Mrd. Euro



Quelle: eigene Darstellung und Berechnung auf Grundlage der Verbrauchsdaten des DIW (2015); \* DIW (2006); \*\* DIW (2002)

Biokraftstoffe werden in der Energiesteuer gegenüber ihren fossilen Äquivalenten gleichbehandelt, unterliegen also dem gleichen Steuersatz je Mengeneinheit. Umgerechnet auf den CO<sub>2</sub>-Gehalt sind sie teils deutlich im Nachteil (vgl. Abbildung 11). Der Vergleich der impliziten CO<sub>2</sub>-Steuersätze gestaltet sich jedoch kompliziert. Zum einen variiert der CO<sub>2</sub>-Gehalt je nach Herstellung und Ursprung. Für Abbildung 11 wurde deshalb der Emissionsfaktor der durchschnittlichen Zusammensetzung zugrunde gelegt. Zum anderen werden Treibhausgasemissionen der Biokraftstoffe aufgrund der biogenen Herkunft häufig mit Null bewertet. Ein Vergleich der impliziten Besteuerung wäre dann jedoch nicht möglich.

Flüssiggas und Erdgas genießen bis mindestens Ende 2018 ermäßigte Steuersätze (60 und 69 Euro/tCO<sub>2</sub>). Ob die Förderung danach verlängert wird, wird aktuell noch diskutiert. Die Regelsteuersätze würden umgerechnet auf den CO<sub>2</sub>-Gehalt 135,81 und 157,47 Euro/tCO<sub>2</sub> betragen. Trotz der steuerlichen Förderung konnten sich beide Technologien auf dem Markt noch nicht durchsetzen. Die Anteile an Neuzulassungen und Bestand sind bislang sehr gering (vgl. Abbildung 1, S. 6).

Strom als Kraftstoff wird deutlich geringer besteuert (46 Euro/tCO<sub>2</sub>). Für die Berechnung wurde der für Haushalte, Gewerbe, Handel und Dienstleistungen geltende Regelsteuersatz (20,50 Euro/MWh) gewählt und der Strommix 2014 unterstellt (UBA 2015a). Je nach Ort der Aufladung können Nutzer\_innen von Elektrofahrzeugen von Steuerermäßigungen profitieren, da für einige Unternehmen reduzierte Steuersätze sowie Entlastungen und Ermäßigungen gelten. Insbesondere für einige Dienstwagenflotten könnte dies einen substantiellen Vorteil darstellen. Selbstgenutzter Strom aus Erneuerbaren Energie (EE) ist darüber

hinaus unter Umständen steuerbefreit. Ohnehin aber ist für Stromnutzer\_innen die Belastung durch die EEG-Umlage heute bedeutend höher als die der Stromsteuer. Für Haushaltsstrom beträgt sie im Jahr 2016 63,5 Euro/MWh, also mehr als das Dreifache des Stromsteuersatzes. Die Eigenversorgung mit EE-Strom ist unter speziell geregelten Ausnahmen von der Umlage befreit. Entscheidend dafür sind unter anderem Größe der Anlage, die Personenidentität von Betreiber\_in und Verbraucher\_in sowie ein räumlicher Zusammenhang zwischen Herstellungs- und Verbrauchsort (Bundesnetzagentur 2015).

Umwandlungsverluste in der Stromerzeugung wurden in der Berechnung der impliziten CO<sub>2</sub>-Steuersätze nicht berücksichtigt, um den Vergleich der Kraftstoffe möglichst auf die Emissionen des Betriebs zu beschränken. Bislang ist die Stromsteuer noch nicht auf den Einsatz von Strom als Kraftstoff im Verkehr ausgelegt. Bei einer zunehmenden Elektrifizierung besteht Diskussionsbedarf, wie Elektrofahrzeuge angemessen an der Finanzierung der Straßeninfrastruktur beteiligt werden können und wie zukünftig die Energiesteuer zu ergänzen oder abzulösen ist. Wasserstoff als Kraftstoff wird weder von Energie- noch Stromsteuer erfasst.

Tatsächlich handelt es sich bei Energie- und Stromsteuern natürlich nicht um CO<sub>2</sub>-Steuern, weshalb einige Vorbehalte gegenüber der Betrachtungsweise zu nennen sind. Bei der Ausgestaltung von Kraftstoffsteuern spielen vor allem auch verkehrspolitische Aspekte eine Rolle. Die Steuereinnahmen sollen in erster Linie Wegekosten für Bau und der Erhalt der Infrastruktur internalisieren – die CO<sub>2</sub>-Steuersätze fallen bei bloßer Betrachtung der Klimakosten daher scheinbar hoch aus. Ebenso werden weitere Externalitäten (z. B. Lärm, Stau, Unfälle) nicht berücksichtigt. Die Betrachtung einzelner, ausgewählter Kostenpunkte (hier Klimakosten) lässt den Internalisierungsbeitrag des Straßenverkehrs größer erscheinen als er tatsächlich ist.

Energie- und Stromsteuer verlieren im Rahmen der Inflation an realem Wert, weil sie in nominalen Steuersätzen festgesetzt werden. Die Steuersätze auf Diesel und Benzin beispielsweise sind seit 2003 nominal unverändert (vgl. Abbildung 12). Aufgrund des stetig steigenden Preisniveaus verloren sie in dieser Zeitspanne jedoch rund 14 % an realem Wert. Um dieser schleichenden Steuersenkung entgegenzuwirken und die Lenkungswirkung aufrechtzuerhalten, werden in einigen Ländern (z. B. Dänemark, die Niederlande und Schweden) Umweltsteuersätze indexiert, also automatisch an die Inflation angepasst.

### 3.1.3 Kraftfahrzeugsteuer

Die Kfz-Steuer ist nur eingeschränkt geeignet, die externen Effekte des Verkehrs zu adressieren. Als jährliche Besitzsteuer wirkt sie sich nicht auf die Grenzkosten der Fahrzeugnutzung aus. Stattdessen fallen die Durchschnittskosten mit jedem Fahrzeugkilometer. Auf die Laufleistung nimmt die Steuer somit keinen Einfluss. Lediglich beim Fahrzeugkauf kann ihr eine geringe ökologische Anreizwirkung zugesprochen werden: Die Kraftfahrzeugsteuer wurde dem technologischen Fortschritt immer wieder angepasst, ist aber noch nicht für eine Verkehrswende ausgelegt.

Die Steuer berechnet sich für nach dem 30. Juni 2009 zugelassenen Pkw in der Regel anhand zweier Komponenten: Hubraum und CO<sub>2</sub>-Ausstoß. Je angefangenen 100 Kubikmeter Hubraum werden 2 Euro für Benzin und 9,50 Euro für Diesel berechnet. Der erhöhte Satz für Diesel-Pkw soll den Vorteil in der Energiesteuer ausgleichen. Für die CO<sub>2</sub>-Komponente werden je Gramm CO<sub>2</sub>/km oberhalb der Freigrenze (seit 2014 95 g/km) 2 Euro angelastet. Entscheidend sind dabei die Herstellerangaben. Zwischen Diesel und Benzin unterschieden wird nicht.

Der Einsatz von Biokraftstoffen wird in der Kraftfahrzeugsteuer nicht berücksichtigt. Für die Berechnung der CO<sub>2</sub>-Komponente ist lediglich die Herstellerangabe zum CO<sub>2</sub>-Ausstoß ausschlaggebend. Ein reduzierter tatsächlicher Ausstoß durch Einsatz biogener Kraftstoffe hat somit keine Vorteile. Auch der Einsatz von Flüssig- und Erdgas in bivalenten Fahrzeugen kann nicht berücksichtigt werden. Wie bei den Biokraftstof-

fen wird die Herstellerangabe unter Einsatz von Benzin oder Diesel betrachtet. Nur für Halter\_innen von monovalenten Gasfahrzeugen spiegelt sich der niedrigere CO<sub>2</sub>-Ausstoß auch in einer niedrigeren Kfz-Steuer wider.

Neuzugelassene Elektrofahrzeuge (z. B. Brennstoffzelle und Batterie-Elektrisch) sind aktuell fünf Jahre steuerbefreit. Danach berechnet sich die Kfz-Steuer, wie für Lkw, nach Zulassungsgewicht. Für Elektrofahrzeuge gelten dabei um 50 % reduzierte Steuersätze. Dennoch kann aufgrund der Besteuerung ab dem sechsten Jahr ein Kostennachteil gegenüber einem vergleichbaren konventionellen Fahrzeug entstehen. Plug-In Hybride hingegen werden je nach Antrieb wie Benziner oder Diesel besteuert. Aufgrund des unzulänglichen Testverfahrens zur Feststellung der Emissionswerte fällt die CO<sub>2</sub>-Komponente der Steuer für Plug-Ins besonders günstig aus. Auch werden die Emissionen der Stromerzeugung nicht berücksichtigt.

In ihrer aktuellen Ausgestaltung hat die Kfz-Steuer keinen Einfluss auf die Fahrzeugnutzung und auch die Anreizwirkung bezüglich der Fahrzeugwahl ist schwach und nicht immer kohärent. Wie die Energiesteuer wird auch die Kfz-Steuer durch die Inflation entwertet, da die Steuersätze nominal festgelegt werden.

### 3.1.4 Emissionshandel

In seiner aktuellen Ausgestaltung betrifft der Europäische Emissionshandel (EU-ETS) den Straßenverkehr lediglich in der Bereitstellung der benötigten Kraftstoffe. Die Emissionen von Raffinerien, Stromerzeuger etc. sind im Emissionshandel erfasst. Die Treibhausgasemissionen der Kraftstoffbereitstellung sind somit weitreichend und einheitlich abgedeckt. Für die Stromherstellung gilt jedoch die Vollauktionierung, während für die Herstellung konventioneller Kraftstoffe ein Großteil der Zertifikate kostenlos zugeteilt wird. Der Ausstattungsgrad von Raffinerien beträgt durchschnittlich 84 % (Deutsche Emissionshandelsstelle 2015). In der Folge belastet der der EU-ETS den Kraftstoff der Elektromobilität stärker als die der konventionellen Technologien.

### 3.1.5 Dienstwagensubvention

Laut Kraftfahrtbundesamt (KBA 2015a) gingen im Jahr 2014 rund 64 % aller Pkw-Neuzulassungen auf gewerbliche Halter\_innen zurück. Ein bedeutender Anteil dieser Fahrzeuge sind Dienstwagen.<sup>4</sup> Diese Fahrzeuge bestimmen maßgeblich die mittelfristige Entwicklung der deutschen Pkw-Flotte, da Dienstwagen mit einer durchschnittlichen Haltedauer von drei Jahren (Harding 2014) relativ schnell über den Gebrauchtwagenmarkt weitergegeben werden. Privat genutzte Dienstwagen profitieren dabei doppelt von steuerlichen Vergünstigungen. Zum einen sind Anschaffungs- und Betriebskosten (inklusive Kraftstoffkosten) für Arbeitgeber\_in steuerlich absetzbar. Zum anderen führt die Berechnungsmethode des geldwerten Vorteils<sup>5</sup> meist dazu, dass für Angestellte ein Dienstwagen günstiger als ein gleichwertiges, privat gehaltenes Fahrzeug ist (FÖS 2012).

Diese Steuervergünstigung beträgt in Deutschland laut Schätzungen jährlich zwischen 2,44 bzw. 4,6 Mrd. Euro (FiFo et al. 2010), 5,17 Mrd. Euro (Harding 2014) und 22,9 Mrd. Euro (Copenhagen Economics 2009). Eine bestimmte Technologie wird dabei nicht explizit gefördert. Lediglich für Elektrofahrzeuge besteht eine zusätzliche Absetzbarkeit nach Batteriekapazität, um den höheren Listenpreis dieser Fahrzeuge auszugleichen. Tendenziell entstehen im Vergleich zur Privatanschaffung jedoch Anreize, teurere und größere Fahrzeuge zu kaufen und diese extensiver zu nutzen. Laut KBA (2013) waren in 2012 57,0 % aller gewerblich zugelassenen Pkw Dieselfahrzeuge. Bei Privatzulassungen lag der Anteil deutlich geringer bei 33,9 %. Auch die durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Werte der gewerblichen Neuzulassungen liegen über denen der privaten.

<sup>4</sup> Dienstwagen sind gewerblich gehaltene Pkw, die auch privat genutzt werden können.

<sup>5</sup> Dienstwagen stellen für Arbeitnehmer\_innen einen zu versteuernden Gehaltsbestandteil dar. Die Steuerschuld wird mithilfe eines Fahrtenbuchs ermittelt oder pauschal mit 1 % des inländischen Bruttolistenpreises des Neuwagens berechnet.

Ob die Dienstwagensubvention entscheidenden Einfluss auf die Wahl der Antriebstechnologie hat, kann hier nicht abschließend bewertet werden. Da Dienstwagen eine höhere Laufleistung als private Fahrzeuge haben (FiFo et al. 2010), rechnet sich hier der niedrigere Kraftstoffpreis von Diesel stärker. In jedem Fall werden anteilig in erster Linie Dieselfahrzeuge und im Vergleich zu den Privatzulassungen klimaschädlichere Modelle gefördert.

### 3.1.6 Treibhausgasminderungsquote und Biokraftstoffquotengesetz

Unternehmen der Mineralölwirtschaft sind in Deutschland ordnungsrechtlich verpflichtet, einen Mindestanteil von Biokraftstoffen am gesamten jährlichen Kraftstoffabsatz in Verkehr zu bringen. Seit dem Jahr 2015 bemisst sich der vorgeschriebene Anteil an der Treibhausgasminderung, die durch den Einsatz von Biokraftstoffen bewirkt wird. Durch die Quotenregelung des § 37a Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) sind Unternehmen verpflichtet, die CO<sub>2</sub>-Äquivalente in der Gesamtmenge des von ihnen abgesetzten Kraftstoffs gegenüber dem Basiswert von 83,8 kg/GJ ab 2015 um 3 %, ab 2017 um 4,5 % und ab 2020 um 7 % zu reduzieren. Mittels Sanktionsregelung soll die Einhaltung der Quoten sichergestellt werden.

Die Berechnung der erzielten Treibhausgasminderung erfolgt über den Vergleich der Emissionen aus der tatsächlich in Verkehr gebrachten Kraftstoffmenge mit den fiktiven Emissionen, die aus einer entsprechenden Menge fossiler Kraftstoffe mit gleich hohem Energiegehalt entstünden. Für Biokraftstoffe ist jeweils der THG-Emissionswert anzunehmen, der für sie in der geltenden Fassung der der Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung (BioKraft-NachV) angegeben ist.

Ein Mindestanteil von Biokraftstoffen am Gesamtabsatz wurde Unternehmen erstmals zum 01. Januar 2007 mit dem Inkrafttreten des Biokraftstoffquotengesetzes (BioKraftQuG) vorgeschrieben. Die zunächst festgelegten Quoten wurden allerdings bereits im Juli 2009 durch eine Gesetzesänderung wieder weitgehend entschärft, um auf verschiedene Kritikpunkte an einem zu schnellen Ausbau der Biokraftstoffnutzung zu reagieren (BT-Drs. 16/11131). Die Umstellung von der Biokraftstoffquote auf die Treibhausgasminderungsquote in 2015 zielt nun auf eine stärkere Ausrichtung des Einsatzes von Biokraftstoffen auf die Minderung der Treibhausgasemissionen.

