

# Shell PKW-Szenarien bis 2040

Fakten, Trends und Perspektiven für Auto-Mobilität



# Shell PKW-Szenarien bis 2040

## Fakten, Trends und Perspektiven für Auto-Mobilität



SHELL DEUTSCHLAND

Dr. Jörg Adolf (Projektleitung)

Dr. Christoph Balzer

Dipl.-Ing. Arndt Joedicke

Dipl.-Ing. Uwe Schabla

Dr. Karsten Wilbrand

www.shell.de

prognos

PROGNOS AG

Dr. Stefan Rommerskirchen (Projektleitung)

Dipl.-Geographin Natalia Anders

M. Sc. Verkehrsökonom Alex Auf der Maur

Dr. Oliver Ehrentraut

Dipl.-Volkswirtin Lisa Krämer

Dipl.-Physiker Samuel Straßburg

www.prognos.com

EINLEITUNG	4
1/GLOBALE PKW-TRENDS	6
2/WIRTSCHAFTLICHE UND SOZIODEMOGRAFISCHE RAHMENDATEN BIS 2040	10
3/WIRKUNGSHYPOTHESEN ZU AUTO-MOBILITÄT	14
4/PROGNOSEN ZU PKW-MOTORISIERUNG UND PKW-FAHRLEISTUNGEN	24
5/ANTRIEBE UND KRAFTSTOFFE	42
6/SZENARIEN ZU PKW-BESTAND, ENERGIEVERBRAUCH UND CO <sub>2</sub> -EMISSIONEN	50
7/ ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN	76
LITERATURVERZEICHNIS	80

## KURZFASSUNG

Das Automobil erschließt immer weitere Weltregionen, insbesondere in den Schwellenländern. In Industrieländern wie Deutschland wandeln sich Mobilitätsverhalten, Pkw-Besitz und -Nutzung. Gleichzeitig nimmt die Vielfalt von Antrieben und Kraftstoffen für den Straßenverkehr zu. Die 26. Ausgabe der Shell Pkw-Szenarien untersucht zum einen die künftige Pkw-Motorisierung und -Nutzung, zum anderen Antriebstechniken, Kraftstoffe, Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen des Pkw-Verkehrs in Deutschland bis 2040.

Nach einem einleitenden Blick auf die weltweite automobilen Entwicklung werden zunächst Wirkungshypothesen zu Einflussfaktoren auf Automobilität anhand von Mobilitätshebungen überprüft. Anschließend werden in einem einheitlichen sozioökonomischen Trendszenario Prognosen zur Pkw-Motorisierung und zu den Fahrleistungen nach Alter und Geschlecht erstellt, die mit den gesamtmodalen (Land)-Verkehrsentwicklungen abgestimmt werden. Während der Pkw bei den Jüngeren an Attraktivität verliert, holen die Frauen bei der Motorisierung weiter auf. Ältere Menschen bleiben länger mobil. Wichtige Kennziffern wie Pkw-Motorisierung, Pkw-Bestand und Pkw-Fahrleistungen erreichen in den 2020er Jahren einen

Höhepunkt (*Peak*) und halten sich danach auf dem Niveau des letzten Jahrzehnts.

Nach einer Übersicht über Antriebstechniken und Kraftstoffe werden mit Hilfe von Szenariotechnik künftige Antriebsmixe des Pkw-Bestands sowie Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen des Pkw-Verkehrs modelliert.

In einem Trendszenario werden bei Antrieben und Kraftstoffen Entwicklungstrends der jüngeren Vergangenheit fortgeschrieben; in einem Alternativszenario werden ambitionierte Energie- und Klimaziele mit Technologieumbrüchen verfolgt. Um die Potenziale von Gasantrieben und Gaskraftstoffen abzuschätzen, wird zusätzlich noch eine Gasszenarierette untersucht. Während im Trendszenario sowie in der Gasszenarierette vor allem hybridisierte Pkw mit Verbrennungsmotor und Gasantriebe sowie ein verstärkter Einsatz von Biokraftstoffen eine wichtige Rolle spielen, erfolgt im Alternativszenario eine schnellere Durchdringung des Pkw-Bestands mit elektrischen Antrieben. Alle Szenarien führen zu einer signifikanten Diversifizierung von Antrieben und Kraftstoffen sowie zu einem substantiellen Rückgang des Energieverbrauchs und der CO<sub>2</sub>-Emissionen.

## ABSTRACT

The automobile keeps gaining access to ever more regions of the world, particularly in the emerging market countries. In industrialised countries like Germany, a transition is unfolding as regards mobility behaviour as well as passenger car ownership and use. At the same time, an increasing variety of propulsion technologies and fuels is available for road transport today. The 26<sup>th</sup> edition of the Shell Passenger Car Scenarios examines future automobile motorisation and car use and also propulsion technologies, fuels, energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions up to the year 2040.

Following an introductory view of automotive development worldwide, impact hypotheses regarding influential factors on automobility are analysed by means of mobility surveys. Next, in a uniform socio-economic trend scenario, forecasts are provided on automobile motorisation and mileage patterns differentiating by age and gender; these are reconciled with overall modal (land-based) transport development patterns. While passenger cars lose their appeal amongst the younger set, women continue to catch up as far as motorisation is concerned. Senior citizens remain mobile longer. Key figures such as motorisation, car ownership and mileage will reach

their peak in the 2020s and will then remain at the level of the last decade.

Following an overview of propulsion technologies and fuels, with the aid of scenario technique, models for future propulsion mixes for passenger cars as well as for energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions by passenger car transport are modelled.

In a trend scenario, development trends in the recent past will be updated to include the latest propulsion technologies and fuels; in an alternative scenario, ambitious energy and climate targets will be pursued by means of more disruptive technology changes. To assess the potentials of gas propulsion and gas fuels, in addition a gas mini-scenario is studied. While hybridised passenger cars with internal combustion engines and gas propulsion as well as the increased use of biofuels play a particularly important role both in the trend scenario and in the gas mini-scenario, the alternative scenario reflects a faster penetration of passenger cars featuring electric propulsion technologies. All scenarios will lead to a significant diversification of propulsion systems and fuels as well as to a substantial reduction in energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions.

## HERAUSGEBER

Shell Deutschland Oil GmbH  
22284 Hamburg



# VORWORT UND EINLEITUNG

Seit 1958 erstellt und veröffentlicht Shell Pkw-Studien für Deutschland. In den vergangenen 50 Jahren hat das Automobil nichts an Aktualität und öffentlichem Interesse eingebüßt. Der Pkw ist das Hauptverkehrsmittel in Deutschland und er wird als Verkehrsmittel weltweit immer wichtiger. Gleichzeitig nehmen die automobilen Vielfalt, aber auch die Anforderungen an das Automobil zu. Es gibt also eine Vielzahl von Gründen, eine neue Studie zur Zukunft des Pkw und der Auto-Mobilität in Deutschland zu erstellen.

Die letzte Ausgabe der Shell Pkw-Szenarien erschien im Jahre 2009 (Shell 2009). Die aktuellen Shell Pkw-Szenarien 2014 sind die insgesamt 26. Ausgabe der Shell Pkw-Studie. Sie bieten dem interessierten Leser nützliche Fakten über das Automobil, analysieren Pkw-Trends und zeigen mittel- bis langfristige Perspektiven auf. Die Neuauflage der Pkw-Studie 2014, insbesondere die quantitativen Prognosen, wurde in Zusammenarbeit mit der Prognos AG, Basel, erstellt.

## AUTOMOBILES UMFELD

Seit dem Erscheinen der letzten Shell Pkw-Szenarien 2009 hat sich einiges verändert im automobilen Umfeld: Die Jahreswende 2008/09 markierte nicht nur den Höhepunkt der globalen Finanz- und Wirtschaftskrise mit zum Teil erheblichen Auswirkungen auf und Unsicherheiten für die Automobilwirtschaft. Zeitlich fiel die Veröffentlichung der Shell Pkw-Studie 2009 auch zusammen mit dem Höhepunkt der Euphorie um die Elektromobilität. Inzwischen haben sich die Erwartungen an Elektromobilität deutlich abgeschwächt. Die Zulassungen von Elektrofahrzeugen steigen zwar, aber das Ziel von einer Million Elektro-Pkw bis 2020 wird voraussichtlich nicht erreicht (BMW 2014; Inraplan/BVU 2014).

Anders als Elektroautos hatten sich Biokraftstoffe bereits 2009 als relevante Alternative im deutschen Kraftstoffmarkt etabliert. Obgleich Biokraftstoffe seit 2011 strenge Nachhaltigkeitskriterien erfüllen müssen, gerieten sie mit der Markteinführung von Super E10 stark in die Kritik (Adolf 2011). Mangels Alternativen, aber auch auf Grund einer erneuten Novellierung des Biokraftstoffquotengesetzes, stehen Biokraftstoffe weiter oben auf der Politik-Agenda.

Durch die Erschließung neuer großer Gasvorkommen erfahren Gasantriebe und Gaskraftstoffe als neue Antriebs- bzw. Kraftstoffoption nicht nur im Pkw-Bereich größere Aufmerksamkeit. Und mit der Energiewende im Stromsektor nimmt auch das Interesse an Wasserstoff als Option zur Verwertung überschüssiger erneuerbarer Strommengen (Power-to-Gas) wieder zu.

## STRATEGIEANSÄTZE UND STAKEHOLDER-FOREN

Um die nationale Politikstrategie für Energie und Verkehr zu aktualisieren, hat die Bundesregierung 2012/13 umfangreiche Konsultationen für eine nationale Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie (MKS) durchgeführt. Die MKS hat eine umfassende Analyse der Antriebstechniken aller Verkehrsträger, aller Energieträger bzw. Kraftstoffe sowie relevanter Querschnittsthemen wie Infrastruktur vorgenommen. Sie löst die bisherige Kraftstoffstrategie aus dem Jahre 2004 ab. Sie soll als lernende Strategie weitergeführt werden (BMVBS 2013).

Neben der MKS wurden weitere Strategie- und Forschungsprojekte zum Pkw-Verkehr mit Stakeholder-Beteiligung durchgeführt, darunter das Projekt *Renewability*, welches zusätzliche Potenziale zur Minderung von Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor bis zum Jahr 2030 identifizieren sollte, um anspruchsvolle Klimaziele im Verkehrssektor zu erreichen (Ökoinstitut et al. 2013). Darüber hinaus haben sich zu einzelnen Antriebstechniken und Kraftstoffoptionen – insbesondere für Elektromobilität, aber auch zu Wasserstoff, Erdgas und Biokraftstoffen – in den letzten Jahren unterschiedliche Stakeholder-Initiativen gebildet.

Im Umfeld der MKS erschien eine ganze Reihe von Studien zu einzelnen Antriebs- und Kraftstoffthemen, darunter auch eine Meta-Studie zu aktuellen Verkehrsszenarien (DLR et al. 2013). Auch Shell hat seit den letzten Shell Pkw-Szenarien 2009 Studien zu einzelnen Automobilthemen veröffentlicht – darunter eine erste Shell Lkw-Studie (Shell/DLR

2010), eine Studie zur Zukunft von Biokraftstoffen (Fritsche et al. 2012) sowie eine Kurzstudie zu Erdgas als Kraftstoff (Shell 2013c).



Generell hat die Anzahl von Studien oder studienähnlichen Publikationen zu technischen oder ökonomischen Aspekten von Auto-Mobilität – seien es Antriebstechniken, Kraftstoffe oder Mobilitätsverhalten – in der jüngeren Vergangenheit deutlich zugenommen. Zu den besonders intensiv beforschten Automobil-Themen gehört Elektromobilität. In Bezug auf Forschungsvorhaben zeichnet sich eine verstärkte Einbeziehung relevanter Stakeholder in die Forschungsprozesse ab. Allerdings wird der Anspruch eines vollständig begleitenden Multistakeholder-Prozesses meistens doch nicht erreicht (Adolf 2013).

## ENERGIE- UND VERKEHRSPROGNOSEN

Zukunftsprognosen zum Verkehrssektor sind zahlreich und vielfältig. Grundsätzlich ist der Verkehrssektor und damit auch das Automobil ein Kernbestandteil der Energiewende in Deutschland. Aber auch wenn der Verkehrssektor in die Referenzprognosen zur Energiewende einbezogen wird (Prognos/EWI/-GWS 2014), so steht er dort doch – anders als der Stromsektor – nicht im Zentrum, obgleich er immerhin rund 30 % der Endenergie verbraucht und 20 % der verbrennungsbedingten CO<sub>2</sub>-Emission verursacht.

Von besonderem Interesse für die Verkehrspolitik ebenso wie für die Pkw-Forschung ist die im Jahre 2014 veröffentlichte neue Verkehrsverflechtungsprognose des Bundesverkehrsministeriums bis 2030 (Inraplan/BVU 2014). Auch wenn die Wachstumserwartungen der Vorgängerstudie zurückgenommen wurden, nehmen die Pkw-Motorisierung und auch die Personenverkehrsleistung des motorisierten Individualverkehrs bis 2030 weiter zu, während Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen des Straßenverkehrs abnehmen.

**SHELL PKW-SZENARIEN 2014: METHODEN UND FRAGESTELLUNGEN** Shell setzt seit über 40 Jahren Szenariotechnik ein (Shell 2013a; Wilkinson/Kupers 2013), um eigene Geschäftsentscheidungen auf eine möglichst robuste Grundlage zu stellen – aber auch, um sich an wichtigen

gesellschaftlichen Diskussionen zu beteiligen. Die letzten globalen Energieszenarien der Shell Gruppe sind im Jahre 2013 erschienen (Shell 2013b).

Einstmals als Shell Pkw-Prognose begonnen, wird die Shell Pkw-Studie seit 1979 methodisch als Szenario-Analyse ausgeführt. Auch die neue Shell Pkw-Studie setzt wiederum auf Szenario-Technik. Szenario-Technik ist ein wichtiges Instrument der Zukunftsforschung (Adolf 2010). Szenarien sind jedoch keine Prognosen. Sie stellen vielmehr mögliche, in sich plausible künftige Entwicklungspfade dar. Unter den hier untersuchten Szenarien befinden sich keine Zielszenarien; auch gibt es kein präferiertes Szenario. Die untersuchten Szenariopfade dienen vielmehr in erster Linie dem Erkenntnisgewinn.

In der Shell Pkw-Studie 2009 wurden zwei Leitfragen untersucht: 1) *Welche Auswirkungen hat der demografische Wandel, insbesondere aber die Alterung auf den Pkw-Verkehr in Deutschland?* Und 2) *Wie nachhaltig wird sich Auto-Mobilität gemessen am Energieverbrauch und an den CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2030 entwickeln?*



Beide Pkw-Leitfragen sind weiter aktuell; gleichwohl hat sich die erste Fragestellung verschoben, und es hat sich zwischen den Leitfragen von 2009 noch eine dritte herausdifferenziert.

Heute prägt das veränderte Mobilitätsverhalten älterer Menschen Pkw-Mobilität stärker als je zuvor. Junge Alte nutzen den Pkw mehr als früher. Zu einem wichtigen Prognoseparameter könnte sich in Zukunft jedoch auch das Mobilitätsverhalten junger Menschen entwickeln, denn die jüngeren Jahrgänge scheinen den Pkw seltener zu nutzen (ifmo 2011, 2013). Behalten sie ihr Verhalten später in höherem Alter bei, kann sich dies dann nachhaltig auf Pkw-Mobilität auswirken. Die erste Leitfrage der Shell Pkw-Szenarien erhält damit einen zusätzlichen Fokus auf das Mobilitätsverhalten Jüngerer:

### LEITFRAGE 1

*Wie entwickelt sich das Mobilitätsverhalten Älterer und Jüngerer? Und welchen Einfluss haben demografischer Wandel und verändertes Mobilitätsverhalten auf Auto-Mobilität gemessen an Pkw-Motorisierung und Pkw-Fahrleistungen?*

Seit 2004 setzen die Shell Pkw-Szenarien hierbei auf eine nach Alter und Geschlecht differenzierte Prognose von Motorisierung und Fahrleistungen. Um die Pkw-Prognosen nach Alter und Geschlecht noch weiter zu substantiieren, wurden zusätzlich Wirkungshypothesen zu unterschiedlichen sozioökonomischen Einflussfaktoren auf die Automobilität untersucht, die aktuelle empirische Quellen zu Sozioökonomie und Mobilität nutzen (DIW/TNS 2013, Infas/DLR 2010a).

Die Vielfalt von Pkw-Antriebstechniken und Kraftstoffen wächst und der technologische Wandel im Automobilssektor beschleunigt sich. Eine Prognose des Pkw-Bestands nach Antriebstechniken ist Voraussetzung für die Untersuchung der Nachhaltigkeitsperformance von Auto-Mobilität. Deshalb wurden Antriebstechniken und Kraftstoffe unter einer neuen orientierenden Leitfrage eingehender untersucht:

### LEITFRAGE 2

*Welche Antriebstechniken und Kraftstoffoptionen gibt es? Und welche Antriebstechniken werden in den kommenden Jahren Eingang in den Pkw-Bestand finden?*

Für die Prognose des Pkw-Bestands nach Antrieben, des Energieverbrauchs und der CO<sub>2</sub>-Emissionen des Pkw-Verkehrs wurden wie bei anderen Shell Studien auch unterschiedliche Szenarien entwickelt: ein Trend- und ein Alternativszenario. Zusätzlich wurde – als Variation des Trendszenarios – eine Gasszenarete betrachtet, um die Potenziale von Gasantrieben und Gaskraftstoffen im Pkw-Sektor näher zu beleuchten.

Für die hinter der Pkw-Bestandsprognose stehenden Neuzulassungen wurde ein eigenes Pkw-Kohorten-Modell entwickelt, welches über Neuzulassungen und Überlebensfunktionen den Pkw-Bestand nach Antriebsarten bis 2040 fortschreibt. Für den Bestand wurden schließlich der (End)-Energieverbrauch und – nach unterschiedlichen Abgrenzungen – die CO<sub>2</sub>-Emissionen ermittelt, um so die Nachhaltigkeitsperformance des Pkw beurteilen zu können.

### LEITFRAGE 3

*Wie nachhaltig wird sich Auto-Mobilität in Deutschland – gemessen an Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen – entwickeln? Und welchen Beitrag kann das Automobil zu den Energie- und Klimazielen der Politik leisten?*

Schließlich ist es im Jahr 2014 an der Zeit, den Szenario-Horizont 10 Jahre weiter auf das Jahr 2040 zu verschieben. Der verlängerte Zeithorizont erlaubt es, die langfristigen Auswirkungen heutiger Veränderungen – etwa bei Demografie oder Pkw-Neuzulassungen – auf Pkw-Mobilität, auf den Pkw-Bestand, den Energieverbrauch und die CO<sub>2</sub>-Emissionen abzuschätzen.

## AUTOREN-TEAM UND DATENQUELLEN

Seit 2004 wurden die Shell Pkw-Szenarien wissenschaftlich von ProgTrans AG bzw. Prognos AG begleitet. Zu den Aufgaben von ProgTrans/Prognos gehörte dabei insbesondere die Aufbereitung und Analyse von Zeitreihen und soziodemografischer Rahmendaten sowie die Erstellung quantitativer Szenarioprognosen und -analysen zur Mobilitätsnachfrage und zu den Pkw.

Die Projektleitung und Koordination der 26. Shell Pkw-Studie auf Seiten von Shell Deutschland lag bei Dr. Jörg Adolf, auf Seiten der Prognos AG bei Dr. Stefan Rommerskirchen.

Folgende Autoren der Shell trugen zur wissenschaftlichen Bearbeitung der Studie bei: Dr. Jörg Adolf, Dr. Christoph Balzer, Arndt Joedicke, Uwe Schabla und Dr. Karsten Wilbrand.

Von der Prognos AG arbeiteten Natalia Anders, Alex Auf der Maur, Dr. Oliver Ehrentraut, Lisa Krämer, Dr. Stefan Rommerskirchen und Samuel Straßburg an der Erstellung der Studie mit.

Die Datengrundlagen der vorliegenden Studie umfassen die letzten amtlichen Bevölkerungs- und Haushaltsvorausberechnungen des Statistischen Bundesamtes. Sozioökonomische Daten wurden dem Sozio-ökonomischen Panel (SOEP) des Deutschen Instituts für Wirtschaftsforschung (DIW), der Einkommens- und Verbrauchsstichprobe (EVS) und den Laufenden Wirtschaftsrechnungen (LWR) des Statistischen Bundesamtes entnommen. Die neuesten Pkw-Bestands- und Zulassungszahlen wurden vom Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) bezogen sowie die Kraftstoffverbrauchsdaten und -berechnungen vom DIW.

Darüber hinaus wurde eine Vielzahl von weiteren Experten, Entscheidungsträgern und Stakeholdern aus den Bereichen Wissenschaft, Wirtschaft und Politik befragt. Shell und Prognos danken allen Befragten für Information und Zusammenarbeit. Eine Auswahl relevanter Quellen befindet sich am Ende der Pkw-Studie.

1

# GLOBALE PKW-TRENDS

Autos prägen das tägliche Leben des modernen Menschen. Autos erbringen das Gros der Personenverkehrsleistung in fast allen entwickelten Volkswirtschaften und verursachen gleichzeitig den weitaus größten Anteil an den Mobilitätsausgaben.

Sie beeinflussen und bestimmen Wirtschaft und Gesellschaft wesentlich (mit). Autos verbrauchen Energie und andere Ressourcen. Sie stiften großen individuellen Nutzen, verursachen auf der anderen Seite aber auch negative Externalitäten für die Allgemeinheit (etwa durch Abgas- und Lärmemissionen oder Unfälle).

Aufgrund der Allgegenwärtigkeit des Autos und der zunehmenden Automobilität von Verkehr und Leben in immer mehr Weltregionen stellt sich die Frage, wie sich die Pkw-Motorisierung in wichtigen Ländern entwickelt und wie viele Autos (Pkw) es künftig auf dem Planeten Erde geben wird.



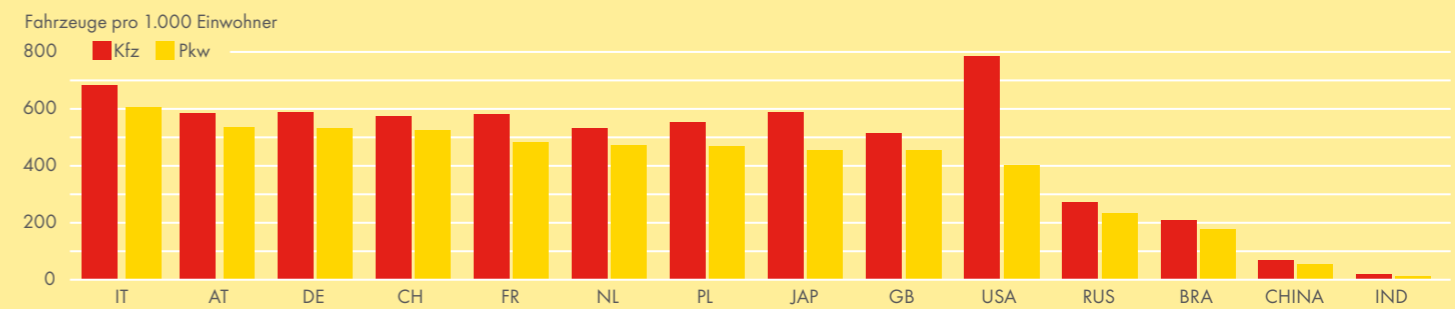
Pkw-Motorisierung in ausgewählten Ländern  
 2000 2011 Pkw pro 1.000 Einwohner



World Bank 2014, Prognos 2014  
 Daten für Südafrika 2010  
 Daten für Brasilien 2009



Kfz-Motorisierung in ausgewählten Ländern (2011)



World Bank 2014, Prognos 2014

## INTERNATIONALE PKW-MOTORISIERUNG

Personenmobilität und damit auch Automobilität wird von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst (WBCSD 2004, 53; RAND/ifmo 2014, 23). Dennoch lässt sich ein enger Zusammenhang von Automobilität – gemessen anhand von Pkw-Motorisierung und/oder Pkw-Fahrleistungen – mit dem verfügbaren Haushaltseinkommen bzw. näherungsweise mit dem Pro-Kopf-Einkommen und damit der jeweiligen wirtschaftlichen Entwicklung eines Landes beobachten. Folglich wird die Ausstattung mit Pkw oftmals als Kriterium für den wirtschaftlichen Entwicklungsstand von Volkswirtschaften herangezogen. So nutzt etwa die Weltbank in ihren Weltentwicklungsindikatoren (World Development Indicator; WDI Table 3.13) die Ausstattung mit Kraftfahrzeugen und mit Pkw als wichtigen Indikator für die jeweilige wirtschaftliche Entwicklung eines Landes (World Bank 2014).

Bei niedrigen Einkommen können sich nur wenige Menschen ihre Wünsche nach individueller motorisierter Mobilität erfüllen. Im Zuge wirtschaftlicher Entwicklung steigende Einkommen erlauben und ermöglichen dagegen die Anschaffung eines Pkw. Dabei scheint es eine Einkommensspanne zu geben, innerhalb derer sich eine Gesellschaft verstärkt bzw. beschleunigt mit Automobilen motorisiert. Die relevante Einkommensschwelle liegt bei etwa 5.000 US-Dollar (WBCSD 2004; Chamon et al. 2008) bzw. beim Übergang von den niedrigen zu den hohen mittleren Einkommen (nach Weltbank-Klassifikation). Der Autowunsch wird bei Erreichen der hohen mittleren Einkommen derart vordringlich, dass die Pkw-Motorisierung dann rascher als das Pro-Kopf-Einkommen wächst.

Nach Erreichen eines durchschnittlichen Pro-Kopf-Einkommens von etwa USD 20.000 endet die beschleunigte Motorisierungsphase und andere Faktoren wie Bevölkerungsdichte und deren räumliche Verteilung (Verstädterungsgrad), öffentliche Verkehrsinfrastruktur und Verkehrspolitik gewinnen Einfluss auf das letztendlich erreichte Motorisierungsniveau (RAND/ifmo 2014).

Länder mit niedrigem verfügbarem bzw. Pro-Kopf-Einkommen weisen meist geringe Pkw-Motorisierungsgrade von zum Teil deutlich unter 100 Pkw pro 1.000 Einwohner auf; in China besitzt nur etwa jeder zwanzigste, in Indien gar nur etwa jeder hundertste Einwohner ein Auto. Da wichtige Schwellenländer die relevante Einkommensschwelle für eine Massenmotorisierung inzwischen erreicht haben, wächst die globale Pkw-Motorisierung rasch. Hocheinkommensländer liegen dagegen im Durchschnitt bei über 400 bis etwa 600 Pkw pro 1.000 Einwohner; das gilt insbesondere für die alten Triade-Märkte der Automobilwirtschaft (USA, Westeuropa und Japan). Deutschland, Österreich und die Schweiz gehören mit etwa 530 Pkw pro 1.000 Einwohner mit zu den am höchsten motorisierten Ländern. Aufgrund seiner hohen Einwohnerzahl verfügt Deutschland über die größte Pkw-Flotte in Europa.

Allerdings sind zwischen den Industrieländern auch bei gleichem Pro-Kopf-Einkommen zum Teil deutliche Unterschiede in der Pkw-Motorisierung (für die Pkw-Fahrleistungen gilt Ähnliches) zu verzeichnen; so liegen Japan und Großbritannien bei der Pkw-Motorisierung deutlich unter derjenigen in den anderen großen EU-Ländern und sehr deutlich unterhalb der USA (einschließlich Pick-ups). Auch in der Entwicklungsdynamik weist die Pkw-Motorisierung Unterschiede auf: Während die Motorisierung in vielen Industrieländern nur noch langsam wächst, legt sie in fast allen Schwellenländern kräftig zu; das gilt vor allem für China, aber auch für Länder wie Russland, Polen oder die Türkei. Der weltweite Durchschnitt der Pkw-Motorisierung liegt zurzeit bei nur 123 Pkw pro 1.000 Einwohner; im Jahr 2000 waren es erst 100 Pkw.

Die Abgrenzung zwischen Pkw und übrigen Kraftfahrzeugen ist nicht immer völlig trennscharf: Teilweise werden auch Pkw-ähnliche Nutzfahrzeuge für den privaten Pkw-Verkehr eingesetzt.

Darüber hinaus werden leichte Nutzfahrzeuge (Sport Utility Vehicles, SUV), worunter heute meist komfortable Geländewagen

verstanden werden, und ähnliche Fahrzeuge unterschiedlich zwischen gewerblichem und privatem Sektor aufgeteilt.

Zudem ist der Anteil von Nutzfahrzeugen an allen Kraftfahrzeugen in den Schwellenländern in der Regel höher als in den Industrieländern. Und einzelne Länder beheimaten auch starke Logistiksektoren mit entsprechenden Nutzfahrzeugflotten. Entsprechend unterscheidet sich die Differenz zwischen der Kfz-Motorisierung, das ist die Anzahl aller Kraftfahrzeuge auf je 1.000 Einwohner, und die Pkw-Motorisierung von Land zu Land.

Besonders auffällig ist die US-Motorisierung: Da Vans, Mini-Vans und Utility-Fahrzeuge hier nicht zu den Pkw zählen, aber im Prinzip wie Pkw genutzt werden, fällt die Pkw-Motorisierung mit nur gut 400 Pkw pro 1.000 Einwohner relativ gering aus; durch eine Verschiebung hin zu Vans und Utilities ist sie zuletzt sogar gesunken. Über alle Kraftfahrzeuge ist die Motorisierung allerdings fast doppelt so hoch – nämlich fast 800 Kraftfahrzeuge auf 1.000 Einwohner.

## GLOBALE PKW-FLOTTE

Die Weltbevölkerung wächst jährlich zurzeit um gut 80 Mio. Menschen. Sie dürfte von heute (Mitte 2013) 7,2 Mrd. Menschen auf 9,6 Mrd. bis zur Mitte und 10,9 Mrd. gegen Ende des Jahrhunderts zulegen (UN 2013; mittlere Variante). Während die Bevölkerungszahl in den Industrieländern bei etwa 1,3 Mrd. verharrt, wächst sie in den Schwellen- und Entwicklungsländern von 5,9 auf 8,5 (2050) bzw. 9,6 Mrd. (2100). Verdoppelte sich der globale Pkw-Motorisierungsgrad nur auf rund 250 Pkw pro 1.000 Einwohner, würde die globale Pkw-Flotte allein bis 2050 auf fast 2,5 Mrd. Pkw anwachsen.

Tatsächlich bewegt sich die Pkw-Motorisierung im Trend sowohl weltweit als auch in den einzelnen Ländern aufwärts, und zwar auch in den hochentwickelten. Das heißt, der Pkw-Motorisierungsgrad bzw. die Anzahl der Pkw bezogen auf die Einwohnerzahl steigt. Nur in einzelnen Jahren – zum Beispiel im Gefolge der globalen Wirtschaftsrezession

2008/09 – waren bislang leichte (vorübergehende) Rückgänge in der Pkw-Motorisierung zu verzeichnen.

Allerdings zeichnen sich in den hochentwickelten Volkswirtschaften – zumindest quantitative – Sättigungstendenzen der Pkw-Motorisierung und Pkw-Nutzung ab. Die Anzahl der Pkw bzw. die Pkw-Motorisierung nimmt hier insgesamt nur noch langsam zu und die Pkw-Fahrleistungen beginnen zu stagnieren; das lässt sich unter anderem im automobilen Pionierland USA beobachten (RAND/ifmo 2013). Inwieweit sich hier bereits dauerhafte Änderungen im Mobilitätsverhalten oder auch nur zeitliche Verschiebungen von Auto-Mobilität widerspiegeln, lässt sich noch nicht abschließend beurteilen, hierzu bedarf es detaillierter soziodemografischer Analysen über längere Zeiträume. Mittelfristig ist für Hocheinkommens- bzw. Industrieländer zumindest von einer anhaltend hohen Pkw-Motorisierung und Pkw-Nutzung auszugehen, da das Sättigungsniveau in der Regel noch nicht (ganz) erreicht sein dürfte.

Insgesamt gibt es heute weltweit rund 900 Mio. Pkw (VDA 2013). Jährlich werden nach Angaben des Weltautomobilverbandes OICA über 60 Mio. Pkw neu zugelassen. Zukunftsprojektionen gehen davon aus, dass die Anzahl der Pkw aufgrund der hohen automobilen Dynamik der Schwellenländer in Zukunft deutlich zulegen wird. Die Internationale Energieagentur geht in ihrem Mobility Model MoMo (IEA 2013) bis zum Prognosehorizont 2035 ihres *New Policies Scenarios* von rund 1,7 Mrd. Pkw aus; bis 2050 werden weltweit zumindest 2 Mrd., wenn nicht sogar nahezu 3 Mrd. Autos erwartet (WBCSD 2004; Chamon et al. 2008).

Eine zentrale Frage zur weltweiten Zukunft des Automobils lautet, ob eine globale Pkw-Flotte von zwei Milliarden Autos bei einer Erdbevölkerung von 9,6 Mrd. Menschen bis zur Mitte des Jahrhunderts überhaupt darstellbar bzw. nachhaltig sein kann (Sperling/Gordon 2009). Gewiss ist, dass die Fahrzeuge der Zukunft anders sein werden, ja müssen. Um immer strengere Umwelt-Anforderungen

zu erfüllen und bei weltweit zunehmendem Pkw-Bestand externe Effekte (wie Emissionen) zu vermindern, werden Autos mit noch effizienteren neuen Antrieben ausgestattet und die von ihnen verwendeten Kraftstoffe bzw. Energieträger werden noch sauberer.

Zudem erlebt das globale Umfeld des Automobils einen rasanten Wandel: es wird immer urbaner. Schon heute lebt mehr als die Hälfte (54%) der Erdbevölkerung in Städten; bis zur Mitte des Jahrhunderts werden es etwa zwei Drittel sein.

