

SHELL NUTZFAHRZEUG-STUDIE

DIESEL ODER ALTERNATIVE ANTRIEBE – WOMIT FAHREN LKW UND BUS MORGEN?

Fakten, Trends und Perspektiven bis 2040



Shell Deutschland

Dr. Jörg Adolf (Projektleitung)

Dr. Christoph Balzer

Dr. Frank Haase

www.shell.de



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt

Prof. Dr. Barbara Lenz

Dipl.-Ing. Andreas Lischke

Dipl.-Volksw. Gunnar Knitschky

www.dlr.de

KURZFASSUNG

Die **Shell Nutzfahrzeug-Studie 2016** ist die Nachfolgestudie der ersten Shell Lkw-Studie 2010 (Shell 2010). Sie wurde inhaltlich auf Nutzfahrzeuge erweitert und behandelt nun auch die Kraftomnibusse. Shell knüpft damit im Nutzfahrzeugbereich an die seit 1958 veröffentlichten Shell Pkw-Szenarien an, die inzwischen in der 26. Auflage erschienen sind (Shell 2014). Die Shell Nutzfahrzeug-Studie 2016 wurde erneut in Zusammenarbeit mit dem Institut für Verkehrsforschung im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) erstellt.

Ziel der Shell Nutzfahrzeug-Studie 2016 ist es, die Zukunft des Straßengüterverkehrs und des öffentlichen Straßenpersonenverkehrs mit Bussen bis in das Jahr 2040 zu erforschen. Hierzu werden zum einen aktuelle Trends in der Transportlogistik für Güter und Personen und der Fahrzeugstatistik untersucht sowie Potenziale relevanter Technologien abgeschätzt. Zum anderen wird mit Hilfe von Güterverkehrsmodellierung und Szenariotechnik sowie der Verknüpfung wichtiger verkehrs-, energie- und umweltpolitischer Parameter des Lkw- und Busverkehrs die Entwicklung in Deutschland umfassend betrachtet.

Die wichtigsten Ergebnisse der Shell Nutzfahrzeug-Studie lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- 1** Die Logistikwirtschaft ist ein relevanter, wachsender Wirtschaftszweig; Deutschland ist ein weltweit führender Logistikstandort. Die Güterverkehrsleistung ist in den vergangenen 25 Jahren um 60% gewachsen und wird bis 2040 nochmals um 50% zulegen. Die Straße ist und bleibt der Hauptverkehrsträger für den Gütertransport.
- 2** In Deutschland sind heute (2016) knapp 3 Mio. Lkw und knapp 80.000 Busse zugelassen. Die Bestandsentwicklung wird von leichten Nutzfahrzeugen bestimmt. Die Schadstoffklassen (Euro-Normen) variieren deutlich nach Fahrzeugsegmenten. Dieselfahrzeuge besitzen einen Flottenanteil von insgesamt 95%.
- 3** Der Dieselantrieb als Standard für Nutzfahrzeuge besitzt weitere Effizienzpotenziale. Für Fernverkehrs-Lkw könnten Gasantriebe auf Basis verflüssigten Erdgases (LNG) eine Alternative darstellen. Potenziale für Elektromobilität weisen leichte Nutzfahrzeuge und Fahrzeuge mit urbanen Fahrprofilen auf.
- 4** Bis 2040 wird der Nutzfahrzeugbestand in Deutschland auf 3,5 Mio. Fahrzeuge zulegen; die Lkw-Fahrleistungen steigen um 39%. Aufgrund von Effizienzfortschritten sinkt der Energiebedarf aller Nutzfahrzeuge von heute bis 2040 um bis zu 13%. Die gesamten CO₂-Emissionen gehen um bis zu 20% zurück. Die 1990er CO₂-Emissionswerte werden 2040 noch deutlich überschritten.

HERAUSGEBER

Shell Deutschland Oil GmbH
22284 Hamburg



Gestaltung & Produktion Mänz Kommunikation

EINLEITUNG

SEITE 4

1
VERKEHRSLOGISTIK
FÜR GÜTER UND
PERSONEN
SEITE 8

2
TYPEN, FLOTTEN,
NEUZULASSUNGEN
SEITE 20

3
ANTRIEBE,
KRAFTSTOFFE,
FAHRZEUGTECHNIK,
FAHRWEISE
SEITE 32

4
NUTZFAHRZEUG-
SZENARIEN
SEITE 58

5 ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN SEITE 76

LITERATURVERZEICHNIS SEITE 80

ABSTRACT

The **2016 Shell Commercial Vehicle Study** is a follow-up to the first Shell Freight Vehicle Study in 2010 (Shell 2010). The scope has been extended to all commercial vehicles and the study now covers buses and coaches in addition to freight. It thus provides a counterpart to Shell's Passenger Car Studies, which have been published since 1958 and are now in their 26th edition (Shell 2014). The 2016 Shell Commercial Vehicle Study has once again been prepared in cooperation with the Institute of Transport Research at the German Aerospace Center (DLR).

The objective of the 2016 Shell Commercial Vehicle Study is to explore the future of road freight and bus & coach travel up to the year 2040. Current trends in transport logistics for goods and passengers and in commercial vehicle statistics have been examined and assessments have been made of the potential of relevant technologies. In addition, freight transport modelling and scenario techniques have also been used, taking account of important traffic, energy, environmental and political factors, to create a comprehensive view of expected developments in Germany.

Key findings of the Shell Commercial Vehicle Study are as follows:

1 Logistics is an important and growing sector of the economy and Germany is one of the world's leading logistics locations. Freight

transport in Germany has risen by 60% over the last 25 years and is expected to increase by another 50% by 2040. Road transport still remains the major mode of freight transport.

2 In Germany, there are currently (2016) almost 3 million trucks and nearly 80,000 buses registered for use on the roads. Changes in the numbers are being driven by light commercial vehicles. European exhaust emission standards vary substantially between vehicle classes. Diesel vehicles account for 95% of the total fleet.

3 Further potential exists for improving the efficiency of diesels, which are the standard propulsion type for commercial vehicles. Gas engines fuelled by Liquefied Natural Gas (LNG) represent a possible alternative for long-distance trucks. Light commercial vehicles and buses used on urban routes could be partly switched to electric drivetrains.

4 By 2040, the number of commercial vehicles in Germany will rise to 3.5 million and freight road transport mileage will go up by 39%. Due to efficiency improvements, the energy consumption of commercial vehicles as a whole will drop by up to 13% by 2040. Total CO₂ emissions will decline by up to 20%. However, CO₂ emissions in 2040 will continue to be substantially higher than 1990 levels.

SHELL NUTZFAHRZEUG-STUDIE 2016

EINLEITUNG UND ÜBERBLICK

Die Shell Nutzfahrzeug-Studie 2016 ist die Nachfolgestudie der ersten Shell Lkw-Studie 2010 (Shell 2010). Sie wurde inhaltlich auf Nutzfahrzeuge erweitert und behandelt nun auch die Kraftomnibusse. Shell knüpft damit im Nutzfahrzeugbereich an die seit 1958 veröffentlichten Shell Pkw-Szenarien an, die inzwischen in der 26. Auflage erschienen sind (Shell 2014). Die Shell Nutzfahrzeug-Studie 2016 wurde erneut in Zusammenarbeit mit dem Institut für Verkehrsforschung im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt erstellt.

Ziel der Shell Nutzfahrzeug-Studie 2016 ist es, die Zukunft des Straßengüterverkehrs sowie des öffentlichen Straßenpersonenverkehrs mit Bussen zu erforschen; im Fokus der Studie stehen insbesondere die hier eingesetzten motorisierten Kraftfahrzeuge – die Lkw und Busse.

STRASSENGÜTERVERKEHR – QUO VADIS?

Nachdem sich der Straßengüterverkehr seit Anfang der 1990er Jahre sehr dynamisch entwickelt hatte, kam es im Gefolge der globalen Finanz- und Wirtschaftskrise 2008/09 zu einem Einbruch mit anschließender Stagnation. Da die erste Shell

Lkw-Studie 2010 unmittelbar nach der Finanz- und Wirtschaftskrise veröffentlicht wurde, ergaben sich damals große Unsicherheiten bei der Abschätzung künftiger Entwicklungen.

Schon seit einigen Jahren ist der Verkehrsforschung klar, dass die ursprünglich sehr hohen Wachstumsprognosen für den

Güterverkehr insgesamt wie auch für den Straßengüterverkehr allein (ITP/BVU 2007) nicht eintreffen würden. Zeichnet sich damit – ähnlich wie für den Pkw in einigen hoch motorisierten Industrieländern – so etwas wie ein Höhepunkt (Peak) für den Straßengüterverkehr ab?

Tatsächlich hat sich der Straßengüterverkehr inzwischen von den Auswirkungen der Finanz- und Wirtschaftskrise deutlich erholt: Die Straßengüterverkehrsleistung erreicht mittlerweile wieder ihr vorheriges Niveau. Und die Zahl der Lkw-Zulassungen kletterte mit nahezu drei Mio. Fahrzeugen in Deutschland im Jahr 2015 auf einen neuen Höchststand.

Weiterhin ist der Straßengüterverkehr zentraler Bestandteil der Transportlogistik. Und diese hat sich zu einem bedeutenden Wirtschaftszweig entwickelt, der mit über die Wettbewerbsfähigkeit eines Wirt-

DEUTSCHLAND IST **LOGISTIKWELTMEISTER**

73 % LKW-ANTEIL AM GÜTERVERKEHR

ÜBER 200 MRD. € UMSATZ IN DER LOGISTIK

3 MIO. LKW, 80.000 BUSSE, 275.000 SONSTIGE KFZ

schaftsstandorts entscheidet. Sowohl aus verkehrs- wie auch aus volkswirtschaftlicher Sicht besteht demnach Grund genug, sich mit der Zukunft des Straßengüterverkehrs zu befassen.

LKW UND ENERGIEWENDE

Gleichzeitig ist der Verkehrssektor im Kontext der nationalen Energie- und Klimapolitik ein wichtiges Handlungsfeld. Schließlich soll auch der Verkehr, insbesondere der Straßenverkehr Beiträge zu den nationalen Energiewendeziele leisten (BMW 2015). So soll der Endenergieverbrauch im Verkehrssektor bis 2020 um rund 10% und bis 2050 um rund 40% gegenüber 2005 zurückgehen. Darüber hinaus gibt es ein sektorübergreifendes Ziel, die Treibhausgasemissionen von 1990 bis 2040 um 70% und bis 2050 um mindestens 80% zu reduzieren. Tatsächlich sind sowohl der

Energieverbrauch des Straßenverkehrs als auch die verkehrsbedingten CO₂-Emissionen – nach einem zwischenzeitlichen Rückgang – zuletzt wieder gestiegen (MWW 2015; BAFA 2016; UBA 2015a).

Im Pkw-Bereich wird deshalb viel an Effizienzpotenzialen, alternativen Antrieben und Kraftstoffen geforscht und entwickelt. Allerdings ist auch hier bislang noch kein Königsweg gefunden worden (Shell 2014). Immerhin gibt es für nahezu alle relevanten Antriebs- und Kraftstoffalternativen – wie Biokraftstoffe, Erdgas- oder Elektromobilität – mehr oder weniger verbindliche quantitative Ziele.

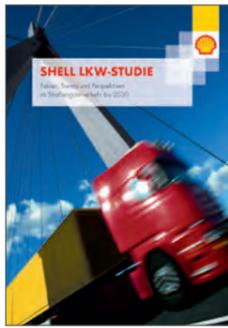
Im Nutzfahrzeugbereich existieren bislang – bis auf CNG-Fahrzeuge – hauptsächlich Pilot- und Demonstrationsprojekte sowie Vor- bzw. Kleinserien zu Fahrzeugen mit alternativen Antrieben und Kraftstoffen.

Gleichwohl lassen sich für Nutzfahrzeuge hier durchaus relevante Anwendungen, aber auch Nischen weiterentwickeln. Angesichts der Dynamik des Straßengüterverkehrs gewinnt die Frage nach effizienteren sowie alternativen Antrieben und Kraftstoffen aus Nachhaltigkeitsicht weiter an Relevanz (vgl. z. B. Süßmann/Lienkamp 2015; UBA 2015b).

SHELL UND SZENARIEN

Shell ist ein globales Energie-Unternehmen und setzt seit Jahrzehnten Szenariotechnik zur „wissenschaftlichen Zukunftsforschung“ (Grunwald 2012) ein. Dabei interessiert sich Shell als langfristig denkendes Unternehmen für die Zukunft von Energieträgern ebenso wie für energierelevante Anwendungstechnologien. So hat Shell in den vergangenen Jahren in Zusammenarbeit mit verschiedenen wissenschaftlichen





Haben Sie Interesse an einer Ausgabe der ersten Shell Lkw-Studie, der Shell BDH Hauswärme-Studie, der Shell Pkw-Szenarien oder der Shell Flüssiggas-Studie? Schreiben Sie uns eine E-Mail: shellpresse@shell.com

Instituten Szenariostudien zu den Energieträgern Biokraftstoffe, Erdgas und Flüssiggas veröffentlicht (Shell 2012, 2013, 2015); zu Anwendungstechnologien erschienen zuletzt die Shell BDH Hauswärme-Studie (Shell BDH 2013) sowie die Shell Pkw-Szenarien (Shell 2014).

Ziel von Szenariostudien ist es, die Zukunft zu erforschen, insbesondere die Folgen künftiger Entwicklungen bereits heute besser einschätzen zu können. Mit Hilfe **explorativer Szenarien** lassen sich nicht nur robustere Unternehmensentscheidungen treffen. Ergebnisse und Erkenntnisse der Szenarioforschung können auch zu wichtigen gesellschaftlich-politischen Debatten beitragen.

Szenarien sind schließlich **keine Prognosen**, sondern zeigen mögliche alternative Entwicklungspfade auf. Die von Shell erstellten Szenario-Studien sind insbesondere keine normativen oder Zielszenarien. Vielmehr basieren die in Shell Studien explorierten Zukünfte auf umfangreichen Potenzialabschätzungen künftiger Technologieentwicklungen.

NEUES UND LEITFRAGEN

Die aktuelle Shell Nutzfahrzeug-Studie knüpft an die Inhalte der Shell Lkw-Studie 2010 an, erweitert und aktualisiert diese jedoch. Sie trägt den Titel „Diesel oder alternative Antriebe – womit fahren Lkw und Bus morgen?“ und stellt hierzu „Fakten, Trends und Perspektiven bis 2040“ kompakt zusammen. Was ist neu in der Shell Nutzfahrzeug-Studie?

Neu ist zunächst einmal die Erweiterung des Untersuchungsgegenstandes auf **Kraftomnibusse**; denn auch Busse sind Nutzfahrzeuge, die dem Lkw in vielerlei Hinsicht – wie Größe, Antrieb, Motorisierung – ähnlich sind. Den Nutzfahrzeugen ähnlich sind außerdem die Sonstigen Kraftfahrzeuge, die hier allerdings nur fahrzeugstatistisch behandelt werden.

Die **leichten Nutzfahrzeuge** dienen nicht ausschließlich dem Gütertransport und werden von der Transportstatistik bisher nicht erfasst. Um die besondere Dynamik dieser Fahrzeuge besser abbilden zu können, wurden – anders als in der Vorgängerstudie – dieses Mal die Fahrzeugfahrleistungen der leichten Nutzfahrzeuge separat von den schweren Nutzfahrzeugen modelliert. Die Fahrleistungen der leichten Nutzfahrzeuge fallen dadurch höher aus.

Die Abschätzung der technischen Entwicklungspotenziale erstreckte sich dieses Mal auf drei Antriebs-Kraftstoff-Kombinationen: Diesel, Gas und Elektro. Die jeweiligen Entwicklungspotenziale werden kriterienorientiert bewertet und anhand von Stern- bzw. **Spinnennetzdiagrammen** visualisiert.

Darüber hinaus werden in der Shell Nutzfahrzeug-Studie folgende Leitfragen untersucht:

Ausgangspunkt für eine mittelfristige Abschätzung des Straßengüterverkehrs sowie der zukünftigen Entwicklung von Lastkraftwagen (Lkw) und Bussen ist die Entwicklung ihrer Verkehrs- und Fahrleistungen. Insofern stellt sich die Frage:

ERSTE LEITFRAGE

Wie wird sich der Straßengüterverkehr in Deutschland – gemessen in Verkehrs- und Fahrleistungen – bis 2040 entwickeln? Wird der Lkw seinen Wachstumspfad weiter fortsetzen? Und wie sieht die Zukunft des öffentlichen Straßenpersonenverkehrs mit Bussen aus?

Im Fokus der Shell Nutzfahrzeug-Studie stehen die im Straßengüterverkehr sowie im öffentlichen Straßenpersonenverkehr eingesetzten motorisierten Kraftfahrzeuge. Das sind zum einen die Lkw einschließlich leichter Nutzfahrzeuge und Sattelzugmaschinen, zum anderen die zur Personenbeförderung eingesetzten Kraftomnibusse.

ZWEITE LEITFRAGE

Welche Trends lassen sich aus den historischen und aktuellen Zulassungsdaten für Lkw und Busse erkennen? Wie entwickeln sich Fahrzeugneuzulassungen und Fahrzeugbestände – in absoluten Zahlen sowie nach bestimmten Merkmalen wie Schadstoffklassen, Alter oder Antriebsart?

Ein Schwerpunkt der Shell Nutzfahrzeug-Studie ist es, die fahrzeugbezogenen Entwicklungspotenziale der im Straßengüterverkehr sowie im öffentlichen Straßenpersonenverkehr eingesetzten Fahrzeuge zu analysieren und zu bewerten. Bislang ist der Dieselantrieb die Standardtechnik für nahezu alle Nutzfahrzeuge. Inzwischen gibt es jedoch alternative Antriebskonzepte und neue Technikentwicklungen. Die dritte Leitfrage lautete daher:

WOHER BEKOMMEN NUTZFAHRZEUGE IHRE ENERGIE UND WER VERBRAUCHT SIE?

Über **99%** des Energieverbrauchs von Lkw und Bussen ist **Dieselmotorkraftstoff**.

95% aller Nutzfahrzeuge fahren mit **Dieselantrieben**.

79% der Energie verbrauchen die **schweren Lkw** und **Sattelzüge**.

DRITTE LEITFRAGE

Mit welchen Antrieben, Kraftstoffen und Fahrzeugtechnologien werden die Nutzfahrzeuge in Zukunft fahren? Welche Effizienzpotenziale besitzen die verschiedenen Technologien (noch)? Im Besonderen stellt sich die Frage, inwieweit und wo Elektromobilität auch im Nutzfahrzeugsektor Einzug halten könnte und ob sich Erdgasantriebe auf Basis verflüssigten Erdgases (LNG) bei schweren Nutzfahrzeugen durchsetzen könnten.

Der Lkw- und Busverkehr macht bereits heute einen substanziellen Anteil am Energieverbrauch sowie an den Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors in Deutschland aus. Um einzuschätzen, welche Energie- und Klimaeffekte von Lkw und Bussen zukünftig erwartet werden können, wurden für die Entwicklung des Nutzfahrzeugbestands zwei unterschiedliche Szenarien, ein Trend- und ein Alternativszenario, entwickelt und der künftige Energiebedarf sowie die daraus resultierenden Treibhausgasemissionen abgeschätzt. Die vierte Leitfrage für die quantitative Szenarioanalyse lautete:

VIerte LEITFRAGE

Wohin können sich der Kraftstoff- bzw. Energieverbrauch und die Treibhausgasemissionen des Straßengüter- und Busverkehrs in Deutschland bis 2040 entwickeln? Und wie lassen sich die Ergebnisse dieser Nachhaltigkeitsindikatoren in den Kontext der nationalen Energie- und Klimapolitik einordnen?

AUTOREN UND DATENQUELLEN

Bei der Erstellung der Shell Nutzfahrzeug-Studie hat Shell wiederum eng mit dem Institut für Verkehrsforschung im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt in Berlin kooperiert. Das Institut bearbeitet ein breites Spektrum von verkehrswissenschaftlichen Fragestellungen; es hat im Besonderen in den vergangenen Jahren eine führende Rolle in der wissenschaftlichen Begleitforschung zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung eingenommen (z. B. DLR et al. 2014a, b, 2015).

Die Projektleitung und Koordination der Shell Nutzfahrzeug-Studie auf Seiten von Shell Deutschland lag bei Dr. Jörg Adorf, auf Seiten des DLR bei Diplom-Ingenieur Andreas Lischke. Die Arbeit entstand unter der wissenschaftlichen Leitung von Frau Professor Dr. Barbara Lenz. Fahrzeugstatistische Analysen und Trendprojektionen erfolgten durch Diplom-Volkswirt Gunnar Knitschky, die Güterverkehrsentwicklung prognostizierte Dr. Axel Wolfemann, Beiträge zum öffentlichen Straßenpersonenverkehr erarbeitete Falko Nordenholz M.A., Dr. Stephan Müller trug zur Bewertung der Fahrzeugtechnik bei und die Datenaufbereitung unterstützte Karolin Hein B.Sc. Weiterhin trugen folgende Autoren der Shell zur wissenschaftlichen Bearbeitung der Studie bei: Dr. Frank Haase für technisch-wissenschaftliche Fragen von Antrieben und Kraftstoffen sowie Dr. Christoph Balzer für die Erstellung energieträgerspezifischer Treibhausgasbilanzen.

Die verkehrswirtschaftliche Analyse stützt sich insbesondere auf die Verkehrsdaten in (DIW 2015b), die Prognose des Straßengüterverkehrs verwendet Parameter der Bundesverkehrsprognose bis 2030 (BVU et al. 2014), um die Güterverkehrsentwicklung mit Hilfe eines Verkehrsmodells des DLR bis 2040 zu projizieren. Basis für die fahrzeugstatistischen Analysen und Trendprojektionen waren statistische Erhebungen des Kraftfahrt-Bundesamtes, insbesondere zu Fahrzeug-Zulassungen, Fahrzeugalter und Umweltmerkmalen (KBA 2015b-f, 2016b). Ausgangspunkt und Grundlage für die Energie- und Kraftstoffbilanzen des Nutzfahrzeugverkehrs ist die DIW-Verbrauchsrechnung (DIW 2015a). Die Treibhausgasbilanzierung erfolgte mit Hilfe von Treibhausgasfaktoren, die anhand von (JEC 2014a) erstellt und weiteren Quellen aktualisiert wurden.

Außerdem wurde bei der Erstellung der Shell Nutzfahrzeug-Studie eine Reihe von Experten, Entscheidungsträgern und Stakeholdern befragt, denen Shell an dieser Stelle seinen Dank ausspricht. Eine Auswahl relevanter Daten und Quellen befindet sich am Ende der Studie.

1 VERKEHRSLOGISTIK FÜR GÜTER UND PERSONEN

Güterverkehr ist zugleich Voraussetzung und Ausdruck für Wirtschaftsaktivitäten. Güterverkehr entsteht, weil Wirtschaftsakteure Waren untereinander austauschen. Damit Waren im Güterverkehr überhaupt transportiert werden können, bedarf es weiterer vorgeschalteter, begleitender sowie nachgeschalteter Aktivitäten; diese Aktivitäten lassen sich im Wesentlichen unter den Begriff Logistik oder auch Transportlogistik zusammenfassen.

Im Folgenden werden zunächst die neuesten Trends in der Transportlogistik für den Güterverkehr analysiert. Anschließend werden Fakten und Trends für den Güterverkehr dargestellt. Da sich die vorliegende Nutzfahrzeug-Studie vor allem mit dem Lkw befasst, liegt der Schwerpunkt der Ausführungen auf Entwicklungen beim Leistungsträger Straße, also dem Straßengüterverkehr.

Dem Lkw in Motorisierung, Antrieb und Fahrzeugtechnik in vielerlei Hinsicht ähnlich ist der zur Beförderung von Personen im Straßenverkehr eingesetzte Kraftomnibus. Wichtige verkehrliche Daten und Perspektiven des öffentlichen Straßenpersonenverkehrs mit Bussen werden im Anschluss an den Straßengüterverkehr behandelt.

1.1 LOGISTIK UND GÜTERVERKEHR

Die logistische Leistungsfähigkeit, ausgedrückt durch effiziente Lieferketten, wird heute als wichtige Voraussetzung für die wirtschaftliche Entwicklung, für den Handel, aber auch für die Wettbewerbsfähigkeit eines Standortes ebenso wie von Unternehmen gesehen. Eine Bewertung der logistischen Leistungsfähigkeit von rund 160 Ländern unternimmt die Weltbank in ihrem Logistics Performance Index. Seit seinem erstmaligen Erscheinen im Jahr 2007 nimmt Deutschland dort eine Top-Platzierung ein (World Bank 2014).

Die Abgrenzung der Logistik als eigenständiges Wirtschaftssegment ist schwierig; denn Logistik wird in der Statistik nicht als eigener Wirtschaftszweig erfasst. Logistik findet sowohl in den jeweiligen Industriezweigen, im Handel sowie insbesondere im Wirtschaftszweig „H Verkehr“ und Lagerei statt. Der Wirtschaftszweig „H“ umfasst jedoch sowohl den Güterverkehr als auch die Personenbeförderung (Destatis 2008).

Die Bruttowertschöpfung und damit der sektorale Beitrag des Wirtschaftszweiges „H“

zum Bruttoinlandsprodukt beläuft sich auf rund 120 Mrd. Euro (Destatis 2015d). Weitere Anhaltspunkte für die volkswirtschaftliche Bedeutung des Logistikbereiches lassen sich mit Hilfe von Umsatzzahlen aus den Strukturhebungen des Statistischen Bundesamtes oder der Umsatzsteuerstatistik ableiten; der Umsatz entspricht näherungsweise dem Produktionswert. So wird der Umsatz der deutschen Logistikwirtschaft heute auf über 200 Mrd. Euro geschätzt; das ist fast genauso viel wie der Umsatz des Maschinenbaus und etwa die Hälfte des Umsatzes des Fahrzeugbaus (Kille/Schwemmer 2012; Destatis 2015c).

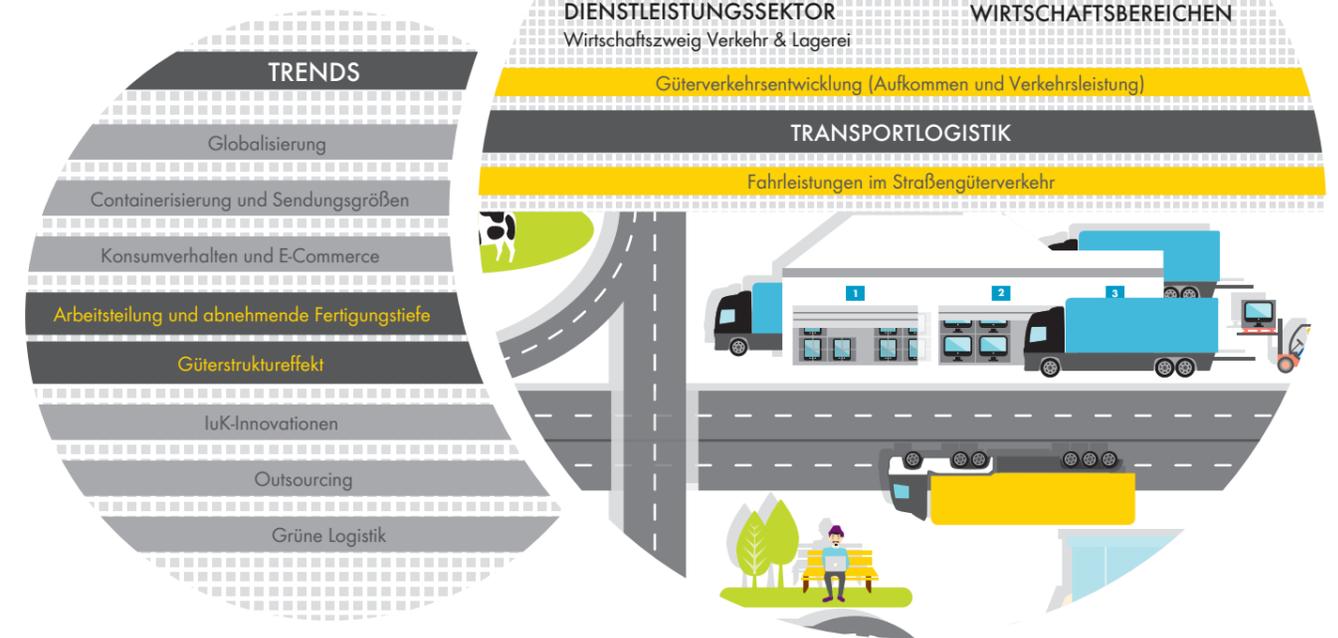
Nach Branchenumsatz, aber auch nach der Bruttowertschöpfung gehört der Logistiksektor folglich zu den volkswirtschaftlich bedeutendsten Wirtschaftssektoren. Darüber hinaus wird die Zahl der Personen, die entweder bei Logistikdienstleistern im Wirtschaftszweig Verkehr und Lagerei oder in den verschiedenen Logistikparten von Industrie und Handel beschäftigt sind, mit 2,7 Mio. angegeben – was deutlich mehr

ist, als in Maschinen- und Fahrzeugbau zusammen mit rund 1,9 Mio. Beschäftigten.

Logistik als Wirtschaftsaktivität kann definiert werden als die ganzheitliche Planung, Steuerung, Koordination, Durchführung und Kontrolle aller unternehmensinternen und unternehmensübergreifenden Informations- und Güterflüsse (BVL 2014). Zu den vier Grundfunktionen der Logistik gehören der Transport (zur Raumüberbrückung), der Umschlag (zur Mengenanpassung), die Lagerung (zur Zeitüberbrückung) und die Kommissionierung (zur Auftragszusammenstellung) der Waren (Gudehus 2007).

Während die „klassische Logistik“ zunächst als physische Verbindung zwischen den unternehmerischen Funktionen Beschaffung, Produktion und Absatz fungierte, entwickelte die Logistik im Laufe der Zeit eine zunehmend integrative Funktion und ist nunmehr neben den physischen Elementen unmittelbar mit der Weitergabe von Informationen durch entsprechenden Informationsservice entlang der gesamten Wertschöpfungskette

1 LOGISTIKMARKT UND GÜTERVERKEHR



verbunden. Auch im englischen Sprachgebrauch wird der Begriff „Logistics“ verwendet. Doch etabliert sich in Anlehnung an das integrative Verständnis von Logistik zunehmend parallel der Begriff Supply Chain Management (SCM) als intelligente Planung und Steuerung von Wertschöpfungsketten (BVL 2014).

Gebräuchlich ist zudem der Begriff Transportlogistik, der vor allem den physischen Transport von Gütern meint, einschließlich dem Sammeln, Verteilen und den mit dem Transport verbundenen Umschlagprozessen. Der Straßengütertransport als Teil des Güterverkehrs steht dabei für einen flexiblen und verschiedene Sendungsgrößen – vom Paket, über die Palette und die Teilladung bis hin zu einer Komplettladung – transportierenden Dienstleister, der von allen Verkehrsträgern die höchste Erreichbarkeit in der Fläche durch ein dichtes Straßennetz gewährleistet.

Die Zusammenhänge zwischen der multi-sektoralen Logistik und dem Güterverkehr sind in der obenstehenden Synopse darge-

stellt (vgl. Abbildung 1). Der Logistikmarkt umfasst auch sämtliche den Güterverkehr begleitenden Wirtschaftsaktivitäten. Der

Straßengüterverkehr per Lkw ist wiederum ein zentraler Bestandteil der Transportlogistik.

1.2 AKTUELLE LOGISTIKTRENDS

Der Wirtschaftssektor Logistik ist ein dynamisch wachsender Dienstleistungsbereich, der sich immer weiter ausdifferenziert. Was sind die Treiber dieser Entwicklung? Welche logistisch relevanten Trends lassen sich über die vergangenen zwei Jahrzehnte erkennen? Und wie beeinflussen diese Treiber und Trends die Transportlogistik in den kommenden Jahren? Im Folgenden werden sechs wichtige Trends behandelt, die sowohl die Entwicklung des Logistiksektors beeinflussen, als auch von logistischen Aktivitäten maßgeblich beeinflusst, wenn nicht gar bestimmt werden.

Im Einzelnen wurden die Trends Globalisierung, die Containerisierung des Güterverkehrs, das Bestell- und Konsumverhalten von Verbrauchern und Wirtschaft, Innovationen im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnologien, das Outsourcing von Unternehmensaktivitäten, insbesondere auch im Transportbereich sowie zunehmende Bestrebungen nachhaltiger und „grüner Logistik“ identifiziert. Die logistisch relevanten Trends wirken sich auf die Arbeitsteilung

und Fertigungstiefe der Güterproduktion sowie die Struktur des Warenhandels (Güterstruktureffekt) aus, und werden selbst wiederum von der Produktions- und Güterstruktur beeinflusst.

GLOBALISIERUNG

Logistik ist zugleich Treiber und Profiteur der Globalisierung. Die zunehmende Internationalisierung der Beschaffung, eine Produktion mit vielfältigen Zulieferbeziehungen

und eine immer stärker auf die Nachfrage ausgerichtete Distribution von Waren und Gütern charakterisiert die Entwicklung der Logistik seit vielen Jahren. Im Zusammenhang damit verstärkt sich die Arbeitsteilung, die sich aufgrund standortspezifischer Vorteile ergibt – resultierend aus zum Beispiel unterschiedlichen Arbeitskosten, Sozial- und Umweltstandards, der Rohstoffverfügbarkeit, der Qualifizierung oder der Absatzmarktstärke. Gleichzeitig befinden sich mittlerweile viele Unternehmen in einem weltweiten Wettbewerb um Aufträge und Marktanteile. Güterverkehr wird „internationalisiert“ und in weltumspannenden und vernetzten Logistiknetzwerken über weiter wachsende Transportdistanzen realisiert.

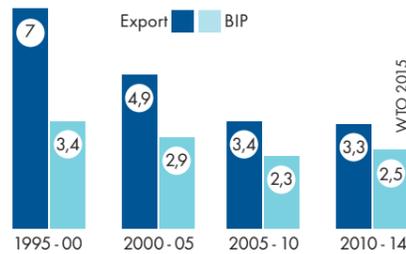
Mögliche Störungen und Unterbrechungen bei der Logistik aufgrund einer zunehmenden Komplexität und externer Ereignisse stellen ein zunehmendes unternehmerisches Risiko und ein ernst zu nehmendes Problem der Globalisierung dar. Je enger die Weltwirtschaft miteinander verzahnt ist, desto weitreichender können sich diese Störungen bemerkbar machen. Daher müssen Logistik- und Transportdienstleistungen gegenüber vielfältigen Störungsfällen, wie etwa Naturereignissen, Terroranschlägen (auch Schiffsentführungen) oder auch Streiks möglichst robust sein. Bezogen auf die Erhöhung des allgemeinen Sicherheitsniveaus führen Kontrollen zu verlängerten Transportzeiten der Güter (BVL 2014).

Gemessen werden kann die Globalisierung mit Hilfe so genannter Globalisierungsindikatoren. Zu den **Indikatoren der wirtschaftlichen Globalisierung** gehört insbesondere die Entwicklung des internationalen Waren- und Dienstleistungshandels. Daneben existieren noch weitere Indikatoren der wirtschaftlichen Verflechtung mit ausländischen Volkswirtschaften – zum Beispiel über Direktinvestitionen, Beschäftigung, Forschung und Entwicklung oder Wertschöpfung.

Unmittelbar auf Güterverkehr und Logistik wirkt sich die Entwicklung des internationalen Warenhandels aus. In den vergangenen 20 Jahren sind die globalen Warenexporte im Durchschnitt stärker gewachsen als das Weltsozialprodukt. Allerdings fiel das

2 WACHSTUM WELTEXPORTE VS. WELTWIRTSCHAFT

In Prozent pro Jahr



Wachstum des internationalen Warenhandels zuletzt deutlich schwächer aus als noch gegen Ende der 1990er Jahre. Dabei ist der Warenaustausch stärkeren Schwankungen unterworfen als die globale Wirtschaftsentwicklung (WTO 2015). Der Globalisierungsindikator internationaler Handel zeigt, dass die Globalisierung sich fortsetzt, die Globalisierungsgeschwindigkeit ließ jedoch zuletzt nach.

CONTAINERISIERUNG UND SENDUNGSSTRUKTUR

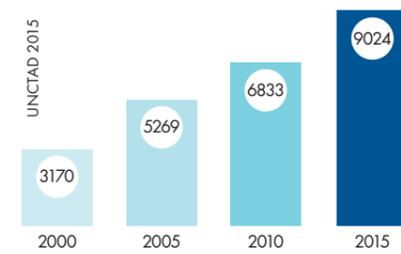
Während der internationale Warenhandel mit nahezu allen Gütern wächst, erfährt die Güterstruktur in den letzten Jahrzehnten einen Wandel. Insbesondere in den Industrieländern gibt es einen starken Trend weg von Massengütern und hin zum Stückgut.

Träger des globalen Handels mit Stückgütern ist der **Container**. Als standardisiertes Transportgefäß hat er wesentlich zur Reduktion der Transportkosten im Güterhandel beigetragen. Container sind intermodal, das heißt, auf allen Verkehrsträgern verwendbar. Die zunehmende Containerisierung des Warenhandels hat die Integration der Verkehrsträger Wasser, Schiene und Straße im Güterverkehr wieder verstärkt. Im Laufe der Zeit wurden immer größere Teile des Güterverkehrs containerisiert (Berndhoffen et al. 2013).

Zwar erfolgen nur rund 15% des Güteraufkommens im internationalen **Seehandel** per Container, was insbesondere dem hohen Gewicht der Massengüter (wie Rohöl, Kohle oder Eisenerz) geschuldet ist. Wertmäßig werden dagegen rund 90% aller Güter per Container transportiert. Parallel zum Rohstoffboom der vergangenen Jahre hat sich der Containerhandel weit dynamischer

3 GLOBALER CONTAINER-SEEHANDEL

In Mrd. Tonnen-Meilen



entwickelt als der übrige Seehandel: So haben sich sowohl das Aufkommen an mit Seeschiffen transportierten Containern (in Tonnen) als auch die Verkehrsleistung der Containerseeschifffahrt allein seit 2000 nahezu verdreifacht, während die gesamte Gütermenge und Güterverkehrsleistung im Seehandel sich seitdem nur um etwa zwei Drittel bzw. drei Viertel erhöht haben. Die Haupttrouten der Containerschifffahrt laufen dabei von Asien nach Nordamerika und von Asien nach Europa (UNCTAD 2015).

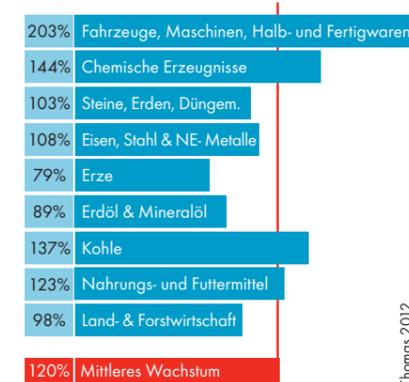
Der **Güterstruktureffekt** beschreibt die Veränderung der Zusammensetzung des Güterverkehrsaufkommens, und zwar weg von Massengütern und hin zu hochwertigeren Stückgütern, die unter anderem in Containern zwischen den Kontinenten transportiert werden. Zudem werden die transportierten Güter leichter und die Sendungsgrößen oftmals kleiner. Just-in-time- und Just-in-sequence-Lieferungen erlauben es zudem, Lagerbestände und Lagerkapazitäten zu reduzieren.

Die Wirkung des Güterstruktureffekts lässt sich auch an den Güterverkehrsleistungen (für Ausfuhr, Einfuhr und Inland) in Deutschland ablesen. Vergleicht man die Entwicklung der Güterverkehrsleistung nach Hauptgütergruppen im Zeitraum 2000 bis 2010, ergibt sich folgendes Bild: Die Güterverkehrsleistung geringwertiger Massengüter (bis auf Kohle) wächst nur unterdurchschnittlich (<120%); ihr Beförderungsanteil sinkt folglich im Zeitverlauf. Der Anstieg der Transportleistung für Kohle geht auf billige Importkohle für die inländische Stromerzeugung zurück.

Sehr stark zugenommen hat dagegen die Beförderung von Fahrzeugen, Maschinen,

4 VERÄNDERUNGEN DER GÜTERVERKEHRSLEISTUNG

2000 bis 2010. Basisjahr 2000 = 100%



Halb- und Fertigwaren – und hier insbesondere Beförderungsleistungen im Außenhandel. Das Wachstum dieser Gütergruppe steht für die eigentlichen Industrieerzeugnisse, die als hochwertige Produkte häufiger als die Güter der anderen Gütergruppen in kleinen Sendungsgrößen unterhalb von Komplettladungen versendet oder mit Containern ex- oder importiert werden.

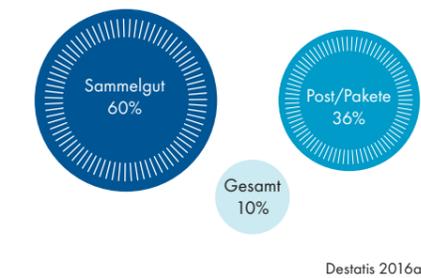
KONSUMVERHALTEN UND E-COMMERCE

Im Warenverkehr nehmen Internet und Online-Handel (E-Commerce in Form von Business-to-Business: B2B und Business-to-Consumer: B2C) eine immer bedeutendere Rolle ein. Die bisherige Standardlieferkette vom Produzenten über den Großhandel zum Einzelhandel wird sukzessive durch Internethändler oder den Direktverkauf der produzierten Waren über das Internet ergänzt oder ganz ersetzt. Gleichzeitig ergänzen große Handelsunternehmen ihr Angebot durch einen eigenen Vertrieb über das Internet. Bedient werden die Transportbedarfe des E-Commerce durch Kurier-, Express- und Paketdienste (KEP) – so genannte nicht lizenzpflichtige Postdienstleistungen. Die drei KEP-Dienste unterscheiden sich dabei nach dem Grad der Individualität bzw. Standardisierung.

Das KEP-Segment und das Sammelgut – hierbei handelt es sich ebenfalls um Waren, die nicht als Komplettladung, sondern als Stückgüter bestehend aus palettierte Ware oder auch aus Einzelstücken, die mit Lademitteln zusammengefasst

5 GÜTERARTEN IM VERGLEICH

Wachstum 2011 bis 2014 in Prozent



und aufgrund des Gewichtes nur mit Hubwagen und Gabelstaplern umgeschlagen werden können – wächst zwischen 2011 und 2014 in Deutschland mit insgesamt 36% (KEP) und 60% (Sammelgut) deutlich stärker als die gesamte Beförderungsmenge (in Tonnen) mit nur 10%. Der Anteil des KEP-Segments und von Sammelgut am gesamten Güteraufkommen hat seit 2010 dynamisch um zwei Prozentpunkte zugelegt; ist im Jahr 2014 aber aufgrund des geringeren spezifischen Gewichtes mit etwa 7% der Gütermenge (in Tonnen) vergleichsweise gering.

Zurückzuführen ist dieses überdurchschnittliche Wachstum auf den stark expandierenden Online-Handel zwischen Unternehmen und Privatkunden (B2C-Handel), aber auch auf Veränderungen der Liefermengen und Sendungsgrößen im B2B-Handel. Dabei werden einerseits immer neue Waren-

gruppen – bis hin zu Lebensmitteln – für den Online-Handel erschlossen. Andererseits nutzen Unternehmen zunehmend die Transportdienstleistungen von KEP-Diensten und Stückgutdienstleistern im B2B-Handel. Noch ist dabei der B2B-Anteil innerhalb des KEP – sowohl nach Umsatz als auch nach Sendungsmengenanteil – größer als der B2C-Bereich.

Das KEP-Sendungsvolumen ebenso wie der KEP-Branchemumsatz ist seit der Jahrtausendwende um etwa zwei Drittel gewachsen, und zwar auf rund 2,8 Mrd. Stück bei einem Branchenumsatz von ca. 17 Mrd. Euro im Jahr 2014. Der KEP-Markt in Deutschland entspricht in etwa einem Viertel des europäischen KEP-Marktes und ist der mit Abstand größte innerhalb Europas (BIEK 2015; BNetzA 2015).

Ein möglicher neuer Trend im Bereich E-Commerce, der zu weiterem Mengenwachstum beitragen kann, ist die Belieferung von Kunden innerhalb eines Tages mit bestellten Waren (Same Day Delivery genannt). Zudem gibt es Bestrebungen, die Belieferung der Kunden mit unternehmenseigenen Lieferdiensten zu realisieren.

IKK-INNOVATIONEN

Die Qualität von Informations- und Kommunikationstechnologien (IKK) wird heute als zentral für die logistische Leistungsfähigkeit

6 DIGITALE INNOVATIONEN IN DER TRANSPORTLOGISTIK



betrachtet (World Bank 2014). Oftmals basieren technologische Innovationen im Bereich Logistik auf dem Einsatz neuer IuK-Technologien. Sie finden Anwendung bei physischen Prozessen im Lager und bei der Lagerhaltung, begleitend zu Transportvorgängen, bei der Transportorganisation und beim Auftragsmanagement sowie insgesamt zur Realisierung der Informationsflüsse entlang der Lieferkette.

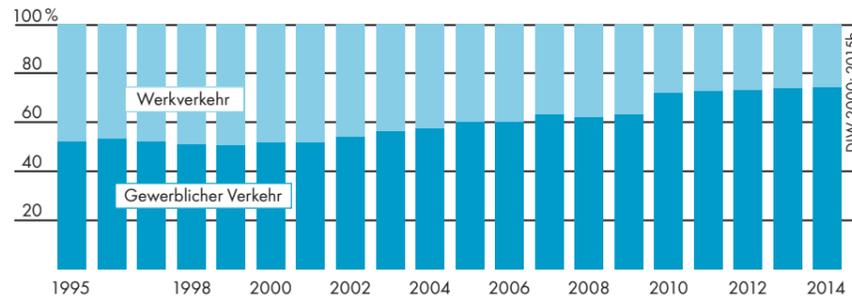
Alle diese Anwendungen unterstützen dabei, Logistik- und Transportdienstleistungen effektiver zu gestalten, das heißt, Fehler zu vermeiden, Arbeitsabläufe effizienter zu gestalten, um so Kosten zu sparen und spezifische Informationen zu Gütersendungen mit eigenen Aktivitäten zu verknüpfen. Als Beispiele für IuK-Innovationen in der Logistik lassen sich anführen: die (Teil-)Automatisierung der Lager- und Lagerhaltungsprozesse, die Einführung von Managementsystemen für Lagerbestände und Fahrzeuge/Flotten, die automatische Datenerfassung und -weitergabe durch Fahrzeuge und die Güter selbst sowie das Informations- und Datenmanagement zwischen Akteuren und Aufträgen u. a. über Internetplattformen.

OUTSOURCING

Der Trend des Outsourcings spiegelt die Strategie der Unternehmen wider, sich auf ihre Kernkompetenzen zu konzentrieren.

7 BEFÖRDERUNGSMENGEN IM STRASSENGÜTERVERKEHR

Werkverkehr gegenüber gewerblichem Güterverkehr



Da Logistikaufgaben nur von wenigen Handels- und Industrieunternehmen als ihre Kernkompetenz betrachtet werden, ergeben sich Aufgabenfelder für spezialisierte Logistikdienstleister. Die Unterscheidung, was den besonderen Fähigkeiten eines Unternehmens beizuzählen ist, kann sehr unterschiedlich ausfallen. So gibt es Logistikunternehmen, die eigene Fuhrparks und Lager unterhalten, wohingegen andere Dienstleister nur die Organisation eines Transports unter Beteiligung mehrerer Akteure planen und steuern.

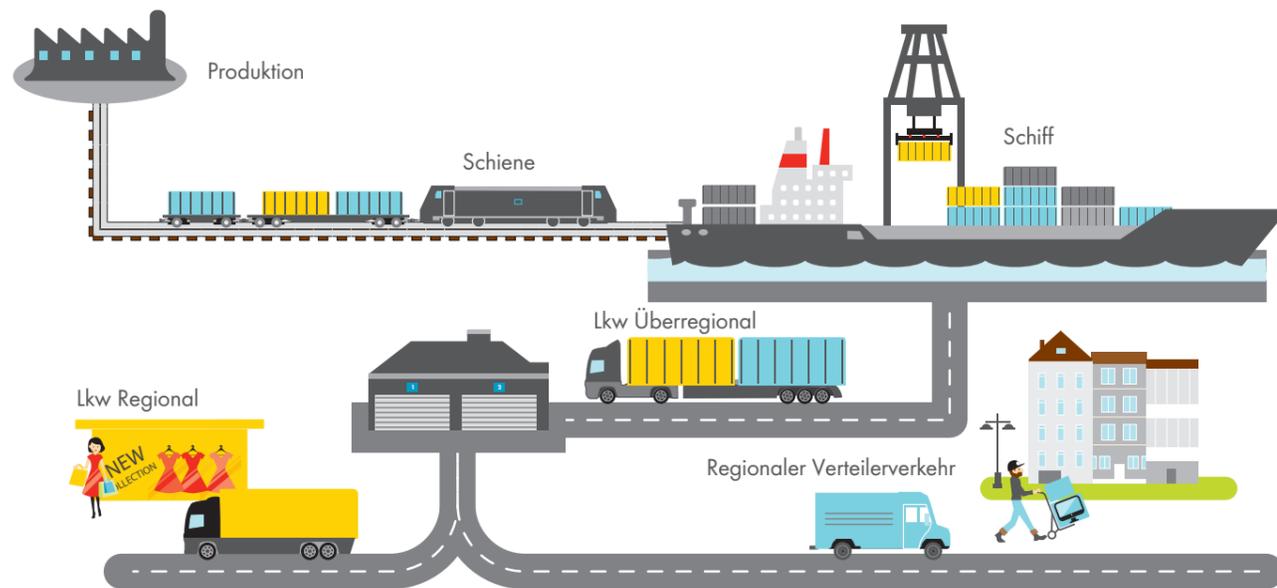
In den letzten Jahren ist eine eindeutige Entwicklung zur Fremdvergabe von Transportdienstleistungen erkennbar. So hat sich das Verkehrsaufkommen (in Tonnen) im Werkverkehr per Lkw in den vergangenen 20 Jahren nahezu halbiert. In der Folge hat

der gewerbliche Güterverkehr gegenüber dem Werkverkehr beständig Anteile hinzugewonnen. Übernahmen werkseigene Lkw vor zwanzig Jahren noch fast die Hälfte des durch deutsche Lkw transportierten Güterverkehrsaufkommens, ist es 2014 nur noch gut ein Viertel (DIW 2015b).

GRÜNE LOGISTIK

Unter dem Schlagwort „Grüne Logistik“ haben eine ganze Reihe von Akteuren das Thema Nachhaltigkeit in Logistik und Transport aufgegriffen. Ziel ist es, Logistikprozesse möglichst umweltfreundlich und ressourcenschonend zu gestalten, das heißt insbesondere, möglichst wenig Energie und Ressourcen zu beanspruchen und möglichst geringe Emissionen zu verursachen. Dabei bezieht sich das Konzept „Grüne Logistik“

8 CO₂-EMISSIONEN ENTLANG EINER TYPISCHEN LIEFERKETTE



nicht nur auf die Erbringung der Transportleistung, sondern über die gesamte Logistikkette (IML 2011). Auch wenn damit nur Teilaspekte grüner Logistik betrachtet werden, haben sich als Indikator für grüne Logistikaktivitäten die Treibhausgas- bzw. CO₂-Emissionen etabliert. Erster Schritt einer emissionsarmen Güterlogistik ist dabei eine

nachvollziehbare Berechnung der von der Transportlogistik verursachten CO₂-Emissionen. Zur Treibhausgasbilanzierung von Transportdienstleistungen wurde 2012 mit der europäischen Norm EN 16258 (CEN 2012) erstmals eine methodische Grundlage entwickelt. Jedoch ist ihre Anwendung freiwillig. Es werden verschiedene Vorge-

hensweisen zugelassen, die zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Und Gebäude, Lager- sowie Umschlagprozesse werden (noch) nicht erfasst (DSLW 2013). Sind die CO₂-Emissionen ermittelt, können konkrete Maßnahmen zur Reduktion von Energieverbrauch und Emissionen abgeleitet werden.

1.3 ENTWICKLUNG DES GÜTERVERKEHRS

Ein Ziel von Logistik ist es, Güter bedarfsgerecht an festgelegten Orten bereitzustellen. Kern von logistischen Dienstleistungen ist der Transport von Gütern. In diesem Abschnitt wird dargestellt, wie sich der Güterverkehr in Deutschland in der jüngeren Vergangenheit entwickelt hat. Anschließend werden die Rahmendaten und wesentlichen Annahmen für die weitere Prognose des (Straßen-)Güterverkehrs sowie die Güterverkehrsprognose bis 2040 mit besonderem Fokus auf den Lkw vorgestellt.

Als Kennziffern des zu transportierenden Güterverkehrs werden vor allem drei Größen angegeben: das Güterverkehrsaufkommen, die Güterverkehrsleistung sowie die Fahrleistung von Güterfahrzeugen. Dabei steht das **Güterverkehrsaufkommen** für die Menge der in Deutschland transportierten Güter und wird in Millionen Tonnen erfasst. Die **Güterverkehrsleistung** stellt den Bezug zu der Entfernung her, über die diese Güter transportiert wurden; sie wird in Milliarden Tonnenkilometern angegeben.

Die **Fahrleistung** misst die mit einem Güterfahrzeug erbrachte Fahrzeugfahrleistung. Im Straßengüterverkehr bezieht sich die Fahrleistung auf alle Nutzfahrzeugklassen. Sie umfasst alle Fahrten, also Ladungsfahrten und Leerfahrten, und die dabei zurückgelegten Entfernungen. In Verkehrstatistiken wird sie in der Regel in Milliarden Fahrzeugkilometern pro Jahr ausgewiesen. Die Fahrleistung ist bedeutsam, um die Nutzungsintensität von Verkehrswegen zu ermitteln. Aus dieser Größe ergeben sich auch – zusammen mit den spezifischen Kraftstoffverbräuchen – die Kraftstoffnachfrage und alle Emissionen, die dem Straßengüterverkehr zuzuordnen sind und die im Kapitel 4 dargestellt werden (FGSV 2012).

Das Güterverkehrsaufkommen, die Güterverkehrsleistung und die Fahrleistungen in dieser Studie beziehen sich grundsätzlich nur auf Verkehre, die auf deutschem Terri-

torium erbracht werden (Inlands- oder **Territorialprinzip**), unabhängig davon, ob es sich um in Deutschland zugelassene oder gebietsfremde Nutzfahrzeuge handelt.

Nicht berücksichtigt werden an dieser Stelle zum einen der Transport über Rohrfernleitungen, zum anderen der Luftverkehr sowie die Seeschifffahrt. Rohrfernleitungen und Flugzeug spielen beim Verkehrsaufkommen wie auch bei der Verkehrsleistung quantitativ nur eine untergeordnete Rolle. Der Seeverkehr dominiert dagegen im Außenhandel – im Export macht er sogar über 80% der erbrachten Beförderungsleistung aus (Thomas 2012); er ist für den betrachteten binnenländischen Güterverkehr jedoch nicht relevant.

Der Logistiksektor und damit der sich aus der Transportlogistik ergebende Güterverkehr ist in den vergangenen Jahrzehnten in Deutschland – parallel zur bzw. im Einklang mit der Wirtschaftsentwicklung – gewachsen. Seit 1991 ist die Güterverkehrsleistung der bodengebundenen Verkehrsträger Straße, Schiene und Binnenschiff um mehr als 60% gestiegen. Getrieben durch die wirtschaftliche Dynamik von Wiedervereinigung, EU-Binnenmarkt sowie EU-Osterweiterung fiel der Anstieg der Güterverkehrsleistung in den 1990er Jahren besonders stark aus. Seit der Jahrtausendwende hat sich nach erfolgter Ost-Integration das Güterver-

kehrswachstum abgeschwächt. Im Gefolge der Finanz- und Wirtschaftskrise kam es im Jahr 2009 zu einem deutlichen Rückgang der Beförderungsleistungen, der erst 2014 wieder aufgeholt werden konnte. Zuletzt wurde eine Güterverkehrsleistung von über 650 Mrd. Tonnenkilometer in Deutschland erbracht (DIW 2015b).

In Bezug auf die Aufteilung des Güterverkehrs nach der Güterverkehrsleistung (Modal Split) ergibt sich im Jahr 2014 folgendes Bild: Unter den drei Verkehrsträgern Straße, Schiene und Binnenschiff weist der Straßengüterverkehr mit 469 Mrd. Tonnenkilometern oder 73% den höchsten Anteil an der Verkehrsleistung bodengebundener Verkehrsträger aus. Es folgen die Schiene mit 113 Mrd. Tonnenkilometer oder 18% sowie die Binnenschifffahrt mit 59 Mrd. Tonnenkilometer oder 9% (vgl. Abbildung 9 auf der nächsten Seite).

Während sich der Modal Split vor der Jahrtausendwende deutlich verschoben hat, vor allem zugunsten des Straßengüterverkehrs, hat sich die Verteilung der Güterverkehrsleistung auf die Verkehrsträger seit der Jahrtausendwende nur noch wenig verändert – mit leichten Gewinnen für den Lkw und Rückgängen für die Binnenschifffahrt.

Allerdings gibt es innerhalb der Verkehrsträger zum Teil deutliche Veränderungen. So bestreiten gebietsfremde Lkw inzwischen fast zwei Fünftel aller Straßengüterverkehrsleistungen in Deutschland – von den 73% der durch Lkw im Jahr 2014 erbrachten Güterverkehrsleistung erfolgten 28 Prozentpunkte durch gebietsfremde und 45 Prozentpunkte durch inländische Lkw (DIW 2015b, BAG 2015b).

9 GÜTERVERKEHRSLEISTUNG MIT PROGNOSE

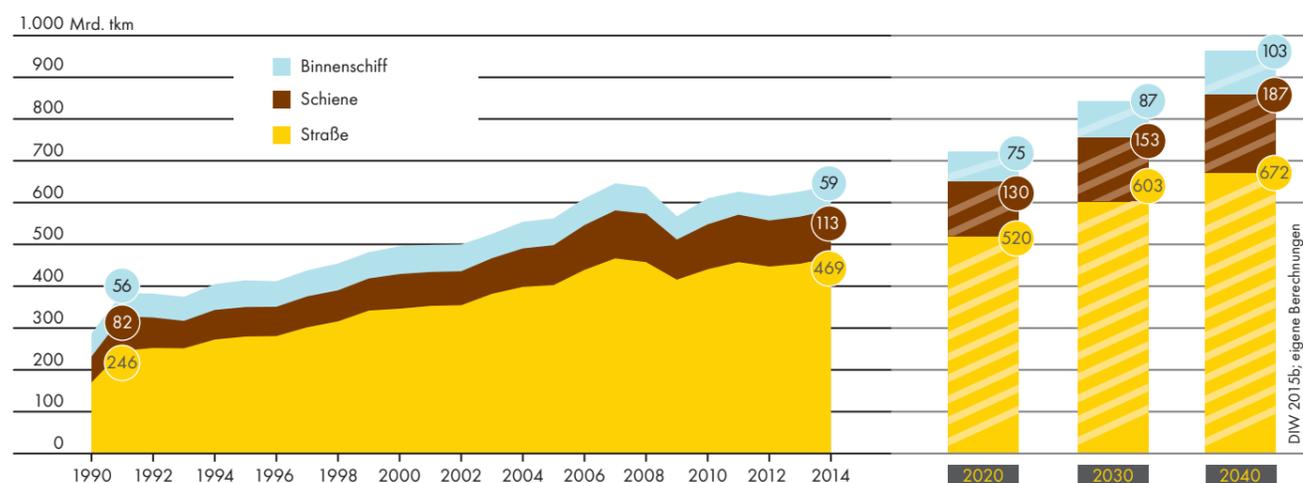


Abbildung 9 zeigt die historische Entwicklung der Güterverkehrsleistung in Deutschland. Deutlich zu erkennen das starke Wachstum in den 1990er Jahren. Auf Grund der globalen Finanz- und Wirtschaftskrise kam es 2008/2009 zu einem vorübergehenden Rückgang. Es dominiert der Verkehrsträger Straße.

Um Aussagen zur künftigen Entwicklung der Fahrleistungen im Straßengüterverkehr treffen zu können, sind drei Schritte erforderlich: Als erstes ist das Verkehrsaufkommen, also welche Mengen von Gütern auf welchen Relationen transportiert werden, zu bestimmen.

Im zweiten Schritt muss der für den Transport genutzte Verkehrsträger (im Binnenverkehr vor allem Straße, Schiene und Binnenschiffahrt) ermittelt werden, um im dritten Schritt die Anzahl der erforderlichen Fahrten aus Fahrzeugwahl, Auslastung sowie ergänzend den Leerfahrtenanteilen abzuleiten. In Bezug auf den Straßengüterverkehr sind relevant: die für den Transport eingesetzten Nutzfahrzeuge und ihre Ladegutmenge sowie die Strecken, die sie zurücklegen müssen, um zum Ausgangsort des Transports und anschließend entweder zurück oder zu einem Anschlussauftrag zu gelangen.

Die Szenarioprognose der Aufkommen und Verflechtungen für 2040 wurden im Rahmen dieser Studie mit Hilfe eines Elastizitätenansatzes bestimmt. Dieser setzt auf dem Basisjahr 2010 auf und wurde für das Stützjahr 2030 mit aggregierten Ergebnissen der VP 2030 (BVU et al. 2014) abgestimmt. Zur Bestimmung der gewählten Verkehrsmittel, der Aufteilung von Güterströmen auf Fahrzeugklassen und die Berechnung von Fahrleistungen wird ein eigenes Verkehrsmodell eingesetzt.

Grundlage für die Prognose des Verkehrsaufkommens zukünftiger Jahre ist die Wirtschaftsentwicklung, da die Güterverkehrenachfrage aus wirtschaftlichen Aktivitäten heraus entsteht. Der Zusammenhang zwischen der Wirtschaftsentwicklung und dem Aufkommen der unterschiedlichen Transportgüter im grenzüberschreitenden und deutschen Binnenverkehr dient zur Abschätzung des künftigen Verkehrsaufkommens. Die im Rahmen der Verkehrsprognose des Bundes für 2030 erstellte Strukturdatenprognose (ifo 2012) geht von einem realen Wachstum des Bruttoinlandsprodukts (BIP) von jährlich 1,1 % bis 2030 aus. Die Langfrist-Energiereferenzprognose der Bundesregierung (EWI et al. 2014) sagt darüber hinaus einen danach leicht abgeschwächten Trend bis 2040 von real 0,9 % pro Jahr voraus.

Insgesamt wird erwartet, dass das Güterverkehrsaufkommen von 4,1 Mrd. Tonnen im Jahr 2014 bis 2040 auf etwa 4,8 Mrd. Tonnen wächst. Dies entspricht einer Zunahme gegenüber 2014 von 17 %.

Wichtig für die Bedeutung der einzelnen Verkehrsträger sind die Eigenschaften von Gütern und Entfernungen, über die diese Güter transportiert werden. Die Eisenbahn ist besonders geeignet, große Mengen an Gütern über große Distanzen zu transportieren, während der Lkw sehr flexibel auch für kleine Mengen und über kurze

Transportentfernungen genutzt wird. Die größte Nachfrage (in Tonnen) für Gütertransporte in Deutschland besteht für Güter, die im Zusammenhang mit dem Baugewerbe transportiert werden: Steine, Erden und sonstige Mineralerzeugnisse wie Zement und Gips machen bereits ein Drittel des Verkehrsaufkommens aus, ca. 10 % betreffen Nahrungsmittel und ca. 8 % des Aufkommens sind Sekundärrohstoffe. Allerdings werden Baustoffe meist nur über kurze Distanzen transportiert (im Mittel weniger als 50 km), während Nahrungsmittel häufig auch größere Distanzen zurücklegen (im Mittel etwa 200 km).

Der größte Anteil des Güterverkehrsaufkommens wird mit dem Lkw transportiert. Sein Anteil liegt seit Jahren bei 84 %. Er liegt damit noch höher als bei den Güterverkehrsleistungen, da die Transportdistanzen bei Lkw im Durchschnitt kürzer sind als diejenigen für Bahn und Binnenschiff. Sein Aufkommen wächst von 2010 bis 2030 um knapp 17 % (BVU et al. 2014). Das ist weniger als das unterstellte Aufkommenswachstum von Bahn bzw. Binnenschiff in Höhe von 23 bzw. 20 %.