Im September 2015 wurde auf EU-Ebene durch die Änderungsrichtlinie 2015/1513/EU eine Reform der Erneuerbare-Energien-Richtlinie<sup>6</sup> und der Kraftstoffqualität-Richtlinie<sup>7</sup> verabschiedet. Die beschlossenen Änderungen betreffen insbesondere die Anrechenbarkeit bestimmter Biokraftstoffe auf das verbindliche Mindestziel für Erneuerbarer Energie (mindestens 10 % des Endenergieverbrauchs im Verkehrssektor bis 2020). Kritikpunkte aus ökologischer Sicht bleiben aber weiterhin die Flächen- und Nutzungskonkurrenz zur Nahrungsmittelherstellung sowie indirekte Landnutzungsänderungen und damit verbundene Emissionen und Verluste von Biodiversität (BUND, Misereor, Oxfam 2013; BUND et al. 2015; Rettet den Regenwald e.V. et al. 2016). Aus Sicht des Bundesverbands der deutschen Bioethanolwirtschaft fehlt es an Planungssicherheit ab 2020 (BDB<sup>e</sup> 2015).

### 3.1.7 Euro-Norm

Die Abgasnorm der Europäischen Union stellt den Rechtsrahmen für Typgenehmigungen und -zulassungen in der EU dar. Sie gibt Grenzwerte für die Emissionen von Kohlenstoffmonoxid und Kohlenwasserstoffe sowie Stickstoffoxide und Feinstaubpartikel vor. Die Euro-Norm hat somit direkte Konsequenzen für die Hersteller, die ihre Fahrzeuge entsprechend der Vorgaben ausrichten müssen. Insbesondere Stickstoffoxi-

<sup>6</sup> Richtlinie 2009/28/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien 2001/77/EG und 2003/30/EG

<sup>7</sup> Richtlinie 98/70/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über die Qualität von Otto- und Dieselmotorkraftstoffen und zur Änderung der Richtlinie 93/12/EWG des Rates

de und Feinstaubpartikel stehen neben Treibhausgasen im Fokus von Kapitel 4. Ihre Grenzwerte in den Abgasnormen Euro 5 und 6 für Pkw sind in Tabelle 2 abgetragen.

Die Euro-Norm unterscheidet zwischen Fahrzeugen mit Otto- und Dieselmotor und nimmt dabei Rücksicht auf die jeweilige Schadstoffproblematik. Aus ökologischer Sicht ist diese Ungleichbehandlung nicht zu begründen. Mit der Abgasnorm Euro-6 wurden die Grenzwerte zwar weiter angeglichen, ein neuer Diesel-Pkw darf aber immer noch 33 % mehr Stickoxide ausstoßen. Auf der anderen Seite ist es Benzinern erlaubt, die doppelte Menge Kohlenstoffmonoxid auszustoßen. In anderen Ländern, beispielsweise den USA, unterscheiden die dort geltenden Abgasnormen des California Air Resources Board sowie der Environmental Protection Agency nicht zwischen den Motortypen und geben einheitlich geltende Grenzwerte vor.

**Tabelle 2: Abgasnormen der EU für Pkw (Stickstoffoxide und Feinstaub)**

Emission	mgNO <sub>x</sub> /km	mgPM/km (Partikelmasse)	PN (Partikelanzahl)	mgCO/km
Benzin Pkw (Euro-6)	60	4,5	6x10 <sup>11</sup> (*)	1.000
Diesel Pkw (Euro-6)	80	4,5	6x10 <sup>11</sup>	500
Benzin Pkw (Euro-5)	60	4,5	-	1.000
Diesel Pkw (Euro-5)	180	5,0	6x10 <sup>11</sup>	500

\*Gilt für neue typgeprüfte Fahrzeuge mit Benzindirekteinspritzung ab September 2017 bzw. für Erstzulassungen ab September 2018. Bis dahin beträgt der Grenzwert 6x10<sup>12</sup>.

Letztendlich sind die Grenzwerte aber nur in Verbindung mit zulässigen Test- und Kontrollverfahren wirksam. Zur Typgenehmigung müssen diese Grenzwerte in einer Abgasprüfung eingehalten werden. Die Unzulänglichkeiten des derzeit angewendeten Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) waren zuletzt so offensichtlich geworden, dass ab 2017 das WLTP-Messverfahren (Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure) in Kraft treten soll. Zusätzlich sollen in RDE-Tests (Real Driving Emissions) Schadstoffemissionen auf der Straße gemessen werden. Die Planungen des EU-Parlaments zu zulässigen Grenzwertüberschreitungen um bis zu 50 % werden aber bereits jetzt unter anderem von Transport & Environment (2016) kritisiert.

### 3.2 Bewertung

Die betrachteten steuerlichen, regulatorischen und gesetzlichen Instrumente geben bei der Wahl der Kraftstoffe und Antriebstechnologien im Pkw-Bereich teils inkohärente Anreize. Für einige Hersteller beispielsweise machen die europäischen Flottengrenzwerte die Dieselsechnologie laut Eigenaussagen unverzichtbar (Haupt 2015), da diese sonst nicht einzuhalten seien. Auch die Euro-Norm gewährt dem Diesel einen Vorteil gegenüber Benzin und setzt bei Stickoxidemissionen einen höheren Grenzwert an. Die Unzulänglichkeiten der Test- und Kontrollverfahren tragen dazu bei, dass die bekannten Nachteile der Technologie bis heute ignoriert und kaschiert werden konnten. Für Fahrzeugkäufer\_innen hingegen fallen mit dem Diesel höhere Kraftfahrzeugsteuern an, die durch die geringere Energiesteuer jedoch – je nach Fahrleistung – überkompensiert werden. Viele der staatlichen Rahmenbedingungen sprechen also schon von Beginn an für die Herstellung und den Kauf eines Dieselfahrzeugs.

Der Einsatz alternativer Kraftstoffe und Antriebe wird an einigen Stellen gefördert – jedoch nicht immer konsequent und selten kohärent. Der Einsatz von Biokraftstoffen beispielsweise wird über die Treibhausgasemissionsminderungsquote verordnet. Die Ausgestaltung der Energiesteuer hingegen stellt einen Nachteil für selbige dar. Der ökologische Nutzen der Kraftstoffe ist indes strittig. Im Vergleich dazu werden Gasfahrzeuge durch die Energiesteuer deutlich begünstigt. Der Einsatz von Strom oder Wasserstoff wird in vielen Instrumenten nicht oder nicht adäquat berücksichtigt.

Insgesamt wird deutlich, dass die Bewertung der Effizienz der Antriebstechnologien unzureichend auf alternative Antriebe ausgerichtet ist und daher zu Verzerrungen innerhalb einiger Instrumente führt (ifeu 2013). Flottengrenzwerte und Kfz-Steuer beispielsweise sind von den angegebenen CO<sub>2</sub>-Emissionswerten der Fahrzeuge abhängig. Gerade bei batterie-elektrischen Fahrzeugen und Plug-In-Hybriden führt die Nichtberücksichtigung der Emissionen in der Stromerzeugung diesbezüglich zu großen Vorteilen für Hersteller und Halter\_innen. Dies kann mit Blick auf die Ziele der Energiewende und die damit einhergehende Dekarbonisierung der Stromerzeugung allerdings als dem Ziel, eines langfristig strombasierten MIV, dienliche temporäre Bevorteilung gesehen werden. Bivalente Gasfahrzeuge hingegen profitieren nicht von den geringeren CO<sub>2</sub>-Werten im Gasbetrieb, sondern werden lediglich nach ihren Werten im Benzinbetrieb bewertet. Dasselbe gilt für den Einsatz von Biokraftstoffen.

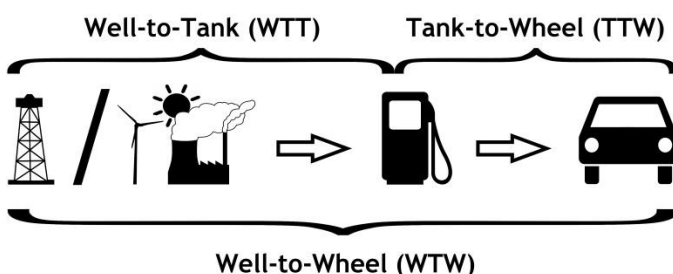
#### 4 Kraftstoffbedingte Emissionen und externe Kosten

Der Straßenverkehr hat nicht nur relevante negative Klimawirkung. Aufgrund der Emissionen von Stickoxiden, Feinstaub und anderen Schadstoffen hat er auch weitreichende Auswirkungen auf die Gesundheit von Mensch und die Umwelt. Für einen angemessenen Vergleich der Kraftstoffe und Antriebstechnologien darf daher nicht allein die Klimawirkung ausschlaggebend sein. Auch die Folgekosten der weiteren kraftstoffbedingten Emissionen müssen berücksichtigt werden.

Die Folgekosten der Emissionen werden meist nicht vom Emittenten selbst sondern von den Geschädigten oder der Allgemeinheit getragen. Sie werden daher als Externalitäten bezeichnet. Eine Betrachtung dieser Externalitäten bietet eine ökonomische Perspektive für die Bewertung und den Vergleich der verschiedenen Kraftstoffe und Antriebstechnologien.

Weil ein vollumfänglicher Vergleich sämtlicher Externalitäten kaum durchführbar ist, konzentriert sich diese Studie auf die externen Kosten, die maßgeblich von der Wahl des Kraftstoffs bzw. der Antriebstechnologie beeinflusst werden und signifikante Auswirkungen auf Klima, Mensch und Umwelt haben. Zuletzt standen insbesondere die Klima- und Gesundheitsschäden des Straßenverkehrs im Fokus der öffentlichen Diskussion. Weitere Schäden und Kosten entstehen unter anderem aufgrund von Lärm oder Unfällen. Ebenso wie Staukosten können diese substantiell sein und machen in vielen Berechnungen einen Großteil der Gesamtkosten aus. Sie sind jedoch nicht vom eingesetzten Kraftstoff abhängig und für den Vergleich daher nicht relevant. Betrachtet werden daher lediglich die Emissionen von Treibhausgasen (Kapitel 4.2.1), Stickoxiden (4.2.2) und Feinstaub (4.2.3).

Abbildung 14: Wirkkette Energiebereitstellung Straßenverkehr



Quelle: eigene Darstellung

Berücksichtigt werden sowohl die Emissionen im Betrieb (TTW, Tank-to-Wheel), die in Folge der Kraftstoffverbrennung entstehen, als auch die Emissionen in der Kraftstoffbereitstellung (WTT, Well-to-Tank), die z. B. auf Herstellungsprozesse und Transport zurückzuführen sind (vgl. Abbildung 14). Lediglich Emissi-



onen während der Fahrzeugherstellung werden vernachlässigt, da davon ausgegangen werden kann, dass keine großen Unterschiede in der Herstellung von Fahrzeugen mit Otto- oder Dieselmotor bestehen. Der Vergleich von Benzin und Diesel, der Fokus dieser Analyse, kann also unabhängig von der Fahrzeugherstellung betrachtet werden. Dies gilt auch für Erdgas- und Flüssiggasfahrzeuge, da diese ebenfalls mit Ottomotoren betrieben werden. Lediglich die Herstellung von elektrischen Fahrzeugen geht aufgrund der aufwändigeren Batterieproduktion mit zusätzlichen Emissionen sowie weiteren Externalitäten einher. Der Vergleich der Kraftstoffe mit Strom ist daher mit Vorsicht zu bewerten. Auch der Einsatz von Biokraftstoffen wird an geeigneten Stellen diskutiert. Eine Bewertung ist aber häufig schwierig vorzunehmen. Zum einen können Biokraftstoffe aufgrund der Flächenkonkurrenz unter anderem zur Nahrungsherstellung nur begrenzt eingesetzt werden. Zum anderen fallen die Emissionsbilanzen je nach eingesetztem Rohstoff, Herkunft und Landnutzungsänderung sehr unterschiedlich aus. Darüber hinaus liegen zu den Emissionen im realen Betrieb kaum Erkenntnisse vor, da Biokraftstoffe bislang fast ausschließlich als Beimischung zum Einsatz kommen (UBA 2014).

#### 4.1 Gegenüberstellung der kraftstoffbedingten Folgekosten

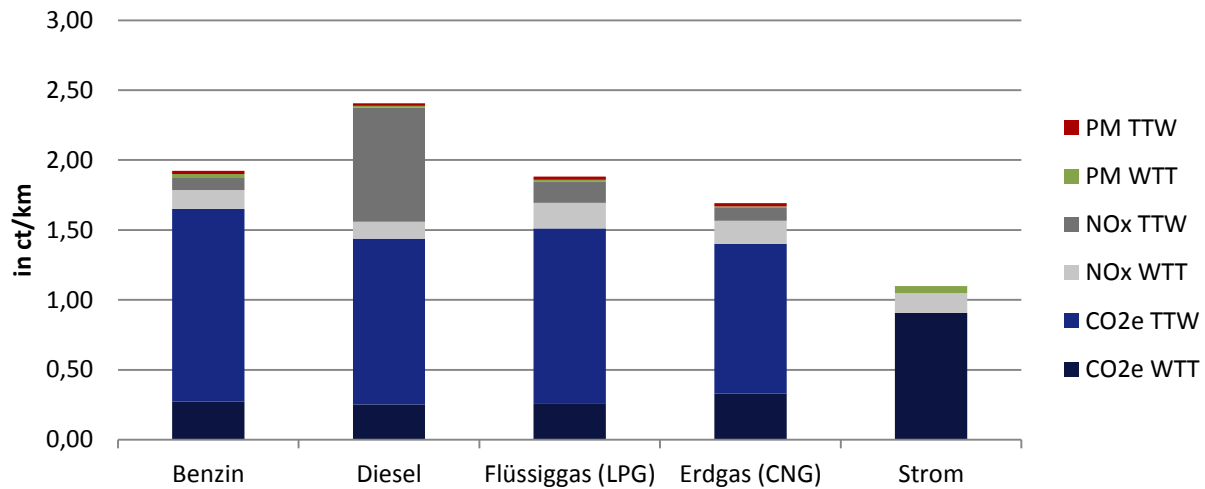
Die Ergebnisse der Analyse der externen Kosten in den Kapiteln 4.2.1 bis 4.2.3 werden im Folgenden dargestellt und zusammengefasst. Für die Berechnung der externen Kosten wurde größtenteils auf die von DLR et al. (2013) verwendeten Emissionsfaktoren zurückgegriffen. Diese basieren weitestgehend auf den Angaben des Handbook on External Costs of Transport der Europäischen Kommission (Ricardo AEA 2014) für mittlere Pkw<sup>8</sup> der Abgasnorm Euro 5. Die entnommenen Werte berücksichtigen die tatsächlichen Emissionen im realen Fahrbetrieb. Die zuletzt diskutierten Abweichungen der CO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub>-Emissionen von den im Zulassungsverfahren ermittelten Werten werden also berücksichtigt. Die Kostensätze für die Berechnung der Schadenshöhe stammen aus der Methodenkonvention des Umweltbundesamts (UBA 2012a) und sind in Tabelle 8 (S. 38) zusammengefasst. Alle Werte und Annahmen werden in den jeweiligen Kapiteln genauer betrachtet.