Die Verstädterung schreitet in allen Weltregionen voran – vor allem in Asien und Afrika, aber auch in Amerika und Europa. In China schnell der Verstädterungsgrad bis 2050 auf 76%, in Deutschland steigt er von heute 75 auf 83%, in den USA auf 87% und in Japan auf nahezu 100% (UN 2014).

Städte und ihre Siedlungsstrukturen werden folglich immer wichtiger – nicht nur für den Ressourcenverbrauch, sondern auch für den Mobilitätsaufwand der Bevölkerung und damit auch für die Pkw-Nutzung (Shell 2014).

Und schließlich werden die Autofahrer aufgrund des demografischen Wandels in den wichtigsten Automobilmärkten (Nordamerika, Europa, China) immer älter. So steigt in Deutschland das Durchschnittsalter (bezogen auf den Median) bis zur Mitte des Jahrhunderts auf über 50 Jahre an (UN 2013).

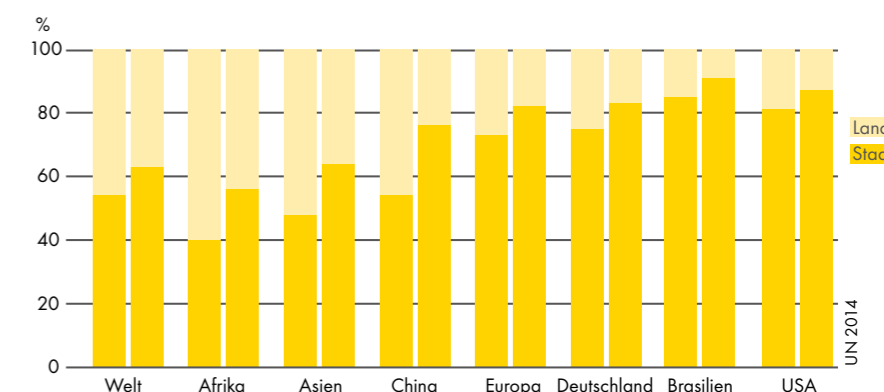
Den Veränderungen seines Umfeldes wird sich das Automobil nicht nur bei Antrieben und Kraftstoffen anpassen (müssen). Es wird neue Fahrzeugtypen, neue automobiler Formen, neue Funktionalitäten und neue Ausstattungsmerkmale geben. Dazu gehören könnten eine umfassende Web-Vernetzung oder autonomes Fahren, ebenso neue gemeinsame Nutzungsformen wie Carsharing und andere neue Mobilitätsdienstleistungen.

Ein Ende des Automobilzeitalters ist also noch längst nicht abzusehen, im Gegenteil: Wirtschaftlich ist das Auto für Hersteller, Dienstleister und Nutzer, volkswirtschaftlich für Arbeitsplätze und Einkommen von enormer Bedeutung. Technisch ist das Produkt Auto zwar weit, aber noch längst nicht zuende entwickelt. Und global befindet sich das Automobil zurzeit sogar in einer Phase beschleunigten Wachstums.

Obgleich der Einfluss der sich rasch motorisierenden Schwellenländer als Konsumenten, aber auch als Produzenten wächst, werden Automobilnationen wie Deutschland einen wichtigen, möglicherweise sogar führenden Beitrag zur Weiterentwicklung des Automobils und damit zur globalen Auto-Mobilität der Zukunft leisten.

Von daher ist es relevant und interessant, sich im Rahmen einer umfassenderen Pkw-Studie mit der Entwicklung und der Zukunft des Automobils im Autoland Deutschland zu befassen.

## 2/VERSTÄDTERUNG IN DEN WELTREGIONEN 2014/2050



2

# WIRTSCHAFTLICHE UND SOZIO-DEMOGRAFISCHE RAHMENDATEN BIS 2040

Die Entwicklung des Automobils und von Automobilität hängt stark von wirtschaftlichen und demografischen Faktoren ab. Wirtschaftsaktivität geht einher mit Güterverkehr und erfordert Arbeitswege von Personen. Einkommen ermöglichen Mobilität – zum Beispiel Freizeitverkehr. Personenmobilität wird von Personen und Haushalten nachgefragt. Im Folgenden werden die wichtigsten makroökonomischen und sozio-demografischen Rahmendaten für Deutschland bis zum Jahr 2040 prognostiziert. Diese Rahmendaten bilden die Grundlage für die folgenden Pkw-Szenarioprognosen.



## WELTWIRTSCHAFTLICHE ENTWICKLUNG

Die globale Wirtschaftsentwicklung wird mit dem makroökonomischen Modell VIEW der Prognos prognostiziert; darin sind 42 Länder und mehr als 90 % der Weltwirtschaftsleistung abgebildet.

Die OECD-Industrieländer erwirtschaften heute noch annähernd die Hälfte des globalen Bruttoinlandsprodukts. Bis zum Jahr 2040 wird die Entwicklung der Weltwirtschaft hingegen zunehmend von den Schwellenländern getragen und mitbestimmt. Der wirtschaftliche Aufholprozess vieler Schwellenländer setzt sich damit in Zukunft weiter fort. Dabei weisen die meisten wirtschaftlich dynamischen Schwellenländer eine größere Bevölkerungsdynamik auf als die reiferen Industriegesellschaften.

Die Vernetzung nationaler Volkswirtschaften (Globalisierung) fördert Wachstum und Wohlstand in den Industrieländern ebenso wie in den weniger entwickelten Schwellenländern. Im Zeitraum von 1990 bis 2011 führte die zunehmende internationale Vernetzung der 42 Untersuchungsländer ausnahmslos zu einer Steigerung des Bruttoinlandsprodukts je Einwohner – unabhängig von der Größe ihrer Volkswirtschaft, dem durchschnittlichen Wohlstand ihrer Einwohner, der Struktur ihrer Wirtschaft oder ihrer geografischen Lage.

Der Prozess der Globalisierung setzt sich im Prognosezeitraum fort. Der Welthandel

wächst auch in Zukunft deutlich schneller als das globale Bruttoinlandsprodukt, wenngleich das relative Expansionstempo (Welthandel in Relation zum globalen Bruttoinlandsprodukt) etwas nachlässt. Die Bedeutung des Welthandels als Wachstumstreiber der Weltwirtschaft nimmt folglich leicht ab.

## WIRTSCHAFTSENTWICKLUNG IN DEUTSCHLAND

In der langen Frist wächst die deutsche Volkswirtschaft (real) um durchschnittlich knapp 1,3 % p.a. In der laufenden Dekade zeigt sich die Wachstumsdynamik dabei noch etwas gedämpft. In den 2020er Jahren zieht das Wachstumstempo an und erreicht Werte von durchschnittlich 1,5 % p.a. Zwischen 2030 und 2040 schwächt sich die Zuwachsrate wieder auf einen Wert von durchschnittlich 1,0 % p.a. ab (Prognos 2014).

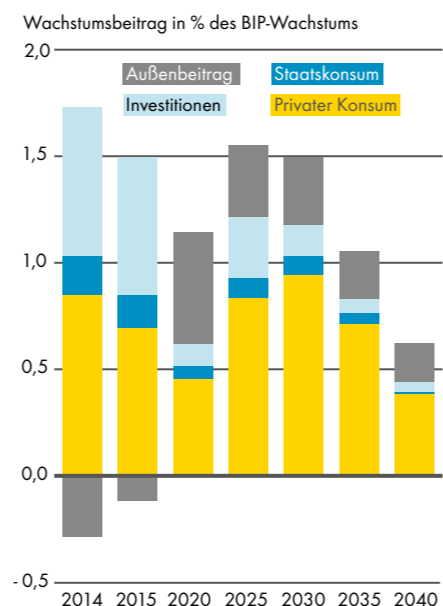
Das Bruttoinlandsprodukt je Einwohner wird aufgrund der sinkenden Bevölkerungszahl real mit 1,4 % p.a. etwas stärker wachsen als die Gesamtwirtschaft. Jeder Inländer erzielt damit zwischen 2012 und 2040 einen durchschnittlichen Einkommenszuwachs in Höhe von durchschnittlich gut 510 Euro p.a. Die Wirtschaftsleistung je Einwohner steigt zwischen 2012 und 2040 von 30.200 Euro auf 45.000 Euro und damit um fast 50 %.

In den vergangenen Jahren stützte sich die deutsche Wachstumsdynamik sehr stark auf den Außenhandel. Die deutschen Waren- und Dienstleistungsexporte erreichen inzwischen mehr als 50% des Bruttoinlandsprodukts.

Pro Kopf werden für jeden Einwohner Deutschlands heute Waren und Dienstleistungen im Wert von fast 16.000 Euro ausgeführt.

Für die Zukunft ist der mit Abstand größte Wachstumsbeitrag – wie in fast allen übrigen Volkswirtschaften – aus dem Anstieg der privaten Konsumausgaben zu erwarten (Abbildung 3). Ein deutscher Haushalt gibt heute durchschnittlich rund 28.000 Euro für den privaten Konsum aus; darunter etwa 4.000 Euro für Verkehrszwecke (StBA

## 3/WACHSTUMSBEITRÄGE ZUM BRUTTOINLANDSPRODUKT



## WIRTSCHAFTSSEKTOR DEUTSCHE AUTOMOBIL-INDUSTRIE IN ZAHLEN

Die Automobilwirtschaft gehört in vielen Industrieländern, insbesondere aber in Deutschland, zu den volkswirtschaftlichen Leitsektoren. Die deutschen Automobilhersteller und ihre Zulieferer produzierten zuletzt (2013) weltweit rund 14 Millionen Pkw, das entspricht etwa einem Fünftel der globalen Pkw-Produktion von fast 75 Mio. Autos. Von den 14 Mio. Pkw deutscher Automobilproduzenten wurden 5,4 Mio. im Inland und 8,6 Mio. Pkw im Ausland hergestellt. Damit ist Deutschland der größte Automobil-Produzent in Europa und hinter China, Japan und den USA der viertgrößte weltweit.

Zusätzlich wurden noch gut 300.000 Nutzfahrzeuge und rund 250.000 Fahrzeuganhänger von deutschen Automobilproduzenten hergestellt. Mit über 750.000 Beschäftigten erreichten die deutschen Automobilhersteller einen Jahresumsatz von über 360 Mrd. Euro. Hierfür investierten sie etwa 13 Mrd. Euro in Anlagen und über 18 Mrd. Euro in Forschung und Entwicklung (VDA 2014 und Schade et al. 2012).

Seit 2010 produziert die deutsche Automobilindustrie mehr Pkw im Ausland als im Inland. Von den etwa 3 Mio. Neuzulassungen pro Jahr in Deutschland werden allerdings nur etwa 1,3 Mio. Pkw auch im Inland produziert. Über 4 Mio. Pkw inländischer Pkw-Produktion, mehr als drei Viertel, gehen in den Export. Auf der anderen Seite wird mehr als die Hälfte der inländischen Pkw-Nachfrage durch Fahrzeugimporte gedeckt.

Die Automobilindustrie ist in Deutschland in zwei Verbänden organisiert: Im Verband der Automobilindustrie (VDA) sind die deutschen Fahrzeughersteller, im Verband der Internationalen Kraftfahrzeughersteller (VDIK) die ausländischen Hersteller. Der deutsche Pkw-Absatz teilt sich etwa 70 zu 30 zwischen deutschen Konzernmarken und Importmarken auf.

**75 Mio. Pkw**  
globale Autoproduktion

**14 Mio. Pkw**  
weltweit von deutschen Herstellern

**5,4 Mio. Pkw**  
in Deutschland gebaut

**4 Mio. Pkw**  
ins Ausland exportiert

**300.000 Nutzfahrzeuge**  
weltweit von deutschen Herstellern

**750.000 Beschäftigte**  
in Deutschland

**360 Mrd. €**  
Umsatz p.a.

**13 Mrd. €**  
Investitionen

**18 Mrd. €**  
Ausgaben für  
Forschung & Entwicklung

Neben den Automobilverbänden in Deutschland gibt es noch den Weltverband Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles (OICA), der weltweit etwa 40 nationale Verbände der Automobilindustrie organisiert sowie den Europäischen Verband European Automobile Manufacturers' Association (ACEA); beide erstellen eine Vielzahl von Statistiken, Publikationen und Informationen zur Autoindustrie.

**BEVÖLKERUNG DEUTSCHLANDS UND DER ZENSUS 2011**

Die Bevölkerung wird heute nicht mehr durch traditionelle Volkszählung (zuletzt 1987) ermittelt, sondern in erster Linie über registergestützte Verfahren mit ergänzenden Befragungen. Der letzte Zensus fand 2011 statt, Stichtag der Erhebung war der 9. Mai 2011. Seit

etwa 2013 werden Daten und Auswertungen aus dem Zensus 2011 vom Statistischen Bundesamt veröffentlicht.

Die Ergebnisse des Zensus 2011 haben offenbart, dass in Deutschland deutlich weniger Menschen leben als vermutet. Das Statistische Bundesamt hatte basierend auf Fortschreibungen der letzten Volkszählungen (Westdeutschland 1987, Ostdeutschland 1981) die Einwohnerzahl zum 31.12.2011 ursprünglich auf 81,8 Millionen taxiert. Laut Zensus zählte die Bundesrepublik jedoch zu diesem Zeitpunkt nur 80,3 Millionen Einwohner und damit 1,5 Millionen oder knapp 2% weniger Einwohner als angenommen. Hauptgrund für diesen statistischen Bevölkerungsrückgang ist, dass rund 1,1 Mio. weniger nicht abgemeldete Ausländer in Deutschland leben als fortgeschrieben. Auch fielen die Bevölkerungsverluste in einigen Regionen (Berlin, Hamburg und Baden-Württemberg) höher aus als in anderen.

Die Bevölkerungsdaten in den aktuellen Prognos-Modellen basieren derzeit strukturell noch auf den Zahlen der (alten) Bevölkerungsvorausberechnung, allerdings angepasst an die Ergebnisse des Zensus von 2011.

Untersucht man die strukturellen Abweichungen zwischen Zensus 2011 und Bevölkerungsvorausberechnung zeigt sich, dass die Anteile der jeweiligen Altersgruppen an der Gesamtbevölkerung zwischen dem Zensus und der Bevölkerungsvorausberechnung variieren.

Die größten der durchweg sehr moderaten Abweichungen ergeben sich bei der Altersgruppe der über 75-Jährigen. Der Anteil dieser Altersgruppe an der Gesamtbevölkerung beträgt laut Zensus 9,32%, die Bevölkerungsvorausberechnung hatte demgegenüber einen Wert von 9,58% angegeben und somit den tatsächlichen Anteil um 0,26 Prozentpunkte überschätzt. Insgesamt weicht die Altersstruktur zwischen den beiden Erhebungen jedoch nicht erheblich ab.

So bleibt der Anteil der unter 15-Jährigen als auch der über 65-Jährigen an der Gesamtbevölkerung unverändert bei 13% bzw. 21%. Die Wirkung des Zensus 2011 auf die Struktur der Bevölkerung ist somit anders als auf die Bevölkerungszahl eher gering.

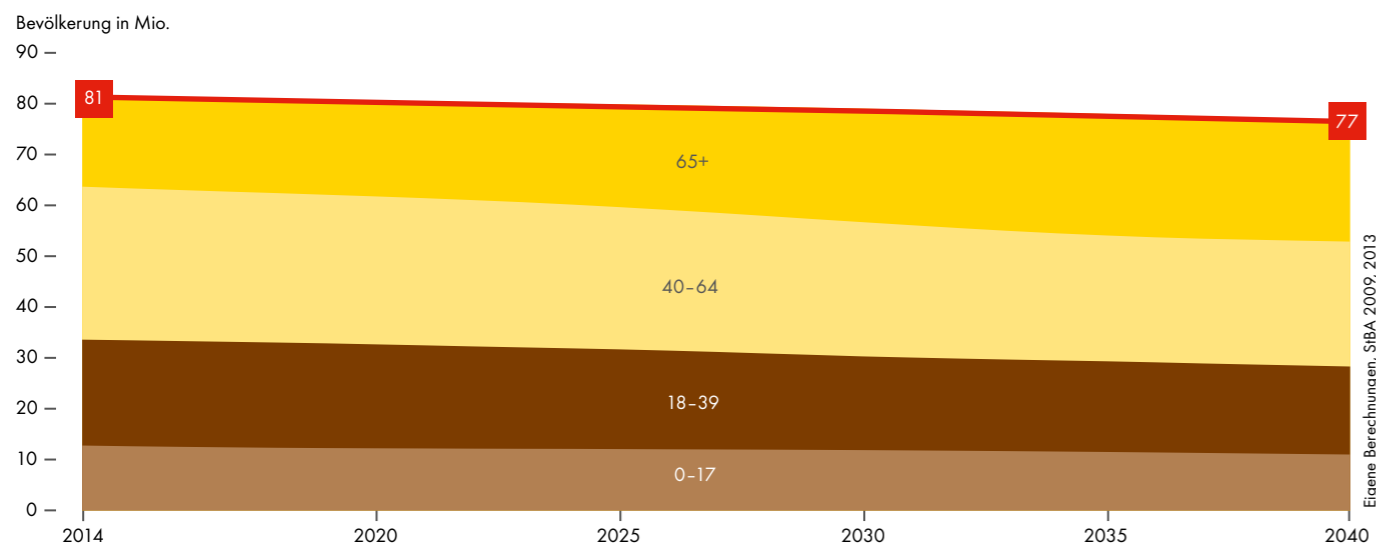
2014b). Insbesondere in der kurzen Frist sowie in den 2020er Jahren weisen die Ausgaben der privaten Haushalte kräftige Zuwächse auf. Schwächere, im Zeitverlauf abnehmende Wachstumsbeiträge kommen darüber hinaus aus der Entwicklung des öffentlichen Konsums. Für die Entwicklung der Privaten Konsumausgaben ist das verfügbare

Einkommen der privaten Haushalte von zentraler Bedeutung. Dieses hängt wiederum von der Entwicklung der Stundenlöhne und der Beschäftigungsentwicklung ab.

Aufgrund der erheblich gesunkenen und weiter sinkenden Arbeitslosigkeit kommt es während des Prognosezeitraums zu spürbaren

Reallohnzuwächsen. Die Investitionen entwickeln sich insgesamt mit einem Zuwachs von 1,1% p.a. unterdurchschnittlich. Dies gilt jedoch nicht für sämtliche Unterkategorien: Während die Ausrüstungsinvestitionen kräftig zulegen, sie steigen zwischen 2012 und 2040 im Durchschnitt um 1,9% p.a., stagnieren die öffentlichen Investitionen zum Aufbau

**4/BEVÖLKERUNGSPROGNOSE DEUTSCHLAND**



und zur Erhaltung der materiellen staatlichen Infrastruktur. Zum einen fehlen den öffentlichen Haushalten vor dem Hintergrund der Schuldenbremse Mittel für eine substanzielle Ausweitung der öffentlichen Investitionen. Zum anderen sinkt aufgrund der rückläufigen Bevölkerungszahl der Gesamtbedarf an staatlicher Infrastruktur.

**DEMOGRAFISCHE ENTWICKLUNG**

Heute (2013) leben in Deutschland etwa 81 Mio. Einwohner. Die Einwohnerzahl Deutschlands wird in Zukunft spürbar schrumpfen und gemäß der 12. Vorausberechnung des Statistischen Bundesamts (Variante 1-W2) 2040 nur noch knapp 77 Millionen betragen (StBA 2009); das sind gut 4 Mio. Einwohner weniger. Darüber hinaus kommt es zu deutlichen Verschiebungen in der Altersstruktur (Abbildung 4).

Während der Anteil der unter 18-Jährigen von ca. 16% im Jahr 2014 auf unter 14% im Jahr 2040 zurückgeht, steigt der Anteil der über 65-Jährigen deutlich von gut 21% auf 31%. Der Anteil der Personen in den mittleren Altersgruppen (18 - 64 Jahre) an der Gesamtbevölkerung wird bis 2040 von aktuell etwa 63% auf 55% fallen. Treiber dieser Veränderungen sind die niedrige Geburtenrate und die weiterhin stetig steigende Lebenserwartung in der Bundesrepublik.

Seit 1969 wird die bestandserhaltende Geburtenrate von 2,1 Kindern je Frau nicht mehr erreicht. 2008 betrug die Geburtenrate je Frau nur noch 1,38 und lag damit selbst im europäischen Vergleich auf sehr niedrigem Niveau. Es ist zu erwarten, dass sich die Geburtenrate im Prognosezeitraum selbst bei optimistischer Einschätzung nur geringfügig erhöht, da die steigende Erwerbsbeteiligung von Frauen einen dämpfenden Effekt auf die Fertilität hat. Zudem kann auch eine leicht steigende Geburtenrate bei einer sinkenden Anzahl potenzieller Mütter die Schrumpfung der Bevölkerung nicht aufhalten.

Die Lebenserwartung ist im Laufe der letzten Jahrzehnte spürbar angestiegen. Seit den frühen 60er Jahren des vergangenen Jahrhunderts ist die durchschnittliche Lebenserwartung bei Geburt um mehr als 10 Jahre auf derzeit 77,7 Jahre (Männer) bzw. 82,7 Jahre (Frauen) angewachsen. Der medizinische Fortschritt, körperlich weniger belastende Arbeitsbedingungen und der zunehmende Wohlstand werden dazu beitragen, dass die Lebenserwartung in Zukunft weiter ansteigt. 2040 liegt die Lebenserwartung von Männern bei der Geburt nach Berechnungen des

Statistischen Bundesamts bei 82,4 Jahren, die von Frauen bei 87 Jahren. Die erwartete positive Nettozuwanderung wird die Schrumpfung sowie den Alterungsprozess abfedern, aber nicht aufhalten. Seit 1950 betrug der durchschnittliche Saldo aus Zuwanderung nach und Abwanderung aus Deutschland jährlich rund 200.000. Da die nach Deutschland zuziehenden Personen im Schnitt jünger sind als die bereits in Deutschland wohnenden Menschen, bremst die Migrationsbewegung den Alterungsprozess der in Deutschland lebenden Bevölkerung.

Inwieweit die gegenwärtig überdurchschnittliche Nettozuwanderung von rund 400.000 Personen (2013) anhalten wird, ist fraglich. Nach Überwindung der Krise im Euroraum dürfte eher von einer Normalisierung der Nettozuwanderung auszugehen sein. Perspektivisch wird sich die Zuwanderung wieder auf das langjährige Durchschnittsniveau einpendeln.

Der demografische Wandel wirkt sich spürbar auf die deutsche Volkswirtschaft und dabei insbesondere auf den Arbeitsmarkt aus. Der Rückgang der Bevölkerung im erwerbsfähigen Alter, insbesondere durch das Ausscheiden der Babyboomer-Generation der 1960er Jahrgänge, verknüpft zunehmend das Arbeitsangebot. Trotz einer stärkeren Ausschöpfung des Arbeitskräftepotenzials - mehr weibliche und ältere Erwerbspersonen - schrumpft die Zahl der Erwerbstätigen.

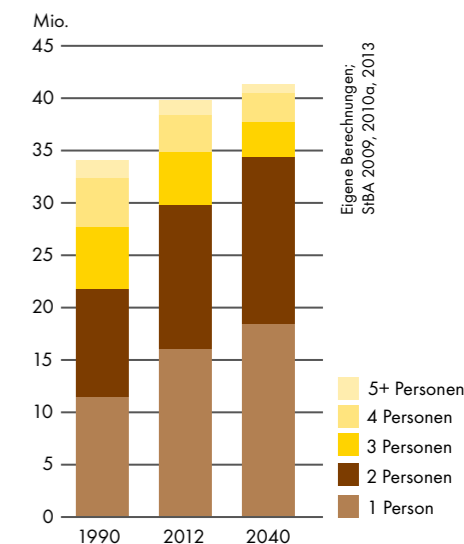
Die soziodemografischen Veränderungen haben Konsequenzen für die gesamtwirtschaftliche Ersparnis und den Konsum. Einerseits werden jüngere Bevölkerungsgruppen im Zuge verstärkter privater Altersvorsorge eine höhere Sparneigung zeigen. Andererseits verändert sich die Sparneigung im Lebenslauf.

Während junge Menschen in der Regel eine relativ hohe Sparquote aufweisen, geht diese mit dem Alter nach Beendigung der Erwerbsphase zurück. Eine alternde Gesellschaft wird unter dem Strich vermehrt konsumieren und weniger sparen. Zudem kann die intergenerative Umverteilung von Vermögensbeständen von Alt zu Jung die Sparquote zusätzlich dämpfen. All dies führt zu positiven Auswirkungen auf den Binnenkonsum.

**PRIVATE HAUSHALTE**

In Deutschland leben heute rund 40 Mio. private Haushalte. Die Anzahl der Privathaushalte wird in Deutschland trotz sinkender Bevölkerungszahl in Zukunft noch zunehmen, und zwar um 1,3 Millionen auf rund 41,3

**5/PRIVATHAUSHALTE NACH HAUSHALTSGRÖSSE**



Millionen im Jahr 2040 (StBA 2010a).<sup>1)</sup> Ursächlich für diese Entwicklung ist der anhaltende Trend zu immer kleineren Haushalten.

Während 1990 auf einen Haushalt noch durchschnittlich 2,3 Personen kamen, ist dieser Wert inzwischen auf derzeit zwei Personen je Haushalt gesunken. 2040 wird die durchschnittliche Haushaltgröße nur noch 1,8 Personen je Haushalt betragen. Gleichzeitig steigen die Bevölkerungsanteile, die in Ein- bzw. Zweipersonenhaushalten leben, von heute 20% auf 24% bzw. von 34% auf 42% (Abbildung 5).

Getrieben wird dieser Prozess zum einen durch die - infolge der niedrigen Geburtenraten - sinkende Zahl der Haushalte mit Kindern sowie zum anderen durch den Bedeutungsverlust klassischer Familienstrukturen. Langfristig wird die schrumpfende Bevölkerungszahl den Effekt rückläufiger Haushaltsgrößen überwiegen.

Aufgrund der regional sehr unterschiedlichen Entwicklungen setzt dieser Effekt in einigen Bundesländern schon früher ein. So geht die Anzahl der Haushalte in Ostdeutschland bereits seit 2006 zurück.

<sup>1)</sup> Die Ergebnisse des Zensus zu den Haushaltsentwicklungen liegen derzeit noch nicht vor; die hier dargestellten Entwicklungen basieren auf der Haushaltsvorausberechnung 2010 und der 12. Bevölkerungsvorausberechnung (2009). Analog zur Bevölkerungsentwicklung dürfte auch die Anzahl der Haushalte (leicht) abgenommen haben. Der Haushaltsfortschreibung bis zum Jahr 2040 liegt die Trendvariante zugrunde.

## 3

WIRKUNGSHYPOTHESEN  
ZU AUTO-MOBILITÄT

Die Gesamtmobilität der Bevölkerung verteilt sich auf verschiedene Verkehrsmittel (Fußwege, Fahrrad, motorisierter Individualverkehr und öffentliche Verkehrsmittel). Der Pkw ist nur ein Mittel, um mobil zu sein. Die Pkw-Nutzung wird entsprechend beeinflusst von der Entwicklung des Mobilitätsverhaltens insgesamt und von den Entwicklungen der Nutzung anderer Verkehrsmittel.

Das Mobilitätsverhalten insgesamt und auch die Wahl der Verkehrsmittel werden dabei von verschiedenen sozioökonomischen Einflussfaktoren bestimmt. Neben dem Alter und dem Geschlecht spielen das Einkommen, der Familienstand und der Haushaltstyp (Anzahl der Personen und Kinder im Haushalt), das Bildungsniveau, der Erwerbsstatus und die Wohnregion eine wichtige Rolle. Die sozioökonomischen Faktoren bestimmen zudem die Konsumgewohnheiten, die Ausgaben für Mobilität und damit auch für das Automobil.

In ihrer Wirkungsweise können die Einflussfaktoren auf Auto-Mobilität unterschieden werden in Alters-, Altersstruktur- und in Kohorteneffekte. Alterseffekte sind etwa Verhaltensänderungen, die sich mit zunehmenden Alter von Personen einstellen. Unter Altersstruktureffekten versteht man Effekte, die sich aus Veränderungen in der Altersstruktur der gesamten Bevölkerung ergeben. Unter einer Kohorte versteht man schließlich in der Bevölkerungsökonomie (Demografie) einen Geburtenjahrgang. Kohorteneffekte ergeben sich, wenn einzelne Geburtenjahrgänge (zum Beispiel Geburtsjahr 1990) ein anderes Mobilitätsverhalten aufweisen als andere Jahrgänge (beispielsweise Geburtsjahr 1960). Die Berücksichtigung von Kohorteneffekten ist insbesondere deshalb wichtig, weil einzelne Kohorten ein bestimmtes Mobilitätsverhalten aufweisen, das sie oft über ihren ganzen Lebensweg beibehalten.

So verändert sich im Zeitverlauf durch den Kohorteneffekt das Mobilitätsverhalten einzelner Altersgruppen, das in der

Mobilitätsforschung früherer Jahre oftmals als konstant betrachtet wurde.

Für Deutschland wie für andere Industrieländer ist ein Prozess der demografischen Alterung zu beobachten – die Einwohner werden im Durchschnitt immer älter (Abbildung 4). Entsprechend der Veränderung der Altersstruktur ist davon auszugehen, dass angesichts einer in der Vergangenheit geringeren Pkw-Nutzung im Alter die Pkw-Nutzung insgesamt bei einer alternden Gesellschaft zurückgeht. Dem Altersstruktureffekt entgegen wirkt jedoch der Kohorteneffekt: Die heute 60- bis 70-Jährigen nutzen auch im Alter häufiger einen Pkw als frühere gleichaltrige Generationen, da sie mit dem Auto aufgewachsen sind, was das Mobilitätsverhalten langfristig ändert.

Zudem gibt es Entwicklungen, die das Mobilitätsverhalten einzelner Altersgruppen langfristig ändert. Beispielsweise verschiebt eine länger andauernde Ausbildungsphase tendenziell den Zeitpunkt nach hinten, zu dem ein eigenes Auto angeschafft werden kann. Zusätzlich beeinflussen sich verändernde Rahmenbedingungen das Mobilitätsverhalten. So ermöglicht es eine bessere gesundheitliche Versorgung älteren Menschen heute, länger gesund und aktiv zu sein als früher.

Eine neuere Entwicklung ist eine vor allem in Deutschland zu beobachtende Trendänderung im Mobilitätsverhalten junger Menschen. Nachdem das eigene Auto für Jugendliche lange mit dem Traum von Autonomie gleichgesetzt wurde, verliert es seit einigen Jahren zunehmend an Bedeutung für die Mobilität junger Menschen (Kuhnimhof et al. 2013, ifmo 2011 & 2013).

Eine spannende Frage ist, wie nachhaltig bzw. dauerhaft diese Verhaltensänderungen jüngerer Menschen sind und wie sich diese im Zeitverlauf auf das Mobilitätsverhalten der Gesamtbevölkerung auswirken.

Im Folgenden sollen wichtige sozioökonomische Einflussfaktoren und ihre Wirkungsrichtung auf Auto-Mobilität untersucht werden. Wichtige Erhebungs- und Messgrößen für Auto-Mobilität sind zum einen die Verfügbarkeit und Nutzungshäufigkeit von Pkw, zum anderen Pkw-Motorisierung und Pkw-Fahrleistungen. Pkw-Verfügbarkeit und -Nutzung geben die Ausstattung der Bevölkerung oder von Personen und Haushalten mit Pkw bzw. deren Nutzung an. Dabei beeinflusst die Pkw-Verfügbarkeit maßgeblich die Entscheidung, mit dem Pkw mobil zu sein.

Die Motorisierung wird in der Regel als Zahl der zugelassenen Pkw bezogen auf die Bevölkerung oder je 1.000 Einwohner ausgewiesen; die Fahrleistungen entweder als zurückgelegte Personenkilometer oder Fahrzeugkilometer. Da Pkw auch von anderen Personen als dem Eigentümer genutzt werden können, ist die Pkw-Verfügbarkeit in der Regel höher als die durchschnittliche Pkw-Motorisierung.

Während sich fahrzeugstatistische Erhebungen des Kraftfahrt-Bundesamts (zum Beispiel zum Pkw-Bestand) auf die formalrechtliche Zuordnung konzentrieren, erfassen Mobilitätshebungen in der Regel die Pkw-Verfügbarkeit und die Pkw-Nutzung.

Zur Diskussion sozioökonomischer Einflussfaktoren auf Auto-Mobilität sowie zur Charakterisierung des Mobilitätsverhaltens werden vor allem die Pkw-Verfügbarkeit, gegebenenfalls zusätzlich die Gründe für Mobilität

## MOBILITÄTSVERHALTEN UND DATENGRUNDLAGEN

Studien und Analysen zum Mobilitätsverhalten für Deutschland basieren meist auf den beiden zentralen Verkehrsbefragungen *Deutsches Mobilitätspanel (MOP)* und *Mobilität in Deutschland (MiD)*. Auswertungen des MOP liefern sowohl die jährlichen Berichte, etwa Streit et al. 2014 (aktuelles Erhebungsjahr 2012) als auch verschiedene Studien (Kunert et al. 2012). Da die Erhebung seit 1994 als Längsschnittstudie durchgeführt wird, können auf dieser Datenbasis langfristige Trends und Veränderungen von Alltagsmobilität und Pkw-Fahrleistung dargestellt werden. Daneben bietet die Querschnitterhebung MiD, die bisher 2002 und 2008 durchgeführt wurde, eine gute Datengrundlage zur Analyse des Mobilitätsverhaltens in Deutschland, jedoch nicht bis zum aktuellen Rand.

Unter anderem auf Basis dieser Datensätze hat sich das Institut für Mobilitätsforschung (ifmo) in der jüngeren Vergangenheit gezielt mit der Frage der Mobilität junger Menschen beschäftigt (ifmo 2011 und 2013; außerdem Kuhnimhof et al. 2013). Das ifmo beschäftigt sich zudem mit Fragen der zukünftigen Entwicklung von Mobilität (ifmo 2008 und 2010).