Aufgrund des hohen Ausgangsniveaus bei geringeren Transportweiten des Lkw sinkt dessen Anteil am Güterverkehrsaufkommen bis 2040 nur geringfügig. Der Lkw bewegt 2040 dann knapp 3,9 Mrd. Tonnen auf der Straße.

Zu Grunde liegen diesen Entwicklungen deutliche strukturelle Veränderungen des Güterverkehrsaufkommens. Beispielsweise wird damit gerechnet, dass das Aufkommen von Baustoffen und weiteren Massengütern wie Kohle und Mineralölprodukten und Sekundärrohstoffen zurückgeht, während auf der anderen Seite Nahrungsmittel und Güter, die im kombinierten Verkehr transportiert werden, zunehmen werden (BVU et al. 2014).

Bedeutsam ist, dass die **Transportentfernungen** weiterhin zunehmen. Schon heute macht der grenzüberschreitende Verkehr einschließlich des Hafenhinterlandverkehrs etwa ein Viertel des Gesamtaufkommens aus. Dieser Anteil wird bis 2040 auf etwa ein Drittel anwachsen. Das Anwachsen der Transportentfernungen schlägt sich in einer im Vergleich zum Verkehrsaufkommen und auch im Vergleich zum BIP stärkeren Zunahme der Verkehrsleistungen nieder.

Die Verkehrsleistungen sind in Bezug auf den erforderlichen Ressourceneinsatz beim Gütertransport aussagekräftiger als das Güterverkehrsaufkommen. In der Verflechtungsprognose der Bundesregierung legt der Verkehrsträger Straße bei den Güterverkehrsleistungen bis 2030 mit 39 % stärker zu als das Binnenschiff mit über 23 %, aber schwächer als die Schiene mit über 43 % - jeweils gegenüber dem Prognose-Basisjahr 2010 (BVU et al. 2014).

Unter den Annahmen zur wirtschaftlichen und verkehrlichen Entwicklung erfolgt für den Güterverkehr bis 2040 folgende Szenarioprognose: Die **Verkehrsleistungen** nehmen insgesamt im Vergleich zu 2014 bis 2040 um 50 % zu und wachsen von 641 auf 962 Mrd. Tonnenkilometer an; der Lkw wächst von 469 auf 672 Mrd. Tonnenkilometer bzw. um 43 %. Der Anteil der Straße an der bodengebundenen Güterverkehrsleistung (Modal Split) wird in der Folge leicht von 73 % (2014) auf 69 % (2040) zurückgehen. Ein Grund hierfür ist die Zunahme der Transportentfernungen und des kombinierten Verkehrs und damit der Nachfrage, in der insbesondere die Schiene gegenüber der Straße konkurrenzfähig ist.

Die Wahl eines Verkehrsträgers, also ob für einen Transport die Eisenbahn, das Binnenschiff oder die Straße genutzt wird, hängt von einer Reihe von Faktoren ab, deren bedeutsamsten die Transportkosten, Transportzeiten und Transportzeitunzuverlässigkeiten sind. Um diese Parameter bestimmen zu können, sind Annahmen zur Entwicklung einer Reihe von Faktoren wie Energiepreisen, Löhnen, Gebühren und Abgaben zu treffen. In der Tabelle sind die hierfür getroffenen **verkehrs- und energiewirtschaftlichen Annahmen** zusammengestellt.

Daten zur Erdöl-, Erdgas- und Strompreisentwicklung wurden wiederum den Langfrist-Energieszenarien der Bundesregierung entnommen (EWI et al. 2014). Danach steigen die Dieselpreise bis 2040 in realen Preisen (2011) auf 2,09 Euro pro Liter - bei einem Rohölpreis von 126 US-Dollar (2011) pro Barrel. Im Straßengüterfernverkehr machen die **Energiekosten** bei Dieselmotorkraftstoffen von einem Euro pro Liter (ohne Mehrwertsteuer) gut 32 % der Gesamtkosten aus (vgl. Abbildung 11). Bei 80 Cent pro Liter Dieselmotorkraftstoff (netto) sinken die anteilmäßigen Kraftstoffkosten

auf nur noch etwas mehr als 27 % der Gesamtkosten.

Der zweite große Kostenblock für Transportunternehmen sind die **Lohnkosten** für das fahrende Personal - von ebenfalls nahezu 30 % der gesamten Lkw-Kosten. Hier wirken letztendlich zwei Kräfte gegeneinander: Zum einen zeichnet sich eine zunehmende Knappheit von Berufskraftfahrern in Deutschland ab (BAG 2015a); zum anderen nimmt der Anteil ausländischer Transportunternehmen am Straßengüterverkehr in Deutschland, hier vor allem der grenzüberschreitende Verkehr, zu.

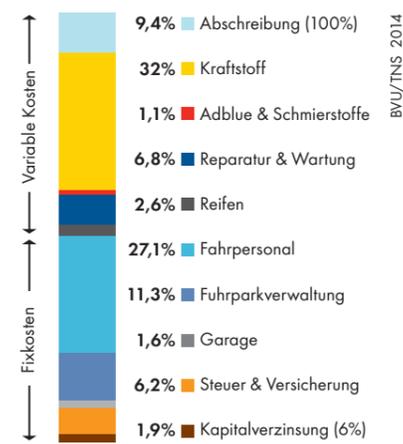
Aufgrund des intensiven Preiswettbewerbs wird davon ausgegangen, dass steigende Lohnkosten für inländische Berufskraftfahrer weitgehend durch Anbieter aus Ost- und Südosteuropa kompensiert werden - und die Lohnkosten sich damit real praktisch nicht verändern. Der Kraftstoffkostenanteil wird jedoch zulegen, wenn die Energiepreise im Straßengüterverkehr stärker ansteigen als die anderen Kostenkomponenten. Energiepreise können bei kostensensitiven Gütern die Wahl des Verkehrsmittels deutlich beeinflussen.

10 ENERGIE- UND VERKEHRSWIRTSCHAFTLICHE ANNAHMEN

PARAMETER	ANNAHME	QUELLE
Kraftstoffkosten	Verbraucherpreis Diesel 2040 1,92 €/l (Euro 2011) zzgl. einem CO ₂ -Aufschlag von 0,17 €/l; Großverbraucherpreis 5 % unter dem Endkundenpreis	EWI et al. 2014; eigene Annahme
Bahnstrompreise	Entwicklung wie Strompreis an der Börse; mittleres reales jährliches Wachstum von 1,4 % zwischen 2011 und 2030 sowie von 2,2 % bis 2040	EWI et al. 2014; eigene Annahme
Lkw-Maut	Inflationsbereinigt (real) eingefroren auf Stand 01.11.2015 (nur Fahrzeuge ab 7,5 Tonnen zulässigem Gesamtgewicht; heutige Mautstrecken)	Eigene Annahme
Löhne	Reale Konstanz (gegenläufige Trends im Straßengüterverkehr von ansteigenden Löhnen für Inländer und zunehmendem Anteil von Ausländern mit im Vergleich niedrigeren Lohnkosten heben sich auf)	Eigene Annahme; BAG 2010
Trassenpreise Schiene	Real konstant bis 2040	Eigene Annahme
Ufergelder Binnenschiff	Real konstant bis 2040	Eigene Annahme

11 KOSTENSTRUKTUR FERNVERKEHRS-LKW

bei 135.000 km Jahresfahrleistung und 1 €/l Dieselkraftstoff (netto)



Im Vergleich zum Fernverkehrs-Lkw unterscheidet sich die Kostenstruktur für überwiegend im Nahverkehr eingesetzte Lkw. Hier spielen die Kraftstoffkosten im Vergleich zu Fahrer- und Fahrzeugkosten eine untergeordnete Rolle, da die Fahrleistungen dieser Fahrzeuge deutlich geringer als im Straßengüterfernverkehr sind.

Ein weiterer wichtiger Kostenfaktor für den Straßengüterverkehr, insbesondere den Straßengüterfernverkehr ist die **Lkw-Maut**. Die Höhe der Lkw-Maut für Lkw ab 7,5 t zulässigem Gesamtgewicht bemisst sich aktuell nach dem Verursacherprinzip, wobei zu den reinen Infrastrukturkosten (Staffelung nach der Anzahl der Achsen) eine weitere Komponente hinzugefügt wurde, die sich aus den Schadstoffklassen der Lkw ergibt (Alfen et al. 2014). Die Bemessung hängt sowohl vom Zinsniveau als auch von verkehrs- und umweltpolitischen Vorgaben (wie der Berücksichtigung von Emissionen) ab. In dieser Studie wird das derzeitige Niveau bei der Lkw-Mauthöhe (Stand 1.11.2015) in den Szenarien bis zum Jahr 2040 eingefroren.

Der Ermittlung der Verkehrsleistungen liegt die Annahme zu Grunde, dass die Verkehrsinfrastruktur der Nachfrage entsprechende Kapazitäten aufweist, es also nicht zu Engpässen auf einzelnen Verkehrsträgern kommt. Um die Belastung der Verkehrsnetze, Energieverbräuche und

Emissionen abschätzen zu können, werden Verkehrsleistungen in Fahrleistungen umgerechnet. Aus dem Verkehrsaufkommen werden über Auslastungsgrade, Nutzlasten und Leerfahrtenanteile unterschiedlicher Fahrzeugarten und Zuggattungen schließlich Fahrten abgeleitet. Unterschiede zwischen Gutarten (z. B. bezüglich der Auslastung von Fahrzeugen) und Entfernen-

gen (z. B. für die Wahl der Fahrzeugklasse) werden berücksichtigt. Die weiteren Betrachtungen der modellierten Fahrleistungen im Straßengüterverkehr und den sich daraus ergebenden Energiebedarf und CO₂-Emissionen erfolgen im Kapitel 4 dieser Studie im Zusammenhang mit zwei Szenarien, dem Trend- und dem Alternativszenario.

EXKURS BUNDESVERKEHRSPROGNOSEN

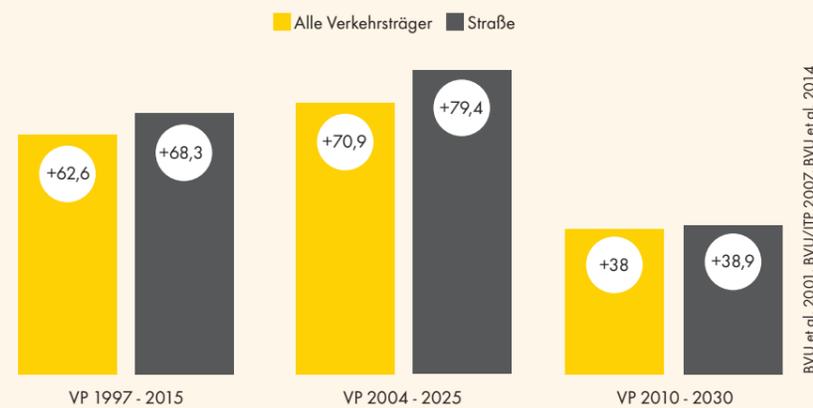
Das Bundesverkehrsministerium lässt in größeren Abständen Verkehrsprognosen für alle Verkehrsträger und deren verkehrliche Verflechtungen – daher auch Verflechtungsprognose – erstellen. Die Verkehrsprognosen der Bundesregierung bilden eine wichtige Grundlage für die langfristige Planung des Verkehrssystems und der Raumstruktur sowie insbesondere für die Bundesverkehrswegeplanung. Sie werden darüber hinaus auch häufig als Basis für Szenariostudien im

Verkehrsbereich genutzt. Darüber hinaus erstellt das Bundesamt für Güterverkehr zweimal im Jahr eine gleitende Mittelfristprognose für den Güter- und Personenverkehr (BAG/TCI 2016).

Die letzten drei Verkehrsprognosen des Bundes wurden in den Jahren 2001 für das Prognosejahr 2015 (BVU et al. 2001), 2007 für das Prognosejahr 2025 (ITP/BVU 2007) sowie 2014 für das Prognosejahr 2030 (BVU et al.

12 VERKEHRSPROGNOSEN 2015, 2025, 2030

Zuwachs Güterverkehrsleistung zu Basisjahr in Prozent



Die Abbildung 12 vergleicht das prognostizierte Verkehrsleistungswachstum der letzten drei Bundesverkehrsprognosen (VP). Aufgrund des zuletzt geringeren Wachstums wurden die prognostizierten Zuwächse deutlich reduziert, insbesondere für die Lkw.

1.4 STRASSENPERSONENVERKEHR MIT BUSSEN

Der Verkehrsträger Straße dient nicht nur dem Straßengüterverkehr und dem motorisierten Individualverkehr. Die Straße trägt auch den öffentlichen Straßenpersonenverkehr (ÖSPV), der hauptsächlich mit Bussen erfolgt. Im Folgenden werden die wichtigsten verkehrswirtschaftlichen Fakten, Trends und Zukunftsprojektionen des ÖSPV mit Bussen dargestellt.

BUSSE IM STRASSENVERKEHR

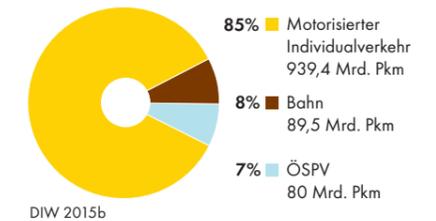
Gemessen an Linienlängen, Fahrzeugfahrleistungen und Platzkapazitäten ist der Busverkehr mit großem Abstand Hauptträger des ÖSPV in Deutschland. Er nimmt ca. 80% an der Beförderungsleistung ein (Destatis 2016c). Aufgrund der großen Bedeutung des motorisierten Individualverkehrs ist der Anteil des Busverkehrs an den

Fahrzeugfahrleistungen im Straßenverkehr vergleichsweise gering; sein Anteil liegt hier bei nur etwa einem halben Prozent.

Aufgrund der hohen Personenbesetzung von Bussen nehmen sie bei der Personenbeförderung jedoch eine wichtige Rolle ein: So hat der ÖSPV (einschließlich Straßenbahnen und Stadtschnellbahnen) mit rund 80 Mrd. Personenkilometern immerhin

einen Anteil von etwa 7% an der inländischen Personenverkehrsleistung. Aufgrund der kürzeren Transportweiten ist die Bedeutung des ÖSPV am inländischen Personenverkehrsaufkommen fast doppelt so hoch – zuletzt (2014) lag sein Anteil hier bei über 13% und über 9 Mrd. Fahrgästen (DIW 2015b).

13 MODAL SPLIT VERKEHRSTRÄGER 2014



Im internationalen Vergleich spielt die Personenbeförderung mit Bussen in Deutschland aber eher eine untergeordnete Rolle: Die ÖSPV-Beförderungsleistung – und folglich auch der Busanteil am Modal Split – liegt mit jährlich weniger als 1.000 Personenkilometern (Pkm) pro Kopf unter dem europäischen Durchschnitt. Neben dem Pkw spielt in Deutschland der Schienenverkehr eine größere Rolle im Personenverkehr als in anderen großen Flächenstaaten der EU; er ist allerdings weniger bedeutend als in Österreich und insbesondere der Schweiz (DIW 2015b; EC 2015).

SEGMENTE IM BUSVERKEHR

Der ÖSPV wird mit Kraftomnibussen und schienengebunden mit Straßen- und Stadtschnellbahnen durchgeführt. Diese Verkehre werden in der Verkehrsstatistik gemeinsam erfasst. Die Personenbeförderung mit Bussen gliedert sich wiederum in vier Segmente: den Stadtbusverkehr, den Regionalbusverkehr, den Gelegenheitsverkehr und den Fernlinienbusverkehr. Die Entwicklung des ÖSPV und die Bedeutung der einzelnen Verkehrsmittel im ÖSPV sind in Abbildung 15 dargestellt:

Die Personenverkehrsleistung des ÖSPV insgesamt liegt relativ stabil bei rund 80 Mrd. Personenkilometern jährlich. Es dominiert der Linienverkehr und hier insbesondere der

2014) veröffentlicht. Ihr Szenariohorizont erstreckt sich jeweils auf etwa zwei Jahrzehnte, gerechnet vom Basisjahr der jeweiligen Prognose. Die aktuelle Verflechtungsprognose wurde auf mehrere Lose verteilt. Die eigentliche Verkehrsprognose wurde in Los 3 erstellt, während Los 1 und Los 2 wichtige Strukturdaten als Input für die Verkehrsprognose liefern. In den Losen 4 bis 6 erfolgte dann die Umlegung der Verkehrsprognose auf die Verkehrsinfrastruktur, um somit mögliche künftige Engpässe zu identifizieren.

Die Verkehrsprognosen unterscheiden sich im Hinblick auf die sozioökonomischen und verkehrlichen Strukturdaten – darunter zum Beispiel wirtschaftliche Entwicklung, Verkehrsangebot, Infrastruktur und Nutzerkosten. Die Modell-Inputs basieren in der Regel auf Trendprojektionen und teilweise auch auf speziellen Vorgaben von Verkehrs-, Wirtschafts-, Energie- oder Umweltpolitik.

Für detailliertere Verkehrsprognosen relevant sind die Outputdaten zu Verkehrsaufkommen und Verkehrsleistung der einzelnen Verkehrsträger. Über die vergangenen drei Verkehrsprognosen zeigen sich dabei zum Teil deutliche

Unterschiede: Nach dem starken Güterverkehrswachstum in den 1990er Jahren setzten die Verkehrsprognosen für 2015 und 2025 sehr hoch an. So wurde hier über alle Verkehrsträger ein Verkehrsleistungswachstum von 63% bzw. 71% über den jeweiligen Szenariohorizont prognostiziert. In der aktuellen Verkehrsprognose sind es dagegen nur noch 38% bis 2030. Für den Lkw ist der Rückgang des prognostizierten Verkehrsleistungswachstums noch deutlicher: von 68% (bis 2015) bzw. 79% (bis 2025) auf nun 39% (bis 2030).

Auch bezüglich des Modal Split gibt es Differenzen zwischen den Prognosen: nach der aktuellen Verkehrsprognose bis 2030 wächst der Lkw nur noch im Durchschnitt aller Verkehrsträger und legt im Modal Split in der Folge nicht mehr zu. Im Zeitraum 2010 bis 2014 ist der Straßengüterverkehr deutlich gewachsen. Der Anstieg auf gut 600 Mrd. Tonnenkilometer würde folglich einen Zuwachs von weniger als 30% bis 2030 bedeuten. Teilweise lässt sich dies rechtfertigen mit dem abklingenden Aufholeffekt nach der Finanz- und Wirtschaftskrise, sodass das Verkehrsleistungswachstum mittelfristig wieder geringer ausfällt.

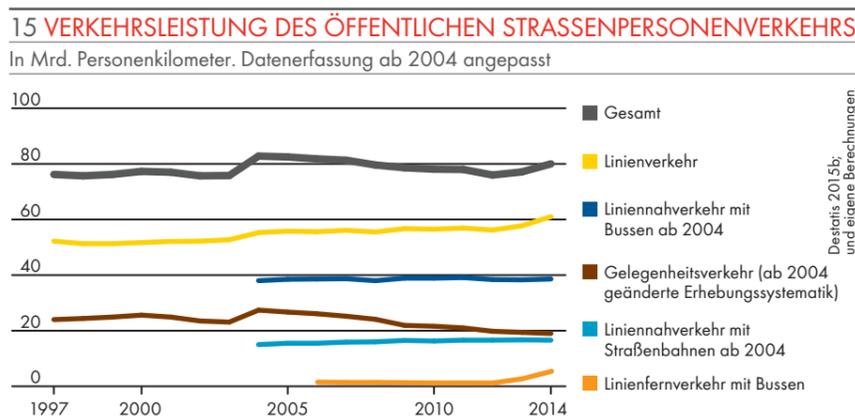
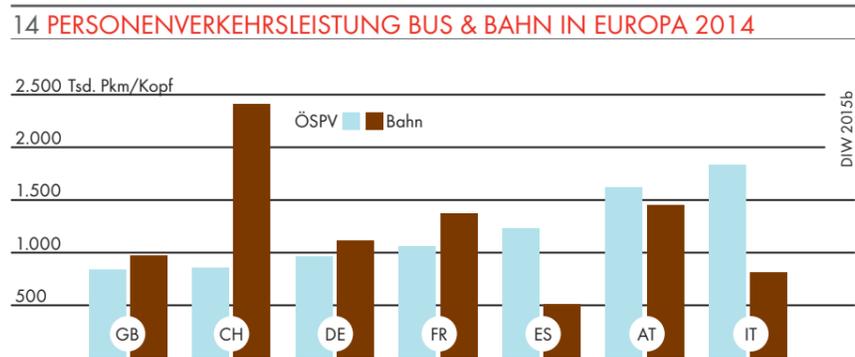
Liniennahverkehr mit Stadtbussen, deutlich vor dem Liniennahverkehr mit Straßenbahnen, gefolgt vom nicht liniengebundenen Gelegenheitsverkehr sowie schließlich dem zuletzt besonders dynamischen Liniennahverkehr mit Bussen.

Der **Stadtbusverkehr** steht für rund die Hälfte der Personenbeförderungsleistung im ÖSPV. In Städten mit mehr als 100.000 Einwohnern wurden 2013 etwa 12,5 Mrd. Personenkilometer realisiert (VDV 2015). Dies entspricht etwa 23% der gesamten Verkehrsleistung des liniengebundenen ÖSPV (DIW 2015b). Der Stadtbusverkehr bildet in Großstädten einen wichtigen Teil des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV), im Allgemeinen als Ergänzung zum Schnellbahnverkehr. In Klein- und Mittelstädten bildet er häufig das einzige Angebot im innerstädtischen ÖPNV.

Charakteristisch für Stadtbussysteme sind kurze Haltestellenabstände, kurze Taktzeiten und im Tagesverlauf schwankende Nachfragenlinien. Die Fahrzeuge sind dementsprechend für schnellen Fahrgastwechsel und zügiges Beschleunigungsverhalten ausgelegt. Die Fahrzeugflotten werden auf die unterschiedlichen Anforderungen der städtischen Siedlungsstruktur ausgerichtet. Seit einigen Jahren werden neuartige Bedienkonzepte, wie beispielsweise Rufbusangebote und Quartierbusse mit Kleinbussen erprobt.

Darüber hinaus sind Stehplätze im Liniennahverkehr grundsätzlich gestattet. Ausnahmen können durch die Behörde verfügt werden, die dem jeweiligen Unternehmen die Konzession für den Betrieb erteilt hat (§22 Verordnung über den Betrieb von Kraftfahrunternehmen im Personenverkehr, BOKraft), wenn es sich nicht um Orts- oder Nachbarortsverkehr handelt. Bei stehenden Fahrgästen ist die zulässige Höchstgeschwindigkeit auf 60 km/h beschränkt (§3(2) Straßenverkehrsordnung, StVO).

Der **Regionalbusverkehr** verbindet ländliche Räume. Diese Linien weisen Verläufe von teilweise mehr als 50 Kilometern und häufig weite Haltestellenabstände auf. Weil die Fahrgäste länger in diesen Bussen verweilen, werden im Regionalbusverkehr Fahrzeuge mit höheren Komfortstandards



eingesetzt. Die Motorisierung und Bereifung dieser Fahrzeuge sind im Gegensatz zu Stadtbussen für höhere Geschwindigkeiten ausgelegt, um den Einsatz auf überörtlichen Straßen zu ermöglichen. Ebenso ist die Bestuhlung hinsichtlich Komfort und Sicherheitseigenschaften höheren Reisegeschwindigkeiten angepasst.

In vielen Regionen ist der Regionalbusverkehr eng mit dem Schülerverkehr verflochten. Dies schafft bei der Finanzierung und Erbringung der Transportleistungen sinnvolle Synergien, führt andererseits aber auch dazu, dass speziell in den Schulferien das häufig bereits geringe Angebot im Regionalbusverkehr noch weiter reduziert wird.

Busverkehr, der kein Linienverkehr ist, wird als **Gelegenheitsverkehr** bezeichnet. Dieser ist rechtlich beschränkt auf Ausflugsfahrten und Ferienreisen sowie auf Verkehr mit Mietomnibussen (§46(1) Personenbeförderungsgesetz, PBefG). Die Verkehrsleistung im Gelegenheitsverkehr ist im Gegensatz zum Linienverkehr seit Jahren rückläufig. Sie fiel zwischen 2004 und 2013 von 27,4 Mrd. Personenkilometern auf 19,0 Mrd. Personenkilometer pro Jahr (DIW 2015b). Die Fahrzeuge im Gelegenheitsverkehr

weisen sowohl hinsichtlich der Bestuhlung als auch der zusätzlichen Einrichtungen wie Bordtoilette und Kochmöglichkeit hohe Komfortmerkmale auf.

Zu einem besonders dynamischen Verkehrsegment hat sich in Deutschland in den letzten Jahren der **Linienfernverkehr** mit Fern- bzw. Reisebussen entwickelt. Im Sinne des Personenbeförderungsgesetzes (§42a in Verbindung mit §8 PBefG) ist unter Fernlinienbusverkehr die Durchführung gewerblicher Verbindungen auf festgelegten Linien zwischen weit entfernt liegenden Orten zu verstehen.

Innerhalb Deutschlands existierte bis zur Liberalisierung des Marktes im Januar 2013 praktisch kein Fernbusverkehr. Aus historischen Gründen beschränkte sich das Angebot auf Verbindungen von und nach Berlin. Darüber hinausgehend wurde zum Schutz des Schienenverkehrs eine restriktive Regulierungspolitik verfolgt, in der die etablierten Anbieter öffentlichen Verkehrs vor einer Neukonzessionierung ein Anhörungsrecht besaßen und damit den Markteintritt verhindern konnten. Die Neukonzessionierungen beschränkten sich daher auf spezialisierte Angebote,

wie etwa Flughafenzubringer. Folglich lag die erbrachte Verkehrsleistung im Fernbusverkehr im Jahr 2010 bei nur 841 Mio. Personenkilometern (Destatis 2016a). Dies entsprach einem Anteil von 2,3% an der gesamten Verkehrsleistung im öffentlichen Fernverkehr mit Bussen und Bahnen.

Die Regulierung im Fernverkehrsmarkt ist Anfang 2013 weitgehend entfallen. Genehmigungen können nun erteilt werden, wenn es sich bei der angebotenen Verbindung rechtlich um Fernverkehr handelt, also die Fahrweite 50 Kilometer überschreitet und die Fahrzeit mehr als eine Stunde beträgt. Damit bleibt der durch die Bundesländer mitfinanzierte ÖPNV weiterhin vor Wettbewerb geschützt.

In Folge der Deregulierung trat eine Vielzahl von Fernbusanbietern in den Markt. Dabei handelte es sich überwiegend um neu gegründete Unternehmen, die zusammen mit mittelständischen Busunternehmen Netze aufbauten oder einzelne Linien bedienten. Nach einer Phase der Marktoffenung setzte rasch eine Konsolidierung ein. Heute wird der Fernbusmarkt von wenigen großen Anbietern bestimmt. Der mittlere Auslastungsgrad im Fernbusverkehr lag zunächst deutlich höher als bei der Bahn, ist aber im Zuge der Angebotsausweitung auf etwa 50% gefallen (BAG 2016).

Heute werden mehr als 9.000 Fahrten wöchentlich auf über 300 Fernbus-Verbindungen angeboten (BAG 2016). Die Netzdichte ist dabei zwischen den Großstädten sehr hoch; nur noch wenige Großstädte über 100.000 Einwohnern werden gegenwärtig nicht von Fernbussen bedient. Aber auch unter den mittleren Städten zwischen 50.000 und 100.000 Einwohnern wird etwa die Hälfte angefahren. Der ländliche Raum ist dagegen nur indirekt über Oberzentren an Fernbusnetze angebunden.

Die Zahl der beförderten Fahrgäste erreichte 2014 15,6 Mio. Damit konnte die Menge gegenüber einem Ausgangswert von 2,0 Mio. im Jahr 2010 annähernd verachtfacht werden. Die erbrachte Beförderungsleistung der Fernbusse lag 2014 bei 5,4 Mrd. Personenkilometern und damit immer noch deutlich weniger als 10% der aktuellen ÖSPV-Verkehrsleistung

(Destatis 2015a). Für 2015 wird ein Anstieg auf 20 Mio. Fahrgäste erwartet (Destatis 2016b). Bei einer angenommenen konstanten mittleren Fahrtweite von 330 km pro Fahrgast ergibt sich daraus ein weiterer Anstieg der Verkehrsleistung auf 6,6 Mrd. Personenkilometer.

PROJEKTION FÜR DEN BUSVERKEHR

Basis für die Abschätzung der Entwicklung des Busverkehrs bis 2040 ist die aktuelle Bundesverkehrsprognose (BVU et al. 2014). Danach geht das Verkehrsaufkommen im ÖSPV bis 2030 von 9,3 Mrd. Fahrgästen im Basisjahr 2010 auf gut 9 Mrd. Personenkilometer in 2030 leicht zurück. Dagegen steigt die Verkehrsleistung des ÖSPV von 78,1 Mrd. Personenkilometer (2010) auf 82,8 Mrd. Personenkilometer (2030) an.

Im Rahmen der Verkehrsprognose 2030 wurden die Busse wieder von diesem Wert separiert. Für die Busse des Nahverkehrs wird in der Verkehrsprognose 2030 von einem Rückgang der Verkehrsleistung ausgegangen. Während sie 2010 noch bei knapp 39 Mrd. Personenkilometern lag, wird bis 2030 ein Rückgang auf 37 Mrd. Personenkilometer erwartet (BVU et al. 2014). Dies entspricht einem Rückgang von 0,25% p.a. Da Prognosen über das Jahr 2030 hinaus nicht vorliegen, werden die von der Bundesverkehrsprognose 2030 prognostizierten Entwicklungspfade über 2030 hinaus linear fortgeschrieben. Daraus ergibt sich für 2040 eine Verkehrsleistung von geschätzt 36 Mrd. Personenkilometern im Nahverkehr mit Bussen.

Für den Gelegenheitsverkehr wird durch die Verfügbarkeit günstiger Pauschal-Flugreisen ebenfalls ein Rückgang der Verkehrsleistung erwartet. Dieser wird sich auf 2,8 Mrd. Personenkilometer, entsprechend 12%, belaufen. Der prozentuale Rückgang ist damit noch stärker als im Nahverkehr. Dass trotz dieses Rückgangs der Verkehrsleistung im ÖPNV dennoch die Gesamtverkehrsleistung des ÖSPV steigt, liegt am wachsenden Fernbusmarkt. Die Zahl der von Fernbussen beförderten Personen steigt von 3 Mio. im Jahr 2010 auf 25 Mio., die Fernbus-Verkehrsleistung wächst von 1,2 auf 8,8 Mrd. Personenkilometer bis 2030 (BVU et al. 2014).

16 VERKEHRSLEISTUNG FERNBUSSE MIT PROJEKTION BIS 2040

In Mio. Personenkilometer



Für die Zeit nach 2030 wird angenommen, dass der Fernbus bis 2040 einem moderaten linearen Wachstumspfad folgt (siehe Abbildung 16). Grund für das vergleichsweise moderate Wachstum des Fernbusses ist zum einen das Basisjahr 2010 – gerade nach 2010 entfaltet der Fernbusmarkt eine hohe Dynamik. Auf der anderen Seite hat intensiver Wettbewerb bei niedrigen Kilometererlösen und gleichzeitig steigenden Kosten – zum Beispiel durch verpflichtende Standards zur Barrierefreiheit – das Wachstum des Fernbusverkehrs zuletzt deutlich gebremst. Für 2040 ergibt sich für den Fernbusverkehr demnach eine Verkehrsleistung von ca. 10,3 Mrd. Personenkilometern.

Das Wachstum des Fernbusmarktes kompensiert bezogen auf die Verkehrs- und Fahrleistung jedoch den Rückgang im Nahverkehr und im Gelegenheitsverkehr. Für die gesamte Fahrleistung der Busse wird in der Verkehrsprognose 2030 zwischen 2010 und 2030 von einem Anstieg von 3,3 auf 3,5 Mrd. Fahrzeugkilometer ausgegangen. Dies entspricht einem jährlichen Anstieg von 0,3% (BVU et al. 2014). Analog zu den Verkehrsleistungen wird auch hier von einer linearen Fortsetzung dieses Wachstums ausgegangen. Demnach ist ein weiteres moderates Wachstum der Fahrleistung des gesamten Busverkehrs auf 3,4 Mrd. Fahrzeugkilometer im Jahr 2040 zu erwarten.

2 TYPEN, FLOTTEN & NEUZULASSUNGEN VON NUTZFAHRZEUGEN

Straßengüterverkehr und öffentlicher Straßenpersonenverkehr wird durch motorisierte Kraftfahrzeuge erbracht. Gegenstand einer Lkw- bzw. Nutzfahrzeug-Studie sind folglich die Kraftfahrzeuge, die Güter und Personen im Straßenverkehr befördern; namentlich sind dies insbesondere Lkw und Busse. Eine weitere Nutzfahrzeuggruppe, die besondere Transportaufgaben im Straßenverkehr wahrnimmt, sind die Sonstigen Kraftfahrzeuge.

Zunächst erfolgt ein kurzer Überblick über die wichtigsten Fahrzeugtypen im Nutzfahrzeugbereich und deren Klassifizierung. Um neue und relevante Trends bei Nutzfahrzeugen erkennen zu können, werden anschließend die wichtigsten Nutzfahrzeugklassen jeweils nach Bestand und Neuzulassungen untersucht. Von besonderem Interesse sind darüber hinaus Entwicklungen bei Antrieben und Kraftstoffen sowie bei den Schadstoffklassen (Euro-Normen) von Nutzfahrzeugen.

2.1 NUTZFAHRZEUGKLASSEN

Im Gegensatz zu den Pkw sind Nutzfahrzeuge solche Kraftfahrzeuge, die nach ihrer Bauart und Einrichtung zum Transport von Gütern, zur Beförderung von Personen oder zum Ziehen von Anhängerfahrzeugen bestimmt sind. Alle Kraftfahrzeuge werden in der Europäischen Union einheitlich gemäß EU-Rahmenrichtlinie 46/2007/EG klassifiziert. Zur einheitlichen Erfassung in den Fahrzeugregistern werden die Kraftfahrzeuge in Deutschland nach dem Verzeichnis zur Systematisierung von Kraftfahrzeugen und ihren Anhängern untergliedert (EP/Rat 2007a, KBA 2015a).

Zur Beförderung von Gütern werden zwei Arten von Kraftfahrzeugen eingesetzt: Lastkraftwagen und Sattelzugmaschinen. Lkw transportieren die Ladung auf der eigenen Ladefläche; zudem können sie Lasten auf einem Anhänger ziehen (Gliederzüge). Sattelzugmaschinen sind dagegen nicht selbst zum Transport von Gütern bestimmt, sondern Zugmaschinen.

Das häufigste, geläufigste und relevanteste Kriterium für die Unterscheidung von Lastkraftwagen ist die zulässige Gesamtmasse oder das zulässige Gesamtgewicht (zGG). Weitere fahrzeugstatistische Klassifizierungen in der Kraftfahrzeugstatistik beziehen sich auf Alter und Halter der Fahrzeuge,

auf ihre Nutzlast, die Motorisierung oder Kraftstoffart.

Im Besonderen werden in der europäischen Fahrzeugstatistik bei Lkw die Gewichtsklassen bis 3,5 Tonnen (N1), über 3,5 bis 12 Tonnen (N2) und über 12 Tonnen (N3) zulässiges Gesamtgewicht unterschieden. Fahrzeuge der Klasse N2 stellen das Rückgrat der Auslieferung im Nah- und Regionalverkehr. Im Rahmen dieser Studie relevant sind deshalb die zusätzlichen Gewichtsgrenzen bis und ab 7,5 Tonnen. Haupteinsatzgebiet der schweren Lkw der Klasse N3 als Lastzugkombination mit Zugfahrzeug (Motorwagen) und Anhänger ist der Güterfernverkehr. Als Einzelfahrzeug wird er im Baustellenverkehr eingesetzt. Die inzwischen bedeutendste Lkw-Gewichtsklasse sind die Fahrzeuge bis 3,5 Tonnen (N1), die sich zu einem bedeutenden Anteil aus Pkw-ähnlichen Fahrzeugen zusammensetzt. N1-Fahrzeuge werden als leichte Nutzfahrzeuge bezeichnet und insbesondere für Dienstleistungsfahrten und bei der Warenauslieferung verwendet.

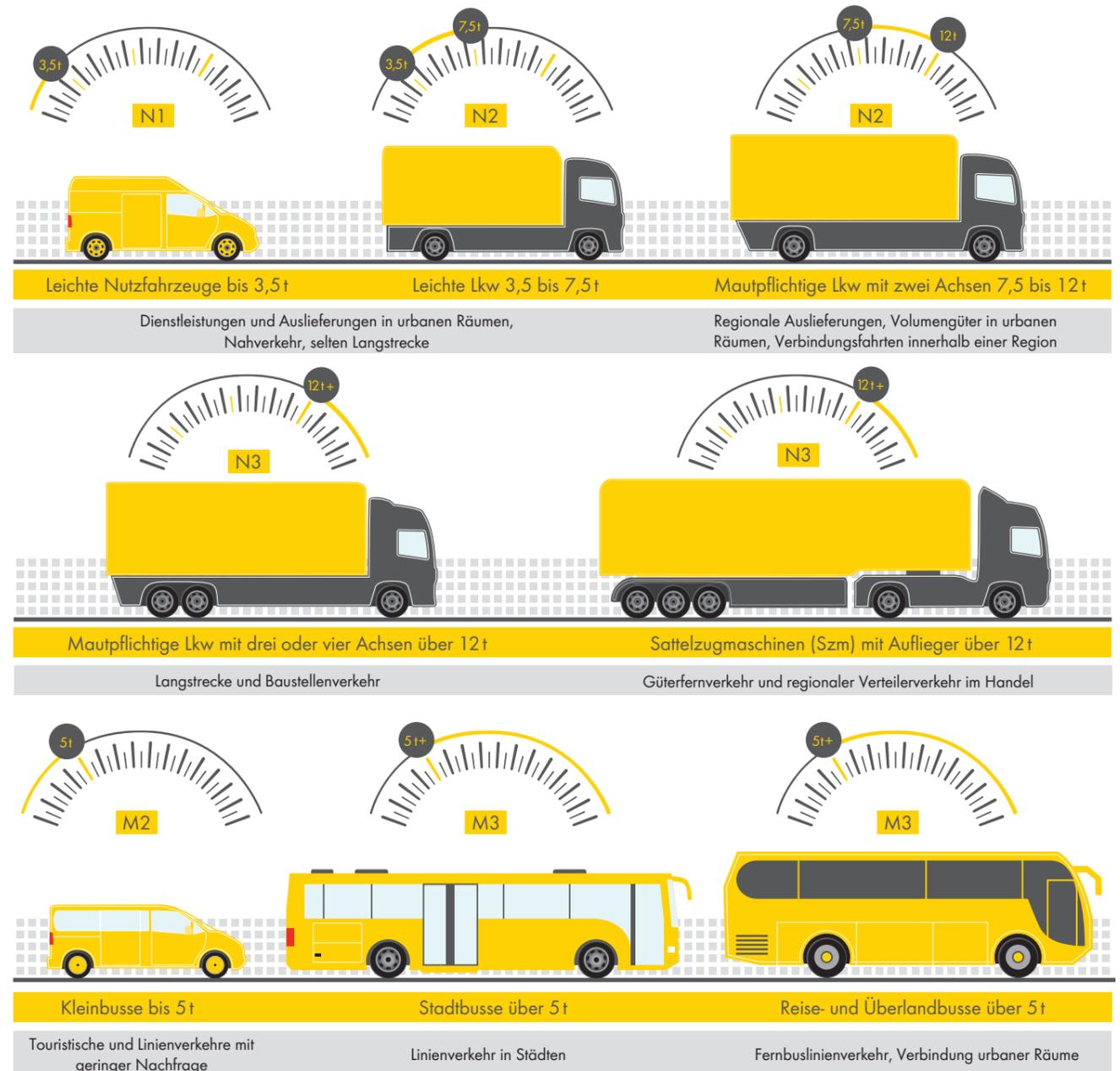
Die Gruppe der Zugmaschinen (T) umfasst land- und forstwirtschaftliche Zugmaschinen auf Rädern, die gewöhnlichen Straßenzugmaschinen und die hier relevanten Sattelzugmaschinen. Besonderheit der

Sattelzugmaschinen ist das Mitführen der Sattelanhänger, wobei ein wesentlicher Teil des Gewichtes des Sattelanhängers von der Sattelzugmaschine getragen wird. Sattelzugmaschinen werden vor allem im schweren und Straßengüterfernverkehr eingesetzt.

Kraftfahrzeuge zur Beförderung von Personen werden in der Fahrzeugklasse M erfasst. Sind die Fahrzeuge nach ihrer Bauart und Einrichtung zur Beförderung von mehr als neun Personen (einschließlich des Fahrzeugführers) und ihres Reisegepäcks bestimmt, handelt es sich um Kraftomnibusse. Sie werden entsprechend der zulässigen Gesamtmasse in die Gruppe bis 5 Tonnen (M2) und mehr als 5 Tonnen (M3) unterschieden. Fahrzeuge zur Beförderung von bis zu neun Personen sind Pkw (M1); diese werden hier nicht weiter betrachtet.

Die Klasse der Sonstigen Kraftfahrzeuge umfasst Fahrzeuge, die aufgrund ihres Gesamtgewichtes den europäischen Fahrzeugklassen zugeordnet werden können, deren Fahrzeug- und Aufbauarten aber aufgrund ihrer Beschaffenheit weder den Pkw noch den Kraftomnibussen oder Lkw zugeordnet werden können. Zu den Sonstigen Fahrzeugen zählen beispielsweise Fahrzeuge von Feuerwehr, Polizei

17 LKW UND BUSSE: FAHRZEUGKLASSEN UND TYPEN



und Zivilschutz, Abfallsammelfahrzeuge, Straßenkehrer und Kanalreiniger, Verkaufsfahrzeuge und Hubarbeitsbühnen.

Nicht im Rahmen dieser Studie behandelte Nutzfahrzeuge sind die Selbstfahrenden Arbeitsmaschinen, die nach ihrer Bauart und ihrer besonders mit dem Fahrzeug fest verbundenen Einrichtung zur Verrichtung von Arbeiten bestimmt und geeignet sind. Zu dieser Klasse zählen vor allem Arbeitsmaschinen für Erdarbeiten und Straßenbau sowie Arbeitsmaschinen und -geräte für Land- oder Forstwirtschaft.

2.2 LKW UND SATTELZUGMASCHINEN

Zum 31.12. 2014 waren weltweit 223,4 Mio. Nutzfahrzeuge registriert; darunter fallen Lkw ebenso wie Busse, aber keine agrar- und forstwirtschaftlichen Zugmaschinen. Die größten Nutzfahrzeugflotten laufen in Asien, und zwar in China mit 62,9 Mio. Fahrzeugen sowie in Japan und Indien mit 14,9 und 10,9 Mio. Fahrzeugen. Die nächstgrößeren Nutzfahrzeugflotten befinden sich in Amerika: In Mexiko mit 10,4 Mio. Fahrzeugen und in den USA mit

7,7 Mio. Fahrzeugen (Light Vehicles). In der Russischen Föderation fahren 9,7 Mio. Nutzfahrzeuge (VDA 2015).

LKW IN EUROPA

Bestand
In den EU-28-Ländern waren 2013 35,6 Mio. Lkw registriert. Frankreich hat mit Abstand die größte Fahrzeugflotte mit rund 6,6 Mio. Einheiten, gefolgt von Spanien, Italien, Großbritannien und Polen. Der

Bestand der deutschen Lkw liegt mit 2,8 Mio. Fahrzeugen auf dem sechsten Platz. Seit Beginn der Finanz- und Wirtschaftskrise (2008) ist der Lkw-Bestand in diesen Ländern nur noch langsam gestiegen, und zwar um 1,1 Mio. Fahrzeuge. Seit Mitte der 1990er Jahre ist die europäische Lkw-Flotte insgesamt um über 50% gewachsen; besonders stark fiel das Wachstum der Lkw-Flotten in Ost- und Südosteuropa aus, wo sich die Bestände in den vergangenen 15 bis 20 Jahren oftmals verdoppelten (EC 2015).

Alle europäischen Nutzfahrzeugflotten werden von den leichten Nutzfahrzeugen bis 3,5 Tonnen dominiert. Während für Deutschland, Polen und Italien das Verhältnis leichter Nutzfahrzeuge zu Lkw und Sattelzugmaschinen etwa 70:30 beträgt, weisen Frankreich, Spanien und Großbritannien ein Verhältnis von mehr als 85:15 auf. Mit ca. 800.000 Fahrzeugen fahren in Polen, Italien und Deutschland die größten Flotten an Lkw und Sattelzugmaschinen.

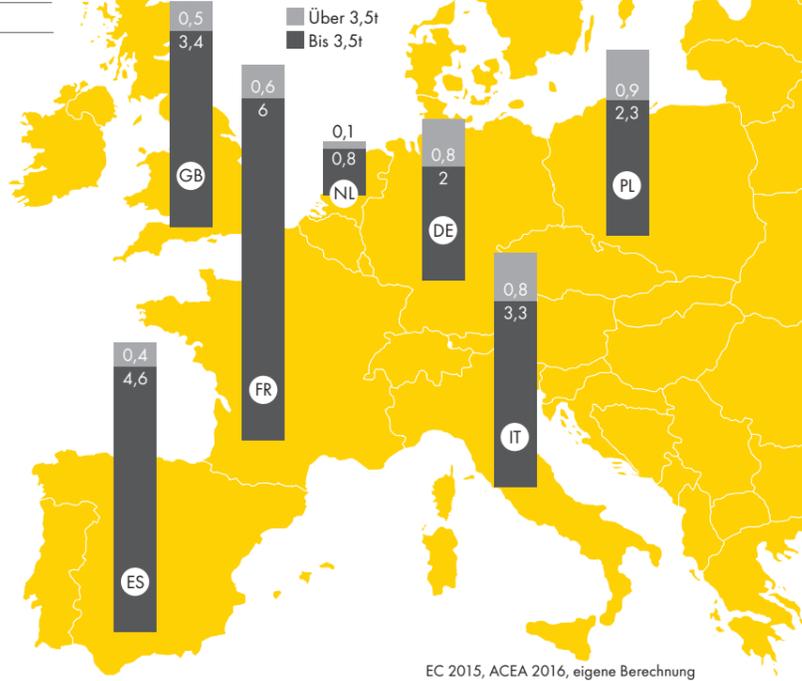
Lkw-Neuzulassungen

Die Zulassungszahlen für Lkw spiegeln weit stärker als die Bestandszahlen den stark von der wirtschaftlichen Entwicklung abhängigen Straßengüterverkehr wider. Die Neuzulassungen waren infolge der Finanz- und Wirtschaftskrise stark zurückgegangen. Obwohl die Zulassungen seitdem in den meisten Ländern wieder gestiegen sind, ist das Vorkrisenniveau der damaligen EU-27 bis zum Berichtsjahr 2015 in der EU-28 noch nicht wieder erreicht; im Jahr 2015 lagen die Neuzulassungen über alle Lkw-Kategorien mit 2 Mio. Neufahrzeugen mehr als 350.000 Stück darunter.

Über alle Lkw-Fahrzeugklassen, das heißt leichte Nutzfahrzeuge und Lkw über 3,5t zusammen, verzeichnen Frankreich und Großbritannien zuletzt (2015) die höchsten Neuzulassungszahlen mit jeweils über 400.000 Fahrzeugen pro Jahr. An dritter Stelle folgt bereits Deutschland mit über 300.000 Einheiten. Spanien und Italien, deren Bestand größer als der Deutschlands ist, weisen dagegen immer noch geringere Neuzulassungen als Deutschland aus.

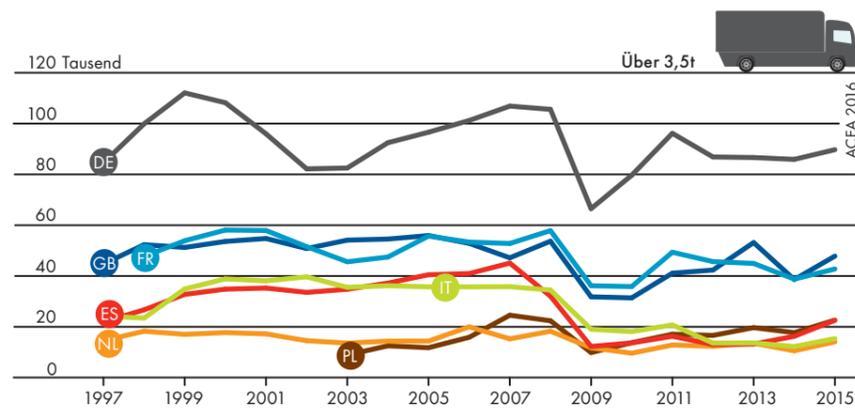
18 GRÖSSTE LKW-FLOTTEN IN DER EU 2013

In Mio.

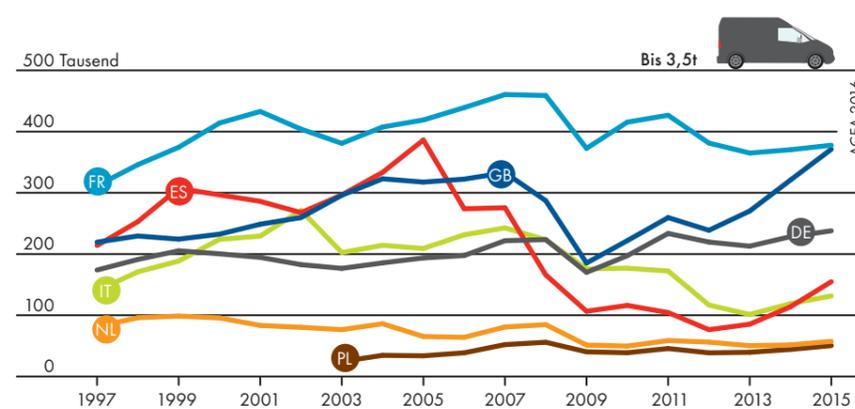


EC 2015, ACEA 2016, eigene Berechnung

19 NEUZULASSUNGEN LKW ÜBER 3,5t IN AUSGEWÄHLTEN EU-LÄNDERN



20 NEUZULASSUNGEN LKW BIS 3,5t IN AUSGEWÄHLTEN EU-LÄNDERN



Während der Anteil des deutschen Lkw-Marktes am EU-28-Markt für leichte Nutzfahrzeuge bis 3,5 Tonnen bei weniger als 15% liegt, ist die Bedeutung Deutschlands für die Lkw und Sattelzüge über 3,5 Tonnen mit einem Neufahrzeuganteil von über 25% groß.

Bei den leichten Nutzfahrzeugen liegt Frankreich durchweg vorn. Allerdings werden in dieser Fahrzeugklasse nur in Großbritannien und Deutschland die vergangenen Zulassungszahlen überschritten und in Polen fast wieder erreicht. Schließlich fällt auf, dass die Absatzzahlen für leichte Nutzfahrzeuge weniger stark schwanken als diejenigen für Lkw und Sattelzüge.

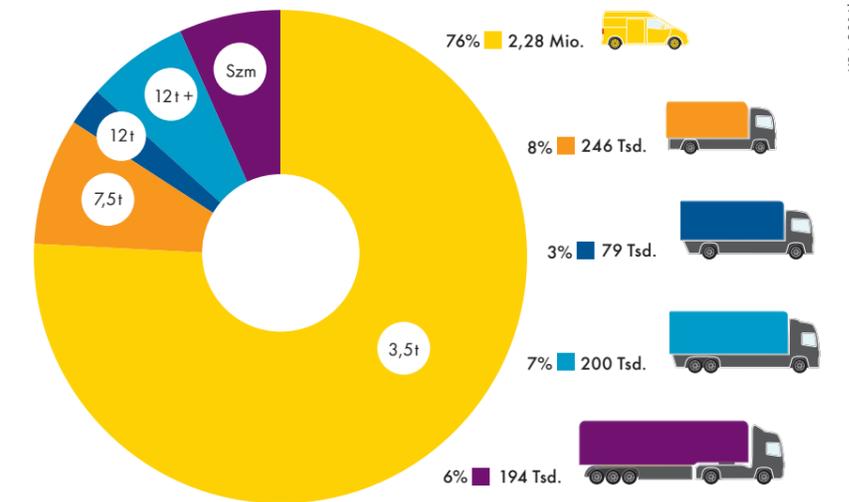
LKW IN DEUTSCHLAND

Lkw-Bestand

Am 1.1. 2016 waren in Deutschland 2.995.166 Lkw und Sattelzugmaschinen registriert. Der Klasse der leichten Nutzfahrzeuge gehören 2,28 Mio. Fahrzeuge an, das entspricht drei Viertel des Bestands. Zu der Klasse 3,5 bis 7,5 Tonnen gehören 246.000 Fahrzeuge (8%). Von geringem Umfang ist mit 79.000 Fahrzeugen die Klasse von 7,5 bis 12 Tonnen. Sie stellen weniger als 3% des Bestandes. Die Fahrzeuge über 12 Tonnen werden unter anderem als Motorwagen in Gliederzügen eingesetzt. Mit 200.000 Einheiten (7%) sind sie ähnlich stark vertreten wie die Sattelzugmaschinen mit 194.000 Fahrzeugen (6%).

21 BESTAND VON LKW UND SZM IN DEUTSCHLAND NACH KLASSEN

Zum 1.1.2016



KBA 2016b

Bei der Betrachtung der Entwicklung des Bestandes von Lkw und Sattelzugmaschinen ist der Anstieg des Gesamtbestandes besonders auffällig. Deutsche Einheit, EU-Osterweiterung sowie Liberalisierung des EU-Binnenmarktes für Transportdienstleistungen führten zu einer steigenden Transportnachfrage und damit letztendlich bis zum Jahr 2002 zu einem kontinuierlichen Wachstum des inländischen Fahrzeugbestandes.

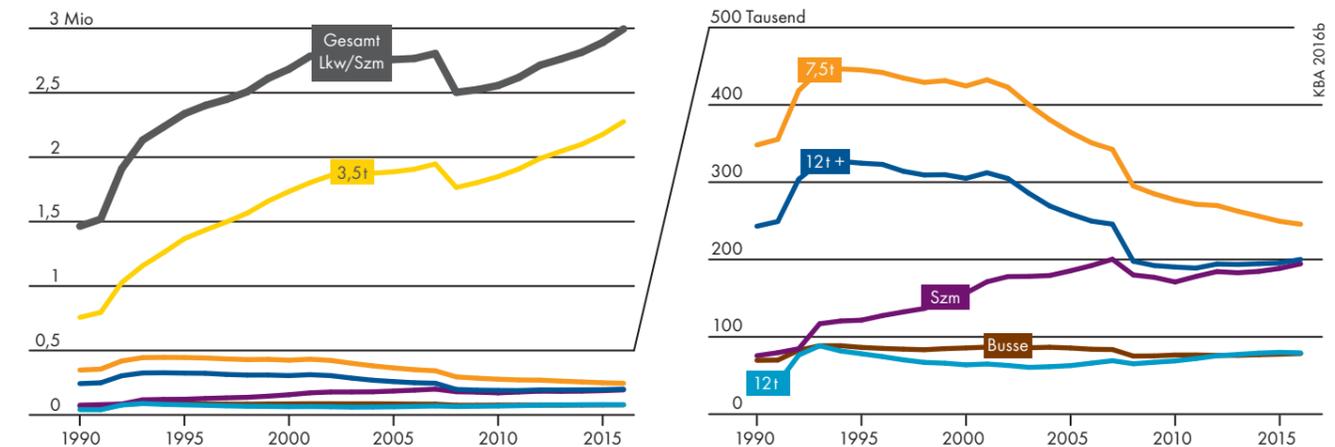
Im Gefolge einer schwächeren Wirtschaftsentwicklung in Deutschland stagnierte der Bestand in den Folgejahren. Ab dem Jahr 2008 wurden zudem nach einer Statistikumstellung alle vorübergehend stillgelegten Fahrzeuge nicht mehr erfasst; hierdurch

sank der Fahrzeugbestand um etwa 12% und wird um 340.000 Fahrzeuge niedriger ausgewiesen (KBA 2009). Zusätzlich wurde das Flottenwachstum durch die globale Finanz- und Wirtschaftskrise 2009 gedämpft, von 2,3% auf 1% im Jahr 2008. Seitdem wächst der Lkw-Bestand kontinuierlich weiter – und hat inzwischen das Vorkrisenniveau (einschließlich der Statistikumstellung) übertraffen.

Die Bestandsentwicklung wird geprägt durch die leichten Nutzfahrzeuge, die von 760.000 Fahrzeugen 1990 auf 1,95 Mio. Fahrzeuge 2007 und weiter auf 2,28 Mio. Fahrzeuge zu Beginn des Jahres 2016 gestiegen ist. Das entspricht für die vergangenen 25 Jahre einer Verdreifachung

22 ENTWICKLUNG DES BESTANDS IN DEUTSCHLAND

Veränderte Berechnungsgrundlage ab 2007



KBA 2016b

der Einheiten und einem durchschnittlichen jährlichen Wachstum von 4,6% und für die Jahre von 2008 bis 2015 (ohne vorübergehend stillgelegte Fahrzeuge) noch von 3,2%.

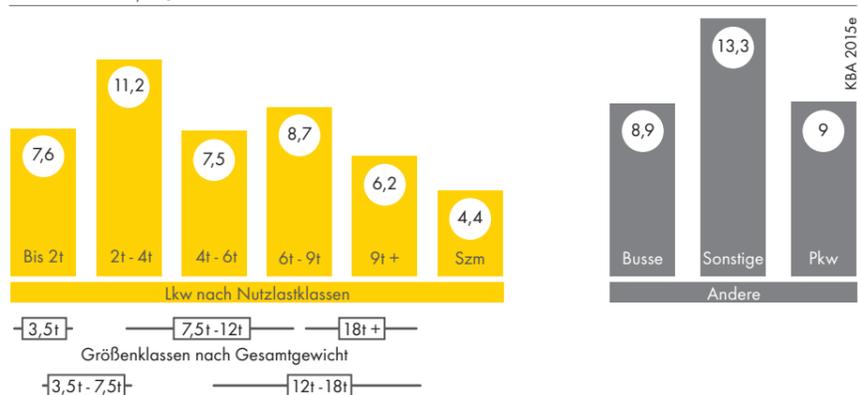
Ein vergleichbares, aber nicht annähernd so starkes Wachstum ist bei der Klasse der Sattelzugmaschinen zu erkennen. Von 76.000 Fahrzeugen im Jahr 1990 stieg der Bestand auf 200.000 Fahrzeuge 2007 und verzeichnet 2015 194.000 Fahrzeuge. Dies entspricht einem durchschnittlichen jährlichen Wachstum von 3,6% seit 1990 bis heute und für die letzten acht Jahre nach der Statistikstellung von 1%.

Mit 3% durchschnittlich jährlichen Wachstums wuchs in den letzten acht Jahren der Bestand der Lkw von 7,5 bis 12 Tonnen. Hervorgerufen wurde dieser Anstieg unter anderem durch eine nachträgliche Verringerung des zulässigen Gesamtgewichts (Ablastung) infolge der Lkw-Maut für Lkw ab 12 Tonnen. Nach einer Verdoppelung des Bestandes nach der Deutschen Einheit auf 88.000 Lkw reduzierte sich der Bestand wieder auf 60.000 Einheiten und wächst seit 2003 auf heute 80.000 Fahrzeuge.

Die Bestandszahlen der Klassen von 3,5 bis 7,5 Tonnen und über 12 Tonnen sind nach einem starken Anstieg in den frühen 1990er Jahren gesunken und verzeichnen umstellungsbereinigt im Jahr 2015 einen um 15% geringeren und 2% höheren

23 DURCHSCHNITTSALTER DES FAHRZEUG-BESTANDS IN DEUTSCHLAND

Zum 1.1.2015, in Jahren



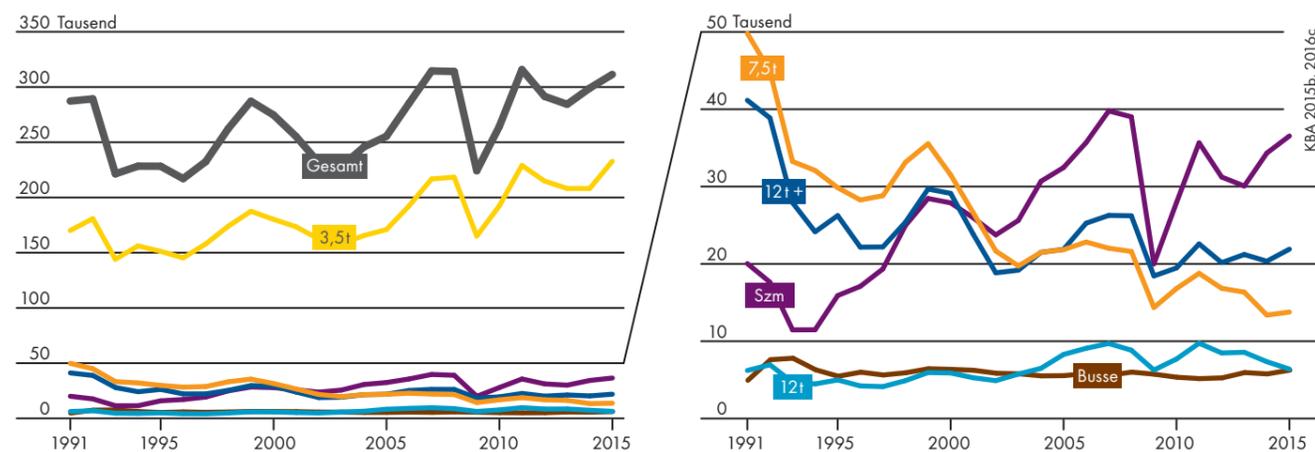
Bestand gegenüber 1990, und zwar 245.000 und 200.000 Fahrzeuge. Die Lkw über 12 Tonnen liegen seit dem Jahr 2008 stabil bei knapp unter 200.000 Fahrzeugen, mit zuletzt wieder leicht ansteigendem Trend.

In Bezug auf das Fahrzeugalter lässt sich feststellen, dass sich dieses bei Lkw und Sattelzugmaschinen - im Gegensatz zu den Pkw mit inzwischen über neun Jahren - in den vergangenen zehn Jahren kaum noch verändert hat. Lkw sind im Durchschnitt etwas jünger als acht Jahre (7,7 Jahre). Auffällig ist hierbei das hohe Durchschnittsalter von zum Teil deutlich über zehn Jahren von kleinen und mittleren Nahverkehrs-Lkw mit Nutzlasten von 2 bis 4 Tonnen. Das jüngste Fahrzeugsegment im Bereich Straßengüterfahrzeuge sind die Sattelzugmaschinen mit einem Durchschnittsalter von nur 4,4 Jahren. Dabei sind die im Straßengüterfernverkehr

eingesetzten Lkw mit Motorleistungen von 300 kW und mehr im Durchschnitt sogar noch jünger als vier Jahre (KBA 2015e). Insgesamt spiegeln die Bestandszahlen den Trend einer höheren Transportnachfrage. Obgleich ein wachsender Teil der steigenden Nachfrage im Straßengüterverkehr durch gebietsfremde Fernverkehrs-Lkw gedeckt wird, legt der inländische Sattelzug-Bestand deutlich zu. Zum anderen reflektiert der Trend zu leichten Nutzfahrzeugen eine höhere Transportnachfrage durch abnehmende Fertigungstiefen und immer kleinteiligere Sendungsgrößen.

Die Ausdehnung der Mautpflicht hinunter auf 7,5-Tonner dürfte sich dämpfend auf die Lkw-Klasse von 7,5 bis 12 Tonnen auswirken, während die leichten Lkw von 3,5 bis 7,5 Tonnen weiter unter Druck der flexiblen leichten Nutzfahrzeuge stehen. Das niedrige Durchschnittsalter der Sattelzugma-

24 ENTWICKLUNG DER NEUZULASSUNGEN IN DEUTSCHLAND



schinen ist - neben den hohen Fahrleistungen - schließlich auch auf die emissionsklassenabhängige Tarifgestaltung des deutschen Mautgesetzes zurückzuführen.