Die Analyse der ausgewählten Externalitäten zeigt, dass Klimakosten den größten Block der externen Kosten kraftstoffbedingter Emissionen bei allen Technologien ausmachen (vgl. Abbildung 15). In der Tat haben hier Dieselfahrzeuge aufgrund der höheren Energieeffizienz des Verbrennungsprozesses Vorteile gegenüber Benzinfahrzeugen mit Ottomotor. Die externen Klimakosten der CO<sub>2e</sub>-Emissionen in Kraftstoffbereitstellung und Betrieb liegen rund 13 % unter denen des Benziners. Eine entscheidende Rolle der Diesels-technologie für den Klimaschutz kann daraus aber aus folgenden Gründen nicht abgeleitet werden.

<sup>8</sup>

Betrachtet werden Pkw mit 1,4 bis 2 Liter Hubraum. Diese machen laut DLR et al. (2013) rund 70 % der Segmente „untere Mittelklasse“ und „Mittelklasse“ aus.

Abbildung 15: Vergleich der externen Kosten kraftstoffbedingter CO<sub>2</sub>-, NO<sub>x</sub>- und PM-Emissionen in der Kraftstoffbereitstellung und im Betrieb (WTW), in ct/km



Quelle: eigene Darstellung; die verwendeten Emissionsfaktoren und Kostensätze sind in Tabelle 7 und Tabelle 8 (S. 38) zusammengefasst und werden in den Kapiteln 4.2.1 bis 4.2.3 erläutert.

Zum einen dürfen weitere Externalitäten, insbesondere die der Stickoxidemissionen, nicht vernachlässigt werden. Die Einbeziehung der Stickoxide verändert das Bild maßgeblich und zeigt, dass die Dieseltechnologie mit großen Umwelt- und Gesundheitsschäden einhergeht. Allein die NO<sub>x</sub>-Emissionen im Betrieb (TTW) verursachen rund ein Drittel der gesamten, hier betrachteten Kosten. Die Gesamtkosten übersteigen die des Benzins daher um 26 %.

Zum anderen existieren Alternativen, die dem Diesel nicht nur in puncto Klimaschutz überlegen sind. Insbesondere Erdgasfahrzeuge verursachen aufgrund des kohlenstoffärmeren Kraftstoffs weniger Treibhausgasemissionen je Kilometer als vergleichbare Benzin-, Diesel- und Flüssiggasfahrzeuge. Auch in Bezug auf den Ausstoß weiterer Schadstoffe bietet die Technologie Vorteile. In dem hier durchgeführten Vergleich schneidet lediglich Strom als Kraftstoff besser ab. Für eine umfängliche Bewertung müsste jedoch auch die Herstellung batterieelektrischer Fahrzeuge (BEV) berücksichtigt werden, was im Rahmen dieser Studie nicht geleistet werden kann.

Der Ausstoß von Feinstaub hat bei neueren Fahrzeugmodellen (ab Euro 5) kaum noch Einfluss auf den Kraftstoffvergleich, weil nur noch ein geringer Teil der Emissionen kraftstoffbedingt ist. Der Großteil des Feinstaubes entsteht durch Abreibung von Bremsen und Reifen sowie Aufwirbelungen. Diese indirekten Emissionen unterscheiden sich zwischen Pkw mit verschiedenen Antriebstechnologien und Kraftstoffen jedoch kaum und wurden daher bei der Bewertung außen vor gelassen. Die gesamten durch Feinstaub verursachten externen Kosten eines Pkw-Kilometers sind also vermutlich höher als in Abbildung 15 angedeutet. Darüber hinaus sind Feinstaubemissionen in erster Linie ein Problem älterer Fahrzeugmodelle. Moderne Fahrzeuge sind in der Regel mit Partikelfilter ausgestattet, die die Emissionen am Auspuff effektiv reduzieren. Gleichwohl kann die Feinstaubbelastung lokal ein erhebliches Gesundheitsproblem, insbesondere in stark verdichteten Räumen in entsprechender geographischer Lage, sein.

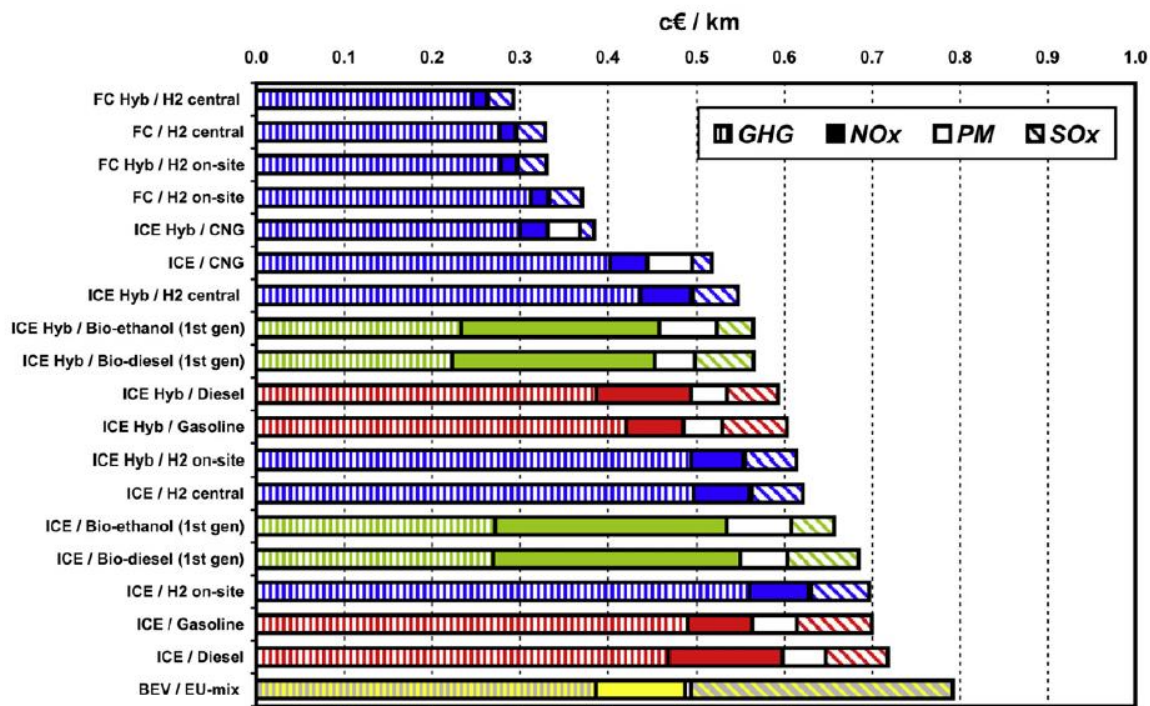
Die Dieseltechnologie mag in der Vergangenheit einen Beitrag zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen im Pkw-Verkehr geleistet haben. Zum einen lagen zu Beginn des Jahrtausends (vgl. Abbildung 4, S. 8) die CO<sub>2</sub>-Werte der Pkw noch weit über den heutigen – der Anteil der Klimakosten an den betrachteten Umwelt- und Gesundheitskosten war entsprechend gewichtiger. Auch war der Vorteil des Diesels gegenüber benzinbetriebenen Fahrzeugen bis ca. 2006 deutlich höher. Heute jedoch bietet der Diesel aus öko-

logischer Perspektive keinen komparativen Vorteil mehr und ist gemäß den untersuchten Daten sogar die insgesamt schädlichste der hier betrachteten Technologien.

Zu einem ähnlichen Fazit kommen Torchio und Santarelli (2010) in einer WTW-Analyse der externen Kosten verschiedener Kraftstoffe und Antriebe (siehe Abbildung 16). Auch hier übersteigen die Gesamtkosten des Diesels die des Benzins vor allem aufgrund des höheren  $\text{NO}_x$ -Ausstoßes und trotz der Vorteile bezüglich der Klimakosten durch Treibhausgasemissionen (GHG). Die Autoren gehen dabei sogar vereinfachend davon aus, dass die  $\text{NO}_x$ -Emissionsfaktoren der verschiedenen Fahrzeuge gleich der Grenzwerte der Abgasnorm Euro 5 sind. Da Diesel die Grenzwerte im Realbetrieb deutlich übersteigt (und Benzin dieses tendenziell unterbietet), ist der Nachteil des Diesels unter realen Bedingungen vermutlich bedeutend höher als in der Studie angegeben.

Die relativ geringen absoluten Werte der externen Kosten je Kilometer sind auf die Anwendung sehr konservativer Kostensätze zurückzuführen. So wurde beispielsweise eine Tonne  $\text{NO}_x$  gemäß Maibach et al. (2008) mit 5.300 Euro bewertet. Dies entspricht dem Durchschnitt für die EU-25. Für Deutschland schlägt die Studie einen Kostensatz in Höhe von 9.600 Euro<sub>2000</sub>/t  $\text{NO}_x$  vor. Die hier vorliegende Studie geht auf Grundlage des (UBA 2012a) von 15.400 Euro<sub>2010</sub>/t  $\text{NO}_x$  aus. Das Handbook on External Costs of Transport (Ricardo AEA 2014) schlägt einen Kostensatz in Höhe von 17.039 Euro<sub>2010</sub>/t  $\text{NO}_x$  vor. Die externen Kosten des Stickoxidausstoßes sind in Torchio und Santarelli (2010) für den Fall Deutschlands daher als zu gering einzustufen. Feinstaubemissionen spielen in Torchio und Santarelli (2010) wie auch in dieser Studie eine untergeordnete Rolle beim Vergleich der Kraftstoffe.

Abbildung 16: Eine WTW-Analyse der externen Kosten verschiedener Kraftstoffe und Antriebe



Quelle: Torchio und Santarelli (2010, Figure 8, S. 4168). Rot: konventionelle Kraftstoffe, blau: erdgasbasierte Kraftstoffe, grüne Biokraftstoffe, gelb: elektrisch. FC=Brennstoffzelle, Hyb=Hybrid, H2=Wasserstoff, ICE=Verbrennungsmotor, BEV= Batterieelektrisches Fahrzeug.

In der Summe schneiden in der Studie vor Umweltaspekten insbesondere erdgasbasierte Kraftstoffe, inklusive erdgasbasiertem Wasserstoff (H2) in Brennstoffzellenfahrzeugen (FC) sowie als Hybridvariante (Hyb) besonders gut ab. Die Bilanz der Biokraftstoffe ist vor allem von der hohen  $\text{NO}_x$ -Belastung in der Kraft-

stoffbereitstellung geprägt. Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV), für die der durchschnittliche Strommix der EU in die Berechnungen der Emissionen einfließt, schneiden aufgrund des hohen Schwefeloxidausstoßes ( $\text{SO}_x$ ) in der Stromerzeugung sehr schlecht ab. Auch die externen Kosten der Treibhausgas- und  $\text{NO}_x$ -Emissionen sind überdurchschnittlich. Das verdeutlicht, dass die Nachhaltigkeit von BEV extrem von der Entwicklung des Strommix abhängt und der Erfolg der Energiewende eine Bedingung für die Elektrifizierung des Verkehrs sein muss.

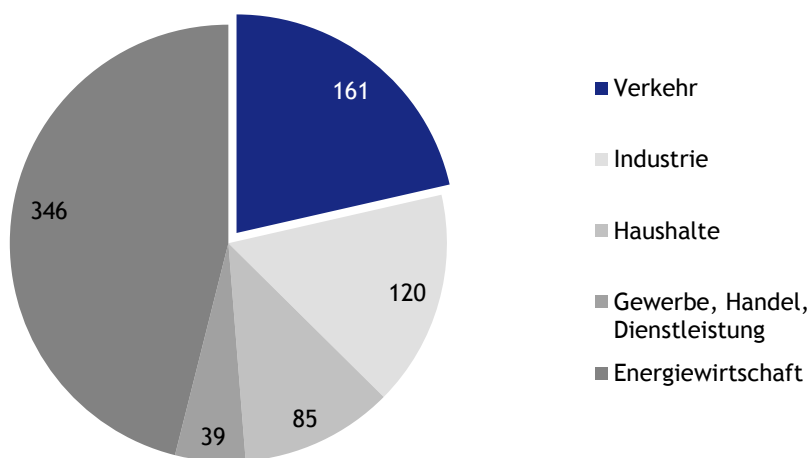
## 4.2 Detailanalyse: Externe Kosten der Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen

In den folgenden Kapiteln werden die Auswirkungen der kraftstoffbedingten Emissionen von Treibhausgasen, Stickoxiden und Feinstaub auf Mensch, Umwelt und Klima im Einzelnen betrachtet. Berücksichtigt werden dabei die Emissionen im Betrieb (TTW) sowie die der Kraftstoffbereitstellung (WTT). Im Verlauf der Betrachtung werden die für die Berechnung der externen Kosten verwendeten Emissionsfaktoren und Kostensätze hergeleitet und diskutiert.

### 4.2.1 Treibhausgase

Der Verkehr verursachte im Jahr 2014 rund 22 % aller in Deutschland emittierten Treibhausgase (UBA 2016a). Davon stammten rund 95 % aus dem Straßenverkehr. Beim Vergleich der Treibhausgasminderungen innerhalb der Sektoren, schneidet der Verkehrssektor nahezu ununterbrochen am schlechtesten ab und befindet sich kaum unter dem Stand von 1990.

Abbildung 17: Treibhausgasemissionen nach Sektoren in 2014 in Millionen Tonnen  $\text{CO}_2$ -Äquiv.



Quelle: UBA (2016a)

### Auswirkungen auf Mensch, Umwelt, Klima

Bei der Verbrennung fossiler Energieträger in Verbrennungsmotoren entsteht unter anderem Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ), das den größten Effekt auf den Treibhauseffekt hat. Zwar ist die Klimawirksamkeit von  $\text{CO}_2$  im Vergleich zu anderen Treibhausgasen relativ gering. Aufgrund der deutlich größeren ausgestoßenen Mengen und der sehr langen Verweildauer hat  $\text{CO}_2$  jedoch maßgeblichen Einfluss auf den Klimawandel. Weitere Treibhausgase wie Methan, Lachgas und F-Gase sind weitaus klimawirksamer, im Bereich Straßenverkehr aber weniger relevant.

Das (UBA 2012b) empfiehlt einen mittleren, kurzfristigen Kostensatz in Höhe von 80 Euro<sub>2010</sub>/tCO<sub>2</sub><sup>9</sup> für die Berechnung der Klimakosten. Mittel- und langfristig wird von stark ansteigenden Kosten ausgegangen. Einen ähnlichen mittleren Kostensatz (90 Euro<sub>2010</sub>/tCO<sub>2</sub>) empfiehlt das Handbook on External Costs of Transport (Ricardo AEA 2014).

### Kraftstoffbedingte Emissionen im Betrieb (TTW)

In einer reinen Betrachtung der Kraftstoffe weist Diesel gegenüber Benzin keinen Vorteil in Bezug auf THG-Emissionen auf. Umgerechnet auf den Energiegehalt liegt der CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor mit 74 tCO<sub>2</sub>/TJ rund 3 % über dem des Benzins (UBA 2013a). Der CO<sub>2</sub>-Ausstoß je eingesetzter Energie ist also in etwa gleich hoch. Die Emissionsfaktoren für Flüssiggas (Autogas) und Erdgas liegen 10 % bzw. 22 % unter dem des Benzins. Biokraftstoffe weisen in der Regel ähnliche Emissionsfaktoren wie ihre konventionellen Äquivalente auf. Aufgrund des biogenen Ursprungs werden die CO<sub>2</sub>-Emissionen aber meist mit Null bewertet.