Darüber hinaus bietet das sozio-ökonomische Panel (SOEP) des Deutschen Instituts für Wirtschaftsforschung (DIW) vielfältige Analysemöglichkeiten. Das SOEP ist eine Wiederholungsbefragung bei über 12.000 privaten Haushalten. Es stellt die zentrale Quelle für sozioökonomische Analysen in Deutschland dar und ermöglicht aufgrund der Panelstruktur, das heißt immer dieselben befragten Familien und Haushalte, auch Längsschnittanalysen. Durch die jährlichen Erhebungswellen liegen stets Daten bis zum aktuellen Rand vor (letztes Erhebungsjahr 2012). Zudem kann als Messgröße für Auto-Mobilität die Pkw-Verfügbarkeit im Haushalt abgebildet werden.

Informationen über die Entwicklung der Ausgaben für Mobilität im Verhältnis zu den privaten Konsumausgaben liefern die Einkommens- und Verbrauchsstichprobe (EVS) bzw. die Laufenden Wirtschaftsrechnungen (LWR). Bei der EVS handelt es sich um eine amtliche Quotenstichprobe zur Entwicklung der Lebensverhältnisse privater Haushalte; die EVS wird alle fünf Jahre durchgeführt – zuletzt 2013. Die Ergebnisse werden teilweise erst zwei Jahre nach Erhebung veröffentlicht. Die LWR sind eine (kleinere) Unterstichprobe der EVS, Daten zu Einkommenssituation und Konsumverhalten werden kontinuierlich erhoben.



(Wegezwecke) oder die Nutzungsintensität (Häufigkeit der Nutzung eines Verkehrsträgers) herangezogen, um Entwicklungen weiter zu differenzieren und zu erklären.

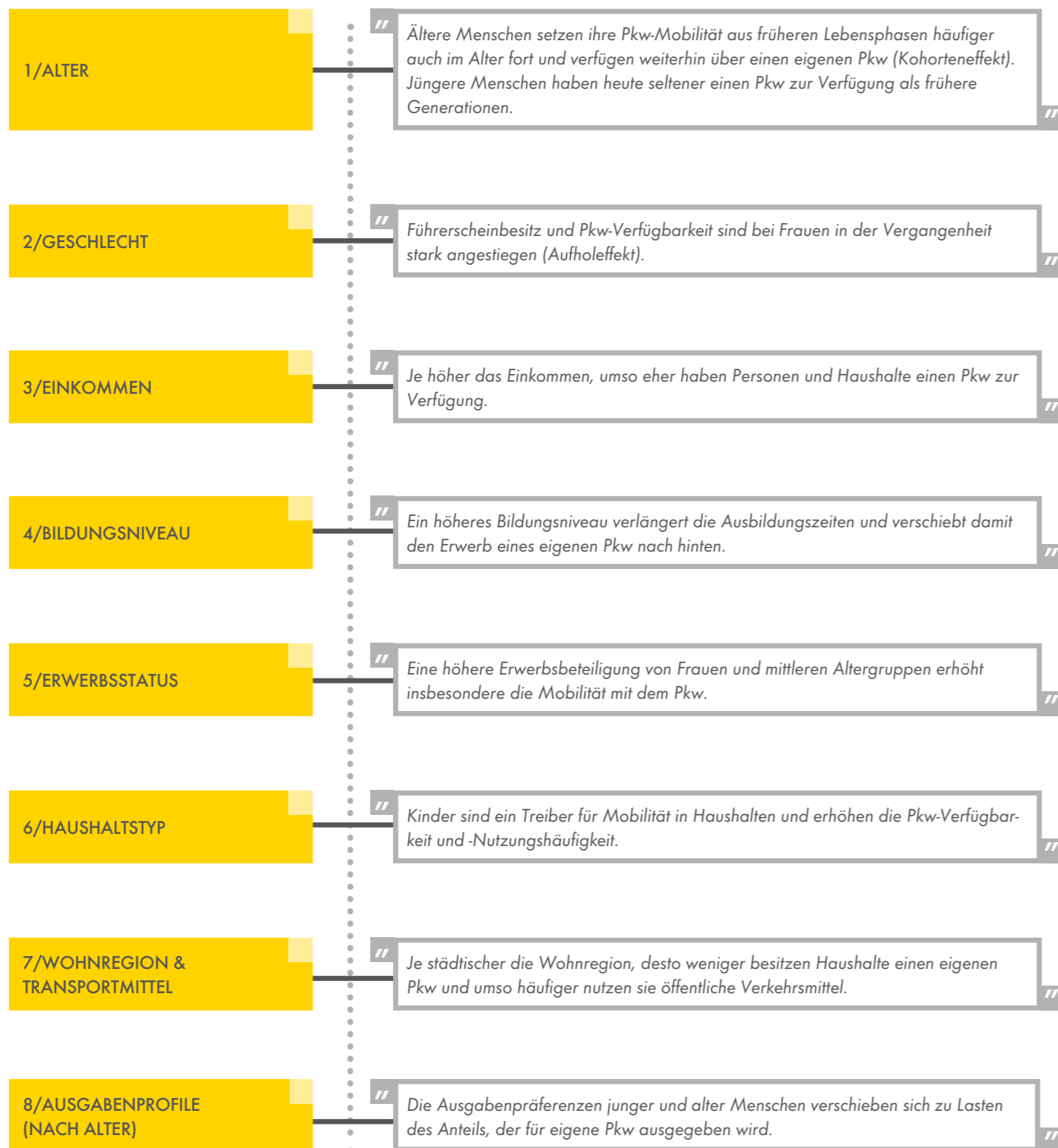
Über vier Fünftel aller Haushalte verfügen heute über Zugang zu (mindestens) einem Pkw. Auf individueller Ebene haben über 70% aller Erwachsenen sowie pro Kopf rund 60% aller Einwohner Zugang zu einem Pkw. Insgesamt ist über die letzten 10 Jahre eine

langsame Zunahme bei der Pkw-Verfügbarkeit zu beobachten (Streit et al. 2014). Hinter dieser durchschnittlichen Entwicklung verbergen sich für unterschiedliche Bevölkerungsgruppen zum Teil starke und auch gegenläufige Entwicklungen. Daher werden die Mobilitätskennzahlen getrennt nach Altersgruppen und Geschlecht betrachtet. Darüber hinaus stellt sich die Frage, welche sozioökonomischen Einflussfaktoren auf die Pkw-Verfügbarkeit und das Mobilitätsverhalten insgesamt wirken und

wie diese sich in der Vergangenheit entwickelt haben: Ist die Zunahme der Pkw-Verfügbarkeit auf steigende Einkommen oder eine erhöhte Erwerbsbeteiligung zurückzuführen? Welchen Einfluss hat die Entwicklung hin zu mehr Einpersonenhaushalten auf die Pkw-Mobilität? Zu den folgenden zentralen sozioökonomischen Einflussfaktoren auf die Pkw-Verfügbarkeit werden Hypothesen formuliert, die im Folgenden genauer untersucht werden.

MÖGLICHE EINFLUSSFAKTOREN

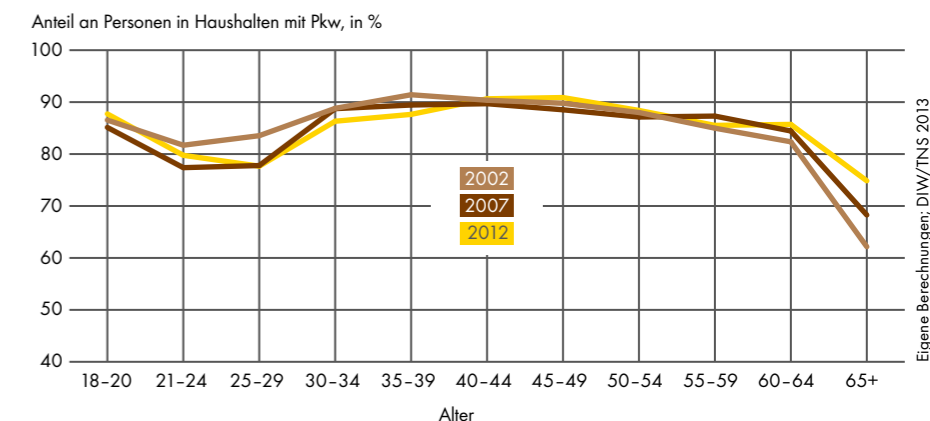
VERMUTETER WIRKUNGSZUSAMMENHANG



ALTER UND GESCHLECHT

Abbildung 6 zeigt den Anteil an Personen in Haushalten mit Pkw nach Altersgruppen. Für die Altersgruppen der 21- bis 39-Jährigen ist der Anteil der Personen in Haushalten mit Pkw gesunken, die gelbe Linie (für das Jahr 2012) liegt unterhalb der hellbraunen Linie (für 2002). Für die Altersgruppen der 40- bis 54-Jährigen hat sich über die vergangenen 10 Jahre wenig verändert. Veränderungen sind jedoch bei den über 55-Jährigen zu beobachten: Die Pkw-Verfügbarkeit liegt 2012 deutlich über den Zahlen von 2002. Bei den über 65-Jährigen bleibt das Niveau allerdings deutlich niedriger als bei den jüngeren Altersklassen.

6/PKW-VERFÜGBARKEIT NACH ALTERSGRUPPEN



Der Anstieg der Pkw-Verfügbarkeit in den stark besetzten älteren Bevölkerungsgruppen kann zudem den Rückgang in den immer weniger stark besetzten jungen Altersgruppen überkompensieren. Daneben spiegeln die Entwicklungen der Pkw-Verfügbarkeit die Entwicklungen des Mobilitätsverhaltens insgesamt wider, gemessen an der Anzahl der zurückgelegten Wege pro Tag: Während die Jüngeren heute etwas weniger mobil sind, steigt die Mobilität der Älteren im Vergleich zu früheren Jahren an (Infas/DLR 2010a).

Pkw-Motorisierung. Dieser Aufholeffekt wird auch bei der ältesten Altersgruppe deutlich. Der Anstieg der Pkw-Verfügbarkeit bei Frauen fällt dort deutlich größer aus als bei den Männern. Allerdings liegt die Pkw-Verfügbarkeit dort auch 2012 bei den Männern noch deutlich über derjenigen der Frauen (DIW/TNS 2013).

die letzten 10 Jahre. Grund dafür dürfte sein, dass die meisten noch im elterlichen Haushalt leben und den Pkw der Eltern zur Verfügung haben. Anhand der verschiedenen Einflussfaktoren auf die Pkw-Verfügbarkeit lassen sich hier unterschiedliche Wirkungszusammenhänge identifizieren. Um eine homogenere Vergleichsgruppe zu erhalten, fokussiert die Analyse im Folgenden auf die Haushaltsvorstände eines Haushalts und damit auf Haushalte statt Personen. Dadurch wird in den jungen Altersgruppen die Differenzierung möglich von denjenigen, die noch bei den Eltern leben und denen, die ihren eigenen Haushalt haben.

Innerhalb der einzelnen Altersgruppen zeigen sich darüber hinaus deutliche Unterschiede zwischen Frauen und Männern. Bei den jüngeren Frauen fällt der Rückgang der Pkw-Verfügbarkeit geringer aus als bei den jüngeren Männern. Hier überlagern sich Effekte des Bedeutungsverlusts von Pkw bei den Jüngeren mit dem Aufholeffekt der weiblichen

Sowohl hinsichtlich des Pkw-Besitzes als auch der Nutzung sind Frauen und Ältere die Gruppen mit dem deutlichsten Bedeutungsgewinn in Deutschland (Kunert et al. 2012). Beeinflusst werden diese Entwicklungen jedoch maßgeblich von sozioökonomischen Merkmalen wie Einkommen, Erwerbsstatus und Bildungsniveau.

Für die jüngste Altersgruppe der 18- bis 20-Jährigen zeigt Abbildung 6 nur wenig Veränderung bei der Pkw-Verfügbarkeit über

Zudem ist grundsätzlich davon auszugehen, dass es vor allem die Lebenssituation des Haushaltsvorstands ist, die die Anschaffung eines Pkws für einen Haushalt maßgeblich bestimmt.

**1** Die aufgestellte Hypothese, dass ältere Menschen heute auch im Alter häufiger einen Pkw zur Verfügung haben als noch vor 10 Jahren und entsprechend auch nutzen, kann bestätigt werden. Jüngere Menschen haben heute hingegen seltener einen Pkw zur Verfügung als vor 10 Jahren.

**2** Die aufgestellte Hypothese zum Aufholeffekt der Frauen in der Pkw-Verfügbarkeit kann ebenfalls bestätigt werden. Der Aufholeffekt verläuft allerdings in den einzelnen Altersklassen unterschiedlich.



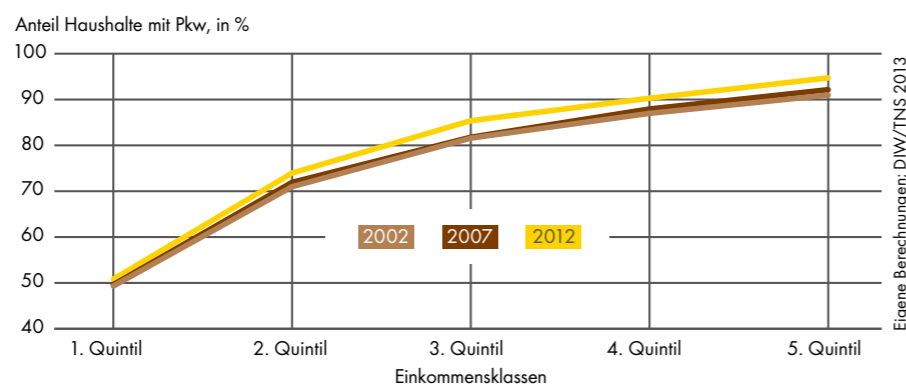
**EINKOMMEN**

Ein Zusammenhang zwischen Pro-Kopf-Einkommen und Pkw-Verfügbarkeit lässt sich für Deutschland auch in sozioökonomischen Querschnittserhebungen belegen: Je höher das Haushaltseinkommen, um so eher besitzen Haushalte einen und auch mehrere Pkw (Infas/DLR 2010a).

Abbildung 7 stellt die Veränderung des Anteils an Haushaltsvorständen mit Pkw-Verfügbarkeit nach Haushaltseinkommensklassen dar. Um bei der Betrachtung des Einflussfaktors Einkommen Größen- und Altersstruktureffekte auf die Pkw-Ausstattung möglichst auszuschließen, werden zunächst so genannte Äquivalenzeinkommen ermittelt. Hierfür wird das verfügbare Haushaltseinkommen mit der Anzahl und dem Alter der Personen des Haushaltes gewichtet. Anschließend werden die Einkommen in fünf Klassen (Quintile) eingeteilt.

Über die letzten 10 Jahre sind nur leichte Änderungen zu verzeichnen. Der Anteil der Haushaltsvorstände mit Pkw im Haushalt ist im untersten Einkommensquintil am geringsten und weitgehend konstant geblieben, während er in den restlichen Quintilen etwas angestiegen ist.

7/PKW-VERFÜGBARKEIT NACH EINKOMMENSKLASSEN\*



\*Verfügbares Haushaltseinkommen, gewichtet nach Anzahl und Alter der Haushaltsmitglieder (Äquivalenzeinkommen)

Dieser deutliche Zusammenhang zwischen Pkw-Verfügbarkeit und Einkommen zeigt sich auch über die Altersgruppen.

Da das Haushaltseinkommen in der Regel mit dem Alter des Haushaltsvorstands über das Erwerbsleben ansteigt, ist die Pkw-Verfügbarkeit in Haushalten von unter 30-Jährigen, die alleine und nicht mehr bei ihren Eltern leben, besonders niedrig.

Mit dem Einstieg ins Erwerbsleben und zunehmender Berufserfahrung steigt das

Einkommen an und damit auch die Wahrscheinlichkeit, einen Pkw zu besitzen. Entscheidend dabei beeinflusst wird der Kauf eines eigenen Pkw vom Eintritt in das Erwerbsleben, der sich in Folge längerer Ausbildungszeiten (Studium) heute vielfach nach hinten verschiebt.

3

Die aufgestellte Hypothese, dass mit dem Einkommen die Pkw-Verfügbarkeit steigt, kann bestätigt werden.

**BILDUNGSNIVEAU**

Die Einkommensentwicklung über den Lebensverlauf hängt maßgeblich vom Bildungsniveau ab. Über die letzten Jahre ist in Deutschland eine deutliche Zunahme des Anteils an Hochqualifizierten zu verzeichnen. Der Anteil der Personen ab 18 Jahren mit einem hohen Bildungsabschluss – wie Universität, Fachhochschule oder Berufsakademie – ist von 2002 bis 2012 von rund 21 auf 26 % angestiegen (DIW/TNS 2013).

Diese Entwicklung bringt eine Verlängerung der durchschnittlichen Ausbildungszeiten mit sich und damit einen verspäteten Einstieg ins Erwerbsleben. Dies erklärt teilweise die rückläufigen Zahlen im Pkw-Besitz bei jungen Menschen, deutet aber im Zeitablauf auf eine mit dem ausbildungsbedingt verbesserten Einkommenspotenzial steigende Pkw-Besitz-Wahrscheinlichkeit hin.

Die Darstellung der Pkw-Verfügbarkeit von Haushaltsvorständen nach dem Bildungsniveau belegt grundsätzlich einen deutlich positiven Zusammenhang: Je höher der Bildungsabschluss, umso höher der Anteil derer, die

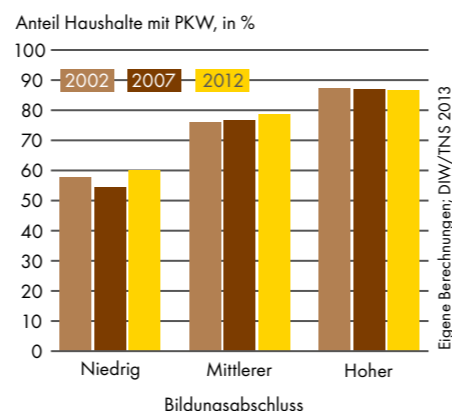
einen Pkw besitzen. Dabei überlagern sich die Zusammenhänge des Bildungsniveaus mit denen der Einkommen. Akademiker-Haushalte erzielen im Schnitt deutlich höhere Einkommen als Nichtakademiker-Haushalte. Ohne den Einkommenseffekt haben Akademiker-Haushalte hingegen eine geringere Pkw-Besitzwahrscheinlichkeit (ifmo 2011).

Abbildung 8 zeigt, dass die Pkw-Verfügbarkeit in Haushalten mit hoher Qualifikation über die letzten Jahre stabil geblieben ist während sie in Haushalten mit mittlerem Bildungsabschluss etwas angestiegen ist.

Neben den Effekten auf die Einkommenssituation über den Lebensverlauf und die Höhe der Einkommen generell beeinflusst das Bildungsniveau das Erwerbs- und damit das Mobilitätsverhalten.

Insbesondere bei Frauen haben das steigende Qualifikationsniveau und die zunehmende Erwerbsbeteiligung zu einem Anstieg sowohl der Anzahl als auch der Länge der im Berufsverkehr zurückgelegten Wege geführt (ifmo 2008).

8/PKW-VERFÜGBARKEIT NACH BILDUNGSNIVEAU



4

Ein höheres Bildungsniveau verlängert die Ausbildungszeiten und verschiebt den Erwerb eines eigenen Pkws. Die aufgestellte Hypothese kann angenommen werden.

**ERWERBSSTATUS**

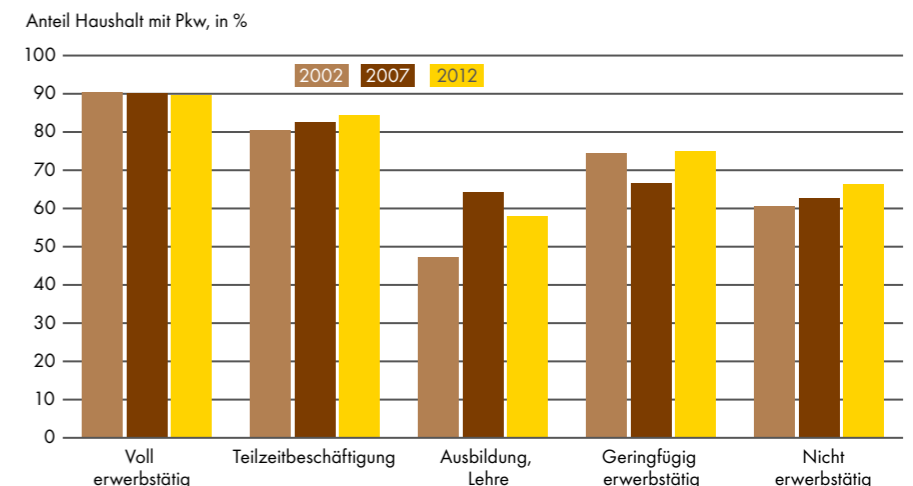
Die Verteilung des Erwerbsstatus über die Altersgruppen zeigt, dass der Anteil der Nicht-Erwerbstätigen bis zum Alter von 50 Jahren sinkt und dann wieder zu steigen beginnt. Gegenläufig verhält es sich mit den Voll- und Teilzeiterwerbstätigen.

Abbildung 9 macht deutlich, dass die Erwerbstätigkeit des Haushaltsvorstandes die Verfügbarkeit eines Pkws im Haushalt deutlich beeinflusst. Befindet sich dieser noch in der Ausbildung oder ist nur geringfügig oder gar nicht erwerbstätig, sinkt die Wahrscheinlichkeit deutlich, dass der Haushalt einen Pkw zur Verfügung hat.

Über die letzten Jahre zeigt sich eine stabile Entwicklung der Pkw-Verfügbarkeit bei Haushalten mit in Vollzeit erwerbstätigen Haushaltsvorständen. Bei Haushalten, in denen der Haushaltsvorstand in Teilzeit oder gar nicht beschäftigt ist, sind hingegen leichte Anstiege zu verzeichnen.

Zudem hat in den letzten Jahren die zunehmende Erwerbstätigkeit von Frauen deren Aufhollekt in Bezug auf Pkw- und Führerschein-Besitz erheblich befördert. Weil Frauen mehr und öfter arbeiten, besitzen sie auch

9/PKW-VERFÜGBARKEIT NACH ERWERBSSTATUS



öfter einen Pkw selbst. Die zunehmende Erwerbstätigkeit in der mittleren Altersgruppe bestimmt nicht nur die Entscheidung einen Pkw zu besitzen, sondern auch die Wegezwecke. In der mittleren Altersphase

zwischen 40 und 60 Jahren ist der Anteil an Wegen zur Arbeit und an dienstlichen Wegen am höchsten und der Pkw ist für diese spezifischen Wege das wichtigste Verkehrsmittel (Infas/DLR 2010b).

5

Die aufgestellte These, dass eine höhere Erwerbsbeteiligung insbesondere die Mobilität mit dem Pkw erhöht, kann bestätigt werden.

**HAUSHALTSTYP**

In der mittleren Lebensphase steigt nicht nur der Anteil der Erwerbstätigen, sondern auch die Wahrscheinlichkeit, dass Kinder im Haushalt leben, was die Pkw-Anschaffung von Haushalten ebenfalls stark beeinflusst.

In Deutschland insgesamt geht in den letzten Jahren jedoch der Trend zu immer mehr Einpersonenhaushalten und weniger Familien. Der Anteil der Personen ab 18 Jahren, die in Paarfamilien oder in alleinerziehenden Familien leben (ob als Kind oder als Eltern), ging von 1996 auf 2012 von 44 auf 38 % zurück (siehe Abbildung 10).

Entsprechend hoch war der Anstieg bei den Haushalten ohne Kinder. Im Zuge des demografischen Wandels wird sich diese Entwicklung auch zukünftig fortsetzen.

Der angesprochene Rückgang der Personen, die in Familien leben, zeigt sich bei allen Altersgruppen zwischen 21 und 49 Jahren. Insbesondere bei den jüngeren sind diese Entwicklungen aber auch Ausdruck einer späteren Familiengründung.

10/VERTEILUNG DER PERSONEN AB 18 JAHREN NACH HAUSHALTSTYP

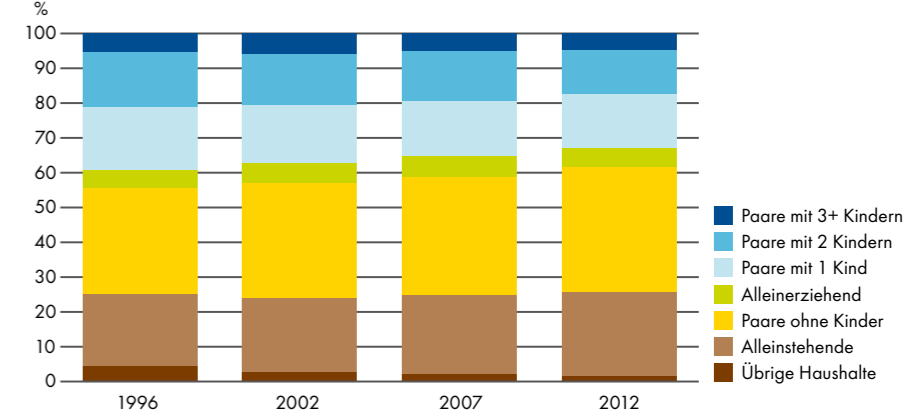


Abbildung 11 auf der nächsten Seite zeigt die Entwicklung des Anteils an Haushaltsvorständen in Haushalten mit Pkw nach Haushaltstypen. Die Pkw-Verfügbarkeit ist in Haushalten mit Kindern mit über 90 % am höchsten.

Allerdings hat sich an den Zahlen der Paarfamilien in den letzten Jahren wenig verändert. Alleinstehende, Paare ohne Kinder und auch Alleinerziehende besitzen im Jahr 2012

im Vergleich zum Jahr 2002 jedoch häufiger einen Pkw.

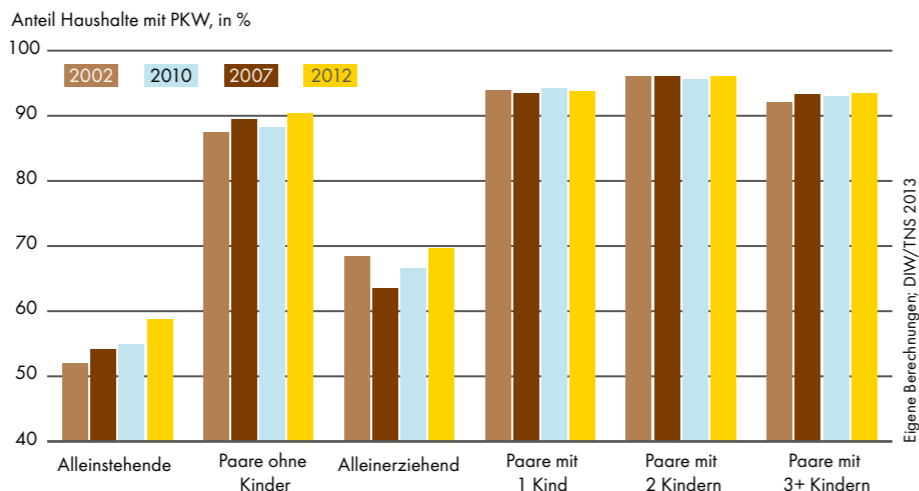
Betrachtet man zusätzlich die Pkw-Verfügbarkeit von Haushaltsvorständen in Paarfamilien nach dem Alter des jüngsten Kindes im Haushalt, zeigt sich, dass zwischen Familien, deren jüngstes Kind unter 6 Jahre alt ist und denjenigen mit jüngstem Kind zwischen 6 und unter 12 Jahren in den letzten Jahren ein

zunehmender Unterschied festzustellen ist. Die Pkw-Verfügbarkeit von Paarfamilien mit jungen Kindern geht zurück während die von Paarfamilien mit jüngstem Kind zwischen 6 und 12 ansteigt (DIW/TNS 2013). Dies kann ein weiterer Hinweis darauf sein, dass der Erwerb eines eigenen Pkws im Lebensverlauf zunehmend nach hinten verschoben wird.

Die Zahlen zur Pkw-Verfügbarkeit nach Haushaltstypen (Abbildung 11) machen ebenfalls deutlich, dass ein großer Unterschied zwischen Alleinstehenden und Paarhaushalten ohne Kinder besteht. Lagen die Quoten bei den Alleinstehenden 2012 bei knapp 60%, waren es bei den Paaren ohne Kinder nahezu 90%.

Auffallend bei den Alleinstehenden sind zudem Unterschiede in der Pkw-Verfügbarkeit nach Alter. Am seltensten besitzen sehr junge Einpersonenhaushalte unter 30 und ältere über 60 Jahren einen eigenen Pkw. Dabei sind junge Menschen in Einpersonenhaushalten deutlich mobiler als alte Menschen, die alleine leben. Bei den Jungen spielt lediglich der Pkw für das Mobilitätsverhalten keine

### 11/PKW-VERFÜGBARKEIT NACH HAUSHALTSTYP



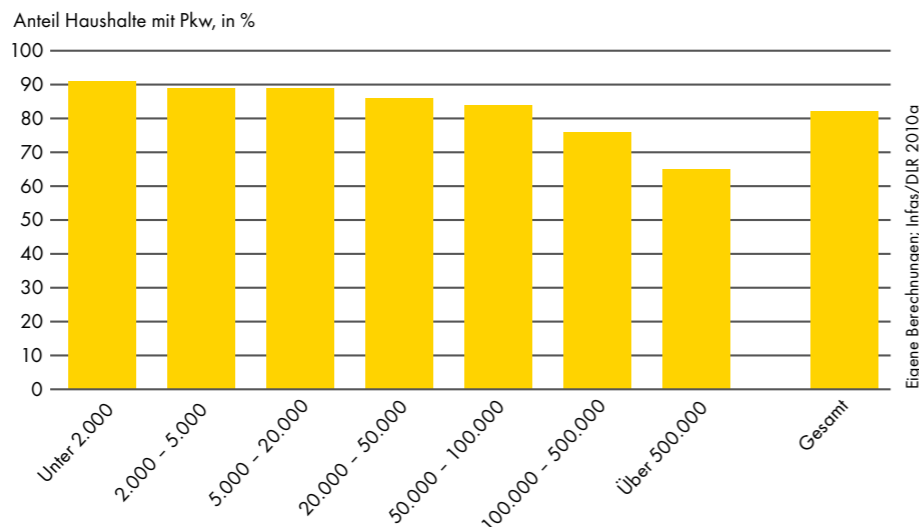
oder noch keine große Rolle. Ähnliche Aussagen wie zur Pkw-Verfügbarkeit können auch zur Nutzungshäufigkeit gemacht werden: Haushalte, in denen mindestens ein Kind unter 14 Jahren lebt, weisen eine besonders hohe Nutzungshäufigkeit von Pkw auf (Infas/DLR 2010b).

**6** Die aufgestellte These, dass Kinder ein Treiber von Pkw-Mobilität sind und die Verfügbarkeit sowie Nutzung von Pkw erhöhen, kann bestätigt werden.

### WOHNREGION & VERFÜGBARE TRANSPORTMITTEL

Das Grundbedürfnis an Mobilität, gemessen am Anteil mobiler Personen, ist zunächst unabhängig von der Wohnregion gleich stark ausgeprägt. Allerdings legen Bewohner in ländlicheren Regionen längere Strecken zurück, sind dabei aber weniger lange unterwegs als Personen in städtischen Gebieten. Die Wahl verschiedener Verkehrsmittel hängt unter anderem von der Entfernung ab. Wer stärker in der Nähe seines Wohnbereichs oder im städtischen Umfeld aktiv ist, geht häufiger zu Fuß, nutzt das Fahrrad oder die öffentlichen Verkehrsmittel. Gleichzeitig ist der öffentliche Verkehr in stark verdichteten Regionen besser ausgebaut (Infas/DLR 2010a, Kunert/Radke 2012).

### 12/PKW-VERFÜGBARKEIT NACH GEMEINDEGRÖSSE



öffentlichen Nahverkehrs spiegelbildlich mit der Gemeindegröße ansteigt. Der Anteil der Haushalte, die angeben, aus Einstellungsgründen keinen Pkw zu besitzen oder weil sie ihn nicht brauchen (etwa ein Fünftel der Haushalte ohne Pkw), leben eher in Kernstädten. Zudem sind es eher junge Menschen in urbanen Regionen, die zunehmend auf den öffentlichen Verkehr und das Fahrrad setzen (Infas/DLR 2010b).

**7** Die aufgestellte These, dass die Pkw-Verfügbarkeit mit der Besiedlungsdichte der Wohnregion abnimmt und gleichzeitig die Nutzung der öffentlichen Verkehrsmittel zunimmt, kann bestätigt werden.

### AUSGABENPROFLE (NACH ALTER)

Mit dem Einkommen steigt nicht nur die Zahl der Pkw pro Einwohner; auch die Ausgaben je Haushalt für Verkehr steigen insgesamt und auch anteilig an den gesamten Konsumausgaben (Kunert/Radke, 2012). Im Durchschnitt geben Haushalte heute rund 14% ihrer privaten Konsumausgaben für Verkehrszwecke aus. 88,8% der Verkehrsausgaben werden für den Kauf und Betrieb von Fahrzeugen aufgewendet, 11,2% für öffentliche Verkehrsmittel, wobei rund die Hälfte in den öffentlichen Personennahverkehr geht (StBA 2014b).

Im Vergleich zur Lebenshaltung allgemein hat sich Mobilität in den letzten 20 Jahren überproportional verteuert. Dabei ist der Kostenanstieg für Dienstleistungen des öffentlichen Verkehrs deutlicher ausgefallen als der der Autonutzung.

Die Kosten je Beförderungsleistung liegen für die Nutzung öffentlicher Verkehrsmittel im Durchschnitt über den variablen Kosten der Autonutzung (StBA 2011; Kunert/Radke 2012). Entsprechend zeigen Auswertungen der Laufenden Wirtschaftsrechnungen (LWR), dass der Anteil der Ausgaben für Personenbeförderung und Verkehrsdienstleistungen an allen Verkehrsausgaben in der Vergangenheit angestiegen ist.