Lkw-Neuzulassungen

Die Neuzulassungen von Lkw und Sattelzugmaschinen in Deutschland schwanken viel stärker und spiegeln damit deutlicher die wirtschaftliche Entwicklung sowie die daraus folgende Güterverkehrsnachfrage wider als die Fahrzeugbestände. Die Finanz- und Wirtschaftskrise wirkte sich 2009 mit einem Rückgang der Neuzulassungen um fast 30% aus, bei der Klasse der leichten Nutzfahrzeuge um ein knappes Viertel und insbesondere bei den Sattelzugmaschinen um nahezu 50%. Seit 1991 werden jährlich durchschnittlich 266.000 Lkw und Sattelzugmaschinen neu zugelassen. Die höchsten Werte liegen bei 315.000 Fahrzeugen im Jahr 2011, der niedrigste Wert bei 217.000 Fahrzeugen 1996 und damit noch geringer als 2009. 2015 lag die Zahl der gesamten Neuzulassungen bereits wieder bei 311.000 Fahrzeugen.

Auch die Zahl der Neuzulassungen ist geprägt von den leichten Nutzfahrzeugen, die 2015 mit 233.000 Einheiten einen Anteil von drei Viertel der neuen Fahrzeuge haben. Der Anteil der leichten Nutzfahrzeuge an den Neuzulassungen lag 1991 bei 60% und stieg auf 70% im Jahr 2002 und schließlich weiter auf den Wert von 2015.

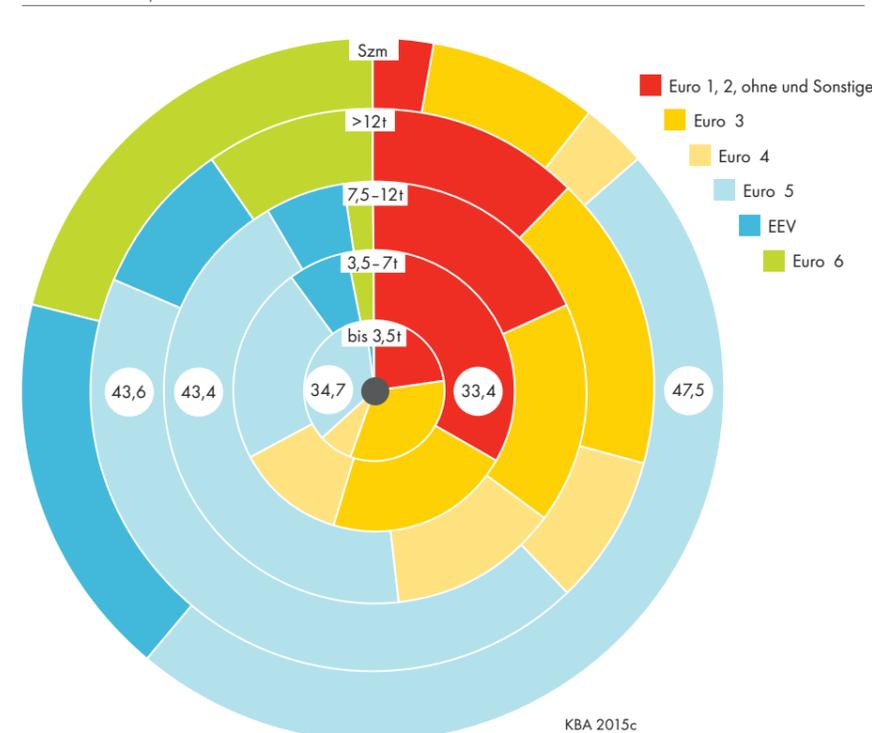
Mit 37.000 Fahrzeugen und einem Anteil von 12% an den Neuzulassungen stellen die Sattelzugmaschinen heute die zweitgrößte Gruppe. Ihr Anteil lag 1991 bei 7% und 20.000 Fahrzeugen.

Die Neuzulassungen der Lkw 3,5 bis 7,5 Tonnen und über 12 Tonnen sanken seit 1991 von 50.000 und 41.000 Einheiten auf 14.000 und 22.000 Einheiten 2015. Ihr Anteil betrug 4% und 7%. Wie im Bestand weisen die Neuzulassungen der Lkw über 12 Tonnen in den letzten Jahren relativ konstante Neuzulassungszahlen auf.

Den geringsten Anteil mit 2% und 6394 Einheiten im Jahr 2015 hielt die Gruppe der Lkw 7,5 bis 12 Tonnen. Durchschnittlich

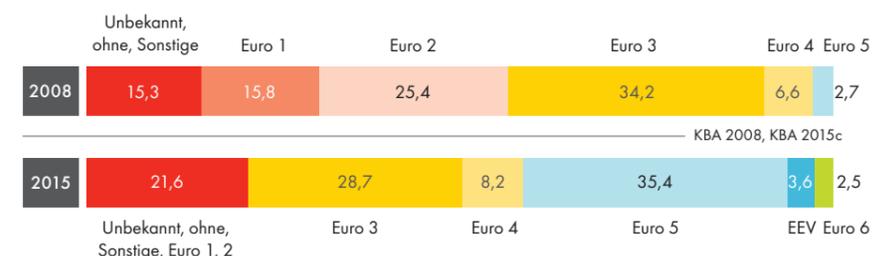
25 LKW-BESTAND NACH EMISSIONSKLASSEN

Zum 1.1.2015, Anteile in Prozent



26 LKW-BESTAND NACH EMISSIONSKLASSEN

2008 und 2015, Anteile in Prozent



wurden von dieser Klasse seit 1991 jährlich nur 6.600 Fahrzeuge neu zugelassen.

Die Zahl der Neuzulassungen im Verhältnis zum Bestand zeigt auch den Zeitbedarf für eine Lkw-Flottenerneuerung an: Bei rund 300.000 Neuzulassungen erneuerte sich die gesamte deutsche Lkw-Flotte in etwa zehn Jahren. Während bei den Sattelzügen aber nahezu ein Fünftel aller Fahrzeuge jährlich neu zugelassen werden, sind es bei den kleinen Nahverkehrs-Lkw gerade einmal 5%. Entsprechend erneuert sich die Sattelzugflotte in nur fünf Jahren. Bei allen anderen Fahrzeugkategorien dauert es erheblich länger - besonders bei Nahver-

kehrs-Lkw, wie sie häufig im urbanen und regionalen Lieferverkehr eingesetzt werden.

EURO-KLASSEN VON LKW

Der Straßenverkehr ist eine bedeutende Quelle von lokalen Emissionen, insbesondere von Luftschadstoffen. Auch Lkw verursachen lokale Emissionen. Lkw-Motoren nutzen Verbrennungsmotoren, die Kraftstoffe verbrennen und dabei entstehen Abgasemissionen.

Um die Luftschadstoffemissionen des Straßenverkehrs zu verringern, hat der Gesetzgeber in den frühen 1990er Jahren Abgasgrenzwerte für alle Fahrzeugklassen,

die so genannten Euro-Normen oder Schadstoffklassen, eingeführt. Kraftfahrzeuge müssen für ihre Typgenehmigung und Neuzulassung ab einem Stichtag einen bestimmten Euro-Standard einhalten. Die Euro-Normen setzen fahrleistungsabhängige Abgasgrenzwerte für Luftschadstoffe fest. Sie wurden immer weiter verschärft. Inzwischen lautet die aktuelle Norm Euro 6 (leichte Nutzfahrzeuge und Pkw) und Euro VI (Lkw und Sattelzüge) (vgl. Kapitel 3). Zur Vereinfachung der fahrzeugstatistischen Darstellung wird in diesem Kapitel nur noch die arabische Bezifferung genutzt.

Die Klassifizierung von Lkw anhand ihrer Luftschadstoffemissionen (Euro-Normen) ist nicht nur ein wichtiges fahrzeugtechnisches und ökologisches Unterscheidungsmerkmal. Euro-Normen besitzen für Nutzfahrzeughalter auch große wirtschaftliche Relevanz, zum Beispiel bei der Einfahrt in Umweltzonen, bei der Kraftfahrzeugsteuer sowie insbesondere für die Autobahn-Maut, deren Tarife im ökologischen Teil nach Euro-Normen gestaffelt sind.

Euro-Klassen im Bestand

Für alle Straßengüterfahrzeuge (leichte Nutzfahrzeuge, Lkw und Sattelzüge) zeigt sich folgendes Bild: Machten am 1.1.2008 – dem ersten Jahr nach der Statistikumstellung – die Fahrzeuge ohne Schadstoffklassen und bis Euro 3 mit 91 % den überwiegenden Anteil am Bestand aus, so hat sich dieser Anteil bis 2015 auf 50 % verringert. 2015 erreichen 29 % den Euro-2-Standard, 8 % Euro 4 und 35 % die Euro 5, die 2008 für die leichten Nutzfahrzeuge noch nicht verpflichtend war. Euro 6 hat mit 2,5 % noch eine geringe Bedeutung.

Die 2000 eingeführte freiwillige Kategorie für „Besonders umweltfreundliche Fahrzeuge“ (Enhanced Environmentally Friendly Vehicle, EEV), übertraf die 2008/2009 eingeführte Euro-5-Norm und war damit bis zur Einführung von Euro 6 der anspruchsvollste europäische Abgasstandard. EEV verzeichnete mit 111.740 Fahrzeugen und einem Anteil von fast 4 % ihren höchsten Bestand am 1.1. 2014. Mit Euro 6 ist der EEV-Standard abgastechisch überholt worden, sodass der EEV-Bestand inzwischen wieder sinkt.

Allerdings unterscheiden sich die Euro-Anteile in den Größenklassen beträchtlich: Angereizt von einer (teilweise) nach Euro-Standards gestaffelten Lkw-Maut fährt der Straßengüterfernverkehr tendenziell mit Fahrzeugen des Standards Euro 5, EEV sowie Euro 6. Bei den Sattelzugmaschinen machten diese Fahrzeuge 86 % des Bestandes aus, bei der Fahrzeugklasse der Lkw über 12 Tonnen waren es immerhin noch 62 %. Bei den Nahverkehrs-Lkw von 7,5 bis 12 Tonnen machen Euro 5 bis Euro 6 nur noch gut die Hälfte des Fahrzeugbestandes aus (52 %). Leichte Nutzfahrzeuge und vor allem kleine Nahverkehrs-Lkw fahren dagegen noch überwiegend Fahrzeuge mit Standards von Euro 4 und schlechter.

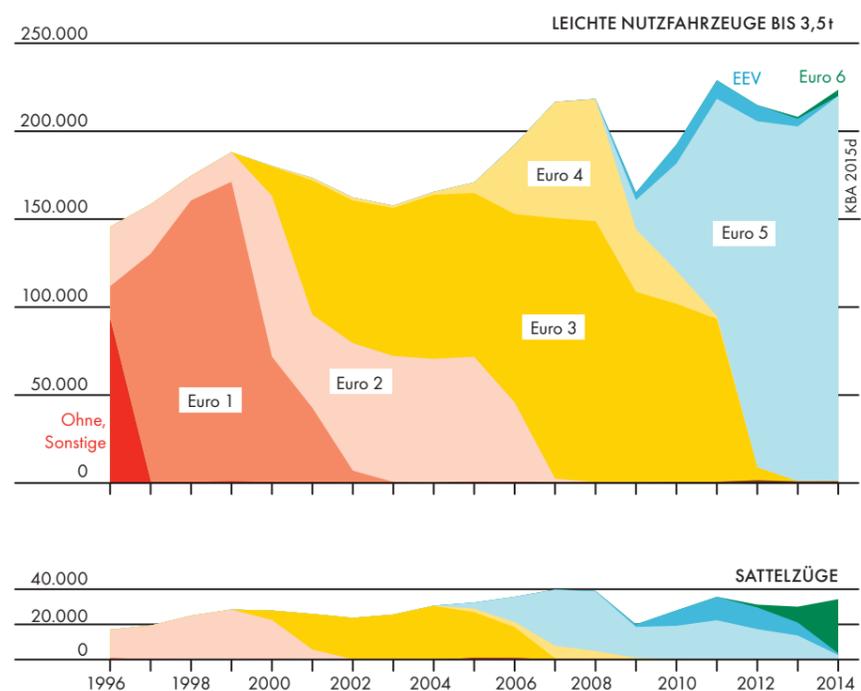
Aus der Lkw-Bestandsstatistik lässt sich ableiten: Je schwerer das Gesamtgewicht und höher die Nutzlast des Fahrzeugs, desto restriktiver ist die Schadstoffklasse, das heißt desto sauberer ist das Fahrzeug. In Deutschland fahrende Lkw und Sattelzugmaschinen erfüllen die Euro-5-, Euro-6- oder die EEV-Norm; der Güternahverkehr findet noch überwiegend mit Nutzfahrzeugen der Klassen Euro 4 oder mit weniger restriktiver Euro-Norm statt.

Euro-Klassen bei den Neuzulassungen

Die Zusammensetzung des Lkw-Bestands nach Euro-Klassen wird von den Neuzulassungen und der endgültigen Außerbetriebnahme bestimmt. Da Neufahrzeuge stichtagsweise bestimmte Euro-Standards mindestens erfüllen müssen – in der Regel der höchste Euro-Standard – wird die Zusammensetzung der Lkw-Flotten vor allem von den Neuzulassungen im Verhältnis zum Bestand bestimmt. Lkw-Segmente mit geringer Erneuerungsrate – insbesondere Nahverkehrs-Lkw – erfüllen in der Regel niedrige Abgasemissionsstandards; Segmente mit hoher Erneuerungsrate – wie Sattelzüge im Straßengüterfernverkehr – decken die höchsten Abgasnormen ab.

Wie sich Euro-Standards im Lkw-Neufahrzeugmarkt durchsetzen, kann am Beispiel der beiden bedeutendsten Lkw-Klassen dargestellt werden: Der Vergleich der Emissionsklassen von neu zugelassenen leichten Nutzfahrzeugen und Sattelzügen zeigt zum einen die unterschiedlichen Einführungszeitpunkte von Euro-Normen für leichte Nutzfahrzeuge und Lkw/Sattelzüge, zum anderen die unterschiedlich langen Zulassungsperioden der einzelnen Euro-Klassen.

27 EMISSIONSKLASSEN BEI DEN NEUZULASSUNGEN VON LEICHTEN NUTZFAHRZEUGEN BIS 3,5t UND SATTELZÜGEN



Die Schadstoffklasse Euro 4 wurde schon bald nach ihrer Einführung von Euro 5 abgelöst und hat sich bei den Sattelzugmaschinen nicht durchsetzen können. Aufgrund der Mehrkosten bei annähernd gleichem Kraftstoffverbrauch gegenüber der Euro-3-Norm wurden Lkw mit Euro-4-Norm nur zögernd angenommen. Gleichzeitig haben die Lkw-Hersteller bereits weit vor dem Stichtag der verpflichtenden Einführung der Euro-5-Norm am 1. September 2009 ihre Euro-5-Neufahrzeuge am Markt angeboten, so dass die Käufer die Euro-4-Norm häufig übersprungen haben und gleich auf die Euro-5-Norm umgestiegen sind.

Auch bei den leichten Nutzfahrzeugen konnte sich die Norm Euro 4 nicht etablieren. Die Phase der Zulassungen von Euro-3-Fahrzeugen überlagert sowohl zeitlich um mehrere Jahre als auch mengenmäßig um mehr als das Doppelte die Euro-4-Phase.

Neuzulassungen von Fahrzeugen mit EEV-Standard blieben in beiden Fahrzeugklassen mehr oder weniger eine Randerscheinung. EEV-Zulassungen erfolgen inzwischen nicht mehr, der Standard wird abgelöst von der aktuellen Euro-6-Norm.

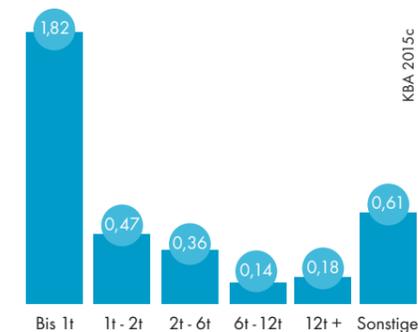
Als Zwischenfazit für die Euro-Standards lässt sich festhalten: Saubere Fahrzeugtechnologie setzt sich immer weiter durch – das zeigen Lkw-Flottenbestand und Lkw-Neuzulassungen, wenn sie nach den jeweiligen Emissionsklassen differenziert betrachtet werden. Allerdings gibt es zwischen den einzelnen Fahrzeugklassen zum Teil erhebliche Unterschiede.

LKW-ANTRIEBE

Lkw verbrauchen Kraftstoffe und damit Energie. Für die Kraftstoffversorgung, aber auch für die Energiepolitik ist es daher von Interesse, mit welchen Antrieben Kraftfahrzeuge für den Straßengüterverkehr ausgestattet sind und welche Kraftstoffe sie nutzen (können).

Anders als in der allgemeinen Nutzfahrzeugstatistik werden Antriebs- und Kraftstoffarten für Nutzfahrzeuge nicht auf das zulässige Gesamtgewicht, sondern auf die Nutzlast bezogen dargestellt.

28 ANTEILE ALTERNATIVER ANTRIEBE AM LKW-BESTAND, OHNE BENZIN
Nach Nutzlastklasse am 1.1.2015, in Prozent



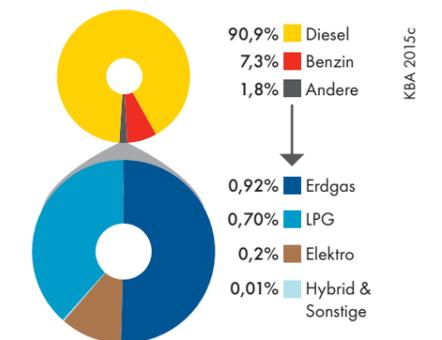
Antriebe im Bestand

Der Lkw-Bestand insgesamt (einschließlich der leichten Nutzfahrzeuge und Sattelzugmaschinen) weist einen sehr hohen Anteil von 95 % Dieselantrieben auf. Dieselmotoren sind insofern der Standardantrieb für Straßengüterfahrzeuge. Nur etwa 4 % aller Lkw fahren mit alternativen Antrieben. Der wichtigste alternative Antrieb bei Lkw ist letztendlich der Benziner.

Auch bei den Antrieben unterscheiden sich die Fahrzeuggrößen stark voneinander. In schweren Lkw und insbesondere in Sattelzugmaschinen werden zu über 99 % Dieselantriebe eingesetzt. Die alternativen Antriebe machen hier weniger als 0,5 % aus.

Eine differenzierte Betrachtung der Lkw nach Gewicht (Nutzlast) zeigt, auf welche Fahrzeugklassen sich alternative Antriebe verteilen: Schwere Lkw mit Nutzlasten über sechs Tonnen bewegen sich fast ausschließlich mit Dieselantrieben fort. Faktisch konzentrieren sich die alternativen Antriebe bei Lkw auf die Klasse der leichten Nutzfahrzeuge – und hier vor allem auf

29 KRAFTSTOFFARTEN IM BESTAND
Lkw bis 1t Nutzlast am 1.1.2015

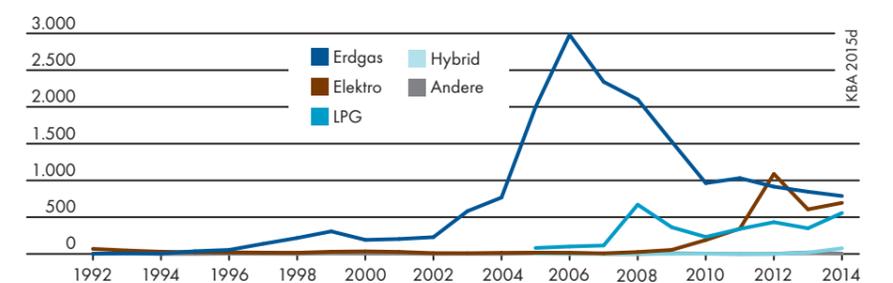


Pkw-ähnliche Fahrzeuge mit Nutzlasten unter einer Tonne, teilweise auch noch bis zwei Tonnen (Transporter und Sprinter).

Allein in der kleinsten Nutzlastklasse der leichten Nutzfahrzeuge bis 0,999 Tonnen machen alternative Antriebe einen substantziellen Anteil von 9,1 % aus. Doch der Anteil der Fahrzeuge mit Dieselantrieb nimmt auch bei den knapp 1,5 Mio. Kleintransportern zu und liegt nun (2015) bei 91 %. Der Diesel verdrängt Fahrzeuge mit Benzinantrieben, die nur noch einen Anteil von knapp 7,3 % ausmachen und auch absolut abnehmen; Gasantriebe und bivalente Antriebe kommen bei steigenden Bestandszahlen auf 1,6 %, wovon Erdgasantriebe eine höhere Bedeutung haben. Der Elektroantrieb mit etwa 2.300 Fahrzeugen und steigenden Bestandszahlen hat nur in dieser niedrigsten Nutzlastklasse bis 0,999 Tonnen eine – wenn auch geringe – Bedeutung (0,2%).

Bereits in der nächstgrößeren Nutzlastklasse bis 1.999 Tonnen beträgt der Dieselantrieb bei 740.000 Einheiten über 98 %. Mit Ausnahme des an Bedeutung verlierenden

30 ALTERNATIVE KRAFTSTOFFARTEN UNTER DEN LKW-NEUZULASSUNGEN
Bis 1t Nutzlast



Benzinantriebs (1,38%) liegen die übrigen Antriebe bei jeweils unter 0,25% und führen damit allenfalls ein Nischendasein in der Lkw-Flotte.

Eine detaillierte Betrachtung aller Lkw bestätigt somit die abnehmende Bedeutung der alternativen Antriebe mit zunehmender Nutzlast: Je höher das Gesamtgewicht des Lkw, desto seltener ist die Verwendung eines alternativen Antriebs.

Festzuhalten ist allerdings, dass im Gegensatz zum absolut an Bedeutung verlierenden Benzinantrieb die übrigen alternativen Antriebe absolut über die Zeit zunehmen – jedoch von geringem Niveau aus. Außerdem sind die wichtigsten alternativen Lkw-Antriebe Erdgas- und Autogasfahr-

zeuge; elektrische Antriebe spielen im gesamten Lkw-Bestand bislang so gut wie keine Rolle.

Antriebe in den Neuzulassungen

Aufgrund der Dominanz von Dieselantrieben im Straßengüterverkehr erübrigt sich zusätzlich zu allgemeinen Zulassungen eine gesonderte Behandlung des Dieselantriebs. Aufgrund der (noch) geringen Bedeutung von alternativen Antrieben werden diese im Folgenden separat und auch nur für die relevanten Fahrzeugklassen (bis eine Tonne Nutzlast) betrachtet.

Der Anteil der Benzinantriebe von Lkw bis 0,999 Tonnen Nutzlast ist von 23.000 Neuzulassungen (19%) 1992 auf unter 4.100 im Jahr 2004 gesunken und liegt

heute um 6.800 Fahrzeuge (4,23%). Erdgas- und Flüssiggasantriebe haben um das Jahr 2007 eine Hochphase. Bis zu 3.000 neue Fahrzeuge mit Erdgasantrieb (3,2%) werden zugelassen. Bis heute sinken die Neuzulassungen auf unter 800 (0,5%). Fahrzeuge mit Flüssiggasantrieb sind mit Anteilen unter 0,5% wesentlich unbedeutender, halten diesen Anteil aber bis heute. Allerdings sind Flüssiggasfahrzeuge vielfach umgerüstete Benziner (Shell 2015).

Die Neuzulassungen von Fahrzeugen mit Elektroantrieb verliefen bis zum Jahr 2009 auf einem konstant sehr niedrigen Niveau und sind seitdem stark gestiegen (von 0,04% auf 0,31%). Hybridfahrzeuge verharren dagegen auf niedrigstem Niveau.

2.3 KRAFTOMNIBUSSE

BUSSE IN EUROPA

Die Flotten der Kraftomnibusse sind im Vergleich zu den Lkw-Flotten wesentlich kleiner. In der EU-28 fahren heute (2013) rund 822.900 Busse. Die größten Flotten werden mit jeweils 112.000 Fahrzeugen in Großbritannien und Polen mit 103.000 Einheiten betrieben, gefolgt von Italien und Frankreich mit 99.000 und 95.000. Deutschland liegt auch bei den Bussen an fünfter Stelle mit 77.000 vor Spanien mit knapp 60.000 Einheiten. Dabei ist die Busflotte in den betrachteten EU-Ländern, wie in der EU insgesamt, in den vergangenen Jahren (moderat) gewachsen (EC 2015). Die Neuzulassungen von Bussen

in diesen Ländern verlaufen mit weniger starken Schwankungen als die der Lkw. Entsprechend ihrer hohen Fahrzeugbestände weisen Großbritannien und Frankreich, aber auch Deutschland relativ viele Neuzulassungen auf. Dagegen gibt es beim Bestands-Spitzenreiter Polen wie in Italien und Spanien relativ wenige Neuzulassungen – ein Anzeichen für ein hohes Durchschnittsalter der Busflotten in diesen Ländern. Pro Jahr werden in der EU etwa 40.000 Busse neu zugelassen. Bis zu einem Viertel der Neuzulassungen in Westeuropa (EU-15) sind kleine Busse bis 3,5 Tonnen; in Osteuropa (EU-11) beträgt ihr Anteil die Hälfte der Bus-Neuzulassungen.

BUSSE IN DEUTSCHLAND

Der Bestand an Kraftomnibussen ohne die vorübergehend stillgelegten Fahrzeuge liegt seit Jahren nahezu konstant bei etwa 75.000 Fahrzeugen. Umstellungsbedingt waren die Bestände vor dem Jahr 2008 um 8.000 bis 9.000 Fahrzeuge höher ausgewiesen. Die meisten Busse weisen zwischen 30 und 60 Sitzplätze auf und wiegen zwischen 16 und 20 Tonnen.

Das Durchschnittsalter der deutschen Busflotte weist im Zeitverlauf einen leicht ansteigenden Trend um weniger als ein Jahr auf und liegt seit dem Jahr 2005 bei knapp neun Jahren. Mit Ausnahme der kleinen

Busse (bis 31 Sitzplätze) lässt sich feststellen, dass das Alter der Busse seit Jahren mit der Zahl der Sitzplätze steigt; mit anderen Worten: je größer die Buskategorie, desto älter die Fahrzeuge.

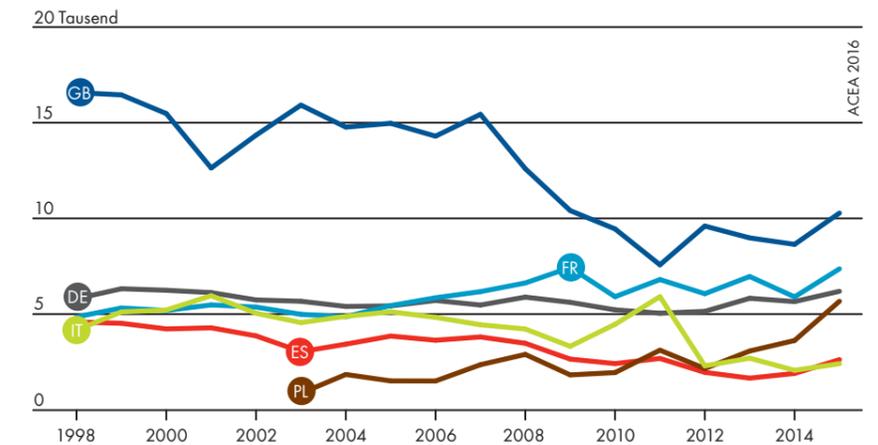
Betrachtet man die Eigentümerstruktur des Fahrzeugbestandes etwas genauer, so fällt auf, dass mehr als die Hälfte der Fahrzeuge privaten Haltern zuzuordnen sind. Mehr als die Hälfte dieser Fahrzeuge wird im ÖPNV eingesetzt (BDO 2014). Öffentliche und private Betreiber gemeinsam betrachtet setzen ebenfalls die Hälfte des Busbestandes im ÖPNV ein. Davon haben Standardlinienbusse einen Anteil von etwa 40% und Gelenkbusse von etwa 20% (VDV 2015). Weitere ÖPNV-Busse sind Großraumbusse, Doppeldecker, Midi-, Klein- und Minibusse sowie die in Deutschland als O-Busse bezeichneten Trolleybusse. Von ihnen gibt es allerdings nur noch 71 Stück in drei Städten.

Die Zahl der Bus-Neuzulassungen bewegt sich seit Jahren im Wesentlichen zwischen 5.500 und 6.000 Fahrzeugen pro Jahr. Zuletzt (2015) wurden in Deutschland wieder deutlich über 6.000 Omnibusse neu zugelassen. Dies sind gegenüber dem Tiefststand 2011 nahezu 1.100 Fahrzeuge mehr. Treiber dieses Wachstums ist unter anderem die Deregulierung des Fernbusmarktes zum 1.1. 2013 (FIS 2016). Bedient wird der Fernbusmarkt von etwa 1.000 Fahrzeugen (BAG 2016).

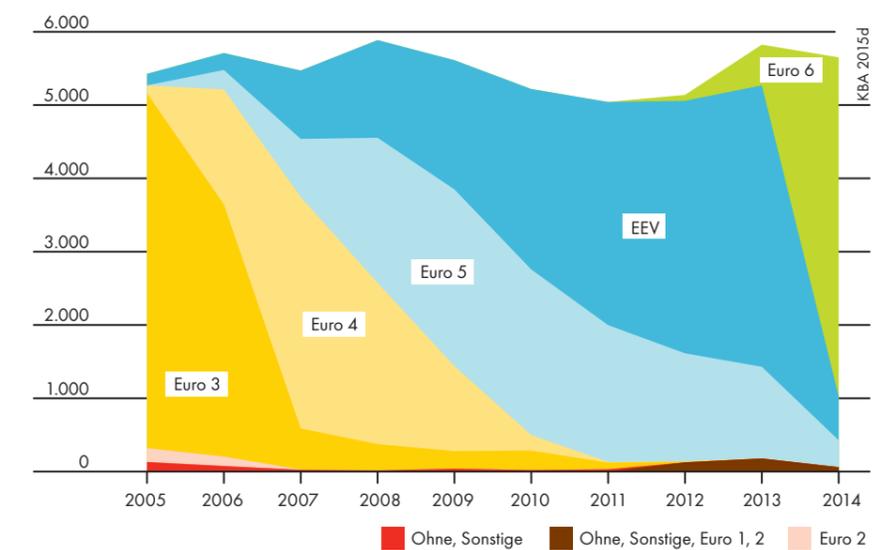
Euro-Klassen von Bussen

Mit Blick auf die Luftschadstoffemissionen ist festzuhalten, dass ein großer Teil der Busflotte nicht den aktuellen Abgasstandards entspricht. Weniger als die Hälfte der im Jahr 2015 zugelassenen Kraftomnibusse erfüllen die Abgasnormen Euro 5 oder

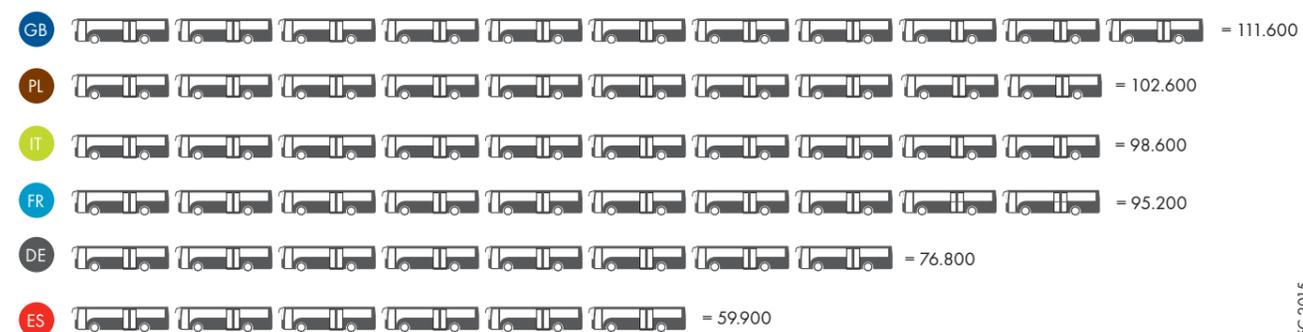
33 NEUZULASSUNGEN VON Bussen IN AUSGEWÄHLTEN EU-LÄNDERN



34 BUS-NEUZULASSUNGEN NACH EMISSIONSKLASSEN

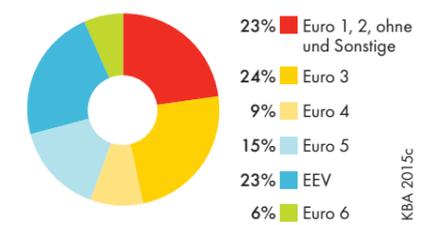


31 GRÖSSTE BUS-FLOTTEN IN DER EU 2013



32 BUS-BESTAND NACH EMISSIONSKLASSEN

Am 1.1.2015



besser und weniger als 10% erreichen die aktuelle Abgasnorm Euro 6.

Auffällig ist der hohe Anteil an Bussen mit EEV-Standard (23%). Zusammen mit einem Anteil von 6% Euro-6-Fahrzeugen und 15% Euro 5 ist die Busflotte damit sauberer als die gesamte Lkw-Flotte (einschließlich der leichten Nutzfahrzeuge und Sattelzugmaschinen). Dies liegt allerdings eher an den vergleichsweise niedrigen Abgasstandards leichter Lkw und Nutzfahrzeuge; die Abgasstandards im Straßengüterfernverkehr – mit hohen Euro-5-, EEV- und Euro-6-Anteilen – liegen deutlich höher als bei der Busflotte.

Mehr als 80% der Neuzulassungen von Bussen erfüllten im Jahr 2014 bereits den

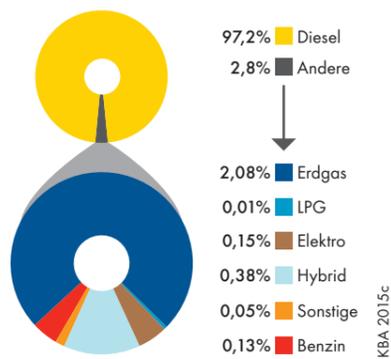
Euro-6-Standard. Auch bei den Neuzulassungen zeigt sich die große Bedeutung der EEV-Norm. Nach mehreren Jahren mit über 60% wurde zuletzt immer noch ein Zehntel entsprechend der Norm EEV neu zugelassen. Busse mit Schadstoffklasse Euro 5 wurden nur noch zu einem geringen Anteil von 6,5% neu zugelassen. Die Popularität der im Jahr 2000 eingeführten freiwilligen EEV-Norm rührte daher, dass diese Fahrzeuge die ab 2008/2009 gültige Norm Euro 5 bereits übertrafen. Die umweltbedingten Mehrkosten wurden durch einen höheren Wiederverkaufswert ausgeglichen.

Bus-Antriebe

Aufgrund unterschiedlicher Anforderungen muss bei Entwicklung und Einsatz von

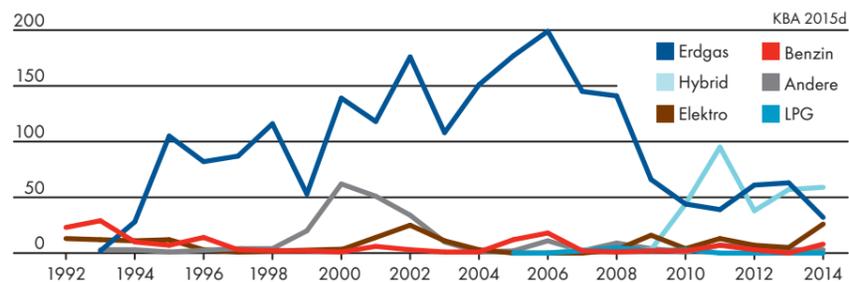
35 KRAFTSTOFFARTEN IM BUS-BESTAND

Zum 1.1.2015



Antrieben und Kraftstoffen zwischen Stadtbussen und Reisebussen unterschieden werden. So ist das Fahrprofil von Stadtbussen für den urbanen Personenverkehr oftmals von Stop-and-Go auf fast immer denselben Fahrstrecken geprägt, während Reisebusse für den regionalen sowie den Fernverkehr vor allem auf Effizienz, Wirtschaftlichkeit und Komfort angelegt sind. Für Stadtbusse sind teilweise auch andere nicht-kommerzielle Kriterien für Anschaffung und Betrieb von Relevanz. Grundsätzlich weisen Stadtbusse daher größere Potenziale auf, alternative Antriebe und Kraftstoffe zu nutzen als Reisebusse. Allerdings liegen keine für Stadt- und Reisebusse differenzierten Kraftfahrzeugstatistiken vor, so dass Busantriebe und -kraftstoffe im Folgenden nur über alle Kraftomnibusse betrachtet werden können.

36 NEUZULASSUNGEN BUSSE NACH KRAFTSTOFFEN OHNE DIESEL



Die meisten Kraftomnibusse besitzen einen Dieselantrieb (mehr als 97%). Der Anteil alternativer Antriebe in der Busflotte lag im Jahr 2015 bei 2,8% und damit fast doppelt so hoch wie im deutschen Pkw-Bestand und noch deutlich höher als bei vergleichbar schweren Lkw.

Alternativen zum Dieselantrieb sind Busse mit Gasmotoren bzw. Gaskraftstoffe. Bei den Gasantrieben dominieren Erdgasbusse; insbesondere für komprimiertes Erdgas gibt es ein breiteres Angebot an CNG-Fahrzeugen. Busse mit 30 bis 50 Sitzplätzen und einem zulässigen Gesamtgewicht von etwa 20 Tonnen benötigen für ihr Fortkommen eine Leistung von etwa 200 bis 300 kW; diese kann wiederum von entsprechenden Erdgasmotoren für mittelschwere Lkw bereitgestellt werden. Zurzeit verkehren rund 1.600 Erdgasbusse in Deutschland, was etwa 2% der deutschen

Busflotte entspricht. Allerdings ist sowohl der Bestand als auch die Zahl der neu zugelassenen Erdgasbusse in der jüngeren Vergangenheit tendenziell rückläufig.

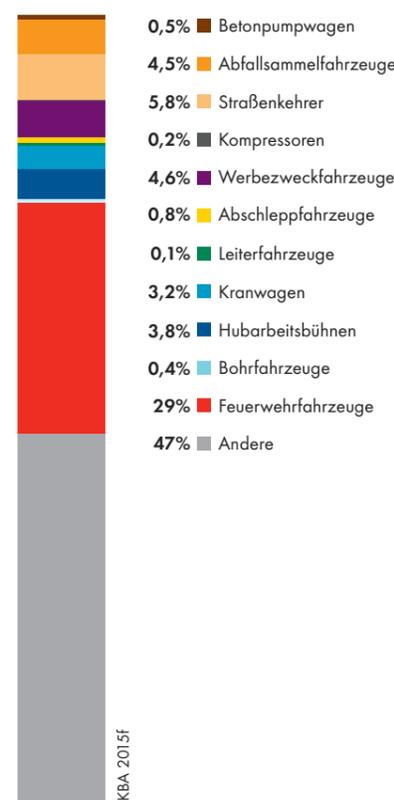
Stattdessen werden seit 2010 – mit einem Neuzulassungsanteil von etwa 1% – vermehrt Busse mit Hybridantrieb neu zugelassen. Hybridantriebe ermöglichen gerade im urbanen Straßenverkehr mit einer Vielzahl von Stop-and-Go-Vorgängen hohe Kraftstoffeinsparungen. Ihr Bestandsanteil erreicht jedoch erst 0,4%. Dagegen entwickeln sich Elektrobusse auf deutlich niedrigerem Niveau als Hybridbusse – sowohl bei den Neuzulassungen als auch im Bestand. Busse mit den Kraftstoffarten Flüssiggas (LPG) und Benzin spielen eine vernachlässigbare Rolle; zum einen ist ihre Anzahl sehr gering, zum anderen handelt es sich meist um kleinere und leichtere Busse.

bauarten. Bis dahin wurden beispielsweise Wohnmobile, Kranken- und Leichenwagen auch zu dieser Klasse hinzugerechnet, die heute als Fahrzeuge mit besonderer Zweckbestimmung den Pkw zugeordnet werden.

Mit fast 30% bilden die Feuerwehrfahrzeuge die größte bestimmte Gruppe der Aufbauarten der Sonstigen Kraftfahrzeuge, gefolgt von Verkaufs- und Ausstellungswagen sowie Straßenreinigungs- und Abfallsammelfahrzeugen mit jeweils 5% Anteil am Bestand. Die Anteile der Aufbauarten sind seit der Umstellung nahezu konstant.

37 BESTAND VON SONSTIGEN FAHRZEUGEN NACH AUFBAU

Zum 1.1.2015

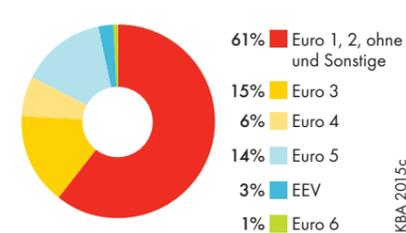


Die Sonstigen sind auch Fahrzeuge mit einer geringen Jahresfahrleistung, weshalb sie mit 13,3 Jahren das höchste Durchschnittsalter im Vergleich zu den Lkw und Omnibussen aufweisen. Die Altersstruktur zwischen den einzelnen Fahrzeugen mit Spezialaufbau schwankt beträchtlich. Das höchste Durchschnittsalter weisen die Leiterfahrzeuge mit 30 Jahren auf. Die Feuerwehrfahrzeuge sind durchschnittlich 17,5 Jahre alt und damit seit dem Jahr 2000 um zwei Jahre älter. Straßenreinigungs- und Abfallsammelfahrzeuge werden intensiver genutzt und sind deshalb mit durchschnittlich zehn und sieben Jahren wesentlich jünger.

2014 wurden 15.000 Sonstige Kraftfahrzeuge neu zugelassen. Seit dem Jahr 2011 stiegen die Neuzulassungen kontinuierlich um 1.000 Fahrzeuge an. Bei den Sonstigen Fahrzeugen bilden neben den „Anderen“ die Feuerwehrfahrzeuge mit 17% die größte Gruppe bei den Neuzulassungen, gefolgt von Straßenreinigungs- (6%) und Abfallsammelfahrzeugen (7%), Hubarbeits-

38 EMISSIONSKLASSEN IM BESTAND DER SONSTIGEN FAHRZEUGE

Zum 1.1.2015



bühnen und Verkaufsfahrzeugen (jeweils 5%) und Kranwagen (4%). Aufgrund des im Verhältnis zum Fahrzeugbestand niedrigen Niveaus der Neuzulassungen dauert der Austausch der Fahrzeugflotte sehr lange, sodass das Durchschnittsalter des Bestands stetig zunimmt.

Euro-Klassen

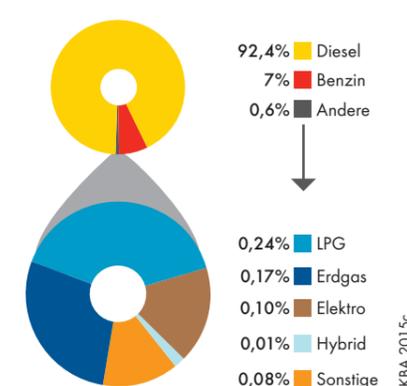
Das hohe Durchschnittsalter der Sonstigen Kraftfahrzeuge spiegelt sich in den Emissionsklassen wider: 60% der Sonstigen Kraftfahrzeuge erfüllen lediglich die Normen der Schadstoffklassen Euro 2 und schlechter. Nur etwas mehr als 3% erreichen die Normen EEV und Euro 6.

Ursächlich für den hohen Bestand in der Gruppe „Ohne, Sonstige, Unbekannt, Euro 1, Euro 2“ ist aber auch, dass über 40% der Sonstigen Fahrzeuge im Jahr 2014 mit einer anderen als der derzeit gültigen Schadstoffklasse zugelassen wurden. In den Jahren zuvor lag der Wert ebenfalls über 30%. Hierbei handelt es sich um Fahrzeuge, die keiner Emissionsklasse zugeordnet werden können.

43% der 2014 neu zugelassenen Sonstigen Fahrzeuge erfüllten die Emissionsnorm Euro 5. Die EEV-Norm wurde von 4% der Fahrzeuge erreicht und hatte mit über 11% in den vorherigen Jahren einen ähnlich hohen Anteil an den Neuzulassungen wie bei den Lkw. Die Norm Euro 6 erfüllten 2014 erst 13% der Fahrzeuge. Bei der geringen Anzahl von Fahrzeugen der Klasse Euro 3 und Euro 4 handelt es sich entweder um Erfassungsfehler oder es wurden Ausnahmegenehmigungen der Länder zur Zulassung erteilt (KBA 2016a).

39 KRAFTSTOFFARTEN IM BESTAND DER SONSTIGEN FAHRZEUGE

Zum 1.1.2015



Antriebe der Sonstigen Kraftfahrzeuge

Der Dieselantrieb ist mit 92,4% im Bestand der Standardantrieb der Sonstigen Kraftfahrzeuge. Dabei steigt der Dieselanteil kontinuierlich an. Der Anteil der Fahrzeuge mit Benzinantrieb ist kontinuierlich rückläufig und liegt aufgrund der langen Lebensdauer der Fahrzeuge heute noch bei knapp 7%.

Fahrzeuge mit alternativem Antrieb machen nur 0,6% der Sonstigen Kfz aus. Gasantriebe sind unter den alternativen Antrieben mit 0,4% und 1.100 Fahrzeugen führend, wobei – anders als bei Lkw und Omnibussen – Flüssiggasfahrzeuge etwas häufiger im Bestand zu finden sind als Erdgasfahrzeuge. Fahrzeuge mit Elektro- und Hybridantrieben haben eine ähnlich geringe Bedeutung wie diese Antriebe bei den Lkw.

Der kontinuierliche Anstieg des Dieselbestandes ergibt sich aus einem dauerhaft hohen Anteil von fast 99% des Dieselantriebs an den Neuzulassungen. Die übrigen Antriebe liegen weit unter 1% und stellen somit keine Alternativen in der Klasse der Sonstigen Fahrzeuge dar.

Antriebe mit Flüssiggas nehmen kontinuierlich ab, während Erdgas bei durchschnittlich 30 Neuzulassungen verharrt. Fahrzeuge mit Elektro- und Hybridantrieb schwanken im unteren zwei- und im einstelligen Bereich. Jedoch spricht die konstante Bestandsentwicklung der Fahrzeuge mit Gas- und Elektroantrieb dafür, dass diese Fahrzeuge länger im Bestand bleiben als die Dieselfahrzeuge.

2.4 SONSTIGE KRAFTFAHRZEUGE

Die „Sonstigen Kraftfahrzeuge“ umfassen nationale Fahrzeug- und Aufbauarten, die aufgrund ihrer Beschaffenheit weder den Pkw noch den Kraftomnibussen oder Lkw zugeordnet werden können. Sie gelten gemäß der Fahrzeugstatistik nicht als Nutzfahrzeuge. Basis der Fahrgestelle und Motorisierung sind jedoch häufig baugleiche oder bauähnliche Lkw, Kraftomnibusse und Pkw. Aus diesem Grund sollen die Sonstigen Kraftfahrzeuge ebenfalls beschrieben werden.

Zu den Sonstigen Kraftfahrzeugen zählen: Feuerwehr-, Polizei-, Zivilschutz-, Kommu-

BESTAND UND NEUZULASSUNGEN IN DEUTSCHLAND

Der Bestand der Sonstigen Kraftfahrzeuge betrug am 1.1. 2015 275.000 Fahrzeuge und nimmt kontinuierlich zu. Die amtliche Statistik unterscheidet seit dem Jahr 2012 die Sonstigen Kraftfahrzeuge in zwölf Auf-

3 ANTRIEBE, KRAFTSTOFFE, FAHRZEUGTECHNIK, FAHRWEISE

Zur Fortbewegung müssen Kraftfahrzeuge gespeicherte Energie in kinetische Energie (Bewegungsenergie) umwandeln. Diese Transformation findet im Fahrzeugantrieb statt. Die hierfür erforderliche Energie wird chemisch in Kraftstoffen oder elektrochemisch in Batterien – eigentlich: wiederaufladbare Akkumulatoren – gespeichert und bereitgestellt.

Ein wichtiges Ziel bei der Weiterentwicklung von Antriebstechnik ist es, Umwandlungs-, Übertragungs- und Speicherverluste bei der Energieumwandlung und Energienutzung im Fahrzeug zu minimieren. Im Folgenden werden die wichtigsten Trends bei den Antrieben, der Kraftstoff- bzw. Energieversorgung sowie der Fahrzeugtechnik und Fahrweise von Lkw und Bussen untersucht sowie künftige technische Entwicklungs- und Effizienzpotenziale abgeschätzt.

3.1 ÜBERBLICK UND KRITERIEN

Nutzfahrzeugantriebe und ihre Energieversorgung lassen sich im Wesentlichen in drei Gruppen einteilen: in Diesel- und in Gaskraftfahrzeuge, die beide von einem Verbrennungsmotor angetrieben werden, sowie in ganz oder teilweise elektrifizierte Fahrzeuge, deren Vortrieb entsprechend mit Hilfe von Elektromotoren erfolgt.

Lkw und Busse werden heute fast ausschließlich von **Dieselmotoren** angetrieben. Daher werden zunächst Stand und Perspektiven des Dieselantriebs für Nutzfahrzeuge erörtert. Zudem werden jüngere Entwicklungen bei Dieselmotoren, insbesondere aber bei seinen flüssigen Substituten wie Biokraftstoffen und synthetischen Kraftstoffen erörtert. Zu geringen Anteilen finden sich unter den Nutzfahrzeugen auch ottomotorisch angetriebene Fahrzeuge. In der Regel handelt es sich hierbei um leichte Nutzfahrzeuge und hier auch um das unterste Teilsegment (nach Fahrzeuggewicht) – mit anderen Worten: um Derivate von Pkw-Motoren (ika 2014). Eine ausführliche Diskussion ottomotorischer Antriebe erfolgte bereits in der letzten Ausgabe der Shell Pkw-Szenarien (Shell 2014).

Neben Dieselmotoren haben in den vergangenen Jahren weltweit **Gasantriebe** und Gaskraftstoffe an Bedeutung gewonnen.

Gasantriebe basieren bislang auf dem Ottoprinzip (Fremdzündung); aus Effizienzgründen wird jedoch bei Nutzfahrzeugen die dieselmotorische Verbrennung von Erdgaskraftstoffen als neuer Motorenentwicklungspfad bei der Antriebsentwicklung parallel verfolgt. Eine wesentliche Neuerung bei Kraftstoffen im Nutzfahrzeugbereich ist die mögliche Option der Nutzung von **verflüssigtem Erdgas** (Liquefied Natural Gas, oder kurz LNG). Daher konzentriert sich die Diskussion bei Gasantrieben und Gaskraftstoffen auf LNG, umfasst aber auch komprimiertes Erdgas (Compressed Natural Gas, oder kurz CNG).

Flüssig- bzw. **Autogas** (Liquid Petroleum Gas, oder kurz LPG) wird hauptsächlich im Pkw-Bereich genutzt, oftmals in umgerüsteten Benzinfahrzeugen. Im Nutzfahrzeugsektor kommt Autogas nur bei Pkw-ähnlichen leichten Nutzfahrzeugen zum Einsatz, kaum oder gar nicht dagegen bei schwereren Lkw, Sattelzügen oder Bussen. Auf eine Darstellung von Flüssiggasfahrzeugen wird daher an dieser Stelle verzichtet und auf die Shell Flüssiggas-Studie (Shell 2015) verwiesen.

Ein wichtiger Techniktrend in der Antriebstechnik ist die zunehmende Hybridisierung und Elektrifizierung von Kraftfahrzeugen

– ein Trend, der sich nicht nur bei Pkw, sondern inzwischen auch bei Lkw und Bussen zeigt. Deshalb werden Stand und Anwendungspotenziale von **Hybrid- und Elektroantrieben** im Nutzfahrzeugbereich ausführlich untersucht. Eine besondere Form der Elektromobilität sind mit Wasserstoff betriebene **Brennstoffzellen**-Nutzfahrzeuge – bislang vor allem leichte Nutzfahrzeuge und Busse.

Die Abschätzung der technischen Entwicklung und Potenziale der drei genannten Antriebs-Kraftstoff-Kombinationen für Nutzfahrzeuge (Diesel, Gas, Elektro) wird durch eine an **sechs ausgewählten Kriterien** orientierte Bewertung synoptisch abgeschlossen. Die Auswahl der Bewertungskriterien richtet sich dabei zum einen nach den Entscheidungskriterien und Wahlentscheidungen der Fahrzeugnutzer. Dazu gehören die technologische Reife, die Nutzerkosten, weitere Nutzerpräferenzen sowie die jeweilige Verfügbarkeit eines Kraftstoffes bzw. Energieträgers. Zum anderen werden in der Bewertung von Politik und Gesellschaft gesetzte Rahmenbedingungen berücksichtigt. Mit zu den wichtigsten Politik-Vorgaben für Nutzfahrzeugbetreiber, aber auch Nutzfahrzeughersteller und Kraftstoffanbieter gehören staatliche Regulierungen zu lokalen Emissionen (Luftschadstoffe und

Lärm) und zu den Treibhausgasemissionen von Antrieben und Kraftstoffen.

Bei der Bewertung einzelner Antriebs-Kraftstoff-Kombinationen wird auf typische Anwendungsbereiche eingegangen, wobei sich die Anforderungen urbaner bzw. städtischer Verkehre zum Teil wesentlich von überregionalen Langstreckenverkehren unterscheiden. Die Bewertungen der Antriebs-Kraftstoff-Kombinationen selbst erfolgen gemeinsam auf der Grundlage des aktuellen Wissensstandes durch die an der Studie beteiligten Experten. Es werden dabei keine besonders günstigen Bedingungen für die Weiterentwicklung einer bestimmten Antriebs- und Kraftstofftechnik vorausgesetzt und auch kein spezielles Ziel verfolgt, welches aus Sicht von Energie-, Umwelt- oder Klimapolitik erreicht werden soll.

Die Bewertungskriterien für Antriebs-Kraftstoff-Kombinationen werden auf Basis von Experteneinschätzungen quantitativ durch die Bestimmung eines Levels (0 bis 5) eingestuft, wobei Level 5 eine sehr gute und Level 0 eine sehr schlechte Bewertung beinhaltet. Zum Kriterium Nutzerkosten werden keine quantitativen Berechnungen durchgeführt, da die Entwicklung der Technologiekosten und der Energie- und Kraftstoffkosten sowie der preistechnisch relevanten Rahmenbedingungen (wie Steuern, Maut oder Einfahrverbote) über einen langen Zeitraum nicht feststehen. Es geht hier um eine Einschätzung, die vor allem auf technologische Unterschiede zwischen den betrachteten Kraftstoffen und Antrieben bis zum Jahr 2040 abstellt.

Die Bewertung von Antriebs-Kraftstoff-Kombinationen für Nutzfahrzeuge erfolgt bezogen auf die hauptsächlichlichen Einsatzgebiete der Fahrzeuge. Dabei umfasst der **regionale Einsatzbereich** Fahrten zum Sammeln und Verteilen von Gütern und zum Erbringen regionaler Dienstleistungen. Die durchschnittlichen Fahrleistungen dieser Fahrzeuge sind abhängig vom Einsatz. Sie erstrecken sich von hohen Fahrleistungen von bis zu 90.000 Kilometern Jahresfahrleistung beim Einsatz als Stadtbus, als Baustellen-Lkw oder auch für die Ver- und Entsorgung einer Stadt eingesetzten Lkw

40 AUSWAHLKRITERIEN FÜR NUTZFAHRZEUG-TECHNOLOGIEN

KRITERIEN	BESCHREIBUNG
Technologische Reife*	Grad der technischen Einsatzbereitschaft bzw. des Entwicklungsstandes einer Antriebs-Kraftstoff-Kombination. Einstufung in Anlehnung an Technologiereife-Stufe (Technology Readiness Level, TRL) der NASA (NASA 1995; DOD 2011; ISO 2013), TRL-Level 6 (Prototyp) bis TRL 9 (etablierte Technologie).
Fahrzeug-Nutzerkosten (Summe aus fixen Fahrzeugvorhaltekosten und variablen Fahrzeugeinsatzkosten)	Fahrzeugbeschaffungskosten als fixe Fahrzeugvorhaltekosten und variable Kraftstoff- bzw. Energiekosten sowie Wartungskosten bei durchschnittlicher Fahrleistung. Für einen Dienstleister spielt beim Erbringen einer Transportleistung zum einen die absolute Höhe der Fahrzeug-Nutzerkosten eine Rolle. Bei der Auswahl einer bestimmten Antriebs-Kraftstoff-Kombination werden auch die Kostenunterschiede, insbesondere zur Referenztechnik (Diesel) betrachtet.
Nutzerpräferenzen	Neben den Fahrzeug-Nutzerkosten existierende „harte“ und „weiche“ Faktoren bei der Entscheidung zum Fahrzeugkauf bzw. zur Auswahl einzelner Antriebs-Kraftstoff-Kombinationen (siehe hierzu Abbildung 41).
Verfügbarkeit Energie/ Kraftstoff	Dichte der Kraftstoff-/Energieversorgungsinfrastruktur für eine Antriebstechnologie
Lokale Emissionen	Regulierte Luftschadstoffemissionen, insbesondere Feinstaub (PM), Stickoxide (NO _x) sowie Lärmemissionen.
Treibhausgas-Emissionen	Die Klima-Performance von Antriebs-Kraftstoff-Kombinationen kann anhand ihrer direkten Verbrennungsemissionen (Tank-to-Wheel-Emissionen) vorgenommen werden, oder anhand der Gesamtemissionen, einschließlich derjenigen aus der Vorkette bzw. der Energiebereitstellung (Well-to-Tank-Emissionen).

*BEWERTUNG

0	Keine Ausprägung des Kriteriums bezogen auf den bewerteten Antrieb; TRL: 1-5
1	Geringe Ausprägung des Kriteriums bezogen auf den bewerteten Antrieb im Sinne, es ist nur eine minimale Ausprägung vorhanden; TRL 6: Prototyp in Einsatzumgebung – Prototyp
2	Mittlere Ausprägung des Kriteriums bezogen auf den bewerteten Antrieb im Sinne, es ist eine genügende Ausprägung vorhanden; TRL 7: Prototyp im Einsatz (1 - 3 Jahre) – Prototyp
3	Gute Ausprägung des Kriteriums bezogen auf den bewerteten Antrieb im Sinne, es ist eine fortgeschrittene Ausprägung vorhanden; TRL 7: Prototyp im Einsatz (4 - 5 Jahre) – Prototyp
4	Fast vollständige Ausprägung des Kriteriums bezogen auf den bewerteten Antrieb im Sinne, es ist noch Potenzial für eine weitere technologische Entwicklung vorhanden; TRL 8: Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit im Einsatz – Produkt
5	Vollständige Ausprägung der Komponente bezogen auf den bewerteten Antrieb, es sind keine oder nur noch marginale Verbesserungen möglich; TRL 9: Qualifiziertes System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes – Produkt

TRL: Technology Readiness Level (NASA 1995; DOD 2011; ISO 2013)

bis hin zum Verteilfahrzeug für Stückgüter oder Pakete und Kuriergut mit einer Jahresfahrleistung von etwa 10.000 Kilometern. Diese Nutzfahrzeuge werden häufig unter schwierigen Bedingungen mit Stop-and-Go-Betrieb eingesetzt.

Im Gegensatz dazu werden Nutzfahrzeuge im überregionalen Einsatz oder auch im internationalen Güterverkehr genutzt, die Produktions- und Lagerstandorte oder auch regionale Verteilzentren miteinander verbinden. Diese Fahrzeuge haben in der Regel eine hohe durchschnittliche Fahrleistung von über 100.000 Kilometern. Vor allem Lkw im Straßengüterfernverkehr können aufgrund ihres Fahr- und Lastprofils antriebstechnisch auf eine hohe Durchschnittsgeschwindigkeit hin optimiert werden.

Im Anschluss an die Untersuchung der antriebs- und kraftstoffspezifischen Entwick-



41 NUTZERKRITERIEN FÜR ANTRIEBS-KRAFTSTOFF-KOMBINATIONEN

lungen werden grundsätzliche fahrzeugtechnische Trends und Entwicklungen analysiert, die unabhängig von Antriebstechnik und Kraftstoff letztendlich für alle Nutzfahrzeuge gelten.



3.2 DIESEL DIESELANTRIEBE

Der Dieselantrieb ist seit vielen Jahrzehnten Hauptantriebstechnik des Straßengüterverkehrs und des öffentlichen Straßenpersonenverkehrs. Als im Nutzfahrzeugbereich am weitesten verbreitetes Antriebskonzept eignet sich der Dieselantrieb deshalb als Referenz und Messlatte für alternative Antriebe. Wo steht der Dieselantrieb heute? Was sind die wichtigsten Technikrends? Und welche Entwicklungspotenziale sind beim Dieselantrieb in den kommenden Jahren (noch) zu erwarten?

Der Dieselantrieb blickt auf eine mehr als einhundertjährige Entwicklung zurück. Dieselmotoren sind prinzipbedingt die effizienteste Antriebsmethode im Vergleich verbrennungsmotorischer Antriebe. Im Laufe der Jahre wurde die Dieselmotortechnik zudem immer weiter verbessert. Dabei wurden die Antriebe und damit die Fahrzeuge immer effizienter.

Mit der zunehmenden Pkw-Motorisierung sowie der dynamischen Entwicklung des Straßengüterverkehrs nahmen die verkehrsbedingten Luftschadstoffemissionen jedoch immer weiter zu und erreichten in den 1980er Jahren einen Höhepunkt. Seit Anfang der 1990er Jahre wurde eine Verringerung der verkehrsbedingten Luftschad-

stoffemissionen durch verbindliche EU-weite Abgasemissionsstandards für Kraftfahrzeuge forciert (vgl. den Exkurs zu den Grenzwerten für Abgasemissionen).

Im Laufe der Jahre wurden die Abgasvorschriften für Kraftfahrzeuge immer strenger. Die Fahrzeughersteller reagierten mit einer ganzen Reihe von technischen Innovationen, um die Abgasemissionen verbrennungsmotorischer Antriebe nachhaltig zu senken: Durch eine Optimierung der innermotorischen Verbrennung (unter anderem durch höhere Einspritzdrücke und Abgasrückführung) wurden zunächst die Rohemissionen des Verbrennungsmotors reduziert. Zusätzlich wurden dem Motor eine ganze Reihe von Abgasreinigungstechniken

nachgeschaltet, die zu einer wesentlichen Verbesserung der Abgasqualität des Dieselantriebs beitragen. Bei heutigen Euro-VI-Lkw ist die Systemkombination mehrerer Abgasreinigungstechniken wie Oxidationskatalysator, Partikelfilter und selektive katalytische Reduktion (SCR) mit Hilfe einer wässrigen Harnstoff-Lösung (AdBlue®) einschließlich Ammoniak-Schlupfkatalysator Standard (Hoepke/Breuer 2013).

Trotz Einführung immer umfassenderer Abgasreinigungstechniken ist es gelungen, die Antriebsleistung von Dieselfahrzeugen zu erhöhen. Da die Antriebsleistung Nutzerentscheidungen und damit die Wettbewerbsfähigkeit von Dieselmotoren maßgeblich beeinflusst, arbeiten alle Fahrzeughersteller daran, weitere noch ungenutzte Effizienzpotenziale im und um den Dieselantriebsstrang zu heben.

Gleichwohl fordert die Politik, den Kraftstoff- bzw. Energieverbrauch sowie die Treibhausgasemissionen auch des Straßengüterverkehrs substantiell zu reduzieren. Ähnlich wie schon für Pkw sind auch für Nutzfahrzeuge CO₂-Grenzwerte, welche die direkten spezifischen CO₂-Emissionen von

EXKURS GRENZWerte FÜR ABGASEMISSIONEN

Verbindliche EU-weite Abgasvorschriften wurden Anfang der 1990er Jahre mit den Euro-Abgasnormen – Euro 1 für leichte Nutzfahrzeuge (Fahrzeugklasse N1) und Pkw (M1) sowie Euro I für mittlere und schwere Lkw (N2 und N3) – eingeführt. Inzwischen gilt die sechste Stufe von Euro-Abgasnormen. Dabei wurden die Abgasvorschriften im Zeitverlauf immer strenger. Zudem ist zu berücksichtigen, dass sich die Prüfbedingungen kontinuierlich weiterentwickelt haben. Im Vergleich zu Euro 1 bzw. I wurden die Grenzwerte für Abgasemissionen einzelner Luftschadstoffe mit Euro 6 bzw. VI um bis zu 98 % reduziert. Zu den gesetzlich limitierten Abgasemissionen gehören insbesondere Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffe (HC), Partikelmasse (PM) und Partikelanzahl (PN) sowie Stickoxide (NO_x).