Für die letztendlich ausgestoßene Menge CO<sub>2</sub> je Kilometer ist neben dem Emissionsfaktor des verbrauchten Kraftstoffs der Wirkungsgrad des entsprechenden Antriebs entscheidend. Hier hat der Dieselmotor als Selbstzünder aufgrund seiner Funktionsweise Effizienzvorteile. Häufig wird davon ausgegangen, dass der Wirkungsgrad des Dieselmotors zwischen 5 und 15 %-Punkte über dem des Ottomotors liegt. Flüssiggas und Erdgas werden häufig bivalent in Ottomotoren eingesetzt. Meist wird daher von einer gleichen oder ähnlichen Energieeffizienz ausgegangen (siehe z. B. DLR et al. 2013; Öko-Institut 2014). Bei monovalentem Betrieb können die Motoren für den Gaseinsatz optimiert und der Wirkungsgrad erhöht werden.

Zusammengenommen sind der Emissionsfaktor des Kraftstoffs sowie der Wirkungsgrad des Motors ausschlaggebend für den CO<sub>2</sub>-Ausstoß je Kilometer. Tabelle 3 gibt eine Übersicht über die in ähnlichen Studien angenommenen Werte. Die Emissionswerte sind relativ zum Benzin dargestellt. Ein Vergleich der absoluten Angaben wäre aufgrund der unterschiedlichen Referenzfahrzeuge sowie unterschiedlichen Bezugsjahren nicht sinnvoll. Die Werte stellen vor dem Hintergrund der zuvor gemachten Aussagen zu Emissionsfaktoren und Wirkungsgraden eine durchaus realistische Bandbreite dar.

**Tabelle 3: CO<sub>2</sub>-Ausstoß (TTW) im Vergleich**

Kraftstoff/Antrieb	CO <sub>2</sub> -Ausstoß je Kilometer ggü. Benzin
Benzin (Ottomotor)	100 %
Diesel	84 bis 95 %
Flüssiggas (LPG)	89 bis 91 %
Erdgas (CNG)	76 bis 85 %
Strom (BEV)	0 %

Quelle: (Chernyavs'ka/Gulli 2010; DLR et al. 2013; ifeu 2004; Torchio/Santarelli 2010), Öko-Institut 2014

Der höhere Wirkungsgrad des Diesels spiegelt sich auch in den Zulassungsdaten des KBA wieder (siehe Tabelle 9, S. 38). In 2014 neuzugelassene Dieselfahrzeuge des Segments „Kleinwagen“ stoßen gemäß Typenzulassung durchschnittlich 15,6 % weniger CO<sub>2</sub> je Kilometer aus als Benziner des gleichen Segments. Für die Segmente „Kompaktklasse“, „Mittelklasse“ und „obere Mittelklasse“ liegt die Differenz bei 14,6 %, 13,9 % bzw. 20,5 %. Für Flüssiggas und Erdgas liegen keine Werte des KBA vor.

Laut dem ICCT (2014a) hat die Diskrepanz zwischen CO<sub>2</sub>-Emissionen auf dem Rollenprüfstand und unter realen Bedingungen in den letzten Jahren drastisch zugenommen. Die im Typgenehmigungsverfahren ermittelten Werte sind daher als Minimalwerte anzusehen. Die in der Studie untersuchten Werte des realen Betriebs lagen in 2013 rund 38 % über den Herstellerangaben. Die Entwicklung der Diskrepanz scheint, laut

<sup>9</sup> 80 Euro in Preisen zu 2010 pro Tonne CO<sub>2</sub>

den Autor\_innen, für Diesel und Benzin jedoch ähnlich verlaufen zu sein, so dass von keiner systematischen Verschiebung zwischen den beiden Kraftstoffen ausgegangen werden muss.

Trotz des Vorteils innerhalb der Segmente stößt ein durchschnittliches Dieselfahrzeug mehr CO<sub>2</sub> aus als ein durchschnittlicher Benziner (vgl. Abbildung 4, S. 8). Der Dieselanteil ist vor allem in Segmenten mit tendenziell schwereren und leistungstärkeren Fahrzeugen hoch (vgl. Abbildung 7, S. 9). In anderen Worten, der durchschnittliche Diesel-Pkw ist zwar effizienter pro Kilogramm bewegte Fahrzeugmaße, aber eben auch schwerer und höher motorisiert als der durchschnittliche Benziner. Entscheidend für die Bewertung des Dieseltrends ist daher die Substituierung: Ersetzt ein Dieselfahrzeug einen in puncto Gewicht, Motorisierung etc. vergleichbaren Benziner, oder wird der Effizienzvorteil des Diesels ausgehebelt? Generell scheint der Trend zum Diesel auch mit einer Zunahme des Gewichts und der Leistung einherzugehen (Wuppertal Institut 2016). Dieser Aspekt wurde bereits in Kapitel 2.2.3 (S. 8) beleuchtet, bleibt beim Vergleich der externen Kosten jedoch unberücksichtigt.

Ebenfalls nicht berücksichtigt werden kurzlebige Luftschadstoffe, die Einfluss auf das Klima haben (Schmale/Kuik 2013). Feinstaub beispielsweise reflektiert die Sonneneinstrahlung und wirkt daher kühlend (der sogenannte Maskeneffekt). Ruß und „black carbon“ hingegen, spezielle Formen des besonders kleinen Feinstaubes (<PM<sub>2,5</sub>), wirken klimaerwärmend. Ruß entsteht bei der unvollständigen Verbrennung fossiler Energien und stellt insbesondere bei Dieselfahrzeugen ein Problem dar, das auch durch den Einsatz von Partikelfiltern nur zum Teil gelöst wird. Die Bedeutsamkeit des „black carbon“ für die Bewertung des Dieseltrends stellen unter anderem Cames und Helmers (2013) heraus. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass der steigende Dieselanteil in Europa trotz der zunächst besser scheinenden Abgaswerte keinen positiven Effekt für das Klima hatte.

#### Emissionen in der Kraftstoffbereitstellung (WTT)

Auch bei Betrachtung der reinen Kraftstoffbereitstellung sind Dieselfahrzeuge aufgrund des höheren Wirkungsgrads des Motors zunächst gegenüber Benzinern im Vorteil (vgl. Tabelle 4). Zwar liegt der Emissionsfaktor laut Berechnungen von DLR et al. (2013) für die Dieselbereitstellung gemessen am Energiegehalt mit 16 gCO<sub>2</sub>/MJ deutlich über dem des Benzins (14,4 gCO<sub>2</sub>/MJ). Aufgrund der höheren Energieeffizienz des Dieselmotors ist der Faktor umgerechnet auf den Kilometer jedoch rund 8 % geringer. Flüssiggas und Erdgas weisen ähnliche Werte auf. Biokraftstoffe haben tendenziell deutlich höhere Emissionsfaktoren. Diese hängen jedoch stark von den verwendeten Rohstoffe und Technologien ab.

**Tabelle 4: THG-Emissionsfaktoren und externe Kosten der Kraftstoffbereitstellung**

Kraftstoff	Energieeffizienz	Emissionsfaktoren		Externe Kosten
	MJ/100km	g/MJ	g/km*	ct/km**
Benzin/Ottokraftstoff	238,0	14,4	34,3	0,274
Diesel	198,0	16,0	31,7	0,253
Flüssiggas (LPG)	238,0	13,8	32,8	0,263
Erdgas (CNG)	238,0	17,3	41,2	0,329
Biomethan (CNG) aus Energiepflanzen	238,0	39,0	92,8	0,743
Biomethan (CNG) aus Bioabfällen	238,0	29,0	69,0	0,552
Strom	67,0	169,2	113,3	0,907

Quelle: DLR et al. (2013), (UBA 2012a; UBA 2015a), Öko-Institut (2014) ;

\*eigene Umrechnung der Emissionsfaktoren in g/km;

\*\*Berechnung der externen Kosten unter Anwendung des Kostensatzes von 80s Euro<sub>2010</sub>/t (UBA 2012a).

Um die Vergleichbarkeit der Daten zu wahren wurde in Tabelle 4 fast ausschließlich auf die Daten von DLR et al. (2013) zurückgegriffen. Diese enthalten jedoch keine Werte für Strom, weshalb eigene Abschätzungen gemacht wurden. Für batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) gilt eine gesonderte Betrachtung, da im Fall

von Elektroautos alle CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Vorkette anfallen. Der deutsche Strommix (Inlandsverbrauch) hatte in 2014 einen Emissionsfaktor von 609 gCO<sub>2</sub>/kWh oder 169,2 gCO<sub>2</sub>/MJ (UBA 2015a). Im Vergleich zum Benzin (WTT+TTW) enthält eine Energieeinheit also fast doppelt so viel CO<sub>2</sub>. Aufgrund des wesentlich höheren Wirkungsgrades der BEV – 67 MJ/100km für einen mittleren Pkw laut Öko-Institut (2014) – fällt die Bilanz der kraftstoffbedingten Treibhausgasemissionen dennoch deutlich besser aus. Unter Anwendung der zuvor genannten Werte ergibt sich ein Ausstoß von 113,3 gCO<sub>2</sub>/km. Torchio und Santarelli (2010) berechnen für einen BEV mit hoher Reichweite (600 km) und geringerer Effizienz (111 MJ/km) unter Einsatz des europäischen Strommix einen Wert von 129 gCO<sub>2</sub>/km. Analog zum steigenden Einsatz erneuerbarer Energien bei der Stromerzeugung, werden die kraftstoffbedingten Treibhausgasemissionen zukünftig weiter fallen.

Doch die isolierte Betrachtung der Emissionen aus der Kraftstoffbereitstellung vernachlässigt den in Kapitel 2.2.6 bereits angesprochenen Aspekt der Abhängigkeit der Emissionsbilanz des Diesels von der Importquote. Mit steigender Dieselnachfrage wird ein zunehmender Teil aus Importen gedeckt. Gegenüber Produkten aus heimischen Raffinerien ergeben sich in der Kraftstoffbereitstellung dadurch zusätzliche Transportwege und damit einhergehende Emissionen von Treibhausgasen und weiteren Schadstoffen. Die Größenordnung dieses Effekts kann an dieser Stelle nicht abgeschätzt werden.

#### 4.2.2 Stickstoffoxide

Der Straßenverkehr ist in Deutschland die mit Abstand größte Quelle von Stickstoffoxiden (NO<sub>x</sub>) und für 36 % aller Emissionen verantwortlich (UBA 2015b). NO<sub>x</sub> entsteht unter anderem in Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor als Nebenprodukt beim Verbrennungsprozess. Je nach Temperatur und Luftüberschuss wird der Kraftstoff nur unvollständig verbrannt und es treten vermehrt Stickoxide aus.

#### Auswirkungen auf Mensch, Umwelt, Klima

Der Sachverständigenrat für Umweltfragen (2015, S. 19) nennt die zu hohen Stickstoffeinträge – darunter fallen neben Stickoxiden unter anderem auch Ammoniak und Lachgas – „eines der großen ungelösten Umweltprobleme unserer Zeit“. Sie belasten Luft, Wasser und Boden und schaden daher nicht nur der menschlichen Gesundheit sondern dem gesamten Ökosystem. Die vom Straßenverkehr ausgestoßenen Stickstoffoxidemissionen belasten in erster Linie die Luft und damit die menschliche Gesundheit. NO<sub>x</sub> wird unter anderem mit allergischen Erkrankungen, Herz-Kreislauf- und Atemwegserkrankungen, Lungenkrebs sowie einer generell erhöhten Sterblichkeit in Verbindung gebracht (siehe z. B. Franze et al. 2005, Samoli et al. 2006, Laumbach/Kipen 2012, Guarnieri/Balmes 2014, Hamra et al. 2015). Aufgrund ihrer langen Reaktions- und Verweildauer (mehrere Tage) wirken Stickoxide auch überregional und können sich weiträumig verbreiten (LUBW o.J.).

Das Umweltbundesamt (UBA 2012a) beziffert die Kosten einer Tonne NO<sub>x</sub> mit 15.400 Euro<sub>2010</sub>. Der Großteil, 82 %, sind auf Gesundheitsschäden zurückzuführen. Biodiversitätsverluste, Ernte- und Materialschäden sind für 14 %, 3 % bzw. 1 % verantwortlich. Aufgrund ihrer potentiell überregionalen Wirkung gibt das UBA einen einheitlichen Kostensatz für Emissionen inner- und außerorts vor (vgl. Tabelle 8, S. 38). Das Handbook on External Costs of Transport (Ricardo AEA 2014) geht sogar von 17.039 Euro<sub>2010</sub>/t NO<sub>x</sub> aus.

### Kraftstoffbedingte Emissionen im Betrieb (TTW)

Die seit dem 1. September 2014 geltende Abgasnorm Euro 6 schreibt für Benzin- und Diesel-Pkw NO<sub>x</sub>-Grenzwerte von 60 bzw. 80 mg/km<sup>10</sup> vor. Zuvor lag der Grenzwert der Abgasnorm Euro 5 für Diesel bei 180 mg/km (vgl. Tabelle 2, S. 23). Diese Grenzwerte müssen im Rahmen des Typgenehmigungsverfahrens gemäß NEFZ eingehalten werden. Laut Kraftfahrtbundesamt (KBA 2015b) hatte ein in 2014 neuzugelassener Benziner (Diesel) einen NO<sub>x</sub>-Abgaswert von 23,2 mg/km (122,1 mg/km) (vgl. Tabelle 9, S. 38).

In der Tat haben Benzinfahrzeuge im Labor sowie auch unter realen Bedingungen kaum Probleme mit der Einhaltung der Grenzwerte. Ähnlich verhält es sich bei Erd- und Autogasfahrzeugen. Bislang wurden für diese Fahrzeugtypen keine systematischen Unregelmäßigkeiten festgestellt. Dieselfahrzeuge hingegen schneiden nicht nur im NEFZ unterdurchschnittlich ab, sondern verfehlen vor allem unter realen Bedingungen die Grenzwerte häufig um ein vielfaches. Eine Reihe an Studien, in denen Dieselfahrzeuge mithilfe mobiler Emissionsmessgeräte (PEMS) im Fahrbetrieb gemessen wurden, schätzt den durchschnittlichen NO<sub>x</sub>-Emissionsfaktor früher Euro-6-Modelle auf rund 450 bis 600 mg/km (siehe z. B. Ligterink et al. 2013, ICCT 2014b, Kadijk et al. 2015b, Yang et al. 2015). Der Grenzwert von 80 mg/km wird im Durchschnitt also um das sechs- bis siebenfache überschritten. Ein ähnlicher Verdacht besteht auch für Diesel-Plug-In-Hybride (Kadijk et al. 2015a und 2016). Eine offizielle PEMS-Prüfung des KBA mit über 50 Fahrzeugen von 25 in- und ausländischen Herstellern soll noch im Jahr 2016 abgeschlossen und veröffentlicht werden (KBA 2015d).<sup>11</sup>

Unter Anwendung des Kostensatzes für NO<sub>x</sub> in Höhe von 15.400 Euro<sub>2010</sub>/t (UBA 2012a) belaufen sich die Gesundheits- und Umweltkosten eines Benzinfahrzeugs mit einem Emissionswert von 60 mg/km (Grenzwert Euro 6) auf rund 0,09 ct/km. Ein durchschnittlicher Diesel-Pkw verursacht, unter Berücksichtigung der sechs- bis siebenfachen Überschreitung des Grenzwerts von 80 mg NO<sub>x</sub>/km, Kosten in Höhe von 0,72 bis 0,86 ct/km, also mehr als das Achtfache des Benziners. Durchschnittlich trägt NO<sub>x</sub> (TTW) etwas mehr als 10 % zu den hier betrachteten externen Kosten zu. Bei Dieselfahrzeugen ist es rund ein Drittel.