Besonders deutlich fällt dieser Anstieg in den Altersgruppen der 35- bis 55-Jährigen und bei den über 80-Jährigen aus. Einen leicht überdurchschnittlichen Anteil an Ausgaben für den öffentlichen Verkehr weisen die 25- bis 35-Jährigen auf. Der ÖV-Anteil liegt bei den über 70-Jährigen deutlich über dem Durchschnitt der Gesamtbevölkerung.

### 13/ANTEIL VERKEHRS-AUSGABEN AM PRIVATEN KONSUM NACH ALTERSGRUPPEN

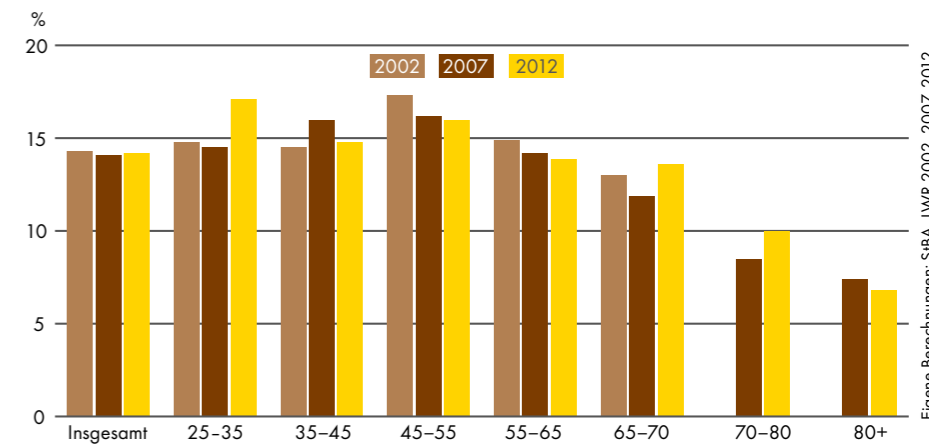


Abbildung 13 zeigt den Anteil der Ausgaben für Verkehr insgesamt an den privaten Konsumausgaben nach dem Alter der Haupteinkommensbezieher über die letzten zehn Jahre auf Basis der Laufenden Wirtschaftsrechnungen (LWR). Der Anteil der Ausgaben für Verkehr an den privaten Konsumausgaben der Altersgruppen bis 55 Jahre liegt über dem Durchschnitt aller Haushalte. Größere Anstiege waren über die letzten 10 Jahre in den Altersgruppen der 25- bis 35-Jährigen und den 65- bis 70-Jährigen festzustellen. Auf Grund zu geringer Fallzahlen und unterschiedlicher Altersgruppenabgrenzungen sind für die unter 25-Jährigen und für die über 70-Jährigen

im Jahr 2002 keine vergleichenden Aussagen möglich. Ältere Daten auf Basis der umfassenderen Einkommens- und Verbraucherstichprobe EVS 2008/2003 zeigen noch deutlicher, dass gerade die Älteren immer mehr Geld für Mobilität ausgeben. Allerdings ist hier der Anteil für Personenbeförderung und Verkehrsdienstleistungen höher. Außerdem weisen die untersten Altersklassen (bis 35 Jahre) die höchsten Anteile bei den Verkehrsausgaben auf (StBA 2010b). Weitere Erkenntnisse dürfte erst die Veröffentlichung der Haushaltsbücher der aktuellen Einkommens- und Verbraucherstichprobe 2013 liefern, die 2015 erfolgen soll.

**8** Zu der These, dass junge Menschen ihre Ausgaben zu Lasten der Ausgaben für Pkw auf andere Bereiche verlagern, kann keine klare Aussage gemacht werden. Der Ausgabenanteil für Verkehr insgesamt an allen Konsumausgaben steigt deutlich bei den 25- bis 35-Jährigen. Für Ältere, insbesondere über 70-Jährige, lassen sich zurzeit (noch) keine statistisch ausreichend gesicherten Aussagen treffen; allerdings spielt der ÖV anteilig hier eine größere Rolle.



# FAZIT

## AUTO-MOBILITÄT – NEUE VERHALTENSWEISEN?

Die untersuchten Wirkungshypothesen zwischen relevanten sozioökonomischen Faktoren und Pkw-Motorisierung bzw. Auto-Mobilität haben zu folgenden Ergebnissen geführt:

In der Vergangenheit haben vor allem die höhere Mobilität älterer Menschen im Zuge des demografischen Wandels und die Aufholeffekte der Frauen im Takt mit einer zunehmenden Bildungs- und Erwerbsbeteiligung als treibende Effekte auf die Pkw-Verfügbarkeit und Pkw-Mobilität gewirkt. Aus jüngeren Jahren mitgenommenes Mobilitätsverhalten bestimmt die Gegenwart. Steigende Einkommen, höhere Bildung und Erwerbstätigkeit sind – bislang jedenfalls und auch mittelfristig noch – weitere relevante Treiber für Pkw-Mobilität.

Allerdings lassen sich Pkw-Besitz und -Mobilität schon aus Platz- und Zeitgründen nicht beliebig ausweiten. Irgendwo bzw. irgendwann sind alle wichtigen Mobilitätswünsche erfüllt oder konkurrieren Auto-Mobilitätswünsche mit anderen Bedürfnissen. Es stellt sich die Frage, was passiert dann? Ändert sich das Mobilitätsverhalten? Oder gibt es gar neue Verhaltensweisen?

Grundlegende Änderungen im Mobilitätsverhalten finden dabei eher im Generationenwechsel statt. Wenn ältere Generationen ihr Mobilitätsverhalten nur wenig bzw. langsam ändern, kann nur die junge nachrückende Generation Träger neuer Verhaltensweisen im Verkehr sein. Tatsächlich ist die Bedeutung des Pkw in den letzten Jahren bei den Jüngeren zurückgegangen, während die öffentlichen Verkehrsmittel und das Fahrrad gewonnen haben. Strukturelle Unterschiede wie Einkommen, Erwerbstätigkeit, Haushaltskonstellation und Wohnregionen können etwa 60% der Veränderungen beim Pkw-Besitz junger Menschen erklären (ifmo 2011; Kuhnimhof et al. 2013).

Teilweise, insbesondere im Fall der ausbildungsbedingten Verschiebung des Pkw-Besitzes in höhere Altersgruppen, handelt es sich bei den beobachteten strukturellen Veränderungen um (temporäre) Übergangseffekte. Jedoch sind 40% des Rückgangs des Pkw-Besitzes der jungen Bevölkerung nicht strukturell zu erklären.

Hier spielen vielmehr veränderte Präferenzstrukturen eine Rolle. Welche Einflussgrößen diese Präferenzveränderungen konkret beeinflussen und inwieweit sich diese zukünftig verfestigen, ist allerdings nach wie vor eine offene Frage (ifmo 2011).

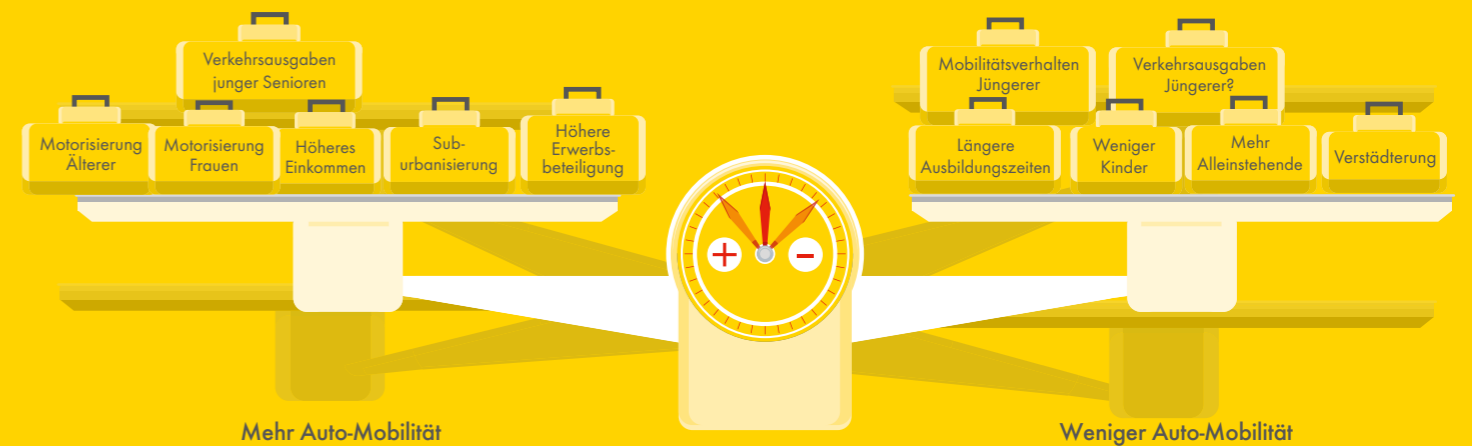
Höhere Anteile an Hochschulabsolventen verschieben den Eintritt ins Erwerbsleben für junge Erwachsene im Lebensverlauf – und damit oftmals Pkw-Motorisierung – nach hinten. Zudem entfällt bei einer steigenden Zahl von Einpersonenhaushalten ein wichtiger Treiber für Pkw-Mobilität in Haushalten – die Kinder.

Der anhaltende Trend zur Verstädterung führt zur teilweisen Verlagerung motorisierten Individualverkehrs auf öffentliche Verkehrsmittel.

Die untersuchten sozioökonomischen Faktoren haben unterschiedliche Auswirkungen auf einzelne gesellschaftliche Gruppen und ihr Mobilitätsverhalten. So stehen den treibenden eine Reihe dämpfender Einflussfaktoren gegenüber, die künftig zu einem Bedeutungsverlust des Pkw führen könnten.

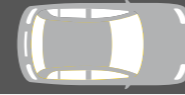
Die nebenstehende Waage stellt Auto-Mobilität treibende und hemmende Einflussfaktoren und ihre Wirkungsrichtung noch einmal gegenüber.

Wie sich die Einflussfaktoren insgesamt und im Zeitablauf auf Auto-Mobilität in Deutschland auswirken, lässt sich mittels Überprüfung einzelner Wirkungshypothesen nicht bestimmen. Hierzu bedarf es vielmehr quantitativer Szenarioanalysen.



4

# PROGNOSE ZUR PKW-MOTORISIERUNG UND ZU DEN PKW-FAHRLEISTUNGEN



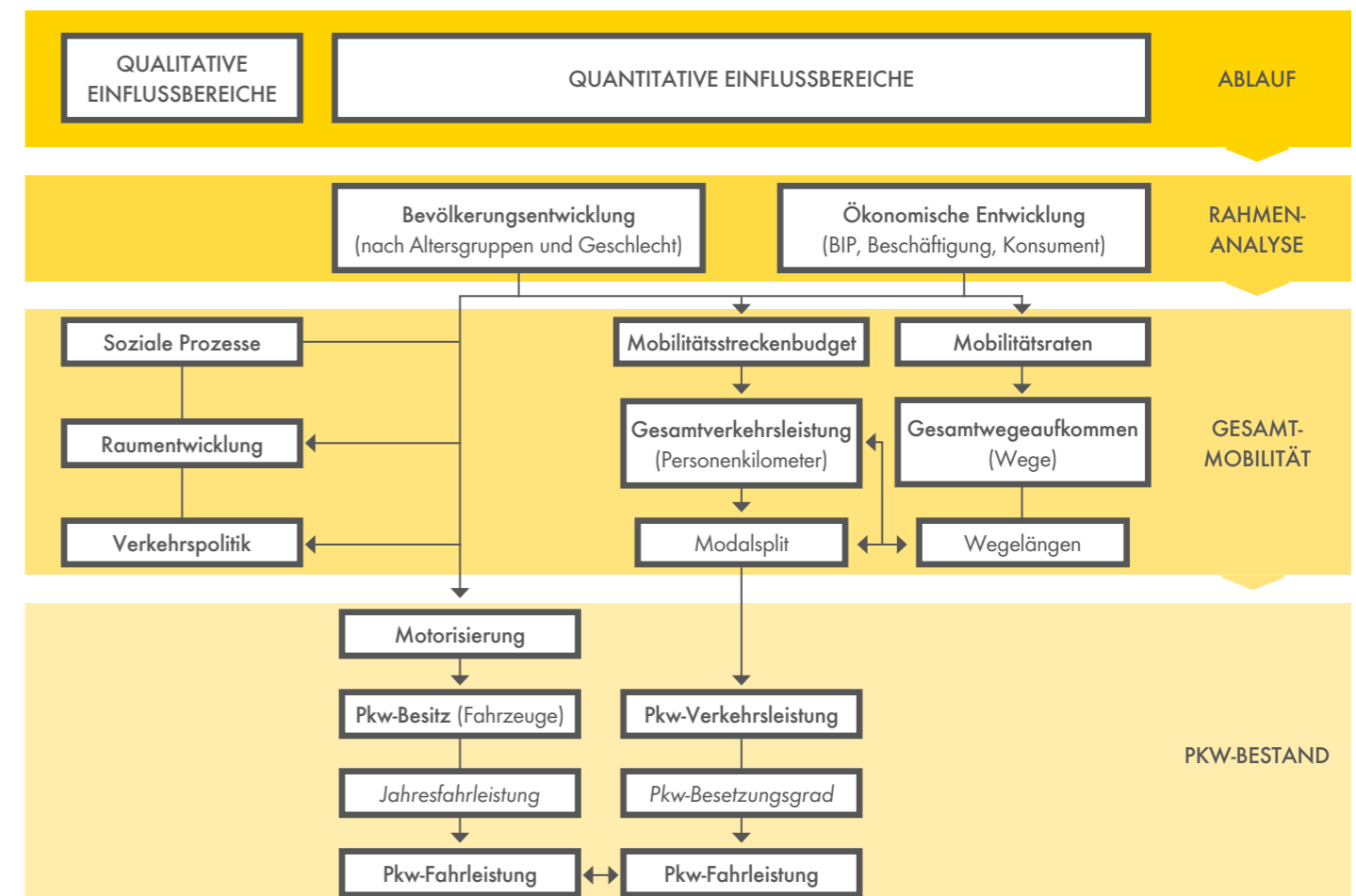
Eine wichtige Aufgabe der Shell Pkw-Szenarien ist die Projektion der Pkw-Motorisierung einschließlich des gesamten Pkw-Bestands und der Pkw-Fahrleistungen in Deutschland bis 2040. Die Pkw-Fahrleistungen bestimmen letztendlich in Verbindung mit der Weiterentwicklung des Pkw-Bestands hinsichtlich Antriebs- und Kraftstoffart und spezifischem Kraftstoffverbrauch auch den Energieverbrauch und die Treibhausgasemissionen des Pkw-Verkehrs in Deutschland. Die Prognose des Pkw-Bestands nach Antriebstechniken sowie seines Energieverbrauchs und seiner Treibhausgasemissionen erfolgt mit Hilfe von Szenariotechnik im sechsten Teil der Shell Pkw-Szenarien.

Im Folgenden wird ein einziges Szenario für die künftige Entwicklung von Pkw-Motorisierung und Pkw-Fahrleistungen in Deutschland bis zum Jahr 2040 entwickelt. Für die Motorisierungs- und Bestandsprojektion werden die in Kapitel 2 skizzierten sozioökonomischen Kenndaten und demografischen Trends angenommen. Die Prognose der Pkw-Motorisierung nach Altersklassen und Geschlecht berücksichtigt ferner überprüfte Wirkungshypothesen zur Pkw-Mobilität aus Kapitel 3.

Da den Szenarien zu Antrieben und Kraftstoffen in Kapitel 6 nur ein einziges Motorisierungs- bzw. Fahrleistungsszenario zugrunde gelegt wird, werden keine Rückwirkungen von unterschiedlichen Antriebs-Kraftstoff-Konfigurationen im Pkw-Bereich auf den Pkw-Besitz und die Pkw-Nutzung betrachtet, auch wenn solche Rückkopplungseffekte wahrscheinlich sind.

Grundsätzlich wäre auch eine Variation künftiger Motorisierungs- und Fahrleistungsentwicklungspfade in Form von Szenarien denkbar. Die bisherige Entwicklung zeigt aber, dass Besitz und Fahrleistungen von Pkw relativ gut einschätzbare, kontinuierliche Entwicklungsverläufe aufweisen – vor allem dann, wenn man die Analyse nach Alter und Geschlecht der Pkw-Halter differenziert. Trends in Bezug auf dieselben Nutzer wie auch bestimmte Lebensphasen, die sie durchlaufen, ändern sich nur relativ langsam. Größere mittelfristige Prognoseunsicherheiten der zukünftigen Entwicklung des motorisierten Individualverkehrs beziehen sich vielmehr auf Antriebstechniken und Kraftstoffe der Zukunft. Um diesen Unsicherheiten Rechnung zu tragen, werden hierfür im zweiten Teil dann verschiedene Szenarien quantitativ und qualitativ durchleuchtet.

14/PROGNOSE-MODELL ZUR PKW-MOTORISIERUNG UND ZU DEN PKW-FAHRLEISTUNGEN



## PROGNOSEANSATZ

Die grundsätzliche Herangehensweise an die Prognosen besteht darin, qualitative und quantitative Einflüsse auf die bisherigen Entwicklungen der Verkehrsnachfrage und Motorisierung möglichst differenziert zu analysieren und prognostisch fortzuschreiben.

Die wichtigsten qualitativen Einflüsse auf die zukünftige Verkehrsnachfrage insgesamt und auf die Motorisierung – und damit auch auf die Aufteilung der Verkehrsnachfrage auf die Verkehrsträger (Modalsplit) – gehen von sozioökonomischen Veränderungsprozessen wie der zunehmenden Frauenmotorisierung, dem steigenden Einkommen, den Veränderungen der Haushaltsgrößen oder neuer Präferenzen jüngerer Menschen sowie von der Siedlungs- und Raumentwicklung – also der Verteilung von Bevölkerung und Wirtschaft im Raum – und außerdem von Einflüssen der Verkehrspolitik aus, die ihrerseits vom Verkehrsgeschehen und dessen Auswirkungen geprägt werden.

Die für die Prognosen bis 2040 genutzten quantitativen Einflüsse sind einerseits die Bevölkerungsentwicklung nach Alter und Geschlecht und andererseits ökonomische Größen, nämlich die Gesamtwirtschaftsentwicklung (Bruttoinlandsprodukt), privater Konsum, verfügbares Einkommen und die Erwerbsbeteiligung. Die Veränderungen bei den quantitativen Einflussbereichen werden für die Szenario-Prognosen unterschiedlich genutzt: Bei der Entwicklung der Motorisierung kommt es darauf an, die soziodemografischen Veränderungsprozesse möglichst



differenziert zu berücksichtigen, also zu analysieren, in welcher Lebensphase sich einzelne Pkw-Haltergruppen befinden und wie ihr bisheriges Mobilitätsverhalten verlaufen ist.

Dabei durchläuft jedes Segment seine eigene Entwicklung, die von Alter und Geschlecht, aber auch von den bisherigen Mobilitätsgewohnheiten der älter werdenden Menschen abhängt. Solche Veränderungen werden nicht sichtbar, wenn man die Motorisierung nur pauschal über die Gesamtbevölkerung betrachtet oder die Pkw-Bestandsentwicklung von allgemeinen sozioökonomischen Einflussgrößen abhängig macht.

Ein nach Alter und Geschlecht der Fahrzeugbesitzer differenzierter Ansatz steht daher als Basisprognose im Mittelpunkt. Er führt von der Motorisierung der einzelnen Bevölkerungssegmente nach Alter und Geschlecht (Pkw je 1.000 Personen im jeweiligen Bevölkerungssegment) zum Pkw-Bestand in den einzelnen Bevölkerungssegmenten. Mit Hilfe einer Abschätzung der altersspezifischen Jahresfahrleistungen, also der jeweiligen Nutzungsintensität der Pkw, kommt man als Produkt aus Pkw-Bestand und -Jahresfahrleistung zur Gesamtfahrleistung des Pkw-Bestands bis zum Prognosehorizont. Da dieser Ansatz von den einzelnen Pkw-Besitzersegmenten (von unten) herkommt, wird er auch als *Bottom-Up-Ansatz* bezeichnet.

Schließlich werden im Rahmen einer Kontrollprognose relevante sozioökonomische Einflüsse berücksichtigt, indem die Entwicklung der

Gesamtverkehrsnachfrage je Einwohner – also das Mobilitätsstreckenbudget (zurückgelegte Strecke je Person und Zeiteinheit) – in Bezug zur Wirtschaftsleistung insgesamt (Bruttoinlandsprodukt je Einwohner), zum verfügbaren Einkommen sowie zum effektiven privaten Konsum in Verbindung gebracht wird. Dabei wird nicht alleine auf den Pkw-Verkehr abgestellt, sondern auf die gesamte Verkehrsleistung mit allen motorisierten (Land)-Verkehrsmitteln. Über die Abschätzung der Veränderung des Modalsplits ergeben sich unter anderem die hier interessierenden Verkehrsleistungen mit Pkw. Anschließend erfolgt noch eine Abschätzung der entfernungsbezogenen mittleren Besetzungsgrade (Anzahl der Personen, die sich im Mittel in den Pkw befinden).

Daraus lässt sich dann ebenfalls (als Quotient aus Pkw-Verkehrsleistung und Besetzungsgrad) die Pkw-Fahrleistung berechnen. Sie muss in Summe mit dem Ergebnis der Basisprognose übereinstimmen. Da dieser Ansatz bei der Gesamtnachfrage (von oben) ansetzt, wird er auch als *Top-Down-Ansatz* bezeichnet.

Die Prognosen zur Motorisierungsentwicklung in den einzelnen Bevölkerungssegmenten wurden so vollständig mit der gesamten motorisierten (Land)-Verkehrsnachfrage abgestimmt. Die Prognosen erhalten damit ein hohes Maß an Konsistenz, weil sie alle sozioökonomischen Einflüsse umfassend berücksichtigen und mit zwei völlig unterschiedlichen Herangehensweisen abgestimmt sind.



auf Daten zur Bevölkerungsentwicklung, die vom Statistischen Bundesamt stammen, sowie auf Angaben des Kraftfahrt-Bundesamts zum geschlechts- und altersgruppenspezifischen Pkw-Bestand. Mit Veröffentlichung erster Zensusergebnisse im Frühjahr 2013 wurde

die Bevölkerungszahl in Deutschland um 1,5 Millionen Menschen nach unten korrigiert.

Damit lebten am 31.12.2011 in Deutschland nur 80,3 Millionen Einwohner statt der bisher auf Grundlage früherer Zählungen

errechneten 81,8 Millionen. Das entspricht einer Differenz von 1,5 Millionen Menschen (StBA 2014b). Diese statistische Umstellung hat einen direkten Einfluss auf den Motorisierungsgrad der Bevölkerung und führt zu einer höheren Pkw-Ausstattung je

1.000 Einwohner. Der Motorisierungsgrad hat sich beispielsweise im Jahr 2011 durch diese Korrektur von 525 auf 534 Pkw je 1.000 Einwohner erhöht. Die Korrektur der Bevölkerungsdaten wurde vom Statistischen Bundesamt für die Jahre 2011 bis 2013

durchgeführt, jedoch nicht für die Entwicklung zuvor. Aus diesem Grund wurde die Bevölkerungsentwicklung in der Vergangenheit von uns entsprechend korrigiert und gemäß der konservativen Variante (Mittlere Bevölkerung, Untergrenze) bis 2040 fortgeschrieben.

## DATEN ZUM PKW-BESTAND

Die Daten zum Pkw-Bestand in Deutschland werden vom Kraftfahrt-Bundesamt erfasst und in Statistiken bereitgestellt. Im Rahmen der vorliegenden Analysen und Prognosen sind insbesondere die Statistiken zum Fahrzeugbestand nach Haltergruppen von Bedeutung (KBA 2013a). Zur Berechnung der



geschlechts- und altersgruppenspezifischen Motorisierungsgrade wurde in den bisherigen Shell Pkw-Szenarien mit Angaben zum Pkw-Bestand inklusive der vorübergehend stillgelegten Pkw gearbeitet. In der vorliegenden Studie bildet der Pkw-Bestand ohne vorübergehend stillgelegte Pkw die Grundlage

für die Prognosen. Allerdings liegen die um vorübergehend stillgelegte Fahrzeuge bereinigten geschlechts- und altersgruppenspezifischen Daten erst ab 2008 (und bis 2012) vor; daher war eine Bereinigung der statistischen Brüche erforderlich.

## PKW-STATISTIK: ZEITREIHEN UND STRUKTURBRÜCHE

Pkw-Bestandsstatistiken können im Zeitablauf Veränderungen erfahren, wenn sich Vorschriften zur Fahrzeughaltung oder internationale Vereinbarungen zu Definitionen bzw. Abgrenzungen in der statistischen Berichterstattung ändern. Dies war im Hinblick auf den Pkw-Bestand in Deutschland auch seit der Vereinigung im Jahr 1991 mehrfach der Fall: Eine erste Umstellung bestand darin, dass die Berichterstattung des tiefgegliederten Datenmaterials sich bis zum Jahr 1999 jeweils auf eine Auszählung des Fahrzeugbestands zum 1. Juli bezog, ab dem Jahr 2001 hingegen zum 1. Januar. Da die Pkw-Bestandsveränderungen zwischen dem ersten und zweiten Halbjahr sehr stark schwanken können, lässt sich ein solcher statistischer Bruch nicht einfach durch lineare Interpolation bereinigen.

Wichtiger war allerdings, dass sich die statistische Behandlung vorübergehend stillgelegter Fahrzeuge in der Vergangenheit zweimal gravierend verändert hat: Erstmals gab es eine Änderung, als die statistische Berücksichtigung stillgelegter Fahrzeuge ab August 2000 von einer Stilllegungsfrist von 12 auf 18 Monate ausgeweitet wurde. Dadurch kamen damals geschätzt eine halbe Million Fahrzeuge zusätzlich in die Pkw-Bestandsstatistik, also etwa 1% des damaligen Pkw-Bestands. Erheblich gravierender ist aber, dass seit dem 1.1.2008 die vorübergehend stillgelegten Pkw in der Pkw-Bestandsstatistik nicht mehr enthalten sind. Damit entfielen knapp 12% aller Pkw aus dem Bestand. Im Vergleich damit führte die Einbeziehung von Pkw mit besonderer Zweckbestimmung (Wohnmobile, Krankenwagen u.a.) ab dem 1.1.2006 nur zu einer geringen Beeinträchtigung der Zeitreihe.

In den bisherigen Shell Pkw-Szenarien wurde mit Zeitreihen gearbeitet, in denen die vorübergehend stillgelegten Pkw noch enthalten waren. Die übrigen Brüche wurden, soweit möglich, durch Vergleichswerte korrigiert, wobei sich die Vergleichswerte stets nur auf Eckdaten (also den Gesamtbestand der Pkw) beziehen, nicht aber auf die dahinter liegenden Strukturen der Daten. Diese wurden bei Korrekturen in der Regel unverändert übertragen. In der vorliegenden Shell Pkw-Studie wurde nun erstmals mit Pkw-Bestandsdaten gearbeitet, in denen die vorübergehend stillgelegten Fahrzeuge nicht mehr enthalten sind. Die Eckdaten der Korrekturen für die Daten vor dem Jahr 2008 stammen vom Kraftfahrt-Bundesamt (vgl. Kraftfahrt-Bundesamt, Statistische Mitteilungen FZ 23, verschiedene Jahrgänge), reichen aber nur bis zum Jahr 2000 zurück. Für die Jahre davor musste der statistische Datenbruch durch eine Schätzung der Stilllegungsquoten bereinigt werden.

Sofern die Stilllegungsquoten beispielsweise nach Alter oder Geschlecht der Fahrzeughalter variieren, kann dies zu einer mehr oder minder starken Verzerrung führen, wenn man die Alters- und Geschlechtsstrukturen des ursprünglichen Datensatzes auf die neuen Eckdaten überträgt. Da für eine Korrektur der Strukturen jegliche Hintergrundinformationen fehlen, wurde auf solche Korrekturen verzichtet. Dies erklärt, warum es in einzelnen Jahren in tiefgegliederten Datenreihen (nach Alter und Geschlecht) sprunghafte Veränderungen geben kann (z.B. die Altersgruppe der 25- bis 29-Jährigen oder der 55- bis 59-Jährigen); diese haben wir bei der Analyse und Interpretation der Vergangenheitsdaten aber generell berücksichtigt.

## PKW-PROGNOSE: MOTORISIERUNG, BESTAND, FAHRLLEISTUNGEN

### PKW-MOTORISIERUNG NACH ALTER UND GESCHLECHT

Die Motorisierungsgrade zeigen in der Vergangenheit – abgesehen von den statistischen Datenbrüchen durch die Schätzung der Stilllegungsquoten – erhebliche alters- und geschlechtsspezifische Abweichungen vom jeweiligen Mittelwert, der Ende 2013 bei 544 Pkw pro 1.000 Einwohner lag. Die Schwelle von 500 Pkw pro 1.000 Einwohner wurde im Jahr 2005 überschritten, eine rückläufige Motorisierung hat es seit Beginn der Massenmotorisierung in den 1950/60er Jahren in Deutschland noch nicht gegeben.

Veränderungen in der Motorisierung können sich aus Veränderungen in der Altersstruktur oder auch durch Verhaltensänderungen der Altersgruppen im Zeitverlauf ergeben. Wenn die Bevölkerung insgesamt altert, hat dies Auswirkungen auf das Mobilitätsverhalten.

Jüngere Jahrgänge (Kohorten) weisen ein anderes Mobilitätsverhalten auf als ältere, wie die nach Alter und Geschlecht differenzierten Daten zum Pkw-Bestand zeigen; das gilt für Männer, aber noch stärker für die Frauen.

Im Durchschnitt über alle Altersgruppen liegt der Motorisierungsgrad der Frauen heute mit 350 Pkw je 1.000 Frauen bei 55 % der Motorisierung der Männer. Damit nähert sich die Motorisierung der Frauen im Durchschnitt der Motorisierung der Männer an. Diese Tendenz wird künftig verstärkt, indem zunehmend Frauen als Fahrzeughalterinnen auftreten werden.

Außerdem ist davon auszugehen, dass es altersgruppenspezifische Sättigungsgrenzen (nach oben) bei den Älteren und Sockelbeträge (nach unten) bei den Jüngeren gibt. Das bedeutet, dass steigende Motorisierungsgrade, die bereits heute in einigen Altersklassen bei den Männern bei über 1.000 Pkw pro 1.000 Einwohner liegen, nicht beliebig weiter steigen, sondern eine trendmäßig erkennbare Obergrenze als Sättigung haben,

die beispielsweise in der höchstmotorisierten Klasse der 50- bis 54-jährigen Männer bei etwa 1.100 Pkw je 1.000 Einwohner liegt.

Als Folge des Nachrückens jüngerer – und weniger stark motorisierter Altersgruppen können auch Trendwenden auftreten. Analog dazu werden bei den jüngeren Altersgruppen die in den letzten Jahren abnehmenden Motorisierungsgrade nicht permanent weiter absinken, bis sie die Null-Linie erreichen, sondern einen Sockelbetrag von ca. 150 Pkw pro 1.000 Einwohner nicht unterschreiten.

Auch diese Untergrenze lässt sich durch eine Analyse der Trendfunktionsverläufe mathematisch und aus sachlichen Erwägungen auch inhaltlich begründen, weil es offenbar zumindest bei einem Teil der Bevölkerung ein noch nicht gestilltes Interesse an einem eigenen Pkw gibt, das diese realisieren können und wollen.

Nachfolgend werden die wichtigsten Fakten und Annahmen für die Motorisierungsprognose nach Alter und Geschlecht erläutert. Zusätzlich werden die Prognoseergebnisse in vier Grafiken synoptisch dargestellt: jeweils die Motorisierung der Männer und Frauen nach Altersklassen (Abbildung 15 und 16), die Pkw-Motorisierung insgesamt und nach Geschlecht (Abbildung 17) sowie der Anteil der Frauen- an der Männermotorisierung (Abbildung 18).

Bei der Motorisierung Frauen zu Männer bedeutet ein Wert von 100 %, dass Frauen- und Männermotorisierung gleich hoch liegen. Bei der Analyse der Motorisierungsentwicklungen muss man beachten, dass nicht identische Personen im Zeitablauf betrachtet werden (Kohorten), sondern innerhalb der Altersklassen. Innerhalb der Alterklasse sind Jahr für Jahr andere Personen vertreten, weil die ältesten Personen ausscheiden und die jüngsten neu hinzukommen.



### 18–20



Der Motorisierungsgrad der jungen Männer und Frauen unter 20 liegt mit aktuell 165 Pkw pro 1.000 Männer und 134 Pkw pro 1.000 Frauen deutlich unter dem Durchschnitt. Der seit 1999 zu verzeichnende rückläufige Trend hat sich seit 2005 nicht mehr fortgesetzt; bei den Frauen steigt die Motorisierung seither sogar wieder leicht an. Aber nach wie vor können (und/oder wollen und/oder müssen) sich nur wenige Personen in dieser Altersgruppe einen Pkw leisten: Verlängerte Ausbildungszeiten, längeres Wohnen zu Hause, hohe Kosten für das erste Auto sowie gleichzeitig die Nutzungsmöglichkeit des steigenden Pkw-Bestands der Eltern bzw. der Älteren sowie zunehmend auch von Carsharing-Flotten und nicht zuletzt eine Bevorzugung von Ausgaben für Mobilkommunikation statt für Mobilität sind mögliche Erklärungsgründe, ohne dass anhand des aktuellen Stands der Mobilitätsforschung belegbar wäre, welchen Anteil die einzelnen Argumente an der beobachtbaren Entwicklung haben.