Bei den Abgasvorschriften wird grundsätzlich nach Bezugsmasse unterschieden (Bosch 2014). Die Bezugsmasse eines Kraftfahrzeugs entspricht im Wesentlichen der Masse des fahrbereiten Fahrzeugs und unterscheidet sich damit von der europäischen Fahrzeugklassifizierung nach zulässigem Gesamtgewicht (Lkw) oder zusätzlich nach Sitzplätzen (Busse). Schwere Lkw (N3 sowie teilweise N2) und Busse (M3 sowie teilweise M2) mit einer Bezugsmasse von mehr als 2.610 kg weisen eine andere Emissionsmetrik auf als leichte Nutzfahrzeuge und kleinere Busse (EP/Rat 2009): Grenzwerte für Abgasemissionen von leichten Nutzfahrzeugen (N1), leichten Lkw (N2), Kleinbussen (M2) sowie Pkw (M1) werden auf die Fahrleistung in Gramm bzw. Milligramm pro Kilometer (g/km oder mg/km) bezogen; für schwere Lkw und Busse gelten hingegen Abgasgrenzwerte pro Kilowattstunde (mg/kWh).

Zudem unterscheidet sich die Methodik der Abgasmessung: Für leichte Nutzfahrzeuge und Kleinbusse werden die Abgasemissionen nach Euro 6 im stationären (modifizierten) Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) so wie für Pkw auf dem Rollenprüfstand ermittelt. Dies ist für schwere Lkw nicht praktikabel, daher werden bei schweren Lkw und Bussen bei Euro VI sowohl stationäre als auch transiente Fahrzyklen in Motorenprüfstandstests angewandt. Dabei sind die Euro-VI-Fahrzyklen

für schwere Nutzfahrzeuge global harmonisierte Fahrzyklen, namentlich der stationäre World Harmonised Stationary Cycle (WHSC) und der instationäre World Harmonized Transient Cycle (WHTC). Der WHSC ist ein Motorprüfstandstest unter definierten Bedingungen; der transiente WHTC orientiert sich an realen Fahrzyklen und normalen Fahrbedingungen für Nutzfahrzeuge.

Außerdem müssen schwere Lkw und Busse die geltenden Abgasemissionsvorschriften erfüllen. Dazu werden die Abgasemissionen im Praxisbetrieb mit mobilen Messvorrichtungen, auch Portable Emission Measurement System (PEMS) genannt, ermittelt. Darüber hinaus ist die Dauerhaltbarkeit emissionsmindernder Einrichtungen über typische Fahrzeuglebensdauern nachzuweisen; die Euro-VI-Anforderungen reichen von fünf Jahren bzw. 160.000 km Fahrleistung für leichte Nutzfahrzeuge bis zu sieben Jahren bzw. 700.000 km für schwere Lkw und Busse.

Die Luftschadstoffemissionen für schwere Euro-VI-Nutzfahrzeuge weisen inzwischen nur noch geringe Abweichungen der Abgasemissionen im Praxisbetrieb von den Motorenprüfstandstests der Euro-VI-Norm auf (ICCT 2015b). Bei leichten Nutzfahrzeugen, Kleinbussen und Pkw weichen NEFZ- und reale Luftschadstoffemissionen in der Regel deutlich voneinander ab. Daher befinden sich die schweren Lkw und Bussen vergleichbare Abgasvorschriften für leichte Nutzfahrzeuge, Kleinbusse sowie Pkw in der Diskussion bzw. sind für die nahe Zukunft in Vorbereitung.

Zum einen soll der NEFZ durch einen neuen Fahrzyklus und ein neues Testverfahren, den World-Harmonized Light-Duty Vehicles Test Cycle bzw. Procedure (WLTC/WLTP), ersetzt werden; dabei basiert der WLTP auf empirischen und damit realitätsnäheren Fahrdaten und einheitlicher Testmethodik (ICCT 2013). Zum anderen werden künftig nicht nur die NEFZ-Emissionen auf dem Rollenprüfstand, sondern auch die Abgasemissionen im Praxisbetrieb durch PEMS überwacht und limitiert (EU-KOM 2015).

42 ABGASGRENZWerte FÜR NUTZFAHRZEUGE MIT DIESELANTRIEB

UBA 2015

Fahrzeugtyp	Schwere Lkw und Busse (N2, N3; M3) Ab 2.610 kg Bezugsmasse				Leichte Nutzfahrzeuge: N1, teilweise N2; M2. 1.760 bis 2.610 kg Bezugsmasse		
	EU-Verordnungen 595/2009 sowie 582/2011				EU-Verordnung 715/2007		
Rechtsgrundlage	mg/kWh				g/km		
Emissionsmetrik	Euro I	Euro VI WHSC 2012	Euro VI WHTC 2012	Veränderung in %	Euro 1 NEFZ 1995	Euro 6 NEFZm 2016	Veränderung in %
Abgas-Norm Testverfahren Gilt seit	1993	2012	2012		1995	2016	
Kohlenmonoxid CO	4,5	1,5	4	-67/-11	6,9	0,74	-89
Kohlenwasserstoffe HC	1,1	0,13	0,16	-88/-85	-	-	-
HC + NO _x	-	-	-	-	1,7	0,215	-87
Stickoxide NO _x	8	0,4	0,46	-95/-94	-	0,125	-
Ammoniak NH ₃ in ppm	-	10	10	-	-	-	-
Partikelmasse PM	0,36	0,01	0,01	-97	0,25	0,0045	-98
Partikelzahl PN/kWh bzw. PN/km	-	8 * 10 ¹¹	6 * 10 ¹¹	-	-	6 * 10 ¹¹	-

Lkw und Bussen begrenzen, in der Diskussion (vgl. Exkurs CO₂-Regulierung für Lkw und Busse?). Mittelfristig werden relevante Effizienzreserven, die zur Minderung des Kraftstoffverbrauchs und der CO₂-Emissionen von Nutzfahrzeugen wichtige Beiträge leisten können, in drei Bereichen gesehen: Verbesserung des Wirkungsgrads, Hybridisierung und Abwärmenutzung. Sie werden im Folgenden dargestellt.

Verbesserung des Wirkungsgrads

Für den Wirkungsgrad ist maßgeblich, dass der Motor und das Motorkennfeld so konzipiert sind, dass ein Fahrzeug möglichst lange in einem bestimmten Drehzahlbereich arbeitet. Dies ist vor allem bei häufig in regionalen eingesetzten Nutzfahrzeugen mit zahlreichen Anfahrvorgängen nur bedingt realisierbar. Da die meisten Nutzfahrzeuge vom Hersteller für ein breites Nutzerspektrum konzipiert sind, wird bei deren Nutzung je nach dabei auftretenden Fahrtrmustern ein geringerer Wirkungsgrad erreicht.

Generell versuchen die Fahrzeughersteller, durch die Verringerung der innermotorischen Reibung, das Downspeeding (Verlängerung der Endübersetzung im optimalen Arbeitsbereich der Verbrennung) und die Optimierung der Einzelkomponenten und Betriebsparameter wie Einspritzdruck, Abgasrückführung und Temperatur, den Wirkungsgrad des Antriebsstranges (Motor und Getriebe) weiter zu erhöhen.

Eine weitere Effizienzmaßnahme ist die Elektrifizierung von Nebenaggregaten (wie Öl- und Wasserpumpen, Luftkompressoren). Elektrisch betriebene Nebenaggregate zeichnen sich gegenüber mechanisch angetriebenen Aggregaten durch eine höhere Effizienz aus, da sie unmittelbar bezogen auf die abgegebene Leistung einen höheren Wirkungsgrad besitzen. Zudem können elektrisch angetriebene Nebenaggregate an den aktuellen Leistungsbedarf angepasst werden (Reif et al. 2012). Überdies können bei Nutzfahrzeugen wichtige Nebenverbraucher (wie Kompressoren) auch ausgekuppelt werden. Im Lkw-Bereich werden 2 bis 3 % Kraftstoffeinsparungen aus der Optimierung des Nebenaggregate-Betriebes erwartet.

EXKURS CO₂-REGULIERUNG FÜR LKW UND BUSSE?

Für Pkw (M1-Fahrzeuge) wurden bereits mit EU-Verordnung 443/2009/EG im Jahr 2009 CO₂-Grenzwerte festgelegt, die 2014 durch EU-Verordnung 333/2014/EU fortgeschrieben wurde (EP/Rat 2009c, 2014c). Danach sollen die CO₂-Emissionen für Neuwagen – genauer: die herstellerbezogenen Neuwagenemissionen – auf durchschnittlich nur noch 95 g CO₂/km sinken. Das entspricht bei Diesel-Pkw einem Normverbrauch von etwa 3,6 Liter Diesel auf 100 km (gemessen im Neuen Europäischen Fahrzyklus NEFZ). Die CO₂-Grenzwert-Regulierung wirkt sich maßgeblich auf die von den Fahrzeugherstellern angebotenen Pkw aus, insbesondere auch auf die antriebstechnische Ausstattung von Neufahrzeugen.

Auch für Nutzfahrzeuge ist eine europäische CO₂-Grenzwert-Gesetzgebung seit langem in der Diskussion – in Japan und den USA gibt es bereits Verbrauchs- bzw. CO₂-Emissionsstandards für Nutzfahrzeuge. Für leichte Nutzfahrzeuge (Kategorie N1) gibt es analog zu den Pkw durch EU-Verordnung 510/2011/EU eine Festlegung von herstellerbezogenen CO₂-Grenzwerten für Neufahrzeuge. Abgrenzungskriterium der CO₂-Regulierung für N1-Fahrzeuge ist die Fahrzeugmasse, die sich aus zulässiger Gesamtmasse abzüglich Nutzlast ergibt. Nach EU-Verordnung 253/2014/EU dürfen N1-Fahrzeuge mit einer Fahrzeugmasse von bis zu 2.610 kg ab 2020 nicht mehr als 147 g CO₂/km ausstoßen; das entspricht etwa 5,6 Liter Diesel auf 100 km (EP/Rat 2014b).

Aufgrund ihrer seit 1990 deutlich gestiegenen absoluten CO₂-Emissionen sind zuletzt auch schwere Lkw in den Fokus der europäischen CO₂-Regulierung gelangt (EU-KOM 2014b). Bislang werden die spezifischen CO₂-Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen in Europa nicht einmal in standardisierten Messverfahren ermittelt. Zu den schweren Nutzfahrzeugen im Sinne künftiger EU-CO₂-Regulierung zählen zum einen Straßengüterfahrzeuge der Klassen N2 und N3 (über 3,5 Tonnen zulässiges Gesamtgewicht), zum anderen Busse der Klassen M2 und M3 (mit mehr als acht Sitzplätzen).

Die Betrachtung allein antriebsbedingter CO₂-Emissionen erschien dabei nicht sinnvoll, da nur etwa ein Drittel der CO₂-Reduktionspotenziale über den Nutzfahrzeugantrieb zu realisieren sind (EU-KOM 2014a). Anders als Pkw oder auch leichte Nutzfahrzeuge werden schwere Nutzfahrzeuge jedoch nicht in Großserien gefertigt. Vielmehr gibt es bei schweren Nutzfahrzeugen eine große Variantenvielfalt mit funktionalen Ausstattungen für unterschiedliche Einsatzgebiete. So beeinflussen etwa Variationen bei Antriebstechnik, Achszahl oder spezielle Aufbauten den spezifischen Kraftstoffverbrauch und die fahrzeugspezifischen CO₂-Emissionen. Von daher stellt bereits die Messung und der Vergleich fahrzeugspezifischer Verbräuche und CO₂-Emissionen eine große Herausforderung dar.

Zur einheitlichen Berechnung von CO₂-Emissionen schwerer Nutzfahrzeuge hat die EU-Kommission das Simulationstool VECTO (Vehicle Energy Consumption Tool) entwickeln lassen (EC/JRC 2014). Mit Hilfe von VECTO können für beliebig konfigurierte ganze Nutzfahrzeuge und definierte Einsatzbereiche spezifischer Kraftstoffverbrauch und CO₂-Emissionen berechnet werden. Das Simulationsprogramm berechnet dabei die Verbrauchswerte für das Gesamtfahrzeug aus vermessenen Daten der wichtigsten verbrauchsrelevanten Komponenten; und das sind Motor, Reifen und Karosserie des Fahrzeugs, Getriebe, Achsen und die Nebenaggregate.

Welche legislativen Schlussfolgerungen – von der Pflicht zur CO₂-Berichterstattung bis hin zu verbindlichen CO₂-Grenzwerten auch für schwere Nutzfahrzeuge – aus den künftig vorliegenden Daten zu spezifischen Kraftstoffverbräuchen und CO₂-Emissionen für schwere Nutzfahrzeuge gezogen werden sollen, wird zurzeit noch diskutiert (EU-KOM 2014b).

Insgesamt wird für den Wirkungsgrad des Antriebsstrangs ein Verbesserungspotenzial von 7-14% sowohl im urbanen als auch beim Langstreckeneinsatz gesehen. Es ist darauf hinzuweisen, dass es bereits bei der Entwicklung der Euro-VI-Motoren einigen Fahrzeugherstellern gelungen ist, dass die neu entwickelten Euro-VI-Motoren um bis zu 5% weniger Kraftstoff als die Vorgänger-Generation mit Euro V verbrauchen. Oft geht damit ein Mehrverbrauch des für die Abgasreinigung benötigten Zusatzstoffes AdBlue® einher.

Hybridisierung

Weitere Einsparpotenziale werden von der Hybridisierung von Nutzfahrzeugantrieben erwartet. Hybridfahrzeuge können elektrische Energie aus dem Fahrbetrieb mit Verbrennungsmotor rückgewinnen (rekuperieren) und teilweise auch kurze Strecken elektrisch (unterstützt) fahren. Anders als batterieelektrische Fahrzeuge oder Plug-in-Hybride versorgen sie sich nicht extern mit Fahrstrom und fahren auch nicht rein elektrisch über größere Strecken.

Hybridfahrzeuge wandeln beim Bremsen einen Teil der Bewegungsenergie des Fahrzeuges in elektrische oder mechanische Energie um. Elektrische Energie wird

dann in Akkumulatoren gespeichert und über einen Elektromotor, der parallel zum Verbrennungsmotor arbeitet, bei einem Anfahr- oder Beschleunigungsvorgang wieder in Bewegungsenergie umgesetzt. Als mechanischer Energiespeicher kann ein hydraulisches System verwendet werden, das beim Bremsen die Bewegungsenergie als Druck speichert und beim nächsten Anfahrvorgang der Fahrzeugtraktion wieder zuführt.

Derartige Hybridsysteme sind besonders effizient in der Anwendung, wenn häufige Brems- und Anfahrvorgänge während einer Fahrt stattfinden, wie dies bei urbanen und regionalen Verkehren gegeben ist. Im Busbereich konnte durch Hybridisierung bis zu 20% Kraftstoffersparnis realisiert werden (Hondius 2015). Bei Lkw werden im urban-regionalen Einsatz Einsparpotenziale von bis zu 20%, im Langstreckenbereich von etwa 5% für möglich gehalten.

Abwärmenutzung

Mehr als 50% der im Kraftstoff gespeicherten Energie geht beim Verbrennungsmotor in Form von Wärme über die Motorkühlung sowie den Abgasstrom verloren. Bisher wird die Energie des Abgasstroms nur teilweise genutzt – zum Beispiel für die

Abgasturboaufladung und für die Abgasnachbehandlung.

Die Abgaswärmenutzung (englisch: Waste Heat Recovery, WHR) ist eine weitere technische Maßnahme, die sonst über den Auspuff entweichende Energie für den Fahrzeugantrieb zu nutzen. Ähnlich wie in Kraftwerken erzeugen WHR-Systeme mit Hilfe eines in den Abgasstrang integrierten Wärmetauschers (Verdampfers) Elektrizität. Dabei wird die Wärmeenergie aus dem Abgasstrom im Wärmetauscher auf eine Flüssigkeit (beispielsweise Wasser oder Alkohol) übertragen. Durch Zuführung der Wärmeenergie verdampft die Flüssigkeit und erzeugt hierdurch Druck, der wiederum einen Expander oder eine Turbine antreibt. Diese(r) kann den Fahrzeugantrieb direkt unterstützen oder mit einem Stromgenerator gekoppelt werden.

Voraussetzung für die Abgaswärmenutzung ist ein möglichst gleichmäßiger Strom wärmeenergiereicher Abgase – ideal ist der Einsatz im Fern- oder Langstreckenverkehr. Bei Nutzfahrzeugen mit überwiegendem Langstreckeneinsatz wird das Effizienzpotenzial der Abwärmenutzung auf etwa 5% geschätzt.

lungsprozess von Kraftstoffen, insbesondere dessen Nachhaltigkeit, ab.

Die EU-Kraftstoffrichtlinie 30/2009/EG und die EU-Dieselnorm EN 590 sind in Deutschland in nationales Recht übernommen worden. Hierzulande darf gemäß 10. Bundesimmissionsschutzverordnung (10. BImSchVO) Dieselkraftstoff nur in den Verkehr gebracht werden, wenn er der EU-Dieselnorm EN 590 entspricht. Die Einhaltung wird von den Behörden laufend überwacht.

Aufgrund der hohen Nachfrage im Straßengüterverkehr, aber auch durch die zunehmende Verdieselung der Pkw-Flotten, hat sich Dieselkraftstoff zur Hauptkraftstoffsorte in Deutschland und Europa entwickelt. Auf den Kraftstoffmärkten in Deutschland und Europa wird inzwischen mehr als doppelt so viel Diesel- wie Ottokraftstoff verbraucht. Dabei sind Deutschland und Frankreich mit

DIESELKRAFTSTOFF UND DIESELSUBSTITUTE

Dieselantriebe nutzen in der Regel aus der Verarbeitung von Erdöl gewonnenen Dieselkraftstoff. Flüssige Ersatz- oder Ergänzungstoffe aus fossilen Ressourcen oder aus erneuerbaren Energiequellen sind zum einen Biokraftstoffe und hier im Besonderen Biodiesel, zum anderen so genannte paraffinische Kraftstoffe.

Dieseldieselkraftstoff

Dieseldieselkraftstoff ist ein fossiler (mineralischer) Kraftstoff. Er wird in Raffinerien mit Hilfe von Druck und Temperatur (Destillation) und Konversionsprozessen aus Erdöl gewonnen. Dabei ist Dieseldieselkraftstoff ein Gemisch aus unterschiedlichen Kohlenwasserstoff-Arten mit in der Regel zehn bis 22 Kohlenstoffatomen. Einheitliche europäische Anforderungen an Kraftstoffe wurden zunächst von der EU-Kraftstoffqualitätsrichtlinie 70/1998/EG bzw. in der dritten Fassung 30/2009/EG spezifiziert. Weitere Mindestanforderungen

wie Cetanzahl, Dichte, Polyaromaten- und Schwefelgehalt, Flammpunkt und andere werden von der europäischen Dieseldieselkraftstoffnorm EN 590 definiert.

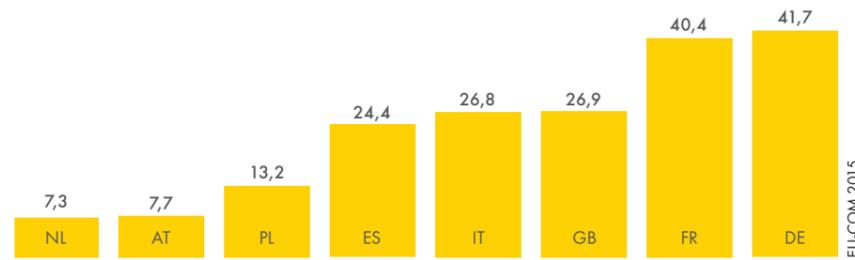
Im Laufe der Jahre ist die Dieseldieselkraftstoffspezifikation deutlich verschärft worden. Beispielsweise wird heute in der EU fast nur noch schwefelfreier Dieseldieselkraftstoff vermarktet. Die jüngsten Revisionen der EU-Kraftstoffqualitäts-Richtlinie aus den Jahren 2009 und 2015 richten sich anders als bisher jedoch weniger auf die Kraftstoffinhaltsstoffe; sie zielen vielmehr auf den Herstel-

einem Dieseldieselfkraftstoffverbrauch von heute (2013) jeweils über 40 Mrd. Litern die mit Abstand größten Dieseldieselfkraftstoffmärkte in der EU (EU-COM 2015).

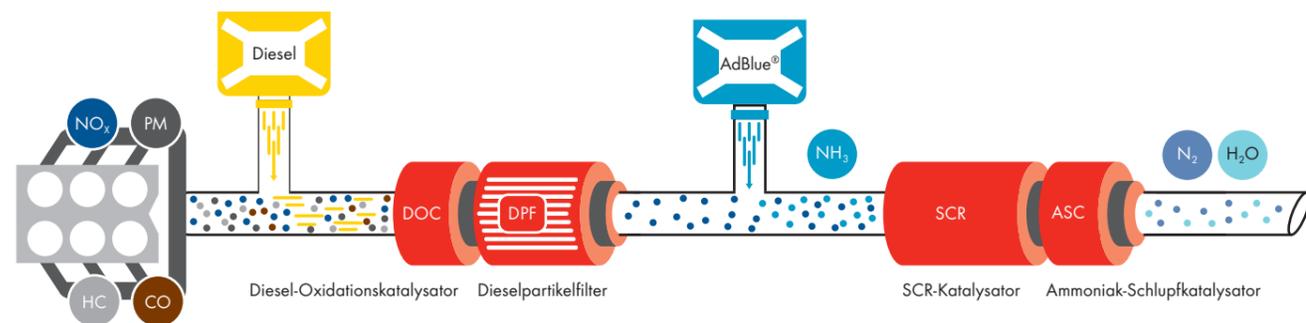
Moderne Dieseldieselfkraftstoffe benötigen für die Abgasnachbehandlung zusätzlich zum Dieseldieselfkraftstoff eine wässrige Harnstofflösung (AdBlue®); dabei handelt es sich nicht um ein Kraftstoffadditiv, sondern um ein Betriebsmittel für die Abgasreinigung (vgl. Exkurs Abgasnachbehandlung im Dieseldieselfkraftstoff-Lkw).

43 EU-DIESELKRAFTSTOFF-MÄRKTE 2013

In Mrd. Liter



EXKURS ABGASNACHBEHANDLUNG IM DIESEL-LKW



Um heutige Normen für Abgasemissionen einhalten zu können, benötigen Nutzfahrzeuge mit Dieseldieselfkraftstoffantrieb eine aufwändige und komplexe Abgasnachbehandlung. Der für stöchiometrisch betriebene Ottomotor übliche Drei-Wege-Katalysator reicht nicht aus, um die Stickoxidemissionen von mageren Dieseldieselfkraftstoffmotoren zu neutralisieren. Und der Stickoxidspeicherkatalysator (NO_x-Speicherkat) ist für Dieseldieselfkraftstoff-Nutzfahrzeuge nicht wirksam genug und führt zu Kraftstoffmehrerverbrauch.

Daher hat sich die **Selektive Katalytische Reduktion** (Selective Catalytic Reduction oder kurz: SCR) – bei Lkw und Bussen mit den Abgasnormen Euro V, EEV, Euro VI sowie für leichte Nutzfahrzeuge mit der Euro-Norm 6 – zur Standardkomponente von Abgasnachbehandlungssystemen für Dieseldieselfkraftstoffmotoren entwickelt.

Im Zwei-Wege-Dieseldieselfkraftstoff-Oxidationskatalysator werden zunächst Kohlenmonoxid (CO) sowie unverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC) und im Dieseldieselfkraftstoffpartikelfilter (PM) aus dem Abgasstrom entfernt. Zur Behandlung der Stickoxide (NO_x) folgt ein SCR-Katalysator. Hierfür wird Ammoniak (NH₃) als Reduktionsmittel zur Minderung der Stickoxidemissionen eingesetzt; denn Ammoniak oxidiert bevorzugt mit dem Sauerstoff der Stickoxide. Da Ammoniak giftig, aber sehr gut wasserlöslich ist, wird es als ungiftige wässrige Harnstofflösung (CH₄N₂O) eingesetzt. Sein Harnstoffgehalt beträgt 32,5%. Sein technischer Name lautet AUS 32 (Aqueous Urea Solution) oder auch Dieseldieselfkraftstoff Exhaust Fluid (DEF), sein Handelsname AdBlue® (Cummins 2009; VDA 2013). Die Qualitätsanforderungen, insbesondere an seine Produktreinheit, sind in der Norm DIN 70070 – entsprechend ISO 22241 – festgelegt (DIN 2003).

AdBlue® wird in einem speziellen Zusatztank im Fahrzeug mitgeführt. Da AdBlue® bei -11 °C Grad beginnt einzufrieren, muss der Tank in kälteren Gebieten beheizt werden. Zur Abgas-Entstickung wird die Harnstofflösung vor dem SCR-Katalysator mittels Injektor kontinuierlich in den heißen Abgasstrom eingeführt und zersetzt sich dort zu Ammoniak. Im nachgeschalteten SCR-Katalysator werden Stickoxide weitgehend in unschädlichen molekularen Stickstoff (N₂) und Wasser(dampf) (H₂O) umgewandelt. Zur Vermeidung von Ammoniakemissionen wird schließlich ein Ammoniak-Schlupfkatalysator (ASC) nachgeschaltet.

Entscheidend für eine erfolgreiche Stickoxidreduktion ist das Verhältnis von Ammoniak zu Stickoxiden (Feed-Verhältnis). Im praktischen Einsatz und bei ausreichend hohen Abgastemperaturen kann eine NO_x-Reduktion von 90% erreicht werden (Bosch 2014).

Der spezifische Verbrauch von AdBlue® ist abhängig von der Fahrzeugklasse, insbesondere dem Fahrzeuggewicht, und der Konstruktion, Auslegung und Betriebsweise des Motors. Bei Nutzfahrzeugen mit Abgasrückführung liegt der AdBlue®-Verbrauch in der Regel unter 5% des Dieseldieselfkraftstoffkonsums, im Falle ohne Abgasrückführung dagegen zwischen 5 und 10%. Auf der anderen Seite kommt es zu einer Kraftstoffeinsparung ähnlicher Größenordnung, da bei Einsatz von SCR-Technik hohe NO_x-Gehalte bei den Rohemissionen toleriert werden können und der Motor auf heiße, partikelarme und effiziente Verbrennung ausgelegt werden kann.

AdBlue® wird heute an Tankstellen in Gebinden (Flaschen, Kanistern) oder als Zapflösung, insbesondere auf Lkw-Spuren angeboten. Zudem gibt es spezielle Tank-Container für Betriebstankstellen.

Biokraftstoffe und Biodieseldieselfkraftstoff

Zur wichtigsten Alternative zu fossilen Kraftstoffen haben sich in den vergangenen zwei Jahrzehnten Biokraftstoffe entwickelt. Sie sind ebenfalls flüssig und weisen meist nur leicht abweichende, aber grundsätzlich ähnliche technische und Verbrennungseigenschaften auf wie ihre fossilen Pendanten.

Für Dieseldieselfkraftstoff hat sich insbesondere **Biodieseldieselfkraftstoff** etabliert, technischer Name Fettsäuremethylester (FAME). Über 11 Mio. Tonnen oder rund 80% der in der EU eingesetzten Biokraftstoffe ist Biodieseldieselfkraftstoff (EurObserv'er 2015).

Bei der Herstellung von Biodieseldieselfkraftstoff werden pflanzliche und tierische Öle und Fette mit Hilfe von Alkoholen umgeestert zu Methyl-ester. Der in Deutschland am häufigsten eingesetzte Ausgangsstoff für die Biodieseldieselfkraftstoffherstellung ist Raps (BLE 2015). Technische Anforderungen an Biodieseldieselfkraftstoff sind seit 2003 in der EU-Norm EN 14214 geregelt.

Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse sollen mittel- bis langfristig zunehmend durch Biokraftstoffe aus Abfall- und Reststoffen oder gar Algenölen ersetzt werden (Shell 2012; EP/Rat 2015b). Bislang spielen solche **Biokraftstoffe zweiter und dritter Generation** kommerziell jedoch noch keine Rolle. Kaum noch Bedeutung weisen dagegen Pflanzenöle auf – schon wegen ihrer gegenüber Dieseldieselfkraftstoff abweichenden technischen und Verbrennungseigenschaften.

Biodieseldieselfkraftstoff wird heute kaum noch – oder allenfalls in Nischenanwendungen – in Reinform (B100) eingesetzt. Vielmehr wird Biodieseldieselfkraftstoff für den Straßenverkehr dem fossilen Dieseldieselfkraftstoff beigemischt. Die Beimischung von Biodieseldieselfkraftstoff geschieht, um die Energie- und Treibhausgas-Quoten zu erfüllen, die sich aus der EU-Richtlinie für erneuerbare Energien 28/2009/EG sowie der EU-Kraftstoffqualitätsrichtlinie (30/2009/EG) ergeben. Danach müssen im Verkehrsbereich bis 2020 mindestens 10% erneuerbare Energien eingesetzt und über Kraftstoffe mindestens 6% Treibhausgasemissionen eingespart werden. Biokraftstoffe sind hierbei bislang die mit Abstand wichtigste Erfüllungsoption. Zudem müssen Biokraftstoffe bestimmte

Nachhaltigkeitskriterien erfüllen, um auf die EU-Energie- und Treibhausgasziele angerechnet zu werden (EP/Rat 2009a, b). Biodieseldieselfkraftstoff muss zudem die qualitativen Anforderungen der europäischen Biodieseldieselfkraftstoff-Norm EN 14214 erfüllen.

Aufgrund abweichender technischer Eigenschaften von Biodieseldieselfkraftstoff haben sich Hersteller und Kraftstoffanbieter darauf geeinigt, den Biodieseldieselfkraftstoffanteil im Dieseldieselfkraftstoff auf 7 Vol.-% (B7) zu begrenzen. Mit einer Änderung, insbesondere einer Erhöhung über 7% hinaus, ist auf absehbare Zeit nicht zu rechnen. Höhere Biokraftstoffanteile im Dieseldieselfkraftstoff als B7 lassen sich künftig nur mit neuen und technisch-qualitativ besser kompatiblen Biokraftstoffen erreichen.

Über 99% des Dieseldieselfkraftstoffabsatzes in der EU besteht inzwischen aus B7 (EU-COM 2015). Daher sind die größten Dieseldieselfkraftstoffverbraucher zumeist auch die bedeutendsten Biodieseldieselfkraftstoffverwender: Frankreich mit 2,5 Mio. Tonnen und Deutschland mit 1,9 Mio.

Tonnen Biodieseldieselfkraftstoff, jeweils in Öläquivalenten (EurObserv'er 2015).

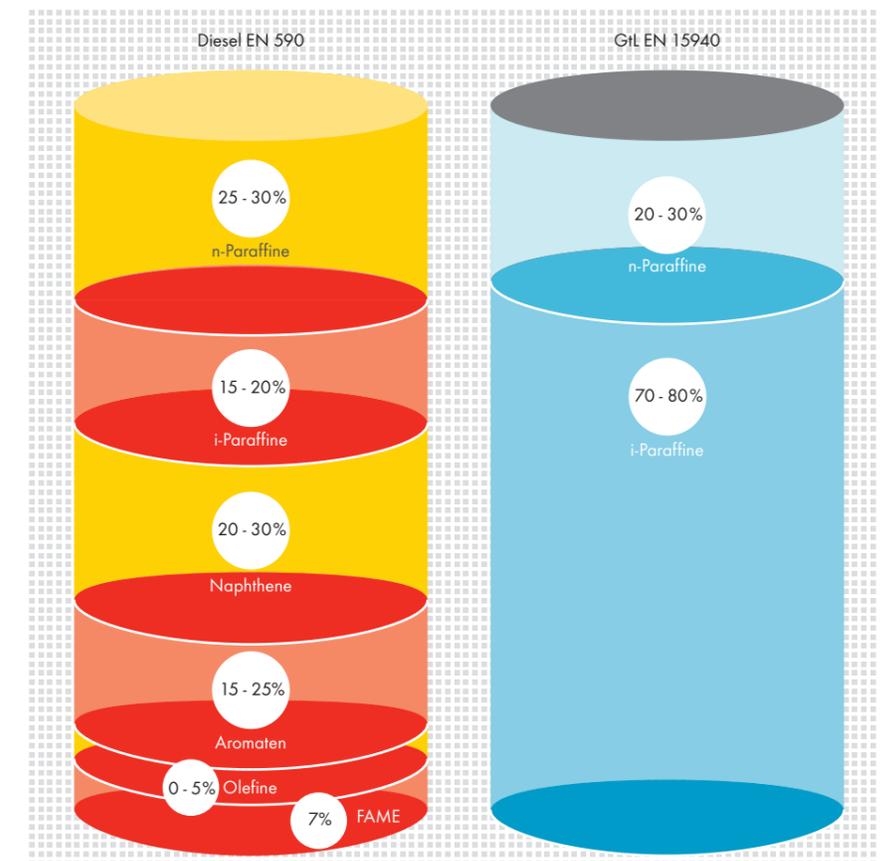
Paraffinische Kraftstoffe

Eine weitere Kraftstoffalternative sind paraffinische Kraftstoffe. Paraffine sind stabile, wenig reaktionsfreudige Gemische aus gesättigten Kohlenwasserstoffen (Alkane) mit der allgemeinen Summenformel C_nH_{2n+2} bezeichnet (Mortimer/Müller 2010).

Die Eigenschaften von Paraffin-Kraftstoffen lassen sich aus der homologen Reihe der Alkane ableiten. Sie sind zunächst klar, geruchs- und geschmacklos sowie ungiftig. Weiterhin weist paraffinischer Kraftstoff eine höhere Cetanzahl als fossiler Dieseldieselfkraftstoff auf und er ist nahezu frei von Sauerstoff, Stickstoff, Schwefel oder Aromaten. Paraffinischer Kraftstoff verbrennt daher sehr sauber und kann so zur Reduktion von verkehrs- bzw. verbrennungsbedingten Luftschadstoffemissionen beitragen – auch in bestehenden Kraftfahrzeugflotten.

44 DIESEL (B7) UND PARAFFINISCHER KRAFTSTOFF (GTL)

Vergleich einer typischen Zusammensetzung



Während paraffinische Kraftstoffe – wie in Abbildung 44 an Gas-to-Liquids (GtL) gezeigt – zu mindestens 98,5% aus Iso- und Normal-Paraffinen bestehen, stellt Dieselkraftstoff ein Vielstoffgemisch aus unterschiedlichen Kohlenwasserstoff-Arten in unterschiedlichen Mischungsverhältnissen dar. Darunter finden sich nicht nur langkettigere Alkane, sondern auch Olefine oder aromatische Kohlenwasserstoffe. Wird dem Dieselkraftstoff überdies Biodiesel beige-mischt, kommen Fettsäureester hinzu.

Allerdings liegt die Dichte paraffinischer Kraftstoffe etwas niedriger als bei fossilem Dieselkraftstoff. Jedoch erfüllen paraffinische Kraftstoffe die Dichte-Anforderungen der Dieselkraftstoffnorm EN 590 als Kraftstoffgemisch mit fossilem Dieselkraftstoff. Um überdies den allgemeinen Einsatz paraffinischer Kraftstoffe zu ermöglichen, ist 2016 eine EU-Kraftstoffnorm für paraffinische

Dieseldieselkraftstoffe (EN 15940) veröffentlicht worden (CEN 2016). Wichtige Fahrzeughersteller haben Nutzfahrzeuge mit Euro-VI-Motoren bereits für paraffinische Kraftstoffe freigegeben.

Dünnflüssige Paraffine können mit Hilfe des Fischer-Tropsch-Verfahrens aus Synthesegasen gewonnen werden. Die größte kommerzielle Relevanz besitzen derzeit paraffinische Kraftstoffe auf Erdgasbasis (GtL). Gleichwohl können paraffinische Fischer-Tropsch-Kraftstoffe auch aus festen oder flüssigen Ausgangsstoffen wie Kohle oder Biomasse hergestellt werden (Coal- or Biomass-to-Liquids). Die Internationale Energieagentur geht davon aus, dass der Einsatz dieser als XtL-Kraftstoffe bezeichneten Energieträger von heute (2014) 0,9 Mio. Barrel pro Tag auf 2,5 Mio. Barrel bis 2040 zulegen könnte (IEA 2015). Außerdem lassen sich paraffinische

Kraftstoffe durch katalytische Reaktion mit Wasserstoff (Hydrierung) aus Pflanzenölen gewinnen. Sie werden daher auch hydrierte Pflanzenöle (Hydrotreated Vegetable Oils, HVO) genannt. In Deutschland stellen HVO-Kraftstoffe etwa ein Fünftel des Biodieselangebots (BLE 2015).

Flüssige Kraftstoffe, darunter auch paraffinische Kraftstoffe, können auch aus Strom hergestellt werden; man spricht insbesondere im Zusammenhang mit überschüssigem erneuerbarem Strom von Power-to-Liquids (PtL). Dabei wird unter Power-to-Liquids die Erzeugung von energiereichen kohlenwasserstoffhaltigen Flüssigkeiten aus Strom mittels Elektrolyse über Wasserstoff und via nachgeschalteter Synthese (zum Beispiel Fischer-Tropsch) unter Zuführung von CO₂ zu synthetischem Benzin, Diesel oder Kerosin verstanden (vgl. Exkurs auf Seite 50: Kraftstoff aus Strom – Power-to-X).

Lärmgrenzwerte von 68 Dezibel einhalten; bislang sind es noch 74 Dezibel (EP/Rat 2014d). Beim Straßenverkehr ist zu unterscheiden zwischen antriebsbedingten und Reifen-Fahrbahn-Geräuschen. Antriebsbedingte Geräuschemissionen dominieren bei niedrigen Geschwindigkeiten und beim Anfahren, bei höherem Tempo sind Reifen-Fahrbahn-Geräusche vorherrschend. Aufgrund höherer antriebsbedingter Emissionen von Dieselmotoren schneiden Dieselmotoren im örtlichen Verkehr und bei niedrigen Geschwindigkeiten schlechter ab als außerorts.

In Bezug auf die **Treibhausgasemissionen** spricht zunächst die hohe Effizienz für den Dieselantrieb, speziell im Vergleich zum Ottoprinzip. Allerdings entstehen bei der dieselmotorischen Verbrennung fossiler Kraftstoffe CO₂-Emissionen. Neben Effizienzsteigerungen können CO₂-arme bzw. erneuerbar hergestellte Alternativkraftstoffe, zum Beispiel Biokraftstoffe aus nachhaltiger Biomasse oder Power-to-Liquids aus erneuerbarem Strom, die Klimabilanz des Dieselantriebs substanziell verbessern. Allerdings sind alternative Kraftstoffe nach wie vor teurer als Diesel.

Verfügbarkeit jederzeit gegeben. Obgleich straßenverkehrsbedingte Emissionen fast aller regulierten Luftschadstoffe insgesamt seit Jahren sinken, werden die 2010/2015 zur Verbesserung der Luftqualität eingeführten EU-Immissionsgrenzwerte insbesondere bei Partikeln und Stickoxiden in vielen Ballungsräumen regelmäßig überschritten (UBA 2016). Als einer der Hauptverursacher verkehrsbedingter **lokaler Luftschadstoffemissionen**, insbesondere in urbanen Räumen, gilt der Dieselantrieb.

Allerdings tragen Nutzfahrzeuge nur einen Teil zu den Verkehrsemissionen bei; und oftmals sind es alte Nutzfahrzeuge mit niedrigen oder ohne Euro-Abgasstandards. Mit der Einführung der Umweltplakettspflicht haben einige Städte insbesondere älteren Dieselfahrzeugen die Zufahrt in bestimmte Bereiche untersagt, um deren Einfluss auf die Grenzwertüberschreitungen auszuschließen. Eine Alternative, die durch ältere Dieselfahrzeuge verursachten Luftschadstoffemissionen zu reduzieren, sind emissionsarme paraffinische Kraftstoffe.

Eine weitere Quelle **lokaler Emissionen** sind Geräuschemissionen, und hier ist der Straßenverkehr eine der Hauptquellen. Bis 2024 sollen Neufahrzeuge in der EU

DIESEL IM CHECK

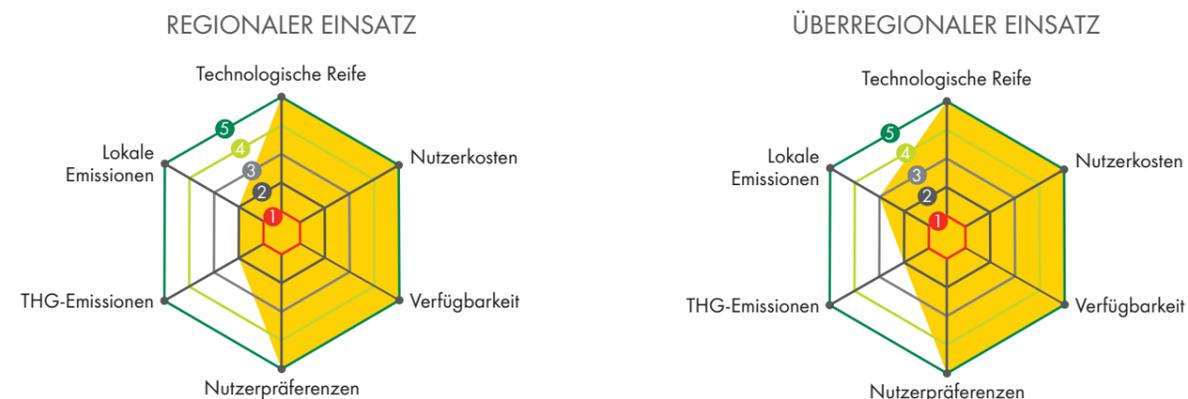


Der Dieselantrieb besitzt als Standardtechnik für Nutzfahrzeuge die höchste **technologische Reife**, aber auch noch weiteres Verbesserungspotenzial. Die **Nutzerkosten** sind durch den Einsatz ausgereifter Antriebstechnik moderat. Informationen zu den Nutzerkosten, insbesondere Gesamtkostenbetrachtungen (Total Cost of Ownership) sind verfügbar und transparent. Diesel- und Dieselnutzerkosten stellen somit eine technische wie ökonomische Benchmark für alle anderen alternativen Kraftstoffe und Antriebe dar.

Gleichzeitig bietet der Fahrzeugmarkt eine hohe Vielfalt bei Dieselfahrzeugen. So werden Fahrzeuge mit unterschiedlichen Leistungsmerkmalen und auf spezifische **Nutzerpräferenzen** optimal ausgerichteten Aufbauten sowie passend dazu ausgestatteten Fahrerhäusern angeboten. Es herrscht zwischen den Herstellern der Fahrzeuge Wettbewerb auf nationaler und europäischer Ebene, sodass die Preise gut vergleichbar sind.

Die Möglichkeit, Dieselkraftstoff zu tanken, ist durch eine weltweit flächendeckende

45 STECKBRIEF DIESELANTRIEB UND DIESELKRAFTSTOFF



(0: keine Ausprägung, 1: geringe Ausprägung, 2: mittlere Ausprägung, 3: gute Ausprägung, 4: fast vollständige Ausprägung, 5: vollständige Ausprägung)

MARKTDURCHDRINGUNG

- Standard-Antriebstechnik für alle Nutzfahrzeuge und flächendeckend verfügbarer Kraftstoff.

ANWENDBEREICHE

- Alle Nutzfahrzeuge (Lkw, Busse und Sonstige Kfz)

EFFIZIENZPOTENZIALE BIS 2040

- Motor/Antrieb: 7 - 14%, Hybridisierung: 5 - 20%, Abwärmenutzung: ca. 5%

KOSTEN

- Kosten für Antriebstechnik gering aufgrund hoher Stückzahlen und hoher Technologiereife. Dieseldieselkraftstoffpreise abhängig von internationalen Preisen für Rohöl, Ölprodukte sowie Energiesteuern; Dieseldieselsubstitute teurer als fossiler Diesel.

FAZIT DIESEL

Dieselantrieb und Dieselkraftstoff sind Benchmark für alle alternativen Antriebe und Kraftstoffe. Bis auf lokale und Treibhausgasemissionen sind alle Kriterien maximal ausgeprägt; die Emissionsperformance kann durch alternative Kraftstoffe partiell verbessert werden.



3.3 ERDGAS

ERDGASANTRIEBE

Zu einer relevanten Antriebs- und Kraftstoffalternative für Nutzfahrzeuge haben sich in letzter Zeit mit Erdgas betriebene Motoren entwickelt. Schon länger werden modifizierte Ottomotoren für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge mit komprimiertem Erdgas (CNG) betrieben. Im Gefolge des weltweiten Erdgasbooms der vergangenen Jahre haben sich bei Erdgasantrieben und Erdgaskraftstoffen wichtige Innovationen ereignet; dazu gehört unter anderem die Verwendung von verflüssigtem Erdgas als Kraftstoff in schweren Lkw. Was sind die wichtigsten Trends für Erdgas-Nutzfahrzeuge? Und welche Entwicklungspotenziale werden gesehen?

Ein Vorteil des Verbrennungsmotors ist, dass er mit sehr unterschiedlichen Kraftstoffen betrieben werden kann. So können Nutzfahrzeugantriebe nicht nur flüssige, sondern auch gasförmige Kraftstoffe verwerten. In der Regel sind hierfür jedoch technische Modifikationen am Motor erforderlich; diese reichen von der Kraftstoffversorgung und

dessen Speicherung, über die Motorsteuerung sowie brennraumrelevante Bauteile bis hin zur Abgasnachbehandlung. Nach Art des gespeicherten Kraftstoffs – komprimiert oder flüssig – lassen sich zunächst CNG- und LNG-Fahrzeuge unterscheiden. Den Motoren wird das Erdgas jedoch gasförmig zugeführt, sodass der wesentliche

Unterschied von CNG und LNG-Nutzfahrzeugen in der Art der Speicherung des Erdgases – komprimiert oder tiefkalt (kryogen) – liegt und weniger in der Antriebstechnik. Nach Art des Motorenkonzeptes lassen sich im Nutzfahrzeugbereich Mono-, Bi- und Dual-Fuel-Antriebe, stöchiometrischer vs. Magerbetrieb, äußere Gemischbildung über das Saugrohr versus Direkteinspritzung unterscheiden. Die wohl wichtigste Unterscheidung für Leistung, Effizienz und Emissionen von Nutzfahrzeugen dürfte jedoch Otto- versus Dieselmotorprinzip in der Antriebstechnik sein.

In Europa haben sich Erdgasfahrzeuge ausgehend vom erdgasbetriebenen Otto-Pkw über die leichten Nutzfahrzeuge bis hin zu mittelschweren Lkw und Bussen ausgebreitet. Für schwere Nutzfahrzeuge werden

neue Trends bei der Erdgasantriebstechnik hingegen vor allem in Nordamerika, wo sich heute bereits einige tausend LNG-Fahrzeuge im Einsatz befinden, entwickelt. In China werden ebenfalls Erdgas-Nutzfahrzeuge in größerer Anzahl eingesetzt. In beiden Fällen handelt es sich hauptsächlich um Fahrzeuge mit Otto-Motoren (PNNL 2010, EC/DGM 2014b).

Mono-/Bi-Fuel – Ottoprinzip

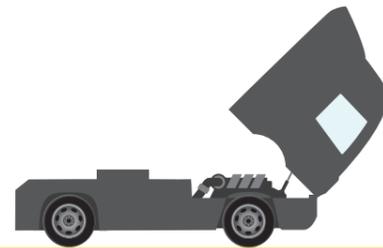
Mit Erdgas betriebene leichte Nutzfahrzeuge, Lkw oder Busse sind in aller Regel mit einem Ottomotor ausgerüstet und nutzen vor allem komprimiertes Erdgas. Dabei wird das komprimierte Gas (200 bar) mit Hilfe eines Druckregelmoduls entspannt und über ein zusätzliches Gasrail bei niedrigem Arbeitsdruck (5 bis 10 bar) in das Saug-

rohr eingeblasen. Das Gas-Luft-Gemisch wird dann mit einer Zündkerze im Brennraum gezündet.

CNG-Nutzfahrzeuge fahren meist im reinen Gasbetrieb; es sei denn, es handelt sich um Pkw-ähnliche leichte Nutzfahrzeuge mit zusätzlichem, kleineren Benzintank. Solche bivalenten oder Bi-Fuel-Fahrzeuge können für kürzere Strecken auch mit Benzin fahren, nicht aber mit einem Benzin-Erdgas-Gemisch. Oft handelt es sich dabei um Fahrzeuge mit Ottomotoren, die auf Benzinbetrieb eingestellt sind. CNG-Fahrzeuge, deren Motor bezüglich Klopfestigkeit, Verdichtung und Emissionen auf Erdgasbetrieb optimiert ist, werden auch als „monovalent plus“ bezeichnet (Bosch 2014; EG/DGM 2014b).

Allerdings weisen Erdgas-Ottomotoren gegenüber Dieselmotoren spürbare Effizienz Nachteile auf. Für Nutzfahrzeuge vor der Euro-VI-Norm liegt der energetische Effizienznachteil bei bis zu 30% (Kofod/Stephenson 2013). Bei diesen Motoren handelt es sich um Diesel-Motorblöcke, die für den Gasbetrieb umgerüstet wurden. Trotz des Effizienz Nachteils weisen diese Motoren jedoch eine sauberere Verbrennung und damit eine weniger aufwändige Abgasnachbehandlung auf.

Euro-VI-Motoren müssen strenge Grenzwerte für Partikel- und NO_x-Emissionen erfüllen; zudem müssen sie spezielle



46 AKTUELLE MOTORENKONZEPTE FÜR GAS-NUTZFAHRZEUGE

	MONO-/BI-FUEL – STÖCHIOMETRISCH (λ=1)	MONO-FUEL MAGERBETRIEB (λ >1)	DUAL-FUEL	HPDI (HIGH PRESSURE DIRECT INJECTION)
Entwicklungsstand und Marktreife	Ausgereift, im Einsatz	Bis Euro V/EEV verfügbar	Euro V ausgereift; (noch) kein Euro VI	In Erprobung in Nordamerika, angekündigt für Europa
Zündung	Fremdzündung		Kompressionszündung	
Kraftstoffanteil Erdgas und Betriebsweise	Bis zu 100% Mono-Fuel plus: reiner Gasbetrieb Bi-Fuel: alternativer Gas-/Benzinbetrieb		Ca. 50 - 60% Kein reiner Gasbetrieb, aber reiner Dieselbetrieb möglich	> 90% Nur Mischbetrieb; kein reiner Diesel- oder Gasbetrieb möglich
Motorleistung	Heute in Europa ca. 340 PS, USA bereits 400 PS		> 450 PS	
Effizienz im Vergleich zum Diesel-Fz (EEV/km)	Ca. 15 - 20% geringer als Diesel-Nfz, mit Potenzial 10%	Effizienzvorteil zu Fremdzünder λ = 1, aber schlechter als Diesel	Nahezu Diesel-ähnlich, außer bei geringer Motorlast (reiner Dieselbetrieb)	Vergleichbar Dieselantrieb
Potenzial direkte THG-Emissionen (TTW) (vs. Diesel=100)	Heute kaum/wenig Einsparung, künftig ca. -15%	Ca. -10%	Ca. -10% Abhängig von Erdgasanteil	Ca. -20% Abhängig von Erdgasanteil
Abgasnachbehandlung	3-Wege-Katalysator für Euro 6	Oxikat + DNO _x -Speicher-Kat/SCR für Euro 5	DOC + DPF + SCR für Euro 5	DOC + DPF + SCR für Euro 6
Euronorm Schallemission (Lärm)	Euro VI Motorschall ca. -10% gegenüber Diesel	Für Euro VI NO _x -Nachbehandlung (zu) aufwändig Motorschall k. A.	Euro V/EEV verfügbar; erste Euro-VI-Modelle; Motorschall wie Diesel	US EPA 2014; zulassungsfähig für Euro VI; nicht in Europa angeboten Motorschall wie Diesel

PNNL 2010; EC/DGM 2014b; ICCT 2015a; BMWI 2016; Westport 2016a

Abgasgrenzwerte für Methanemissionen einhalten (für Euro VI: CH₄ < 0,5 g/kWh gemäß EU-Verordnung 595/2009/EG). Moderne Euro-VI-Gasmotoren können sich hinsichtlich der Effizienz dem Dieselmotor annähern. Die maximale Effizienz im Motorkennfeld ist weniger als 10% schlechter als bei einem vergleichbaren Dieselmotor; allerdings ist der energetische Treibstoffverbrauch im Zyklus gemessen immer noch zwischen 15% und 20% höher (Kofod/Stephenson 2013; UBA 2015b). Euro-VI-Gasmotoren weisen außerdem hinsichtlich Drehmoment und Motorbremskraft ein Dieselmotor-ähnliches Kennfeld auf.

Eine Option für eine effizientere Kraftstoffnutzung von ottomotorischen Gasfahrzeugen ist der **Magerbetrieb**. Hierbei wird mehr Luft in den Verbrennungsraum eingegeben, als für eine vollständige Verbrennung des Luft-Kraftstoff-Gemisches erforderlich ist – das Verbrennungsluftverhältnis Lambda ist dann größer als eins (λ > 1, typisch für Dieselmotoren). Zwar sind bei mager betriebenen Gas-Ottomotoren die Rohemissionen niedriger, auf der anderen Seite gestaltet sich jedoch die Abgasnachbehandlung schwieriger, sodass ähnlich wie beim Dieselantrieb Oxidationskatalysator/NO_x-Speicherkat oder SCR-Technik (statt nur Drei-Wege-Katalysator) zum Einsatz kommen muss (PNNL 2010; Bosch 2014).

Darüber hinaus befindet sich die innere Gemischbildung mittels **Direktinblasung** (Direct Injection, DI) von Erdgas in den Brennraum für Benzin-Pkw in der Entwicklung – mit der Option einer späteren Anwendung auch im leichten Nutzfahrzeugsbereich. Durch CNG-DI-Technik wären – wie schon bei direkt einspritzenden Benzinern (JEC 2013) – weitere Leistungssteigerungen sowie eine Senkung des Kraftstoffverbrauchs möglich.

In Europa werden bislang ausschließlich Gasfahrzeuge mit stöchiometrischen Mono- bzw. Bi-Fuel-Ottomotoren mit Drei-Wege-Katalysatoren angeboten. Im Wesentlichen handelt es sich um leichte Nutzfahrzeuge, leichte bis mittelschwere Lkw sowie Stadtbusse und Sonderfahrzeuge. Dabei ist das Leistungsspektrum für Straßengüterfahr-

zeuge nach oben (noch) begrenzt (dena 2015).

Dual-Fuel Dieselpinzip

Eine Möglichkeit, die Effizienz des Gasantriebs direkt in Richtung Dieselantrieb zu erhöhen, ist es, Gaskraftstoffe in Dieselmotoren einzusetzen. Allerdings kann Erdgas nicht allein in Dieselmotoren gezündet werden. Dieselmotoren basieren auf dem Prinzip der Selbstzündung durch Kompression; dazu bedarf es jedoch eines zündwilligen Kraftstoffes (wie Dieseldieselkraftstoff). Da Erdgas vergleichsweise zündunwillig ist, wird neben dem Erdgas zusätzlich noch Dieseldieselkraftstoff – je nach Motortyp etwa 5% des Kraftstoffes – in den Brennraum eingespritzt. Diese Diesel-Pilotmenge dient hier quasi als Ersatz-Zündkerze für den Erdgaskraftstoff.

Da gleichzeitig zwei Kraftstoffe – Erdgas und Diesel – im Brennraum eingesetzt werden, spricht man auch vom Dual-Fuel-Prinzip. Dual-Fuel-Motoren haben eine lange Tradition – etwa bei der Verwertung von (überschüssigem) Erdgas in stationären bzw. nicht-mobilen Motoren oder in der Seeschifffahrt (LNG-Transportschiffe).

Bei vorgemischten Dual-Fuel-Motoren wird Erdgas in das Saugrohr eingeblasen; im Falle von LNG-Tanks kann deren Speicherdruck genutzt werden. Der Erdgaskraftstoff wird dann gemeinsam mit Luft über das Einlassventil in den Brennraum geführt. Zum Ende der Kompression wird Diesel über einen Injektor unter hohem Druck direkt in den Brennraum eingespritzt. Durch die Selbstzündung des Dieseldieselkraftstoffs verbrennt das gesamte Diesel-Gas-Luft-Gemisch. Die Dieselsubstitutionsraten sind bisher auf etwa 50 bis 60% begrenzt, um eine unkontrollierte Entzündung zu verhindern. Durch bessere Einspritzsysteme und besseres Motormanagement können höhere Substitutionsraten erreicht werden. Marinemotoren mit dem gleichen Prinzip schaffen bereits mehr als 95%.

Auf der einen Seite können Dual-Fuel-Motoren auch allein mit Dieseldieselkraftstoff fahren, was insbesondere bei geringer Last auch notwendig ist, weil das Luft-Kraftstoff-Gemisch zu mager wird. Diese Flexibilität verringert die Abhängigkeit von einer im

Vergleich zu Dieseldieselkraftstoff dünneren Erdgaskraftstoff-Tankstelleninfrastruktur. Ein Betrieb von Dual-Fuel-Technik nur mit Erdgas ist wiederum nicht möglich.

Da Dual-Fuel-Motoren nach dem Dieselpinzip arbeiten, erreichten sie im Normalbetrieb eine höhere Leistung (PS), mehr Drehmoment und verbesserte Effizienz als Gas-Ottomotoren. Allerdings sind für die Abgasnachbehandlung – wie bei Dieselnutzfahrzeugen – Diesel-Oxidationskatalysator (DOC), Diesel-Partikelfilter (DPF) sowie SCR-Technik erforderlich (EU/DGM 2014b).

Eine Weiterentwicklung des Dual-Fuel-Konzeptes sind so genannte HPDI-Motoren – HPDI steht für **High Pressure Direct Injection**. Bei HPDI-Motoren werden beide Kraftstoffe, Diesel und Erdgas, direkt und unter hohem Druck in den Brennraum eingebracht. Dabei wird das tiefkalte und flüssige LNG mit Hilfe einer hydraulischen Krypumpen auf den notwendigen Druck gebracht, über einen Wärmetauscher geleitet und durch das warme Motorkühlwasser verdampft.

Zuerst wird eine Pilotmenge Diesel unter hohem Druck in den Brennraum eingespritzt, die sich in der komprimierten Verbrennungsluft selbst entzündet. Erdgaskraftstoff wird etwas zeitverzögert zum Dieseldieselkraftstoff über den HPDI-Injektor zu Beginn der Diesel-Verbrennung in den Brennraum unter hohem Druck (200 bis 300 bar) eingeblasen.

Der energetische Anteil von Gas am HPDI-Kraftstoffgemisch erreicht mehr als 90%. HPDI-Fahrzeuge erzielen reinen Dieseldiesel-Fahrzeugen gegenüber vergleichbare Wirkungsgrade (Westport 2016a). Technisch anspruchsvoll ist dabei die hohe Belastung der Gaseinblaseventile durch Druck, Strömungsvolumina und Temperatur bei kurzen Schaltzeiten (Merker/Teichmann 2014). HPDI-Motoren können die aktuellen US-amerikanischen Abgasnormen für schwere Nutzfahrzeuge erfüllen; sie werden aber (noch) nicht in Europa angeboten. Schwere Euro-VI-Nutzfahrzeuge mit HPDI-Motor sind jedoch bereits angekündigt.

ERDGASKRAFTSTOFFE

Nutzfahrzeuge mit Gasantrieben nutzen gasförmige Kraftstoffe, meist aus Erdgas. Erdgas stammt in der Regel aus fossilen Vorkommen; Erdgassubstitute können aber auch aus alternativen Quellen – wie Biomasse oder Strom aus erneuerbaren Quellen – gewonnen werden. Was sind die wichtigsten Erdgaskraftstoffe und welche Eigenschaften besitzen sie?

Komprimiertes Erdgas (CNG) und verflüssigtes Erdgas (LNG)

Erdgas ist zunächst ein brennbares Naturgas, dessen Zusammensetzung je nach Fundstätte erheblich schwanken kann. Hauptbestandteil von Erdgas ist der gesättigte Kohlenwasserstoff Methan (CH₄). Nebenbestandteile sind höhere Kohlenwasserstoffe wie Ethan, Propan und Butan und andere meist unbrennbare Bestandteile wie Stickstoff, Kohlendioxid, Sauerstoff, Wasser, Spuren von Edelgasen sowie Schwefelbestandteile (DVGW 2013).

Erdgas besitzt eine hohe Methanzahl, weist damit eine sehr hohe Klopfestigkeit auf – entsprechend einer Oktanzahl (ROZ) von etwa 120 bis 130. Erdgas verbrennt zudem aufgrund seiner Zusammensetzung sehr sauber und ist wegen seines geringen Kohlenstoffgehaltes der CO₂-ärmste fossile Energieträger.

Erdgas wird in weit verzweigten Pipeline-Systemen verteilt. Es gibt in Deutschland zwei Qualitäten, das so genannte H-Gas und das L-Gas. H-Gas weist einen höheren Methananteil, einen höheren Energiegehalt sowie eine etwas geringere Dichte als L-Gas auf. Aufgrund der in Deutschland und in den Niederlanden mittelfristig auslaufenden L-Gas-Produktion soll das deutsche Erdgasnetz in den kommenden Jahren (bis 2030) im Wesentlichen auf H-Gas umgestellt werden (FNBBG 2015).

Bezogen auf den gravimetrischen Heizwert – Kilowattstunden (kWh) oder Megajoule (MJ) pro Kilogramm (kg) – besitzt Erdgas einen höheren Energiegehalt als Dieselkraftstoff. Der verbrennungsmotorisch verwertbare Energiegehalt wird durch den (unteren) Heizwert angegeben; für reines Methan liegt dieser bei 50 MJ/kg sowie für Erdgas (im EU-Mix) bei etwa 45 MJ/kg, während Dieselkraftstoff lediglich 43 MJ/kg erreicht

(JEC 2014b). Vergleiche dazu auch das Schaubild 51 zur Energiedichte.

Die Dichte von gasförmigem Erdgas ist jedoch unter Norm- oder Standardbedingungen (Umgebungstemperatur 0°C bzw. 15°C; atmosphärischer Druck 1,01325 bar) äußerst gering, zumal Erdgas noch leichter als Luft ist. Um Erdgas für mobile Zwecke überhaupt nutzen zu können, muss seine volumetrische Energiedichte (in Kilowattstunden oder Megajoule pro Liter) erhöht werden. Hierfür kommen prinzipiell zwei Methoden – oder deren Kombination – in Frage: Die Verdichtung des Erdgases durch Druck und die Verflüssigung durch Abkühlung (Shell 2013).

Die Energiedichte eines Gases hängt sehr stark von den Druck- und Temperaturverhältnissen ab. So verringert sich das Volumen von gasförmigem Methan – unter Normalbedingungen, wenn es mit 200 bar komprimiert wird um ungefähr den Faktor 200. Pro Volumeneinheit beträgt der Energiegehalt von komprimiertem Methan folglich rund ein Fünftel desjenigen von Dieselkraftstoff: circa 7 MJ/l zu knapp 36 MJ/l. Es ist allerdings zu beachten, dass der Energiegehalt von CNG pro Verkaufseinheit (Kilogramm) etwa ein Drittel über demjenigen einer Verkaufseinheit Dieselkraftstoff (Liter) liegt. Gleichwohl ist die volumetrische Energiedichte von komprimiertem Erdgas noch deutlich zu niedrig für viele Nutzfahrzeuganwendungen und erfordert entsprechend große CNG-Tanks mit zusätzlichem Gewicht oder ein häufigeres Betanken.

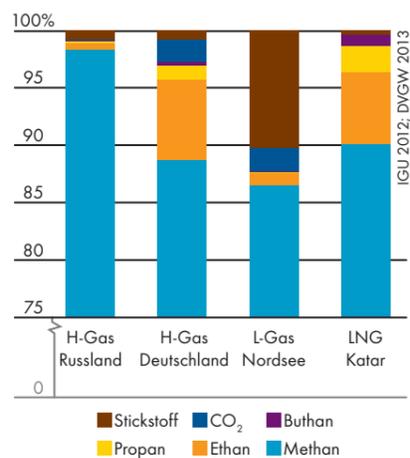
Eine weitere Möglichkeit, die Energiedichte von Erdgas als Kraftstoff zu erhöhen, besteht in der Verflüssigung durch Tiefkühlung (Liquefaction). Wenn ein Gas immer weiter gekühlt wird, geht es irgendwann vom gasförmigen in den flüssigen Aggregatzustand über. Wird Methan bei atmosphä-

rischen Bedingungen (Druck von 1 bar) auf unter -161 °C gekühlt, kondensiert es und geht von der gasförmigen in die flüssige Phase über; durch den Phasenübergang verkleinert sich das Volumen um den Faktor 600 gegenüber seinem ursprünglich gasförmigem Zustand bei Umgebungsbedingungen. Damit erreicht verflüssigtes Erdgas etwa 60% des Energiegehaltes pro Liter von Dieseldieselkraftstoff oder etwa 21 MJ/l zu ca. 36 MJ/l.