Die Beimischung von Bioethanol und Biodiesel zu Benzin bzw. Diesel erhöht tendenziell den Ausstoß von Stockoxiden; die Beimischung von Biomethan zu Erdgas hat vermutlich kaum Auswirkungen (Anderson 2015). Quantitative Aussagen zum NO<sub>x</sub>-Ausstoß von Biokraftstoffen können jedoch nicht gemacht werden, weil keine gesicherten Erkenntnisse vorliegen (UBA 2014).

Diese Werte sind lediglich als Referenz zu verstehen, verdeutlichen aber das Ausmaß des NO<sub>x</sub>-Problems des Diesels. Das NO<sub>x</sub>-Emissionsverhalten eines Fahrzeugs ist unter anderem abhängig von bestimmten Fahrzeugeigenschaften (z. B. Gewicht), der eingesetzten Abgasreinigungstechnologie, der Fahrsituation und vielen weiteren externen Faktoren (z. B. Temperatur, Fahrverhalten), so dass keine allgemeine Aussage über einen durchschnittlichen Diesel-Pkw gemacht werden kann. Es existieren Fahrzeuge, die die Grenzwerte auch unter realen Bedingungen mit effektivem Technologieeinsatz einhalten können (siehe z. B. Kadijk et al. 2016), sowie Euro-6-Modelle, die in bestimmten Fahrsituationen mehr als 2.000 mg/km ausstoßen (ICCT 2014b).

Gänzlich ausgelassen wurden bei der Betrachtung ältere Modelle, die jedoch den Hauptanteil am Pkw-Bestand ausmachen. Am 1.1.2015 lag der Anteil der Euro-6-Diesel am gesamten Diesel-Pkw-Bestand bei

<sup>10</sup> Im Februar 2016 genehmigte das EU-Parlament eine Aufweichung der Diesel-Grenzwerte für das geplante Real Drive Emissions (RDE) Abgastestverfahren. Demnach sind ab 2020 Überschreitungen um bis zu 50 % (also max. 120 mg/km) zulässig (Transport & Environment 2016).

<sup>11</sup> Die nach Abschluss der Studie veröffentlichten Ergebnisse (BMVI 2016) schließen sich an die Ergebnisse der zuvor zitierten Untersuchungen an: Die 53 geprüften Modelle (19 Euro 5-Pkw, 30 Euro 6-Pkw sowie vier leichte Nutzfahrzeuge Euro der 5-Norm) überschreiten den jeweils zulässigen Grenzwert im RDE-Testverfahren im Durchschnitt um das 5,1-fache. Der durchschnittlich festgestellte Emissionsfaktor liegt bei 674 mg/km.



rund 3 % (KBA 2015c). Bei den Neuzulassungen lag der Marktanteil über das Jahr 2014 bei rund 25 % (Mock 2015). Laut Kadijk et al. (2016) ist der Vorteil von Euro-6-Modellen gegenüber Euro-5-Modellen nach bisherigen Erkenntnissen jedoch als eher gering einzuschätzen. Auch von Euro 1 auf Euro 5 habe es keinen substantiellen Verbesserungen gegeben.

### NO<sub>x</sub> Emissionen in der Kraftstoffbereitstellung (WTT)

Aufgrund des geringeren Kraftstoffverbrauchs liegt der NO<sub>x</sub>-Emissionsfaktor umgerechnet auf den gefahrenen Kilometer rund 10 % unter dem des Benziners (siehe Tabelle 5) (DLR et al. 2013). Dieser Vorteil wird in der Summe durch die zuvor beschriebenen Realemissionen im Betrieb jedoch mehr als überkompensiert. Einen besonders hohen Emissionsfaktor in der Bereitstellung weist aus Energiepflanzen gewonnenes Biomethan (Bio-CNG) auf, was unter anderem auf die Düngung in der Landwirtschaft zurückzuführen ist. Die Faktoren variieren dabei jedoch stark und sind von der genutzten Pflanze abhängig (siehe z. B. UBA 2014). Für Biodiesel und Bioethanol machen DLR et al. (2013) keine Angaben. Die Daten des UBA (2013b) lassen erahnen, dass die Werte in der Regel noch deutlich schlechter ausfallen als für Biomethan und Bioethanol im aktuellen Mix weitaus mehr NO<sub>x</sub> verursacht als Biodiesel.

**Tabelle 5: NO<sub>x</sub>-Emissionsfaktoren und externe Kosten der Kraftstoffbereitstellung**

Kraftstoff	Energieeffizienz	Emissionsfaktoren		Externe Kosten
	MJ/100km	g/MJ	g/km*	ct/km***
Benzin/Ottokraftstoff	238,0	0,037	0,088	0,136
Diesel	198,0	0,040	0,079	0,122
Flüssiggas (LPG)	238,0	0,050	0,119	0,183
Erdgas (CNG)	238,0	0,045	0,107	0,165
Biomethan (CNG) aus Energiepflanzen	238,0	0,081	0,193	0,297
Biomethan (CNG) aus Bioabfällen	238,0	0,030	0,071	0,110
Strom	67,0	0,139**	0,092	0,143

Quelle: DLR et al. (2013), (UBA 2012a), Öko-Institut (2014);

\*eigene Umrechnung der Emissionsfaktoren in g/km;

\*\*eigene Berechnung auf Grundlage UBA (2014);

\*\*\*Berechnung der externen Kosten unter Anwendung des Kostensatzes von 15.400 Euro<sub>2010</sub>/t (UBA 2012a).

Die Angaben zu den Stickoxidemissionen der Stromerzeugung entstammen eigenen Berechnungen. Auf Grundlage der Emissionsbilanzen des Umweltbundesamts (UBA 2014) wird von einem Emissionsfaktor von rund 0,5 NO<sub>x</sub>/kWh bzw. 0,139 gNO<sub>x</sub>/MJ ausgegangen. Bei einer Energieeffizienz von 67 MJ/100 km (Öko-Institut 2014) eines mittleren BEV gelangen wir zu 0,093 gNO<sub>x</sub>/km.

Die externen Kosten der NO<sub>x</sub>-Emissionen in der Kraftstoffbereitstellung machen einen nicht unerheblichen Teil der betrachteten externen Gesamtkosten aus – durchschnittlich 10 %. Sie variieren zwischen 0,110 ct/km für Biomethan aus Abfällen und 0,297 ct/km für Biomethan aus Energiepflanzen.

### 4.2.3 Feinstaub

Der Straßenverkehr ist in Deutschland für rund 15 % bzw. 20 % der Emissionen von PM<sub>10</sub> und PM<sub>2,5</sub>, Feinstaub mit einem Durchmesser von weniger als 10 bzw. 2,5 Mikrometer, verantwortlich (UBA 2015b). In Ballungsgebieten ist der Straßenverkehr häufig die größte Feinstaubquelle. Aufgrund des Verbrennungsprozesses im Fahrzeugmotor sowie durch Staubaufwirbelung, Bremsen- und Reifenabrieb wird ein Gemisch fester und flüssiger Partikel freigesetzt.

## Auswirkungen auf Mensch, Umwelt, Klima

Je nach Größe kann Feinstaub unterschiedlich tief in den menschlichen Körper eindringen –  $PM_{10}$  bis in die Nasenhöhlen,  $PM_{2,5}$  bis in die Lungenbläschen (UBA 2016b). Sogenannte Ultrafeine Partikel (unter 0,1 Mikrometer) gelangen unter Umständen sogar bis in den Blutkreislauf. Die gesundheitlichen Schäden reichen laut UBA von Reizungen der Schleimhäute und Luftröhre über Plaquebildung in Blutgefäßen bis hin zu Schäden am Nervensystem. In Deutschland verkürzt die durchschnittliche Feinstaubbelastung die Lebenserwartung um ca. 7,5 Monate und ist Grund für etwa 100.000 Krankenhausaufenthalte in der Europäischen Union pro Jahr (Schmale/Kuik 2013). Schätzungsweise 35.000 Todesfälle in Deutschland pro Jahr, ca. 4 % aller Sterbefälle, sind auf Luftverschmutzung, insbesondere durch  $PM_{2,5}$ , zurückzuführen (Lelieveld et al. 2015). Die Gesundheitsrisiken steigen dabei auch bei Einhaltung der Grenzwerte signifikant an, da bereits geringe Konzentrationen schädigend sind (Cesaroni et al. 2014).

Weitere Auswirkungen sind noch unbekannt oder werden aktiv erforscht. Eine wachsende Zahl an Studien verbindet Luftverschmutzung, insbesondere durch Feinstaub, beispielsweise mit einem deutlich erhöhtem Diabetesrisiko (siehe z. B. Eze et al. 2014, Weinmayr et al. 2015). Ebenso wenig erforscht, ist die Entstehung und Wirkung von sekundärem Feinstaub. Neben den direkten Feinstaubemissionen stoßen insbesondere Benzinfahrzeuge Gase aus, die erst später in der Luft zu Feinstaub umgewandelt werden (Sekundäre Aerosole) und Lungenzellensterben verursachen (Künzi et al. 2015). Die Klimawirksamkeit bestimmter Partikel wurde in Abschnitt 4.2.1 angesprochen.

Zur monetären Bewertung der Gesundheitsschäden gibt das Umweltbundesamt in der Methodenkonvention (UBA 2012a) eine Spanne von 2.900 Euro<sub>2010</sub>/t (für groben Feinstaub ( $>PM_{10}$ ), außerorts) bis hin zu 364.100 Euro<sub>2010</sub>/t ( $PM_{2,5}$ , innerorts) an (siehe Tabelle 8, S. 38). Diese extreme Spanne ergibt sich, da der Schaden je nach Partikelgröße und Emissionsort stark variiert. Gerade in Städten und Metropolregionen sind aufgrund der hohen Bevölkerungsdichte potentiell sehr viel mehr Menschen betroffen als in ländlichen Regionen. Da Feinstaubmenge, Feinstaubzusammensetzung und Emissionsort meist unbekannt sind, ergeben sich bei der Berechnung externer Kosten erhebliche methodische Schwierigkeiten.

### Kraftstoffbedingte Emissionen im Betrieb (TTW)

Feinstaubemissionen sind bei neuen Fahrzeugmodellen mit Filtertechnologie weit weniger kraftstoffabhängig als CO<sub>2</sub> oder NO<sub>x</sub>, da ein Großteil der Emissionen auf Abrieb und Verschleiß von Reifen, Bremsen und Straßen (indirekte Emissionen) zurückzuführen ist. Vor allem grober Feinstaub (PM<sub>10</sub> und größer) stammt fast ausschließlich aus diesen indirekten Emissionsquellen. Auch PM<sub>2,5</sub> wird größtenteils auf diese Weise emittiert. Gemäß der Methodenkonvention des Umweltbundesamts (UBA 2012a) stammt bei Diesel- und Benzinfahrzeugen (Euro 5) lediglich rund ein Drittel der PM<sub>2,5</sub>-Emissionen direkt aus dem Auspuff. Im Vergleich der Kraftstoffe im Betrieb (TTW) werden im Folgenden ausschließlich die direkten Emissionen betrachtet.

Seit Abgasnorm Euro 6 dürfen Pkw im Betrieb 4,5 mg/km an Feinstaub ausstoßen (vgl. Tabelle 2, S. 23). In der Tat kann auch unter realen Fahrbedingungen davon ausgegangen werden, dass moderne Fahrzeuge diese Werte einhalten oder unterbieten. Die Filterung von Partikeln ist technologisch wesentlich leichter umsetzbar und kostengünstiger als beispielsweise die Reduzierung von Stickoxidemissionen. Regulatorischer Druck auf die Hersteller – in Form der Euro-5-Norm – reichte aus, um das Feinstaubproblem von Dieselfahrzeugen mithilfe von Filtertechnologie weitestgehend zu lösen. Das in den vergangenen Jahren aufgekommene Feinstaubproblem moderner Benzinfahrzeuge mit Direkteinspritzung ist auf ähnliche Weise lösbar (siehe z. B. Transport & Environment 2013, Johnson 2014, Deutsche Umwelthilfe/Verkehrsclub Deutschland 2015). Eine Kosten-Nutzen-Analyse für die Europäische Kommission (Mamakos et al. 2011) hat darüber hinaus ergeben, dass der soziale Nutzen des Einsatzes von Partikelfiltern die Kosten deutlich übersteigt. Die besonders feinen und leichten Feinstaubpartikel der direkteinspritzenden Benziner waren durch die Grenzwerte der Abgasnorm bislang unzureichend abgedeckt, da für Pkw bis einschließlich Euro 5 lediglich die Partikelmasse, bzw. ihr Gewicht, berücksichtigt wurde. Seit Euro 6 ist nun auch die Partikelanzahl (PN) Teil der Abgasnorm. Diese gilt bereits jetzt für Diesel-Pkw, jedoch erst ab September 2017 (2018) für Typzulassungen (Erstzulassungen) von Pkw mit Ottomotor.

Für die Berechnung der externen Kosten wurde auf die Werte von DLR et al. (2013) zurückgegriffen, die von Emissionswerten deutlich unterhalb der Grenzwerte der Abgasnorm ausgehen (siehe Tabelle 7, S. 38). Da nicht zwischen Feinstaubgrößen und Emissionsort differenziert wurde, wurde vereinfachend einheitlich der Kostensatz in Höhe von 122.800 Euro<sub>2010</sub>/t verwendet.

### Emissionen in der Kraftstoffbereitstellung (WTT)

In der Kraftstoffbereitstellung (WTT) ist der Vergleich der externen Kosten der Feinstaubemissionen nur bedingt durchführbar, da in den Quellen nicht zwischen den verschiedenen Feinstaubgrößen unterschieden wird. Die Emissionsfaktoren in Tabelle 6 stammen aus Torchio und Santarelli (2010) und beziehen sich auf die ausgestoßene Menge PM in Gramm umgerechnet auf den gefahrenen Kilometer. Fehlende Werte wurden durch eigene Abschätzung auf Grundlage der Emissionsbilanz des Umweltbundesamts (UBA 2014) ergänzt.

Für die Berechnung der externen Kosten wurde von Schadenskosten in Höhe von 55.400 Euro je Tonne PM<sub>2,5</sub> ausgegangen (UBA 2012a). Die Abschätzung stellt damit einen Maximalwert dar, weil davon ausgegangen werden kann, dass auch weniger schädliches PM<sub>10</sub>- und PM<sub>>10</sub> emittiert wird. Der Einfluss die auf Gesamthöhe der externen Kosten ist dennoch gering.