Wir gehen aber davon aus, dass sich diese Entwicklungen in Zukunft noch fortsetzen: Der Motorisierungsgrad bei den Männern wird sich langsam bis auf den Sockelwert von 150 Pkw pro 1.000 Einwohner absenken. Die Frauen in dieser Altersklasse werden bei der Motorisierung weiter aufholen. Das Verhältnis von weiblicher zu männlicher Motorisierung wird im Jahr 2040 als gleich groß prognostiziert.

### 21–24



In der Altersgruppe der 21- bis 24-Jährigen sind die Entwicklungen ähnlich wie bei der jüngsten Altersgruppe. Der Rückgang bei den Männern führt auf das Niveau der unter 20-Jährigen: Die Motorisierung sinkt von 366 Pkw pro 1.000 Männer in 2000 bis auf 192 Pkw pro 1.000 Männer heute.

Bei den Frauen vollzieht sich eine beinahe parallele Entwicklung: Während von 1.000 Frauen in diesem Alter in 2000 noch 226 einen Pkw besaßen, sind es heute nur noch 153. Dieser Wert liegt allerdings deutlich höher als der Tiefstwert des Jahres 2008 (138 Pkw je 1.000 Frauen). Das Verhältnis der Motorisierung der Frauen zu den Männern hat sich auch in dieser Altersklasse von 62 % in 2000 auf 79 % aktuell angenähert.

Wir nehmen an, dass die potenziellen Erklärungsgründe für den Rückgang in der letzten Dekade – längere Ausbildungszeiten, schmalere Budgets bei gleichzeitig anderen Präferenzen für Kommunikation und Reisen – auch zukünftig anhalten und dementsprechend die Motorisierung in dieser Altersgruppe ebenfalls weiter zurückfallen wird, allerdings nicht bis auf den Sockelbetrag. Im Zeitverlauf wird eine weitere Angleichung der Frauen-Motorisierung an die der Männer auf 90 % im Jahr 2040 erfolgen.

### 25–29



Die Motorisierung der 25- bis 29-Jährigen wurde in der Vergangenheit im Hinblick auf ihren Ausstieg aus der Pkw-Mobilität schon oft diskutiert. Zunächst schienen nur ökonomische Gründe – wie längere Ausbildungszeiten und folglich schwächere Einkommenssituation, Gründung eines eigenen Haushalts, aber (zunächst) verstärkt innerhalb der Städte (Ausbleiben der Suburbanisierung) sowie Zunahme der Single-Haushalte – für den Rückgang der Motorisierung in dieser Altersgruppe verantwortlich zu sein. Zunehmend spielen aber auch andere Gründe eine wichtige Rolle: Mit der Verbreitung neuer Kommunikationstechnologien, aber auch mit der Verbesserung der ÖV-Angebote in den Agglomerationen und Ballungsräumen verliert der Auto-Besitz (u.a. als Statussymbol) an Bedeutung. Das Mobilitätsverhalten in den jüngeren Altersgruppen gewinnt an Flexibilität und Pragmatismus. Das sich verändernde Konsum-, Siedlungs- und Mobilitätsverhalten in Verbindung mit sozioökonomischen Faktoren ist also für den Rückgang der Motorisierung verantwortlich. Die Motorisierung der 25- bis 29-jährigen Männer wird diesen Trends auch weiter – wenn auch bedeutend langsamer – folgen. Bis 2040 wird diese Altersgruppe mit Jüngeren aufgefüllt, die zwischen 2011 und 2015 geboren sind und eine geringe Motorisierung aufweisen. Auf den Sockelbetrag wird die Motorisierung jedoch nicht zurückgehen, sondern beträgt gemäß Trendfortschreibung dann 378 Pkw pro 1.000 Männer.

Bei den Frauen scheint der rückläufige Trend seit 2009 gestoppt zu sein: Zwischen 2009 und 2012 blieb die Motorisierung der Frauen praktisch unverändert, während sich die Annäherung an die Motorisierung der gleichaltrigen Männer weiter fortsetzte; sie erreicht in 2040 wie bei den 25- bis unter 30-Jährigen 90 % des Niveaus der männlichen Motorisierung in dieser Altersgruppe.

### 30–34



Die Motorisierung der Altersgruppe der 30- bis 34-Jährigen bewegt sich auf einem deutlich höheren absoluten Niveau als die der jüngeren Altersgruppen. Der Motorisierungsgrad der Frauen war in der jüngeren Vergangenheit bei leicht rückläufiger Tendenz relativ stabil, während er sich kontinuierlich der Motorisierung der Männer annäherte.

Dieser Trend wird sich weiter fortsetzen, und wir gehen davon aus, dass die Frauenmotorisierung aufgrund von Nachholeffekten (Familiengründung, zunehmendes Wohnen im suburbanen Raum) in dieser Altersgruppe sogar wieder leicht zulegen wird, nämlich von 422 Pkw pro 1.000 Frauen in 2012 auf 475 Pkw pro 1.000 Frauen in 2040.

Die deutlich rückläufige Motorisierung der Männer zwischen 30 und 35 Jahren, für die ähnliche Gründe wie bei der Motorisierung der 25- bis 29-Jährigen angeführt werden können, wird bis 2040 weiter abnehmen, und zwar von 581 Pkw pro 1.000 Männer heute auf rund 520 Pkw pro 1.000 Männer in 2040. Damit wird sich die geschlechtsspezifische Motorisierung auch in dieser Altersgruppe bis auf ein Niveau von rund 90 % angleichen.

**35-39**



Mit zunehmendem Alter steigt die Erwerbsbeteiligung – auch bei Frauen – und damit tendenziell auch das Einkommen sowie die Anzahl der Arbeitswege, und entsprechend höher liegt die Motorisierung. Auch in dieser Altersgruppe sind zwei ähnliche Tendenzen wie bei den jüngeren Altersklassen zu beobachten: eine deutlich rückläufige Motorisierung der Männer und eine weitere Zunahme des Verhältnisses von Frauen- zu Männermotorisierung, allerdings im Unterschied zu den jüngeren Altersklassen verbunden mit einer leicht steigenden Motorisierung der Frauen. Eine mögliche Erklärung hierfür könnte die zunehmende Frauen-Erwerbstätigkeit sein, die dazu führt, dass ein eigenes oder in der Familie benötigtes (zweites) Fahrzeug auf Frauen zugelassen wird.

In Fortschreibung der Vergangenheitstrends wird sich das Verhältnis von weiblicher zu männlicher Motorisierung weiter annähern und die Motorisierung der Frauen bis 2040 nahezu 90% der Männermotorisierung erreichen. Dann wird die Motorisierung der Männer bei etwa 630 Pkw und der Frauen bei 550 Pkw pro 1.000 Einwohner liegen.

**40-44**



Die Motorisierung der Altersgruppe der 40- bis 44-Jährigen weist ähnliche Entwicklungen wie die Altersgruppe der 35- bis 39-Jährigen auf: einen Rückgang der Männer- und einen Anstieg der Frauenmotorisierung, verbunden mit einer deutlichen Annäherung der geschlechtsspezifischen Motorisierungsgrade. Die Gründe dürften ähnlich gelagert sein wie bei der jüngeren Altersgruppe.

Wir erwarten bei der Motorisierung beider Geschlechter zukünftig eine Fortsetzung der Vergangenheitstrends: Bei den Frauen wird die Motorisierung weiter leicht ansteigen (von heute gut 540 auf dann rund 575 Pkw je 1.000 Frauen), bei den Männern wird sie von 900 Pkw in 1995 und 817 in 2012 auf rund 745 Pkw pro 1.000 Männer in 2040 zurückgehen. Damit setzt sich auch die Annäherung der Frauen- an die Männermotorisierung fort; das Verhältnis wird 2040 etwas über 75% betragen.

**50-54**



Die Personen in der Altersgruppe der 50- bis 54-Jährigen weisen heute bei den Männern die zweithöchste und bei den Frauen die höchste Motorisierung aller Altersklassen auf: In 2012 waren es 1.049 Pkw pro 1.000 Männer und 636 Pkw pro 1.000 Frauen. Wir gehen davon aus, dass hier – in Annäherung an die Entwicklung bei den 45 bis 49-jährigen – die Motorisierung der Männer auf einem hohen Niveau bleibt; allerdings zeichnet sich eine leicht abnehmende Tendenz bereits ab 2030 ab, weil hier Männer nachrücken, die heute bereits mit einer relativ niedrigen Motorisierung Erfahrungen gesammelt haben. Eine hohe Motorisierung der Männer über 1.000 Pkw pro 1.000 deutet auf einen Zweitwagenbesitz hin.

Die Motorisierung der Frauen entwickelte sich schon in der Vergangenheit dynamisch und erreicht mit der von uns prognostizierten Motorisierung von 784 Pkw pro 1.000 Frauen 2040 die höchste Frauen-Motorisierung aller Altersklassen. Die Annäherung an die Männermotorisierung schreitet hier also etwas langsamer, aber dennoch kontinuierlich voran.

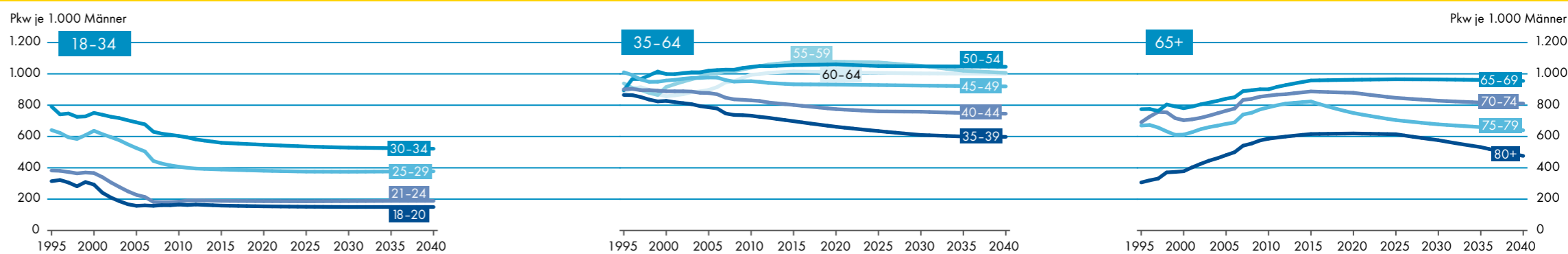
**55-59**



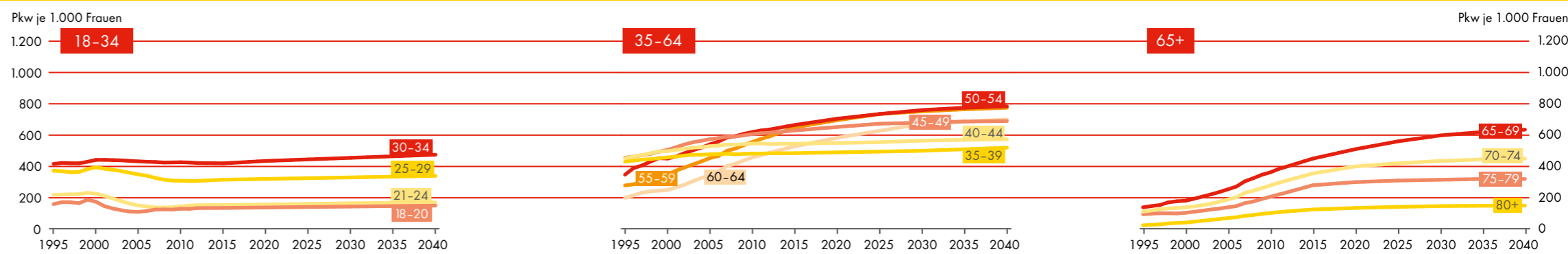
Auch die Altersgruppe der 55- bis 59-Jährigen gehört zu den höchst motorisierten Altersgruppen. Die Motorisierung darin steigt bei den Männern seit 1999 stetig und bei den Frauen generell und sehr dynamisch. Das Nachrücken der weiteren Generationen lässt die Motorisierung in dieser Altersgruppe ansteigen, allerdings bei Männern nur bis 2030. Ab 2030 – also wenn die heute unter 40-Jährigen mit ihrer erlernten niedrigeren Motorisierung die Motorisierung in dieser Altersgruppe bestimmen – steht die abnehmende Motorisierung für weniger Zweitwagen-Besitz. In 2040 wird statistisch gesehen dennoch jeder Mann in der Altersgruppe der 55- bis 59-Jährigen immer noch ein Fahrzeug besitzen.

Bei den 55- bis 59-Jährigen Frauen war die Vergangenheitsentwicklung der Motorisierung ganz besonders dynamisch, und daher steigt die Motorisierung nicht nur trendmäßig weiter, sondern erreicht 2040 einen ähnlich hohen Wert wie bei den 50- bis 54-jährigen Frauen, nämlich von 775 Pkw pro 1.000 Frauen, womit aber immer noch nicht die Motorisierung der gleichaltrigen Männer erreicht wird (ca. 77%).

15/MOTORISIERUNG DER MÄNNER NACH ALTERSGRUPPEN 1995 - 2040



16/MOTORISIERUNG DER FRAUEN NACH ALTERSGRUPPEN 1995 - 2040



**45-49**



Diese Altersgruppe gehört zu den hochmotorisierten. Das Verhältnis der Motorisierung der Frauen zu derjenigen der Männer hat sich kontinuierlich erhöht und liegt heute bei 65%. Die Männer-Motorisierung war in der Vergangenheit auf einem hohen Niveau relativ stabil – mit einem leichten Anstieg bis Mitte der 2000er Jahre und einem leichten Rückgang danach – und lag zwischen 950 und 980 Pkw pro 1.000 Männer. Bei den Frauen hat der Motorisierungsgrad in den letzten Jahren stark zugelegt auf vergleichsweise hohe 615 Pkw je 1.000 Frauen dieser Altersgruppe; das ist aktuell die zweithöchste Frauen-Motorisierung aller Altersgruppen.

Die Motorisierung der Männer wird dem Trend folgend weiter leicht zurückgehen und bei 920 Pkw je 1.000 Männern liegen, während diejenige der Frauen dem Langfristtrend entsprechend und in Analogie zu den den jüngeren Altersklassen weiter ansteigen und im Jahr 2040 den für diese hochmotorisierte Altersklasse vergleichsweise hohen Wert von 690 Pkw je 1.000 Frauen erreichen wird. Damit erreichen die 45- bis 49-jährigen Frauen 2040 75% der Männermotorisierung.

**60-64**



Wie in der Altersgruppe der 55- bis 59-Jährigen flacht sich der Anstieg der Motorisierung der Männer in der Altersklasse der 60- bis 64-Jährigen allmählich ab, verharrt aber zukünftig auf dem heutigen, relativ hohen Niveau von rund 1.000 Pkw pro 1.000 Männer. Dabei wird der Erwartung Rechnung getragen, dass die Erwerbsbeteiligung dieser Altersgruppe zukünftig höher liegen wird als heute, weil das faktische Rentenalter als Folge gesetzlicher Bestimmungen und einer Abnahme von Frühpensionierungen sukzessive ansteigen wird.

Bei der Motorisierung der Frauen dieser Altersgruppe gibt es noch Nachholeffekte. Das Verhältnis von 70% an der männlichen Motorisierung im Jahr 2040 erreichen die Frauen durch eine weiterhin steigende Motorisierung aufgrund des Nachrückens der jüngeren Altersklassen. Allerdings wird ab 2030 bei der eigenen Motorisierung wie auch bei der Annäherung an die Motorisierung der Männer eine deutliche Sättigungstendenz erkennbar.



65-69



65- bis 69-Jährige: Aufgrund der erwarteten sukzessiven Heraufsetzung des Rentneralters und einer zunehmenden Erwerbsbeteiligung dieser Altersklasse mit einer entsprechenden Zunahme der Anzahl von Arbeitswegen bleibt die Motorisierung der Altersklasse der 65- bis 69-Jährigen auf einem hohen Niveau mit Stagnation bei den Männern ab 2015 (Trendübernahme aus jüngeren Altersgruppen).

Die Frauen in dieser Altersklasse bleiben ebenfalls länger aktiv und mobil; ihre Motorisierung nimmt weiterhin zu und erreicht in 2040 den Wert von 635 Pkw pro 1.000 Frauen. Der hohe Anstieg bei den Frauen gegenüber heute resultiert auch aus dem Kohorteneffekt, dass jüngere Jahrgänge ihre hohe Motorisierung in die nächsten Altersgruppen mitnehmen werden.

70-74



Die Motorisierung der Altersgruppe der 70- bis 74-jährigen Personen wird nicht mehr so stark wie in der Vergangenheit zunehmen. In den letzten Jahren zeigte sich bei den Männern schon eine deutliche Abflachung des ansteigenden Trends. Einige Argumente sprechen sogar für einen zukünftigen Rückgang ihrer Motorisierung: Die gesundheitlichen Probleme bestimmen zunehmend die Verkehrsmittelwahl, auch wenn eine ärztliche Bescheinigung der Fahrtauglichkeit – im Unterschied zur Schweiz – in Deutschland (noch) nicht vorgeschrieben ist.

Ein weiterer Aspekt ist der zunehmende Wunsch, Mobilitätswänge zu Fahrten mit dem Pkw zu reduzieren, indem ein Teil dieser Altersgruppe ihren Wohnsitz in die Nähe der Versorgungseinrichtungen oder an Haltepunkte des öffentlichen Verkehrs verlegt, um lange Wege zum Arzt, für das Einkaufen oder eine Teilnahme am städtischen Kulturangebot mit dem Pkw zu vermeiden. Der allmähliche Rückgang der Männermotorisierung auf ein immer noch hohes Niveau wie im Jahr 2005 wird auch durch das Nachrücken (etwas) schwächer motorisierter Generationen bestimmt.

Die Motorisierung der Frauen in dieser Altersklasse wird sich hingegen noch erhöhen. In den letzten Jahren war noch ein deutliches Aufholen gegenüber den Männern mit einem entsprechenden Anstieg der Motorisierung beobachtbar. Bis 2040 wird sich der Anstieg der Motorisierung abflachen, die dann 450 Pkw pro 1.000 Frauen erreicht, damit aber deutlich niedriger liegt als bei den jüngeren Altersklassen. Die Frauenmotorisierung in dieser Altersklasse steigt im Verhältnis zur Männermotorisierung dennoch von 36% heute auf 55% im Jahr 2040.

Die steigende Frauenmotorisierung in dieser Altersklasse führt zu einer immer noch zunehmenden Gesamtmotorisierung von Männern und Frauen in dieser Altersklasse, und zwar von etwa 590 heute auf ca. 625 Pkw pro 1.000 70-74-Jährige im Jahr 2040.

75-79



Der Motorisierungsgrad der Altersgruppe der 75- bis 79-Jährigen ist in der Vergangenheit stetig gestiegen. Dennoch sind die Frauen zwischen 75 und 79 mit 235 Pkw pro 1.000 Frauen aktuell unterdurchschnittlich motorisiert. Bei den Männern wird die zukünftige Entwicklung einerseits dadurch geprägt sein, dass sie den Pkw-Besitz gewohnt sind und auch länger fähig bleiben; andererseits bewegen zunehmende Kosten der Mobilität und des Alters und der Wunsch nach weniger Mobilitätsaufwand mit einem (eigenen) Pkw immer mehr Menschen dieser Altersgruppe zu einer verkehrsgünstigeren Wohnortwahl und zu einem Ausstieg aus dem Pkw-Besitz. Außerdem bringen immer mehr Frauen ebenfalls einen Pkw in diese Altersgruppe mit. Hier erwarten wir daher bei den Männern eine deutliche Trendwende und einen starken Rückgang der Motorisierung auf Werte wie Anfang der 2000er Jahre.

Die Frauen-Motorisierung wird trotz stetiger Zunahme in der Vergangenheit mit 320 Pkw pro 1.000 Frauen 2040 immer noch unterdurchschnittlich bleiben. Dennoch steigt das Verhältnis von weiblicher zu männlicher Motorisierung von 29% heute auf 50% in 2040, weil die Männermotorisierung in dieser Altersgruppe zurückgehen wird und Frauen sich zunehmend die Lust und Last des Fahrens mit den Männern teilen.

Sich allmählich ändernde Präferenzen und Gewohnheiten in der Verkehrsmittelwahl führen aber dennoch, trotz steigender Frauenmotorisierung, zu einem insgesamt (leicht) rückläufigen Motorisierungstrend in dieser Altersklasse, und zwar von etwa 510 heute auf ca. 470 Pkw pro 1.000 75- bis 79-Jährige in 2040.

80+



Über 80-Jährige: Die starke Wachstumsdynamik beim Motorisierungsgrad der über 80-jährigen Männer wird sich nach unserer Einschätzung nicht fortsetzen, sondern sogar wieder abschwächen, weil in dieser Altersgruppe der Anteil der Ältesten immer größer und damit das Durchschnittsalter weiter steigen wird, folglich die Fahrfähigkeit, aber auch die Fahrnwilligkeit zunimmt. Pkw-sparende Wohnortwahl und stärkere ÖPNV-Nutzung verstärken diese Trendwende. Die Motorisierung der Männer steigt dann bis zum Jahr 2020 noch leicht von heute 600 Pkw auf 619 Pkw pro 1.000 Männer; anschließend sinkt sie aber kontinuierlich und erreicht mit 476 Pkw pro 1.000 Männer im Jahr 2040 wieder das Niveau von 2005.

Die Frauen werden ihre Motorisierung in Fortsetzung der Vergangenheitstrends und als Folge der aus jüngeren Jahren mitgenommenen Gewohnheiten weiterhin leicht erhöhen: von 113 Pkw heute auf den Motorisierungssockelbetrag von 150 Pkw pro 1.000 Frauen im Jahr 2040.

PKW-MOTORISIERUNG GESAMT

Eine zusammenfassende Darstellung der zuvor beschriebenen Analysen, Annahmen und Prognosen zur Motorisierungsentwicklung nach Geschlecht sowie insgesamt bietet nebenstehend Abbildung 17.

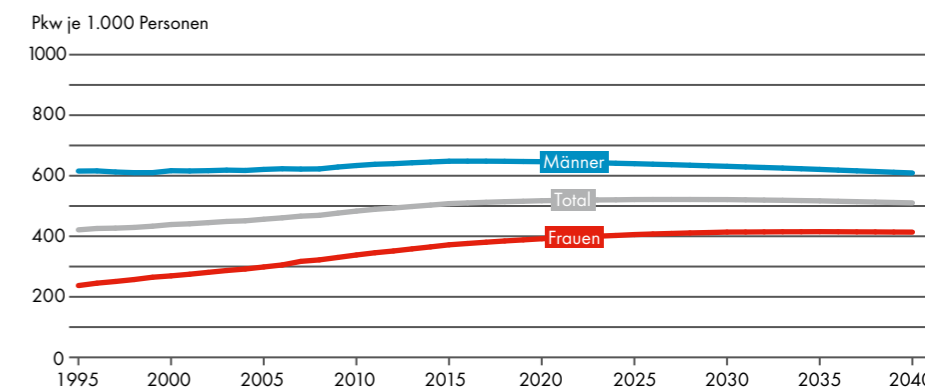
Die Motorisierung der Männer wird im Durchschnitt nur wenig und auch nur noch wenige Jahre bis ca. 2016/2017 zunehmen. Zum einen sinkt die Bedeutung der am stärksten motorisierten Altersklassen (von 50 bis 64 Jahre) langfristig ab (der Anteil an allen Männern geht von heute 21,4% über 24,3% im Jahr 2020 auf 20,3% 2040 zurück). Zum anderen sind die Altersklassen mit einer sehr hohen Motorisierung (zwischen 45 und 69 Jahren) von einer Stagnation der Motorisierung betroffen. Trendmäßige Rückgänge in den jüngeren Altersgruppen und der Rückgang der Motorisierung in den älteren Altersgruppen ab 2030 führen folglich zu einem insgesamt leichten Rückgang der Männermotorisierung von heute 640 auf 609 Pkw pro 1.000 Männer in 2040.

Eine weitere Ursache hierfür ist, dass die Frauen zunehmend als Halterinnen eines eigenen Pkw auftreten und ihre Motorisierung an die der Männer angleichen. In den höheren Altersgruppen tragen auch mobilitätssparende Wohnortverlagerungen zum Rückgang der Motorisierung bei den Männern bei.

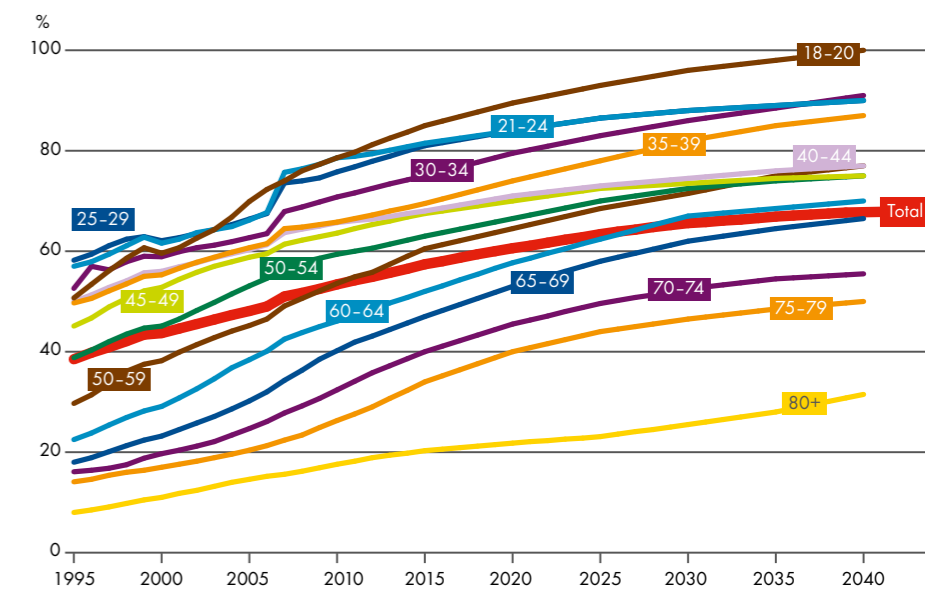
Die Motorisierung der Frauen wird in Fortsetzung des Trends der Vergangenheit insgesamt deutlich zunehmen (von heute 351 auf 414 Pkw je 1.000 Frauen im Jahr 2040), weil in allen Altersgruppen eine ansteigende Motorisierung erwartet wird. Diese Effekte werden in die nächsten Altersklassen mitgenommen. Die abschwächenden Effekte aus den geburtschwachen Jahrgängen werden durch andere Altersgruppen überkompensiert. Aufgrund der erhöhten Frauenmotorisierung weisen vor allem die Altersklassen zwischen 50 und 70 Jahren 2040 eine zum Teil deutlich höhere Gesamtmotorisierung (Männer und Frauen) im Vergleich zu heute auf. Bis zum Jahr 2040 steigt der Verhältniswert von durchschnittlicher Frauen- zu Männermotorisierung auf 68% an.

Die Motorisierung über alle Einwohner (Männer und Frauen, ohne Einbeziehung der Pkw nicht-privater Haltergruppen) betrug in 2012 493 Pkw je 1.000 Einwohner. Diese Gesamtmotorisierung erreicht ihren Spitzenwert etwa 2025/2026 mit 521 Pkw 1.000 Einwohner und geht dann auf einen Wert von 510 in 2040 zurück.

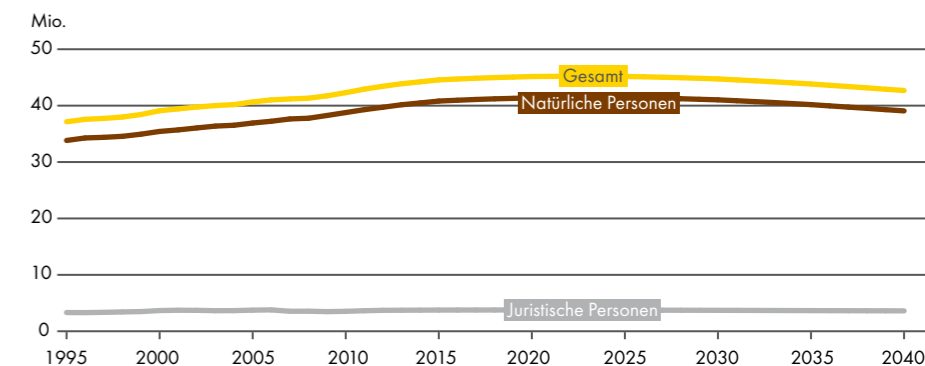
17/MOTORISIERUNG GESAMT UND NACH GESCHLECHT



18/MOTORISIERUNG FRAUEN ZU MÄNNERN NACH ALTERSGRUPPEN



19/ENTWICKLUNG DES PKW-BESTANDS ALLER HALTERGRUPPEN



ENTWICKLUNG DES PKW-BESTANDS

Die Kombination von Motorisierungs- und Bevölkerungsprognose ergibt die Prognosen des Pkw-Bestands nach Altersgruppen und – in Verbindung mit einer separaten Prognose des noch fehlenden Pkw-Bestands nicht-privater Haltergruppen (also juristischer Personen) – die Entwicklung des Pkw-Bestands

in Deutschland insgesamt. Die Aufsummierung geschlechts- und altersspezifischer Einzelprognosen zur Motorisierungsentwicklung zeigt, dass der Pkw-Bestand privater Halter in Deutschland bis 2025 wachsen wird. Ab 2025 beginnt der Abbau des Bestands privater Halter: Im Jahr 2025 werden 41,4 Mio. Pkw gegenüber 39,7 Mio.

Pkw heute registriert sein. Danach wird der private Pkw-Bestand infolge des Rückganges der fahrfähigen Bevölkerung und des Bedeutungsanstiegs weniger stark motorisierter Altersgruppen sowie des sich veränderten Mobilitätsverhaltens auf 39,1 Mio. Pkw im Jahr 2040 zurückgehen.

Neben den heute (2012) rund 39,7 Mio. Pkw privater Halter wird der Gesamtbestand durch die 3,7 Mio. Pkw ergänzt, welche sich im Besitz von nicht-privaten Haltern befinden. Dabei handelt es sich um auf juristische Halter zugelassene Pkw: Dienstwagen der Unternehmen, Fahrzeuge der Pflegedienste, Mietwagenflotten (einschließlich Carsharing), Dienstleister etc. Der Anteil der juristisch angemeldeten Fahrzeuge blieb in der Vergangenheit relativ stabil bei ca. 8,5% des Gesamtbestands.

Die künftige Entwicklung des Pkw-Bestandes von nicht-privaten Haltergruppen wird mittels des Verhältnisses der von juristischen Haltern angemeldeten Fahrzeuge zu den Erwerbstätigen abgeschätzt. Dabei wird von einem moderaten Anstieg dieser Erwerbstätigen-Motorisierung von heute 89 auf 97 Pkw je 1.000 Erwerbstätige im Jahr 2040 ausgegangen. Bei mittelfristig rückläufigen Erwerbstätigenzahlen wird der Pkw-Bestand juristischer Personen zunächst auf fast 3,8 Mio. Pkw im Jahr 2020 ansteigen und dann kontinuierlich zurückgehen, bis 2040 nur noch gut 3,6 Mio. Pkw auf nicht-private Pkw-Halter zugelassen sind.

Die Entwicklung des Pkw-Bestandes aller Haltergruppen insgesamt ist in Abbildung 19 dargestellt. Der Pkw-Bestand steigt von 43,4 Mio. 2012 auf gut 45,2 Mio. zwischen 2020 und 2025 an und geht dann langsam auf 42,7 Mio. Pkw im Jahr 2040 zurück. Bezogen auf den Pkw-Bestand insgesamt zeichnet sich damit für etwa 2025 ein so genanntes *Peak Car* ab. Denn nach 2025 geht der Pkw-Bestand langsam zurück.

Auch der Gesamtmotorisierungsgrad in Deutschland – also der gesamte Pkw-Bestand (privater und juristischer Halter) je 1.000 Einwohner – steigt noch weiter an, nämlich von heute knapp 550 auf den Spitzenwert von knapp 570 Pkw je 1.000 Einwohner. Dieser *Peak-Motorisierungsgrad* wird aufgrund der immer noch steigenden Motorisierung älterer Menschen erst zwischen 2025 und 2030 erreicht. Bis 2040 geht dieser Wert dann auf rund 558 zurück und erreicht damit wieder ein Niveau, mit dem wir auch für das Jahr 2016 rechnen.

## GEWERBLICHE PKW-HALTER UND FIRMENWAGEN

### Pkw-Bestand

Der gesamte Pkw-Bestand setzt sich aus der Fahrzeughaltung der natürlichen und juristischen Personen zusammen. Die Erfassung des Pkw-Bestandes juristischer Personen erfolgt nach der Wirtschaftszweigsystematik des Kraftfahrt-Bundesamtes (KBA 2009; KBA 2013a). Dabei werden selbständige natürliche Erwerbspersonen, das waren zum 1. Januar 2013 schätzungsweise ca. 665.000 Pkw-Halter, unter den privaten Haltern erfasst (und sind auch in den Angaben, die nach Alter und Geschlecht differenziert sind, enthalten). Mit anderen Worten: Im Pkw-Bestand privater Halter (= natürlicher Personen) sind auch die Pkw der Selbständigen enthalten, weil ihre Beschäftigung nicht bei einer juristischen Person erfolgt.

Die privaten Halter schließen also – so auch in der vorliegenden Studie – selbständig Erwerbende ein, wobei deren Anteil am gesamten privaten Pkw-Bestand rund 1,5% ausmacht. Die Unterscheidung zwischen Pkw von juristischen und natürlichen Personen ist folglich nicht deckungsgleich mit der Unterscheidung der Pkw von Privathaushalten und Gewerbe (manchmal auch als Firmenwagen bezeichnet), weil die Selbständigen den privaten und nicht den gewerblichen Pkw-Haltern zugerechnet werden; die Zahl der Firmenwagen aller gewerblichen Pkw-Halter ist also größer als die Zahl der juristischen Pkw-Halter (KBA 2011). Das Kraftfahrt-Bundesamt verwendet den Begriff gewerbliche Halter in seinen Statistiken allerdings generell nicht. Der Anteil der Pkw am Gesamtbestand, deren Halter juristische Personen (ohne natürliche selbständige Personen) sind, ist relativ stabil und lag in der Vergangenheit mit leicht sinkender Tendenz bei rund 8,5%.