Erdgas durch Kühlung zu LNG zu verflüssigen, verkleinert nicht nur das Volumen. Da praktisch nur Stickstoff einen noch niedrigeren Siedepunkt als Methan besitzt, werden bei der Verflüssigung von Erdgas einzelne Komponenten aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften abgeschieden. Darüber hinaus werden bei der Aufbereitung von Erdgas zu LNG verschiedene Stoffe und Verunreinigungen entfernt – darunter CO₂ oder auch Stickstoff.

Für die Erdgas-Zusammensetzung von größerer Bedeutung als die Verflüssigung ist jedoch die Provenienz (Herkunft) des Erdgases. So weist aus Russland kommendes H-Gas einen höheren Methangehalt auf als fast alle LNG-Provenienzen (beispielsweise Katar). Auf der anderen Seite enthält deutsches L-Gas sehr viel mehr Stickstoff als LNG. Da ein hoher Stickstoffgehalt die sichere Lagerung von LNG beeinträchtigt und außerdem den Energiegehalt senkt, wird der Stickstoffgehalt von LNG in der Regel auf unter ein Prozent reduziert. Dagegen haben die unterschiedlichen Anteile der

47 ERDGAS-ZUSAMMENSETZUNG



anderen Brenngase Ethan, Propan sowie Butan kaum Einfluss auf den Energiegehalt von LNG, da ihr Heiz- oder Brennwert nahe demjenigen von Methan liegt.

Die Verflüssigung von Erdgas kann großtechnisch bzw. zentral am Quellort oder dezentral aus dem Erdgasnetz heraus stattfinden. Im Jahr 2014 erfolgten rund 15% oder gut 400 TWh der EU28-Erdgasimporte als LNG; das entspricht etwa der Hälfte des deutschen Erdgasverbrauchs pro Jahr. Die drei Hauptherkunftsländer für europäisches LNG sind die drei Länder Katar, Algerien sowie Nigeria (eurogas 2015).

Als Kraftstoff und auch für Transportzwecke von Erdgas über große Entfernungen wird LNG als siedendes Kryogen (tieftal Flüssigkeit) bei der für den betreffenden Speicherdruck geltenden Siedetemperatur gespeichert und transportiert. Schon eine moderate Druckerhöhung – zum Beispiel auf 10 bar im Fahrzeugtank – erlaubt eine höhere Speichertemperatur. Kälte aus der Verdampfung (Boil-off) von Erdgas wird

zur Kühlung des Kryogens eingesetzt. Aufgrund des unterschiedlichen Siedeverhaltens der einzelnen LNG-Komponenten verändert sich allerdings die Zusammensetzung in der Gas- und Flüssigphase. Bei längerer ungekühlter Aufbewahrung kann in der Folge die Kraftstoffqualität von LNG beeinträchtigt werden – zum Beispiel durch eine zu geringe Methanzahl in der Flüssigphase; dieses Alterungsphänomen wird auch als „Weathering“ bezeichnet (EU/DGM 2014a). Daher sind LNG-Verdampfung und Verdampfungsverluste durch effektive Tankisolierung sowie intensive Nutzung der LNG-Fahrzeuge möglichst zu vermeiden.

LNG ermöglicht im Vergleich zu CNG höhere Energiedichten und damit größere Reichweiten (bei gleich großem Tank), muss jedoch in isolierten Tanks kühl gehalten werden, damit es flüssig bleibt. Demgegenüber hat CNG den Vorteil, dass für die Komprimierung weniger Energie aufgewendet werden muss als für die Verflüssigung.

Bislang gibt es lediglich eine nationale Norm für komprimiertes Erdgas als Kraftstoff (DIN 51624), die Mindestheizwerte, Methanzahl und Grenzwerte für weitere Kraftstoffinhaltsstoffe vorgibt. Eine europäische Kraftstoffnorm für Erdgaskraftstoffe wird vorbereitet (künftig EN 16723-2).

Biogas (CBG und LBG)

Eine Alternative zu fossilem Erdgas ist Biogas. Es wird aus Biomasse hergestellt und besitzt vor allem bei den direkten Treibhausgasemissionen weitere Vorteile gegenüber Erdgas. Allerdings hat Biogas einen deutlich geringeren Methangehalt als Erdgas (50 bis 75%) und enthält ebenfalls weitere Bestandteile wie hauptsächlich Kohlendioxid, Wasser und andere Verunreinigungen (FNR 2013).

Biogas kann direkt als Kraftstoff in Kraftfahrzeugen genutzt oder in das Erdgasnetz eingespeist und anschließend bilanziell dem Verkehrssektor zugeordnet werden. Die Nutzung als Kraftstoff kann entweder

DIESEL VS. LNG: WELCHER ANTRIEB EMITTIERT WENIGER CO₂?

Die Antriebsperformance hinsichtlich der direkten Treibhausgasemissionen (Tank-to-Wheel) hängt von der Antriebsleistung und von den spezifischen Treibhausgasemissionen der eingesetzten Kraftstoffe ab. Wie wirken sich diese Parameter auf die Treibhausgasbilanz von Erdgas-Nutzfahrzeugen aus?

ANTRIEBSLEISTUNG

Dieselantriebe verbrauchen etwa 20% weniger Energie als stöchiometrisch betriebene Ottomotoren (λ=1). Durch Magerbetrieb (λ>1) können Otto-Nutzfahrzeuge den Effizienznachteil gegenüber Dieselantrieben um einige Prozentpunkte vermindern. Diesel-ähnliche Effizienz oder nahezu Diesel-gleiche Effizienz erreichen allerdings erst so genannte Dual-Fuel-Antriebe, die auf dem Dieselprinzip basieren. Dual-Fuel-Fahrzeuge werden im Normalbetrieb überwiegend mit Erdgaskraftstoffen betrieben.

CO₂-FAKTOREN

Für die Ermittlung der direkten Treibhausgasemissionen ist aber nicht nur der Endenergieverbrauch, sondern auch der spezifische CO₂-Ausstoß der verwendeten Kraftstoffe von Bedeutung. Der CO₂-Faktor für Erdgas (Methan) beträgt 55 g CO₂/MJ und für Dieseldieselkraftstoff 73,2 g CO₂/MJ; die direkten CO₂-Emissionen von Dieseldieselkraftstoff liegen also rund ein Drittel höher!

KRAFTSTOFFE

Die CO₂-Bilanz eines Nutzfahrzeuges wird neben der Antriebsleistung und dem kraftstoffspezifischen CO₂-Faktor schließlich auch noch von

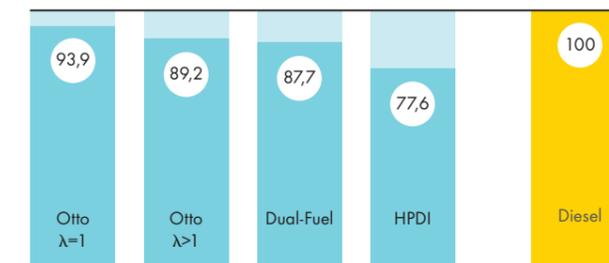
den Anteilen der jeweils verwendeten Kraftstoffe bestimmt. Je höher der Erdgasanteil, desto besser die Treibhausgasbilanz.

TREIBHAUSGASBILANZ

Aufgrund des deutlich niedrigeren CO₂-Faktors von Erdgas können gasbetriebene Ottoantriebe bei den fahrlleistungsbezogenen CO₂-Emissionen besser abschneiden als mit Dieseldieselkraftstoff – es sei denn, es handelt sich um einen sehr ineffizienten Ottomotor. Dual-Fuel-Konzepte (DF), insbesondere HPDI-Motoren, vereinen die Vorteile von dieselmotorischer Effizienz und CO₂-armer Gasverbrennung, vorausgesetzt sie können – etwa im Straßengüterfernverkehr (hier: DF 60%, HPDI 90%) – hohe Gasanteile fahren.

48 CO₂-EMISSIONEN SCHWERER GAS-LKW

Gasmotortechnologie relativ zu Dieselantrieb = 100



gasförmig (Compressed Biogas bzw. CBG) oder flüssig (Liquefied Biogas bzw. LBG) erfolgen (IEA/BETF37 2014).

Damit Biogas in Kraftfahrzeugen verwendet oder in das Erdgasnetz eingespeist werden kann, muss es gereinigt und – etwa durch Zugabe von weiteren Gasen

– auf Kraftstoff- bzw. Erdgasnetzqualität gebracht werden. Die direkte Verwendung von Biogasen in Verbrennungsmotoren erfordert schließlich wegen des möglichen Siloxaneintrags über das Rohgas erhöhte Aufmerksamkeit bezüglich Abrieb und Verschleiß relevanter Motorbauteile (EC/DGM 2014a).

wenn, dann nur sehr kleine Nutzfahrzeuggebrauchsmärkte gibt. Dagegen liegen die Kraftstoffkosten unter, meist sogar deutlich unter denjenigen für Dieselmotoren. Allerdings wird der heutige Tankstellenpreis stark von der Energiesteuerermäßigung für Erdgaskraftstoffe beeinflusst; diese gilt zwar nur bis Ende 2018, soll aber verlängert werden.

Die Möglichkeit, Erdgas in Form von CNG zu tanken, ist flächendeckend gegeben, wobei das CNG-Tankstellennetz mit etwa 900 öffentlichen Zapfpunkten noch Optimierungspotenzial sowohl bezogen auf die Standorte als auch auf die Leistungsfähigkeit der Tankanlagen, insbesondere für die Nutzung von Lkw, aufweist. Eine **Infrastruktur** für LNG als Kraftstoff für den Straßenverkehr existiert aktuell in Deutschland nicht und müsste erst noch geschaffen werden.

Nutzfahrzeuge mit Gasantrieb wurden und werden insbesondere in Städten bereits seit vielen Jahren eingesetzt; denn Gasantriebe verbrennen sehr sauber und stoßen nur wenige **lokale Luftschadstoffemissionen** aus. Das Erreichen der Euro-VI-Norm erfordert im Vergleich zum Dieselantrieb

Power-to-Gas (PtG)

Eine weitere Möglichkeit, Erdgaskraftstoff-Substitute herzustellen, ist Power-to-Gas (PtG) – dabei handelt es sich um Erdgaskraftstoffe, die mit Hilfe von Strom (Power) aus Wasser (H₂O) und Kohlendioxid (CO₂) gewonnen werden.

einen deutlich geringeren Aufwand bei der Abgasnachbehandlung. Zudem arbeiten Mono-Fuel-Erdgasmotoren aufgrund der hohen Klopfestigkeit von Methan, aber auch wegen der besseren Gemischbildung im Brennraum leiser als vergleichbare Dieselmotoren.

Da Erdgas einen geringeren Kohlenstoffanteil als Diesel aufweist, fallen die direkten **Treibhausgasemissionen** von Gasantrieben geringer aus. Dieser Vorteil wird aber zu einem großen Teil durch den geringeren Wirkungsgrad bei Mono-Fuel Gasmotoren verringert. Dual-Fuel- und HPDI-Motoren, die in Europa noch nicht als Serientechnik zur Verfügung stehen, könnten diesen Effizienznachteil deutlich verringern.

Aufgrund des Energieaufwandes bei der Verflüssigung von Erdgas sind bei der Betrachtung des gesamten Kraftstoffbereitstellungspfadens die Treibhausgasemissionen von LNG höher als die von CNG. Auf der anderen Seite lassen sich die Upstream-Emissionen von Erdgaskraftstoffen durch ein technisch problemloses Beimischen von Biogas (in Form von CBG oder LBG) verringern.

MARKTDURCHDRINGUNG

■ Nischenanwendung mit eingeschränkter Modellvielfalt (bezüglich Leistung/Einsatzgebieten); CNG flächendeckend verfügbarer Kraftstoff, LNG in Deutschland (noch) nicht verfügbar.

ANWENDUNGSBEREICHE

■ In festgelegten Einsatzgebieten und auf festen Routen; bisher hauptsächlich leichte Nutzfahrzeuge, Stadtbusse oder Lkw zur Ver- und Entsorgung, perspektivisch LNG für Straßengüterfernverkehr.

EFFIZIENZPOTENZIALE BIS 2040

■ Optimierung von Gasmotoren auf Erdgaskraftstoffe. Umstellung/Einführung von Dual-Fuel-Technik für schwere Nutzfahrzeuge.

KOSTEN

■ Kosten für Antriebstechnik höher als bei Diesel (u. a. aufgrund geringerer Stückzahlen); niedrigere Kraftstoffkosten (insbesondere aufgrund geringerer Energiesteuer auf Erdgaskraftstoffe).

FAZIT ERDGAS

Gasantrieb konnte sich im Nutzfahrzeugbereich als Nischentechnologie etablieren. Die Weiterentwicklung im Straßengüterfernverkehr erfordert Fortschritte bei Effizienz, Leistung und Reichweiten von Gasantrieben. Schaffung und Optimierung einer CNG/LNG-Infrastruktur sowie Erhalt des substantiellen Kraftstoffkostenvorteils durch Fortführung der Energiesteuerermäßigung nach 2018 sind erforderlich.

ERDGAS IM CHECK

Der Gasantrieb bei Lkw und Bussen besitzt für Nutzfahrzeuge bereits eine hohe **technologische Reife**. Serienfahrzeuge verschiedener Hersteller stehen Nutzern zur Verfügung. Im Hinblick auf Modellvielfalt, Antriebseffizienz, Leistung und Reichweite besteht jedoch noch weiterer Entwicklungsbedarf.

Für viele Fahrzeuganwendungen werden die **Nutzeranforderungen** von mit Gas betriebenen Nutzfahrzeugen bereits erfüllt. Informationen zu den Nutzerkosten von Erdgasfahrzeugen sind inzwischen fast ähnlich gut wie für Dieselfahrzeuge zugänglich. Die Anschaffungskosten von Erdgasneufahrzeugen notieren insbesondere aufgrund geringer Stückzahlen deutlich (ca. 20 bis 30%) über denjenigen für vergleichbare Dieselantriebe. Zudem sind die Wartungskosten für Erdgasfahrzeuge höher als für Dieselmotoren.

Ein zusätzliches wirtschaftliches Restwertisiko ergibt sich weiterhin daraus, dass es für gebrauchte Erdgasfahrzeuge kaum oder



3.4 STROM ELEKTROMOBILITÄT

Elektromobilität wird vielfach als die Mobilitätstechnik der Zukunft – vor allem für den motorisierten Individualverkehr gesehen. Elektromobile gelten als effizient und sauber. Ihr Einsatz wird in vielen Ländern staatlich gefördert. Gleichwohl sind Elektrofahrzeuge – zumindest reine Elektrofahrzeuge – bislang noch nicht sehr häufig im Straßenbild anzutreffen. Zudem sind die Definitionen und Abgrenzungen von Elektro-Mobilität vielfältig. Zählen auch Hybridfahrzeuge dazu? Und was ist mit Brennstoffzellen und Wasserstoff? In Bezug auf Lkw und Busse stellt sich ferner die Frage: Wo stehen Elektroantriebe für Nutzfahrzeuge technisch und wirtschaftlich heute? Und was sind die Perspektiven, den Dieselantrieb im Straßengüterverkehr bzw. im Personentransport mit Bussen abzulösen?

Elektromobilität lässt sich zunächst einmal als Mobilität von Personen und Gütern mit Hilfe von Elektrofahrzeugen und Strom als Antriebsenergie beschreiben. Elektrofahrzeuge umfassen in der Regel Fahrzeuge mit Elektromotoren sowie eine Batterie als Energiespeicher. Technisch handelt es sich um einen wieder aufladbaren Akkumulator; da im Zusammenhang mit Elektromobilität die Energiespeicher meist als **Batterien** bezeichnet werden, wird im Folgenden ebenfalls von Batterien und nicht von Akkumulatoren bzw. batterieelektrischen Fahrzeugen gesprochen.

Die meisten Elektrofahrzeuge heute sind jedoch keine reinen Elektrofahrzeuge, sondern **Hybridfahrzeuge**. Meist handelt es sich um elektrifizierte Kraftfahrzeuge,

die teilweise aber auch bereits kürzere Strecken elektrisch unterstützt fahren können. Da ihr Hauptantrieb nach wie vor ein Verbrennungsmotor ist, werden solche (milden) Hybridkonzepte beim Dieselantrieb diskutiert.

Von Elektromobilität spricht man eigentlich erst, wenn sich Fahrzeuge auch extern mit Fahrstrom versorgen und größere Strecken rein elektrisch fahren können.

Fahrzeuge, die neben dem Verbrennungsmotor auch mit einem leistungsfähigen Elektromotor, einer größeren Batterie für den Fahrzeugantrieb sowie einem Ladestromanschluss ausgestattet sind, werden als **Plug-in-Hybridfahrzeuge** bzw. Plug-in Hybrid Electric Vehicles (**PHEVs**)

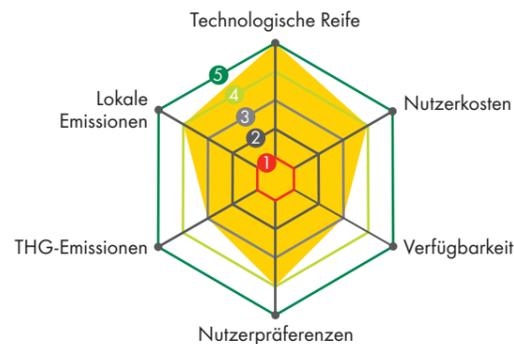
bezeichnet. Davon zu unterscheiden sind **batterieelektrische Fahrzeuge (BEVs)**, die nur noch mit Elektromotor, Batterie und Ladeanschluss, nicht aber mehr mit einem Verbrennungsmotor ausgestattet sind. Sie versorgen sich ausschließlich elektrisch und können nur rein elektrisch fahren.

Ähnlich wie beim Pkw wird an Konzepten gearbeitet, leichte Nutzfahrzeuge zu hybridisieren (ika 2014). Schon um die für leichte Nutzfahrzeuge geltenden sowie künftig darüber hinausgehenden CO₂-Grenzwerte für Neufahrzeuge erfüllen zu können, besteht für die Fahrzeughersteller ein Anreiz, in diesem Fahrzeugsegment Plug-in-Hybride mit einer elektrischen Mindestreichweite anzubieten. Allerdings dürften die zusätzlichen Kosten für den elektrifizierte Antriebsstrang bei leichten Nutzfahrzeugen weniger leicht unterzubringen sein als bei Oberklasse-Pkw. Darüber hinaus gibt es einige Prototypen und Kleinserien von leichteren Plug-in-Lkw. Für schwere Nutzfahrzeuge bringt die Plug-in-Funktion aufgrund der geringen Speicherdichte von Strom in Batterien jedoch nur geringen Zusatznutzen.

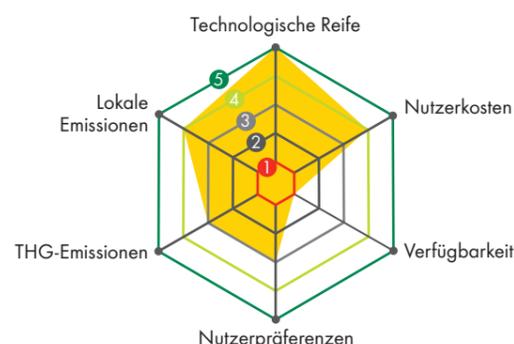
Rein batterieelektrische leichte Nutzfahrzeuge werden bereits in verschiedenen Flotten – unter anderem bei Kurier- und Paketdienstleistern – erprobt. Technisch könnte sich der Elektroantrieb mittel- bis langfristig

49 STECKBRIEF GASANTRIEBE UND ERDGAS ALS KRAFTSTOFF

REGIONALER EINSATZ



ÜBERREGIONALER EINSATZ



[0: keine Ausprägung, 1: geringe Ausprägung, 2: mittlere Ausprägung, 3: gute Ausprägung, 4: fast vollständige Ausprägung, 5: vollständige Ausprägung]

in dieser Fahrzeugklasse und im regionalen Einsatzbereich – mit begrenzter Tagesfahrleistung und definierten Fahrstrecken – zu einer Alternative zum Verbrennungsmotor entwickeln. Schließlich erfordern verschärfte Luftqualitätsanforderungen in urbanen Ballungszentren und Hot Spots emissionsfreies Fahren und damit Elektromobilität für entsprechende Nahverkehre mit Nutzfahrzeugen. Allerdings besteht auch hier die ökonomische Herausforderung, die Kosten eines noch teureren elektrifizierten Antriebs auf geringere Fahrzeugfahrleistungen umzulegen.

Bei Lkw über 3,5 Tonnen gab es in den letzten Jahren einige geförderte Projekte und Prototypen für den Verteilverkehr in Städten. Bei Lkw über 12 Tonnen, die schwere Güter transportieren oder eine hohe tägliche Laufleistung erreichen, gibt es keine aktuellen Bestrebungen, diese mit Batterien und elektrischem Antrieb auszurüsten (Berger 2016). Zu gravierend wären die Einschränkungen bei Reichweite und Nutzlast. Vielversprechender ist hingegen die Entwicklung von emissionsfreien Stadtbusen, bei denen – vor allem im asiatischen Raum – bereits batterieelektrische Serienfahrzeuge verfügbar sind.

Der von Elektrofahrzeugen genutzte Fahrstrom kann alternativ zur Speicherung in Batterien auch über **Oberleitungen** zugeführt werden. Oberleitungsbusse, auch Trolleybusse, waren früher Teil des öffentlichen Straßenpersonenverkehrs in vielen Großstädten, finden sich heute jedoch kaum noch in Deutschland. Gleichwohl wird über die Rückkehr hybridisierter O-Busse in den ÖSPV diskutiert (BMVI 2015).

Mit Oberleitungs-Hybrid-Lkw gab es in den letzten Jahren eine technische Pilotierung in Deutschland. In Kalifornien gibt es eine erste kurze Strecke für einen kommerziellen Piloten; in Schweden existiert hierzu eine erste Planung. Der in Deutschland eingesetzte Oberleitungs-Hybrid-Lkw fuhr dabei auf einer eigens elektrifizierten Teststrecke mittels Pantograph rein elektrisch, war zusätzlich aber auch noch mit einem eigenen Verbrennungsmotor ausgestattet, um auch auf nichtelektrifizierten Strecken einsetzbar zu sein. Für einen breiteren oder

EXKURS UMSTELLUNG VON STADTBUSSEN AUF ELEKTROANTRIEB



Die Planung einer Umstellung von Stadtbusen mit Verbrennungsmotor auf Elektrobusse verlangt, dass man geeignete Linien identifiziert und auch das Laden und die Wartung dieser Busse neu plant. Für die Umstellung müssen unter anderem folgende Fragen beantwortet werden:

- Welche Stadtbuslinien sind für den Einsatz von Elektrobusen mit welcher Fahrgastkapazität (bestimmt im Wesentlichen von der Fahrzeuglänge und der Bestuhlung) und bei welchem Takt am besten geeignet?
- Wie muss der Energiespeicher des Busses dimensioniert sein? Wie muss die Klimatisierung bei der Batteriedimensionierung berücksichtigt werden? Welche voraussichtliche Lebensdauer (Anzahl Ladezyklen bei Schnell- und bei Langsam-Ladung) haben die Batterien? Und was kosten die Batterien?
- Wo (Platzbedarf, Bereitstellung der Ladeleistung an einer Ladestelle) und wie (durchschnittliche Ladezeit, verwendete Ladetechnik) ist ein Laden des Busses sinnvoll?
- Was kostet ein Elektrobus inklusive der notwendigen Ladeinfrastruktur und dem voraussichtlichen Strombedarf im Betrieb? Wird ein solches Vorhaben durch öffentliche Fördermittel finanziell unterstützt? Amortisieren sich die Mehrkosten bei der Anschaffung gegenüber einem Dieselbus bei der geplanten Laufleistung?
- Welche ökologischen Vorteile bringt der Einsatz des Elektrobusse bezüglich der Abgas- und Lärmemissionen?

Für die Dimensionierung der Energiespeicher werden aktuell verschiedene Varianten diskutiert: Der reine Übernachtslader, der seine maximale Tagesfahrleistung mit einer Batteriekapazität ohne Nachladung während des Einsatzes realisiert oder der Übernachtslader, der an einer oder beiden Endhaltestellen innerhalb von 10 Minuten mittels Schnellladung nachlädt – oder auch alternativ dazu die Weiterentwicklung des mit Ausnahme von drei Städten nur bis zum Ende der 1950er Jahre genutzten Trolleybusses. Ausgerüstet mit Pufferbatterien kann er in sensiblen Bereichen wie an Straßenkreuzungen und Baustellen oder auch in historischen Stadtgebieten ohne Oberleitung fahren. Der dafür benötigte Fahrstrom wird parallel zum Fahrbetrieb über Oberleitung in den Pufferbatterien gespeichert (Hondius 2014; BMVI 2015; Lange/Otto 2015).

gar flächendeckenden Einsatz von Oberleitungs-Nutzfahrzeugen ist eine elektrifizierte Autobahn (eHighway) erforderlich (Siemens 2015).

Eine Alternative zur Oberleitung könnte die **induktive** (kontaktlose) Energieübertragung zwischen Infrastruktur und Fahrzeugen sein. Zwar gibt es hier bereits Referenzanwendungen und Demonstrationsprojekte, aber es fehlt noch gänzlich an Planungen zum Aufbau einer induktiven Ladeinfrastruktur (Meins 2012) oder zum Aufbau von Oberleitungen an Autobahnen.

Ebenfalls zu den Elektrofahrzeugen zählen **Brennstoffzellenfahrzeuge** (Fuel Cell

Electric Vehicles bzw. **FCEVs**). Diese sind mit Elektromotor, Brennstoffzelle sowie mit (kleinerer) Batterie und Wasserstofftank ausgestattet. Brennstoffzellenfahrzeuge fahren ebenfalls rein elektrisch. Sie versorgen sich mit Wasserstoff. In der Brennstoffzelle reagiert Wasserstoff mit Luftsauerstoff und setzt elektrische und thermische Energie sowie Wasser frei (kalte Verbrennung). Die warme Verbrennung von Wasserstoff in Wärmekraftmaschinen wird dagegen heute nicht mehr weiter verfolgt.

Die Entwicklung von Brennstoffzellenfahrzeugen konzentriert sich bislang auf den Pkw-Bereich. In der jüngeren Vergangenheit wurden erste Serienmodelle vorge-

stellt. Im Nutzfahrzeugbereich gibt es erste Fahrzeugkonzepte für leichte Nutzfahrzeuge und Verteiler-Lkw. Ausgiebig getestet wurden in den vergangenen Jahren dagegen Prototypen von Brennstoffzellen-Stadtbusen, um Erfahrungen im Umgang mit der neuen Antriebstechnik und Wasserstoff als Kraftstoff zu sammeln sowie für weitere Überlegungen zur Kommerzialisierung (FuelCellToday 2012; Berger 2015).

Die wichtigsten technischen Merkmale von Elektrofahrzeugen (PHEVs, BEVs und FCEVs) sind der Elektroantrieb in Verbindung mit wieder aufladbaren Batterien oder einer direkten Stromabnahme während der Fahrt sowie gegebenenfalls Brennstoffzellen. Welche möglichen Ansatzpunkte für technische Verbesserungen bieten diese Antriebskomponenten?

Elektromotoren

Elektromotoren haben eine ähnlich lange technologische Entwicklung hinter sich wie Verbrennungsmotoren. Jedes Jahr werden Millionen von Elektromotoren produziert und installiert. Im Verkehrsbereich setzt insbesondere die Schiene seit Jahrzehnten auf Elektrotraktion. Relativ neu bei der Anwendung von Elektromotoren ist der motorisierte Straßenverkehr – und hier insbesondere leichte und schwere Lkw. Auch Elektromotoren können noch weiter verbessert werden – etwa durch Minimierung von Energieverlusten im Motor oder die weitere Optimierung einzelner Systemkomponenten. Allerdings weisen elektrische Antriebe bereits sehr hohe Wirkungsgrade auf. Während Elektromotoren motorische Wirkungsgrade von knapp 90% erreichen, kommen effiziente Lkw-Dieselmotoren auf nur etwa 40%. Zudem sind Elektromotoren in der Lage, Bremsenergie im Generatormodus zurückzugewinnen bzw. zu rekuperieren und so zusätzlich im Unterschied zu rein verbrennungsmotorischen Antrieben Bewegungsenergie in elektrische Energie umzuwandeln, diese zu speichern und erneut als Antriebsenergie einzusetzen; somit im Saldo Energie einzusparen.

Batterie

Die Batterie ist für reine Elektrofahrzeuge das zentrale und zugleich das technisch wie

wirtschaftlich kritischste Element batterieelektrischer Mobilität. Stand der Technik für Consumer-Anwendungen ebenso wie für Elektrofahrzeuge sind heute Lithium-Ionen-Batterien als wiederaufladbare elektrochemische Energiespeicher. Sie werden auch für die kommenden zwei Jahrzehnte als führende Batterietechnologie für automobiler Anwendungen gesehen – allerdings wird an der Zellchemie weiter gearbeitet (ISI 2015). Lithium-Ionen-Batterien sind deutlich leistungsfähiger als bisherige Batterietechnologien. Ihre Speicherdichte ist jedoch gering und ihre spezifischen Speicherkosten pro Einheit gespeicherter Energie sind (mit etwa 200 Euro pro kWh Speicherkapazität) hoch. Ziel der Batterieentwicklung ist es, die Speicherdichte deutlich zu erhöhen und die Kosten der Batterieherstellung (bis unter 100 Euro pro kWh) zu senken (ISI 2015; VDE 2015).

Signifikanten Einfluss auf den energetischen Wirkungsgrad von batterieelektrischen Fahrzeugen können schließlich die Ladeverluste haben, die bei der Betankung, durch Standby oder durch Selbstentladung entstehen. Der Ladewirkungsgrad selbst hängt stark von Umwelteinflüssen, aber auch von der Art der Betankung (Schnell- vs. Normalladung) ab (Marx 2015). Zu den batterietechnischen Entwicklungszielen gehören jedoch nicht nur Wirtschaftlichkeit, gravimetrische und volumetrische Energiedichte sowie Ladewirkungsgrad, sondern die grundsätzliche Verbesserung relevanter

STROM UND WASSERSTOFF

Elektromobilität basiert entweder auf der direkten Verwendung von Strom oder der Umwandlung von Wasserstoff durch Brennstoffzellen in Strom. Während Strom in beiden Fällen einen Elektromotor als Antriebsaggregat antreibt, unterscheidet sich die Art der gespeicherten Energie – zum einen wird Strom ausschließlich in Batterien gespeichert, zum anderen fungiert Wasserstoff als Energiespeicher.

Fahrstrom

Elektrofahrzeuge beziehen elektrische Energie aus dem Stromnetz. Produktbezogen unterscheidet sich Fahrstrom durch die Art und Weise der „Betankung“; das heißt vor allem nach den Parametern Ladeleistung, Spannungsebene und Stromstärke. Auf Anwenderseite drückt sich dies insbesondere

Leistungsparameter – wie Lebensdauer, Sicherheit oder Packaging (VDE 2015).

Brennstoffzelle

Stand der Technik bei Brennstoffzellenfahrzeugen sind Polymer-Elektrolyt-Membran oder kurz PEM-Brennstoffzellen (bzw. Polymer Electrolyte Fuel Cell PEFC). Die PEM-Brennstoffzelle ist eine Niedertemperaturbrennstoffzelle, die bei Betriebstemperaturen von unter 100°C arbeitet. Als Brenngas wird hochreiner Wasserstoff verwendet. Oxidationsmittel ist Sauerstoff, wobei auch ein Luftbetrieb möglich ist. Die PEM-Brennstoffzelle zeichnet sich durch einen einfachen Aufbau, flexibles Verhalten wie schnelle Lastwechsel, gute Kaltstarteigenschaften und eine kompakte Bauform infolge hoher Leistungsdichte aus.

Brennstoffzellen weisen höhere Wirkungsgrade als verbrennungsmotorische Antriebe auf. Der elektrische Zellenwirkungsgrad von PEM-Brennstoffzellenmodulen liegt bei 60%; auch unter Berücksichtigung des Elektroantriebes liegt der antriebstechnische Wirkungsgrad eines Brennstoffzellenfahrzeugs noch deutlich über demjenigen eines dieselmotorischen Fahrzeugs (einschließlich Getriebe). Neuere Entwicklungen zielen auf die Erhöhung der Betriebstemperatur (Hochtemperatur-PEM) und eine Verringerung des Einsatzes von Edelmetallkatalysatoren (wie Platin oder Platinlegierungen), um so die Effizienz weiter zu steigern und die Systemkosten zu reduzieren.

re in der Ladegeschwindigkeit (Schnell- vs. Normalladung) aus. Je nachdem, ob ungesteuertes oder gesteuertes Laden von Batteriefahrzeugen möglich ist, können überdies Verkehrs- und Stromsektor miteinander gekoppelt werden. Ein wesentlicher Nachteil von in Batterien gespeicherter Energie ist die mit Abstand geringste Energiedichte

unter allen heute für Mobilitätszwecke verwendeten Energieträgern. Die gravimetrische Energiedichte von Batterien liegt zurzeit (je nach Zellchemie) bei rund 90 bis 250 Wattstunden pro Kilogramm bzw. 0,3 bis 0,9 MJ/kg, die volumetrische Energiedichte bei 160 bis 670 Wattstunden pro Liter bzw. 0,5 bis 2,4 MJ/l (VDE 2015). Dieselmotoren weisen demgegenüber mit gut

43 MJ/kg bzw. knapp 36 MJ/l eine deutlich höhere Energiedichte auf – vor allem in Bezug auf die Masse.

Für die Speicherung von 30 Litern Dieselmotoren – was dem spezifischen Kraftstoffverbrauch eines effizienten Lkw auf 100 km entspricht – wäre folglich eine etwa 2.000 kg schwere Batterie erforderlich. Wenn

man berücksichtigt, dass der spezifische Energieverbrauch von Elektroantrieben weniger als halb so groß wie der von Dieselantrieben ist (<15 l/100 km), wäre für elektrische Fernverkehrs-Lkw mit 1.000 km Reichweite eine Batterie mit einem Gewicht in der Größenordnung von nahezu 10 Tonnen erforderlich, was fast dem Leergewicht einer heutigen Sattelzugmaschine entspricht.

EXKURS KRAFTSTOFF AUS STROM: POWER-TO-X (PtX)

Mit Power-to-Gas (PtG) wird die Erzeugung eines energiereichen Gases mittels strombasierter Elektrolyse beschrieben. In einem ersten Schritt entsteht durch die Aufspaltung von Wasser Wasserstoff, der als chemischer Energiespeicher fungiert. Wird ausschließlich Strom aus erneuerbaren Energiequellen eingesetzt, spricht man von erneuerbarem oder auch grünem Wasserstoff.

Der erzeugte Wasserstoff (H_2) kann als Kraftstoff (PtH_2) in Brennstoffzellenfahrzeugen eingesetzt werden. PtH_2 profitiert im Verkehrsbereich von der hohen Effizienz von Brennstoffzellen. Der Wasserstoff kann auch direkt in das Erdgasnetz eingespeist werden, wo er sich mit dem Erdgas durchmischt. Allerdings ist dies aufgrund unterschiedlicher stofflicher Eigenschaften von Wasserstoff und Methan nur in niedrigen Konzentrationen möglich.

Alternativ lässt sich der Wasserstoff via nachgeschalteter Methanisierung unter Zuführung von CO_2 in ein synthetisches Methan ($PtCH_4$) umwandeln. Voraussetzung hierfür ist eine entsprechende Quelle konzentrierten Kohlendioxids als Rohstoff, anderenfalls muss das CO_2 bei zusätzlichem Energieaufwand aus der Luft extrahiert werden. $PtCH_4$ kann entweder – im Gegensatz zu Wasserstoff – unbegrenzt in das Erdgasnetz eingespeist werden oder von Erdgasfahrzeugen in Form von CNG oder LNG genutzt werden.

Unter Power-to-Liquids (PtL) wird die Erzeugung von energiereichen kohlenwasserstoffhaltigen Flüssigkeiten aus Strom mittels Elektrolyse über Wasserstoff und via nachgeschalteter Synthese (zum Beispiel Methanol-Synthese oder Fischer-Tropsch-Verfahren) unter Zuführung von CO_2

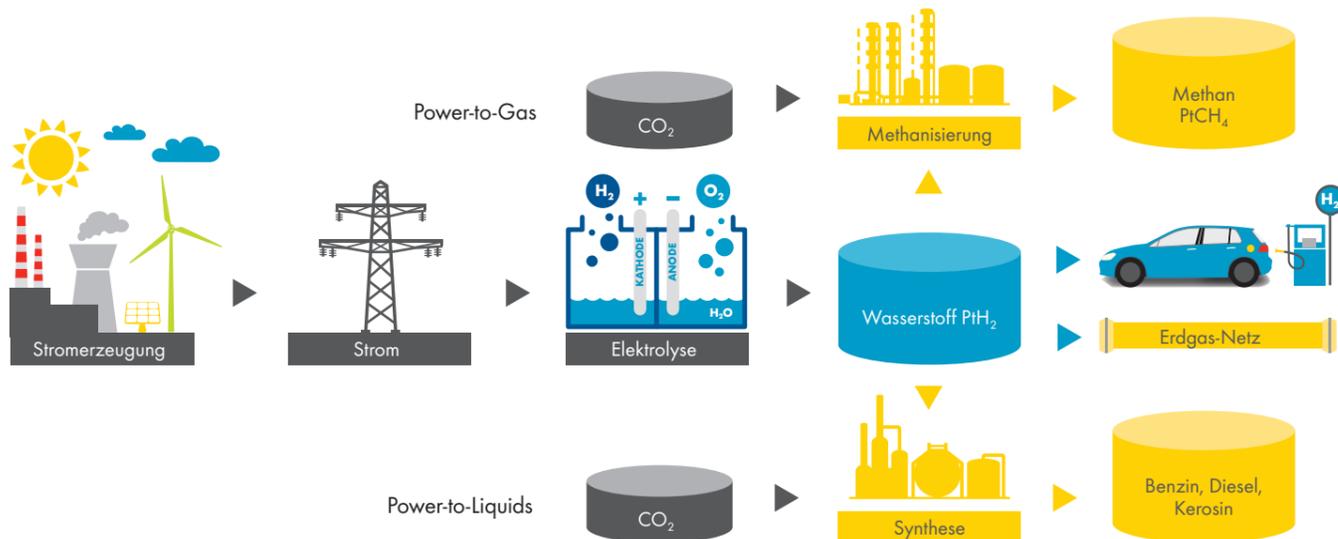
bzw. CO zu synthetischem Benzin, Diesel oder Kerosin verstanden. Vorteil von PtL-Kraftstoffen ist es, dass sie über die bestehende Kraftstoffinfrastruktur verteilt und von bestehenden Fahrzeugflotten nahezu nahtlos verwendet werden können. Noch nahtloser wäre der Ersatz von fossil erzeugtem durch grünen Wasserstoff in Raffinerieprozessen – etwa zum Hydrocracking von Kohlenwasserstoffen für die Kraftstoffherstellung.

PtL und PtG gemeinsam ist der Prozess der Elektrolyse von Wasserstoff aus Wasser und Strom; beide zusammen werden auch als Power-to-X oder PtX-Kraftstoffe bezeichnet – für Power-to-Anything, also die Umwandlung von Strom in nahezu beliebige Kraftstoffarten (LBST/Hinrich 2016).

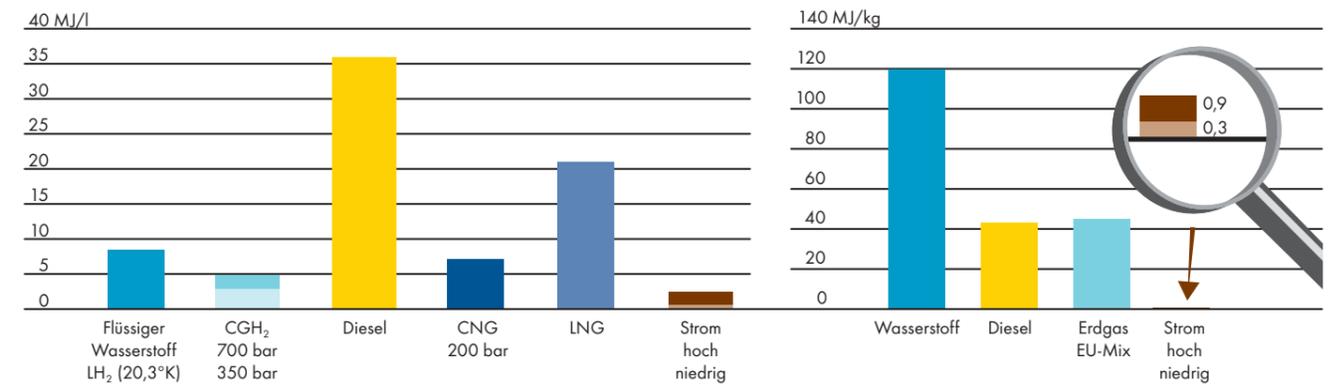
Nachteil aller PtX-Kraftstoffe ist, dass ihre Herstellung über mehrere Produktionsschritte erfolgt; das gilt insbesondere bei $PtCH_4$ und PtL. Schon bei der Elektrolyse geht etwa ein Drittel der ursprünglich elektrischen Energiemenge verloren. In Summe ergeben sich so niedrige Gesamtwirkungsgrade (heute $PtCH_4$ ca. 50 %, PtL ca. 40 %) bei vergleichsweise hohen Kraftstoffbereitstellungskosten.

Ziel von PtX-Kraftstoffen ist es, künftig überschüssigen erneuerbaren Strom zu nutzen, und zwar möglichst effizient und möglichst wirtschaftlich. Dazu müssen die Wirkungsgrade der einzelnen Prozessschritte noch weiter gesteigert und die Technikkosten substanziell gesenkt werden. In marktrelevanten Mengen werden PtX-Kraftstoffe deshalb nicht vor 2030, teilweise auch noch später erwartet (DLR et al. 2014b, 2015; Regett et al. 2014; FVV 2016).

50 HERSTELLUNGSSCHRITTE VON POWER-TO-X-KRAFTSTOFFEN



51 ENERGIEDICHTE IN MEGAJOULE PER LITER (LINKS) UND MEGAJOULE PER KILOGRAMM (RECHTS)



Leistungsstarke Batterien würden nicht nur die Nutzlast von Nutzfahrzeugen reduzieren, sondern aufgrund ihrer geringen (volumetrischen) Energiedichte auch noch das Nutzvolumen. Die 2015 vorgenommenen Änderungen der EU-Richtlinie 579/2015/EU zu Abmessungen und Gewichten von Nutzfahrzeugen zugunsten von alternativen Antrieben – eine Tonne zusätzlich, aber keine Nutzvolumenerhöhung – reichen folglich nicht aus, um diese Alternative in schweren Nutzfahrzeugklassen attraktiv zu machen.

Schließlich erlaubt die direkte Nutzung des Energieträgers Strom, emissionsfrei zu fahren. Gleichwohl können auch E-Nutzfahrzeuge indirekte Emissionen, insbesondere Treibhausgasemissionen verursachen. Da Strom häufig nur ein Sekundärenergieträger ist, der durch den Einsatz von Primärenergieträgern erzeugt wurde, können bei der Erzeugung, aber auch bei der Bereitstellung des Fahrstroms Treibhausgasemissionen entstehen. Nachhaltige Elektromobilität setzt daher voraus, dass der eingesetzte Fahrstrom möglichst erneuerbar hergestellt wird.

Zuletzt ist eine ausreichende Energieversorgungsinfrastruktur Voraussetzung für die Anwendung einer Antriebstechnik – zunächst Punkt-zu-Punkt, als Korridor bis hin zu flächendeckend. Die EU hat 2014 mit der AFID-Richtlinie beschlossen, den Aufbau der Infrastruktur für alternative Antriebe voranzutreiben – mit besonderem Fokus auf Elektromobilität (EP/Rat 2014a). Zwar gibt es in Deutschland wie auch in anderen europäischen Ländern inzwischen einige tausend öffentliche (Normal-)Ladepunkte – allerdings mit noch deutlich weniger

Schnellademöglichkeiten. Aufgrund der zu erwartenden elektrisch absolvierbaren Fahrstrecken dürften E-Nutzfahrzeuge betriebseigene Ladestationen bevorzugen, hingegen eine öffentliche Versorgung weniger einer Rolle spielen.

Wasserstoff

Wasserstoff für automobiler Brennstoffzellen kann nur in hochreiner Form verwendet werden, da die Leistungsfähigkeit der Brennstoffzelle schon bei kleinsten Verunreinigungen beeinträchtigt werden könnte. Deshalb wurden in einer mehrteiligen ISO-Norm für die Verwendung von Wasserstoff als Kraftstoff in Brennstoffzellen (ISO 14687) die Anforderungen an Wasserstoff als Kraftstoff festgelegt. Danach dürfen zum Beispiel Schwefelbestandteile vier parts per billion (ppb) nicht überschreiten; Dieselmotoren gelten dagegen ab 10 parts per million (ppm) als schwefelfrei (ISO 2012).

Der chemische Energieträger Wasserstoff ist bei Umgebungsbedingungen gasförmig. Er besitzt eine relativ geringe volumetrische Energiedichte von nur 10,7 MJ pro Kubikmeter. Das ist weniger als ein Drittel der Energiedichte von Erdgas (Methan) und deutlich weniger als von flüssigen Energieträgern. Unter allen mobilen Energieträgern besitzt Wasserstoff jedoch die höchste gravimetrische Energiedichte mit 120 MJ pro Kilogramm – das ist fast dreimal so viel wie bei Kohlenwasserstoffen (Dieselmotoren 43,1 MJ/kg; Erdgas mit 35,7 MJ/kg) (JEC 2014b).

Um Wasserstoff in Fahrzeugen als Kraftstoff mitzuführen, muss er folglich analog zum Erdgas stark komprimiert werden. Als

Speicherdruck für Druckwasserstoff (Compressed Gaseous Hydrogen bzw. CGH₂) haben sich 350 bar (für Busse) oder 700 bar (für Pkw) etabliert. Dafür gibt es Tankbehälter in Form von Druckgasbehältern, wobei das Zusatzgewicht der Drucktanks heute durch moderne Verbundmaterialien deutlich reduziert werden kann. Technisch möglich wäre auch die tiefkalte Speicherung bei -253 °C bzw. 20,3 °K in einem Kryotank oder Metallhydridspeicher; beide Technologien sind jedoch noch zu aufwändig für kommerzielle Nutzfahrzeuganwendungen (van Basshuysen/Schäfer 2014).

Über die Hochdruckspeicherung von Wasserstoff werden Energiedichten von 2,9 MJ/l (350 bar) bzw. 4,6 MJ/l (700 bar) erreicht (FVV 2013). Damit liegt die Speicherdichte von Wasserstoff noch mindestens um ein Drittel unter derjenigen von komprimiertem Erdgas sowie deutlich unterhalb von LNG und Dieselmotoren – bei allerdings deutlich effizienterem Brennstoffzellenantrieb.

Im Vergleich zur Stromspeicherung in Fahrzeugbatterien fällt nicht nur die volumetrische, sondern insbesondere die höhere gravimetrische Energiedichte ins Gewicht. Als Energiespeicher bietet Wasserstoff somit die Möglichkeit, das Reichweitenproblem von batterieelektrischen Antrieben – zumindest teilweise – zu beheben. Für Nutzfahrzeuganwendungen folgt, dass Wasserstoff als Energieträger zwar keine Einschränkungen bei der Nutzlast, wohl aber bei Nutzvolumen nach sich zieht. Unter anderem deshalb wird Wasserstoff bislang in Europa nur in Stadtbusen und Pkw erprobt bzw. angewendet.

Durch die kalte Verbrennung ermöglichen Brennstoffzellenfahrzeuge ebenfalls lokal emissionsfreie Mobilität. Jedoch ist Wasserstoff auch ein Sekundärenergieträger, der aus anderen Primärenergieträgern erzeugt wird. Somit entscheidet letztendlich die Art der Wasserstoffherzeugung über seine Nachhaltigkeit und Emissionsbilanz. Die wichtigsten Wasserstoffherzeugungspfade

sind zum einen die Dampfreformierung auf Erdgasbasis, zum anderen die Elektrolyse von Wasser.

Voraussetzung für Aufbau und Einsatz einer Brennstoffzellenflotte ist schließlich eine ausreichende Tankstelleninfrastruktur. Bislang (2016) gibt es in Deutschland 34 Wasserstofftankstellen, davon 21 öffentlich zugängliche; in Europa sind es inzwischen

95 Stationen sowie weltweit 214 (LBST/TÜV SÜD 2016). Auch die Wasserstofftankstelleninfrastruktur steht im Fokus der AFID-Richtlinie (EP/Rat 2014a). Zudem will die Initiative H₂-Mobility in den kommenden Jahren ein Wasserstofftankstellennetz von über 400 Stationen in Deutschland errichten (H₂M 2016).

PHEV UND BEV IM CHECK

Der rein elektrische Antrieb und der Plug-in-Hybridantrieb bei leichteren Lkw (Fahrzeugklassen N1 und N2) sowie Stadtbussen hat eine technologische Reife, die Prototypen und erste Kleinserien hervor gebracht hat. Ihre Erprobung im praktischen Einsatz erfolgt bereits bzw. ist in den nächsten Jahren zu erwarten. In Bezug auf die **technologische Reife** ist die Weiterentwicklung der Batterien sowohl hinsichtlich Speicherdichte als auch Kostendegression pro gespeicherter Kilowattstunde die zentrale Voraussetzung.

Mit verbesserten Batterien dürften die Anschaffungs- und damit die **Nutzerkosten** spürbar sinken, sodass sich der Abstand des batterieelektrischen Nutzfahrzeugs zum dieselgetriebenen verringert. Plug-in-Hybride müssen allerdings die Kosten von zwei Antriebssträngen tragen: verbrennungsmotorisch und batterieelektrisch. Dem steht bei leichten Nutzfahrzeugen der Anreiz der Hersteller gegenüber, mit dem Plug-in-

Hybrid die CO₂-Grenzwerte für Neufahrzeuge zu reduzieren.

Informationen zu realen Nutzerkosten werden erst im Rahmen von Piloten in Bezug auf die konkrete Nutzung (Einsatztage, tägliche Fahrleistung, Witterungseinflüsse usw.) ermittelt. Für die ökonomische Wettbewerbsfähigkeit von Plug-in-Hybriden und batterieelektrischen Fahrzeugen im Straßengüterverkehr spielt schließlich die Preisdifferenz zwischen Dieselmotorkraftstoff und Strom eine wichtige Rolle. In Bezug auf die **Nutzerpräferenzen** bieten Plug-in-Hybride im überregionalen Einsatz deutlich mehr Vorteile als batterieelektrische Fahrzeuge, für Kurzstrecken können reine Elektrofahrzeuge durchaus ausreichen.

Strom ist zwar grundsätzlich flächendeckend verfügbar. Doch erfordert das elektrische Betanken von E-Nutzfahrzeugen eine entsprechende **Infrastruktur** leistungsfähiger Ladestationen und Ladeplätze. Für Busse und sonstige Kraftfahrzeuge können dies Haltestellen oder Fahrzeugdepots sein; für Straßengüterfahrzeuge im regio-

nalenen Verteiler- und Liefereinsatz dürften dagegen eher eigene Lademöglichkeiten in den Unternehmen vorgehalten werden. Größere Reichweiten und somit ein höheres Maß an Autonomie bieten wiederum Plug-in-Hybridfahrzeuge.

Insbesondere in Städten können Nutzfahrzeuge mit elektrischem Antrieb dazu beitragen, die durch den Verkehr verursachten **lokalen Luftschadstoffemissionen** zu reduzieren. Zudem sind die Lärmemissionen auch noch deutlich geringer als bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren – allerdings nur bei niedrigen Geschwindigkeiten (UBA 2013).

Außerdem werden im elektrischen Fahrmodus keinerlei direkte Treibhausgasemissionen verursacht. Entscheidend für den Klimaschutz von Elektrofahrzeugen ist deshalb die Stromerzeugung. Stärker als bei verbrennungsmotorischen Antrieben fällt bei Elektrofahrzeugen der Energiebedarf für die Fahrzeugproduktion, insbesondere die Batterien, ins Gewicht.

MARKTDURCHDRINGUNG

■ Prototypen, Kleinserien für leichte Nutzfahrzeuge sowie Stadtbusse. Die Antriebstechnik, vor allem die Batterien, müssen noch weiter verbessert werden. Bei sinkenden Fahrzeuggesamtsummen kann sich eine Nische entwickeln.

ANWENDUNGSBEREICHE

■ Hauptsächlich bei planbaren täglichen Fahrleistungen und Einsätzen bzw. in einem festgelegten Einsatzgebiet, vor allem leichte Nutzfahrzeuge, Lkw zur Verteilung sowie zur Ver- und Entsorgung oder Stadtbusse.

EFFIZIENZPOTENZIALE BIS 2040

■ Hohe Wirkungsgrade von Elektromotoren (ca. 90%). Energiespeicherung in Batterien noch mit zu geringer Energiedichte und zu hohen Herstellkosten. Ladeverluste müssen gesenkt oder minimiert werden.

KOSTEN

■ Anschaffungskosten, vor allem durch die Batterien, sind signifikant höher als bei reinem Dieselantrieb. Bei den Bussen kosten Plug-in-Hybridfahrzeuge derzeit in der Anschaffung noch mindestens 30% und Batteriefahrzeuge ca. 90% mehr als reine Diesel (Hondius 2015).

FAZIT PHEV UND BEV

In Summe weisen insbesondere batterieelektrische Fahrzeuge geringe Merkmalsausprägungen bei Nutzerkriterien auf. Mittelfristig werden sich E-Nutzfahrzeuge zu einer Anwendungsnische entwickeln. Batterieelektrische Fahrzeuge kommen nahezu ausschließlich für den regionalen Einsatz in Frage, Plug-in-Hybride sind dagegen in der Lage, das Reichweitenproblem zumindest teilweise zu überbrücken. Emissions- und Immissionsregulierungen können die Entwicklung und den Einsatz urbaner und regionaler E-Nutzfahrzeuge fördern.

BRENNSTOFFZELLE & WASSERSTOFF IM CHECK

Bislang finden sich Brennstoffzellenfahrzeuge vor allem bei Pkw. Im Nutzfahrzeugbereich konnten Brennstoffzellenfahrzeuge in einer Reihe von Pilotanwendungen, vor allem in Stadtbussen, bereits ihre **technologische Reife** nachweisen. Bisher gibt es hier jedoch nur Einzelfahrzeuge.

Die zentrale Herausforderung der Fahrzeugentwicklung sind die Kosten der Brennstoffzelle und die Lebensdauer (TAB 2012). Mit weiteren Verbesserungen der Brennstoffzellenproduktion, der Reduzierung des Bedarfs an hochwertigen Rohstoffen und der Verbesserung der Leistungsfähigkeit der Brennstoffzellen dürften die **Nutzerkosten**

spürbar sinken. Informationen zu realen Nutzerkosten liegen für Nutzfahrzeuge mangels Fahrzeugangebot noch nicht vor. Zudem ist der Wasserstofftankstellenpreis bislang ein gesetzter Preis. Schließlich können auch andere als rein ökonomische Nutzerpräferenzen – wie ökologisches Image oder Innovationsförderung – die Ausbreitung der Brennstoffzelle befördern.

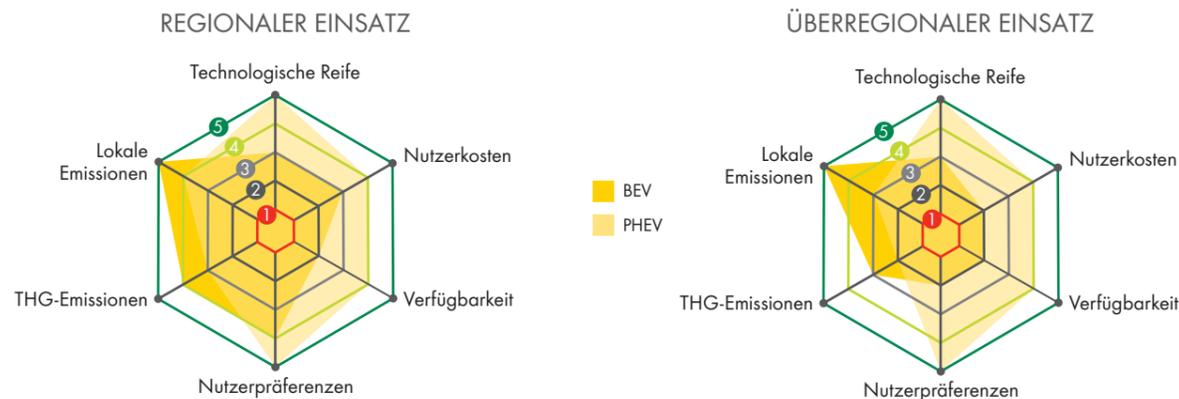
Zurzeit gibt es jedoch nur in einigen deutschen Ballungsräumen eine erste Wasserstoff-Tankstelleninfrastruktur und eine Reihe nicht öffentlicher Tankstellen. Aufgrund der geringen Zahl der bisher errichteten Stationen ist eine Wasserstofftankstelle noch vergleichsweise teuer; dazu trägt auch der Aufwand für die Druckwasserstoffspeicherung bei, dem nur eine geringe

Anzahl von Nutzern gegenübersteht. Im Nutzfahrzeugbereich werden zudem noch keine serienreifen Fahrzeuge angeboten.

Bei der Nutzung von Wasserstoff als Kraftstoff entstehen wie bei einem elektrischen Antrieb keine **lokalen Luftschadstoffemissionen**. Auch in Bezug auf Lärmemissionen sind Brennstoffzellenfahrzeuge vorteilhaft gegenüber Verbrennungsmotoren.

Bei der Verwendung von Wasserstoff im Fahrzeug entstehen auch keinerlei **Treibhausgase**, allerdings je nach Art der Herstellung in der Vorkette, die bei der Gesamtbilanzierung zu berücksichtigen sind. Langfristiges Ziel ist es, den Wasserstoff aus überschüssigem erneuerbaren Strom herzustellen.

52 STECKBRIEF PLUG-IN-HYBRID (PHEV) UND REIN BATTERIEELEKTRISCHER ANTRIEB (BEV)



[0: keine Ausprägung, 1: geringe Ausprägung, 2: mittlere Ausprägung, 3: gute Ausprägung, 4: fast vollständige Ausprägung, 5: vollständige Ausprägung]

53 STECKBRIEF BRENNSTOFFZELLEN UND WASSERSTOFF



[0: keine Ausprägung, 1: geringe Ausprägung, 2: mittlere Ausprägung, 3: gute Ausprägung, 4: fast vollständige Ausprägung, 5: vollständige Ausprägung]

MARKTDURCHDRINGUNG

■ Bisher nur erste Serienfahrzeuge im Pkw-Bereich. Im Busbereich werden Prototypen getestet. Noch keine Lkw in Europa.

ANWENDUNGSBEREICHE

■ Grundsätzlich alle Fahrzeuge, da Fahrzeugleistungen durch Zusammenschalten von Brennstoffzellen beliebig konfiguriert werden können. Der Platzbedarf für Wasserstoffspeicher kann die Reichweite oder Nutzlast von Nutzfahrzeugen einschränken.

EFFIZIENZPOTENZIALE BIS 2040

■ Wirkungsgrad Brennstoffzellenmodul etwa bei 60%. Weitere Entwicklungsziele: Effizienzsteigerung Brennstoffzelle/Fuel-Cell-Antriebsstrang. Kostensenkung Brennstoffzelle durch Verringerung Materialaufwand.

KOSTEN

■ Kosten für Nutzfahrzeuge vor allem durch die Kosten für die Brennstoffzellen signifikant höher als bei allen anderen Antrieben. Bisher gibt es nur Prototypen, deren Anschaffungspreise nicht mit Serienfahrzeugen vergleichbar sind.

FAZIT BRENNSTOFFZELLEN UND WASSERSTOFF

Brennstoffzellenfahrzeuge sind technisch erprobt. Die technisch-ökonomischen Merkmale sind noch etwas schwächer ausgeprägt als bei batterieelektrischen Fahrzeugen – mit Ausnahme von Energiespeicherung und Reichweite. Zum Markthochlauf muss außerdem ein ausreichend dichtes Tankstellennetz geschaffen werden. Wasserstoffbetriebene Brennstoffzellen können langfristig einen Beitrag zu emissionsfreier Mobilität leisten.

3.5 FAHRZEUGTECHNIK

FAHRWIDERSTAND

Neben Motor- und Antriebstechnik sowie Kraftstoffen lassen sich Kraftstoff- bzw. Energieverbrauch und CO₂-Emissionen durch eine Verbesserung der übrigen, nicht antriebsstrangbezogenen Fahrzeugtechnik reduzieren. Hauptansatzpunkt optimierter Fahrzeugtechnik ist die Reduzierung des Fahrwiderstandes. Der Fahrwiderstand lässt sich definieren als Summe aller von außen auf das Fahrzeug wirkenden Kräfte, die der Fortbewegung des Fahrzeuges entgegenwirken. Je höher der Fahrwiderstand, desto höher die erforderliche Antriebsleistung, um ein Kraftfahrzeug auf eine bestimmte Geschwindigkeit zu beschleunigen oder diese konstant zu halten.

Der Fahrwiderstand lässt sich in vier Komponenten zerlegen: den Luftwiderstand (auch aerodynamischer Widerstand), den Rollwiderstand sowie den Beschleunigungs- und Steigungswiderstand. Nur der Luftwiderstand ist dabei nicht vom Fahrzeuggewicht abhängig. Im Fernverkehr und bei hohen Durchschnittsgeschwindigkeiten kann der Anteil von Luft- und Rollwiderstand am Fahrwiderstand bei über 80% liegen, im urbanen bzw. regionalen Einsatz nimmt der Anteil masseabhängiger Fahrwiderstände zu (FAT 2012). Während Luft- und Rollwiderstand zerstreut werden bzw. dissipativ sind, lassen sich Beschleunigungs- und Steigungswiderstand (zumindest teilweise) rekuperieren (Süßmann/Lienkamp 2015). Im Folgenden werden die neuesten Entwicklungen bei der Minderung von Luft- und Rollwiderstand sowie Leichtbau behandelt.

Luftwiderstand/Aerodynamik

Die Aerodynamik gewinnt zunehmend an Bedeutung bei der Entwicklung von Nutzfahrzeugen. Sie spielt insbesondere bei Fahrzeugen, die hohe Laufleistungen bei hohen Durchschnittsgeschwindigkeiten

im Fernverkehr erbringen, eine immer wichtigere Rolle bei den Bemühungen um einen geringeren durchschnittlichen Kraftstoffverbrauch. Der Luftwiderstand eines Fahrzeuges wird von drei Faktoren bestimmt: von der Stirnfläche (Breite mal Höhe) des

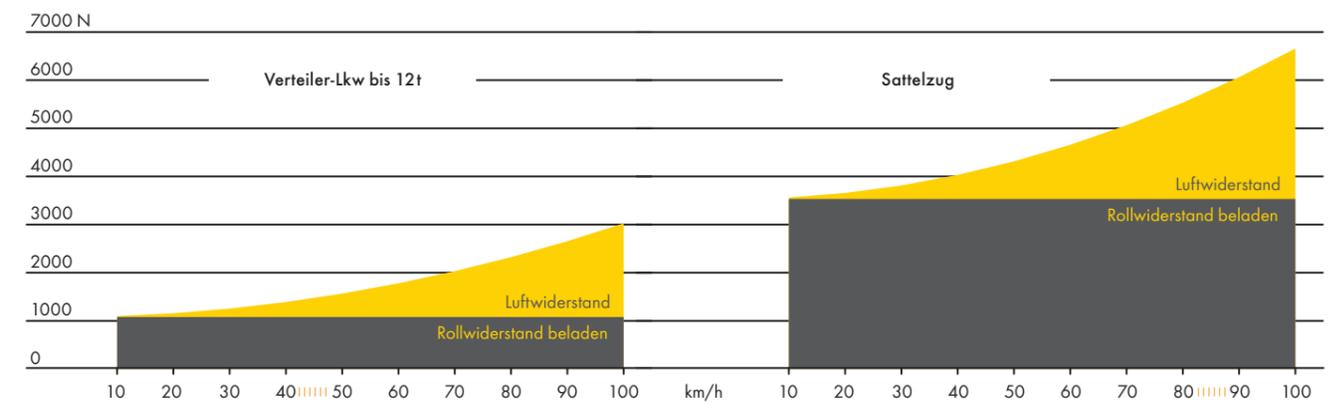
Fahrzeugs, von seiner Windschlüpfrigkeit (ausgedrückt durch den Luftwiderstandsbeiwert bzw. C_w-Wert) sowie insbesondere von der gefahrenen Geschwindigkeit.