Die Unterschiede zwischen Diesel, Benzin, Flüssiggas und Erdgas sind vernachlässigbar. Strom hat demgegenüber einen deutlich erhöhten Ausstoß. Die Verlagerung der Emissionen aus dem Straßenverkehr in die Vorkette bietet trotzdem Vorteile, weil sie tendenziell dichter besiedelte Regionen entlasten und somit die externen Kosten reduziert.

Tabelle 6: Feinstaub-Emissionsfaktoren und externe Kosten der Kraftstoffbereitstellung

Kraftstoff	Emissionsfaktoren	Externe Kosten
	g/km	ct/km**
Benzin/Ottokraftstoff	0,004	0,022
Diesel	0,002	0,011
Flüssiggas (LPG)	0,002*	0,022
Erdgas (CNG)	0,002	0,011
Biomethan	0,002*	0,011
Biodiesel	0,006	0,033
Bioethanol	0,034	0,188
Strom	0,009	0,050

Quelle: Torchio/Santarelli (2010), (UBA 2012a);

\*für LPG wurde vereinfachend der Emissionsfaktor von Diesel und CNG übernommen, Biomethan hat nach Angaben des UBA (2014) den gleichen Faktor wie Erdgas;

\*\*Berechnung der externen Kosten unter Anwendung des maximalen Kostensatzes von 55.400 Euro2010/t (UBA 2012a).

## 5 Fazit

Die Dieseltechnologie hat sich fest im deutschen Pkw-Markt etabliert. Fast jedes dritte Auto auf deutschen Straßen ist mittlerweile ein Diesel, bei den Neuzulassungen ist es bereits jedes zweite. Eine begünstigende steuerliche, regulatorische und gesetzliche Anreizstruktur, gepaart mit dem frühen Engagement deutscher Automobilhersteller und der Nachfrage nach sparsamen Fahrzeugen, kann den Diesel-Boom erklären. In dieser Studie wurde die wachsende Bedeutung und Zukunftsfähigkeit der Dieseltechnologie hinterfragt, da ihre Übervorteilung ungerechtfertigt erscheint und zunehmend im Widerspruch zu klima-, umwelt- und verkehrspolitischen Zielen steht.

Zunächst schwindet der vermeintliche Klimavorteil der Dieseltechnologie, der ihr aufgrund effizienterer Motoren bis heute zugeschrieben wird: Die durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen aller Diesel- und Benzin-Neuwagen in der EU liegen nahezu gleichauf, in Deutschland sind neue Benzin-Pkw im Schnitt bereits heute klimafreundlicher als Diesel-Neuwagen. Die Gründe liegen darin, dass Automobilhersteller neuerdings die großen CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenziale bei Benzin-Pkw erschließen, während die Emissionen bei Dieselmotoren kaum noch reduziert werden können. Zudem führen überdurchschnittliche Steigerungen von Fahrzeugleistung und -gewicht bei Diesel-Pkw dazu, dass die Vorteile effizienterer Motoren kompensiert werden. Vor allem in den höherklassigen Pkw-Segmenten ist der Diesel stärker vertreten, da sich die oft teureren Motoren im Kleinwagenbereich kaum rechnen und Pkw-Käufer insbesondere bei Diesel-Pkw immer leistungsstärkere Modelle nachfragen. Auch weil sich Dieselfahrzeuge wegen steuerlicher Fehlanreize im Wesentlichen für Viel- bzw. Weitfahrer\_innen lohnen, werden Pkw in den höherklassigen Segmenten nachgefragt. Große, leistungsstarke Pkw mit hohen Fahrleistungen passen jedoch nicht zum künftigen Pkw-Verkehr, da insbesondere die weitere Verstärkung kleinere und leichtere Pkw mit geringerer Fahrleistung und alternativen Antrieben attraktiver werden lässt. Die Ausrichtung deutscher Automobilhersteller auf leistungsstarke Verbrennungsmotoren und eine besondere Fokussierung auf die Dieseltechnologie führen jedoch bislang zur Vernachlässigung eines notwendigen Strategiewechsels hin zu emissionsarmen Alternativen. Ineffizientere Raffinationsprozesse und wachsende Kraftstoffimporte durch die vermehrte Dieselnachfrage schmälern den Klimavorteil der Dieseltechnologie weiter.

Die Analyse der ausgewählten Externalitäten zeigt, dass der Diesel aus ökologischer Perspektive keinen komparativen Vorteil gegenüber Benzinfahrzeugen mit Ottomotor hat. Stattdessen scheint er sogar die insgesamt schädlichste der hier betrachteten Technologien zu sein. Insbesondere unter Berücksichtigung der Stickoxidemissionen ergeben sich große Folgekosten aufgrund von Gesundheitsschäden, die bei einer

Bewertung der Kraftstoffe nicht vernachlässigt werden dürfen. Doch selbst bei einer bloßen Fokussierung auf den Klimaschutz, kann für die Dieselsechnologie keine entscheidende Rolle abgeleitet werden. Bereits heute existieren Technologien mit deutlich mehr Einsparpotenzial.

Dennoch profitiert der Diesel weiterhin von den gesetzten Rahmenbedingungen der Politik. Die Wahl der Kraftstoffe und Antriebe wird von steuerlichen, regulatorischen und gesetzlichen Instrumenten beeinflusst, die teils inkohärente Anreize schaffen. Vor allem die reduzierte Energiesteuer verschafft dem Dieseldkraftstoff einen nicht zu rechtfertigen Vorteil gegenüber Benzin. Die Unzulänglichkeiten der Test- und Kontrollverfahren zur Feststellung der Emissionswerte für die Typenzulassungen haben es den Herstellern gleichzeitig ermöglicht, die bekannten Nachteile der Technologie jahrelang zu umgehen. Viele Instrumente sind für den Einsatz alternativer Technologien noch nicht ausgelegt und verzerren daher häufig den Wettbewerb. So wird das Reduktionspotenzial von Biokraftstoffen oder bivalenten Gasfahrzeugen bei Kfz-Steuer und Flottengrenzwerten nicht berücksichtigt.

**ANHANG**
**Tabelle 7: Verwendete Emissionsfaktoren (in g/km) für Kraftstoffbereitstellung und Betrieb**

	Emissionen WTT			Emissionen TTW		
	CO <sub>2e</sub>	NO <sub>x</sub>	PM	CO <sub>2e</sub>	NO <sub>x</sub>	PM
Benzin	34,3	0,088	0,004	172,0	0,060	0,0019
Diesel	31,7	0,079	0,002	148,0	0,530	0,0015
Flüssiggas (LPG)	32,8	0,119	0,002	156,0	0,100	0,0019
Erdgas (CNG)	41,2	0,107	0,002	134,0	0,060	0,0019
Strom*	113,3	0,093	0,009	0,0	0,000	0,0000

Quelle: CO<sub>2e</sub>- und NO<sub>x</sub>-Emissionen (WTT und TTW) sowie Feinstaub (nur TTW) gemäß DLR et al. (2013); Feinstaub (WTT) nach Torchio/Santarelli (2010);

\*Die CO<sub>2e</sub>- und NO<sub>x</sub>-Werte (WTT) für „Strom“ entstammen eigenen Berechnungen basierend auf Öko-Institut (2014) und UBA (2014).

**Tabelle 8: Kostensätze für Luftschadstoffe aus dem Straßenverkehr in Deutschland (in Euro<sub>2010</sub>/t)**

Emission	TTW		WTT
	Innerorts	Außerorts	
CO <sub>2</sub>	80	80	80
NO <sub>x</sub>	15.400	15.400	15.400
PM <sub>2,5</sub>	364.100	122.800	55.400
PM <sub>10</sub>	33.700	11.000	39.700
PM <sub>&gt;10</sub>	10.200	2.900	2.900

Quelle: (UBA 2012a)

**Tabelle 9: CO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub>-Ausstoß neuzugelassener (2014) Benzin- und Dieselfahrzeuge gemäß Typenzulassung**

Kraftstoff/Antrieb	Anzahl	gCO <sub>2</sub> /km	ggü. Benzin	gNO <sub>x</sub> /km	ggü. Benzin
Benzin, Ø Alle	1.533.726	132,4		0,023	
Diesel, Ø Alle	1.452.565	135,2	2,1 %	0,122	430,4 %
Benzin, Ø Kleinwagen	386.763	120,9		0,024	
Diesel, Ø Kleinwagen	58.801	102,0	-15,6 %	0,120	400,0 %
Benzin, Ø Kompaktklasse	444.245	128,4		0,026	
Diesel, Ø Kompaktklasse	339.843	109,7	-14,6 %	0,113	334,6 %
Benzin, Ø Mittelklasse	91.056	148,5		0,022	
Diesel, Ø Mittelklasse	287.274	127,8	-13,9 %	0,116	427,3 %
Benzin, Ø obere Mittelklasse	12.039	176,6		0,032	
Diesel, Ø obere Mittelklasse	108.586	140,4	-20,5 %	0,090	181,3 %

Quelle: (KBA 2015b)

## LITERATUR

- Altfeld, F., Liesenkötter, B., Schewe, G. (2014): Technologiewettbewerb unter Unsicherheit. In: Proff, H. (Hrsg.): Radikale Innovationen in der Mobilität. Technische und betriebswirtschaftliche Aspekte. Wiesbaden, Springer Fachmedien. S. 7-23.
- Anderson, L. G. (2015): Effects of using renewable fuels on vehicle emissions. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews. Jg. 47, S. 162-172.
- Bundesverband der deutschen Bioethanolwirtschaft (BDB<sup>e</sup>) (2015): Aktualisierte Fassungen der europäischen Biokraftstoff-Richtlinien mit sämtlichen Änderungen nach Beschluss des EU-Rates. Abrufbar unter: <https://www.bdbe.de/mediacenter/presseinformationen/aktualisierte-fassung-der-europaischen-biokraftstoff-richtli>. Letzter Zugriff am: 21.3.2016.
- BMF (2014): Entwicklung der Energie- (vormals Mineralöl-) und Stromsteuersätze in der Bundesrepublik Deutschland. Abrufbar unter: [http://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Zoll/Energiebesteuerung/Entwicklung\\_der\\_Energie\\_und\\_Stromsteuersaetze/2009-05-05-geschichte-energie-stromsteuersaetze.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](http://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Zoll/Energiebesteuerung/Entwicklung_der_Energie_und_Stromsteuersaetze/2009-05-05-geschichte-energie-stromsteuersaetze.pdf?__blob=publicationFile&v=4). Letzter Zugriff am: 24.3.2016.
- BMVI (2016): Bericht der Untersuchungskommission „Volkswagen“. Abrufbar unter: [http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/Strasse/bericht-untersuchungskommission-volkswagen.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/Strasse/bericht-untersuchungskommission-volkswagen.pdf?__blob=publicationFile). Letzter Zugriff am: 26.4.2016.
- Borgstedt, P., Neyer, B., Schewe, G. (2015): Innovationsstrategien von Automobilherstellern im Spannungsfeld konventioneller und alternativer Antriebsarten. In: Proff, H. (2015): Entscheidungen beim Übergang in die Elektromobilität. Technische und betriebswirtschaftliche Aspekte. Wiesbaden, Springer Fachmedien. S. 59-69
- Bracher, T. (2011): Stadtverkehr. In: Schwedes, O. (Hrsg.): Verkehrspolitik. Eine interdisziplinäre Einführung. Wiesbaden, Springer Fachmedien. S. 275-295.
- BUND et al. (2015): Offener Brief “Umsetzung der EU Biokraftstoff-Reform in Deutschland.” Abrufbar unter: [http://www.bund.net/fileadmin/bundnet/pdfs/landwirtschaft/151008\\_bund\\_landwirtschaft\\_agrosprit\\_biokraftstoffpolitik\\_offener\\_brief.pdf](http://www.bund.net/fileadmin/bundnet/pdfs/landwirtschaft/151008_bund_landwirtschaft_agrosprit_biokraftstoffpolitik_offener_brief.pdf). Letzter Zugriff am: 21.3.2016.
- BUND, Misereor, Oxfam (2013): Verordnete Verantwortungslosigkeit - Die Förderung von Biosprit in der EU. Abrufbar unter: [http://www.bund.net/fileadmin/bundnet/publikationen/landwirtschaft/130506\\_bund\\_landwirtschaft\\_biosprit\\_hintergrund.pdf](http://www.bund.net/fileadmin/bundnet/publikationen/landwirtschaft/130506_bund_landwirtschaft_biosprit_hintergrund.pdf). Letzter Zugriff am: 21.3.2016.
- Bundesnetzagentur (2015): Leitfaden zur Eigenversorgung. Konsultationsfassung. Abrufbar unter: [http://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen\\_Institutionen/ErneuerbareEnergien/Eigenversorgung/Entwurf\\_Leitfaden\\_151016.pdf;jsessionid=E00A292EE62C8572BFC4AD2333D5023A?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](http://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/ErneuerbareEnergien/Eigenversorgung/Entwurf_Leitfaden_151016.pdf;jsessionid=E00A292EE62C8572BFC4AD2333D5023A?__blob=publicationFile&v=3). Letzter Zugriff am: 14.4.2016
- Cames, M., Helmers, E. (2013): Critical evaluation of the European diesel car boom - global comparison, environmental effects and various national strategies. Abrufbar unter: [http://download.springer.com/static/pdf/165/art%253A10.1186%252F2190-4715-25-15.pdf?originUrl=http%3A%2F%2Fenueurope.springeropen.com%2Farticle%2F10.1186%2F2190-4715-25-15&token2=exp=1456502753~acl=%2Fstatic%2Fpdf%2F165%2Fart%25253A10.1186%25252F2190-4715-25-15.pdf\\*~hmac=ba3d24e04696275d3d0984f2e397d5c5ce993e92d4cd0836a3db8fc41369cbad](http://download.springer.com/static/pdf/165/art%253A10.1186%252F2190-4715-25-15.pdf?originUrl=http%3A%2F%2Fenueurope.springeropen.com%2Farticle%2F10.1186%2F2190-4715-25-15&token2=exp=1456502753~acl=%2Fstatic%2Fpdf%2F165%2Fart%25253A10.1186%25252F2190-4715-25-15.pdf*~hmac=ba3d24e04696275d3d0984f2e397d5c5ce993e92d4cd0836a3db8fc41369cbad). Letzter Zugriff am: 26.2.2016.
- Center for Automotive Management (2015): Newsletter Dezember 2015. Abrufbar unter: [http://autoinstitut.de/index\\_htm\\_files/CAM-Newsletter\\_2015-12.pdf](http://autoinstitut.de/index_htm_files/CAM-Newsletter_2015-12.pdf). Letzter Zugriff am: 3.2.2016.