### Pkw-Neuzulassungen

Ein anderes Bild bietet sich bei den Neuzulassungen (KBA 2012). Bis zur Jahrtausendwende waren private Neuwagenkäufer noch in der Überzahl. Heute bestimmen mit knapp 62% hauptsächlich die juristischen Personen den Neuwagenmarkt; das macht immerhin 1,8 Mio. Pkw in 2013 aus (KBA 2013b). Dabei dominieren zunehmend die Wirtschaftszweige Handel/Kfz-Reparatur mit Tages- bzw. Kurzzulassungen mit etwa 700.000 Einheiten sowie die Pkw-Vermietung mit rund 300.000 Einheiten. Die größten Zuwächse bei den Neuzulassungen haben im letzten Jahrzehnt aber nicht Mietwagen, sondern Neuzulassungen im verarbeitenden Gewerbe verzeichnet.

Die Struktur der Neuzulassungen zeigt, dass höherwertige Fahrzeuge bei den Pkw-Zulassungen juristischer Halter überwiegen: Während der private Anteil in der Mittelklasse noch bei etwa einem Viertel liegt, sind es in der Oberklasse kaum mehr als ein Zehntel.

Mietfahrzeuge (einschließlich Carsharing) sind überwiegend im Segment der kleineren Autos (Minis, Kleinwagen und Kompaktklasse) vertreten. Zwar haben die Firmen auch Mittelklassewagen, diese bilden jedoch nicht den Kern der Carsharing-Flotte.

Die Kleintransporter (Utility-Klasse bzw. auch Sprinter-Klasse) werden als Pkw zugelassen, wenn eine entsprechende Typgenehmigung vorliegt. Ihr Anteil bei Neuzulassungen beträgt ca. 4%. Bezogen auf die Neuzulassungszahlen in 2013 sind das rund 118.000 Fahrzeuge (davon werden ca. 83.000 von juristischen Haltern genutzt) oder 0,3% des gesamten Pkw-Bestandes.

Weiterhin unterscheiden sich private und juristische Zulassungen bei folgenden Merkmalen: Hubraum und Leistung von juristischen Neuzulassungen fallen im Durchschnitt etwa 10% höher aus als bei privaten Haltern. Und Dieselantriebe überwiegen leicht bei juristischen Neuzulassungen. Alternative Antriebe sind bei privaten Neuwagenkäufern beliebter als bei juristischen; Elektro-Pkw werden jedoch bislang fast ausschließlich auf Firmen zugelassen. Aufgrund des (etwas) höheren Dieselantriebs juristischer Neuzulassungen liegen die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen trotz stärkerer Motorisierung etwa gleichauf mit denjenigen der privaten Neuwagenkäufer bei jeweils rund 142 g CO<sub>2</sub>/km im Jahr 2012 (KBA 2013c).

### ALTERSSPEZIFISCHE PKW-FAHRLLEISTUNGEN UND GESAMTFAHRLLEISTUNG

Die künftige Pkw-Gesamtfahrleistung wird anhand einer Fortschreibung der altersgruppenspezifischen Pkw-Fahrleistungen ermittelt. Die Fahrleistung deutscher Pkw betrug 2012 gemäß *Verkehr in Zahlen* ca. 610 Mrd. Fahrzeugkilometer (DIW 2013, 153). Das entspricht einer durchschnittlichen Jahresfahrleistung von 14.200 km je Pkw, die – unter Berücksichtigung der Bereinigung der Pkw-Bestandsentwicklung um die vorübergehend stillgelegten Pkw – seit Jahren relativ konstant bleibt.

Angesichts der demografischen Entwicklung und dem damit verbundenen altersspezifischen Mobilitätsverhalten einer leicht rückläufigen Pkw-Nutzung wird die durchschnittliche Jahresfahrleistung je Pkw im Prognosezeitraum bis 2040 auf ca. 13.700 km zurückgehen. Die hohen durchschnittlichen Jahresfahrleistungen der Pkw-affinen Altersklassen und von Pkw juristischer Fahrzeughalter können die weniger hohe Jahresfahrleistung der Älteren und der Frauen nicht überkompensieren. Die Erhebung *Mobilität in Deutschland* (MiD) 2008 belegt wie auch schon ihr MiD 2002, dass sich die durchschnittlichen Verkehrs- und Fahrleistungen nach Altersgruppe und auch nach Geschlecht teilweise deutlich unterscheiden. Dies gilt auch für die Fahrleistungen bei privatgenutzten und Firmenfahrzeugen.

Für die zukünftigen altersspezifischen Jahresfahrleistungsentwicklungen spielen folgende Faktoren eine zentrale Rolle: Angleichung der Motorisierung und des Mobilitätsverhaltens zwischen Männern und Frauen in den jüngeren Altersgruppen; Familien mit Kindern bevorzugen weiterhin suburbane Wohnformen, die allerdings mit einem weiten Aktionsradius (Wege zur Arbeit, zum Einkaufen, Hol- und Bring-Funktionen) verbunden sind; insbesondere in den mobilitätsintensiven Altersgruppen der 30- bis 49-Jährigen dürfte die Nutzungsintensität des Pkw dadurch deutlich steigen. Die älteren Personen tendieren zur Reduktion des Mobilitätsaufwandes und nutzen ihren Pkw weniger intensiv als die anderen Altersgruppen. Auch die steigenden Gesundheitskosten dürften die Nutzungsintensität des Pkw bei den Älteren verringern. Die fortschreitende Zunahme der Single-Haushalte in allen Altersklassen führt teilweise zum Verzicht auf Pkw infolge der steigenden Haushaltsgrundkosten.

Für die folgenden Pkw-Fahrleistungsprognosen wurden die Ergebnisse der Erhebungen

MiD 2002 (Infas/DIW 2003) und 2008 (Infas/DLR 2010b) herangezogen, die allerdings nur nach Altersgruppen, nicht aber nach Geschlechtern differenziert sind. Daraus geht hervor, dass die durchschnittliche Jahresfahrleistung insgesamt zwischen 2002 und 2008 leicht zurückgegangen ist: von 14.700 in 2002 auf 14.100 km in 2008. Dahinter steht ein Rückgang der durchschnittlichen Fahrleistungen in den meisten Altersgruppen. Nur bei den Personen über 60 Jahren steigt sie noch (leicht) an. Für die einzelnen Altersgruppen werden folgende Szenarioprognosen abgeleitet:

Die Jahresfahrleistung der unter 30-Jährigen liegt deutlich unter dem oben genannten Durchschnittswert. Trotz sinkender Motorisierung bleibt die Nutzung des Pkw aufgrund eines geringen Einkommens in dieser Altersgruppe praktisch unverändert: 9.900 km heute und 10.000 km zwischen 2015 und 2040.

Nach wie vor erbringen die Altersgruppen der 30- bis 49-Jährigen die höchsten durchschnittlichen Jahresfahrleistungen: rund 18.900 km in der Altersgruppe der 30- bis 39-Jährigen und 17.400 km in der Altersgruppe der 40- bis 49-Jährigen. Bei den beiden am stärksten Pkw-mobilen Altersgruppen kommt es zu einer geringen Zunahme der Jahresfahrleistung bis 2015 und einer anschließenden Stagnation auf diesem Niveau. Der (leicht) sinkende Motorisierungsgrad dieser Altersgruppen führt zu einer intensiveren Nutzung der verbleibenden Fahrzeuge.

Die am höchsten motorisierte Gruppe der 50- bis 59-Jährigen wird die ohnehin hohe Jahresfahrleistung von 14.000 km weitgehend beibehalten, weil vor allem die Frauen ihr Mobilitätsverhalten an dasjenige der Männer angleichen.

Die Altersgruppe der 60- bis 64-Jährigen weist eine relativ niedrige, aber deutlich zunehmende Nutzung ihrer Pkw auf, da diese Altersgruppe noch im erwerbsfähigen Alter ist und stärker als zuvor aktiv bzw. mobil bleiben muss. Die Jahresfahrleistung steigt von 8.200 heute auf 10.000 km je Pkw 2040 und liegt dann auf demselben Niveau wie die Altersgruppe der unter 30-Jährigen.

Deutlich niedrigere durchschnittliche Jahresfahrleistungen weisen heute Ältere mit über 65 Jahren auf: 2008 waren es rund 6.000 km. Mit der Zunahme der Bedeutung des Freizeitverkehrs und in Verbindung mit einer zunehmenden guten gesundheitlichen

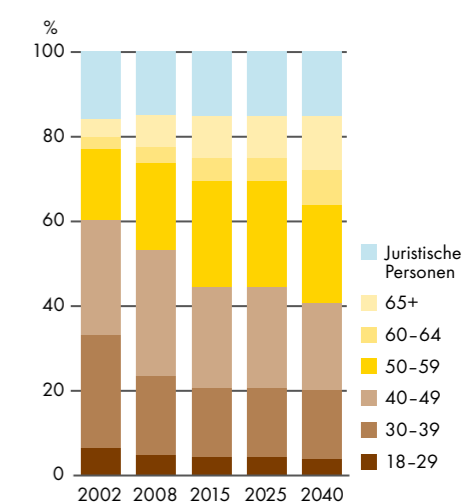
Verfassung der Pkw-mobilen älteren Menschen wird die Jahresfahrleistung bis 2040 auf 7.500 km ansteigen.

Die von juristischen Personen gehaltenen Pkw haben eine deutlich höhere Jahresfahrleistung als der Durchschnitt der privat gehaltenen Pkw. Die branchenspezifischen Mobilitätsprofile (z.B. Taxi, Pizza-Kurier, Mietfahrzeug, mobile Pflegedienste) weisen ganz unterschiedliche Jahresfahrleistungen auf. Im Mittel wird die durchschnittliche Jahresfahrleistung der Pkw juristischer Personen heute auf knapp 25.000 km geschätzt. In 2008 war es konjunkturbedingt etwas weniger (24.600 km). Die Jahresfahrleistung wird bis 2015 noch geringfügig auf 25.000 km je Pkw ansteigen und dann bis 2040 konstant bleiben.

Aus der Verknüpfung der altersgruppenspezifischen Pkw-Bestandes- mit den altersgruppenspezifischen Nutzungsintensitätsprognosen (der je Pkw erbrachten durchschnittlichen Jahresfahrleistung) ergibt sich die Gesamtfahrleistung der Pkw. Diese betrug im Jahr 2012 rund 610 Mrd. Fahrzeugkilometer und wird infolge der steigenden Motorisierung bis 2020 auf 626 Mrd. Fahrzeugkilometer ansteigen. Ab 2020 überwiegen die Pkw-Mobilität reduzierenden Effekte, das sind zum einen weniger Pkw-Halter, zum anderen geringere altersgruppenspezifischen Fahrleistungen. In der Folge kommt es zu einem Rückgang der Fahrleistung auf 580 Mrd. Fahrzeugkilometer in 2040 (was etwa dem Betrag des Jahres 2003 entspricht).

Auch der *Peak* der Pro-Kopf-Pkw-Fahrleistungen wird im Jahr 2020 liegen und dann etwa 7.830 km je Einwohner betragen; heute liegt dieser Betrag bei gut 7.700 km, und 2040 werden es 7.580 km je Einwohner sein, was

### 20/ENTWICKLUNG DER ALTERSSPEZIFISCHEN PKW-FAHRLLEISTUNG





etwa dem Betrag der Jahre 2011/2012 entspricht. Die Entwicklung der absoluten Pkw-Fahrleistungen in Pkw-km ist in der unteren Kurve der Abbildung 24 dargestellt, die Entwicklung der Pkw-Fahrleistungsanteile (in Pkw-km) nach Haltersegmenten – und bei den privaten Haltergruppen nach Altersklassen – ist in Abbildung 20 dargestellt. Der Anteil der von älteren Personen erbrachten

Pkw-Fahrleistungen wird infolge des demografischen Wandels deutlich zunehmen. Der Anteil der Fahrleistung der unter 30-Jährigen geht hingegen kontinuierlich zurück, während die Fahrleistung der von juristischen Personen genutzten Fahrzeuge über die Jahre weitgehend konstant bleibt. Nach 2025 stagnieren die Veränderungen der altersspezifischen Anteile an der Gesamtfahrleistung. Es findet

lediglich eine Umverteilung zwischen der Altersgruppe der 60- bis 64-Jährigen und der über 65-Jährigen zugunsten der älteren Altersklasse statt. Da der Bevölkerungsanteil der über 65-Jährigen von heute 21 % auf 31 % 2040 wächst, nimmt der Anteil dieser Altersgruppe insgesamt trotz steigender, aber dennoch geringerer altersgruppenspezifischer Fahrleistungen von 9 % auf 15 % deutlich zu.

## PKW- UND PERSONENMOBILITÄT

Zur Prüfung der Konsistenz werden die Bottom-Up-Prognosen für die Kenngrößen des Pkw-Verkehrs (Pkw-Bestand, Pkw-Fahr- sowie Pkw-Verkehrsleistungen) – mittels einer Top-Down-Prognose zur Entwicklung des Personenverkehrs mit motorisierten Landverkehrsmitteln in Deutschland insgesamt validiert. Nicht erfasst bzw. dargestellt werden im Folgenden Fußwege, Fahrradwege und Luftverkehr.

Dies hat statistische wie auch inhaltliche Gründe: Fuß- und Fahrradwege werden nicht regelmäßig statistisch erfasst, sondern nur im Rahmen von Mobilitätshebungen. Nach darauf basierenden Schätzungen decken sie aktuell jeweils knapp 3 % der gesamten Personenverkehrsleistung in Pkm ab (vgl. DIW 2013, 224f.). Beim Luftverkehr werden in der Statistik nur die Verkehrsleistungen auf den inländischen Streckenanteilen und nur für ausgewählte Flughäfen ausgewiesen; damit sind diese Zahlen mit den anderen Angaben nicht vergleichbar. Außerdem dient der Luftverkehr im Unterschied zu den übrigen Verkehrszweigen hauptsächlich nur zwei Wegezwecken (Geschäfts- und Freizeit-/Urlaubsreisen) und weist damit nur geringe Substitutionspotenziale mit landgebundenen Verkehrsmitteln auf. Die Abstimmung der Prognoseergebnisse erfolgt in drei Schritten:

Zunächst werden die Personenverkehrsleistungen mit motorisierten Landverkehrsmitteln (Individual- und Öffentlicher Verkehr) mittels des gesamtmodalen Mobilitätsstreckenbudgets prognostiziert. Das Mobilitätsstreckenbudget gehört zu den zentralen Mobilitätskenngrößen. Über die zurückgelegten Wegelängen bzw. die Personenverkehrsleistung pro Kopf und Jahr gibt es Auskunft über die durchschnittliche Mobilität und Verkehrsbeteiligung der Einwohner. In Verbindung mit der Bevölkerungsprognose ergeben sich daraus die gesamtmodalen Personenverkehrsleistungen.

entfernungsgewichtete Besetzungsgrad ist der Quotient aus der Verkehrsleistung und Fahrleistung mit Pkw, führt also von der Pkw-Verkehrsleistung zur Pkw-Fahrleistung, in beiden Ansätzen das letzte Prognoseresultat (Abbildung 14).

Verbrauch Angaben der amtlichen Statistik. Trotz einzelner Sprünge in der Vergangenheit zeigt die Entwicklung der Personenverkehrsleistung pro Einwohner (Pkm/Kopf) einen stetigen Anstieg, der sich noch bis 2025 fortsetzt.

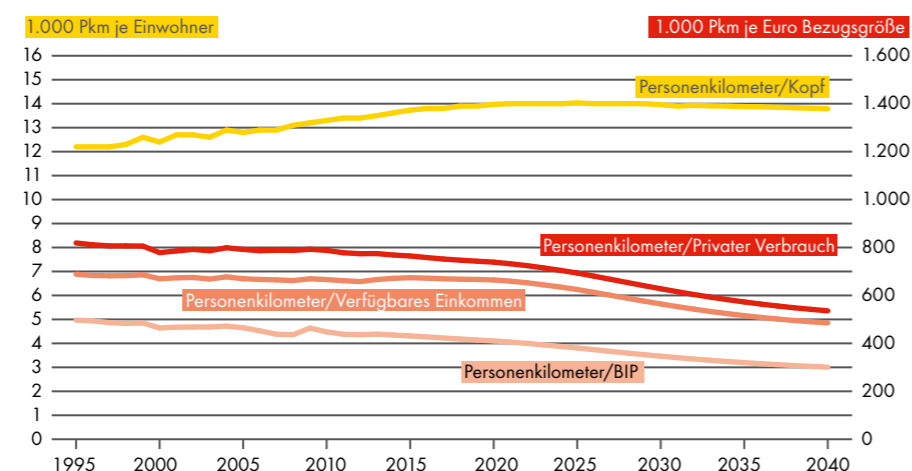
Abbildung 21 zeigt die Entwicklung des durchschnittlichen Mobilitätsstreckenbudgets (linke Skala). Die historischen Daten sind für den MIV Schätzungen des DIW (DIW 2013, 153), für den öffentlichen Verkehr sowie für das Bruttoinlandsprodukt und den privaten

Nach 2025 geht die Verkehrsleistung pro Kopf insbesondere aufgrund des demografischen Wandels leicht zurück, bleibt jedoch auf einem hohen Niveau von 14.000 Pkm/Kopf. Dieser Wert zählt zu den höchsten in Europa (ProgTrans 2010, 340).

In einem weiteren Schritt werden die Personenverkehrsleistungen sukzessive auf die Landverkehrsträger (Modalsplit) aufgeteilt: Zuerst werden die Verkehrsleistungen auf den motorisierten Individualverkehr (MIV: Pkw und Krafträder) und den Öffentlichen Verkehr (ÖV) aufgeteilt. Anschließend wird eine weitergehende Differenzierung des MIV auf Pkw und Krafträder vorgenommen sowie der öffentliche Verkehr nach Öffentlicher Straßenpersonnenverkehr (ÖSPV), Schienennahverkehr (SNV) sowie Schienenfernverkehr (SFV) aufgegliedert.

Abschließend wird die Prognose der entfernungs-gewichteten Besetzungsgrade als Abstimmungsgröße zwischen den beiden Prognoseansätzen im Pkw-Verkehr erstellt. Der

21/GESAMTMODALES MOBILITÄTSSTRECKENBUDGET, VERKEHRSLEISTUNGEN JE EINWOHNER UND JAHR UND MOBILITÄTSINTENSITÄTEN



### FAHRRAD – DIE ÖKOLOGISCHE ALTERNATIVE?

Neben dem Auto nimmt das Fahrrad einen führenden Platz als Massenverkehrsmittel im Industrieland Deutschland ein. Aus statistischen Erhebungen zur Ausstattung von Haushalten mit Gebrauchsgütern (Einkommens- und Verbraucherstichprobe sowie Laufende Wirtschaftsrechnungen) geht hervor, dass es in Deutschland über 70 Mio. Fahrräder gibt (StBA 2013a, 15). Der Ausstattungsgrad der privaten Haushalte mit Fahrrädern liegt ähnlich hoch wie derjenige mit Autos, nämlich bei rund 80 %. Allerdings ist der Ausstattungsbestand mit rund 180 Fahrrädern pro 100 Haushalte fast doppelt so hoch wie derjenige mit Pkw mit 105 Fahrzeugen. Diese Größenordnungen werden durch die Erhebung *Mobilität in Deutschland 2008* belegt (Infas/DLR 2010b, Haushalte, 4, 7).

Fahrräder und Fahrradverkehr haben sich in den vergangenen Jahren stark gewandelt. In der Fahrradtechnik gab es eine Vielzahl von Innovationen: neue Schaltungen, verbesserte Brems- und Beleuchtungstechnik, leichtere Materialien und anderes bewirken alle zusammen mehr Komfort und Verkehrssicherheit. Neue Fahrradtypen decken immer besser unterschiedlichere Kundenbedürfnisse ab.

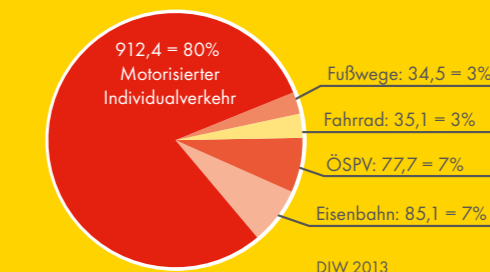
Die neueste Entwicklung sind (schnelle) Pedececs bzw. E-Bikes; das sind – je nach Nenndauer- und Unterstützungsleistung – Fahrräder oder auch Krafträder mit elektrischem Hilfsantrieb. Ferner wird der Zugang und die Nutzung von Fahrrädern in immer mehr Städten durch Fahrradverleihsysteme – zum Beispiel für intermodale Verkehre – erleichtert. Generell scheint sich das Fahrrad einer gestiegenen gesellschaftlichen Wertschätzung zu erfreuen.

Fahrräder gelten als ökologische und platzsparende Alternative im Personenverkehr, gerade im urbanen Verkehr. Eingesetzt wird das Fahrrad vor allem auf Strecken bis 5 km sowie für die Wegezwecke Einkauf, Freizeit und Beruf. Der Verkehrsanteil des Fahrrades an allen zurückgelegten Wegen im Personenverkehr (Verkehrsaufkommen) liegt inzwischen bei 10 % (DIW 2013, S. 222f).

Städte und Regierungen haben sich vielfach zum Ziel gesetzt, den Fahrradverkehr zu fördern und auszuweiten. Der Nationale Radverkehrsplan sieht bis 2020 eine Steigerung des Fahrradanteils am Verkehrsaufkommen von 10 auf 15 % vor (BMVBS 2012).

Ungeachtet des Trends zum Fahrrad darf jedoch nicht übersehen werden: In der Beliebtheit und Häufigkeit der Verkehrsmittelnutzung liegt das Auto weit vor dem Fahrrad (Sinus/ADFC 2013). Und der Anteil des Fahrrades an der Personenverkehrsleistung ist mit rund 35 Mrd. Personenkilometern klein, nämlich nur rund 3 %, während es beim Pkw rund 80 % sind (DIW 2013, 222f). Einen Überblick über die Bedeutung der verschiedenen Verkehrszweige im Landverkehr insgesamt bietet die nachfolgende Abbildung.

22/PERSONENVERKEHRSLEISTUNG NACH LANDVERKEHRSMITTELN 2011 (IN MRD. PKM UND %)



Für die Projektion der gesamtmodalen Personenverkehrsleistungen können verschiedene Mobilitätsintensitäten der Personenverkehrsleistung herangezogen werden: die Personenverkehrsleistungen je 1.000 Euro Bruttoinlandsprodukt (BIP) als Kenngröße des Zusammenhangs von Wirtschafts- und Personenverkehrsleistungsentwicklung sowie die Personenverkehrsleistung im Verhältnis zum Privaten Verbrauch und zum verfügbaren Einkommen als Leitgrößen des effektiven Konsums bzw. der persönlichen finanziellen Leistungsfähigkeit. Die drei Leitgrößen sind in Abbildung 21 in konstanten Preisen des Jahres 2005 ausgewiesen. Es zeigt sich, dass die Verkehrsleistungen in Relation zu den jeweiligen ökonomischen Leitvariablen schon in der Vergangenheit rückläufig waren – am deutlichsten zu sehen bei den Pkm je Einheit BIP. Für die Zukunft ist von einem weiteren Rückgang aller drei Mobilitätsintensitäten auszugehen. Auf der einen Seite steigen das BIP und das verfügbare Einkommen schneller als die Mobilitätsnachfrage, weil sich das verfügbare Einkommen auf Arbeitnehmerentgelte sowie Unternehmens- und

Vermögenseinkommen aufteilt und die Arbeitnehmerentgelte, aus denen vor allem die Personenmobilität finanziert wird, seit dem Jahr 2000 und auch zukünftig schwächer steigen als die Vermögens- und Unternehmenseinkommen. Auf der anderen Seite konkurriert Mobilität beim privaten Verbrauch (zunehmend stärker) mit anderen Konsumausgaben.

Im zweiten Prognoseschritt wird die Entwicklung des Modalsplits trendmäßig, aber unter Berücksichtigung des demografischen Wandels, fortgeschrieben.

Seit Mitte der 1990er Jahre sind die Personenverkehrsleistungen im MIV (Pkw und Krafträder) um rund 100 Mrd. Pkm gestiegen. Da gleichzeitig auch die ÖPNV-Verkehrsleistungen deutlich zunahm, liegt der MIV-Anteil im Modalsplit relativ konstant bei 85 % seit Beginn der 2000er Jahre mit leicht abnehmender Tendenz.

Auch künftig wird sich der Modalsplit der (motorisierten) Verkehrsträger nur langsam ändern: Der MIV wird aufgrund des

demografischen Wandels – vor allem des weiter steigenden Durchschnittsalters und des damit verbundenen Umsteigens älterer Menschen auf den ÖPNV – sowie aufgrund eines Bedeutungsanstiegs des Fernbusverkehrs leicht an Bedeutung verlieren. Das bedeutet, dass der MIV zugunsten des ÖV zwischen 2013 und 2040 0,5 Prozentpunkte oder 32 Mrd. Pkm verliert; der MIV-Anteil sinkt von 84,9 % auf 84,4 %, die jährliche MIV-Personenverkehrsleistung von gut 920 auf etwa 890 Pkm.

Bei der Aufteilung der MIV-Verkehrsleistungen werden die Krafträder infolge der Zunahme von elektrisch angetriebenen Krafträdern einen geringfügigen Anteilzuwachs erfahren (von 1,9 % im Jahr 2013 auf 2,1 % im Jahr 2040). Abbildung 23 fasst die künftige Entwicklung des Modalsplit zusammen.

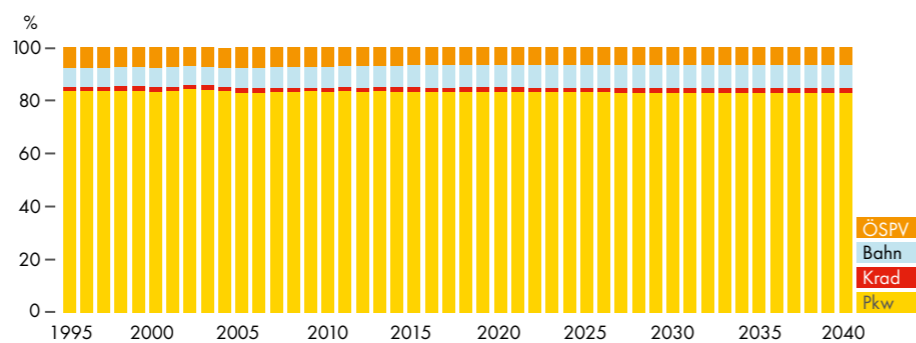
Der finale Abgleich der Bottom-Up- und Top-Down-Prognose erfolgt über den durchschnittlichen entfernungs-gewichteten Besetzungsgrad von Pkw in der Dimension Personenkilometer je Fahrzeugkilometer. Der

Pkw-Besetzungsgrad weist einen langfristig rückläufigen Trend auf und liegt zurzeit bei knapp 1,5 (vgl. Abbildung 24). Zum sinkenden Besetzungsgrad hat unter anderem die steigende Erwerbsbeteiligung beigetragen; denn beruflich bedingte Wegezwecke weisen die geringsten Besetzungsgrade auf.

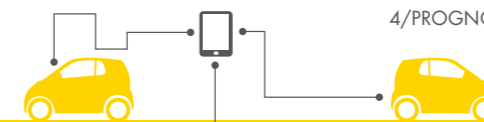
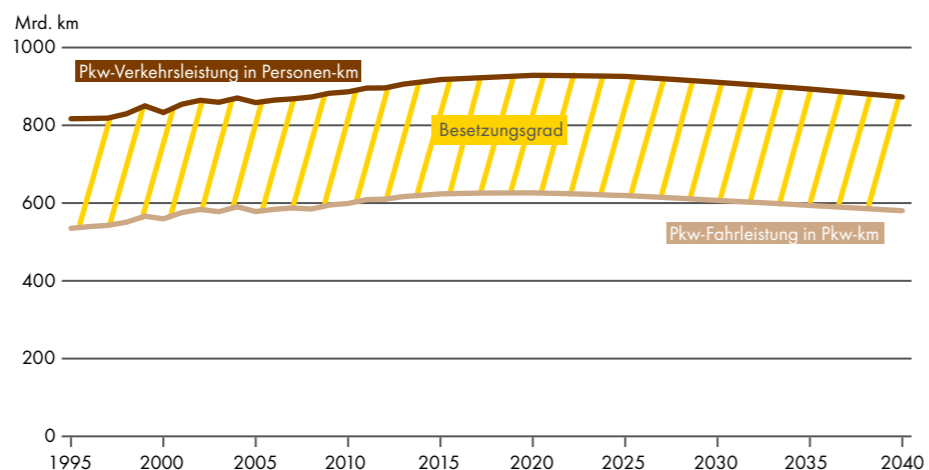
Die ab der zweiten Hälfte der 2020er Jahre sinkende Pro-Kopf-Motorisierung, der tendenzielle Ausstieg aus dem Zweitwagen-Besitz und die daraus resultierende Abnahme des Pkw-Bestandes implizieren eine intensivere Pkw-Nutzung und einen höheren Besetzungsgrad als bisher. Auch die zunehmende Bedeutung des Freizeitverkehrs ebenso wie Begleitwege tragen zum höheren Besetzungsgrad bei. In Zukunft dürfte dieser daher nicht weiter sinken, sondern bis 2040 wieder leicht ansteigen: von heute 1,47 auf etwa 1,50 Personen/Pkw.

Mit den geschilderten Prognoseannahmen führen die gesamtmodale Top-Down-Prognose und die Bottom-up-Prognose für den Pkw-Verkehr zu einer identischen Entwicklung der Pkw-Verkehrs- und -Fahrleistungen in Deutschland bis zum Jahr 2040. Die Szenarioprognosen sind damit im Hinblick auf alle getroffenen Annahmen vollständig konsistent.

23/MODALSPILT DER PERSONENVERKEHRSLEISTUNGEN



24/VERKEHRS- UND FAHRLEISTUNGEN DES PKW



## CARSHARING – MIETEN STATT BESITZEN?

Eine Alternative zum individuellen Pkw-Besitz stellt das Carsharing dar. Carsharing ist die organisierte, gemeinschaftliche Nutzung von Kraftfahrzeugen (BCS 2014) und wird heute in Deutschland von etwa 150 Unternehmen und Vereinen meist in urbanen Zentren angeboten.

Es ist grundsätzlich zu unterscheiden zwischen stationsbasiertem Carsharing (von festen, gut angebundenen und wohnungsnahen Mietstationen) und flexiblem Carsharing, das heißt frei im Straßenraum verfügbaren Carsharing-Angeboten, auch Free Floating genannt; hierbei können frei parkende Mietautos aus einer räumlich definierten Parkzone – teilweise spontan – genutzt werden.

Zugriff auf das Fahrzeugangebot haben in der Regel nur registrierte Nutzer. Anders als bei Mietwagen schließt der Kunde nur einmal zu Beginn einen Rahmenvertrag mit dem Anbieter ab und kann in der Folge jederzeit Carsharing-Angebote buchen. Über neue Medien und Kommunikationstechnologien besteht in der Regel rund um die Uhr Zugang zu Carsharing. Oft ist auch ein sehr kurzzeitiges Anmieten (meist ab einer Stunde) möglich. Nutzungstarife basieren auf Zeit- und Kilometerkomponenten.

Carsharing-Angebote lohnen sich in der Regel für Personen, die nur selten und unregelmäßig mit dem Pkw fahren (wollen). Nach bisherigen Erkenntnissen nutzen vor allem jüngere Männer mit überdurchschnittlicher Bildung (auch Studenten) und



überdurchschnittlichem Einkommen im städtischen Umfeld Carsharing (Hülsmann et al. 2014; Lenz/Bogenberger 2014).

Carsharing kann den eigenen Pkw ersetzen oder auch ergänzen (zum Beispiel den Zweit- oder Drittwagen); gleiches gilt für den Öffentlichen Verkehr. Da Carsharing-Fahrzeuge von mehreren Nutzern geteilt genutzt werden, kann ein Carsharing-Pkw zumindest theoretisch mehrere Pkw ersetzen und so Verkehrsflächen und Ressourcen sparen helfen. Eine hinreichend valide Aussage über die Auswirkungen von Carsharing auf die Pkw-Motorisierung und Pkw-Nutzung (ebenso wie den ÖV) ist zurzeit noch nicht möglich. Zum Mobilitätsverhalten der Nutzer von Carsharing-Modellen, insbesondere in Verbindung mit Elektromobilität, laufen zurzeit die Forschungsprojekte share (bis 2016) und WiMobil (bis 2015) (BMU 2014).

Grundsätzlich gibt es Carsharing schon länger in Deutschland – seit über 25 Jahren. Allerdings hat sich Carsharing, vor allem in der Free-Floating-Variante, erst in der jüngeren Vergangenheit sehr dynamisch entwickelt. Heute gibt es mehr als 750.000 registrierte Nutzer (einschließlich Doppel-/Mehrfahrzählungen) und rund 14.000 Carsharing-Fahrzeuge (Loose 2014). Selbst wenn ein Carsharing-Fahrzeug mehrere Pkw ersetzt, ist die Carsharing-Flotte im Vergleich zu den fast 44 Mio. Pkw in Deutschland nach wie vor noch sehr klein, so dass Pkw-Besitz weiterhin eher selektiv ersetzt bzw. ergänzt werden dürfte.



## NEUES VERKEHRSMITTEL FERNBUS?

Der Verkehrszweig Fernbus zählt zum Personenfernverkehr. Fernbusse sind in der Regel Reisebusse, die im Linienverkehr größere und weit voneinander entfernte Orte – meist Großstädte – bedienen. Im Ausland spielt der Fernbus zum Teil eine große Rolle im Personenfernverkehr – etwa bei geringer Bevölkerungsdichte oder unzureichender Schieneninfrastruktur.