Die Frontfläche von Nutzfahrzeugen ist in der Regel groß. Außerdem setzt die EU-Richtlinie 53/1996/EG zu Abmessungen und Gewichten von Nutzfahrzeugen der Verringerung des Strömungswiderstandes durch aerodynamisch optimierte Bauformen enge Grenzen. So weisen etwa die in Europa üblichen stumpfen Frontlenker-Bauformen ein deutlich ungünstigeres Strömungsverhalten auf als keilförmige Hauberfahrzeuge. Der wichtigste Einflussfaktor auf den Luftwiderstand ist jedoch die gefahrene Geschwindigkeit; denn der Luftwiderstand (eine Kraft gemessen in Newton) steigt im Quadrat zur Geschwindigkeit an, das heißt, der Luftwiderstand vervierfacht sich bei einer Verdoppelung der Geschwindigkeit.

Setzt man Roll- und Luftwiderstand zusammen gleich 100%, macht der Luftwiderstand eines beladenen Fernverkehrs-Lkw bei idealem Fahrtwind (Windstille) und einer Geschwindigkeit von 85 km/h etwa 40% des gesamten Fahrwiderstandes aus; bei

54 LKW-FAHRWIDERSTÄNDE

Benötigte Kraft zur Überwindung (in Newton)



einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 40 bis 50 km/h würde der Anteil des Luftwiderstands auf nur noch etwa 15% sinken. Im Verteilerverkehr mit niedrigen Durchschnittsgeschwindigkeiten werden allerdings kleinere und leichtere Lkw eingesetzt; aufgrund des deutlich geringeren Gewichts ist bei diesen der Anteil des Rollwiderstands grundsätzlich geringer.

Es zeigt sich aber auch, dass der absolut zu überwindende Luftwiderstand (gemessen als Kraft in Newton) beim Fernverkehrs-Lkw bei 85 km/h etwa fünfmal so hoch ist wie der Luftwiderstand beim Verteiler-Lkw bei 40 bis 50 km/h. Der steigende Einfluss des Luftwiderstands ist auf die quadratische Proportionalität des Luftwiderstands zur Geschwindigkeit zurückzuführen.

2015 hat die EU die Richtlinie zu den zulässigen Maßen und Gewichten von Nutzfahrzeugen durch EU-Richtlinie 719/2015/EU novelliert (EP/Rat 2015a); sie muss innerhalb von zwei Jahren in nationales Recht umgesetzt werden. Richtlinie 719/2015/EU gestattet es, die bisherigen maximalen Längenabmessungen von Lkw, Bussen und Anhängern bis zu 500 mm ohne Genehmigung und darüber mit Genehmigung zur Verbesserung der Aerodynamik zu überschreiten. Darüber hinaus sollen künftig die Abmessungen abgerundeter Fahrerhäuser länger ausfallen dürfen. Dies schafft den Konstrukteuren zusätzlichen Spielraum, vor allem bei Sattelzugmaschinen mit Trailern und bei Solo-Lkw und Gliederzügen mit Einsatzschwerpunkt im Straßengüterfernverkehr, bei gleichbleiben-

der Ladekapazität den Luftwiderstand je nach Einsatzanforderungen und Fahrzeugspezifika zu verbessern. Für schwere Fernverkehrs-Lkw werden – bei realitätsnahen Fahrbedingungen – mittelfristig realisierbare Einsparpotenziale von 6 bis 8% erwartet (FAT 2011, 2013).

Aktuell haben sich vor allem Luftleitschilder, abgerundete Aufbauanten, die Verringerung des Freiraumes zwischen Fahrerhaus und Aufbau sowie Seitenverkleidungen als nützliche Maßnahmen bewährt. Gleichzeitig gab es in den letzten Jahren bereits mehrere Konzeptstudien von Fahrzeug- und Trailerherstellern, die zeigten, wie aerodynamisch optimierte Sattelzugmaschinen und Trailer in Zukunft aussehen könnten.

Die Nutzung dieses Kraftstoffeinsparpotenzials wird aber auf sich warten lassen, da hierzu neue Fahrerhäuser für Serienmodelle von Sattelzugmaschinen, Lkw, Trailer und Anhänger entwickelt und zugelassen werden müssen. Auch die Marktdurchdringung wird einige Jahre dauern, da die Trailer und Anhänger häufig deutlich länger genutzt werden als die Sattelzugmaschinen und Solo-Lkw. Eine nachträgliche Ausrüstung vorhandener Trailer und Anhänger mit zusätzlichen klappbaren Windshots kann die Hebung dieses Potenzials beschleunigen.

Noch größere Kraftstoffeinsparungen wären durch die Verlängerung der Fahrzeuge auf 25,25 statt 18,75 Meter und die Erhöhung des Gewichts auf mehr als 40 bzw. 44 Tonnen möglich. Solche EuroCombi, Long- oder Gigaliner – auch

Longer and/or Heavier Vehicles oder kurz LHV genannt – können eine bestimmte Ladung kompakter mit weniger Fahrten transportieren und sparen hierdurch Kraftstoff ein. In einzelnen Ländern, insbesondere in Skandinavien, in Nordamerika oder in Australien, sind solche überlangen bzw. überschweren Nutzfahrzeuge bereits seit Jahren im Einsatz.

Ansonsten beschränkt sich ihr Einsatz in Deutschland auf eine Reihe von bis Ende 2016 befristeten Feldversuchen mit überlangen Lkw von bis zu 25,25 Metern Länge (bei unverändertem zulässigen Gesamtgewicht). Es konnte gezeigt werden, dass Lang-Lkw Effizienzgewinne und Kraftstoffeinsparungen zwischen 15 und 25% ermöglichen (bast 2014). Der Einsatz von Lkw mit einem höheren Gesamtgewicht als heute zulässig ist in Europa nicht ohne infrastrukturelle Anpassungen möglich. Bei der Novellierung von EU-Richtlinie 719/2015/EU konnten sich die Mitgliedstaaten nicht auf eine weitergehende Erhöhung der Fahrzeuglängen und/oder Fahrzeuggewichte im europäischen Maßstab einigen.

Rollwiderstand

Ein weiterer wichtiger Faktor für den Kraftstoff- und Energieverbrauch von Nutzfahrzeugen ist der Rollwiderstand. Er errechnet sich aus dem Fahrzeuggesamtgewicht und dem Rollreibungskoeffizienten. Da die Gewichtskraft bestehend aus Fahrzeuggewicht und Zuladungsgewicht durch das Fahrzeug und die Ladung vorgegeben sind, gilt es, den Rollreibungskoeffizienten zu verringern. Wichtigster Einflussfaktor auf

55 ROLLWIDERSTAND AM REIFEN



- 1. Ein- und Ausgang der Verformung in der Bodenaufstandsfläche
- 2. Verformung in der Bodenaufstandsfläche + Schub und Druck

Verformung = Energieverlust

den Rollreibungskoeffizienten ist die Reifenbeschaffenheit, denn der Rollwiderstand wird maßgeblich durch die Verformung der Reifen bei Fahrbahnkontakt beeinflusst. Er ist unter anderem abhängig vom Reifendurchmesser, den Materialeigenschaften, dem Fahrbahnbelag und vom Reifendruck.

Die einfachste Maßnahme zur Minderung des Rollwiderstands ist die Prüfung des Luftdrucks und die Korrektur auf den festgelegten Normalwert. So kann heute mit automatischer Reifendruckkontrolle vermieden werden, dass Lkw mit zu niedrigem Luftdruck unterwegs sind. Die Systeme kosten weniger als 1.000 Euro, werden bereits als Serientechnik angeboten und bringen bei konsequenter Anwendung eine Kraftstoffersparnis, die betrachtet auf den Zustand ohne diese Serientechnik mehrere Prozent ausmachen kann (Goodyear Dunlop 2012).

Des Weiteren kann der Rollwiderstand durch spezielle Gummimischungen und Profile von Leichtlaufreifen minimiert werden, was direkt dem Kraftstoffverbrauch zu Gute kommt. Pro Nutzfahrzeug und Jahr entstehen nur wenige hundert Euro zusätzliche Kosten, welche sich trotz geringer Kraftstoffeinsparung bei gleichzeitig hoher Laufleistung abhängig vom Kraftstoffpreis amortisieren. Leichtlaufreifen werden bereits von vielen Reifenherstellern angeboten und sind daher bereits heute uneingeschränkt einsetzbar.

Mit der in der EU im Jahr 2012 eingeführten Kennzeichnungspflicht für Reifen – klassifiziert nach Kraftstoffeffizienz, Nasslaufleistung und Schallemissionen – kann sich der Nutzer auch schnell über die unterschiedlichen Eigenschaften von Reifen informieren. Die Aufrüstung von Standardreifen auf Leichtlaufreifen bzw. die Aufrüstung um eine Reifenklasse bei Komplettbereifung wird mit 3 - 4 % Kraftstoffeinsparung angegeben (Goodyear Dunlop 2013; Breemersch/Akkermans 2015).

Leichtbau

Da Roll-, Beschleunigungs- und Steigungswiderstand abhängig vom Fahrzeuggewicht sind, wirkt sich eine Reduzierung des Fahrzeugeigengewichtes durch leichtere Materialien oder materialsparende Konstruktionen günstig auf den Fahrzeugwiderstand und damit den Energieverbrauch aus. Zum einen spart ein geringeres Eigengewicht beim Fahren (Rollen) sowie bei Beschleunigungsvorgängen und Steigungsfahrten Kraftstoff, zum anderen ermöglicht ein geringeres Eigengewicht der Nutzfahrzeuge eine Erhöhung der Nutzlast.

Längerfristig bieten der verstärkte Einsatz von Aluminium, geschäumten Stählen und hochwertigen Verbundwerkstoffen im Nutzfahrzeug- und Anhängerbau noch signifikante Gewichteinsparpotenziale. Pro eingesparter Tonne Fahrzeugmasse wird für Sattelzüge ein Kraftstoffeinsparpotenzial von 1 - 2%, und für Stadtbusse von etwa 5% angeführt. Für Lkw werden mittelfristig Gewichtsreduktionspotenziale von bis zu etwa zwei Tonnen gesehen (Breemersch/Akkeremans 2015; Süßmann/Lienkamp 2015).



Neben antriebs- und fahrzeugtechnischen Maßnahmen hat die Fahrzeugbedienung durch den Fahrzeugführer sowie die Fahrzeug- und Ladungsdisposition maßgeblichen Einfluss auf Energieverbrauch und Emissionen von Lkw.

Fahrerunterstützung

Einen bunten Strauß von Optionen zu Kraftstoffeinsparungen bietet die Nutzung von Fahrerassistenzsystemen, indem der Fahrer von möglichen Aufgaben durch ein technisches System entbunden oder unterstützt wird. Die Fahrerassistenz beginnt bei einfachen Anzeigen zum aktuellen Energieverbrauch, geht über Empfehlungen zum Fahrerverhalten und Tempomaten bis zu aktuellen Entwicklungen wie Kolonnenfahren mit verringertem Abstand und schließlich zum automatisierten Fahren.

Alle diese Technologien besitzen zusätzlich zur Schulung des Fahrers Potenziale, den Energiebedarf beim Fahren zu reduzieren. Für viele der neuen Technologien ist der Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologien Voraussetzung (Amitran 2014).

Eine durch Informations- und Kommunikationstechnologien (IuK) getriebene Spartechnik ist zunächst der vorausschauende Tempomat (Predictive Cruise Control, kurz PCC). Durch Nutzung – mitgeführter oder per Global Positioning System (GPS) verfügbarer – topografischer Daten erlauben PCC-Systeme eine an die vorhandene Topografie angepasste Fahrweise durch einen direkten Eingriff in den Antriebsstrang. Mittels entsprechender Schalt- und Gasstrategien wird angestrebt, einen Teil der kinetischen Energie im Schwung des fahrenden Lkw durch leichtes Überspringen zu speichern. Der negative Beschleunigungs- oder Steigungswiderstand kann dann bei Berganfahrten als zusätzlicher Vortrieb genutzt werden. Das Kraftstoffeinsparpotenzial von PCC-Systemen wird in Abhängigkeit von gefahrener Geschwindigkeit und topografischen Gegebenheiten mit 3 bis 6% angegeben; im Flachland entfalten sie allerdings kaum Wirkung (LAO 2013).

Beim Kolonnenfahren (Platooning) werden schwere Nutzfahrzeuge auf Fernstraßen durch digitale Systeme (elektronische Deichsel) zu Fahrzeugkonvois zusammengestellt. Durch eine gezielte Verringerung des Fahrzeugabstands – zum Beispiel von 50 Meter auf 10 bis 20 Meter – verringert sich der Luftwiderstand. Das Effizienzpotenzial hängt von der Anzahl der sich daran beteiligenden Fahrzeuge, der Geschwin-

digkeit und dem Abstand der Fahrzeuge und der gemeinsam in einer Kolonnenfahrt zurückgelegten Fahrlänge ab. Die größten Vorteile ergeben sich für die Fahrzeuge in der Mitte der Kolonne (ca. 11% Kraftstoffeinsparung), aber auch Führungs- und Abschlussfahrzeug profitieren von den günstigeren Strömungsverhältnissen (LAO 2016). Des Weiteren konnten in bisherigen Simulationen positive Effekte des Kolonnenfahrens von Lkw auf den Verkehrsfluss festgestellt werden, so dass sich auch für die anderen Verkehrsteilnehmer Kraftstoffeinsparungen sowie kürzere Reisezeiten ergeben (Müller 2012).

Das Kolonnenfahren setzt letztendlich teilweise oder hoch-automatisiertes Fahren von miteinander vernetzten Lkw voraus. Bisher sprachen sowohl juristische Gründe – wer haftet bei einem Unfall? – als auch Sicherheitsbedenken noch gegen eine Anwendung solcher Systeme. 2014 wurde die Wiener Straßenverkehrskonvention (von 1968) im Hinblick auf aktuelle Fahrerassistenzsysteme überarbeitet – eine ständige Fahrerüberwachung ist jedoch weiterhin Pflicht. Darüber hinaus gibt es in Deutschland ein „Digitales Testfeld Autobahn“ (A9), auf dem Innovationen wie Platooning in Verbindung mit (teil-)automatisiertem Fahren in der Praxis getestet werden können (Bundesregierung 2015). Mit einer breiteren Anwendung voll automatisierter Lkw im Straßengüterverkehr wird nichtsdestotrotz erst mittelfristig gerechnet.

Disposition und Routenwahl

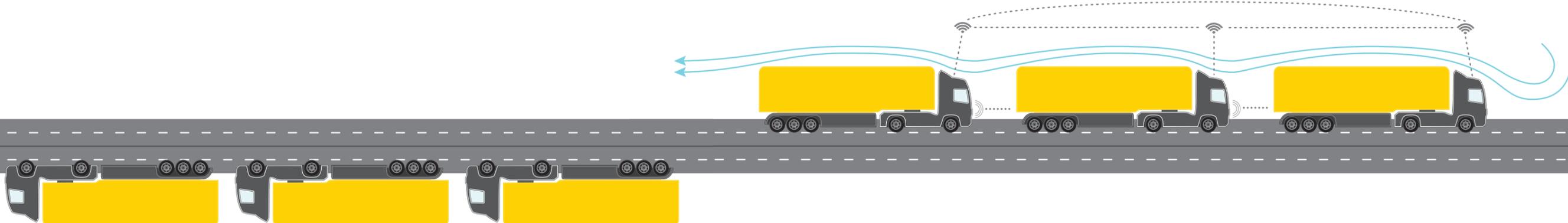
Des Weiteren können zunehmend Telematiksysteme die Disposition von Fahrten oder die kontinuierliche Schulung und Einsatzplanung der Fahrer optimieren.

Über elektronische Marktplätze finden Versender und Transporteure zueinander. Durch den umfassenden Blick auf Angebot und Nachfrage bei gleichzeitiger Anzeige von aktuellen Fahrzeugpositionen wird die Effizienz bei der Planung und Durchführung von Transporten erhöht. So werden Leerfahrten vermieden und die Auslastung der Fahrzeuge erhöht. Zeitfenster zur Abholung und Anlieferung werden präziser abgestimmt, Warte- und Standzeiten und somit Kosten werden verringert.

Ein Verkehrsmanagement basierend auf aktuellen Verkehrssituationen stellt zudem sicher, dass Nutzfahrzeuge schnell ihre Fahrtroute optimieren und so Umwege vermeiden oder Staus mit häufigem Anhalten und Anfahren umfahren. Bei effektiver Vernetzung von Fahrzeugen untereinander oder mit der Verkehrsinfrastruktur wird der Verkehrsfluss zunehmend optimiert werden. Ein Anwendungsbeispiel ist die Unterstützung von Fahrern bei der Parkplatzsuche an Autobahnen, die bereits pilotweise über Apps angeboten wird. Hierdurch kann der Fahrer gezielt einen freien Parkplatz anfahren, ohne bei der Suche unnötig Zeit und Kraftstoff zu verbrauchen.

Bei einer konsequenten Anwendung unter Einsatz aller verfügbaren Komponenten (Flottenmanagement, Fahrermanagement, Navigation) können signifikante Kraftstoffeinsparungen erreicht werden. Diese sind jedoch nur auf der Unternehmerebene durch einen Vorher-Nachher-Vergleich nachweisbar und können aufgrund unterschiedlicher Voraussetzungen nicht generell quantifiziert werden.

56 KOLONNENFAHREN



4 SZENARIEN FÜR LKW UND BUSSE – ANTRIEBE, KRAFTSTOFFE, CO₂-EMISSIONEN

Nach den Rahmenbedingungen für Güterverkehr, Logistik sowie Straßenpersonenbeförderung (Kapitel 1), der Entwicklung von Lkw- und Busflotten (Kapitel 2) sowie der Analyse und Abschätzung künftiger Antriebs-, Kraftstoff- und fahrzeugtechnischer Entwicklungen (Kapitel 3) gilt es im Folgenden – mit Hilfe von Szenariotechnik – in die Zukunft zu schauen. Im ersten Schritt werden die Methode und das Vorgehen der folgenden quantitativen Szenarioanalyse dargelegt. Anschließend werden die betrachteten Szenarien qualitativ beschrieben. Im dritten Schritt folgt die Beschreibung der Annahmen bzw. Eingangsgrößen sowie der wichtigsten quantitativen Szenarioergebnisse. Dazu gehören insbesondere der Antriebsmix des Fahrzeugbestands, der Energieverbrauch sowie die Treibhausgasemissionen von Lkw und Bussen.

4.1 METHODIK UND VORGEHEN

In Abhängigkeit von unterschiedlichen Rahmenbedingungen und Treibern werden zunächst mögliche **Zukunftspfade (Szenarien)** des Straßengüterverkehrs sowie des öffentlichen Straßenpersonenverkehrs mit Bussen entwickelt und qualitativ beschrieben. Die Szenarienentwicklung erfolgte dabei in zwei Stufen: Die Szenarioprognosen zu Fahrleistungen und Fahrzeugbestand basieren auf einem einheitlichen Basisszenario, während die Antriebs-Kraftstoff-Szenarien sich in Bezug auf Antriebstechniken und Kraftstoffe teilweise deutlich unterscheiden.

In Kapitel 1 ist ein **verkehrswirtschaftliches Basisszenario** beschrieben worden, das die Entwicklung von Güterverkehrsaufkommen und Güterverkehrsleistung in Deutschland bis in das Jahr 2040 fortschreibt. Für dieses verkehrswirtschaftliche Basisszenario werden nun die für die Umsetzung der erforderlichen Transportleistung notwendigen Lkw-Fahrleistungen mit Hilfe eines eigenen Güterverkehrsmodells prognostiziert. Für Busse stand kein eigenes Verkehrsmodell zur Verfügung, sodass deren Fahrleistungen auf der Grundlage von statistischen Daten (Destatis 2015b) sowie der Verkehrsprognose des Bundes (BVU et al. 2014) abgeschätzt wurden.

Mittels Trendfortschreibung werden die heutigen **Lkw- und Busflotten** bis 2040 nach Fahrzeugsegmenten zahlenmäßig weiterentwickelt. Anders als in der Shell Pkw-Studie (Shell 2014) werden Neuzulassungen und Fahrzeugbestand nur einmal über die betrachteten Szenarien modelliert. Überdies wird hierbei das durchschnittliche Alter des jeweiligen Fahrzeugbestands nicht verändert. Mit Hilfe von Flottenmodellierung und Trendfortschreibung wurden die Lkw- und Bus-Fahrzeugflotten antriebstechnisch differenziert weiterentwickelt. Dabei unterscheiden sich zunächst die **Antriebsmixe der Neuzulassungen** – und im Zeitverlauf folglich die **Antriebsmixe der Fahrzeugbestände**.

Die Neuzulassungen nach Antrieben orientieren sich in der untersten, aber zahlenmäßig bedeutendsten Lkw-Kategorie der leichten Nutzfahrzeuge (N1) an der aktuellen Shell Pkw-Studie (Shell 2014); das gilt vor allem für das zahlenmäßig stärkste Fahrzeugsegment, die N1-Fahrzeuge mit bis zu einer Tonne Nutzlast. Bei den mittleren und schweren Nutzfahrzeugen (Lkw-Fahrzeugklassen N2 und N3; Kraftomnibusse M2 und M3) werden zum einen die antriebstechnischen Zulassungstrends der Vergangenheit fortgeschrieben. Zum anderen

werden gezielt neue Antriebstechnologien – namentlich Elektroantriebe für leichte Nutzfahrzeuge, Lkw und Stadtbusse sowie Erdgasantriebe für Fernverkehrs-Lkw und -Busse – über die Neuzulassungen in den Fahrzeugbestand eingephasst.

Über die Flottenmodernisierung durch Neuzulassungen können dann die Auswirkungen neuer Antriebstechniken auf den Fahrzeugbestand, seinen Energieverbrauch sowie seine Treibhausgasemissionen abgeschätzt werden. Rückkoppelungseffekte von Entwicklungen bei Antriebs-Kraftstoff-Kombinationen – etwa durch höhere Fahrzeug- und damit Transportkosten – auf Verkehrsaufkommen, Verkehrsleistung oder Fahrleistungen im Straßengüterverkehr oder im öffentlichen Straßenpersonenverkehr werden dabei nicht weiter betrachtet.

Ausgangspunkt der **Kraftstoffverbrauchsrechnung** für Lkw und Busse ist die DIW-Verbrauchsrechnung für den motorisierten Straßenverkehr in Deutschland, welche die realen durchschnittlichen Kraftstoffverbräuche für den Nutzfahrzeugbestand nach Fahrzeugkategorien ausweist (DIW 2015a, b). Für die Verbrauchsprojektion werden zusätzlich zur Differenzierung der Antriebsmixe szenarioabhängig Effizienzmaßnahmen, die sich in ihrer Wirksamkeit

unterscheiden, mit unterschiedlichen Diffusionsgeschwindigkeiten über die Neuzulassungen in die Fahrzeugflotten eingephasst. Die Annahmen zur Effizienzentwicklung basieren ebenso wie die Annahmen zur Diffusion von Antriebstechniken auf den Technologie-Potenzialabschätzungen von Kapitel 3. Unter Annahme antriebspezifischer Fahrzeugfahrleistungen und entspre-

chender szenariovarianter Kraftstoffmische werden szenariospezifische absolute Kraftstoff- bzw. **Endenergieverbräuche** des Straßengüterverkehrs und des ÖSPV mit Bussen ermittelt. Mit Hilfe energieträgerspezifischer Treibhausgasfaktoren, die im Wesentlichen aus (JEC 2014a, b) abgeleitet sind, werden sowohl die direkten Treibhausgasemissionen des Lkw- und

Busverkehrs als auch die Vorkettenemissionen der verwendeten Energieträger ermittelt. Abschließend wird die Entwicklung des Energieverbrauchs und der **Treibhausgasemissionen** von Lkw und Bussen in den Kontext nationaler energie- und klimapolitischer Zielvorgaben eingeordnet.

4.2 SZENARIEN UND TREIBER

In diesem Abschnitt werden zwei unterschiedliche Szenarien für Lkw-Antriebe und Kraftstoffe der Zukunft entwickelt: zum einen ein **Trendszenario**, welches die wichtigsten Entwicklungen der jüngeren Vergangenheit einschließlich absehbarer bzw. bereits beschlossener Maßnahmen fort-schreibt; zum anderen ein ambitioniertes **Alternativszenario**, in dem sich neue Antriebs- und Fahrzeugtechnologien sowie Kraftstoffe bzw. Energieträger gegenüber dem Trend beschleunigt im Markt durchsetzen. Zu den wichtigsten Rahmenbedingungen und Bestimmungsfaktoren für künftige antriebs- und fahrzeugtechnische sowie kraftstoffspezifische Entwicklungen gehören die folgenden:

Zunächst werden durch **Gesellschaft und Politik** wichtige Rahmenbedingungen gesetzt, welche die Auswahl und Nutzung von Fahrzeugen, Antrieben und Kraftstoffen beeinflussen oder gar lenken. Zum Teil verschaffen sich Politik- und Gesellschaftstrends auch über die Nachfrage bzw. die Belieferten Geltung; denn letztendlich müssen Transportdienstleister die Anforderungen und Erwartungen von Kunden abbilden, wodurch die Auswahl der Verkehrsträger oder die Wahl des Antriebes beeinflusst werden.

Die Auswahl von Antriebs-Kraftstoff-Fahrzeug-Konfigurationen wird zweitens von den **Nutzern** von Nutzfahrzeugen vorgenommen. Die Akteure des Straßengüterverkehrs orientieren sich dabei in erster Linie an technischen und betriebswirtschaftlichen Kriterien, im Besonderen an den Hal-tungs- und Nutzungskosten von Lkw (Total Cost of Ownership), um ihre Transportdienstleistungen ökonomisch erbringen zu können. Teilweise kommen noch weitere „weichere“ Nutzerpräferenzen ergänzend hinzu, die nicht betriebswirtschaftlich-technische Parameter betreffen.

Weiterhin hängt die Auswahl bestimmter Antriebs-Kraftstoff-Fahrzeug-Kombinationen von der **technologischen Reife** der betrachteten Antriebs-technik sowie der Bereitstellung der zugehörigen **Kraftstoff- bzw. Energieversorgung** für den Straßengüterverkehr und Straßenpersonenverkehr ab.

Die folgenden alternativen Zukünfte beschreiben mögliche, künftige Entwicklungen als – teilweise notwendige – Voraussetzung für bestimmte Antriebs-Kraftstoff-Szenarien für Lkw und Busse. De daraus entwickelten Szenarien dienen der Erforschung einer möglichen Zukunft und sind keine Prognosen.

TRENDSZENARIO

Das Trendszenario geht von relativ **stabilen Rahmenbedingungen** aus und lehnt sich daher an die langfristigen Trends der Vergangenheit an: Der Straßengüterverkehr ebenso wie der Busverkehr stehen weniger im Fokus von Energie-, Umwelt- und Klimapolitik. Gesellschaftliche und politische Rahmenbedingungen für Lkw und Busse verändern sich in der Folge nur allmählich.

Das bisherige, primär auf Effizienz fokussierte Optimierungsverhalten der Betreiber muss sich unter Trendbedingungen nur unwesentlich umstellen. Bei Lkw- und Busantrieben gibt es einen stetigen moderaten Technologiefortschritt, der sich vor allem auf die weitere Verbesserung der etablierten Technologien rund um den Dieselantrieb konzentriert. Die heutigen Kraftstoffe, insbesondere Diesel sowie teilweise andere flüssige Substitute wie Biokraftstoffe, stehen in ausreichendem Maße und zu wettbewerbsfähigen Preisen zur Verfügung und werden verstärkt eingesetzt.

ALTERNATIVSZENARIO

Das Alternativszenario setzt einen **massiven Wandel** der Rahmenbedingungen und damit deutliche Brüche der Vergangenheitstrends voraus: Die gesellschaftlich-politischen Rahmenbedingungen für Lkw- und Busverkehre verschieben sich merklich – nachhaltigere Transportdienstleistungen, insbesondere mehr ökologische Nachhaltigkeit ist gefragt.

Lkw- und Busbetreiber müssen sich mit ihren Lieferprozessen den veränderten Anforderungen von Politik, Gesellschaft, Handelsunternehmen und Konsumenten stellen. Innovation und technischer Fortschritt schreiten generell schneller voran, insbesondere bei Antriebstechnologien gibt es einen starken technologischen Wandel zu neuen Nutzfahrzeugantrieben, speziell zu elektrischen Antrieben und Gasfahrzeugen. Veränderungen auf den nationalen und internationalen Energiemärkten führen zu deutlichen Verschiebungen im Kraftstoffmix für Nutzfahrzeuge – hin zu Strom/Wasserstoff und Erdgas.

TRENDSZENARIO

Das Trendszenario ist **keine Business-As-Usual-Projektion**. Der Trendpfad bezieht bereits beschlossene, bekannte und auch schon absehbare Änderungen der Rahmenbedingungen – und deren technologische Umsetzung – mit ein. Das Trendszenario entspricht somit eher einem New Policies Scenario, dem präferierten Energieszenario der Internationalen Energie-Agentur (IEA) in ihrem jährlichen World Energy Outlook und nicht einem Current Policies Scenario, welches nur vergangene Trends und bereits fest beschlossene Rahmenbedingungen und Maßnahmen fortschreibt (IEA 2015).

POLITIK UND GESELLSCHAFT

Im Trendszenario setzen staatliche Akteure grundsätzlich auf **marktwirtschaftliche und technologieoffene Lösungen** und verfolgen dabei eher pragmatische Energie-, Umwelt- und Verkehrspolitiken. Lkw und Busse sollen zwar auch hier langfristig einen Beitrag zur Reduktion von Energieverbrauch und Treibhausgasen im Verkehrssektor leisten. Allerdings darf die Wettbewerbsfähigkeit des Straßentransportsektors nicht durch einseitige nationale Maßnahmen gefährdet werden.

Die Politik greift nicht über Ordnungsrecht sowie Steuern/Subventionen in die relativen Preise für Antriebe und Kraftstoffe ein, auch nicht zu Gunsten von alternativen Antrieben oder Kraftstoffen. Lediglich Biokraftstoffe werden ähnlich wie bisher weiter gefördert (etwa über verbindliche Biokraftstoffquoten für die Kraftstoffanbieter), allerdings nur in Form von nachhaltig zertifizierten Biokraftstoffen bzw. zunehmend nur noch Biokraftstoffe zweiter Generation.

In Bezug auf Kraftstoff- bzw. Energieeffizienz sowie die Treibhausgasemissionen vertraut der Gesetzgeber bei schweren Nutzfahrzeugen weitgehend auf die **betriebswirtschaftliche Effizienzoptimierung** der Nutzfahrzeugbetreiber und auf den Wettbewerb der Hersteller um die effizientesten Lkw und Busse. Die CO₂-Flottengrenzwerte für neue leichte Nutzfahrzeuge werden moderat fortgeschrieben und für schwere Nutzfahrzeuge erst spät eingeführt.

Bei den lokalen Emissionen ist mit **Euro VI** (gemäß 595/2009/EG) bereits ein hoher Standard für Lkw-Abgasemissionen erreicht. Dieser wird nur noch moderat weiterentwickelt, sodass sich der Aufwand für die Abgasnachbehandlung von schweren Nutzfahrzeugen nur noch unwesentlich erhöht. Lediglich die Emissionsvorgaben für leichte Nutzfahrzeuge (heute Euro 6) werden denjenigen von schweren Nutzfahrzeugen in der Praxis angepasst. Ansonsten stehen andere Emissionsquellen und -sektoren im Vordergrund regulatorischer Aktivitäten.

Von Seiten der Lokalpolitik erfolgen ebenfalls keine neuen antriebspezifischen Nutzungseinschränkungen oder Nutzerprivilegierungen für Nutzfahrzeuge, insbesondere keine neuen (Ein-)Fahrverbote für Lieferfahrzeuge oder Busse mit Verbrennungsmotor in städtische Gebiete.

ALTERNATIVSZENARIO

Das Alternativszenario stellt gegenüber dem Trendszenario eine deutlich anspruchsvollere Projektion dar. Gleichwohl ist das Alternativszenario **kein Zielszenario**, mit dem top-down eine konkrete energie- oder klimapolitische Vorgabe – wie ein bestimmter sektoraler Endenergieverbrauch oder ein bestimmtes Niveau an Treibhausgasemissionen für den (Güter-)Verkehrsbereich – umgesetzt werden soll. Das Alternativszenario ist vielmehr eine Bottom-up-Projektion, die insbesondere von möglichen technisch (gerade noch) machbaren Veränderungen im Nutzfahrzeugbereich ausgeht.

POLITIK UND GESELLSCHAFT

Im Alternativszenario verfolgen staatliche Akteure überaus anspruchsvolle Energie-, Umwelt- und Verkehrspolitiken mit starken, zum Teil drastischen Eingriffen (**Interventionen**) in den Straßen-güterverkehr sowie den Straßenpersonenverkehr mit Bussen. Die Notwendigkeit von Transportdienstleistungen durch Lkw und Bus im Straßenverkehr wird zwar gesehen, gleichwohl sollen Lkw und Busse deutlich umweltfreundlicher fahren, und zwar sowohl in den urbanen Zonen als auch im Überlandverkehr.

Die Politik greift über Ordnungsrecht sowie Steuern/Subventionen in die relativen Preise für Antriebe und Kraftstoffe zugunsten alternativer Antriebe ein. Die Umstellung der Stromerzeugung auf erneuerbare Energien und Kraftstoffe wird forciert – ebenso, wie die Integration von Verkehrs- und Stromsektor über zusätzliche regulatorische Anreize. Der Auf- und Ausbau neuer Infrastrukturen für Elektro-Mobilität mit leichten Nutzfahrzeugen sowie schwere LNG-Nutzfahrzeuge wird gefördert.

Nach der Einführung einer CO₂-Messung für schwere Nutzfahrzeuge werden auch für diese in den frühen 2020er Jahren anspruchsvolle und effektive **CO₂-Grenzwerte** eingeführt und danach stetig verschärft. Die CO₂-Flottengrenzwerte für leichte Nutzfahrzeuge werden rasch reduziert. Hieraus ergibt sich ein starker Anreiz für Anbieter leichter Nutzfahrzeuge, diese Fahrzeugklasse mit Hybridtechnologien und anderen Nullemissions-Fahrzeugtechnologien zu elektrifizieren.

Messtechnik und Messverfahren für Luftschadstoffe werden immer genauer. Zudem führt der „Prozess der Zivilisation“ (Norbert Elias) zu immer größeren Empfindlichkeiten gegenüber lokalen Emissionen. Als Reaktion hierauf erlässt der Gesetzgeber noch strengere Abgasemissionsstandards für alle Nutzfahrzeuge. Damit müssen sich Nutzfahrzeuge im Praxisbetrieb emissionsfreien Antrieben immer weiter annähern. Zusätzlich werden die Vorschriften für verkehrsbedingte Geräuschemissionen verschärft.

Die lokale Politik verhängt in den Städten vermehrt antriebspezifische **Nutzungseinschränkungen**, insbesondere für Lieferfahrzeuge mit Verbrennungsmotor – zum Beispiel über immer strengere und immer umfassendere Umweltzonen – und vergibt zusätzlich Nutzungsprivilegien für Nullemissionsfahrzeuge.

TRENDSZENARIO

NUTZER UND BETREIBER

Aus Sicht der Nutzfahrzeug-Betreiber ist Dieseltechnik die **Standardtechnik** für Nutzfahrzeuge schlechthin. Die technischen Möglichkeiten und die Wirtschaftlichkeit des Dieselantriebs wie auch das fahrzeug- und kraftstoffseitige Infrastrukturangebot bilden die **Messlatte** für sämtliche Antriebs-Kraftstoff-Alternativen.

Da es kaum zusätzliche ordnungsrechtliche Maßnahmen gibt, welche die Nutzungsmöglichkeiten von Dieselantrieben beschränken, müssen diese bei der Auswahl von Antriebs-Kraftstoff-Konfigurationen auch nicht weiter berücksichtigt werden.

Die ökonomische Optimierung des Dieselmotors wird immer weiter vorangetrieben, und die noch vorhandenen technischen Potenziale von Dieselantrieben (wie Effizienz, Leistung, Reichweite) immer weiter ausgereizt. Zusätzlich erlaubt es das Umfeld, eher weiche Faktoren bzw. Ausstattungsmerkmale (zum Beispiel mehr Komfort) bei der Fahrzeugauswahl zu berücksichtigen.

TECHNISCHER FORTSCHRITT UND ANTRIEBE

Aufgrund antriebstechnischer Innovationen bleibt der effiziente und stetig weiter verbesserte **Dieselantrieb** für Nutzfahrzeuge gegenüber alternativen Antrieben klar die wirtschaftlichere Option. Zudem lassen verbesserte Abgasreinigungstechniken auch Lkw und Busse mit Verbrennungsmotor bei geringen Zusatzkosten nahezu schadstoffemissionsfrei fahren.

Eine Option, die Treibhausgasemissionen von Verbrennungsmotoren weiter zu reduzieren, sind nachhaltig zertifizierte **Biokraftstoffe**. Biokraftstoffe müssen jedoch kompatibel mit dem jeweiligen Fahrzeugbestand sein. Für Nutzfahrzeuge stellen 7 Vol.-% Biodiesel eine technische Beimischungsgrenze dar. Diese kann zum einen durch speziell für höhere Biokraftstoffanteile (wie B20 oder B30) ausgerüstete Nutzfahrzeuge oder durch weitgehend nahtlos verwendbare paraffinische Biokraftstoffe (Drop-in-Kraftstoffe) überwunden werden.

Gasantriebe können ihren Wirkungsgradnachteil gegenüber Dieselfahrzeugen nur teilweise bzw. nicht ausreichend wettmachen. Aufgrund eines vergleichsweise begrenzten Fahrzeugangebotes sowie zugehöriger Fahrzeugdienstleistungen bleiben Gasfahrzeuge bis auf Nischenanwendungen für Nutzfahrzeugbetreiber wenig attraktiv.

Aufgrund hoher Rohstoffkosten, geringer Stückzahlen und fehlender Skaleneffekte gewinnt **Elektromobilität** im Nutzfahrzeugbereich nur sehr langsam an Bedeutung. In der Folge konzentriert sich die Hybridisierung und Elektrifizierung von Antrieben auf die leichteren Fahrzeugsegmente sowie auf Nutzfahrzeuge für urbane Einsatzzwecke.

ALTERNATIVSZENARIO

NUTZER UND BETREIBER

Neue Antriebe und Kraftstoffe legen rasch an technologischer Reife zu und gewinnen dadurch an **Akzeptanz** bei immer mehr Nutzfahrzeug-Betreibern. Teilweise werden hierbei – wenn auch in begrenztem Ausmaß – Leistungseinschränkungen gegenüber Dieselfahrzeugen bewusst in Kauf genommen.

Aufgrund schärferer ordnungsrechtlicher Maßnahmen (wie Umweltzonen und anderen Nutzungsbeschränkungen) werden zunehmend auch **alternative Antriebe** eingesetzt, vor allem bei urbanen Lieferverkehren und Personenbeförderungen. Der Einsatz alternativer Antriebs-Kraftstoff-Konfigurationen wird unterstützt durch substanzialle finanzielle Anreize (Incentives). Zudem üben die mit Waren Belieferten Druck auf Logistikunternehmen aus, ihre Lieferketten möglichst nachhaltig, das heißt insbesondere möglichst emissionsarm zu gestalten. Die Logistikunternehmen reagieren hierauf mit neuen zertifizierten Lieferketten und verstärktem Einsatz von alternativen Antrieben und Kraftstoffen in ihren Fuhrparks.

TECHNISCHER FORTSCHRITT UND ANTRIEBE

Getrieben von der zunehmenden Konkurrenz alternativer Antriebe, von immer strengeren staatlichen Regulierungen sowie den intensiven Wettbewerb im globalisierten Nutzfahrzeugmarkt, schreitet der technische Fortschritt auch beim Dieselantrieb unter Alternativbedingungen schneller voran. Angesichts immer höherer Entwicklungs- und Produktionskosten wird es für den Dieselantrieb dabei schwieriger, seine Alleinstellung als Antriebstechnik für alle Nutzfahrzeuge und Nutzfahrzeuganwendungen zu behaupten. So können schließlich alternative Antriebe vermehrt in Nutzfahrzeug-Teilsegmente eindringen.

Die Leistung **elektrischer Fahrzeugantriebe** und Speicher kann rasch und deutlich gesteigert werden. Neue Vorkommen für die Elektromobilität kritischer Rohstoffe (wie Kobalt, Platin oder Seltene Erden) und bei der Herstellung von hybridisierten und elektrifizierten Pkw realisierte Skaleneffekte führen zu sinkenden Produktionskosten auch im Nutzfahrzeugbereich. Von Pkw-Anwendungen breiten sich Hybrid- und elektrische Antriebe – zunächst Plug-in-Fahrzeuge, aber dann auch batterieelektrische wie Brennstoffzellenantriebe – auf leichte Nutzfahrzeuge, leichte Lkw sowie Busse in urbanen Einsatzgebieten aus.

Die technische Entwicklung von **Gasmotoren** macht insbesondere für schwere Nutzfahrzeuge große Fortschritte. So können Gasantriebe ihren Effizienznachteil gegenüber Dieselfahrzeugen deutlich reduzieren. Zusätzlich bietet Erdgas im Vergleich zu Dieselfahrzeugen den Vorteil geringerer direkter Treibhausgasemissionen und einfacherer Abgasnachbehandlung. Schlussendlich werden schwere Nutzfahrzeuge mit Gasantrieb zum „besseren Diesel“.

TRENDSZENARIO

ENERGIE UND KRAFTSTOFFE

Die Rohstoffvorkommen – Rohöl und so genannte Natural Gas Liquids – für die Erzeugung von flüssigen ölbasierten Kraftstoffen sind reichlich vorhanden. Aus ihnen können insbesondere Dieselmotoren durch Raffinerien in ausreichenden Mengen hergestellt und geliefert werden. Die Dieselnachfrage der wachsenden europäischen Diesel-Pkw-Flotten kann durch zusätzliche Konversionsanlagen für Dieselmotoren sowie durch Dieselmotoren über den Weltmarkt gedeckt werden.

Diesel- und auch Ottokraftstoffe werden in den 2020er und 2030er Jahren verstärkt durch beigemischte **Biokraftstoffe** ergänzt. Zu wachsenden Teilen handelt es sich dabei um nachhaltige Biokraftstoffe zweiter Generation, die dem Dieselmotoren auch in höheren Anteilen problemlos beigemischt werden können (Drop-in-Kraftstoffe). In der Folge steigt der Biokraftstoffanteil für Lkw- und Buskraftstoffe bis 2040 sukzessive auf etwa 20 Vol.-% an.

Alle anderen **alternativen Kraftstoffe** bleiben – wie heute – mehr oder weniger Nischenkraftstoffe; weder auf Seiten der Versorgungsinfrastruktur noch auf Seiten der Fahrzeugflotten gelingt einer alternativen Antriebs-Kraftstoff-Kombination ein breiter Marktdurchbruch. Im Besonderen überschüssiger erneuerbarer Strom steht für den Straßenverkehr innerhalb des betrachteten Szenariozeitraums bis 2040 nicht bzw. noch nicht in relevanten Mengen zur Verfügung.

4.3 NEUZULASSUNGEN

Die jährlichen Fahrzeugneuzulassungen resultieren aus der Notwendigkeit, den Fahrzeugbestand regelmäßig zu erneuern. Zahl und Anteil der Neuzulassungen ergeben sich dabei aus der Entwicklung des Fahrzeugbestandes, dem Fahrzeugalter und den Fahrzeugstilllegungen. Das Niveau der Neuzulassungen unterscheidet sich zwischen Trend- und Alternativszenario nicht, weder insgesamt noch bezogen auf einzelne Fahrzeugsegmente. Unter Berücksichtigung der Zulassungstrends im Fahrzeugbestand ergeben sich bei den Nutzfahrzeug-Neuzulassungen folgende Entwicklungen:

Über alle Nutzfahrzeugklassen, Lkw und Busse zusammen, legt die Zahl der jährlich neu zugelassenen Fahrzeuge von heute rund 290.000 auf 344.000 Nutzfahrzeuge bis 2040 zu. Allerdings ergeben sich in den einzelnen Fahrzeugklassen deutliche Unterschiede. Während die Neuzulassungen der leichten Nutzfahrzeuge von in den letzten Jahren rund 220.000 Einheiten auf über 260.000 p.a. im Jahr 2040 ansteigen, geht die Zahl der zugelassenen mittleren Lkw von 3,5 bis 12 Tonnen (N2)

von gut 20.000 auf nur noch 18.600 Nutzfahrzeuge pro Jahr zurück.

Schwere Lkw (N3) und Busse (M2 und M3) verharren bis 2040 nahezu konstant auf ihren heutigen Neuzulassungszahlen. Die rund 55.000 neuen N3-Fahrzeuge sind zu etwa drei Vierteln Sattelzüge und nur zu einem Viertel schwere Lkw über 12 Tonnen. Hier spiegelt sich vor allem die hohe Umschlaggeschwindigkeit des Sattelzugmaschinenbestandes wider. Tendenziell werden die Neuzulassungszahlen für

ALTERNATIVSZENARIO

ENERGIE UND KRAFTSTOFFE

Die Erschließung der globalen Erdölvorkommen wird aufwändiger oder das globale Ölangebot fluktuiert stark. Beides wirkt sich ungünstig auf die Verfügbarkeit sowie immer wieder auf die relativen Kraftstoffpreise, und zwar zu Ungunsten des Dieselmotors aus. Die Entwicklung von neuen Biokraftstoffen kommt kaum voran. Der Biokraftstoffanteil am Kraftstoffmix steigt folglich bis 2040 nur noch leicht auf etwa 10 Vol.-% an.

Auf der anderen Seite erweisen sich die globalen Erdgasvorkommen noch größer als heute erwartet. Durch die stark steigende Erzeugung und den wachsenden Handel mit **verflüssigtem Erdgas (LNG, Liquefied Natural Gas)** aus Nordamerika, Afrika und dem Mittleren Osten steht dem Verkehrssektor ein neuer Energieträger zu wettbewerbsfähigen Preisen zur Verfügung. Zusätzlich werden mittelfristig aus Hauswärme- und Stromerzeugung weitere Erdgasmengen für den Verkehrssektor frei. Parallel gelingt es, eine LNG-Basisinfrastruktur für den Straßengüterfernverkehr zu errichten. Wie heute schon bei CNG (Compressed Natural Gas) wird LNG bis 2040 ein bis auf 20% steigender Energieanteil Biogas beigemischt.

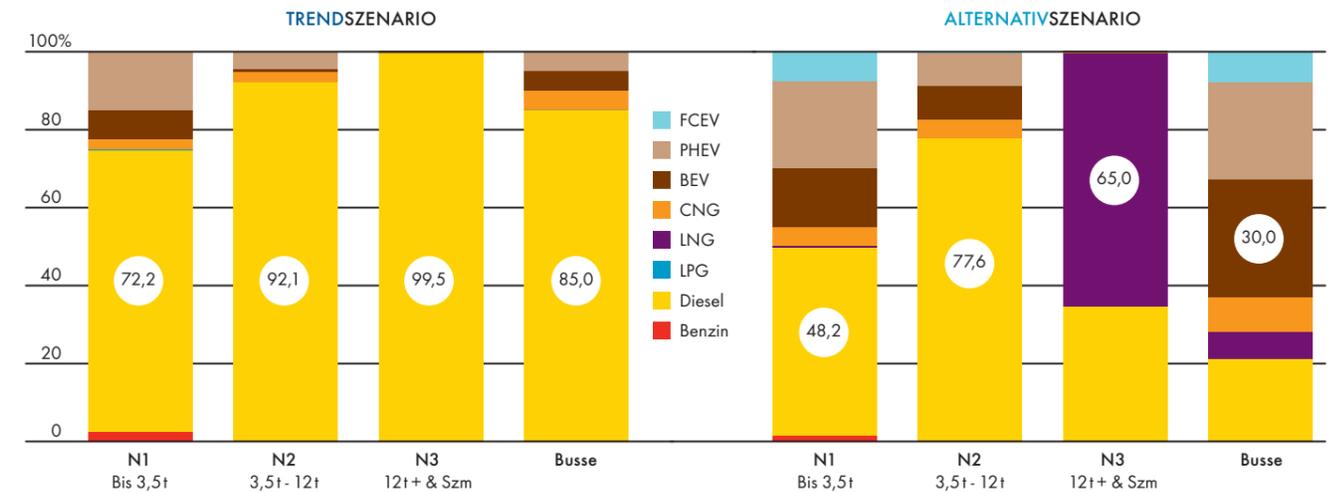
Darüber hinaus stehen große Mengen überschüssigen erneuerbaren Stroms kostengünstig für Verkehrszwecke zur Verfügung; diese können entweder direkt als **Fahrstrom** oder über **Power-to-Gas-Verfahren** – und hier vornehmlich in der Kombination Brennstoffzelle/Wasserstoff – von Lkw und Bussen genutzt werden.

N3-Fernverkehrs-Lkw durch den wachsenden Einsatz gebietsfremder Lkw gedämpft.

Die Busneuzulassungen belaufen sich weiterhin stabil auf 5.700 Neufahrzeuge pro Jahr. Dabei wird davon ausgegangen, dass moderate Rückgänge bei den jährlich neu zugelassenen Linienbussen des Nahverkehrs größtenteils durch eine Zunahme der Neuzulassungen bei Fernverkehrsbussen ausgeglichen werden.

In beiden Szenarien erfolgt eine schrittweise Veränderung des neu zugelassenen Antriebsmixes, indem effizientere Dieselmotoren (einschließlich Hybridfahrzeugen) und alternative Antriebe und Kraftstoffe Marktanteile bei den Neuzulassungen hinzugewinnen. Allerdings unterscheidet sich der Markthochlauf sowohl von Effizienztechnologien als auch von alternativen Antrieben und Kraftstoffen zum Teil deutlich.

57 FAHRZEUGNEUZULASSUNGEN NACH ANTRIEBEN 2040: TREND- UND ALTERNATIVSZENARIO



NEUZULASSUNGEN TRENDSZENARIO

Im Trendszenario setzen Fahrzeugnutzer und -betreiber in erster Linie auf den Einsatz verbesserter Standardtechnologien. So sehen die Neuzulassungen im Trendszenario über alle Fahrzeugklassen effizientere Dieselmotoren weiterhin als mit Abstand wichtigste Antriebsquelle für alle Lkw-Kategorien. Je nach Fahrzeugsegment handelt es sich dabei auch um hybridisierte Dieselmotoren, die bei passenden Fahrprofilen deutliche Kraftstoffeinsparungen gegenüber rein dieselmotorischen Antrieben ermöglichen.

Das größte Potenzial für alternative Antriebe besitzen bis 2040 die leichten Nutzfahrzeuge (N1). Vielfach können hier Antriebsderivate aus dem Pkw-Bereich

synergetisch verwertet werden. Vor allem in den leichteren N1-Segmenten kommt es, nicht zuletzt aufgrund von CO₂-Grenzwert-Standards, zu einer stärkeren Elektrifizierung und Hybridisierung von Antrieben. Dies drückt sich unter anderem in substantiellen Anteilen bei den Elektroantrieben (PHEV, BEV) aus.

Bis 2040 steigt der Anteil von Plug-in-Hybriden (PHEVs) auf 15% und der Anteil rein batterieelektrischer Fahrzeuge (BEVs) auf 7,5%. Andere alternative Antriebe spielen auch bei den N1-Fahrzeugen praktisch keine Rolle. Der reine Benziner wird – seinem langjährigen Zulassungstrend folgend – immer unbedeutender, wird aber neben dem Elektromotor als Antrieb

für N1-Plug-in-Hybride eine Rolle spielen, da hier Synergien mit den Antrieben im Pkw-Bereich zu erwarten sind.

Die N2-Lkw profitieren bis 2040 noch von der Elektrifizierung des N1-Segmentes in Form von rund 5% Plug-in-Neufahrzeugen. Bei Bussen erobern alternative Antriebe ebenfalls bis 2040 weitere Marktanteile. Getrieben unter anderem von urbaner Luftqualitätspolitik erreichen Elektrobusse (PHEV und BEV) Marktanteile von zusammen 10% sowie Erdgasbusse (CNG) etwa 5%. Schwere Lkw und Sattelzüge (N3) setzen mangels alternativer Antriebsoptionen langfristig auch weiterhin nahezu ausschließlich (99,5% im Jahr 2040) auf effiziente Dieselmotoren.

NEUZULASSUNGEN ALTERNATIVSZENARIO

Im Alternativszenario verändern sich zum einen die durch Politik und Gesellschaft gesetzten Rahmenbedingungen deutlich. Alternative Antriebe und Kraftstoffe werden aufgrund sinkender Anschaffungs- und Nutzungskosten allmählich wettbewerbsfähig gegenüber Dieselmotoren. Gleichzeitig werden unter Alternativbedingungen noch größere Effizienzfortschritte über alle Fahrzeugklassen erreicht. Und Fahrzeugnutzer und -betreiber berücksichtigen alternative Antriebe stärker bei der Antriebswahl.

Nicht zuletzt aufgrund ordnungsrechtlicher Vorgaben für den urbanen Straßenverkehr kommt es zu einem verstärkten Einsatz von elektrischen Antrieben für städtische und stadtnahe Straßenverkehre; denn letztendlich ist nur mit Elektro-Lkw vollkommen emissionsfreie Mobilität möglich. Betroffen von der Antriebselektrifizierung sind bei den Lkw die unteren Gewichts- bzw. Nutzlastkategorien, bei den Kraftomnibussen die Stadtbusse. Neben batterieelektrischen Antrieben und Plug-in-Fahrzeugen finden

sich unter den Elektro-Lkw und -Bussen auch Brennstoffzellenfahrzeuge, die in den 2030er Jahren Marktanteile im Nutzfahrzeugmarkt gewinnen. Der Anteil neu zugelassener Elektrofahrzeuge (PHEVs, BEVs, FCEVs) steigt bei den N1-Fahrzeugen bis 2040 auf immerhin 45% und bei leichteren Lkw bis 12 Tonnen (N2) auch noch auf 17% bis 2040. Bei den schwereren Lkw und Sattelzügen (N3) erfolgt eine gewisse Hybridisierung. In der Regel handelt es sich jedoch nur um „normale“ N3-Hybrid-

fahrzeuge. Plug-in-Hybride oder gar eine vollständige Elektrifizierung der N3-Neufahrzeuge (BEV, FCEV) ist auch unter den Bedingungen des Alternativszenarios bis 2040 noch nicht zu erwarten.

Neben Elektroantrieben gewinnen im Alternativszenario außerdem Gasantriebe stark an Attraktivität. So beginnen Erdgas-Lkw in den 2020er Jahren substantielle Marktanteile bei den N3-Neufahrzeugen zu erlangen; getrieben vor allem durch den

Straßengüterfernverkehr erreichen Gasfahrzeuge, insbesondere LNG-Lkw, bis 2040 Marktanteile bei Neufahrzeugen von zwei Dritteln in der Fahrzeugklasse N3.

Mit dem Aufbau von LNG-Fahrzeugflotten und einer entsprechenden LNG-Tankstelleninfrastruktur verbreitert sich gleichzeitig auch das Angebot von CNG. In der Folge nimmt auch der CNG-Anteil in den unteren Fahrzeugklassen N1 und N2 stärker zu. Im Busbereich erobern zum einen Elektrobusse

(PHEV, BEV und FCEV), insbesondere Stadtbusse, in den 2020er und 2030er Jahren große Marktanteile – mehr als drei Fünftel aller neu zugelassenen Busse sind 2040 elektrisch.

Hingegen bleiben Reisebusse unverändert Domäne des Dieselantriebs. Außerdem werden verstärkt Erdgasbusse (CNG oder LNG) nachgefragt. Insgesamt weisen 2040 knapp 80% der Bus-Neuzulassungen alternative Antriebe aus.

4.4 BESTAND

Der Nutzfahrzeugbestand entspringt ursächlich der nachgefragten Verkehrsleistung in Tonnen- bzw. Personenkilometern. Aus der im Zeitverlauf deutlich und durchweg zunehmenden Güterverkehrsleistung ergibt sich für den Lkw-Bestand ein Flottenwachstum. Unter Berücksichtigung der langfristigen Zulassungstrends im Fahrzeugbestand ergeben sich folgende quantitative Bestandsentwicklungen, die im Weiteren wiederum für beide Szenarien Trend und Alternativ gelten:

Über alle Nutzfahrzeugklassen, Lkw und Busse zusammen, wächst der Fahrzeugbestand im Zeitraum von 2014 bis 2040 um über 20% bzw. von 2,9 auf nahezu 3,5 Mio. Fahrzeuge. In den einzelnen Fahrzeugklassen zeigen sich wiederum zum Teil deutliche Unterschiede. Die leichten Nutzfahrzeuge behalten ihren Wachstumstrend bei und legen bis 2040 zahlenmäßig nochmals um fast ein Drittel zu; die Zahl der N1-Fahrzeuge wächst damit von 2,1 auf fast 2,8 Mio. Einheiten. Das ohnehin am schwächsten besetzte N2-Segment schrumpft hingegen um über ein Fünftel, und zwar von heute (2014) 334.900 auf 260.300 Fahrzeuge im Jahr 2040.

Der Fahrzeugbestand schwerer Lkw (N3), aber auch der Busse (M2 und M3) verändert sich bis 2040 kaum. Die N3-Fahrzeuge nähern sich weiter dem Niveau

von 400.000 Einheiten an. Innerhalb des N3-Segmentes verschieben sich die Bestandsanteile zwischen Lkw über 12 Tonnen und Sattelzugmaschinen zugunsten letzterer, also von heute 50:50 auf etwa 40:60 im Jahr 2040. Ebenso wie auf die Neuzulassungen dürfte sich auch hier der Einsatz gebietsfremder Lkw dämpfend auf die in Deutschland registrierten N3-Bestandszahlen auswirken. Der Busbestand verharrt wie in den vergangenen Jahren auch fast unverändert bei knapp 77.000 Fahrzeugen – mit ebenfalls tendenzieller Segmentverschiebung zugunsten von Fernbussen und zu Lasten von Nahverkehrsfahrzeugen.

Die Veränderungen im Antriebsmix der Nutzfahrzeugneuzulassungen schlagen sich schließlich auch im Fahrzeugbestand nieder. Wenn jedes Jahr etwa ein Zehntel

bzw. 290.000 Fahrzeuge zum Bestand von 2,9 Mio. Einheiten neu zugelassen werden, dauert es etwa zehn Jahre, bis sich Veränderungen im Antriebsmix der Neuzulassungen vollständig im Bestand niederschlagen. Voraussetzung hierfür ist, dass die Altersverteilung des Fahrzeugbestands einigermaßen gleichmäßig ist und Veränderungen bei den endgültigen Außerbetriebsetzungen – hervorgerufen zum Beispiel durch eine Alterung des Bestandes – vernachlässigt werden können. Schließlich werden nicht alle Fahrzeugbestände gleich schnell umgeschlagen – was bei der Prognose der einzelnen Fahrzeugsegmente zu beachten ist.

In den folgenden beiden Abschnitten wird dargestellt, wie sich unterschiedlich schnelle und tiefgreifende Veränderungen des Antriebsmixes bei den Neuzulassungen auf den Nutzfahrzeugbestand nach Fahrzeugsegmenten auswirken. Dabei unterscheiden sich Trend- und Alternativszenario im Besonderen bei der Durchdringung des Fahrzeugbestandes entsprechend der unterschiedlichen Markthochläufe der Antriebstechniken über die Neufahrzeuge.

kann. Bei der Fahrzeugklasse N2 bleiben alternative Antriebe weiterhin eine Nische, wobei knapp 2% einen Gasmotor besitzen bzw. gut 2% Plug-in-Hybride sind. Bei schweren N3-Lkw und Sattelzügen bleibt es – fast unverändert zu heute – bei über

99% Dieselantrieben und weniger als 1% Gasantrieben. Die Fahrzeugklasse der Kraftomnibusse besteht im Jahr 2040 aus 91% Dieselfahrzeugen; 9% der Busflotte werden alternativ angetrieben. Jeweils 3% der Fahrzeuge fahren rein elektrisch (BEV),

besitzen zwei Antriebe (PHEV) oder einen mit komprimiertem Erdgas (CNG) angetriebenen Gasmotor. Somit dominiert auch hier der Dieselantrieb weiter den Bestand; alternative Antriebe wachsen langsam in der Nische.

BESTAND ALTERNATIVSZENARIO

Im Alternativszenario führt das beschleunigte Einphasen alternativer Antriebe zu einem deutlich veränderten Antriebsmix im Fahrzeugbestand des Jahres 2040; dies betrifft praktisch alle Fahrzeugsegmente bis auf die N2-Lkw. Grundsätzlich weisen die jeweiligen Fahrzeugklassen je nach ihrer Zweckmäßigkeit für die Nutzer unterschiedliche alternative Antriebe auf.

Bei den N1-Fahrzeugen verfügt mehr als ein Viertel des Bestands über einen elektrischen Antrieb, darunter Plug-ins mit 14%, batterieelektrische Fahrzeuge mit knapp 10% sowie Brennstoffzellenfahrzeuge mit knapp

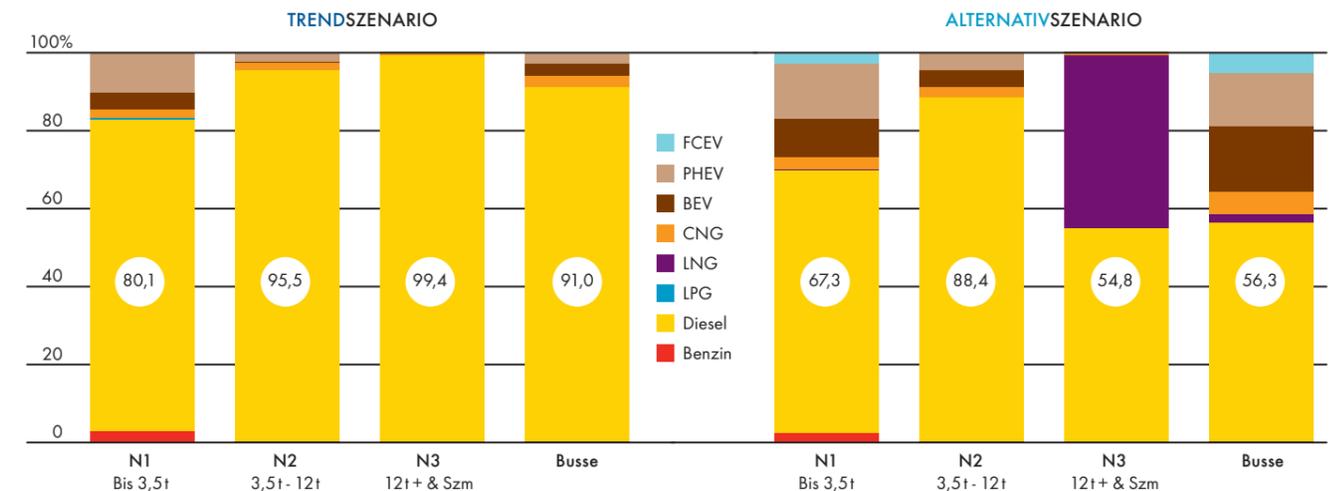
3%. Gut 1,8 Mio. oder etwa zwei Drittel aller N1 sind Dieselfahrzeuge, gegebenenfalls (mild) hybridisiert. Bei den N2-Lkw bis 12 Tonnen bewegen sich fast 90% im Jahr 2040 noch mit Dieselantrieb; zusammen knapp 9% des N2-Bestandes fahren dann jedoch ganz (BEV) oder abschnittsweise elektrisch (PHEV) und knapp 3% haben einen Gasmotor (CNG).