- Cesaroni, G., Forastiere, F., Stafoggia, M., Andersen, Z. J., Badaloni, C., Beelen, R., Caracciolo, B., de Faire, U., Erbel, R., Eriksen, K. T., Fratiglioni, L., Galassi, C., Hampel, R., Heier, M., Hennig, F., Hilding, A., Hoffmann, B., Houthuijs, D., Jockel, K.-H., Korek, M., Lanki, T., Leander, K., Magnusson, P. K. E., Migliore, E., Ostenson, C.-G., Overvad, K., Pedersen, N. L., J, J. P., Penell, J., Pershagen, G., Pyko, A., Raaschou-Nielsen, O., Ranzi, A., Ricceri, F., Sacerdote, C., Salomaa, V., Swart, W., Turunen, A. W., Vineis, P., Weinmayr, G., Wolf, K., de Hoogh, K., Hoek, G., Brunekreef, B., Peters, A. (2014): Long term exposure to ambient air pollution and incidence of acute coronary events: prospective cohort study and meta-analysis in 11 European cohorts from the ESCAPE Project. In: *BMJ*. Jg. 348, Nr. jan21 3. S. f7412-f7412.
- Chernyavs'ka, L., Gullì, F. (2010): Measuring the environmental benefits of hydrogen transportation fuel cycles under uncertainty about external costs. In: *Energy Policy*. Jg. 38, Nr. 10. S. 5335-5345.
- Copenhagen Economics (2009): *Company Car Taxation - Subsidies, Welfare and Environment*.
- Der Spiegel (1994): Lahm und laut. In: *DER SPIEGEL* 12/1994. S. 122f. Abrufbar unter: <http://www.spiegel.de/spiegel/print/d-13688897.html>. Letzter Zugriff am: 29.3.2016.
- Deutsche Emissionshandelsstelle (2015): *Treibhausgasemissionen 2014 - Emissionshandelspflichtige stationäre Anlagen und Luftverkehr in Deutschland*. Abrufbar unter: [http://www.dehst.de/SharedDocs/Downloads/DE/Publikationen/VET-Bericht\\_2014.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.dehst.de/SharedDocs/Downloads/DE/Publikationen/VET-Bericht_2014.pdf?__blob=publicationFile). Letzter Zugriff am: 13.1.2016.
- Deutsche Energieagentur (2011): *Ungeliebt, aber unentbehrlich. Bedarf und Produktion von Mineralöl im künftigen Energiemix*. Abrufbar unter: [http://www.dena.de/fileadmin/user\\_upload/Presse/studien\\_umfragen/Raffineriestudie/Bedarf\\_und\\_Produktion\\_von\\_Mineraloel\\_im\\_kuenftigen\\_Energiemix.pdf](http://www.dena.de/fileadmin/user_upload/Presse/studien_umfragen/Raffineriestudie/Bedarf_und_Produktion_von_Mineraloel_im_kuenftigen_Energiemix.pdf). Letzter Zugriff am: 1.2.2016.
- Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) (2002): *Fahrleistungen und Kraftstoffverbrauch im Straßenverkehr*. Abrufbar unter: [http://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw\\_01.c.92667.de/02-51-1.pdf](http://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.92667.de/02-51-1.pdf). Letzter Zugriff am: 14.3.2016.
- Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) (2006): *Rückgang von Fahrleistung und Kraftstoffverbrauch im Jahr 2005, anhaltender Trend zum Diesel-Pkw*. Abrufbar unter: [http://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw\\_01.c.44587.de/06-32-1.pdf](http://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.44587.de/06-32-1.pdf). Letzter Zugriff am: 14.3.2016.
- Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) (2014): *How Does Fuel Taxation Impact New Car Purchases? An Evaluation Using French Consumer-Level Data*. Discussion Paper. Abrufbar unter: [http://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw\\_01.c.490672.de/dp1428.pdf](http://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.490672.de/dp1428.pdf). Letzter Zugriff am: 1.2.2016.
- Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) (2015): *Verkehr in Zahlen*. 44: 2015/2016. Hamburg.
- Deutsche Umwelthilfe, Verkehrsclub Deutschland (2015): *Partikelaustritt von Fahrzeugen mit direkt einspritzenden Ottomotoren*. Abrufbar unter: [http://www.duh.de/uploads/media/Hintergrundpapier\\_GDI-Pressesgesprach.pdf](http://www.duh.de/uploads/media/Hintergrundpapier_GDI-Pressesgesprach.pdf). Letzter Zugriff am: 3.3.2016.
- DLR, ifeu, LBST, DBFZ (2013): *CNG und LPG - Potenziale dieser Energieträger auf dem Weg zu einer nachhaltigeren Energieversorgung des Straßenverkehrs*. Abrufbar unter: [http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/UI-MKS/mks-kurzstudie-cng-lpg.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/UI-MKS/mks-kurzstudie-cng-lpg.pdf?__blob=publicationFile). Letzter Zugriff am: 29.2.2016.
- ETC/ACM (2012): *Use and effectiveness of economic instruments in the decarbonisation of passenger cars*. ETC/ACM Technical Paper 2012/11. Abrufbar unter: [http://acm.eionet.europa.eu/docs/ETCACM\\_TP\\_2012\\_11\\_eff\\_econ\\_decarb\\_passcars.pdf](http://acm.eionet.europa.eu/docs/ETCACM_TP_2012_11_eff_econ_decarb_passcars.pdf). Letzter Zugriff am: 23.2.2016.



- Eze, I. C., Schaffner, E., Fischer, E., Schikowski, T., Adam, M., Imboden, M., Tsai, M., Carballo, D., von Eckardstein, A., Künzli, N., Schindler, C., Probst-Hensch, N. (2014): Long-term air pollution exposure and diabetes in a population-based Swiss cohort. In: *Environment International*. Jg. 70, S. 95-105.
- FiFo, FÖS, Klinski, S. (2010): Steuerliche Behandlung von Firmenwagen - Analyse von Handlungsoptionen zur Novellierung. Abrufbar unter: [http://www.foes.de/pdf/2011\\_Firmenwagenbesteuerung\\_lang.pdf](http://www.foes.de/pdf/2011_Firmenwagenbesteuerung_lang.pdf). Letzter Zugriff am: 23.3.2016.
- FÖS (2012): Steuerliche Behandlung von Dienst- und Firmenwagen. Ökologische und soziale Fehlanreize beseitigen. Abrufbar unter: <http://www.foes.de/pdf/2012-10-Themenpapier-Dienstwagenbesteuerung.pdf>. Letzter Zugriff am: 29.3.2016.
- FÖS (2015): Steuervergünstigung für Dieseldieselkraftstoff. Kurzanalyse für Greenpeace. Abrufbar unter: [https://www.greenpeace.de/sites/www.greenpeace.de/files/publications/steuerverguenstigung\\_von\\_dieseldieselkraftstoff\\_foes-studie.pdf](https://www.greenpeace.de/sites/www.greenpeace.de/files/publications/steuerverguenstigung_von_dieseldieselkraftstoff_foes-studie.pdf). Letzter Zugriff am: 23.2.2016.
- Franze, T., Weller, M. G., Niessner, R., Pöschl, U. (2005): Protein Nitration by Polluted Air. In: *Environmental Science & Technology*. Jg. 39, Nr. 6. S. 1673-1678.
- Guarnieri, M., Balmes, J. R. (2014): Outdoor air pollution and asthma. In: *The Lancet*. Jg. 383, Nr. 9928. S. 1581-1592.
- Hamra, G. B., Laden, F., Cohen, A. J., Raaschou-Nielsen, O., Brauer, M., Loomis, D. (2015): Lung Cancer and Exposure to Nitrogen Dioxide and Traffic: A Systematic Review and Meta-Analysis. In: *Environmental Health Perspectives*. Jg. 123, Nr. 11. Abrufbar unter: <http://ehp.niehs.nih.gov/1408882>. Letzter Zugriff am: 3.3.2016.
- Harding, M. (2014): Personal Tax Treatment of Company Cars and Commuting Expenses: Estimating the Fiscal and Environmental Costs. Abrufbar unter: <http://dx.doi.org/10.1787/5jz14cg1s7vl-en>. Letzter Zugriff am: 23.3.2016.
- Haupt, H. (2013): Abgesang auf den Dieselmotor: Es hat sich ausgenagelt. Artikel auf Spiegel online. Abrufbar unter: <http://www.spiegel.de/auto/fahrkultur/dieselmotor-die-vorteile-des-selbstzuenders-schwinden-a-883170.html>. Letzter Zugriff am: 1.2.2016.
- Haupt, H. (2015): Wie dreckig ist der Diesel? Artikel auf Zeit online. Abrufbar unter: <http://www.zeit.de/wirtschaft/2015-07/diesel-kraftstoff-umwelt>. Letzter Zugriff am: 2.3.2016.
- Helmers, E. (2010): Bewertung der Umwelteffizienz moderner Autoantriebe - auf dem Weg vom Diesel-Pkw-Boom zu Elektroautos. In: *Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung*, Jg. 22, Nr. 5. S. 564-578.
- Hivert, L. (2013): Short-term break in the French love for diesel? In: *Energy Policy*, Jg. 54. S. 11-22.
- Holzer, H. (2015): Fünf Gründe für den Diesel. Artikel auf Zeit online. Abrufbar unter: <http://www.zeit.de/mobilitaet/2015-10/dieselmotor-vorteile-benziner>. Letzter Zugriff am: 9.2.2016.
- ICCT (2014a): From Laboratory to Road. A 2014 update of official and “real-world” fuel consumption and CO<sub>2</sub> values for passenger cars in Europe. Abrufbar unter: [http://www.theicct.org/sites/default/files/ICCT\\_LaboratoryToRoad\\_2014\\_Report\\_German.pdf](http://www.theicct.org/sites/default/files/ICCT_LaboratoryToRoad_2014_Report_German.pdf). Letzter Zugriff am: 23.3.2016.
- ICCT (2014b): Real-world exhaust emissions from modern diesel cars. Abrufbar unter: [http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT\\_PEMS-study\\_diesel-cars\\_20141010.pdf](http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_PEMS-study_diesel-cars_20141010.pdf). Letzter Zugriff am: 3.3.2016.
- ICCT (2016a): Passenger cars: CO<sub>2</sub> emissions by engine technology (EU). Daten wurden für die Studie zur Verfügung gestellt.

- ICCT (2016b): Passenger cars: CO<sub>2</sub> emissions by engine technology (Germany only). Daten wurden für die Studie zur Verfügung gestellt.
- ICCT (2016c): Passenger cars: New vehicles - Engine power by type of vehicle and engine technology (Germany only). Daten wurden für die Studie zur Verfügung gestellt.
- ICCT (2016d): New passenger cars - Vehicle mass in running order by type of vehicle and engine technology (Germany only). Daten wurden für die Studie zur Verfügung gestellt.
- ifeu (2004): CO<sub>2</sub>-neutral Wege zukünftiger Mobilität durch Biokraftstoffe. Abrufbar unter: [http://www.ifeu.de/landwirtschaft/pdf/CO2-neutrale\\_Wege\\_Biokraftstoffe\\_IFEU.pdf](http://www.ifeu.de/landwirtschaft/pdf/CO2-neutrale_Wege_Biokraftstoffe_IFEU.pdf). Letzter Zugriff am: 7.3.2016.
- ifeu (2013): Konzept zur zukünftigen Beurteilung der Effizienz von Kraftfahrzeugen. Abrufbar unter: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte\\_95\\_2013\\_konzept\\_zur\\_zukuenftigen\\_beurteilung\\_der\\_effizienz\\_von\\_kraftfahrzeugen.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_95_2013_konzept_zur_zukuenftigen_beurteilung_der_effizienz_von_kraftfahrzeugen.pdf). Letzter Zugriff am: 21.3.2016.
- IKA (2014): CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion bei Pkw und leichten Nutzfahrzeugen nach 2020. Studie des Instituts für Kraftfahrzeuge der RWTH Aachen University im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Abrufbar unter: <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/co2-emissionsreduktion-bei-pkw-und-leichten-nutzfahrzeugen-nach-2020-abschlussbericht,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>. Letzter Zugriff am: 4.2.2016.
- IW Köln (2013): CO<sub>2</sub>-Regulierung für Pkw - Fragen und Antworten zu den europäischen Grenzwerten für Fahrzeughersteller. Abrufbar unter: [http://www.iwkoeln.de/\\_storage/asset/107033/storage/master/file/2626704/download/Brosch%C3%BCre%20CO2%20Grenzwerte%20Druck.pdf](http://www.iwkoeln.de/_storage/asset/107033/storage/master/file/2626704/download/Brosch%C3%BCre%20CO2%20Grenzwerte%20Druck.pdf). Letzter Zugriff am: 3.2.2016.
- Johnson, T. (2014): Vehicular Emissions in Review. In: SAE International Journal of Engines. Jg. 7, Nr. 3. S. 1207-1227.
- Kadijk, G., Buskermolen, E., Spreen, J. (2015a): Emission performance of a diesel plug-in hybrid vehicle. In: TNO report. Nr. R10858 v1. Abrufbar unter: <http://publications.tno.nl/publication/34617061/TXv24y/TNO-2015-R10858.pdf>. Letzter Zugriff am: 3.3.2016.
- Kadijk, G., van Mensch, P., Spreen, J. (2015b): Detailed investigations and real-world emission performance of Euro 6 diesel passenger cars. In: TNO report. Nr. R10702. Abrufbar unter: <http://publications.tno.nl/publication/34616868/a1Ug1a/TNO-2015-R10702.pdf>. Letzter Zugriff am: 3.3.2016.
- Kadijk, G., van Mensch, P., Spreen, J., Ligterink, N., Vermeulen, R., Vonk, W. (2016): Emissions of nitrogen oxides and particulates of diesel vehicles. In: TNO report. Nr. R10838. Abrufbar unter: <http://publications.tno.nl/publication/34617056/4QHNN0/TNO-2015-R10838.pdf>. Letzter Zugriff am: 3.3.2016.
- KBA (2013): Privat und gewerblich zugelassene Personenkraftwagen (Pkw) - der kleine Unterschied. Abrufbar unter: [http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/Halter/2012/2012\\_n\\_firmenwagen.html?nn=1036776](http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/Halter/2012/2012_n_firmenwagen.html?nn=1036776). Letzter Zugriff am: 21.3.2016.
- KBA (2015a): Neuzulassungen von Pkw im Jahr 2014 nach privaten und gewerblichen Haltern. Abrufbar unter: [http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/Halter/2014\\_n\\_halter\\_dusl.html?nn=652344](http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/Halter/2014_n_halter_dusl.html?nn=652344). Letzter Zugriff am: 21.3.2016.