In Deutschland war der Fernbusverkehr bislang stark durch das Personenbeförderungsgesetz reglementiert. Danach war ein Fernbusangebot parallel zum Schienenpersonenverkehr weitestgehend verboten; ausgenommen waren aus historischen Gründen nur Fernbuslinien von und nach Berlin.

Im Jahr 2012 wurden durch die Novellierung des Personenbeförderungsgesetzes die Wettbewerbsbeschränkungen für Fernbusse weitgehend aufgehoben. Seit dem 1.1.2013 können ab einer Distanz von 50 km und ab einer Beförderungszeit von mehr als 60 Minuten im Schienennahverkehr Fernbusverkehre angeboten werden. Seitdem haben sich in Deutschland zahlreiche Fernbusanbieter etabliert, die einzelne Relationen bedienen. Ende 2013 waren bereits über 200 innerdeutsche Fernbusverbindungen registriert, und rund ein halbes Dutzend Unternehmen bietet deutschlandweit Fernbusverbindungen an.

Auch für Fernbusse existieren bislang kaum wissenschaftliche Studien über ihre Auswirkungen auf den Personenverkehr. Bisher vorliegende Befragungsergebnisse deuten jedoch alle darauf hin, dass der Fernbus Fahrgäste aus anderen Verkehrsträgern abzieht, insbesondere vom Bahnverkehr, aber auch vom Pkw (Selbst- und Mitfahrer) sowie vom (inländischen) Flugverkehr. Teilweise mobilisiert der Fernbus aufgrund seiner vergleichsweise niedrigen Fahrpreise jedoch auch Neukunden, also zusätzliche Verkehrsnachfrage. Fernbusse werden gerne von jüngeren Personen genutzt, zunehmend aber von Senioren, vorwiegend für private oder Freizeitzwecke (Augustin 2014). Die künftige Entwicklung des Fernbusverkehrs hängt von weiteren Verbesserungen bei Infrastruktur (Busbahnhöfe) und Verbindungsangeboten ab. Zur Einordnung und Potenzialabschätzung lässt sich jedoch festhalten: Das Fernbusangebot und die Beförderungsleistung durch Fernbusse haben seit 2013 zwar deutlich zugelegt.

Wie groß ist jedoch das Potenzial des Fernbusses? Insgesamt erbrachten Fernbusse in 2013 im Linienverkehr für 2,8 Mio. Fahrgäste eine Beförderungsleistung von 1,1 Mrd. Personenkilometern (Pkm). Die Eisenbahn beförderte im gleichen Zeitraum 131,4 Mio. Fahrgäste und erbrachte dabei eine Beförderungsleistung von 36,8 Mrd. Pkm (StBA 2014a, Tabellenblatt 2.1.1). Die Anzahl der beförderten Personen über alle motorisierten Landverkehrsmittel lag im Jahr 2012 bei nahezu 70 Mrd., die Beförderungsleistung bei über 1.100 Mrd. Pkm (vgl. DIW 2013, 217, 219).

## → FAZIT: DER PKW – VERKEHRSMITTEL DER ZUKUNFT?

Über die Zukunft des Automobils wird heute viel und kontrovers diskutiert: Auf der einen Seite werden die Autos immer zahlreicher und die Straßen immer voller. Auf der anderen Seite müsste es für eine weitgehend stabile Bevölkerung doch irgendwann auch irgendeine automobilen Sättigungsgrenze geben.

Die Prognose von Pkw-Motorisierung und -Fahrleistungen gibt erste Antworten auf wichtige automobilen Zukunftsfragen: Wie viele Autos wird es künftig in Deutschland geben? Wie viele Kilometer werden diese fahren? Und welche Rolle wird das Verkehrsmittel Automobil dabei im Mobilitätsmix einnehmen?

Die Pkw-Motorisierung der deutschen Bevölkerung (einschließlich juristischer Personen) wird bis etwa 2027/2028 noch leicht ansteigen – von heute (2014) rund 550 auf nahezu 570 in der zweiten Hälfte der

2020er Jahre – und anschließend zurückgehen – auf 558 Pkw pro 1.000 Einwohner im Jahr 2040. Hauptursache des Rückgangs ist zum einen die teilweise recht deutlich rückläufige Männermotorisierung, zum anderen eine (leicht) sinkende Motorisierung der oberen und unteren Altersklassen. Zudem sinkt die zahlenmäßige Besetzung der am stärksten motorisierten Altersklassen (von etwa 35 bis 60 Jahre) gegenüber heute bis 2040 um über 5 Mio. Einwohner.

Die heute jüngeren Altersklassen weisen deutlich geringere Motorisierungen auf als dieselben Altersklassen in früheren Jahren; teilweise handelt es sich auch nur um eine aufgeschobene Pkw-Anschaffung. Im Zuge der demografischen Alterung schrumpft die Altersklasse der unter 30-jährigen fahrfähigen Bevölkerung (ab 18 Jahren) um etwa 2,3 Mio. auf gut 9 Mio. Einwohner. Zusammen

mit dem Motorisierungsrückgang reduziert sich daher ihre Pkw-Flotte von heute 2,8 auf nur noch 2,3 Mio. Pkw.

Mit dem demografischen Wandel wächst die Anzahl der Einwohner über 65 Jahre gegenüber heute um nahezu 7 Mio. auf 23,7 Mio. Einwohner. Die jüngeren Alten von 65 bis etwa 75 Jahre steigern ihr Motorisierungsniveau, so dass sich ihr Pkw-Bestand von 5,3 auf 7,1 Mio. erhöht. Die über 75-Jährigen reduzieren ihr Motorisierungsniveau, teilweise zugunsten alternativer Verkehrsmittel (wie ÖV); aufgrund der stärkeren Besetzung dieser Altersklasse nimmt auch hier der Pkw-Bestand von rund 3 auf 5 Mio. zu.

Frauen übernehmen einen zunehmenden Anteil an der Motorisierung. Durch die Frauenmotorisierung steigt die Motorisierung in den mittleren Altersklassen (45 bis 75 Jahre Männer und Frauen) insgesamt sogar noch an,

besonders stark in den Altersklassen der 60- bis 70-Jährigen.

Der Gesamt-Pkw-Bestand steigt von heute (2014) 44,2 Mio. auf 45,2 im Jahr 2025 und sinkt anschließend auf 42,7 Mio. Pkw 2040 – bei allerdings auch nahezu 4 Mio. weniger Einwohnern. Bezogen auf die gesamte Pkw-Flotte könnte man bereits in der ersten Hälfte der 2020er-Jahre von *Peak Car* sprechen; die Pkw-Motorisierung erreicht den Peak allerdings erst in der zweiten Hälfte der 2020er-Jahre und notiert in 2040 immer noch ganz leicht über dem heutigem Niveau.

Bei der Pkw-Nutzung zeigen sich zwei unterschiedliche Tendenzen: Die durchschnittliche Jahresfahrleistung je Pkw, die schon in der Vergangenheit leicht abgesunken ist (von etwa 14.300 km im Jahr 2000 auf gut 14.000 km im Jahr 2014), wird sich bis 2040 auf etwa 13.600 km reduzieren. Die

Pkw-Verkehrsleistung je Einwohner steigt hingegen noch bis 2025 an (von heute 11.330 auf dann 11.650 km) und reduziert sich danach bis 2040 auf 11.400 km je Einwohner.

Hierin spiegelt sich auch der Nachfrage-rückgang bei der Pro-Kopf-Personenverkehrsleistung (in Pkm) insgesamt wider. Die Pkw-Motorisierung erreicht ihren Peak also etwas später als die Pkw-Nutzungsintensität, gemessen an der Pkw-Verkehrsleistung je Einwohner.

Die Pkw-Gesamtfahrleistungen legen nur noch bis etwa 2020 zu, von heute 610 auf 626 Mrd. Pkw-Kilometer und sinken anschließend bis 2040 auf das Niveau von 2005 ab.

Pkw juristischer Personen (Dienst-/Firmenwagen) machen rund 8,5% des deutschen Pkw-Bestandes aus. Allerdings erfolgen Pkw-Neuzulassungen inzwischen überwiegend

auf juristische Personen. Neue Firmenwagen haben im Durchschnitt etwas mehr Leistung als Privat-Pkw, ihre CO<sub>2</sub>-Emissionen liegen jedoch etwa auf gleicher Höhe. Firmenwagen sind folglich vielfach besser als ihr Ruf.

Mobilität der Zukunft heißt auch, dass sich Mobilitätsverhalten ändert und auch alternative Verkehrsmittel verstärkt eingesetzt werden. Zum alternativen Verkehrsverhalten und zu alternativen Verkehrsmitteln gehören zum Beispiel Carsharing, Fernbusse und das Fahrrad.

Solche neuen Formen der Mobilität können und werden künftig einen größeren Beitrag zum Personenverkehr leisten. Sie können den Pkw im Mobilitätsmix jedoch nicht (näherungsweise) ersetzen. Der Anteil des Pkw an allen Personenverkehrsleistungen dürfte auch 2040 – wie heute – bei über 80% liegen.

5

# ANTRIEBE UND KRAFTSTOFFE



Im Folgenden werden die wichtigsten Fakten und Trends rund um die Antriebstechnik und die Kraftstoff- bzw. Energieversorgung des Pkw dargestellt. Dabei wird zunächst die historische Verbreitung von Antriebstechnologien im Pkw-Bestand in Deutschland analysiert, denn hieraus lassen sich Rückschlüsse auf die künftige Entwicklung von Antriebstechnologien im Pkw-Bestand ziehen.

Im Anschluss werden die wichtigsten Pkw-Antriebskonzepte, ihre Eigenschaften und Funktionsweise sowie mögliche technologische Zukunftstrends diskutiert. Von besonderem Interesse ist hierbei die Entwicklung von Verbrennungsmotor und Elektromobilität. Letzterer wird das Potenzial einer disruptiven Technologie (*disruptive innovation*) zugesprochen, die heutige Antriebstechniken einst (nahezu) vollständig verdrängen könnte (Christensen 1997, Chapter 10; IEA 2014, Chapter 6). Wird es bei den Pkw-Antrieben schon bald eine technologische Revolution geben – oder doch eher eine allmähliche Technologiewerschiebung (Evolution)? Und welche Rolle wird der Verbrennungsmotor als Antriebsquelle künftig spielen?

Entwicklung, Zusammensetzung und Nutzung des Pkw-Bestandes bestimmen den Kraftstoff- bzw. Endenergieverbrauch des motorisierten Individualverkehrs. Nach den Antriebstechnologien im Pkw-Bestand wird daher die Entwicklung des Pkw-Kraftstoffverbrauchs sowie des Kraftstoffmixes in Deutschland analysiert. Hierbei werden die heute und künftig wichtigsten Kraftstoff- bzw. Energieoptionen, ihre Eigenschaften und auch wichtige Zukunftstrends erörtert.

### ANTRIEBE IM PKW-BESTAND

Die Zahl der Antriebskonzepte und Kraftstoffe war in der automobilen Vergangenheit sehr übersichtlich. In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts basierte motorisierter Individualverkehr in Deutschland (fast) allein auf dem Ottomotor. Sowohl bei den Pkw-Neuzulassungen als auch im Pkw-Bestand erreichte der Ottomotor bis etwa 1980 Anteile von 95 % und mehr. Als neuer (Otto)-Antrieb wurde in den 1960er Jahren zunächst der Wankel- oder auch Rotationskolbenmotor eingeführt; in den 1970er Jahren wurden Pkw außerdem erstmals auch mit Flüssiggas betrieben. Beide Antriebe erreichten etwa 10 Jahre nach ihrer Markteinführung ein (vorläufiges) Maximum

von je 20.000 bzw. 25.000 Einheiten, konnten sich in der Folge aber nicht im deutschen Pkw-Bestand halten oder gar durchsetzen.

Die einzige Alternative zum Otto-Antrieb, der sich in den vergangenen 50 Jahren im deutschen Pkw-Bestand nachhaltig durchsetzen konnte, ist der Dieselmotor. Ursprünglich wurde er fast ausschließlich in Nutzfahrzeugen aller Art eingesetzt. Lange Zeit lag der Bestandsanteil des Pkw-Diesels zwischen 3 und 4%. Erstmals 5% und auch mehr als eine Million Diesel-Pkw im Bestand wurden im Jahr 1980 erreicht. Im Gefolge der zweiten Ölpreiskrise kletterte die Zahl der Diesel-Pkw bis zur Jahrtausendwende auf rund 5 Mio.

Einheiten. Der Diesel-Flottenanteil verharrte dabei jedoch lange bei etwa 13 % – dies allerdings bei deutlich wachsendem Pkw-Bestand.

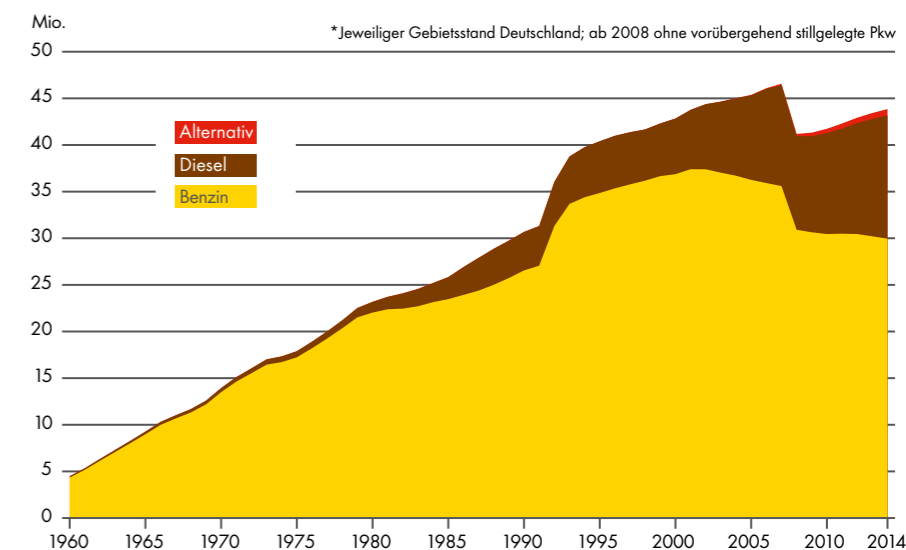
In vielen anderen europäischen Ländern hatte sich der Dieselmotor im Pkw-Bereich schon weit eher und stärker als Antriebsalternative etabliert. Zum Pkw-Diesel-Land wurde Deutschland jedoch erst nach der Jahrtausendwende. Ein rasanter technologischer Fortschritt in der Dieselmotor-Technologie, die Auswirkungen einer substanziellen Energiesteuererhöhung zulasten des Ottokraftstoffes, die Einführung der Ökosteuer sowie höhere Kraftstoffpreise im Gefolge des Energiepreis-

booms führten schließlich zum großen Durchbruch des Dieselmotors auch bei den Pkw. Seit der Jahrtausendwende erreichen Diesel-Pkw in Deutschland regelmäßig – ausgenommen das Jahr 2009 – Pkw-Neuzulassungsanteile zwischen 40 und 50 %, im Pkw-Bestand besitzen Diesel-Pkw inzwischen einen Anteil von rund 30 %. Der Dieselmotor ist heute kein alternativer Antrieb mehr. Vielmehr hat er sich neben dem Ottomotor längst als zweiter Hauptantrieb in der deutschen Pkw-Flotte etabliert. Für einige Nutzersegmente wie Viel- und Berufsfahrer ist er inzwischen der Standardantrieb schlechthin.

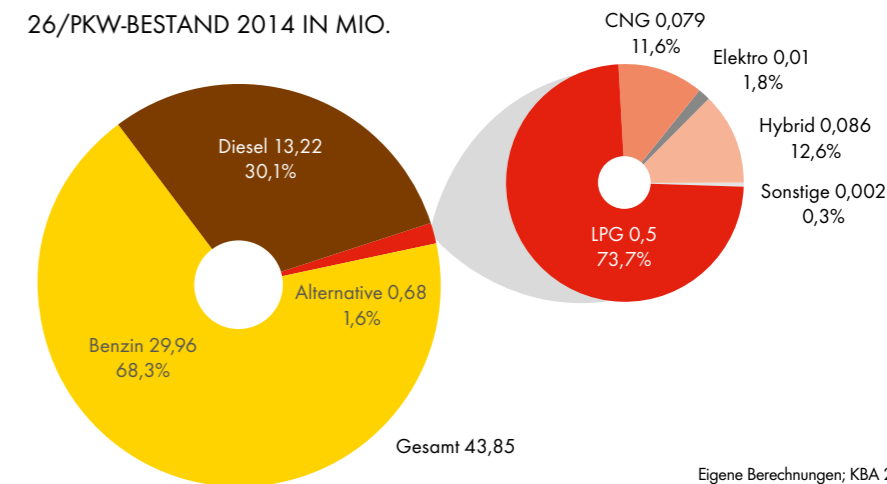
Alle anderen Antriebe sind dagegen nach wie vor Nischenlösungen. Lange Jahre lag der Anteil alternativer Pkw-Antriebe bei etwa einem Promille oder gar darunter. Erst im Jahr 2009 erreichten fahrzeugtechnische Alternativen zu Otto- und Dieselmotor zusammen genommen erstmals Bestandsanteile von etwa einem Prozent.

Zum 1.1.2014 waren 68,3 % bzw. rund 30,0 Mio. der 43,9 Mio. in Deutschland zugelassenen Pkw mit Ottomotor ausgestattet, 30,1 % bzw. 13,2 Mio. mit Dieselmotor sowie knapp 1,6 % bzw. 680.000 mit alternativen Antrieben (KBA 2014a). Unter den alternativen Antrieben weisen lediglich Flüssiggas-Pkw Flottenanteile von über einem Prozent auf; insgesamt gab es 500.867 Flüssiggas-Pkw. Ungeachtet flächendeckender Infrastruktur kann aber auch hier noch nicht von einem

### 25/ENTWICKLUNG DES PKW-BESTANDS NACH ANTRIEBEN\*



### 26/PKW-BESTAND 2014 IN MIO.



substantziellen Marktanteil gesprochen werden. Zum 1.1.2014 waren darüber hinaus 79.065 Erdgas-Pkw, 85.575 Hybrid-Pkw, 12.156 Elektro- sowie gut 2.081 sonstige Pkw zugelassen. Wasserstoff-Pkw werden aufgrund geringer Stückzahlen in der Pkw-Statistik (noch) nicht gesondert ausgewiesen.

Veränderungen im Antriebsmix des Pkw-Bestands ergeben sich dann, wenn der Antriebsmix der Neuzulassungen sich dauerhaft ändert. Wichtige Abweichungen im Antriebsmix zwischen Bestand und Neuzulassungen gibt es nach wie vor beim Diesel. Die Verdieselung der Pkw-Flotte hält aufgrund des anhaltend hohen Diesel-Neuzulassungsanteils an.

Dagegen liegt der Gesamtanteil der alternativen Antriebe bei Neuzulassungen und Bestand etwa auf gleicher Höhe. Allerdings zeigen sich bei den einzelnen Alternativen Unterschiede: Beim führenden alternativen Antrieb Flüssiggas gibt es vergleichsweise wenige Neuzulassungen, denn bei den Flüssiggas-Pkw handelt es sich weit überwiegend um umgerüstete Otto-Pkw. Die Neuzulassungen von Erdgas-Pkw schwanken weiterhin auf niedrigem Niveau.

Pkw mit elektrischem Antrieb, insbesondere Hybrid-Fahrzeuge, wiesen zuletzt bei den Neuzulassungen eine überdurchschnittliche Wachstumsdynamik auf. Allerdings erreichten Pkw mit elektrischem Antrieb bislang Flottenanteile von lediglich 0,2%, während Pkw mit Verbrennungsmotor, das heißt mit Otto-, Diesel- oder Gasmotor, immer noch 99,8% der deutschen Pkw bewegen. Und von den rund 100.000 Pkw mit Elektromotor besitzen die meisten – nämlich Hybride einschließlich Plug-in-Hybride – zugleich auch noch einen Verbrennungsmotor. Elektrische Antriebe (einschließlich Hybrid-Pkw) wachsen, bleiben aber (noch) deutlich hinter dem politischen Ziel von 1 Mio. Elektro-Fahrzeugen im Jahr 2020 zurück.

**ANTRIEBSKONZEPTE UND TRENDS**

Otto- und Dieselantriebe beherrschen den Pkw-Bestand. Während das Grundprinzip des Verbrennungsmotors weitgehend unverändert blieb, haben sich Otto- und Dieselantriebe im Zeitverlauf doch erheblich gewandelt. Sie werden technisch immer aufwändiger konstruiert und dadurch immer effizienter und immer sauberer.

Ungeachtet des bisherigen technischen Fortschrittes besitzen Verbrennungsmotoren noch weitere Optimierungspotenziale. Eine Vielzahl verbrennungsmotorischer

Technologieoptionen wie Direkteinspritzung, Downsizing, Getriebeoptimierung und andere erlaubt es, Verbrennungsmotoren noch effizienter und noch sauberer zu machen, das heißt, sie verbrauchen noch weniger Energie und stoßen dabei noch weniger Luftschadstoff- und CO<sub>2</sub>-Emissionen aus. Gasmotoren sind ebenfalls Verbrennungsmotoren. Durch Modul-Bauweise dürften Gasantriebe, insbesondere in Erdgas-Pkw, ähnliche

technologische Fortschritte machen wie die zugrunde liegenden Ottoantriebe. Darüber hinaus verbrennen Gasantriebe aufgrund des verwendeten Kraftstoffs ohnehin sauberer als flüssige Kraftstoffe.

Die technische Optimierung von (reinen) Verbrennungsmotoren stößt jedoch früher oder später an technisch-physikalische Grenzen, die kaum unterschritten werden können. Das

gilt insbesondere für den Energieverbrauch und die CO<sub>2</sub>-Emissionen. Zudem gibt es bei einzelnen Technologieoptionen aufgrund hoher maßnahmespezifischer Kosten auch ökonomische Grenzen für die kommerzielle Umsetzung (ika 2012, 122-166).

Elektrische Antriebe weisen gegenüber Verbrennungsmotoren im Fahrzeug zum Teil erhebliche Effizienzvorteile auf:

Verbrennungsmotoren wandeln Kraftstoff immer über den (Um)-Weg der Wärmeenergie in Bewegungsenergie um. Hierbei entstehen erhebliche Verluste, so dass der effektive Wirkungsgrad eines Verbrennungsmotors heute im Idealfall (Bestpunkt) bei 37% (Benzin) bzw. 43% (Diesel) liegt. Da der Motorwirkungsgrad insbesondere beim Ottomotor stark von Motorlast und Motordrehzahl abhängt, sind die Wirkungsgrade im Testzyklus

sowie im realen Fahrbetrieb noch einmal deutlich niedriger. Elektroantriebe wandeln elektrische Energie dagegen direkt in kinetische Energie um; sie weisen daher erheblich höhere Wirkungsgrade bis zu etwa 85% auf. Dabei ist der Wirkungsgrad weniger lastabhängig als beim Verbrennungsmotor.

Eine weitere (elektrische) Antriebsalternative sind Brennstoffzellenfahrzeuge (Fuel Cell

## ANTRIEBSKONZEPTE IM ÜBERBLICK

**AUTOGAS / FLÜSSIGGAS**

Pkw mit Ottomotor, die hauptsächlich mit Auto- bzw. Flüssiggas (Liquefied Petroleum Gas, LPG) betrieben werden. Anders als Otto-Pkw machen LPG-Pkw nicht unbedingt einen Trend zur Elektrifizierung/Hybridisierung mit, da es sich meist um Umrüstungen von Otto-Pkw und weniger um Neufahrzeuge handelt.

**OTTO-HYBRIDE (HV)**

Konventionelle Otto-Pkw, die mittelfristig verstärkt elektrifiziert/hybridisiert werden, aber noch keine Plug-in-Hybride sind. Teilweise können sie elektrische Energie aus dem Fahrbetrieb mit Verbrennungsmotor (rück-)gewinnen und teilweise auch kurze Strecken elektrisch (unterstützt) fahren. Benziner-Hybride weisen einen deutlich reduzierten Kraftstoffverbrauch auf.

**DIESEL-HYBRIDE (HV)**

Konventionelle Diesel-Pkw, die mittelfristig verstärkt elektrifiziert/hybridisiert werden, aber noch keine Plug-in-Hybride sind. Teilweise können sie elektrische Energie aus dem Fahrbetrieb mit Verbrennungsmotor (rück-)gewinnen und teilweise auch kurze Strecken elektrisch (unterstützt) fahren. Diesel-Hybride weisen einen deutlich reduzierten Kraftstoffverbrauch auf.

**ERDGAS**

Pkw mit Ottomotor, die hauptsächlich mit komprimiertem Erdgas (Compressed Natural Gas, CNG) angetrieben werden. Wie Otto-Pkw machen CNG-Pkw einen Trend zur Elektrifizierung/Hybridisierung mit.

**DIESEL**

Pkw, die ausschließlich von einem Dieselmotor angetrieben werden und die sich mit Dieselmotorkraftstoff oder (teilweise) mit flüssigen Dieselsubstituten, insbesondere Biokraftstoffen (meist Biodiesel), versorgen.

**OTTO**

Pkw, die ausschließlich von einem Ottomotor angetrieben werden und die sich mit Ottokraftstoff oder (teilweise) mit flüssigen Ottokraftstoffsubstituten, insbesondere Biokraftstoffen (Bioethanol), versorgen.

**PLUG-IN-HYBRIDE (PHEV)**

Pkw, die gleichzeitig mit einem Verbrennungsmotor (Otto, Diesel oder Gas) und Elektromotor plus Batterie ausgestattet sind. Plug-in-Hybride können sich auch extern mit Fahrstrom versorgen sowie auch größere Strecken (heute bereits mehr als 20 Kilometer) rein elektrisch fahren.

**BATTERIE-ELEKTRISCH (BEV)**

Pkw, die mit Elektromotor und Batterie ausgestattet sind. Batterieelektrische Pkw versorgen sich ausschließlich elektrisch und können auch nur elektrisch fahren.

**BRENNSTOFFZELLE (FCEV)**

Pkw, die mit Elektromotor und Brennstoffzelle sowie (kleinerer) Batterie ausgestattet sind. Sie versorgen sich mit Wasserstoff und fahren rein elektrisch. Elektrische Energie (Fahrstrom) wird dabei mit Hilfe der Brennstoffzelle aus Wasserstoff gewonnen.

Electric Vehicles bzw. FCEV); diese werden durch Wasserstoff versorgt, der in der Brennstoffzelle direkt in elektrische Energie umgewandelt wird. Stand der Technik sind Polymer-Elektrolyt-Membran- oder kurz PEM-Brennstoffzellen. Brennstoffzellen haben ebenfalls deutlich höhere Wirkungsgrade als Verbrennungsmotoren. Zur notwendigen Ausstattung von Brennstoffzellen-Pkw gehört auch eine kleine Batterie – meist Lithium-Ionen. Der Einsatz von Wasserstoff in Verbrennungsmotoren wird dagegen heute nicht mehr verfolgt, hauptsächlich aus Effizienzgründen.

Elektrische und Brennstoffzellenfahrzeuge verursachen aufgrund der verwendeten Energieträger anders als Pkw mit Verbrennungsmotoren überhaupt keine direkten Emissionen, weder Luftschadstoffe noch CO<sub>2</sub>. Effizienz und Ökobilanz der gesamten Energiekette (Well-to-Wheel) unterscheiden sich bei Verbrennungs- und Elektromotor allerdings deutlich weniger als die motorische Effizienz (Tank-to-Wheel). Fahrstrom für elektrische Antriebe wird vielfach noch in Kraftwerken gewonnen, die elektrische Energie ebenfalls über den Umweg Wärmeenergie umwandeln – mit entsprechenden Übertragungs- bzw. Wirkungsgradverlusten in der Vorkette. Energetisch und ökologisch sinnvoll sind elektrische Antriebe dann, wenn der Fahrstrom bzw. Wasserstoff (überschüssige) erneuerbare Energie ist.

Wie der Pkw-Antrieb der Zukunft aussieht, ob Verbrennungsmotor oder Elektroantrieb, hängt vor allem vom technologischen Fortschritt bei den einzelnen Antriebsarten ab. Auch wenn Verbrennungsmotor und elektrischer Antrieb sehr unterschiedliche Antriebskonzepte sind, schließen sie sich nicht gegenseitig aus, sondern können sich sogar ergänzen.

In den nächsten Jahren wird es zu einer zunehmenden Elektrifizierung von Antriebskomponenten und somit zu einer Hybridisierung von Antrieben kommen. Für Hybridantriebe gibt es hierbei eine Vielzahl von Kombinationsmöglichkeiten: angefangen bei Mikro-Hybriden mit Start-Stopp-Funktion einschließlich elektrifizierten Nebenaggregaten über den Mild-Hybrid mit Drehmomentunterstützung beim Beschleunigen sowie der Rückgewinnung von Bremsenergie bis zu Voll- bzw. Full-Hybriden, die auch kürzere oder längere Strecken rein elektrisch fahren können.

Hybridfahrzeuge zeichnen sich durch die Kombination von zwei Antriebskonzepten aus: zum einen ein Verbrennungsmotor, zum

anderen ein Elektromotor einschließlich eines Energiespeichers (Batterie) zur Speicherung elektrischer Energie. Die Antriebsstrangkonfiguration kann sich unterscheiden, je nach Anordnung von Verbrennungs- und Elektromotor. Die wichtigsten Konzepte sind der Parallelhybrid, wo Verbrennungs- und Elektromotor ein Fahrzeug gleichzeitig antreiben können, der serielle Hybrid, wo Verbrennungs- und Elektromotor nacheinander angeordnet sind und ein Verbrennungsmotor den Elektromotor zusätzlich mit Strom versorgen kann und schließlich eine Kombination aus beiden, der leistungsverzweigte Hybrid. Ähnlich konzipiert sind Fahrzeuge mit Range Extender (REEV), die hauptsächlich elektrisch fahren und einen Verbrennungsmotor nur zur Erhöhung der Reichweite einsetzen.

Relevant für die Energieversorgung ist die Möglichkeit, ein Hybridfahrzeug auch extern über ein Ladegerät mit elektrischer Energie zu versorgen. Solche Fahrzeuge heißen auch Plug-in-Hybride; mit ihnen ist auch ein rein elektrischer Betrieb mit Strom möglich. Um entsprechende elektrische Reichweiten erzielen zu können, werden höhere Batteriekapazitäten eingesetzt.

Ziel von Elektrifizierung und Hybridisierung ist es, den spezifischen Kraftstoffverbrauch und damit die CO<sub>2</sub>-Emissionen zu reduzieren. So weisen stark elektrifizierte oder hybridisierte Pkw in der Regel deutlich niedrigere (bis zu etwa 25%) Kraftstoffverbräuche und CO<sub>2</sub>-Emissionen auf als konventionelle Referenzfahrzeuge. Voraussetzung einer starken Elektrifizierung und Hybridisierung künftiger Antriebe sind allerdings auch substantielle Kostensenkungen für elektrische Komponenten und Antriebe, denn noch sind Elektro- und Hybrid-Antriebe teuer – teurer insbesondere als konventionelle Otto- und Dieselantriebe.

Schließlich werden bei allen Pkw neben antriebstechnischer Optimierung fahrzeugseitige Maßnahmen wie die Verminderung von Reibungs- und Rollwiderstand, Aerodynamik und Leichtbau verfolgt, die ebenfalls zu deutlichen Verbrauchs- und gegebenenfalls Emissionsminderungen führen.

Einen Überblick über mögliche Antriebskonzepte für morgen gibt die Übersicht auf Seite 45. Die Elektrifizierung und Hybridisierung konventioneller Antriebe machen eine Trennung zwischen normalen Otto- und Diesel-Pkw und Otto- und Diesel-Hybriden auf Basis technischer Kriterien immer schwieriger. Hauptkriterium ist daher die Energieversorgung des jeweiligen Fahrzeugs.

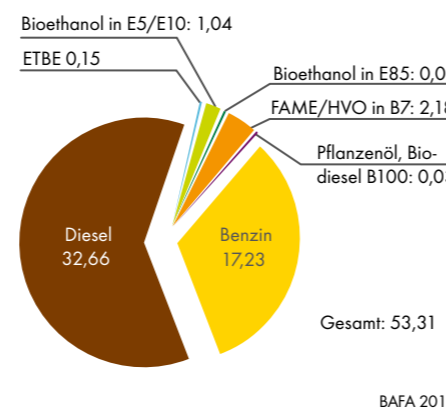
**KRAFTSTOFFVERBRAUCH UND KRAFTSTOFFMIX**

Entsprechend dem heute vorherrschenden Antriebsmix im Pkw-Bestand erfolgt seine Energieversorgung hauptsächlich über flüssige Kraftstoffe, namentlich Otto- und Dieselmotoren. Dabei ergibt sich der Kraftstoffverbrauch des motorisierten Individualverkehrs aus der Entwicklung der Pkw-Fahrleistungen und der spezifischen Pkw-Kraftstoffverbräuche.

Der Kraftstoffmix spiegelt die Zusammensetzung, aber auch die Nutzungsintensität der unterschiedlichen Antriebe im Pkw-Bestand wider. Der Kraftstoffverbrauch von Pkw wird allerdings nicht separat erfasst. Erhoben (auf Basis des Mineralölstatistikgesetzes) wird lediglich der Inlandsabsatz aller flüssigen Kraftstoffe in Deutschland über die Amtliche Mineralölstatistik (BAFA 2014). Darin ist auch der Kraftstoffverbrauch anderer Kraftfahrzeuge (wie Lkw oder Busse) und auch derjenige von Ausländern in Deutschland (Inlands- oder Absatzkonzept) enthalten. Danach wurden im Jahr 2013 insgesamt rund 35 Mio. Tonnen Dieselmotorkraftstoff (einschließlich biogener Dieselmotorkraftstoffe) sowie rund 18,5 Mio. Tonnen Ottomotorkraftstoff (einschließlich biogener Ottomotorkraftstoffe) in Deutschland abgesetzt.