Bei den N3-Fahrzeugen haben sich bis 2040 vor allem bei den Sattelzugmaschinen mit verflüssigtem Erdgas (LNG) fahrende Gasantriebe bei rund der Hälfte der N3-Sattelzüge durchsetzen können. Über

die gesamte Fahrzeugklasse N3 erreicht der Anteil von Fahrzeugen mit Gasantrieb 2040 dann 45%.

Bei den Bussen zeichnet sich im Fahrzeugbestand 2040 eine Mischung aus drei verschiedenen Antriebsarten ab: Der Diesel dominiert mit einem Anteil in Höhe von 56% zwar auch hier. Doch Busse mit elektrischem Antrieb (BEV, PHEV, FCEV) stellen dann bereits gut 35% des Bestandes. Profitierend vom Trend zum Gas-Lkw klettert der Gasanteil bei den Bussen auf knapp 8%, wobei sowohl CNG als auch LNG als Kraftstoffe genutzt werden.

58 FAHRZEUGBESTAND NACH ANTRIEBEN 2040: TREND- UND ALTERNATIVSZENARIO



Als Zwischenfazit zeigt sich, dass die Bestände den antriebsspezifischen Neuzulassungstrends nachfolgen, allerdings mit einer Vorlaufzeit. Die Zeitverzögerung, mit der sich neue Antriebe im Fahrzeugbestand durchsetzen, hängt dabei vom Durchschnittsalter und damit von der Umschlagsgeschwindigkeit des jeweiligen Fahrzeugbestandes ab.

Aufgrund ihrer hohen Jahresfahrleistungen und daraus folgend raschem Verschleiß und hohem Modernisierungsbedarf werden Lkw und Sattelzüge für den Straßengüterfernverkehr am schnellsten ausgetauscht. Ähnliche Aussagen gelten auch für Reisebusse im Linienfernverkehr. Neue Antriebstechnik, wie Erdgasantriebe,

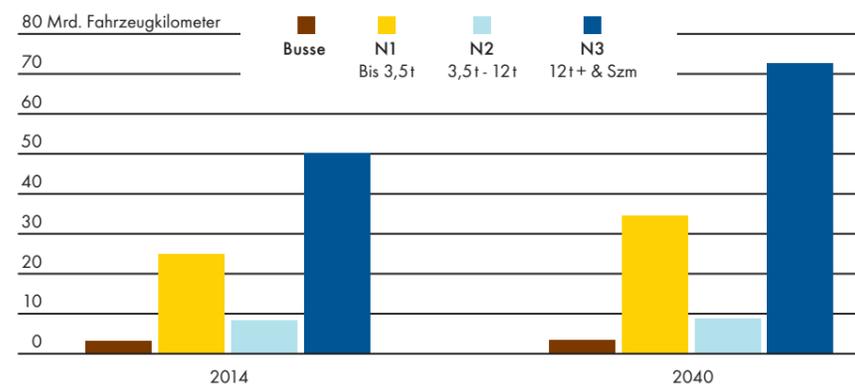
setzen sich im N3-Fahrzeugbestand sowie bei den Fernbussen zügig durch.

Auf der anderen Seite weisen etwa Nahverkehrs- und Verteiler-Lkw (N2), zu großen Teilen aber auch leichte Nutzfahrzeuge (N1) bei geringen Jahresfahrleistungen ein hohes Flottenalter und langsamen Flottenumschlag auf; entsprechend lange dauert es hier, bis neue Antriebstechniken in den Fahrzeugbestand diffundieren. Erschwerend kommt hinzu, dass gegebenenfalls für alternative Antriebe erhöhte Kosten der Fahrzeuganschaffung auf die geringeren Fahrleistungen umgelegt werden müssen.

4.5 FAHRLEISTUNGEN

Die Fahrzeugfahrleistungen ergeben sich aus der Güterverkehrsprognose sowie der Abschätzung der Beförderungsleistung im öffentlichen Straßenpersonenverkehr (ÖSPV) mit Bussen (Kapitel 1). Die Straßengüterverkehrsleistung wächst von 2014 bis 2040 um 43 %, und zwar von 469 auf 672 Mrd. Tonnenkilometer, die Personenbeförderung mit Bussen von 60,5 auf 64,6 Mrd. Personenkilometer. Über Annahmen zu Auslastung, Leerfahrten und Besetzungsgrad werden hieraus die für den Gütertransport und den ÖSPV notwendigen Fahrzeugfahrleistungen von Lkw und Bussen ermittelt.

59 FAHRLEISTUNGEN 2014 UND 2040



Die Lkw-Fahrleistungen steigen in Summe von heute (2014) 83,3 Mrd. Fahrzeugkilometer um 39 % auf 115,9 im Jahr 2040. Damit werden die von der ersten Shell Lkw-Studie (Shell 2010) bereits für 2030 prognostizierten Lkw-Fahrzeugkilometer nun

etwa erst im Jahr 2040 erreicht. Aufgrund eines leicht erhöhten Auslastungsgrades bzw. verringerter Leerfahrtenanteile nimmt die Fahrzeugfahrleistung aller Lkw mit 39 % etwas schwächer zu als die Güterverkehrsleistung der Straße.

Innerhalb der Lkw-Fahrzeugklassen werden vor allem mehr Fahrleistungen bei den leichten Nutzfahrzeugen (N1) mit einem Zuwachs von knapp 40 % und bei schweren Lkw und Sattelzugmaschinen (N3) mit knapp 45 % Wachstum erwartet. Während das Fahrleistungswachstum bei den leichten Nutzfahrzeugen mit einem Zuwachs des N1-Fahrzeugbestands um nahezu ein Drittel im relevanten Zeitraum 2014 bis 2040 einhergeht, wächst derweil die N3-Fahrzeugflotte nur leicht um 2 %.

Dass die Fahrzeugfahrleistungen dennoch zunehmen, liegt insbesondere an der wachsenden Bedeutung gebietsfremder Lkw im Straßengüterfernverkehr. So enthält die Prognose auch Transitverkehre durch Deutschland, die hauptsächlich von gebietsfremden Lkw durchgeführt werden. Hinzu kommen die Zunahme von nach Deutschland ein- und ausfahrenden Lkw-Transporten sowie das Wachstum an Kabotageverkehren (vgl. Exkurs Kabotage). Ein geringer Anteil am Wachstum der N3-Fahrleistungen wird durch die weiter ansteigenden mittleren Transportweiten getragen, die auch die durchschnittlichen jährlichen Fahrleistungen pro Fahrzeug leicht ansteigen lassen.

Die N2-Lkw zwischen 3,5 und 12 Tonnen spielen ebenso wie die Kraftomnibusse (M2- und M3-Fahrzeuge) bei den Fahrleistungen nur eine untergeordnete Rolle. Für beide Fahrzeugsegmente sind nur geringe Fahrleistungsanstiege zu erwarten: die N2-Fahrzeuge legen von 8,2 auf 8,7 Mrd. Fahrzeugkilometer oder um 6 % zu, die Busfahrleistungen wachsen von 3,1 auf 3,5 Mrd. Kilometer bzw. um 13 % zwischen 2014 und 2040. Dabei wird bei den Bus-

sen die Fahrleistung der Fernbusse weiter zunehmen, während sich diese bei den

Standard- und Gelenkbussen im Stadtverkehr verringert.

Anders als bei den Pkw, wo es in den kommenden Jahren zu einem Höhepunkt der Pkw-Nutzung (Peak Car) in Deutschland kommen könnte (Shell 2014), werden die Fahrleistungen im Straßengüterverkehr in den kommenden 25 Jahren weiter wachsen, allerdings etwas moderater als noch vor einigen Jahren angenommen. Mit Blick auf das Wachstum bei den schweren Lkw und Sattelzugmaschinen sowie bei Fernbussen wird dieses Wachstum zum großen Teil auf dem Fernstraßennetz stattfinden. In den urbanen Räumen werden vor allem leichte Nutzfahrzeuge mehr Fahrleistungen erbringen, hingegen der Nahverkehr mit Bussen leicht zurückgehen.

4.6 ENERGIE- UND KRAFTSTOFFVERBRAUCH

Nachdem die Fahrleistungen und zuvor die Anteile am Bestand der verschiedenen Antriebe für beide Szenarien ermittelt wurden, geht es im nächsten Schritt darum, den Kraftstoff- bzw. Energiebedarf des Straßengüterverkehrs sowie des öffentlichen Straßenpersonenverkehrs mit Bussen zu berechnen.

Hierzu wurden zunächst durchschnittliche bzw. spezifische Kraftstoff- und Energieverbrauchsdaten für Lkw und Busse aus verschiedenen Quellen ausgewertet und zusammengestellt. Anschließend wurden für Lkw und Busse antriebspezifische Effizienzpfade, die letztendlich den spezifischen Kraftstoff- bzw. Endenergieverbrauch der Fahrzeuge bestimmen, entwickelt. Aus antriebspezifischen Verbrauchskennwerten und mit Hilfe antriebspezifischer Fahrzeugfahrleistungen kann dann schließlich

der absolute Energieverbrauch des Lkw- und Busverkehrs in Deutschland berechnet werden.

DURCHSCHNITTLICHE VERBRÄUCHE

Ausgangspunkt und Quelle für die Ermittlung des Nutzfahrzeug-Kraftstoffverbrauchs war zunächst die Kraftstoffverbrauchsrechnung des Deutschen Instituts für Wirtschaftsforschung (DIW 2015b). Die DIW-Verbrauchsrechnung berechnet die durchschnittlichen realen Kraftstoffverbräuche für in Deutsch-

land zugelassene Lkw und Sattelzugmaschinen für die Vergangenheit; die letzten Verbrauchsdaten werden für das Jahr 2013 ausgewiesen.

Anders als bei der DIW-Verbrauchsrechnung, die eine Inländerrechnung ist, handelt es sich bei der hier vorgenommenen Verbrauchsrechnung jedoch um eine Inlandsrechnung. Dabei werden nicht nur die von deutschen, sondern auch die von gebietsfremden Lkw jeweils im Inland erbrachten Fahrzeugfahrleistungen als Leistungsbasis für die Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs herangezogen. Zu gebietsfremden Lkw liegen allerdings keine genauen antriebs- oder fahrzeugtechnischen Daten vor.

EXKURS DER KABOTAGE-EFFEKT

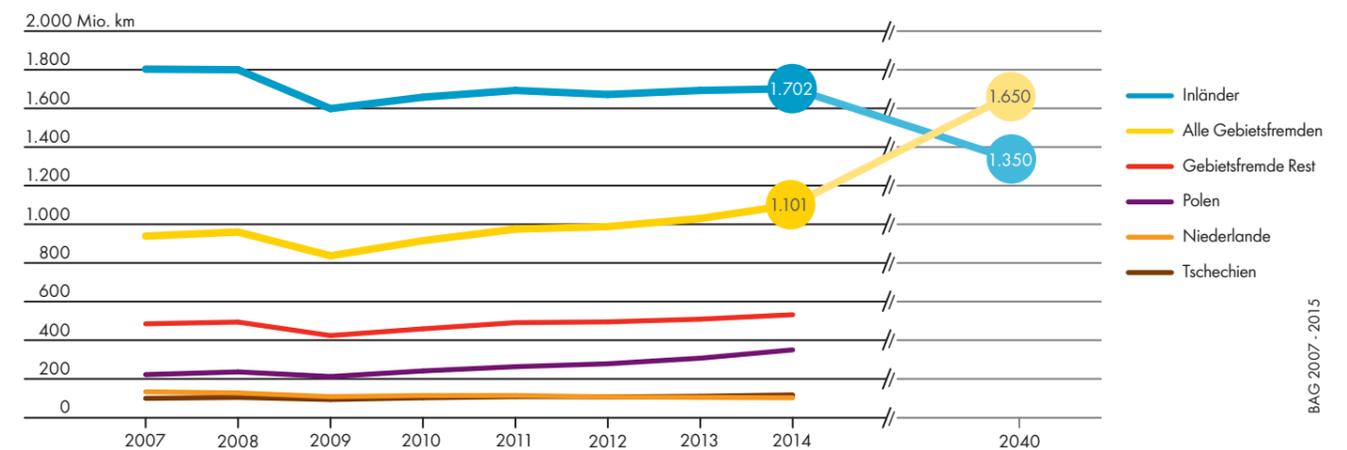
Im Straßengüterverkehr spielen Transportdienstleistungen gebietsfremder Lkw (Kabotage) eine immer größere Rolle. Zum Schutz des inländischen Transportgewerbes waren ausländische Transportdienstleistungen lange strikt reglementiert oder gar grundsätzlich untersagt; andererseits führen Kabotageverbote zu unnötigen Leerfahrten mit entsprechenden ökonomischen und ökologischen Nachteilen. Im Straßengüterverkehr des EU-Binnenmarktes sind Kabotagedienstleistungen seit 1998 grundsätzlich freigegeben, wobei die deutsche Kabotageverordnung erst bis Mitte 2015 sukzessive auf die neuen ost- und südosteuropäischen EU-Mitgliedsländer ausgeweitet wurde.

Die Kabotageverordnung für Deutschland erfolgt in Anlehnung an die EU-Kabotage-Richtlinie 1072/2009/EG durch die Verordnung über den grenzüberschreitenden Verkehr und den Kabotageverkehr (GüKG/KabotageV). Darin wird unter anderem geregelt, wie viele Anschlussfahrten innerhalb Deutschlands ein- und ausfahrende gebietsfremde Lkw durchführen dürfen, bevor sie Deutschland wieder verlassen müssen. Danach hat der Unternehmer dafür zu sorgen, dass höchstens drei aufeinanderfolgende beladene Fahrten ohne Befahren des Gebietes des Staates, in dem das Transportunternehmen seinen Sitz hat, durchgeführt werden.

Das wichtigste Einsatzgebiet ausländischer Straßentransportunternehmen sind die Bundesautobahnen. Anhand der Mautstatistik kann festgestellt werden, wie sich die Lkw-Fahrleistungen gebietsfremder Transportunternehmen in Deutschland in den vergangenen Jahren entwickelt haben. Dabei werden von der Mautstatistik (bisher) alle Fahrten auf mautpflichtigen Bundesfernstraßen und auf Bundesautobahnen durch Lkw über 12 Tonnen erfasst. Somit können alle Fahrten gebietsfremder Lkw bei der Einfahrt, der Ausfahrt und im Transit und zusätzlich alle Kabotagefahrten innerhalb Deutschlands auf Autobahnen und mautpflichtigen Bundesstraßen unterteilt nach Herkunftsländern ausgewertet werden.

Danach erbringen gebietsfremde Transportunternehmen inzwischen fast zwei Fünftel der Lkw-Fahrleistungen auf deutschen Autobahnen und mautpflichtigen Bundesstraßen in Höhe von 11 Mrd. Lkw-km (2014). Zudem hat sich der Anteil der gebietsfremden Fahrleistungen in den vergangenen acht Jahren kontinuierlich erhöht. Die größten Anteile (Transitfahrten, Einfahrende, Ausfahrende und Kabotage) in Deutschland hatten im Jahr 2014 Polen, die Niederlande und Tschechien (BAG 2015b). Setzt sich der Trend zwischen 2007 und 2014 weiter fort, würden gebietsfremde Lkw im Jahr 2040 mehr Fahrleistungen auf mautpflichtigen Strecken

60 FAHRLEISTUNGSANTEILE MAUTPFLICHTIGER LKW IN DEUTSCHLAND



erbringen als inländische Lkw. In der EU wurden zuletzt (2013) knapp 30 Mrd. Tonnenkilometer Kabotageverkehre erbracht (BAG 2015b). Deutschland ist mit Abstand das größte Aufnahmeland für Kabotage in

der EU, gefolgt von Frankreich und Italien; diese Länder haben zuletzt knapp drei Viertel an der gesamten Kabotage in der EU28 auf ihren mautpflichtigen Straßen aufgenommen.

Tatsache ist jedoch, dass gebietsfremde Lkw vor allen Dingen im Straßengüterfernverkehr als Sattelzugmaschinen auf maupflichtigen Strecken eingesetzt werden, wodurch sich ein Anreiz zur Nutzung aktueller Fahrzeugtechnologien ergibt. Daher wurden für gebietsfremde Fahrzeuge bei der Kraftstoffprognose dieselben technischen Annahmen wie für gebietsansässige Nutzfahrzeuge getroffen. Die DIW-Verbrauchsrechnung weist ferner

nicht alle Nutzfahrzeugkategorien aus und enthält nur Verbrauchswerte für Otto- und Dieselfahrzeuge, nicht aber für alternative Antriebe. Für N1-Fahrzeuge ebenso wie für alternative Antriebe mussten daher weitere Quellen herangezogen werden. Dazu gehörten speziell für die leichten Nutzfahrzeuge (ika 2014) sowie darüber hinaus (Ökoinstitut et al. 2015). Da für einige Fahrzeug- oder Antriebsarten keine referenzierbaren Verbrauchskennwerte ermittelt

werden konnten, mussten zusätzlich noch eigene Annahmen getroffen werden, wobei sich diese meist auf alternative Antriebe mit geringen Anteilen am Fahrzeugbestand bezogen; in der Gesamtrechnung spielen diese Werte aufgrund der geringen Fahrzeugzahlen jedoch nur eine geringe Rolle. Tabelle 61 weist die Verbrauchsannahmen für die wichtigsten Fahrzeugkategorien und Antriebe für das Jahr 2013 aus.

61 SPEZIFISCHER KRAFTSTOFFVERBRAUCH NACH FAHRZEUGKATEGORIE UND ANTRIEB

Fahrzeugklasse	Kraftstoffart/Energie	Durchschnittlicher Verbrauch	Quellen
N1 Nutzlast bis max. 999 kg 	Diesel	6,8 Liter/100 km	DIW 2015a
	Benzin	7,8 Liter/100 km	DIW 2015a
	Elektrische Energie	21 kWh/100 km	Ökoinstitut et al. 2015
N1 Nutzlast 1.000 bis 1.999 kg 	Diesel	9,8 Liter/100 km	Ökoinstitut et al. 2015
	Elektrische Energie	25 kWh/100 km	Ökoinstitut et al. 2015
N2 3,5 bis 12 t zul. GG 	Diesel	18,6 Liter/100 km	DIW 2015a
	Erdgas* (CNG)	19,3 kg/100 km	Ökoinstitut et al. 2015
N3 Lkw >12 t und Szm 	Diesel	34,5 Liter /100 km	DIW 2015a
	Erdgas* (LNG)	28 kg/100 km	Eigene Annahme
Standardbus im Nahverkehr 	Diesel	44,9 Liter/100 km	Ökoinstitut et al. 2015
	Erdgas* (CNG)	46,6 kg/100 km	Eigene Annahme
	Elektrische Energie	240 kWh/100 km	Ökoinstitut et al. 2015
Fernbus 	Diesel	29 Liter/100 km	DIW 2015a

*Für Erdgas (CNG/LNG) wurde bei den Verbrauchswerten H-Gasqualität angenommen

EFFIZIENZPFADE LKW/BUSSE

Die Potenziale zur Effizienzverbesserung der jeweiligen Fahrzeuge in den Nutzfahrzeugklassen wurden entsprechend der technischen Potenzialabschätzung im dritten Kapitel festgelegt. Während das Trendszenario die derzeitige Entwicklung mit moderaten Effizienzverbesserungen weitestgehend fortschreibt, werden im Alternativszenario deutlich höhere Effizienzverbesserungen erreicht.

Für jede Antriebstechnik – Diesel-, Benzin-, Gas- sowie Elektroantriebe – wurden eigene Effizienzpfade erarbeitet. Zur quantitativen Beschreibung der Effizienzpfade wurden zum einen die Effizienzpotenziale

in vier **Technologiepakete** gruppiert: 1. Verbesserungen im Antriebsstrang; 2. Elektrifizierung/Hybridisierung des Antriebs; 3. Fahrzeugtechnische Maßnahmen zur Minderung des Fahrwiderstandes sowie 4. Optimierte Fahrweise und Disposition. Antriebsspezifisch entwickeln sich hier insbesondere die Technikpakete 1, 2 und teilweise 3.

Zum anderen erfolgte eine Zuordnung der Nutzfahrzeuge zu hauptsächlichen **Einsatzfeldern** – entweder Einsatz im urbanen Verkehr oder im Fernverkehr – als wichtige Voraussetzung zur Bestimmung von tatsächlich realisierbaren Effizienzpotenzialen. Hierbei wurde den einzelnen

Nutzfahrzeugklassen nach dem Überwiegendprinzip ein Einsatzfeld und somit ein entsprechendes Effizienzpotenzial zugewiesen. Einige technisch bereits heute verfügbare Effizienzpotenziale werden erst später nutzbar, wenn sich die Mehrkosten für die Anschaffung der jeweiligen Technik reduziert haben bzw. sich diese für die Nutzer in nur wenigen Jahren amortisieren.

Die Effizienzpotenziale fließen schließlich über die Neuzulassungen in die Fahrzeugflotten ein und senken so den durchschnittlichen spezifischen Kraftstoffverbrauch des Fahrzeugbestandes. Aufgrund der Verweildauer von Fahrzeugen und damit Fahrzeugtechnologien in den jeweiligen

62 EFFIZIENZPFADE FÜR NUTZFAHRZEUGE MIT DIESELANTRIEB

Technik-Pakete Dieselantrieb	Leichte Nutzfahrzeuge und Lkw, Stadtbusse Hauptsächlich Einsatz in urbanen Räumen						Schwere Lkw >12 t, Sattelzugmaschinen (Szm), Fern- und Überlandbusse Hauptsächlich Einsatz außerhalb urbaner Räume					
	Trend			Alternativ			Trend			Alternativ		
	2020	2030	2040	2020	2030	2040	2020	2030	2040	2020	2030	2040
Motor/Getriebe, Abwärmenutzung, Optimierung Nebenaggregate, in %	0	5,6	9,8	7,4	10,6	13,6	0	5,6	10,6	8,2	11,4	14,3
Hybridisierung des Antriebs (Voll-Hybrid), in %	5	10	15	10	12	20	0	0	0	1	2	3
Fahrwiderstände: Aerodynamik, Leichtbau, Leichtlaufreifen, in %	0	4	7	7	11	14	4	8	12	11	16	17
Fahrweise: Predictive Cruise Control, Platooning, automatisiertes Fahren, in %	0	0	0	0	0	0	1	2	4	1	5	7
Gesamt-Effizienzverbesserung in %	5	19	32	24	33	47	5	16	27	21	34	41

Fahrzeugklassen des Nutzfahrzeugbestandes schlagen sich die Effizienzpotenziale erst nach und nach in einer Senkung des durchschnittlichen Kraftstoffverbrauches in der Flotte nieder.

In Bezug auf die Kombination der Effizienzpotenziale ist anzumerken, dass die Einzelpotenziale der technischen Komponenten nicht ohne Weiteres kumuliert werden können, da ihr Zusammenwirken teilweise nicht möglich ist. Zum Beispiel hebt die Hybridisierung von Fahrzeugen aufgrund von zusätzlichen technischen Komponenten, die das Fahrzeuigeigengewicht erhöhen, die Effizienzpotenziale aus dem Fahrzeugleichtbau wieder auf.

Tabelle 62 zeigt die szenariospezifischen **Effizienzpfade** für Nutzfahrzeuge mit Dieselantrieb in Abhängigkeit von ihren primären Einsatzfeldern bis in das Jahr 2040. Die aufgeführten Kraftstoff- bzw. Energieeinsparungen beziehen sich auf heutige (2014) durchschnittliche Kraftstoff- und Energieverbräuche von Nutzfahrzeugen mit Dieselantrieb. Die angegebenen Einsparungen lassen sich 2020, 2030 und 2040 jeweils für Neufahrzeuge in Form reduzierter durchschnittlicher Kraftstoffverbräuche gegenüber 2014 realisieren.

So profitieren Diesel-Nutzfahrzeuge, die in urbanen Verkehren eingesetzt werden,

stark von Technologien zur Hybridisierung und Elektrifizierung. Im Trendszenario führt beispielsweise die Hybridisierung zu einer Reduktion des durchschnittlichen Energieverbrauches in Höhe von 15% bei Neufahrzeugen im Jahr 2040, die hauptsächlich in urbanen Räumen eingesetzt werden, im Vergleich zu Neufahrzeugen im Langstreckeneinsatz ziehen dagegen nur geringe Vorteile aus Hybridkomponenten, realisieren jedoch Verbesserungspotenziale des verbrennungsmotorischen Antriebsstrangs sowie aus fahrwiderstandsreduzierender Fahrzeugtechnik.

Insgesamt reduziert sich der durchschnittliche Energieverbrauch von neuen Diesel-Nutzfahrzeugen im urbanen Einsatz um 32% (Trend) bzw. 47% (Alternativ), im Fernverkehr um 27% (Trend) bzw. 41% (Alternativ) bis 2040 gegenüber 2014. Diese von den Neufahrzeugen realisierten Effizienzpotenziale werden in den Bestand schrittweise über den Szenariozeitraum integriert. Dadurch sinkt der reale Durchschnittsverbrauch der Bestandsfahrzeuge ebenfalls sukzessive, jedoch insgesamt nicht so stark wie bei den Neufahrzeugen.

Wie für den Dieselantrieb wurden für die anderen Antriebstechniken wie den Ottomotor, den Gasmotor und für elektrische

Antriebe analoge Annahmen zu den Effizienzpotenzialen getroffen; diese Effizienzpfade werden an dieser Stelle jedoch nicht extra dargestellt.

ENERGIE-/KRAFTSTOFFVERBRAUCH

Mit Hilfe der bis 2040 fortgeschriebenen durchschnittlichen bzw. spezifischen Kraftstoffverbräuche kann der Verbrauch aller Nutzfahrzeuge in Deutschland ermittelt werden; betrachtet wird ausschließlich der **Endenergieverbrauch**. Im Folgenden wird in Abgrenzung zum historischen Energieverbrauch der berechnete Endenergieverbrauch fortan als **Energiebedarf** bezeichnet; Energiebedarf deshalb, weil er genau diejenige (errechnete) Energiemenge bezeichnet, die im betrachteten Zukunftsjahr benötigt wird, um eine bestimmte Fahrzeugfahrleistung abbilden zu können.

Zur Berechnung des künftigen Energiebedarfs aller Nutzfahrzeuge werden die Fahrleistungen nach Nutzfahrzeugklassen und Antrieben mit den durchschnittlichen Verbrauchswerten verknüpft. Die Verbrauchswerte berücksichtigen dabei künftige Effizienzverbesserungen bei Fahrzeugantrieben und Fahrzeugtechnik. Bei den Fahrzeugen mit alternativen Antrieben basiert deren Fahrleistung grundsätzlich auf den gleichen durchschnittlichen Fahrleistungen wie bei den Diesel- und Benzin-Fahrzeugen. Dies

bedeutet speziell in Bezug auf Fahrzeuge mit rein elektrischen Antrieben, dass diese ähnlich genutzt werden wie Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren. Für Plug-in-Hybride wird (szenarioinvariant) davon ausgegangen, dass die Fahrzeuge in den Klassen

N1 und N2 zu 70% rein elektrisch angetrieben fahren; bei den wenigen Fahrzeugen in der Klasse N3 beträgt der elektrische Fahranteil nur 40% der Gesamtfahrleistung, was durch entsprechend leistungsfähige Batterien und regelmäßi-

ges Nachladen erreicht werden kann. Bei Plug-in-Hybrid-Bussen wird eine elektrische Fahrleistung von 60% angenommen. Hier kann durch die Nutzung der Busse im Linienverkehr mit Standzeiten an den Endhaltestellen regelmäßig nachgeladen werden.

ENERGIEBEDARF TRENDSZENARIO

Im Trendszenario ergibt sich bis zum Jahr 2030 ein insgesamt weiter leicht ansteigender Energiebedarf über alle Nutzfahrzeuge (Lkw und Busse), und zwar erhöht sich dieser von 783 Petajoule 2014 auf 853 Petajoule im Jahr 2030. Erst nach 2030 beginnen die im Trendszenario realisierten Effizienzverbesserungen sowie alternative Antriebe und Kraftstoffe sich derart auszuwirken, dass der Endenergiebedarf 2040 erreicht dann mit 786 Petajoule in etwa das heutige Niveau – und das trotz deutlich wachsender Fahrleistungen.

Da im Trendszenario der Dieselantrieb Hauptantriebsquelle ist und sich alternative Antriebe nur zu geringen Teilen in fahrleistungsschwachen Fahrzeugsegmenten etablieren können, ist Dieselmotoren im Jahr 2040 weiterhin der dominante Energielieferant über alle Nutzfahrzeuge. Dabei geht der Anteil der Dieselmotoren an der gesamten Kraftstoffversorgung von heute (2014) 99,7% nur leicht auf 99,1% im Jahr 2040 zurück; dies entspricht – ähnlich wie heute – einem Energiebedarf von rund 780 Petajoule oder knapp 22 Mrd. Litern Dieselmotoren.

Im Hinblick auf die einzelnen Nutzfahrzeugklassen ergibt sich folgende Vertei-

lung: Die Fahrzeugklasse N3 ist die einzige Fahrzeugklasse, deren Energiebedarf in den kommenden 25 Jahren – fahrleistungsbedingt – steigt. Ihr Anteil am Energiebedarf steigt von 79% heute auf circa 83% des Energiebedarfes aller Nutzfahrzeugklassen im Jahr 2040. Die zahlreichen N1-Fahrzeuge kommen aufgrund ihres niedrigeren spezifischen Verbrauchs und ihrer geringeren Fahrleistungen auf einen Verbrauchsanteil von nur gut 6%, ebenso wie die N2-Lkw mit ebenfalls rund 6%. Die Busse erreichen wegen hoher durchschnittlicher Fahrleistungen trotz des kleinen Fahrzeugbestandes immerhin einen Anteil von knapp 5% am Energiebedarf aller Nutzfahrzeuge 2040.

Zuletzt wird der für die Selektive Katalytische Reduktion (SCR, siehe Kapitel 3) notwendige Betriebsstoff AdBlue® pauschal ermittelt. Zum spezifischen AdBlue®-Verbrauch finden sich in Abhängigkeit von der Fahrzeugkategorie sowie Motor- und Abgasreinigungstechnik unterschiedliche Angaben, sowohl bezogen auf die Fahrleistung als auch bezogen auf den Dieselmotorenkonsum. Für eine grobe Abschätzung des AdBlue®-Konsums wurde angenommen, dass durchschnittlich 5% des Dieselmotorenkraftstoffverbrauchs an AdBlue® benötigt wird. Zu berücksichtigen ist ferner, dass in den

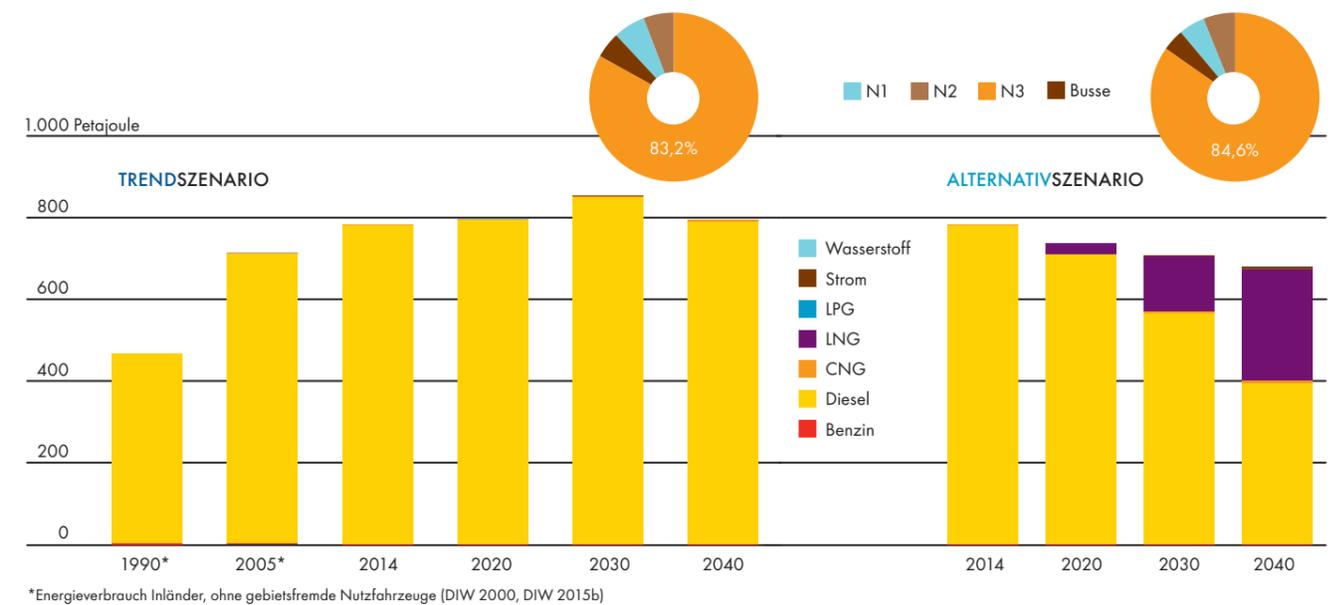
einzelnen Fahrzeugklassen unterschiedliche Abgasstandards vorherrschend sind. So werden im maupflichtigen Straßengüterfernverkehr bereits überwiegend N3-Fahrzeuge mit SCR-Technik eingesetzt – rund drei Viertel der N3-Fahrzeuge weisen schon jetzt Euro V oder besser aus. Leichte Nutzfahrzeuge (N1) und kleine Lkw bis 7,5 Tonnen (unterste N2-Kategorie) fahren nach wie vor oft noch ohne SCR-Technik.

Entscheidend für die Größenordnung des AdBlue®-Verbrauchs ist jedoch vor allem die Kategorie der N3-Fahrzeuge. Für die Abschätzung des AdBlue®-Bedarfs wurde angenommen, dass sich der AdBlue®-Bedarf kurz- bis mittelfristig entsprechend der Flottendurchdringung mit Euro V oder besser entwickelt. Für die Jahre 2030 und 2040 wurde davon ausgegangen, dass sich SCR-Technik nahezu vollständig über den gesamten Nutzfahrzeugbestand mit Dieselmotoren ausbreitet.

Insgesamt ergibt sich im Trendszenario unter diesen Annahmen ein AdBlue®-Bedarf von rund 600 bis 700 Mio. Litern 2014. Der AdBlue®-Bedarf steigt bis zum Jahr 2030 analog zum Dieselmotorenkraftstoffbedarf auf 1,2 Mrd. Liter an, um danach geringfügig wieder auf 1,1 Mrd. Liter im Jahr 2040 zurückzugehen.

halbiert sich der Dieselmotorenkraftstoffbedarf gegenüber 2014 nahezu; er beläuft sich im Jahr 2040 dann auf nur noch 394 PJ oder 11 Mrd. Liter, was einem Anteil von 58% entspricht. Circa 7 Mrd. Liter Dieselmotorenkraftstoff werden durch Erdgaskraftstoffe substituiert; ohne LNG läge der Dieselmotorenkraftstoffverbrauch im Jahr 2040 bei etwa 18 Mrd. Litern.

63 ABSOLUTER ENERGIEBEDARF UND ANTEILE DER FAHRZEUGKLASSEN AM ENERGIEBEDARF



CNG und vor allem LNG decken 2040 41% oder rund 280 Petajoule des gesamten Kraftstoffbedarfes; das entspricht wiederum 140 Mio. kg CNG bzw. 5.555 Mio. kg LNG. Damit kann im Alternativszenario die Energiebasis des Lkw- und Busverkehrs deutlich diversifiziert werden. Allerdings kommt es hierdurch nicht zu einer Senkung des Energiebedarfes; denn Erdgasantriebe sind nicht grundsätzlich effizienter als Dieselmotoren, vielmehr erreichen sie im günstigsten Fall die Effizienz von Dieselmotoren.

Strom und Wasserstoff für Elektronutzfahrzeuge legen ebenfalls deutlich zu; beide Energieträger zusammen decken 2040 mit 8 Petajoule jedoch nur etwa 1,2% des Gesamtenergiebedarfes aller Nutzfahrzeuge. Ursache für den geringen Anteil von Strom und Wasserstoff sind im Besonderen die geringen Fahrleistungen in den bevorzugten Anwendungskategorien von Elektrofahrzeugen (N1, N2 und Stadtbusse) kombiniert mit teilweise deutlich niedrigen durchschnittlichen Fahrzeugverbräuchen – jeweils im Vergleich zur N3-Kategorie.

In Bezug auf die Nutzfahrzeugsegmente ergibt sich folgende Entwicklung und Verteilung des Energiebedarfes: Im Alternativszenario geht der Energiebedarf in allen Fahrzeugklassen zurück, auch bei

den N3-Fahrzeugen – hier allerdings nur leicht. Gleichzeitig findet die Substitution von Dieselmotoren durch Erdgas (primär LNG) in erster Linie im N3-Segment statt. Der Dieselmotorenkraftstoffbedarf der verbrauchsstarken schweren Lkw und Sattelzugmaschinen (N3) sinkt von 617 auf 300 PJ bzw. von 17,3 auf 8,4 Mrd. Liter. Der Erdgasverbrauch der N3-Fahrzeuge steigt dagegen auf 276 PJ bzw. 74 Mio. kg CNG und 5.548 Mio. kg LNG. Der Anteil der N3-Fahrzeuge am gesamten Nutzfahrzeugenergiebedarf steigt gegenüber heute 79% bzw. gegenüber dem Trend mit gut 83% 2040 auf sogar 85%; dies entspricht einem Kraftstoffverbrauch von 576,5 PJ.

In den übrigen Fahrzeugklassen sinkt der Energiebedarf zum Teil sehr deutlich. So geht der Energiebedarf von N1-Fahrzeugen und Bussen bis 2040 um mehr als zwei Fünftel sowie bei den N2-Lkw um rund ein Viertel zurück. Die Anteile von leichten Nutzfahrzeugen (N1) und Bussen gehen folglich noch etwas stärker zurück als im Trendszenario. N1-Fahrzeuge kommen 2040 auf nur noch gut 4%, Busse auf gut 5% des Energiebedarfes. N2-Fahrzeuge erreichen 2040 noch knapp 6%. Ursache für den sinkenden Anteil der übrigen Antriebe am Energiebedarf aller Nutzfahrzeuge ist zum einen die vergleichsweise moderate Zunahme der Fahrzeugfahrleistungen, zum

anderen der Einsatz effizienterer Elektroantriebe. So bestreiten Busse 2040 bereits 20% aller Fahrleistungen elektrisch.

Für die Abschätzung des AdBlue®-Bedarfs ergeben sich im Alternativszenario zusätzliche Schwierigkeiten aus der Verbreitung von Erdgasfahrzeugen. Momentan kann nicht eingeschätzt werden, welche der alternativen Gasantriebe – otto- oder dieselmotorische – sich wie stark am Markt durchsetzen werden. Ottomotorische Gasantriebe nutzen den Dreibegekat und benötigen daher kein AdBlue®. Dagegen erfordern die effizienteren dieselmotorischen Gasantriebe voraussichtlich eine Abgasnachbehandlung mit SCR-Technik und AdBlue®; zur Relation des AdBlue®-Bedarfs zum eingesetzten Diesel-Erdgas-Gemisch liegen bislang keine Informationen vor. Je nachdem, welche Gasantriebe sich durchsetzen und wie hoch der spezifische AdBlue®-Konsum angesetzt werden muss, kann der Bedarf variieren.

Wird nur der Dieselmotorenbedarf berücksichtigt, ergibt sich als konservative Schätzung ein Bedarf von 700 - 800 Mio. Litern AdBlue® im Zeitraum 2020 bzw. 2030 sowie 500 - 600 Mio. Litern 2040 – etwa die Hälfte des Bedarfs im Trendszenario. Sollten alle Gasnutzfahrzeuge ähnlich wie Dieselmotoren AdBlue® benötigen, fiel der Bedarf um bis zu 400 Mio. Liter höher aus.

Als **Zwischenfazit** lässt sich festhalten: Die Abschätzung des künftigen Energiebedarfes von Nutzfahrzeugen hat gezeigt, dass dieser weiterhin hoch sein wird. Ursache hierfür ist in erster Linie die Zunahme der Fahrleistungen, und zwar insbesondere bei den N3-Fahrzeugen im Straßengüterfernverkehr. Gleichwohl können durch Effizienzmaßnahmen und alternative Antriebe sowie Kraftstoffe substantielle Energieeinsparungspotenziale realisiert werden – um rund ein Viertel im Trendszenario gegenüber der Entwicklung bei unveränderten Technologien, unverändert gegenüber dem Status quo des Energieverbrauchs 2014.

Für weitergehende Reduktionen des Endenergiebedarfes zeigt sich im Alternativszenario jedoch ein **Dilemma**: Fahrzeugsegmente, in denen neue energiesparende Antriebstechniken eingeführt werden können, absolvieren vergleichsweise geringe Fahrleistungen. Im Güterfernverkehr mit hohen und deutlich wachsenden Fahrzeugfahrleistungen haben es alternative Antriebe dagegen schwer. In Folge der auf leichtere Nutzfahrzeuge im urbanen Einsatz fokussierten Effizienz- und Technologiemaßnahmen nimmt die ohnehin schon starke Dominanz des N3-Segmentes in der Nutzfahrzeugenergiebilanz noch weiter zu.

Vergleicht man schließlich den Energiebedarf der Nutzfahrzeuge mit dem Energiebedarf der Pkw in den Shell Pkw-Szenarien (Shell 2014), zeigt sich, dass die Bedeutung der Nutzfahrzeuge in der Energiebilanz des Straßenverkehrs zunimmt. Heute verbrauchen die 45,1 Mio. Pkw in Deutschland (2016) noch etwa doppelt so viel Energie wie die Nutzfahrzeuge. Da der Endenergiebedarf der Pkw bis 2040 deutlich sinkt, nähert sich der Energiebedarf von Lkw und Bussen bis 2040 dem der Pkw insgesamt an.

der letzten Ausgabe der Well-to-Wheel-Studie der europäischen Forschungsplattform Joint Research Center of the European Commission, Eucar and Concawe (JEC 2014a). Die Basisdaten der JEC-Studie wurden von der Europäischen Kommission auch bei der Festlegung der typischen sowie der Standardwerte für die Minderung von Treibhausgasemissionen für Biokraftstoffe in der EU-Erneuerbare-Energien-Richtlinie 28/2009/EG (EP/Rat 2009a) sowie der EU-Kraftstoffqualitäten-Richtlinie 30/2009/EG (EP/Rat 2009b) berücksichtigt (ICCT 2014a). Die Treibhausgasemissionsfaktoren für Fahrstrom basieren auf der aktuellen nationalen Energiereferenzprognose bis 2050 (EWI et al. 2014).

Verflüssigtes Erdgas (LNG): Es wird angenommen, dass der Bedarf für LNG im Schwerlastverkehr durch direkte Importe gedeckt wird und es ohne Regasifikation an die Fahrzeuge abgegeben wird. Die WtT-Werte der JEC-Studie wurden durch aktuellere Daten aus (DLR et al. 2014a) ersetzt, die jedoch nach derselben Methode berechnet wurden (es wurde angenommen, dass LNG-Importe aus dem mittleren Osten stammen). Unter der Annahme relativ homogener Gasimportqualitäten wurden auch hier unveränderte CO₂-Emissionen über die Zeit für die Verbrennung angenommen.

vollständig, das heißt entsprechend der kraftstoffspezifischen Eigenschaften, mitgeführt (JEC 2014a).

Strom: Elektroantriebe weisen in einer TtW-Betrachtung praktisch keine direkten CO₂-Emissionen auf. Das CO₂-Emissionsprofil dieser Antriebe wird ausschließlich durch die WtT-Emissionen der Stromerzeugung bestimmt. Je nach Art des eingesetzten Primärenergieträgers und der Konversionstechnologien zur Erzeugung von Strom variieren die CO₂-Emissionen bei der Stromerzeugung über einen weiten Bereich.

Bei Strom wird eine deutliche Änderung der Erzeugungsstruktur und folglich auch seines spezifischen Emissionsfaktors erwartet. In Anlehnung an die nationale Energiereferenzprognose (EWI et al. 2014) werden zwei unterschiedliche Entwicklungen der Emissionsfaktoren für den deutschen Strommix bis 2040 fortgeschrieben: Für das Trendszenario ein Emissionsfaktor auf Basis von Referenzprognose/Trendszenario, für das Alternativszenario ein deutlich niedrigerer Emissionsfaktor auf Basis des Zielszenarios der nationalen Energieprognose – mit hohen Anteilen kohlenstoffarmer bzw. erneuerbarer Technologien.

Wasserstoff in Brennstoffzellenfahrzeugen verursacht ebenso wie Fahrstrom keinerlei direkte Emissionen. Der Sekundärenergieträger Wasserstoff wird heute in erster Linie durch die Reformierung von Erdgas gewonnen; großes Potenzial wird künftig in der Elektrolyse auf Basis überschüssigen erneuerbaren Stroms gesehen.

Im Trendszenario wird bei einer geringen Anzahl von Neuzulassungen unterstellt, dass die Fahrzeuge im Wesentlichen mit Wasserstoff aus den vorhandenen Herstellungstechnologien – und das ist insbesondere die Erdgas-Reformierung (mit bis zu 50% Biogas) – gespeist werden. Im Alternativszenario, mit der Annahme eines breiteren Einsatzes von Brennstoffzellen-Fahrzeugen, wird eine deutlich steigende Erzeugung von Wasserstoff aus regenerativen Energiequellen mittels Elektrolyse (bis zu 80%) 2040 unterstellt. Dabei wird auch vorausgesetzt, dass der Transport von Wasserstoff durch Wasserstoff betriebene Fahrzeuge stattfinden wird.

4.7 TREIBHAUSGASEMISSIONEN

Schließlich sollen die Treibhausgasemissionen des Lkw- und Busverkehrs in Deutschland ermittelt werden. Ausgangspunkt für die Treibhausgasberechnung des Straßengüterverkehrs und des öffentlichen Straßenpersonenverkehrs mit Bussen ist ihre heutige Treibhausgasbilanz (vgl. Abbildung 64).

So betragen die direkten CO₂-Emissionen des Straßenverkehrs in Deutschland im Jahr 2014 133 Mio. Tonnen, was gut einem Fünftel der direkten verbrennungsbedingten CO₂-Emissionen in Deutschland entspricht (UBA 2015a). Dem Straßengüterverkehr und dem Bus sind davon knapp 44 Mio. Tonnen CO₂-Emissionen zuzurechnen, was 5,6% der gesamten verbrennungsbedingten CO₂-Emissionen ausmacht. Gleichzeitig entsprechen die Emissionen von Lkw und Bussen fast der Hälfte der Pkw-CO₂-Emissionen sowie gut einem Viertel der gesamten Verkehrsemissionen. Für die Berechnung der CO₂-Emissionen werden zunächst relevante Treibhausgasfaktoren für Kraftstoffe, die von Lkw und Bussen verwendet werden, zusammengestellt. Dabei werden die Treibhausgasemissionen der gesamten Kraftstoff- bzw. Energieversorgungsketten betrachtet. Im zweiten Schritt werden dann die absoluten Treibhausgasemissionen von Trend- und Alternativszenario ermittelt und diskutiert.

TREIBHAUSGASFAKTOREN

Im Hinblick auf die Treibhausgasemissionen ist zunächst zu unterscheiden zwischen Tank-to-Wheel-Emissionen (TtW), die durch die Verbrennung eines Kraftstoffs im Motor entstehen und den Well-to-Tank-Emissionen (WtT), die durch die Produktion und Bereitstellung des Kraftstoffes verursacht werden. Mit den Well-to-Wheel-Emissionen (WtW) wird die gesamte Nutzungskette des Kraftstoffes bewertet, von der Quelle bis zur Umwandlung in kinetische Energie.

Bei der Verbrennung von fossilen Energieträgern entsteht Kohlendioxid, das die Treibhausgasbilanz von Kraftfahrzeugen mit Verbrennungsmotor maßgeblich bestimmt. In den Vorketten aller Kraftstoffarten bzw. Energieträger können auch noch andere Treibhausgase anfallen. Die wichtigsten sonstigen Treibhausgase (Methan und Lachgas) werden in den Treibhausgas-Gesamtbilanzen mit berücksichtigt. Wenn dort von CO₂ gesprochen wird, werden auch die übrigen Treibhausgase in CO₂-Äquivalenten mitgeführt. Im Folgenden werden die Begriffe Treibhausgasemissionen und CO₂-Emissionen weitgehend synonym benutzt.

Die Zusammenstellung der spezifischen Treibhausgasemissionsfaktoren erfolgte auf Basis der Kraftstoff-Erzeugungspfade und kraftstoffspezifischen Verbrennungsfaktoren

Die CO₂-Emissionsfaktoren für die einzelnen Kraftstoffarten wurden wie folgt ermittelt:

Otto- und Dieselmotorkraftstoff: Die WtT-Emissionsfaktoren der JEC-Studie (JEC 2014a) für Otto- und Dieselmotorkraftstoffe wurden gemäß einer Neuberechnung der Treibhausgasintensität der Rohölimporte in die EU (ICCT 2014b) angepasst und entsprechen damit den Werten in der EU-Richtlinie zu den Berechnungsverfahren zur EU-Kraftstoffqualitäten-Richtlinie (Rat 2015); darüber hinaus werden die WtT-Emissionsfaktoren für Otto- und Dieselmotorkraftstoff über den Zeithorizont bis 2040 als konstant angenommen. Da Otto- und Dieselmotorkraftstoffe in ihren Spezifikationen normiert sind, werden unveränderte CO₂-Emissionsfaktoren für die Verbrennung angenommen.

Komprimiertes Erdgas (CNG): Da das Erdgas für die Nutzung (auf Erdgasnetzqualität) aufbereitet wird, werden für eine homogene Gasqualität auch hier zeitinvariante CO₂-Emissionsfaktoren für die Verbrennung angenommen. Bei der Erzeugung und Bereitstellung (WtT) von gasförmigen fossilen Brennstoffen kann es jedoch zu großen Unterschieden kommen, je nachdem aus welcher Region und über welche Transportwege Gaskraftstoffe in den Markt geliefert werden. Folglich gibt es für jeden Lieferweg/-Pfad unterschiedliche WtT-Emissionsfaktoren. Für den deutschen Markt wurde ein nach Lieferpfad und Liefermengen gewichteter WtT-Emissionsfaktor für CNG ermittelt.

Biogene Kraftstoffe (flüssig & gasförmig)

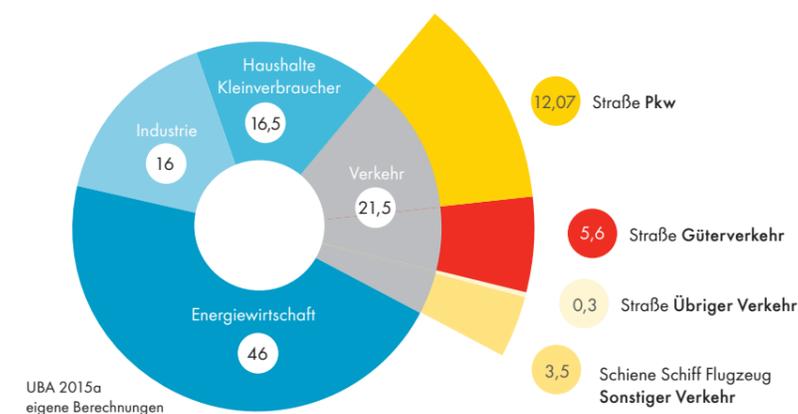
können aus verschiedenen Pflanzen und Stoffen gewonnen und mit unterschiedlichen Methoden hergestellt werden; entsprechend stark können die WtT-Emissionen variieren. Für die Herstellung von Biokraftstoffen wurden Kombinationen aus Pflanzenarten und Verarbeitungsprozessen ausgewählt, mit denen die von EU-Erneuerbare-Energien-Richtlinie 28/2009/EG (EP/Rat 2009a) und die EU-Kraftstoffqualitäten-Richtlinie 30/2009/EG (EP/Rat 2009b) geforderten CO₂-Mindesteinparungen ebenso wie die obligatorische CO₂-Reduktionsquote über alle Kraftstoffe erfüllt werden können.

Dabei steigen sowohl die Biokraftstoff-Mindestanforderungen als auch die CO₂-Reduktionsquote über alle Kraftstoffe bis 2040 weiter an, und zwar deutlicher im Trendszenario als im Alternativszenario. Im Trendszenario steigt der Biokraftstoffanteil an den flüssigen Kraftstoffen auf 20%, im Alternativszenario nur noch geringfügig auf 10%. Unabhängig von der Bioquote wurde für CNG und LNG ein Biogasanteil von bis zu 20% in Trend- und Alternativszenario angenommen.

Anders als bei fossilen Kraftstoffen entzieht Biomasse in der Wachstumsphase durch Photosynthese die Menge CO₂ aus der Atmosphäre, die später bei der Verbrennung wieder frei wird. Diese CO₂-Menge wird WtT als negative CO₂-Emission berücksichtigt (ähnlich ifeu 2012). Die bei der Verbrennung von Biokraftstoffen entstehenden CO₂-Emissionen werden TtW

64 CO₂-EMISSIONEN IN DEUTSCHLAND

Treibhausgasbilanz 2014, in Prozent



65 CO₂-EMISSIONEN NACH KRAFTSTOFFNUTZUNGSPFADEN

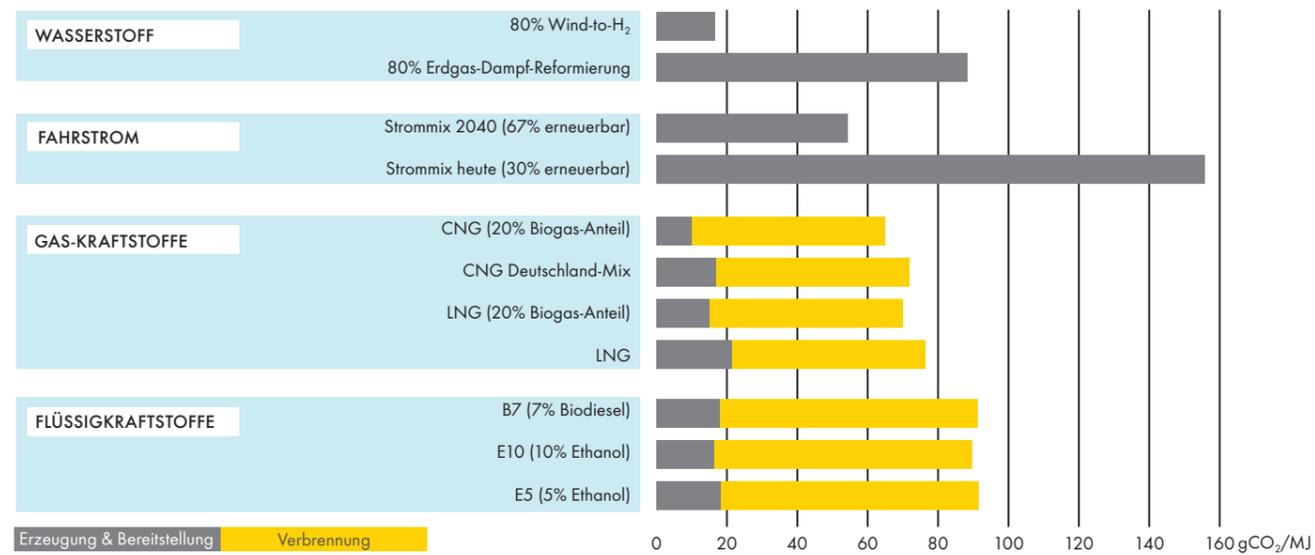


Abbildung 65 stellt CO₂-Emissionsfaktoren für ausgewählte Kraftstoffe über ihre energetische Nutzungskette dar. Es wird unterschieden zwischen den CO₂-Emissionen, die während der Herstellung und Bereitstellung der Kraftstoffe frei werden (WiT), und den CO₂-Emissionen, die bei der Verbrennung der Menge eines Kraftstoffes mit dem Energieinhalt eines Megajoules (MJ) entstehen. Die Treibhausgasemissionen über die gesamte Nutzungskette lassen sich an der Gesamtlänge des Balkens ablesen.

Bei der Nutzung von handelsüblichen Otto- und Dieselmotoren (hier mit Bioanteilen: B7 bzw. E5 und E10) entstehen etwa vier Fünftel der CO₂-Emissionen bei der Verbrennung und nur ein Fünftel während der Kraftstoffproduktion und Bereitstellung.

Gasförmige Kraftstoffe weisen über die energetische Nutzungskette im Vergleich zu Otto- und Diesel geringere CO₂-Emissionen pro Energieeinheit auf. Ansonsten ist bei Gaskraftstoffen die Verteilung zwischen Vorkette und direkten CO₂-Emissionen durchaus ähnlich. Allerdings ist hier der Einfluss des größeren negativen CO₂-Emissionsfaktors des höheren Biogasanteils (20%) stärker.

Fahrstrom weist heute im Durchschnitt den höchsten energieträgerspezifischen CO₂-Emissionsfaktor auf. Eine wesentliche Reduktion wird im Alternativszenario erreicht, welches eine weitgehende Realisierung der erneuerbaren Energiemenge im Stromsektor bis 2040 unterstellt. Und auch für die heutige Wasserstoffherstellung aus Erdgas liegen die Treibhausgas-Nutzungs-

ketten-Emissionen in der Größenordnung der fossilen Kraftstoffe, wenn auch unter dem heutigen Strommix. Wasserstoff bietet – ebenso wie Strom – großes CO₂-Einsparpotential, wenn er überwiegend aus regenerativen Quellen (wie Windstrom) erzeugt wird.

TREIBHAUSGAS-BILANZ LKW UND BUSSE

Wird der Kraftstoffbedarf der Nutzfahrzeuge nun mit den jeweiligen CO₂-Faktoren für die Berechnung der Treibhausgasemissionen verknüpft, ergeben sich die zu erwartenden WiW Treibhausgasemissionen, die den Nutzfahrzeugen zuzuordnen sind. Wie entwickelt sich die Treibhausgas-Bilanz von Lkw und Bussen bis 2040?

Wirkung von Effizienzmaßnahmen in der Antriebs- bzw. Fahrzeugtechnik zurück.

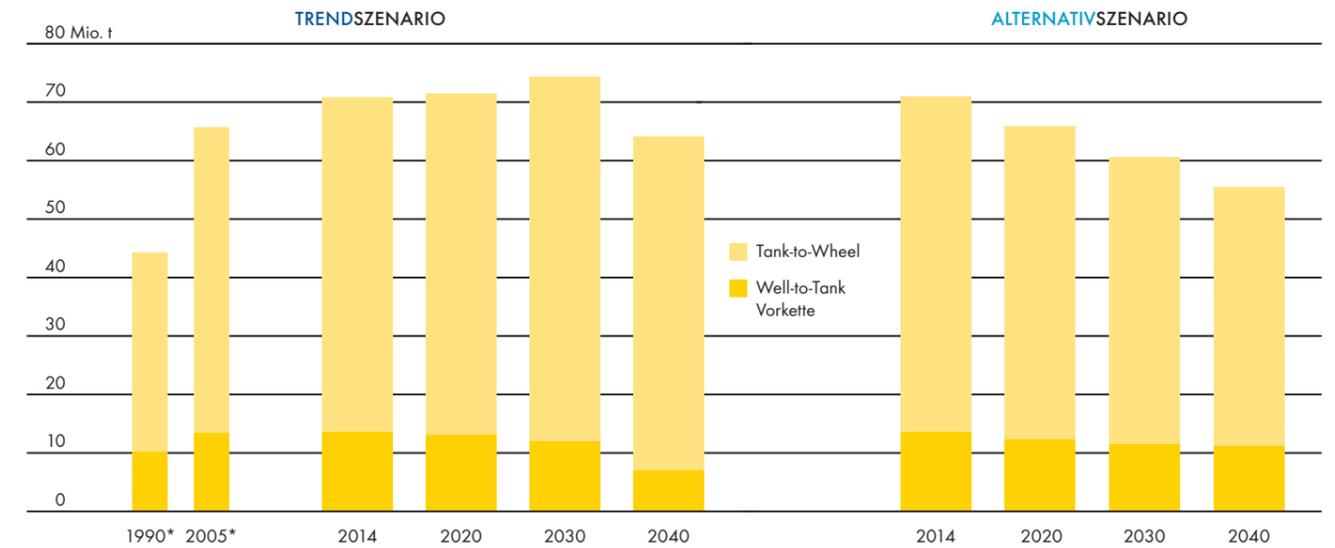
Zusätzlich zu den TiW-Emissionen gehen aber auch die Wit-Emissionen im Zeitverlauf zurück, und zwar um nahezu die Hälfte zwischen 2014 und 2040. Grund hierfür ist, dass sich der Biokraftstoffanteil in den kommenden Jahren bis 2040 auf 20% erhöht. Daraus ergeben sich höhere negative CO₂-Emissionen, die sich in CO₂-Gutschriften für die Vorkette ausdrücken. Entsprechend deutlich sinken die Wit-Emissionen von über 13 Mio. Tonnen auf nur noch 7 Mio. Tonnen gegen Ende des Betrachtungszeitraumes. Strom und Wasserstoff wirken sich aufgrund ihrer geringen Bedarfsmengen bis 2040 noch nicht erkennbar (erhöhend) auf die Wit-Treibhausgasbilanz der Nutzfahrzeuge aus.

TREIBHAUSGAS-BILANZ TRENDSZENARIO

Im Trendszenario steigen die gesamten Well-to-Wheel-CO₂-Emissionen von heute (2014) knapp 71 Mio. Tonnen bis 2030 leicht an und sinken bis 2040 merklich auf gut 64 Mio. Tonnen. Dies entspricht einer Minderung der WiW-Emissionen um knapp 10%.

Die direkten oder Verbrennungsemissionen verlaufen weitgehend parallel zur Entwicklung des Energiebedarfes. Beide erreichen ihr Maximum im Jahr 2030. Die TiW-Emissionen 2040 sind mit gut 57 Mio. Tonnen etwa genauso hoch wie heute. Ursache für die parallele Entwicklung von Kraftstoffverbrauch und TiW-Emissionen ist, dass sich der Energie- bzw. Kraftstoffmix für Nutzfahrzeuge bis 2040 nur unwesentlich ändert; dieser besteht nämlich weiterhin zu über 99% aus Dieselmotoren. Die erreichten TiW-Emissionsreduktionen trotz steigender Fahrzeugfahrleistungen gehen auf die

66 WELL-TO-TANK- UND TANK-TO-WHEEL-EMISSIONEN



*Auf Basis Energieverbrauch Inländer, ohne gebietsfremde Nutzfahrzeuge (DIW 2000; DIW 2015b)

TREIBHAUSGAS-BILANZ ALTERNATIVSZENARIO

Im Alternativszenario sinken die Well-to-Wheel-CO₂-Emissionen über den gesamten Betrachtungszeitraum von heute (2014) knapp 71 Mio. Tonnen auf 55,4 Mio. Tonnen bis zum Jahr 2040. Dies ergibt eine Senkung der WiW-Emissionen von über 20%. Die direkten oder Verbrennungsemissionen gehen von über 57 Mio. Tonnen auf gut 44 Mio. Tonnen oder um 23% zurück, die Vorkettenemissionen sinken dagegen um nur knapp 18% bzw. um gut 2 Mio. Tonnen auf dann gut 11 Mio. Tonnen.

Ursache für die sinkenden TiW-CO₂-Emissionen ist zunächst der rückläufige Energiebedarf. Allerdings sinken die CO₂-Emissionen mit 22% stärker als der Energiebedarf mit nur 13%. Dies ist einerseits auf die Einführung von Gaskraftstoffen zurückzuführen, die bei der

Als **Fazit** zu den CO₂-Emissionen lässt sich festhalten: Die CO₂-Emissionen von Lkw und Bussen lassen sich mittelfristig nur begrenzt reduzieren. Aufgrund weiter steigender Fahrleistungen geht der Energiebedarf von 2014 bis 2040 auch im Alternativszenario nur um gut 13% zurück. Zudem können sich gerade in den leistungsstarken Fahrzeugsegmenten elektrifizierte Antriebe nur in eng begrenzten Anwendungsbereichen entwickeln. Eine grundsätzliche Alternative zur CO₂-Reduktion wäre die Dekarbonisierung von Kraftstoffen, was teilweise bereits durch Biokraftstoffe geschieht. Eine weitere langfristige Option könnten PtL- oder PtG-Kraftstoffe sein.