- KBA (2015b): Fahrzeugzulassungen (FZ) Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen Jahr 2014. Abrufbar unter:  
[http://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2014/fz14\\_2014\\_pdf.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](http://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2014/fz14_2014_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=2). Letzter Zugriff am: 3.3.2016.
- KBA (2015c): Fahrzeugzulassungen (FZ) Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen 1. Januar 2015. Abrufbar unter:  
[http://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2015/fz13\\_2015\\_pdf.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](http://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2015/fz13_2015_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=2). Letzter Zugriff am: 7.3.2016.
- KBA (2015d): Pressemitteilung Nr. 29/2015 - Nachprüfungen des Kraftfahrt-Bundesamtes (KBA) - Ermittlungen des Stickoxidausstoßes bei mehr als 50 Fahrzeugen. Abrufbar unter:  
[http://www.kba.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2011\\_2015/2015/Allgemein/pm29\\_15\\_nachpruefungen\\_kba.html;jsessionid=C93F0B25E13B73A78F626C73C565691F.live2051](http://www.kba.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2011_2015/2015/Allgemein/pm29_15_nachpruefungen_kba.html;jsessionid=C93F0B25E13B73A78F626C73C565691F.live2051). Letzter Zugriff am: 29.3.2016.
- KIT (2016): Deutsches Mobilitätspanel (MOP) - Wissenschaftliche Begleitung und Auswertungen. Bericht 2014/2015: Alltagsmobilität und Fahrleistung. Abrufbar unter:  
[https://www.ifv.kit.edu/downloads/Bericht\\_MOP\\_14\\_15.pdf](https://www.ifv.kit.edu/downloads/Bericht_MOP_14_15.pdf). Letzter Zugriff am: 8.3.2016
- Künzi, L., Krapf, M., Daher, N., Dommen, J., Jeannet, N., Schneider, S., Platt, S., Slowik, J. G., Baumlin, N., Salathe, M., Prévôt, A. S. H., Kalberer, M., Strähl, C., Dümbgen, L., Sioutas, C., Baltensperger, U., Geiser, M. (2015): Toxicity of aged gasoline exhaust particles to normal and diseased airway epithelia. In: *Scientific Reports*. Jg. 5, S. 11801.
- Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) (o.J.): Stickstoffoxide. Abrufbar unter: <http://www4.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/18622/>. Letzter Zugriff am: 29.3.2016.
- Laumbach, R. J., Kipen, H. M. (2012): Respiratory health effects of air pollution: Update on biomass smoke and traffic pollution. In: *Journal of Allergy and Clinical Immunology*. Jg. 129, Nr. 1. S. 3-11.
- Lelieveld, J., Evans, J. S., Fnais, M., Giannadaki, D., Pozzer, A. (2015): The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. In: *Nature*. Jg. 525, Nr. 7569. S. 367-371.
- Ligterink, N., Kadijk, G., Hausberger, S., van Mensch, P., Rexeis, M. (2013): Investigations and real world emission performance of Euro 6 light-duty vehicles. In: TNO report. Nr. R11891. Abrufbar unter:  
[https://www.tno.nl/media/1969/investigations\\_emission\\_factors\\_euro\\_6\\_ld\\_vehicles\\_tno\\_2013.pdf](https://www.tno.nl/media/1969/investigations_emission_factors_euro_6_ld_vehicles_tno_2013.pdf). Letzter Zugriff am: 3.3.2016.
- Linn, J. (2015): Explaining the Adoption of Diesel Fuel Passenger Cars in Europe. Resources for the Future, Discussion Paper. Abrufbar unter:  
<http://www.rff.org/files/sharepoint/WorkImages/Download/RFF-DP-14-08-REV.pdf>. Letzter Zugriff am: 23.2.2016.
- Maibach, M., Schreyer, C., Sutter, D., van Essen, H. P., Boon, B. H., Smokers, R., Schroten, A., Doll, C., Pawlowska, B., Bak, M. (2008): Handbook on estimation of external costs in the transport sector. Delft.
- Mamakos, A., Martini, G., Dilara, P., Drossinos, Y., European Commission, Joint Research Centre, Institute for Energy and Transport (2011): Feasibility of introducing particulate filters on gasoline direct injection vehicles: a cost benefit analysis. Luxembourg.
- Mock, P. (2015): European vehicle market statistics - Pocketbook 2015/16. Berlin.
- MWV (2015): Jahresbericht 2015. Mineralöl-Zahlen 2014. Abrufbar unter:  
[http://www.mwv.de/upload/Publikationen/dateien/MWV-JB\\_Web\\_2014\\_HBr2W53p7xHJWyQ.pdf](http://www.mwv.de/upload/Publikationen/dateien/MWV-JB_Web_2014_HBr2W53p7xHJWyQ.pdf). Letzter Zugriff am: 1.2.2016.

- OECD (2013): Taxing Energy Use. Abrufbar unter: [http://www.oecd-ilibrary.org/taxation/taxing-energy-use\\_9789264183933-en](http://www.oecd-ilibrary.org/taxation/taxing-energy-use_9789264183933-en). Letzter Zugriff am: 15.12.2015.
- Öko-Institut (2014): Konventionelle und alternative Fahrzeugtechnologien bei Pkw und schweren Nutzfahrzeugen – Potenziale zur Minderung des Energieverbrauchs bis 2050. Abrufbar unter: <http://www.oeko.de/oekodoc/2105/2014-662-de.pdf>. Letzter Zugriff am: 14.3.2016.
- Rettet den Regenwald e.V. et al. (2016): Offener Brief “Palmöl und die Umsetzung der EU Biokraftstoff-Reform in Deutschland.” Abrufbar unter: [http://www.bund.net/fileadmin/bundnet/pdfs/landwirtschaft/160309\\_bund\\_landwirtschaft\\_agrosprit\\_biokraftstoffe\\_palmoel\\_offener\\_brief.pdf](http://www.bund.net/fileadmin/bundnet/pdfs/landwirtschaft/160309_bund_landwirtschaft_agrosprit_biokraftstoffe_palmoel_offener_brief.pdf). Letzter Zugriff am: 21.3.2016.
- Ricardo AEA (2014): Update on the Handbook on External Costs of Transport. Report for the European Commission. Abrufbar unter: <http://ec.europa.eu/transport/themes/sustainable/studies/doc/2014-handbook-external-costs-transport.pdf>. Letzter Zugriff am: 27.7.2015.
- Ricardo-AEA/TEPR (2015): Evaluation of Regulations 443/2009 and 510/2011 on CO<sub>2</sub> emissions from light-duty vehicles. Final Report. Abrufbar unter: [http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/docs/evaluation\\_ldv\\_co2\\_regs\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/docs/evaluation_ldv_co2_regs_en.pdf). Letzter Zugriff am: 23.2.2016.
- Roedenbeck, M., Strobel, J. (2014): Entrepreneurial Market Shaping in the Face of Path Dependency: The Success Story of Diesel Cars in Germany. In: Science, Technology & Innovation Studies. Jg. 10, Nr. 2. S. 21-44.
- Sachverständigenrat für Umweltfragen (2005): Potenziale und Instrumente zur CO<sub>2</sub>-Verminderung von PKW. Auszüge aus dem Sondergutachten Umwelt und Straßenverkehr. Abrufbar unter: [http://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/06\\_Hintergrundinformationen/2005\\_08\\_SG\\_Strassenverkehr\\_Auszuege.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/06_Hintergrundinformationen/2005_08_SG_Strassenverkehr_Auszuege.pdf?__blob=publicationFile). Letzter Zugriff am: 12.1.2016.
- Sachverständigenrat für Umweltfragen (2015): Stickstoff: Lösungsstrategien für ein drängendes Umweltproblem. Abrufbar unter: [http://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/02\\_Sondergutachten/2012\\_2016/2015\\_01\\_SG\\_Stickstoff\\_KF.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/02_Sondergutachten/2012_2016/2015_01_SG_Stickstoff_KF.pdf?__blob=publicationFile). Letzter Zugriff am: 23.3.2016.
- Samoli, E., Aga, E., Touloumi, G., Nisiotis, K., Forsberg, B., Lefranc, A., Pekkanen, J., Wojtyniak, B., Schindler, C., Niciu, E., Brunstein, R., Dodic Fikfak, M., Schwartz, J., Katsouyanni, K. (2006): Short-term effects of nitrogen dioxide on mortality: an analysis within the APHEA project. In: European Respiratory Journal. Jg. 27, Nr. 6. S. 1129-1138.
- Schipper, L. (2011): Automobile use, fuel economy and CO<sub>2</sub> emissions in industrialized countries: Encouraging trends through 2008? In: Transport Policy. Jg. 18, Nr. 2. S. 358-372.
- Schipper, L., Fulton, L. (2013): Dazzled by diesel? The impact on carbon dioxide emissions of the shift to diesels in Europe through 2009. In: Energy Policy. Jg. 54. S. 3-10.
- Schmale, J., Kuik, F. (2013): Gefahr für Gesundheit und Klima: Kurzlebige Klimawirksame Schadstoffe. Abrufbar unter: <http://dx.doi.org/10.2312/iass.2013.006>. Letzter Zugriff am: 22.2.2016.
- Statistisches Bundesamt (2015): Gestiegene Motorleistung verhindert stärkeren Rückgang der CO<sub>2</sub>-Emissionen. Pressemitteilung vom 11. Juni 2015. Abrufbar unter: [https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/2015/06/PD15\\_213\\_85pdf.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/2015/06/PD15_213_85pdf.pdf?__blob=publicationFile). Letzter Zugriff am: 3.3.2016.
- Sushandoyo, D., Magnusson, T., Berggren, C. (2012): ‘Sailing Ship Effects’ in the Global Automotive Industry? Competition Between ‘New’ and ‘Old’ Technologies in the Race for Sustainable Solutions. In: Calabrese, G. (Hrsg.): The greening of the automotive industry. Basingstone, Palgrave Macmillan. S. 103-123.

- TAB (2012): Zukunft der Automobilindustrie. Arbeitsbericht Nr. 152 des Büros für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag. Abrufbar unter: <https://www.tab-beim-bundestag.de/de/pdf/publikationen/berichte/TAB-Arbeitsbericht-ab152.pdf>. Letzter Zugriff am: 4.2.2016.
- Torchio, M. F., Santarelli, M. G. (2010): Energy, environmental and economic comparison of different powertrain/fuel options using well-to-wheels assessment, energy and external costs - European market analysis. In: Energy. Jg. 35, Nr. 10. S. 4156-4171.
- Transport & Environment (2013): Particle emissions from petrol cars. Abrufbar unter: [http://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/GDI%20Briefing\\_final\\_T&E.pdf](http://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/GDI%20Briefing_final_T&E.pdf). Letzter Zugriff am: 3.3.2016.
- Transport & Environment (2016): Brow-beaten Parliament agrees to double pollutant emissions from diesel cars. Abrufbar unter: <http://www.transportenvironment.org/press/brow-beaten-parliament-agrees-double-pollutant-emissions-diesel-cars>. Letzter Zugriff am: 4.3.2016.
- TU Dresden (2015a): Sonderauswertung zum Forschungsprojekt „Mobilität in Städten - SrV 2013“. SrV-Stadtgruppe: Unter-/Grund-/Kleinzentren/ländliche Gemeinden, Topografie: flach. Abrufbar unter: [https://tu-dresden.de/die\\_tu\\_dresden/fakultaeten/vkw/ivs/srv/2013/SrV2013\\_Stadtgruppe\\_UnterGrundKleinzentrenLaendlGemeinden\\_flach.pdf](https://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/vkw/ivs/srv/2013/SrV2013_Stadtgruppe_UnterGrundKleinzentrenLaendlGemeinden_flach.pdf). Letzter Zugriff am: 4.2.2016.
- TU Dresden (2015b): Sonderauswertung zum Forschungsprojekt „Mobilität in Städten - SrV 2013“. SrV-Stadtgruppe: Oberzentren 500.000 und mehr EW (ohne Berlin), Topografie: flach. Abrufbar unter: [https://tu-dresden.de/die\\_tu\\_dresden/fakultaeten/vkw/ivs/srv/2013/SrV2013\\_Stadtgruppe\\_Oberzentren\\_500TEWplus\\_flach.pdf](https://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/vkw/ivs/srv/2013/SrV2013_Stadtgruppe_Oberzentren_500TEWplus_flach.pdf). Letzter Zugriff am: 4.2.2016.
- UBA (2010): CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung im Verkehr in Deutschland. Mögliche Maßnahmen und ihre Minderungspotenziale. Ein Sachstandsbericht des Umweltbundesamtes. Abrufbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/3773.pdf>. Letzter Zugriff am: 12.1.2016.
- UBA (2012a): Ökonomische Bewertung von Umweltschäden - Methodenkonvention 2.0 zur Schätzung von Umweltkosten. Abrufbar unter: <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/oekonomische-bewertung-von-umweltschaeden-0>. Letzter Zugriff am: 8.12.2014.
- UBA (2012b): Schätzung der Umweltkosten in den Bereichen Energie und Verkehr. Dessau.
- UBA (2013a): CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren. Abrufbar unter: [www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/419/dokumente/co2\\_faktoren\\_brennstoffe\\_nir\\_2013.xls](http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/419/dokumente/co2_faktoren_brennstoffe_nir_2013.xls). Letzter Zugriff am: 7.3.2016.
- UBA (2013b): Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2012. Abrufbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/emissionsbilanz-erneuerbarer-energetraeger-2012>. Letzter Zugriff am: 2.3.2016.
- UBA (2014): Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2013. Abrufbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/emissionsbilanz-erneuerbarer-energetraeger-2013>. Letzter Zugriff am: 7.3.2016.
- UBA (2015a): Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid- Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2014. Abrufbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/entwicklung-der-spezifischen-kohlendioxid-1>. Letzter Zugriff am: 22.1.2016.
- UBA (2015b): Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen 1990-2013. Abrufbar unter:

[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/dokumente/emissionsentwicklung\\_1990\\_-\\_2013\\_fuer\\_klassische\\_luftschadstoffe.xlsx](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/dokumente/emissionsentwicklung_1990_-_2013_fuer_klassische_luftschadstoffe.xlsx). Letzter Zugriff am: 1.3.2016.

UBA (2016a): Übersicht zur Entwicklung der energiebedingten Emissionen und Brennstoffeinsätze in Deutschland 1990 - 2014. Abrufbar unter:  
<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/uebersicht-zur-entwicklung-energiebedingten>.  
Letzter Zugriff am: 3.3.2016.

UBA (2016b): Feinstaub. Abrufbar unter:  
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe/feinstaub>. Letzter Zugriff am:  
1.3.2016.

VDA (2015): VDA: Brüssels Kritik am Diesel zielt daneben. Pressemeldung des Verbands der Automobilindustrie vom 10. Juli 2015. Abrufbar unter:  
<https://www.vda.de/de/presse/Pressemeldungen/20150710-VDA-Br-ssels-Kritik-am-Diesel-zielt-daneben.html>. Letzter Zugriff am: 13.1.2016.

Weinmayr, G., Fuks, K., Nonnemacher, M., Jakobs, H., Möhlenkamp, S., Erbel, R., Jöckel, K.-H., Hoffmann, B., Moebus, S., on behalf of the Heinz Nixdorf Recall Investigator Group (2015): Long-term exposure to fine particulate matter and incidence of type 2 diabetes mellitus in a cohort study: effects of total and traffic-specific air pollution. In: *Environmental Health*. Jg. 14, Nr. 1. Abrufbar unter: <http://www.ehjournal.net/content/14/1/53>. Letzter Zugriff am: 23.2.2016.

Wuppertal Institut (2006): Klimawirksame Emissionen des PKW-Verkehrs und Bewertung von Minderungsstrategien. Abrufbar unter:  
<http://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/2448/file/WS34.pdf>. Letzter Zugriff am: 12.1.2016.

Wuppertal Institut (2016): Die klimapolitische Wirkung der Steuerbegünstigung für Dieselmotoren. Abrufbar unter:  
[https://www.greenpeace.de/sites/www.greenpeace.de/files/publications/kurzexpertise\\_argumentationspapier\\_diesel.pdf](https://www.greenpeace.de/sites/www.greenpeace.de/files/publications/kurzexpertise_argumentationspapier_diesel.pdf). Letzter Zugriff am: 7.3.2016.

Yang, L., Franco, V., Mock, P., Kolke, R., Zhang, S., Wu, Y., German, J. (2015): Experimental Assessment of NOx Emissions from 73 Euro 6 Diesel Passenger Cars. In: *Environmental Science & Technology*. Jg. 49, Nr. 24. S. 14409-14415.

Zachariadis, T. (2013): Gasoline, diesel and climate policy implications – Insights from the recent evolution of new car sales in Germany. In: *Energy Policy*, Jg. 54. S. 23-32.