Ein Vergleich mit den CO₂-Emissionen der Pkw (Shell 2014) führt zu der Schlussfolgerung, dass sich die Anteile an den CO₂-Emissionen des Straßenverkehrs weiter in Richtung Nutzfahrzeuge verschieben. 2040 werden die CO₂-Emissionen von Lkw und Bussen etwa genauso hoch sein wie diejenigen der Pkw. Umso drängender ist der Bedarf, zusätzliche Potenziale zur CO₂-Emissionsenkung im Straßengüterverkehr und insbesondere im Straßengüterfernverkehr zu erschließen.

Verbrennung rund ein Viertel weniger direkte Treibhausgasemissionen als Diesel- und Ottokraftstoffe verursachen. Dieser kraftstoff-spezifische CO₂-Vorteil wird auch durch die größere Effizienz des Dieselantriebs nicht vollständig kompensiert. Zum anderen trägt die Nutzung von (lokal) emissionsfreien Kraftstoffen zur Reduktion der direkten Treibhausgasemissionen bei.

Der vergleichsweise schwache Rückgang der Vorkettenemissionen resultiert wiederum aus den etwas höheren Vorkettenemissionen von Gaskraftstoffen im Vergleich zu Diesel (B7) sowie zu geringen Teilen aus der Einführung der alternativen Kraftstoffe Strom und Wasserstoff, deren Emissionsprofile sich ausschließlich über die Vorkette definieren.

Für die Treibhausgasemissionen gibt es kein sektorales, sondern nur ein nationales Ziel: Danach sollen im Zeitraum von 1990 bis 2040 die (direkten) Treibhausgasemissionen um 70% sinken. Zwar liegt kein CO₂-Referenzwert für das Jahr 1990 vor. Aus der DIW-Verbrauchsrechnung lässt sich jedoch mit Hilfe von CO₂-Faktoren ein Orientierungswert für 1990 errechnen. Dabei ist allerdings zu beachten, dass die DIW-Verbrauchsrechnung eine Inländerrechnung ohne gebietsfremde Nutzfahrzeuge ist. Auch wenn der Anteil gebietsfremder Transportleistungen 1990 noch geringer war als heute, werden die errechneten CO₂-Emissionen doch eher niedriger ausgewiesen als bei der hier verfolgten Inlandsrechnung einschließlich der Fahrleistungen gebietsfremder Lkw.

Für 1990 ergeben sich dann gut 44 Mio. Tonnen und für das Jahr 2005 annähernd 66 Mio. Tonnen WiW-CO₂-Emissionen bzw. rund 34 Mio. Tonnen und über 52 Mio. Tonnen TiW-Emissionen. Tatsächlich werden die 1990er Emissionswerte im Trend- wie im Alternativszenario im Jahr 2040 noch deutlich überschritten, und zwar unabhängig von der Art der CO₂-Bilanzierung.



5 ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Shell Nutzfahrzeug-Studie 2016 ist die Nachfolgestudie der ersten Shell Lkw-Studie 2010 (Shell 2010). Sie wurde inhaltlich auf Nutzfahrzeuge erweitert und behandelt nun auch die Kraftomnibusse. Shell knüpft damit im Nutzfahrzeugsbereich an die seit 1958 veröffentlichten Shell Pkw-Szenarien an, die inzwischen in der 26. Auflage erschienen sind (Shell 2014). Die Shell Nutzfahrzeug-Studie 2016 wurde erneut in Zusammenarbeit mit dem Institut für Verkehrsforschung im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) erstellt.

Ziel der Shell Nutzfahrzeug-Studie 2016 ist es, die Zukunft des Straßengüterverkehrs sowie des öffentlichen Straßenpersonenverkehrs mit Bussen bis in das Jahr 2040 zu erforschen. Hierzu wurden zum einen aktuelle Trends in der Transportlogistik und der Fahrzeugstatistik untersucht sowie Potenzialabschätzungen relevanter Technologien vorgenommen. Zum anderen erfolgte mit Hilfe von Güterverkehrsmodellierung und Szenariotechnik sowie der Verknüpfung wichtiger verkehrs-, energie- und umweltpolitischer Parameter des Lkw- und Busverkehrs eine umfassende Betrachtung der Entwicklung in Deutschland.

TRANSPORTLOGISTIK UND VERKEHRSPROGNOSEN



Die logistische Leistungsfähigkeit wird heute als wichtige Voraussetzung für die wirtschaftliche Entwicklung und die Wettbewerbsfähigkeit eines Standortes betrachtet. Im aktuellen Logistics Performance Index der Weltbank nimmt Deutschland die Top-Platzierung ein (World Bank 2014). Der Umsatz der deutschen Logistikwirtschaft liegt heute bei über 200 Mrd. Euro pro Jahr und die Zahl der Beschäftigten bei etwa 2,7 Mio. (Kille/Schwemmer 2012, Destatis 2015c).

Kern von logistischen Dienstleistungen ist der physische Transport von Gütern. Die **Güterverkehrsleistung** ist in Deutschland seit Anfang der 1990er Jahre um mehr als 60% gestiegen. Nach einem beschleunigten Wachstum in den 1990er Jahren gab es durch die Finanz- und Wirtschaftskrise einen Rückgang und anschließend eine Erholungsphase. Zuletzt (2014) wurde eine Güterverkehrsleistung von über 635 Tonnenkilometern (ohne Rohrfernleitungen) erbracht; diese teilt sich unter den drei bodengebundenen Verkehrsträgern wie

folgt auf: Straße 73%, Schiene 18%, Binnenschiff 9% (DIW 2015b).

Für die Shell Nutzfahrzeug-Studie werden wichtige Parameter aus der Bundesverkehrsprognose 2030 übernommen und im Ergebnis prognostiziert, dass das Güterverkehrsaufkommen von heute (2014) 4,1 auf 4,8 Mrd. Tonnen im Jahr 2040 wächst; das Verkehrsaufkommen im Straßengüterverkehr legt im Zeitraum 2014 bis 2040 von 3,5 auf 3,9 Mrd. Tonnen zu. Die Güterverkehrsleistungen insgesamt nehmen um 50% zu und wachsen von 641 auf 962 Mrd. Tonnenkilometer an. Der Straßengüterverkehr wächst von 469 auf 672 Mrd. Tonnenkilometer oder um 43%. Der Anteil (Modal

Güterverkehrsleistung gesamt + 50%

Straßengüterverkehr + 43%

Split) des Lkw an der bodengebundenen Güterverkehrsleistung geht in der Folge leicht, und zwar von 73% (2014) auf 69% (2040), zurück. Wesentliche Ursache hierfür ist die Zunahme der Transportentfernungen und des grenzüberschreitenden Verkehrs, welche eher die Schiene als den Lkw begünstigen.

Der **öffentliche Straßenpersonenverkehr (ÖSPV)** erfolgt – neben dem schienen-

gebundenen ÖSPV – hauptsächlich, das heißt zu etwa 76%, mit **Kraftomnibussen** (Destatis 2016c). Der gesamte ÖSPV weist mit knapp 80 Mrd. Personenkilometern 2014 einen Anteil von etwa 7% an der inländischen Personenverkehrsleistung auf. Aufgrund der kürzeren Transportweiten lag der ÖSPV-Anteil am Personenverkehrsaufkommen zuletzt (2014) mit rund 9 Mrd. Fahrgästen sogar bei 13% (DIW 2015b).

Der Busverkehr lässt sich in vier Segmente aufteilen: Etwa die Hälfte der Beförderungsleistung bzw. rund 39 Mrd. Personenkilometer erfolgen im Liniennahverkehr mit Stadtbussen. Dabei umfasst der Liniennahverkehr auch Regionalbusse, die häufig im ländlichen Raum eingesetzt werden. Vom Liniennahverkehr abzugrenzen, ist der Gelegenheitsverkehr, der mit fast 20 Mrd. Personenkilometern knapp ein Drittel der Beförderungsleistung ausmacht, aber seit Jahren rückläufig ist. Ein stark wachsendes Bussegment ist der Fernbuslinienverkehr; sein Anteil am ÖSPV liegt jedoch noch deutlich unter 10%. Für die Projektion bis 2040 wird davon ausgegangen, dass leichte Rückgänge im Nahverkehr sowie im Gelegenheitsverkehr durch Wachstum im Fernbusmarkt kompensiert werden. Hieraus ergibt sich eine Personenverkehrsleistung durch Busse in Höhe von 64,7 Mrd. Personenkilometern.

FAHRZEUGSTATISTIK NUTZFAHRZEUGE



Alle Kraftfahrzeuge werden in der Europäischen Union einheitlich gemäß EU-Rahmenrichtlinie 46/2007/EG klassifiziert (EP/Rat 2007a). Die relevanten **Nutzfahrzeug-Kategorien** sind die Lkw einschließlich leichter Nutzfahrzeuge bis 3,5 Tonnen und Sattelzugmaschinen (Klasse N) sowie die Kraftomnibusse (Klasse M); daneben gibt es noch die Sonstigen Kraftfahrzeuge.

In Europa sind heute (2013) 35,6 Mio. Lkw registriert. Dabei weist Frankreich die mit Abstand größte Lkw-Flotte mit rund 6,5 Mio. Fahrzeugen auf; Deutschland liegt auf Rang 6 (EC 2015). Alle europäischen Nutzfahrzeugflotten werden von den leichten Nutzfahrzeugen bis 3,5 Tonnen dominiert. In Europa wurden zuletzt (2015) rund zwei Mio. Lkw neu zugelassen. Über alle Lkw-Klassen weisen Großbritannien und Frankreich die höchsten Neuzulassungszahlen auf. Mit einem Neuzulassungsanteil von mehr als 25% nimmt Deutschland bei den Lkw und Sattelzügen über 3,5 Tonnen eine bedeutende Rolle in der EU ein.

Leichte Nutzfahrzeuge und Sattelzugmaschinen treiben den Bestand

In Deutschland sind aktuell insgesamt 2.995.166 **Lkw und Sattelzugmaschinen** registriert (KBA 2016b). Die Lkw-Bestandsentwicklung wird geprägt von den leichten Nutzfahrzeugen, deren Bestand sich seit Anfang der 1990er Jahre auf annähernd 2,3 Mio. Einheiten verdreifacht hat und die etwa drei Viertel des Bestandes ausmachen. Es folgen die Sattelzugmaschinen, deren Bestand sich im selben Zeitraum auf circa 200.000 Fahrzeuge mehr als verdoppelt hat. Der gesamte Lkw-Bestand ist im Durchschnitt 7,7 Jahre alt, wobei Sattelzugmaschinen mit 4,4 Jahren das jüngste Fahrzeugsegment stellen (KBA 2015e).

Die **Lkw-Neuzulassungen** in Deutschland schwanken zwischen gut 200.000 und gut 300.000 Fahrzeugen pro Jahr. Und auch hier bestimmen die leichten Nutzfahrzeuge mit einem Anteil von drei Vierteln die Entwicklung. Sattelzugmaschinen weisen wiederum mit etwa 20% die höchste jährliche Austauschrate unter allen Lkw-Klassen auf (KBA 2015b, 2016c).

In Bezug auf die **Schadstoffklassen** (Euro-Normen) setzt sich saubere Fahrzeugtechnik immer weiter durch. Etwa jeder zweite Lkw wies im Jahr 2015 Euro IV bzw. 4 oder besser auf. Die höchsten Abgasstandards besitzen wiederum die schweren Lkw und Sattelzugmaschinen, aufgrund ihrer geringen Erneuerungsraten sind die Schadstoffklassen bei den leichten bis mittleren Nahverkehrs-Lkw die niedrigsten (KBA 2015c).

Anteil des Dieselantriebs bei schweren Lkw und Sattelzügen 99%

Je schwerer der Lkw, desto seltener sind alternative Antriebe

Bei den **Antrieben** ist Dieselmotoren mit einem Bestandsanteil von 95% über alle Lkw der Standardantrieb. Der wichtigste alternative Antrieb ist der Benziner mit einem Bestandsanteil von gut 4%. Grundsätzlich gilt: Je schwerer der Lkw, desto seltener der Einsatz eines alternativen Antriebs. Die alternativen Antriebe konzentrieren sich auf die Klasse der leichten Nutzfahrzeuge und hier vor allem auf Pkw-ähnliche Fahrzeuge. Aber auch bei den Kleintransportern bis 1 Tonne Nutzlast liegt der Bestandsanteil alternativer Antriebe heute (2015) bei nur 1,8%. Dagegen werden schwere Lkw und Sattelzüge zu über 99% von Dieselmotoren angetrieben (KBA 2015c).

In Europa fahren heute (2013) 822.900 **Kraftomnibusse**. Die größten Busflotten werden in Großbritannien, Polen und Italien mit rund 100.000 oder mehr Einheiten betrieben; Deutschland liegt auf Rang 5 (EC 2015). In Europa wurden zuletzt (2015) jährlich etwa 46.000 Busse neu

zugelassen, wobei Deutschland relativ viele Neuzulassungen aufweist (ACEA 2016).

In Deutschland liegt der Bestand seit Jahren nahezu konstant bei etwa 75.000 Fahrzeugen, zuletzt (2016) waren es 78.345 Busse. Das Durchschnittsalter der deutschen Busflotte liegt bei knapp neun Jahren; dabei steigt das Alter der Busse mit der Zahl der Sitzplätze (KBA 2015e). Die Zahl der Bus-Neuzulassungen bewegt sich ebenfalls seit Jahren in einem Korridor zwischen 5.500 und 6.000 Fahrzeugen pro Jahr (KBA 2015b, 2016c).

Im Hinblick auf die Abgasnormen schafft gut die Hälfte aller Busse Euro IV oder besser; damit sind die Bus-Abgasstandards zwar etwas besser als bei den Lkw insgesamt, aber deutlich schlechter als im Straßengüterfernverkehr. Eine besondere Rolle spielt bei Bussen der EEV-Standard (Environmentally-Enhanced Vehicle) mit einem Anteil von 23% im Busbestand (KBA 2015c).

Als Antrieb besitzen mehr als 97% aller Busse hierzulande einen Dieselantrieb. Der Anteil alternativer Antriebe lag im Jahr 2015 bei 2,8% und damit fast doppelt so hoch wie im deutschen Pkw-Bestand und noch deutlich höher als bei vergleichbar schweren Lkw. Wichtigste Antriebsalternative sind Erdgasbusse mit einem Bestandsanteil von gut 2% (KBA 2015c).

Neben Lkw und Bussen existieren in Deutschland heute (2015) noch 275.000 **Sonstige Kraftfahrzeuge**, deren Fahrzeugtechnik zwar oft baugleich oder bauähnlich ist, die aber dennoch nicht als Nutzfahrzeuge im Sinne der Fahrzeugsystematik klassifiziert werden. Mit fast 30% bilden die Feuerwehrfahrzeuge die größte bestimmte Gruppe der Aufbauarten der Sonstigen Kraftfahrzeuge (KBA 2015f).

Das Durchschnittsalter der Sonstigen Nutzfahrzeuge liegt bei 13,3 Jahren. Pro Jahr werden ca. 15.000 Neufahrzeuge zugelassen. Nur knapp ein Viertel aller Sonstigen Kraftfahrzeuge erreicht Euro IV oder besser. Mit 92,4% ist auch hier der Dieselantrieb Standard, vor Benzin mit 7%. Alternative Antriebe spielen mit 0,6% im Bestand praktisch keine Rolle (KBA 2015c).

ANTRIEBE, KRAFTSTOFFE, FAHRZEUGTECHNIK UND FAHRWEISE



Die wichtigsten Trends bei Antrieben, Kraftstoff- und Energieversorgung sowie Fahrzeugtechnik und Fahrweise werden im Rahmen einer mittelfristigen **Potenzialabschätzung** untersucht. Schwerpunkt der Untersuchung sind die drei Antriebs-Kraftstoff-Kombinationen Diesel, Gas und Elektro. Dabei werden die Antriebs-Kombinationen anhand einschlägiger Auswahlkriterien für Nutzfahrzeugtechnologien in Bezug auf typische Anwendungsbereiche, insbesondere urbane vs. überregionale Einsatzbereiche, bewertet und anhand von Netzdiagrammen visualisiert.

Im Nutzfahrzeugbereich ist der **Dieselantrieb** als am weitesten verbreitetes Konzept technisch und wirtschaftlich Referenz und Messlatte für alle anderen Antriebe. Weitere substantielle Effizienzpotenziale werden in folgenden Bereichen gesehen (Hoepke/Breuer 2012; ika 2014; Süßmann/Lienkamp 2015; UBA 2015b): Verbesserung der Wirkungsgrade von Motor und Getriebe, Abwärmenutzung, Elektrifizierung von Nebenaggregaten sowie (milde) Hybridisierung; letztere allerdings vor allem für Fahrzeuge im urbanen Einsatz.

Der Dieselantrieb ist der technische und wirtschaftliche Maßstab

Dieselmotoren sind ein Energiespeicher mit hoher Energiedichte, einfacher Handhabung und der höchsten Verfügbarkeit; er kann durch emissionsärmere biogene, paraffinische oder synthetische Kraftstoffe ergänzt oder ersetzt werden.

Zu einer relevanten Antriebs- und Kraftstoffalternative für Nutzfahrzeuge haben sich in letzter Zeit **Erdgasantriebe** entwickelt. Schon länger werden leichte Nutzfahrzeuge und Lkw in Kombination mit komprimiertem Erdgas (CNG) angeboten. Im Folge des globalen Erdgasbooms hat sich die Verwendung von verflüssigtem Erdgas (LNG) als weitere Option herauskristallisiert (DLR et al. 2014a).

Die wichtigste antriebstechnische Innovation sind Dual-Fuel-Antriebe für schwere Lkw. Sie arbeiten nach dem Dieselprinzip und sind daher ähnlich effizient wie Dieselantriebe. **Dual-Fuel-Antriebe** können überwiegend oder fast ganz mit Erdgas betrieben werden. Noch beschränkt sich das Angebot in Europa jedoch auf CNG-betriebene Ottomotorfahrzeuge (EC/DGM 2014b).

LNG ist ein emissionsarmer Kraftstoff, der Dieselmotoren bezüglich Energiedichte nahe kommt (EC/DGM 2014a). Bislang gibt es jedoch nur eine CNG-Tankstelleninfrastruktur in Deutschland; eine LNG-Infrastruktur muss noch aufgebaut werden. LNG und auch CNG können durch biogene oder strombasierte Gaskraftstoffe (Power-to-Gas) ersetzt oder ergänzt werden.

LNG als neue Option für schwere Nutzfahrzeuge

Ähnlich wie bei Pkw wird auch bei Nutzfahrzeugen an Konzepten gearbeitet, diese zu hybridisieren oder zu elektrifizieren. Von **Elektromobilität** kann gesprochen werden, wenn der alleinige oder Hauptantrieb elektrisch ist; darunter fallen im Besonderen **Plug-in-Hybride (PHEV)**, **batterieelektrische Fahrzeuge (BEV)** und mit Wasserstoff betriebene **Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV)**.

Die größten Potenziale für Elektromobilität werden bei Pkw-ähnlichen leichten Nutzfahrzeugen sowie Fahrzeugen mit urbanen Fahrprofilen – wie Kleintransportern, Nahverkehrs-Lkw oder Stadtbussen – gesehen. Bei schweren Nutzfahrzeugen mit hohen Fahrleistungen gibt es aktuell keine kommerziellen Ansätze, diese zu elektrifizieren.

Zentrales Element für Elektromobilität im Nutzfahrzeugbereich ist die Batterietechnik (ISI 2015; VDE 2015) sowie für Brennstoffzellenfahrzeuge die Brennstoffzelle. Kritisch für Nutzfahrzeuganwendungen ist die geringe Energiedichte von in Batterien gespeicherter Energie; teilweise könnte dies durch die Speicherung von Druckwasserstoff behoben werden. Voraussetzung für flächendeckende Elektromobilität wären ferner leistungsfähige Schnellademöglich-

keiten und eine Wasserstoff-Tankstelleninfrastruktur.

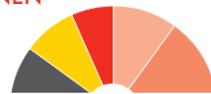
Einzig Elektrofahrzeuge (BEV, FCEV) ermöglichen lokal emissionsfreie Mobilität. Da sowohl Fahrstrom als auch Wasserstoff Sekundärenergieträger sind, kommt es hinsichtlich der Nachhaltigkeit auf die Art und Weise der Bereitstellung an.

Neben Antriebstechnik und Kraftstoffen lassen sich Energieverbrauch und Emissionen von Nutzfahrzeugen durch Verbesserungen der nicht antriebsstrangbezogenen **Fahrzeugtechnik** erreichen. Hauptansatzpunkt hier ist die Reduzierung des **Fahrwiderstands**, der sich im Wesentlichen aus Luft-, Roll-, Beschleunigungs- und Steigungswiderstand zusammensetzt.

Von Verbesserungen der **Aerodynamik** durch optimierte Fahrzeugformen profitiert speziell der Fernverkehr mit hohen Durchschnittsgeschwindigkeiten (FAT 2012). Der **Rollwiderstand** wird stark von der Reifentechnik (Leichtlaufreifen, optimaler Luftdruck) beeinflusst (Goodyear Dunlop 2012). Die Reduktion des Fahrzeuggewichts durch **Leichtbau** wirkt sich nicht nur auf die Nutzlast, sondern auch auf Roll-, Beschleunigungs- und Steigungswiderstand aus; dies kommt speziell urbanen Fahrprofilen zugute.

Zusätzliche Effizienzpotenziale lassen sich schließlich aus der optimierten **Fahrweise und Disposition** von Nutzfahrzeugen erzielen. Die Möglichkeiten reichen von der Fahrerassistenz durch vorausschauende Tempomaten (Predictive Cruise Control) bis zum Kolonnenfahren (Platooning) und automatisiertem Fahren, jeweils unterstützt durch moderne Informations- und Kommunikationstechnologien.

SZENARIEN FÜR LKW UND BUSSE: ANTRIEBE, KRAFTSTOFFE, CO₂-EMISSIONEN



Mit Hilfe von **Szenariotechnik** werden künftige Entwicklungen von Antriebstechniken, Kraftstoffen, Energiebedarf und Treibhausgasemissionen für Nutzfahrzeuge in Deutschland bis in das Jahr 2040 untersucht.

Zunächst werden zwei unterschiedliche Szenarien für Nutzfahrzeugantriebe und Kraftstoffe der Zukunft entwickelt: ein Trend- und ein Alternativszenario. Die wichtigsten Treiber dieser unterschiedlichen Entwicklungspfade sind die von Gesellschaft und Politik gesetzten Rahmenbedingungen, Kaufentscheidungen von Nutzern und Unternehmen, der antriebs- und fahrzeugtechnische Fortschritt sowie Entwicklungen bei Verfügbarkeit und bei Preisen in der Energie- und Kraftstoffversorgung.

Im **Trendszenario** werden die wichtigsten Entwicklungen der jüngeren Vergangenheit fortgeschrieben; hier bleiben der effiziente verbesserte Dieselantrieb und flüssige Kraftstoffe die mit Abstand wirtschaftlichste Option für fast alle Nutzfahrzeuge. Im **Alternativszenario** hingegen setzen sich neue Antriebs- und Fahrzeugtechnologien und Kraftstoffe, insbesondere elektrische sowie Gasantriebe und Gaskraftstoffe, beschleunigt im Markt durch.

Mit Hilfe von Trendextrapolationen und Flottenmodellierung werden die Entwicklungen des inländischen Nutzfahrzeugbestandes sowie der Neuzulassungen bis in das Jahr 2040 fortgeschrieben. Anschließend werden die Lkw- und Busflotten antriebstechnisch differenziert weiterentwickelt.

Über alle Nutzfahrzeugklassen legt die Zahl der jährlichen **Neuzulassungen** von heute rund 290.000 auf 344.000 bis 2040 zu. Am stärksten steigen die Neuzulassungen der leichten Nutzfahrzeuge von 220.000 auf 260.000 Einheiten pro Jahr. Im Trendszenario erreichen alternative Antriebe (PHEV, BEV) lediglich bei leichten Nutzfahrzeugen substantielle Marktanteile von gut einem Fünftel sowie bei Bussen rund 15%. Im Alternativszenario überwiegen alternative Antriebe – elektrisch (PHEV, BEV, FCEV) bei leichten Nutzfahrzeugen und Bussen sowie Gas (LNG) bei schweren Fernverkehrs-Lkw – die Dieselmotorenzulassungen in fast allen Fahrzeugklassen.

Der **Nutzfahrzeugbestand** in Deutschland wächst von 2014 bis 2040 um über 20% von 2,9 auf nahezu 3,5 Mio. Fahrzeuge. Vor allem die Zahl der leichten Nutzfahrzeuge wächst von 2,1 auf fast 2,8 Mio.

Einheiten. Im Lkw-Bestand des Trendszenarios bleiben alternative Antriebe eher die Ausnahme – mit nennenswerten Anteilen lediglich bei leichten Nutzfahrzeugen (17%) und Bussen (9%). Im Alternativszenario kommt es in praktisch allen Fahrzeugklassen zu einem deutlich veränderten Antriebsmix: rund ein Drittel der leichten Nutzfahrzeuge fahren hier elektrisch, 45% der schweren Lkw mit LNG sowie ein Drittel der Busse elektrisch (PHEV, BEV, FCEV).

Neue Antriebe setzen sich demnach im Fahrzeugbestand nur mit Zeitverzögerung durch. Aufgrund der hohen Umschlagsgeschwindigkeit modernisiert sich der Bestand von Fernverkehrs-Lkw und Fernbussen am schnellsten; wegen ihres hohen Durchschnittsalters verändert sich der Bestand an Nahverkehrs- und Verteiler-Lkw sowie zu großen Teilen der leichten Nutzfahrzeuge am langsamsten.

Lkw-Fahrleistungen +39%

Die **Fahrzeugfahrleistungen** steigen für Lkw um 39% oder von gut 83 Mrd. auf knapp 116 Mrd. Fahrzeugkilometer. Das höchste Fahrleistungswachstum weisen Fernverkehrs-Lkw auf, darunter immer mehr gebietsfremde Lkw sowie die immer zahlreicheren leichten Nutzfahrzeuge. Die Busfahrleistungen wachsen von heute 3,1 auf 3,5 Mrd. Fahrzeugkilometer 2040. Anders als bei den Pkw (Shell 2014) nehmen Lkw-Bestand und Lkw-Fahrleistungen in den kommenden Jahren weiter zu. Das Wachstum des Lkw-Verkehrs betrifft dabei zum großen Teil das Fernstraßennetz.

Der **Energiebedarf** aller Nutzfahrzeuge – berechnet anhand durchschnittlicher Kraftstoffverbräuche und der jeweiligen Fahrzeugfahrleistungen – steigt im Trendszenario von heute 783 Petajoule (PJ) auf 853 PJ 2030 und fällt 2040 auf 786 PJ zurück. Im Alternativszenario sinkt der Energiebedarf kontinuierlich bis 2040 um 13% oder auf 682 PJ, und zwar trotz gleichzeitig um 39% steigender Fahrleistungen.

Im Trendszenario bleibt Dieselmotoren mit einem Anteil von über 99% oder 22 Mrd.

litern der nahezu einzig relevante Energieträger; im Alternativszenario halbiert sich der Dieselmotorenbedarf fast, vor allem zu Gunsten von Gaskraftstoffen (LNG) sowie zu geringen Teilen Strom. Schwere Lkw verbrauchen mit Abstand die meiste Energie – ihr Anteil am Energiebedarf aller Nutzfahrzeuge legt von heute 79% auf 83% (Trend) und 85% (Alternativ) im Jahr 2040 zu.

Maßnahmen zur Reduktion des Energiebedarfs von Nutzfahrzeugen stehen vor einem Dilemma: Fahrzeugsegmente, in denen neue energiesparende Antriebstechniken eingeführt werden könnten, erreichen nur geringe Fahrleistungen pro Fahrzeug bei geringen Durchschnittsverbräuchen. Im Straßengüterfernverkehr mit hohen und zudem stark wachsenden Fahrzeugfahrleistungen erfüllen alternative Antriebe die Anwenderanforderungen auf absehbare Zeit (noch) nicht.

Lkw und Busse verursachen heute etwa 5,6% der **verbrennungsbedingten CO₂-Emissionen** in Deutschland; das ist etwa knapp die Hälfte der CO₂-Emissionen des motorisierten Individualverkehrs.

Im Trendszenario steigen die gesamten Well-to-Wheel-Emissionen von heute 71 Mio. Tonnen bis 2030 leicht an und sinken bis 2040 allmählich auf gut 64 Mio. Tonnen; diese Minderung von knapp 10% wird in erster Linie durch CO₂-ärmere Biokraftstoffe erreicht. Im Alternativszenario gehen die Well-to-Wheel-Emissionen auf 55,4 Mio. Tonnen CO₂ zurück. Ursache dieses Rückgangs von über 20% sind der rückläufige Energiebedarf, die Einführung von Gaskraftstoffen sowie zu geringen Teilen Elektromobilität.

Die sektorübergreifenden nationalen Energie- und Klimaziele sehen von 1990 bis 2040 eine Reduktion der direkten Treibhausgasemissionen um 70% vor. Tatsächlich werden die 1990er Nutzfahrzeug-CO₂-Emissionen im Trend- wie im Alternativszenario 2040 noch deutlich überschritten. Die CO₂-Emissionen von Lkw und Bussen werden 2040 etwa genauso hoch sein wie die Pkw-Emissionen (Shell 2014).

LITERATURVERZEICHNIS

ACEA 2016: European Automobile Manufacturers' Association (ACEA), Consolidated Registrations – By Country. 1997-2015. www.acea.be/statistics/tag/category/by-country-registrations, abgerufen am 28.4.2016.

Alfen et al. 2014: Alfen Consult GmbH, AVISO GmbH, Institut für Verkehrswissenschaft, Berechnung der Wegekosten für das Bundesfernstraßennetz sowie der externen Kosten nach Maßgabe der Richtlinie 1999/62/EG für die Jahre 2013 bis 2017, Weimar u.a.O. 2014.

Amitran 2014: Amitran, CO₂ Assessment Methodology for ICT in Transport, Delft u.a.O. 2014. www.amitran.eu

BAFA 2015: Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA), Amtliche Mineralölstatistik für die Bundesrepublik Deutschland. Monat: Dezember 2015, Eschborn 2015.

BAG 2008-2015: Bundesamt für Güterverkehr, Mautstatistik Jahrestabellen 2007-2014, Köln 2008-2015.

BAG 2010: Bundesamt für Güterverkehr (BAG), Internationale Marktanteile und Kapitalverflechtungen deutscher Güterkraftverkehrsunternehmen, Köln 2010.

BAG 2015a: Bundesamt für Güterverkehr (BAG), Marktbeobachtung Güterverkehr. Auswertung der Arbeitsbedingungen in Güterverkehr und Logistik 2015-1 – Fahrerberufe, Köln 2015.

BAG 2015b: Bundesamt für Güterverkehr (BAG), Marktbeobachtung Güterverkehr. Bericht Herbst 2015, Köln 2015.

BAG 2015c: Bundesamt für Güterverkehr (BAG) Mautstatistik Monatstabellen Zeitraum 2007-2015, Köln 2007-2015.

BAG 2016: Bundesamt für Güterverkehr (BAG), Marktbeobachtung Güterverkehr. Marktanalyse des Fernbuslinienverkehrs 2015, Köln 2016.

BAG/TCI 2016: Bundesamt für Güterverkehr (BAG)/Transport Consulting International (TCI), Gleitende Mittelfristprognose für den Güter- und Personenverkehr. Mittelfristprognose Winter 2015/2016, Köln/Waldkirch 2016.

bast 2014: Bundesanstalt für Straßenwesen (bast), Feldversuch Lang-Lkw. Zwischenbericht, Bergisch Gladbach 2014.

BDO 2014: Bundesverband Deutscher Omnibusunternehmer (BDO), Wirtschaftsfaktor Bus – Deutschland und Europa. www.bdo-online.de/themen-und-positionen, abgerufen am 29.4.2016

Berger 2015: Roland Berger GmbH (Berger), Fuel Cell Electric Buses – Potential for Sustainable Public Transport in Europe. A Study for the Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, Munich 2015.

Berger 2016: Roland Berger GmbH (Berger), Integrated Fuels and Vehicles Roadmap to 2030 and beyond, Munich 2016.

Berndhofen et al. 2013: Daniel Bernhofen, Zouheir Sahli, Richard Kneller, Estimating the effects of the container revolution on world trade, CESifo Working Paper Series No. 4136, Munich 2013.

BIEK 2015: Bundesverband Kurier-, Express-, Paketdienste (BIEK), KEP-Studie 2015 – Analyse des Marktes in Deutschland, Berlin 2015.

BLE 2015: Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE), Evaluations- und Erfahrungsbericht für das Jahr 2014, Bonn 2015.

BMVI 2015: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Der Hybrid-Oberleitungsbus – wirtschaftliche Möglichkeiten und ästhetische Herausforderungen für die Elektrifizierung des städtischen Busverkehrs, Dokumentation zum Fachworkshop, Berlin, 25. November 2015.

BMVI 2016: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), LNG und CNG im schweren Lkw-Verkehr – Entwicklungspotenziale der Motorentechnologien. Zusammenfassung der Ergebnisse, Fachworkshop Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung (MKS), Berlin, 22. Januar 2016.

BMWI 2015: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWI), Ein gutes Stück Arbeit. Die Energie der Zukunft. Vierter Monitoring-Bericht zur Energiewende, Berlin 2015.

BNetzA 2015: Bundesnetzagentur (BNetzA), Tätigkeitsbericht Post 2014/15, Bonn 2015.

Bosch 2014: Robert Bosch GmbH (Hrsg.), Kraftfahrtechnisches Taschenbuch, 28. Auflage, Wiesbaden 2014.

Bosch 2014: Robert Bosch GmbH, Systeme für Erdgas- und kombinierte Erdgas-Diesel-Antriebe, Stuttgart 2014.

Breemersch/Akkermans 2015: Tim Breemersch, Lars Akkermans, GHG reduction measures for the Road Freight Transport sector up to 2020. Final report for ACEA, Brussels 2015.

Bundesregierung 2015: Bundesregierung, Strategie automatisiertes Fahren, Berlin 2015.

BVL 2008: Bundesvereinigung Logistik e. V. (BVL), Trends und Strategien in der Logistik: Globale Netzwerke im Wandel, Bremen 2008.

BVL 2014: Bundesvereinigung Logistik e. V. (BVL), Logistik verbindet nachhaltig. Impulse, Ideen, Nachhaltigkeit, Bremen 2014.

BVU et al. 2001: Beratergruppe Verkehr+Umwelt (BVU), ifo Institut für Wirtschaftsforschung, Intraplan Consult GmbH (ITP), Planco Consulting GmbH, Verkehrsprognose für die Bundesverkehrswegeplanung. Schlussbericht, Freiburg u.a.O. 2001.

BVU et al. 2014: Beratergruppe Verkehr+Umwelt (BVU), Intraplan Consult GmbH (ITP), Ingenieurgruppe IVV GmbH & Co. KG, Planco Consulting GmbH, Verkehrsverflechtungsprognose 2030. Schlussbericht, Freiburg u.a.O. 2014.

BVU/TNS 2014: BVU Beratergruppe Verkehr + Umwelt GmbH (BVU), TNS Infratest GmbH, Entwicklung eines Modells zur Berechnung von modalen Verlagerungen im Güterverkehr für die Ableitung konsistenter Bewertungsansätze für die Bundesverkehrswegeplanung. Vorläufiger Endbericht, Freiburg/München 2014.

CEN 2012: Comité Européenne de Normalisation (CEN), Methodology for calculation and declaration of energy consumption and GHG emissions of transport services (freight and passengers). EN 16258:2012, Brussels 2012.

CEN 2016: Comité Européenne de Normalisation (CEN), Automotive Fuels – Paraffinic diesel fuel from synthesis or hydrotreatment – requirements and test methods. Final draft FprEN 15940, Brussels 2016.

Cummins 2009: Cummins Filtration, Diesel Exhaust Fluid (DEF). Q&A, Nashville/USA 2009.

dena 2015: Deutsche Energieagentur (dena), LNG in Deutschland: Flüssigerdgas und erneuerbares Methan im Schwerlastverkehr. Potenzialanalyse und Politikempfehlungen für einen erfolgreichen Markteintritt, Berlin 2015.

Destatis 2008: Klassifikation der Wirtschaftszweige. Mit Erläuterungen, Wiesbaden 2008.

Destatis 2015a: Statistisches Bundesamt (Destatis), Boom bei Linienfernbusen hält an, Pressemitteilung, Wiesbaden, den 8. Oktober 2015.

Destatis 2015b: Statistisches Bundesamt (Destatis), Personenverkehr mit Bussen und Bahnen, Fachserie 8, Reihe 3.1, Wiesbaden 2015.

Destatis 2015c: Statistisches Bundesamt (Destatis), Strukturerhebung im Dienstleistungsbereich Verkehr und Lagerei 2013, Wiesbaden 2015.

Destatis 2015d: Statistisches Bundesamt (Destatis), Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen, Inlandsproduktberechnung, Fachserie 18 Reihe 1.4, Wiesbaden 2015.

Destatis 2016a: Statistisches Bundesamt (Destatis), Verkehr aktuell, Fachserie 8, Reihe 1.1, Wiesbaden 2016.

Destatis 2016b: Statistisches Bundesamt (Destatis), Öffentlicher Personenverkehr 2015: Neuer Höchststand bei Fahr- und Fluggästen, Pressemitteilung, Wiesbaden, den 18. Februar 2016.

Destatis 2016c: Statistisches Bundesamt (Destatis), Personenverkehr mit Bussen, Beförderungs-, Fahrleistung (von großen Unternehmen) (Personenverkehr mit Bussen und Bahnen): Bundesländer, Jahre, Verkehrsart. Tabelle 46100-0012, Wiesbaden 2016.

DIN 2003: Deutsches Institut für Normung (DIN), DIN 70070. Dieselmotoren – NOx-Reduktionsmittel AUS 32 – Qualitätsanforderungen, Berlin 2003.

DIN 2008: Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN), DIN 51624 Kraftstoffe für Kraftfahrzeuge – Erdgas – Anforderungen und Prüfverfahren, Berlin 2008.

DIW 2000: Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW), Verkehr in Zahlen 2000/2001, Hamburg 2000.

DIW 2015a: Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW), Benzin und Diesel dominieren weiterhin im Straßenverkehr, in: DIW Wochenbericht, Nr. 36, S. 779-788.

DIW 2015b: Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW), Verkehr in Zahlen 2015/16, Hamburg 2015.

DLR et al. 2014a: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Energie- und Umweltforschung GmbH (ifeu), Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST), Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH (DBFZ), LNG als Alternativkraftstoff für den Antrieb von Schiffen und schweren Nutzfahrzeugen, Berlin u.a.O. 2014.

DLR et al. 2014b: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Energie- und Umweltforschung GmbH (ifeu), Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST), Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH (DBFZ), Power-to-Gas (PtG) im Verkehr. Aktueller Stand und Entwicklungsperspektiven, Berlin u.a.O. 2014.

DLR et al. 2015: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Energie- und Umweltforschung GmbH (ifeu), Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST), Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH (DBFZ), Erneuerbare Energien im Verkehr. Potenziale und Entwicklungsperspektiven verschiedener erneuerbarer Energieträger und Energieverbrauch der Verkehrsträger, Berlin u.a.O. 2015.

DOD 2011: Department of Defence, United States of America (DOD), Technology Readiness Assessment (TRA). Guidance, Washington 2011.

DSLV 2010: Deutscher Speditions- und Logistikverband e.V. (DSLV), Grüne Logistik: Studie zu Begriffsverständnis, Bedeutung und Verbreitung „Grüner Logistik“ in der Speditions- und Logistikbranche, Bonn 2010.

DSLV 2013: Deutscher Speditions- und Logistikverband e.V. (DSLV), Berechnung von Treibhausgasemissionen in Spedition und Logistik gemäß EN 16258, Bonn 2013.

DVGW 2013: Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW), Technische Regeln. Arbeitsblatt G 260. Gasbeschaffenheit, Bonn 2013.

EC 2015: European Commission (EC), EU Transport in Figures – Statistical Pocketbook 2015. Luxemburg 2015.

EC/JRC 2014: European Commission/Joint Research Center (EC/JRC), Development of a CO₂ certification and monitoring methodology for Heavy Duty Vehicles – Proof of Concept report, Ispra 2014.

EC/DGM 2014a: European Commission, DG Move (EC-COM/DGM), LNG Blue Corridors. Gas Quality, Brussels 2014.

EC/DGM 2014b: European Commission, DG Move (EC-COM/DGM), LNG Blue Corridors. Trucks Euro V Technical Solutions, Brussels 2014.

EP/Rat 1996: Europäisches Parlament/Rat (EP/Rat), Richtlinie 53/1996/EG zur Festlegung der höchstzulässigen Abmessungen für bestimmte Straßenfahrzeuge im innerstaatlichen und grenzüberschreitenden Verkehr in der Gemeinschaft sowie zur Festlegung der höchstzulässigen Gewichte im grenzüberschreitenden Verkehr, in: Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, L 235/59-75, Brüssel, 17.9.1996.

EP/Rat 2007a: Europäisches Parlament/Rat (EP/Rat), Richtlinie 46/2007/EG zur Schaffung eines Rahmens für die Genehmigung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge (Rahmenrichtlinie), in: Amtsblatt der Europäischen Union, L 263/1-160, Brüssel, 9.10.2007.

EP/Rat 2007b: Europäisches Parlament (EP)/Rat, Verordnung 715/2007/EG über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 5 und Euro 6) und über den Zugang zu Reparatur- und Wartungsinformationen für Fahrzeuge, in: Amtsblatt der Europäischen Union, L 171/1-16, Brüssel, den 29.6.2007.

EP/Rat 2009a: Europäisches Parlament/Rat (EP/Rat), Verordnung 28/2009/EG zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien 77/2001/EG und 30/2003/EG, in: Amtsblatt der Europäischen Union, L 140/16-62, Brüssel, den 5. Juni 2009.

EP/Rat 2009b: Europäisches Parlament/Rat (EP/Rat), Verordnung 30/2009/EG zur Änderung der Richtlinie 70/1998/EG im Hinblick auf die Spezifikationen für Otto-, Diesel- und Gasölkraftstoffe, in: Amtsblatt der Europäischen Union, L 140/88-113, Brüssel, den 5. Juni 2009.

EP/Rat 2009c: Europäisches Parlament/Rat (EP/Rat), Verordnung 443/2009/EG zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO₂-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen, in: Amtsblatt der Europäischen Union, L 140/1-14, Brüssel, 5. Juni 2009.

EP/Rat 2009d: Europäisches Parlament/Rat (EP/Rat), Verordnung 595/2009/EG über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen und Motoren hinsichtlich der Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen (Euro VI) und über den Zugang zu Fahrzeugreparatur- und -wartungsinformationen, zur Änderung der Verordnung 715/2007/EG und der Richtlinie 46/2007/EG sowie zur Aufhebung der Richtlinien 1269/1980/EWG, 55/2005/EG und 78/2005/EG; in: Amtsblatt der Europäischen Union, L 188/1-13, Brüssel, 18. Juli 2009.

EP/Rat 2014a: Europäisches Parlament (EP)/Rat, Richtlinie 94/2014/EU über den Ausbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe, in: Amtsblatt der Europäischen Union, L 307/1-20, Brüssel, den 28.10.2014.

EP/Rat 2014b: Europäisches Parlament/Rat (EP/Rat), Verordnung 253/2014/EU zur Änderung der Verordnung 510/2011/EU hinsichtlich der Festlegung der Modalitäten für das Erreichen des Ziels für 2020 zur Verringerung der CO₂-Emissionen neuer leichter Nutzfahrzeuge, in: Amtsblatt der Europäischen Union, L 84/38-41, Brüssel, den 20. März 2014.

EP/Rat 2014c: Europäisches Parlament/Rat (EP/Rat), Verordnung 333/2014/EU zur Änderung der Verordnung 443/2009/EG hinsichtlich der Festlegung der Modalitäten für das Erreichen des Ziels für 2020 zur Verringerung der CO₂-Emissionen neuer Personenkraftwagen, in: Amtsblatt der Europäischen Union, L 103/115-121, Brüssel, den 5. April 2014.

EP/Rat 2014d: Europäisches Parlament/Rat (EP/Rat), Verordnung Nr. 540/2014 über den Geräuschpegel von Kraftfahrzeugen und von Austauschschalldämpferanlagen sowie zur Änderung der Richtlinie 46/2007/EG und zur Aufhebung der Richtlinie 157/1970/EWG, in: Amtsblatt der Europäischen Union, L 158/131-145, Brüssel, den 27. Mai 2014.

EP/Rat 2015a: Europäisches Parlament/Rat (EP/Rat), Richtlinie 719/2015/EU zur Änderung der Richtlinie 53/1996/EG zur Festlegung der höchstzulässigen Abmessungen für bestimmte Straßenfahrzeuge im innerstaatlichen und grenzüberschreitenden Verkehr in der Gemeinschaft sowie zur Festlegung der höchstzulässigen Gewichte im grenzüberschreitenden Verkehr, in: Amtsblatt der Europäischen Union, L 115/1-10, Brüssel, 6.5.2015.

EP/Rat 2015b: Europäisches Parlament/Rat (EP/Rat), Richtlinie 1513/2015/EU zur Änderung der Richtlinie 70/1998/EG über die Qualität von Otto- und Dieselmotoren und zur Änderung der Richtlinie 28/2009/EG zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen, in: Amtsblatt der Europäischen Union, L 239/1-29, Brüssel, 15.9.2015.

EU-COM 2015: EU-Commission (EU-COM), Quality of petrol and diesel fuel used for road transport in the European Union. Twelfth annual report, Brussels, 25.2.2015, COM(2015) 70 final.

EU-KOM 2009: EU-Kommission (EU-KOM), Verordnung 595/2009/EG über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen und Motoren hinsichtlich der Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen (Euro VI) und über den Zugang zu Fahrzeugreparatur- und -wartungsinformationen, zur Änderung der Verordnung 715/2007/EG und der Richtlinie 2007/46/EG sowie zur Aufhebung der Richtlinien 1269/1989/EWG und 78/2005/EG, in: Amtsblatt der Europäischen Union, L 188/1-13, Brüssel, den 18.7.2009.

EU-KOM 2011: EU-Kommission (EU-KOM), Verordnung 582/2011/EU zur Durchführung und Änderung der Verordnung 595/2009/EG hinsichtlich der Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen (Euro VI) und zur Änderung der Anhänge I und III der Richtlinie 46/2007/EG, in: Amtsblatt der Europäischen Union, L 167/1-168, Brüssel, den 25.6.2011.

EU-KOM 2014a: EU-Kommission (EU-KOM), Strategie zur Minderung des Kraftstoffverbrauchs und der CO₂-Emissionen schwerer Nutzfahrzeuge. Impact Assessment, COM(2014) SWD 160 endgültig, Brüssel, den 21.5.2014.

EU-KOM 2014b: EU-Kommission (EU-KOM), Strategie zur Minderung des Kraftstoffverbrauchs und der CO₂-Emissionen schwerer Nutzfahrzeuge. Mitteilung, COM(2014) 285 endgültig, Brüssel, den 21.5.2014.

EU-KOM 2015: EU-Kommission (EU-KOM), Fragen und Antworten zu Emissionsgrenzwerten für Luftschadstoffe. Factsheet, Brüssel, den 25. September 2015.

EurObs'ev' 2015: EurObs'ev' , Biofuels Barometer, Brussels 2015.

eurogas 2015: eurogas, Statistical Report 2015, Brussels 2015.

EWI et. al. 2014: Energiewirtschaftliches Institut (EWI), Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforchung (GWS), Prognos, Entwicklung der Energiemärkte – Energierferenzprognose. Endbericht, Basel u.a.O. 2014.

FAT 2011: Forschungsvereinigung Automobiletechnik (FAT), Verbrauchsreduktion an Nutzfahrzeugkombinationen durch aerodynamische Maßnahmen, FAT-Schriftenreihe 237, Berlin 2011.

- FAT 2012: Forschungsvereinigung Automobiltechnik (FAT), Aerodynamik von schweren Nutzfahrzeugen – Stand des Wissens, FAT-Schriftenreihe 241, Berlin 2012.
- FAT 2013: Forschungsvereinigung Automobiltechnik (FAT), Numerische Untersuchungen zur Aerodynamik von Nutzfahrzeugkombinationen bei realitätsnahen Fahrbedingungen unter Seitenwindinfluss, FAT-Schriftenreihe 260, Berlin 2013.
- FIS 2016: Forschungs-Informationssystem Mobilität und Verkehr (FIS), Buslinienfernverkehr. BMVI (Hrsg.), www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/409383, abgerufen 18. April 2016.
- FNBGas 2015: FNBGas. Die Fernleitungsnetzbetreiber (FNBGas), Netzentwicklungsplan Gas 2015, Berlin 2015.
- FNR 2013: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR), Biogas, 9. Auflage, Gülzow 2013.
- FGSV 2012: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Begriffsbestimmungen - Teil: Verkehrsplanung, Straßenentwurf, Straßenbetrieb, FGSV-Nr. 220, Köln, 2012.
- FuelCellToday 2012: FuelCellToday, The Fuel Cell Industry Review 2012, Herts/UK 2012.
- FVV 2013: Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV), Zukünftige Kraftstoffe für Verbrennungsmotoren und Gasturbinen, Frankfurt/Main 2013.
- FVV 2016: Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV), Renewables in Transport 2050. Empowering a sustainable mobility future with zero emission fuels from renewable electricity. Kraftstoffstudie II. Final Report, Frankfurt/Main 2016.
- Goodyear Dunlop 2012: Goodyear Dunlop, Einflüsse auf den Kraftstoffverbrauch von Lkw, Hanau 2012.
- Goodyear Dunlop 2013: Goodyear Dunlop, Technisches Handbuch Lkw-/Busreifen, Hanau 2013.
- Grundwald 2012: Armin Grundwald, Ist Zukunft erforschbar?, in: Wolfgang J. Koschnick (Hrsg.), FOCUS-Jahrbuch 2012. Prognosen, Trend- und Zukunftsforschung, München 2012, S. 171-196.
- Gudehus 2007: Timm Gudehus, Logistik 1: Grundlagen, Verfahren und Strategien; 4. Auflage, Berlin/Heidelberg 2007.
- H₂M 2016: H₂ Mobility (H₂M), H₂ Mobility tritt in neue Projektphase ein und bestellt neuen Geschäftsführer, Pressemitteilung, Berlin, den 22.4.2016.
- Hoepke/Breuer 2013: Erich Hoepke, Stefan Breuer (Hrsg.), Nutzfahrzeugtechnik. Grundlagen, Systeme, Komponenten, 7. Auflage, Wiesbaden 2013.
- Hondius 2014: Harry Hondius, ZeUS: Das Elektrosbusprojekt der UITP, in: Stadtverkehr. Fachzeitschrift für den öffentlichen Personen-Nahverkehr auf Straße und Schiene, Jg. 59, Heft 4, S. 14-17.
- Hondius 2015: Harry Hondius, Busworld Kortrijk: Eine Auswahl von Neuheiten unter den ÖPNV Bussen, in: Stadtverkehr. Fachzeitschrift für den öffentlichen Personen-Nahverkehr auf Straße und Schiene, Jg. 60, Heft 12, S. 6.
- ICCT 2013: International Council on Clean Transportation (ICCT), World-harmonized light-duty vehicles Test Procedure (WLTP). Policy Update, Berlin u.a.O. 2013.
- ICCT 2014a: The International Council on Clean Transportation (ICCT), Crude Oil Greenhouse Gas Emission Methodology for the Fuel Quality Directive, Washington D.C. 2014.
- ICCT 2014b: The International Council on Clean Transportation (ICCT), Upstream Emissions of Fossil Fuel Feedstocks for Transport Fuels Consumed in the European Union, Washington D.C. 2014.
- ICCT 2015a: International Council on Clean Transportation (ICCT), Assessment of Heavy-Duty Natural Gas Vehicle Emissions: Implications and Policy Recommendations, Berlin u.a.O. 2015.
- ICCT 2015b: International Council on Clean Transportation (ICCT), Comparison of real-world off-cycle NOX emissions control in Euro IV, V, and VI. Briefing, Berlin u.a.O. 2015.
- IEA 2015: International Energy Agency (IEA), World Energy Outlook, Paris 2015.
- IEA/BET37 2014: International Energy Agency, Bio Energy Task 37 (IEA/BET37), Non-grid biomethane transport in Sweden, Malmö 2014.
- ifeu 2012: Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (ifeu), Aktualisierung „Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030“ (TREMODO, Version 5.3) für die Emissionsberichtserstattung 2013 (Berichtsperiode 1990-2011). Version 5.01. Endbericht, Heidelberg 2012.
- ifo 2012: ifo Institut für Wirtschaftsforschung (ifo), Erstellung einer regionalisierten Strukturdatenprognose (Los 1), Prognose der wirtschaftlichen Entwicklung 2010 bis 2030, Dresden/Hamburg 2012.
- IGU 2012: International Gas Union (IGU), Natural Gas Conversion Guide, Oslo 2012.
- ika 2014: Institut für Kraftfahrzeuge (ika), CO₂-Emissionsreduktion bei Pkw und leichten Nutzfahrzeugen nach 2020. Abschlussbericht, Aachen 2014.
- IML 2011: Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik (IML), Klimaschutz liefern: Logistikprozesse klimafreundlich gestalten, Dortmund 2011.
- ISI 2015: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Gesamt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030, Karlsruhe 2015.
- ISO 2012: International Organization for Standardization (ISO), ISO 14687-2:2012. Hydrogen Fuel – Product Specification Part 2: Proton exchange membrane (PEM) fuel cell applications for road vehicles, Geneva 2012.
- ISO 2013: International Standardisation Organisation (ISO): ISO 16290:2013(en). Space systems – Definition of the Technology Readiness Levels (TRLs) and their criteria of assessment, Geneva 2013.
- ITP/BVU 2007: Intraplan Consult GmbH (ITP)/ Beratergruppe Verkehr + Umwelt (BVU), Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen 2025, München/Freiburg 2007.
- JEC 2013: Joint Research Center of the European Commission, Eucar and Concawe (JEC), Tank-to-Wheels Report. Version 4.0, Luxemburg 2014.
- JEC 2014a: Joint Research Center of the European Commission, Eucar and Concawe (JEC), Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context, Version 4.a, Luxemburg 2014.
- JEC 2014b: Joint Research Center of the European Commission, Eucar and Concawe (JEC), Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context, Well-to-tank Appendix 1 - Version 4a, Luxemburg 2014.
- KBA 2008: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), Kraftfahrt-Bundesamt, Fahrzeugzulassungen. Bestand, Emissionen, Kraftstoffe, 1. Januar 2008. Flensburg, April 2008.
- KBA 2009: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) Fachartikel: Alter der Fahrzeuge, Stand 3.12.2008. Flensburg 2009.
- KBA 2015a: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), Verzeichnis zur Systematisierung von Kraftfahrzeugen und ihren Anhängern. Stand: September 2015, Flensburg 2015.
- KBA 2015b: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), Fahrzeugzulassungen (FZ). Neuzulassungen, Besitzumschreibungen und Außerbetriebsetzungen von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern, Jahr 2015, FZ 7, Flensburg 2015.
- KBA 2015c: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), Fahrzeugzulassungen (FZ). Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen, 1. Januar 2015, FZ 13, Flensburg 2015.
- KBA 2015d: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), Fahrzeugzulassungen (FZ). Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen, Jahr 2014, FZ 14, Flensburg 2015.
- KBA 2015e: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), Fahrzeugzulassungen (FZ). Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Fahrzeugalter, 1. Januar 2015, FZ 15, Flensburg 2015.
- KBA 2015f: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), Fahrzeugzulassungen (FZ). Bestand an Nutzfahrzeugen, Kraftfahrzeugen insgesamt und Kraftfahrzeuganhängern nach technischen Daten (Größenklassen, Motorisierung, Fahrzeugklassen und Aufbauarten), 1. Januar 2015, FZ 25, Flensburg 2015.
- KBA 2016a: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), Methodische Erläuterungen zu Statistiken über Fahrzeugzulassungen, Flensburg 2016.
- KBA 2016b: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), Fahrzeugzulassungen (FZ). Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Zulassungsbezirken, 1. Januar 2015, FZ 1, Flensburg 2016.
- KBA 2016c: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), Fahrzeugzulassungen (FZ). Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern – Monatsergebnisse, Dezember 2015, FZ 8, Flensburg 2016.
- Kille/Schwemmer 2012: Christian Kille, Martin Schwemmer, Die TOP 100 der Logistik: Marktgrößen, Marktsegmente und Marktführer 2012/2013, Hamburg 2012.
- Kofod/Stephenson 2013: Max Kofod, Trevor Stephenson, Well-to Wheel Greenhouse Gas Emissions of LNG Used as a Fuel for Long Haul Trucks in a European Scenario, SAE Technical Paper 2013-24-0110, 2013, doi:10.4271/2013-24-0110.
- Lange/Otto 2015: Jürgen Lange, Thomas Otto, BeSystO: Entscheidungsmodell für den ÖPNV mit Elektrobussen, in: Der Nahverkehr, Jg. 33, Heft Nr. 6, S. 16-21.
- LAO 2013: Laustauto Omnibus (LAO), Automatisierte Getriebe im Vergleich, Heft 8, 90. Jg., 2013, S. 14-19.
- LAO 2016: Laustauto Omnibus (LAO), Spezial Platooning, Heft 5, 93. Jg., 2016, S. 18-25.
- LBST/Hinicio 2016: Ludwig Bölkow Systemtechnik GmbH (LBST), Hincio S.A., Power-to-gas. Short term and long term opportunities to leverage synergies between the electricity and transport sectors through power-to-hydrogen, Brussels/Munich 2016.
- LBST/TÜV SÜD 2016: Ludwig-Bölkow-Systemtechnik (LBST)/TÜV SÜD, Weltweit 54 neue Wasserstofftankstellen in 2015. Jahresauswertung, Pressemitteilung, München, den 25. Januar 2016.
- Marx 2015: Peter Marx, Wirkungsgrad-Vergleich zwischen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor und Fahrzeugen mit Elektromotor, in: Der Elektro-Fachmann, 62. Jg. 2015, Nr. 1-2, S. 5-10.
- Meins 2012: Jürgen Meins, Induktive Energieübertragung – Grundlagen und Anwendungen, in: Verband der Elektrotechnik, Elektronik, Informationstechnik (Hrsg.), VDE-Kompandium Elektromobilität, Frankfurt/Main 2012, S. 58-63.
- Merker/Teichmann 2014: Günter P. Merker, Rüdiger Teichmann (Hrsg.), Grundlagen Verbrennungsmotoren. Funktionsweise, Simulation, Messtechnik, 7. Auflage, Wiesbaden 2014.
- Mortimer/Müller 2010: Charles E. Mortimer, Ulrich Müller, Chemie: Das Basiswissen der Chemie, Stuttgart 2010.
- Müller 2012: Stephan Müller, Makroskopische Verkehrsmodellierung mit der Einflussgröße Telematik - Eine Methodenarbeit und Beispielumsetzung mit Cooperative Adaptive Cruise Control Systemen im Güterverkehr, Dissertation, Berlin 2012.
- MWV 2015: Mineralölwirtschaftsverband (MWV), Jahresbericht 2015. Mineralöl-Zahlen 2014, Berlin 2014.
- NASA 1995: National Aeronautics and Space Administration (NASA), Technology Readiness Levels. A White Paper, Washington 1995.
- NGVA 2015: Natural & bio Gas Vehicle Association Europe (NGVA), Report of Activities 2014/15, Brussels 2015.
- Ökoinstitut 2015: Ökoinstitut, Wirtschaftlichkeit von Elektromobilität in gewerblichen Anwendungen. Betrachtung von Gesamtnutzungskosten, ökonomischen Potenzialen und möglicher CO₂-Minderung, Berlin 2015.
- PNNL 2010: Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), Issues affecting adoption of natural gas fuel in light- and heavy-duty vehicles, Washington 2010.
- Rat 2015: Rat der Europäischen Union, Richtlinie 652/2015/EU zur Festlegung von Berechnungsverfahren und Berichterstattungspflichten gemäß der Richtlinie 98/1970/EG über die Qualität von Otto- und Dieseldieselkraftstoffen, in: Amtsblatt der Europäischen Union, L 107/26-67, Brüssel, den 25.4.2015.
- Regett et al. 2014: Anika Regett, Christoph Pelliner, Sebastian Eller, Power2Gas – Hypte oder Schlüssel zur Energiewende?, in: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 64. Jg. (2014), Heft 10, S. 79-84.
- Reif et al. 2012: Konrad Reif, Karl E. Noreikat, Kai Borgeest, Kraftfahrzeug-Hybridantriebe. Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen, Wiesbaden 2012.
- Shell 2010: Shell, Shell Lkw-Studie, Fakten, Trends und Perspektiven im Straßengüterverkehr bis 2030, Hamburg 2010.
- Shell 2012: Shell, Nach Super E10: Welche Rolle für Biokraftstoffe? Fakten, Trends und Perspektiven, Hamburg 2012.
- Shell 2013: Shell, Erdgas. Eine Brückentechnologie für die Mobilität der Zukunft?, Hamburg 2013.
- Shell 2014: Shell, Shell Pkw-Szenarien bis 2040. Fakten, Trends und Perspektiven für Automobilität, Hamburg 2014.
- Shell 2015: Shell Flüssiggas-Studie. LPG als Energieträger und Kraftstoff. Fakten, Trends und Perspektiven, Hamburg 2015.
- Shell BDH 2013: Shell, Bundesindustrieverband Deutschland, Haus, Energie- und Umwelttechnik e.V. (BDH), Shell BDH Hauswärme-Studie, Klimaschutz im Wohnungssektor – wie heizen wir morgen? Fakten, Trends und Perspektiven für Heiztechniken bis 2030, Hamburg/Köln 2013.
- Siemens 2015: Siemens AG, eHighway. Innovative electric road freight transport, Munich 2016.
- Süßmann/Lienkamp 2015: Alexander Süßmann, Markus Lienkamp, Technische Möglichkeiten für die Reduktion der CO₂-Emissionen von Nutzfahrzeugen, in: Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Fahrzeugtechnik. Heft F 103, Bergisch Gladbach 2015.
- TAB 2012: Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB), Konzepte der Elektromobilität und deren Bedeutung für Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt, Arbeitsbericht Nr. 153, Berlin 2012.
- Thomas 2012: Joachim Thomas; Umweltökonomische Analyse des Güterverkehrs 1995 bis 2010, Wirtschaft und Statistik, Juni 2012, S. 503-514.
- UBA 2013: Umweltbundesamt (UBA), Kurzfristig kaum Lärminderung durch Elektroautos. Position, Dessau 2013.
- UBA 2015a: Umweltbundesamt (UBA), Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen 1990-2014, Arbeitsstand: 25.11.2015, Dessau 2015.
- UBA 2015b: Umweltbundesamt (UBA), Zukünftige Maßnahmen zur Kraftstoffeinsparung und Treibhausgasminimierung bei schweren Nutzfahrzeugen, Dessau 2015.
- UBA 2016: Umweltbundesamt (UBA), Luftqualität 2015. Vorläufige Auswertung. Hintergrund, Dessau 2016.
- UNCTAD 2015: United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD), Review of Maritime Transport 2015, Geneva 2015.
- van Basshuysen/Schäfer 2014: Richard van Basshuysen, Fred Schäfer, Handbuch Verbrennungsmotor. Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven, 7. Auflage, Wiesbaden 2014.
- VDA 2013: Verband der Automobilindustrie (VDA), AdBlue®, Berlin 2013.
- VDA 2015: Verband der Automobilindustrie (VDA), Tatsachen und Zahlen. 79. Folge, 2015. Berlin 2015.
- VDE 2015: Verband der Elektrotechnik (VDE), Kompendium: Li-Ionen-Batterien. Grundlagen, Bewertungskriterien, Gesetze und Normen, Frankfurt/Main 2015.
- VDV 2015: Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV), VDV-Statistik 2014. Köln 2015.
- Westport 2016a: Westport HPDI 2.0, Vancouver 2016; gesicherter Link vom 08.04.2016: <http://www.westport.com/is/core-technologies/combustion/hpdi>
- Westport 2016b: Westport Monofuel Direct Injection, Vancouver 2016; gesicherter Link vom 30.03.2016: <http://www.westport.com/is/core-technologies/combustion/cng-di>
- World Bank 2014: World Bank, Connecting to Compete. Trade Logistics in the Global Economy. The Logistics Performance Index and its Indicators, Washington D.C. 2014.
- WTO 2015: World Trade Organisation (WTO), International Trade Statistics. Special focus: world trade and the WTO: 1995–2014, Geneva 2015.

Shell Deutschland Oil GmbH
22284 Hamburg
www.shell.de

Hamburg 2016