Als alternativer Kraftstoff konnten in den vergangenen Jahrzehnten nur Biokraftstoffe substantielle Marktanteile erobern. Sie machten in der jüngeren Vergangenheit zwischen 5,5 bis 6% des Kraftstoffabsatzes aus. Allerdings stagniert der Marktanteil von Biokraftstoffen seit einigen Jahren. Biokraftstoffe werden heute weitgehend beigemischt – zum Ottomotorkraftstoff (E5 oder E10) und zum Dieselmotorkraftstoff (B7); biogene Reinkraftstoffe wie reiner Biodiesel (B100), reines Pflanzenöl oder auch E85 spielen kaum (noch) eine Rolle (Fritsche et al. 2012).

**27/KRAFTSTOFFABSATZ DEUTSCHLAND 2013 IN MIO. TONNEN**



Neben flüssigen Kraftstoffen werden auch noch gasförmige Kraftstoffe eingesetzt; ihre Abschätzung erfolgt anhand der Energiesteuerstatistik. Im Jahr 2012 wurden gut 500.000 Tonnen Flüssiggas sowie gut 150.000 Tonnen komprimiertes Erdgas (CNG) verbraucht, was zusammen etwa 1,5% des gesamten (gasförmigen und flüssigen) Kraftstoffabsatzes entspricht. Elektrische Energie (Fahrstrom) und Wasserstoff werden im Straßenverkehr (noch) nicht in statistisch relevanten Mengen abgesetzt.

Eine Abschätzung des Pkw-Kraftstoffverbrauchs kann letztendlich über Verbrauchsberechnungen erfolgen (Kloas et al. 2004, Kunert/Radke 2013). Betrachtet werden hierbei alle flüssigen Kraftstoffe, aber anders als beim Inlandsabsatz (Inlandskonzept) nur die in Deutschland zugelassenen Kraftfahrzeuge (Inländerkonzept); die Angaben sind daher nur eingeschränkt vergleichbar.

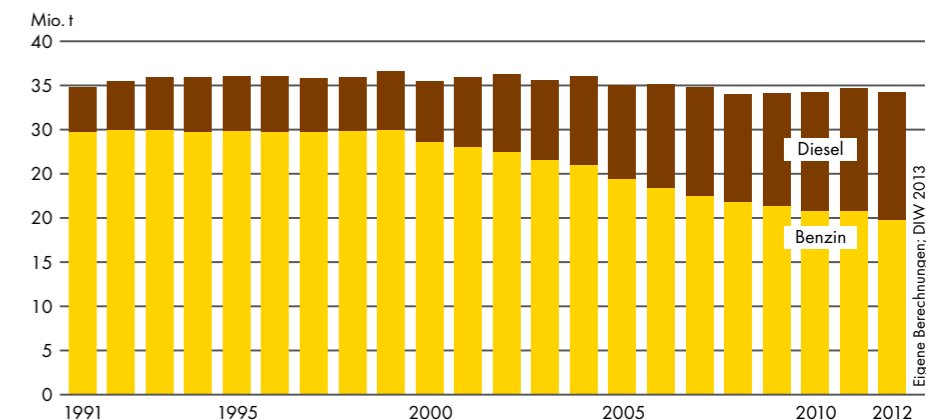
Nach DIW-Verbrauchsrechnung werden knapp zwei Drittel des Inländer-Kraftstoffverbrauchs von Pkw konsumiert. Trotz zunehmender Pkw-Motorisierung und Pkw-Fahrleistungen ist der Kraftstoffverbrauch deutscher Pkw seit 1999 (leicht) rückläufig. Dabei hat sich aufgrund des Dieselbooms die Relation von Otto- und Dieselmotorkraftstoff in den letzten beiden Jahrzehnten beim Pkw signifikant verschoben: Verbrauchten deutsche Pkw zu Beginn der 1990er Jahre noch fast sechsmal so viel Otto- wie Dieselmotorkraftstoff, so ist es heute nur noch etwa eineinhalb mal so viel. Heute verbrauchen Pkw fast die Hälfte (rund 45%) des von in Deutschland zugelassenen Kraftfahrzeugen getankten Dieselmotorkraftstoffes.

**KRAFTSTOFFOPTIONEN**

Die Zahl der Kraftstoffe war in der Vergangenheit überschaubar. Mit zunehmender Zahl der Antriebe nehmen jedoch auch die Kraftstoffoptionen zu, so dass sich das Kraftstoffportfolio – parallel zu den Antriebstechniken – diversifiziert. Neben neuen flüssigen Kraftstoffen kommen hierfür gasförmige Kraftstoffe sowie elektrische Energie in Frage.

Für eine problemlose Verwendung und ein einwandfreies Funktionieren von Pkw-Antrieben müssen alle Verkehrskraftstoffe bestimmte Mindestanforderungen erfüllen. Diese werden (in der Regel) von Kraftstoffnormen festgelegt. Für die heutigen Hauptsorten Otto- und Dieselmotorkraftstoffe macht die europäische Kraftstoffqualitäts-Richtlinie 98/70/EG wichtige verbindliche Vorgaben, die sich in nationalen Kraftstoffnormen widerspiegeln. Kraftstoffnormen definieren überwiegend

**28/PKW-KRAFTSTOFFVERBRAUCH**



bestimmte Produkteigenschaften und teilweise auch deren Zusammensetzung.

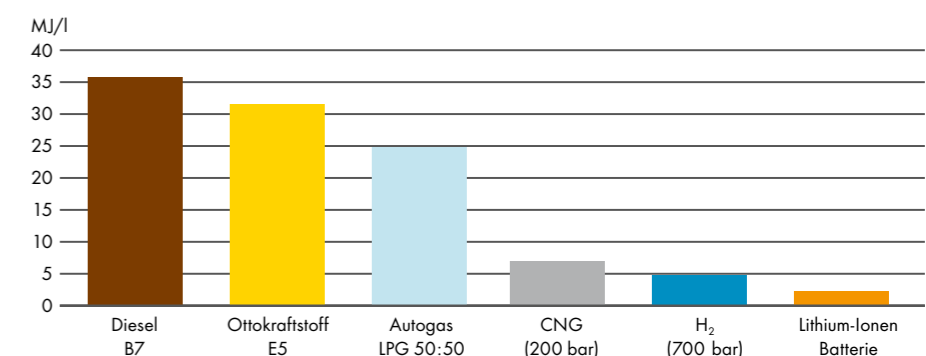
Im Laufe der Jahre wurden die Anforderungen an Otto- und Dieselmotorkraftstoffe mehrfach und aus verschiedenen Gründen erhöht: aus Umweltschutzgründen bzw. als Beitrag zur Luftreinhaltungspolitik, anlässlich neuer Kraftstoffe und Kraftstoffkomponenten oder für eine bessere und effizientere Verbrennung in technisch optimierten Pkw-Antrieben (WFCC 2013). In der Folge unterscheiden sich heutige Otto- und Dieselmotorkraftstoffe sowohl in ihren Produkteigenschaften als auch in ihrer Zusammensetzung zum Teil deutlich von denjenigen vor 20 Jahren. Beispielsweise sind seit 2003 alle in Deutschland verkauften Kraftstoffe praktisch schwefelfrei.

Aus der EU-Erneuerbare Energien-Richtlinie 2009/28/EG (EP/Rat 2009a) und der letzten Überarbeitung der EU-Kraftstoffqualitäts-Richtlinie 2009/30/EG (EP/Rat 2009b) ergeben sich schließlich weitere Anforderungen an die Inverkehrbringer von Kraftstoffen, die wiederum in nationalen Gesetzen umgesetzt sind – insbesondere im Biokraftstoffquotengesetz. Zum einen müssen Kraftstoffe steigende Anteile erneuerbarer Energien, insbesondere Biokraftstoffe, enthalten. Zum anderen werden durch verbindliche

Nachhaltigkeitskriterien, darunter kraftstoffspezifische Treibhausgasemissionsvorgaben, nun auch Bedingungen an die Kraftstoffherstellung gestellt. Bisher mussten Kraftstoffanbieter eine verbindliche (energetische) Biokraftstoffquote von 6,25% erfüllen; ab 2015 muss statt einer Energiequote eine steigende Treibhausgasemissionsparvorgabe (CO<sub>2</sub>-Quote) – hauptsächlich über beigemischte Biokraftstoffe – im Kraftstoffangebot realisiert werden.

Aufgrund ihrer (noch) vergleichsweise geringen und in Europa sehr unterschiedlichen Verbreitung beziehen sich alternative Gaskraftstoffe (Erd- und Autogas) dagegen meist (nur) auf nationale Kraftstoffnormen. Standards für Elektro- und Wasserstoffmobilität befinden sich vielfach noch in Diskussion. Gegenüber Otto- und Dieselmotorkraftstoffen weisen alternative und neue Kraftstoffe aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung und physikalischen Eigenschaften bei Verbrennung und Nutzung Vorteile auf. Dazu gehören insbesondere geringere Emissionen von Luftschadstoffen, Treibhausgasen und auch motorischen Geräuschen. Zu den wichtigsten Aufgaben von Kraftstoffen gehört aber nach wie vor die Energiespeicherung. Auskunft über die Speicherbarkeit von Energie gibt die (volumetrische) Energiedichte, das ist der Energiegehalt (in Megajoule oder Kilowattstunden) pro

**29/KRAFTSTOFFE UND ENERGIEDICHTE**





Volumeneinheit (Liter). Eine hohe Energiedichte spart Platz für Tankraum im Fahrzeug und ermöglicht hohe Kilometer-Reichweiten.

Flüssige Kraftstoffe haben eine hohe Energiedichte und sind sehr gut speicher- und transportierbar. Gasförmige Kraftstoffe weisen niedrigere Energiedichten auf, sind weniger gut speicher- und transportierbar als flüssige Kraftstoffe. Die niedrigste Energiedichte besitzen Batterien, selbst wenn sie als Lithium-Ionen ausgeführt sind und damit dem neuesten Stand der Technik entsprechen (Abbildung 29).

Ein weiterer Nachteil von heutigen Batterien ist ihre niedrige gravimetrische Energiedichte (Energie bezogen auf die Masse); das heißt, ihre Speicherkapazität pro Kilogramm Gewicht ist deutlich geringer als die vergleichbare spezifische Energie von flüssigen oder gasförmigen Kraftstoffen.

Hohe elektrische Reichweiten führen folglich zwangsläufig zu hohen Batterie- und Fahrzeuggewichten. Die mit Abstand höchste gravimetrische Energiedichte hat dagegen Wasserstoff.

Zuletzt ist zu beachten, dass Kraftstoffe Sekundärenergieträger sind, die jeweils eine eigene Erzeugungs- und Verteilungsinfrastruktur benötigen. Aufbau und Erhalt einer solchen Versorgungsinfrastruktur erfordern hohe Investitionen, die nur bei ausreichend großen Pkw-Flotten, Kraftstoffabsätzen und auch dann nur über längere Zeiträume vorgenommen werden können.

Für flüssige fossile Kraftstoffe besteht eine umfangreiche und flächendeckende Versorgungsinfrastruktur – in Deutschland gibt es rund 15.000 Tankstellen. Flüssige biogene Kraftstoffe nutzen (als Beimischung) die Tankstelleninfrastruktur für Otto- und Dieselmotoren. Alternative Kraftstoffe – und das sind im Sinne der Kraftstoffversorgung alle nicht flüssigen Kraftstoffe – erfordern dagegen eigene zusätzliche Versorgungsinfrastrukturen.

Von den alternativen Kraftstoffen verfügt bislang nur Flüssiggas mit etwa 7.000 Tankstellen über eine flächendeckende Versorgung. Für komprimiertes Erdgas gibt es dagegen nur gut 900 Tankstellen, allerdings auch nur rund 80.000 CNG-Pkw im Bestand.

Ein Wasserstoff-Tankstellennetz müsste im Wesentlichen erst noch aufgebaut werden. Ein Stromtankstellennetz ist in herkömmlicher Weise öffentlich kaum zu betreiben.

Letztendlich folgt das Kraftstoffangebot dem Antriebsmix des Pkw-Bestands. Verfügbarkeit und Ausbau der Kraftstoffversorgungsinfrastruktur bestimmen den Pkw-Antriebsmix jedoch wesentlich mit.

Die wichtigsten heute angebotenen Kraftstoffe und weitere alternative Kraftstoffoptionen sind unten aufgeführt. Ähnlich wie bei den Antrieben (Verbrennungsmotor vs. elektrische Antriebe) lassen sich auch die Kraftstoffe in zwei Gruppen unterteilen: in chemische und in elektrische Energieträger.

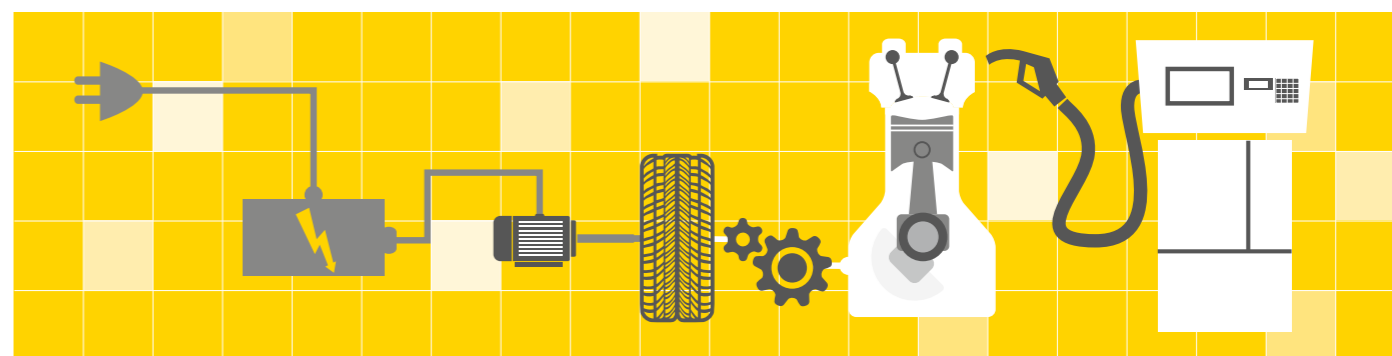
Darüber hinaus kann man chemische Energieträger noch in flüssige (Otto, Diesel und Bio) und gasförmige Kraftstoffe (Erdgas, Flüssiggas, Wasserstoff) aufteilen. Wasserstoff als chemischer Energieträger hätte das technische Potenzial, sowohl Verbrennungs- als auch Elektromotoren mit Energie zu versorgen.

## FAZIT PKW-ANTRIEBE: EVOLUTION STATT REVOLUTION

Der deutsche Pkw-Bestand wird heute antriebstechnisch von Otto- und Dieselmotor dominiert. In den kommenden Jahren ist von weiteren Effizienzverbesserungen der heutigen Hauptantriebe, aber auch von einer stärkeren Diversifizierung im Pkw-Antriebsmix auszugehen. Für die Diversifizierung des Antriebsmixes könnten Gasantriebe eine gewisse Rolle spielen.

Elektromobilität ist prinzipiell eine disruptive Technologie. Elektroantrieb und Brennstoffzellenfahrzeuge besitzen technische Marktreife für bestimmte automobile Anwendungsbereiche. Gerade Elektromobilität entwickelt sich jedoch nicht in der Art einer disruptiven Technologie (Christensen 1997). Denn der bedeutendste Technologietrend ist die zunehmende Elektrifizierung von Pkw mit Verbrennungsmotor. Der Pkw-Antrieb der näheren und mittleren Zukunft ist der Hybrid-Pkw (unterschiedlichster Art), zumal er viele Vorteile beider Antriebstechnologien kombiniert – darunter Effizienz, Leistung und Reichweite. Somit zeichnet sich eher eine Evolution als eine technologische Revolution bei den Pkw-Antrieben ab.

Das Kraftstoffangebot folgt am Ende den Antriebstechnologien in der Pkw-Flotte. Otto- und Dieselmotoren einschließlich biogener Substitute können künftig – in Abhängigkeit von Pkw-Bestandsaufbau und Versorgungsinfrastruktur – zunehmend durch gasförmige Kraftstoffe und Strom ergänzt werden.



## KRAFTSTOFFE IM ÜBERBLICK

### OTOKRAFTSTOFFE

Ottokraftstoff (Benzin) ist ein fossiler Kraftstoff für Ottomotoren, der aus leichteren Bestandteilen der Rohölverarbeitung stammt. Mindestanforderungen werden in der europäischen Kraftstoffnorm EN 228 definiert; dazu gehören auch mögliche Beimischungen von Biokraftstoffen.

Allen Ottokraftstoffen dürfen heute bis zu 5%vol Bioethanol beigemischt werden, und zwar ohne besondere Kennzeichnungspflicht. Mit Kennzeichnung dürfen schließlich dem Ottokraftstoff gegenwärtig bis zu 10%vol Bioethanol beigemischt werden (Super E10). Höhere Bioanteile werden diskutiert (Super E20); eine entsprechende Kraftstoffnorm gibt es bislang allerdings noch nicht.

### DIESELKRAFTSTOFFE

Dieselmotoren sind ein fossiler Kraftstoff für Dieselmotoren, der aus mittelschweren Bestandteilen der Rohölverarbeitung – daher auch Mitteldestillat – stammt. Er kann auch Anteile synthetischen

Diesels aus Erdgas (Gas-to-Liquids) enthalten. Mindestanforderungen werden in der europäischen Kraftstoffnorm EN 590 definiert. Dazu gehören auch mögliche Beimischungen von Biokraftstoffen. Allen Dieselmotoren können bis zu 7% Biodiesel ohne Kennzeichnungspflicht beigemischt werden; höhere Bioanteile sind nur über qualitativ höherwertige Dieselsubstitute möglich – wie hydrierte Pflanzenöle und synthetischer Diesel aus Biomasse.

### BIOKRAFTSTOFFE

Biokraftstoffe können fossilen Kraftstoffen beigemischt werden, sie können prinzipiell aber auch als Reinkraftstoff eingesetzt werden. Zu den biogenen Reinkraftstoffen gehören reiner Biodiesel (B100) sowie reine Pflanzenöle. Nahezu reines Bioethanol (E85) wird mit Bioethanolanteilen zwischen 70 und 86% vermarktet. Biodiesel wird von der europäischen Biodieselnorm EN 14214 spezifiziert, Pflanzenöl (aus Raps) durch DIN 51605 sowie Bioethanol (E85) durch die deutsche Kraftstoffnorm DIN 51625. Die Marktbedeutung von Reinkraftstoffen ist allerdings inzwischen sehr gering. Für die Beimischung zu Diesel- bzw. Ottokraftstoff darf nur EN 14214-Biodiesel bzw. DIN 51605-Bioethanol verwendet werden.

### ERDGAS

Erdgas als Kraftstoff besteht hauptsächlich aus dem Naturgas Methan. Es wird als Kraftstoff in der Deutschen Industrie-Norm DIN 51624 spezifiziert. Aufgrund seiner geringen Energiedichte wird es auf 240 bar komprimiert (Compressed Natural Gas, CNG). Erdgas wird in Kilogramm ausgezeichnet und verkauft. Es gibt in Abhängigkeit vom spezifischen Energiegehalt zwei

Erdgas-Qualitäten: H- und L-Gas, die Erdgas-Gruppe ist kennzeichnungspflichtig. Erdgasfahrzeuge können beide Gasqualitäten fahren, auch gemischt. Der Energiegehalt von 1 kg CNG/ Erdgas (H-Gas) entspricht zirka 1,5 Liter Benzin bzw. 1,33 Liter Diesel. Bei CNG/Erdgas (L-Gas) entspricht 1 kg etwa 1,3 Liter Benzin bzw. 1,1 Liter Diesel. Erdgasfahrzeuge können auch auf Erdgasnetzqualität aufbereitetes Biogas tanken; oftmals handelt es sich um Bioerdgas, das zuvor in das allgemeine Erdgasnetz eingespeist wurde und dem Erdgaskraftstoff dann bilanziell zugerechnet wird. Ferner kann Erdgas auch via Elektrolyse und anschließender Wasserstoff-Methanisierung aus (überschüssigem) erneuerbarem Strom gewonnen werden – auch Power-to-Gas genannt (DLR et al. 2014a, 2014b). Die Nutzung von Wasserstoff in Brennstoffzellenfahrzeugen ist jedoch deutlich energieeffizienter als der Einsatz weiter umgewandelten Erdgases in Verbrennungsmotoren.

### FLÜSSIGGAS

LPG gehört zu den leichtesten gasförmigen Bestandteilen der Rohölverarbeitung. Es besteht hauptsächlich aus einem Propan-Butan-Gasgemisch. Je nach Jahreszeit variieren die Anteile von Propan und Butan im Gasgemisch zwischen 40 und 60%. Flüssiggas als Kraftstoff wird von der europäischen Industrienorm EN 589 spezifiziert. Aufgrund seiner niedrigen Verdampfungstemperatur wird es schon bei Umgebungstemperaturen bzw. bei geringen Drücken flüssig und kann daher unter geringem Druck in Flüssiggasflaschen flüssig gespeichert werden. Es wird in Litern verkauft. Der Energiegehalt von einem Liter LPG ist gut ein Viertel geringer als derjenige von einem Liter Ottokraftstoff;

vergleichbare Ottoantriebe verbrauchen (volumetrisch) etwa 20% mehr Flüssiggas als Ottokraftstoff. Die Herstellung von Bio-LPG aus Biomasse ist prinzipiell möglich, eine kommerzielle Produktion existiert (bislang) jedoch nicht.

### (FAHR)-STROM

Elektrische Energie für Elektrofahrzeuge wird in der Regel aus dem öffentlichen Stromnetz geladen und in Fahrzeugbatterien (meist Lithium-Ionen) gespeichert. Der Ladevorgang kann über verschiedene Anschlüsse mit unterschiedlicher Leistung erfolgen, von der Haushaltssteckdose (bis 3,6 kW) bis zu optionalen Ladestationen mit bis zu 44 kW Leistung. Für die Klimagesamtbilanz spielt die Herkunft des Stroms – aus fossilen Kraftwerken oder erneuerbarer Stromerzeugung – eine wichtige Rolle.

### WASSERSTOFF

Wasserstoff ist wie Erd- und Autogas ein gasförmiger Kraftstoff und wird als Energieträger für Brennstoffzellen nahezu in Reinform (zu 99,999%) eingesetzt. Eine spezifische Wasserstoff-Kraftstoffnorm ist noch in Arbeit. Aufgrund seiner sehr geringen Energiedichte wird Wasserstoff in Drucktanks gespeichert (ähnlich wie komprimiertes Erdgas), nur ist der Druck deutlich höher (meist 700 bar).

Wie beim Fahrstrom spielt beim Wasserstoff seine Herkunft eine zentrale Rolle für die Treibhausgasbilanz. Wasserstoff wird heute in der Regel durch Reformierung aus Erdgas hergestellt, kann aber auch mittels Elektrolyse aus (überschüssigem) erneuerbarem Strom produziert werden (Power-to-Gas).

## 6

## SZENARIEN ZUM PKW-BESTAND, ZUM ENERGIEVERBRAUCH UND ZU DEN CO<sub>2</sub>-EMISSIONEN



Aufbauend auf die Prognosen zur Pkw-Motorisierung und zu den Pkw-Fahrleistungen sowie auf die Analyse technischer Fakten und Trends bei Antrieben und Kraftstoffen werden im Folgenden unterschiedliche Szenarien für Automobilität bis 2040 beschrieben und modelliert. Ziel ist es, den Pkw-Bestand der Zukunft zu prognostizieren, den Energieverbrauch und die Treibhausgasemissionen des motorisierten Individualverkehrs.

Dazu werden zunächst die wichtigsten **Einflussfaktoren** auf künftige Antriebs-Kraftstoff-Kombinationen im Pkw-Bestand untersucht. Anschließend werden unterschiedliche **Szenariopfade** für Antriebe und Kraftstoffe und ihr künftiges Umfeld skizziert. Darauf aufbauend erfolgt mit Hilfe eines **Pkw-Kohortenmodells** eine quantitative Szenarioanalyse zu möglichen Entwicklungen von Antriebstechniken im Pkw-Bestand sowie zu künftigen Energieverbrauchspfaden und den dadurch verursachten Treibhausgasemissionen.

Anders als bei der (einheitlichen) Motorisierungs- und Fahrleistungsprognose werden für Antriebstechniken, Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen unterschiedliche automobiler Zukünfte untersucht: Ein **Trendzenario**, welches Pkw-Trends der jüngeren Vergangenheit fortschreibt und ein hinsichtlich Energiepolitik und Klimaschutz sehr ambitioniertes **Alternativszenario**, das auf

deutlich stärkere und schnellere Veränderungen im Pkw-Bereich mit sich bringt. Dabei untersucht das Alternativszenario im Besonderen die potenziellen Auswirkungen einer verstärkten Elektrifizierung von Antrieben und Kraftstoffen. Neben **Elektromobilität** wurde zuletzt vermehrt über **Erdgas** als weitere Alternative für Pkw-Antriebe und Kraftstoffe diskutiert. Um die Potenziale von Gasantrieben und Gaskraftstoffen im motorisierten Individualverkehr zu beleuchten, wird im Szenarioteil zusätzlich als Variation des Trendzenarios ein kleines Gasszenario (**Gasszenarette**) untersucht.

Die allgemeine Mobilitätsentwicklung und Mobilitätsintensität sowie Pkw-Motorisierung, Pkw-Bestand und Pkw-Fahrleistungen insgesamt verändern sich in den unterschiedlichen Szenarien nicht.

Die unterschiedliche Entwicklung von Antrieben und Kraftstoffen spiegelt sich daher ausschließlich innerhalb der Bestands- und Fahrleistungsprognose wider, also hauptsächlich in unterschiedlichen Anteilen im Antriebs-, Fahrleistungs- und Kraftstoffmix. Ein Vorteil dieses Szenario-Aufbaus ist, dass sich Veränderungen bei Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen direkt auf unterschiedliche Antriebs- oder Kraftstoffmische zurückführen lassen und nicht (teilweise) auf ein zusätzlich verändertes Mobilitätsverhalten.

### EINFLUSSFAKTOREN AUF AUTO-MOBILITÄT

Mögliche Antriebe und Kraftstoffe der Zukunft sind größtenteils schon heute bekannt. Es stellt sich aber die Frage, welche Antriebe und Kraftstoffe sich in den kommenden Jahrzehnten im Antriebs- und Kraftstoffmix des motorisierten Individualverkehrs tatsächlich halten oder neu durchsetzen werden.

Die Zahl der Einflussfaktoren auf Auto-Mobilität im Allgemeinen und auf Antriebstechniken und Kraftstoffe im Besonderen ist zahlreich (vgl. zum Beispiel ifmo 2010). Einflussfaktoren können automobiler Entwicklungen beschleunigen (**Treiber**) oder hemmen (**Hemmnisse**). Wichtige Einflussfaktoren für Auto-Mobilität von morgen sind soziodemografische Faktoren und auch räumliche Siedlungsstrukturen, die sich auf Mobilitätsnachfrage und damit auch auf Pkw-Motorisierung und Pkw-Fahrleistungen auswirken. Grundsätzlich können soziodemografische und räumliche Faktoren auch Einfluss auf Antriebe im Pkw-Bestand und Kraftstoffe für die Pkw-Nutzung haben. Zudem können Einkommens- und Substitutionseffekte unterschiedlicher Antriebe und Kraftstoffe auch Auswirkungen auf Auto-Mobilität ausüben. Eine

szenarioabhängige Variation soziodemografischer und räumlicher Faktoren in Bezug auf antriebs- oder kraftstoffspezifische Trends wird hier jedoch nicht vorgenommen. Die Faktorenanalyse fokussiert sich vielmehr auf die unmittelbar auf künftige Antriebs-Kraftstoff-Konfigurationen im Pkw-Bestand einwirkenden Einflussfaktoren, die teilweise wiederum auch sozioökonomische und räumliche Einflüsse aufnehmen.

Zu den für künftige Pkw-Antriebs-Kraftstoffmische besonders relevanten Einflussfaktoren zählen von der Politik gesetzte Rahmenbedingungen, das Konsumentenverhalten sowie der technologische Fortschritt bei den unterschiedlichen Antriebstechniken und auch die künftige Kraftstoff- und Energieversorgung. Dabei sollen relevante Einflüsse von Politik und Verbraucherverhalten im folgenden Abschnitt ausführlicher diskutiert werden. Einflüsse aus technologischem Fortschritt sowie Kraftstoff- und Energieversorgung werden an dieser Stelle nur grundsätzlich behandelt; eine detailliertere antriebs- und kraftstoffspezifische Diskussion erfolgt bei der qualitativen Beschreibung der unterschiedlichen

Antriebs-Kraftstoff-Zukünfte sowie im quantitativen Prognose-Modell.

#### Gesellschaft und Politik

Gesellschaftliche Präferenzen auf den relevanten Themenfeldern Energie, Klima, Umwelt und Mobilität, die sich in unterschiedlichen von der Politik gesetzten Rahmenbedingungen für Auto-Mobilität widerspiegeln, können erheblichen Einfluss auf Antriebe und Kraftstoffe ausüben.

Politik kann Rahmenbedingungen auf unterschiedlichen Ebenen (national/lokal) und zu unterschiedlichen Dimensionen der Pkw-Haltung und Pkw-Nutzung setzen – etwa durch Ordnungsrecht (Ge- und Verbote). Politik kann Verhaltensanreize geben – durch Steuerpolitik (Energie- oder Kfz-Steuer) oder durch Subventionen (Pkw-Umweltprämie) und sie kann versuchen, durch Information zu überzeugen.

Zu den wichtigsten autospezifischen Politik-Vorgaben gehören Vorschriften zu den Emissionen des Pkw-Verkehrs sowie Nutzungsrechte bzw. -bedingungen für Pkw.

Fahrverbote (Umweltzonen) können die Auswahlentscheidung von Verbrauchern in Bezug auf bestimmte Pkw-Typen (Antriebe) einschränken oder gar vorher bestimmen. Vorschriften zu fahrzeugspezifischen Emissionen, seien es Luftschadstoffe oder CO<sub>2</sub>-Emissionen, setzen bereits am Angebot der Fahrzeughersteller an.

Wegen der herausragenden Bedeutung von Emissionsvorschriften für den Antriebsmix des Pkw-Angebotes soll weiter unten die aktuelle und künftige CO<sub>2</sub>-Abgasgesetzgebung der EU für neue Pkw ausführlicher betrachtet werden.

### Verbraucher

Der jeweilige Antriebs-Kraftstoffmix des Pkw-Bestands basiert letztendlich auf Verbraucherentscheidungen. Verbraucher kaufen, halten und nutzen Pkw. Ihre Entscheidungen werden in der Konsumententheorie (der Mikroökonomie) auf Verbraucherpräferenzen zurückgeführt (Varian 1989, Kap. 3; Döring 2012, 565). Verbraucher wählen Produkte und Dienstleistungen aus, von denen sie sich eine bestimmte Bedürfnisbefriedigung (Nutzen) versprechen.

Da die (Verbraucher)-Einkommen grundsätzlich beschränkt sind, unterliegen Konsumententscheidungen einer Budgetbeschränkung. Bei ihren Wahlentscheidungen orientieren sich Verbraucher an den (relativen) Preisen von Gütern und Dienstleistungen.

Verbrauchernutzen im Mobilitätsbereich stiftet die nachgefragte Personenverkehrsleistung. Nützlich können Produkte wie Pkw und zugehörige Dienstleistungen jedoch auch aus vielerlei anderen Gründen sein.

Zu den nutzstiftenden Attributen von Pkw, die oftmals auch als relevante Kaufkriterien zählen, gehören Leistung, Komfort, Sicherheit, Markeprestige oder auch Umwelteigenschaften wie Verbrauch und Emissionen eines Fahrzeugtyps, oder auch eines Antriebs. Nicht immer lässt sich der Nutzen von Produkten oder Dienstleistungen einfach ermitteln oder objektiv bestimmen – wie das Aussehen oder das Prestige eines Pkw.

Letztendlich ist Nutzen eine subjektive Kategorie. Je nach Präferenzstruktur, Orientierung und Wertvorstellung lassen sich mit Hilfe von Marktforschung Verbrauchergruppen in unterschiedliche Milieus oder Marktsegmente einteilen. Es gibt also nicht den einen durchschnittlichen und repräsentativen Autobesitzer und Autofahrer, sondern viele verschiedene

mit unterschiedlichen Präferenzen. Besser nachvollziehbar und damit auch prognostizierbarer sind Verbraucherentscheidungen auf der Basis ökonomisch messbarer Kategorien wie Marktpreise und Kosten.

Wenn Hauptzweck eines Pkw die Erbringung einer Personenverkehrs- und damit Fahrleistung ist, werden sich ökonomisch rational handelnde Verbraucher für Pkw entscheiden, welche die gewünschte Verkehrsleistung in der gewünschten Qualität (Nutzen) zu den geringsten Kosten erbringen; zumindest werden sie in ihre Kauf- bzw. Halte-Entscheidungen solche Kosten-Nutzen-Überlegungen einbeziehen.

Die Kosten unterschiedlicher Auto-Konzepte – in Abhängigkeit von unterschiedlichen Antrieben und Kraftstoffen – können mit Hilfe von Autokosten-Vergleichen beurteilt werden.

### Technologischer Fortschritt

Eine wichtige, wenn nicht gar herausragende Rolle für die Zukunft des Automobils spielen Forschung und Entwicklung also der technologischer Fortschritt. Technologischer Fortschritt kann autonom, aber auch – durch ökonomische Ziele (Gewinn) motiviert – planmäßig erfolgen. Nach Joseph Alois Schumpeter, einem führenden österreichischen Ökonomen, Innovations- und Kapitalismustheoretiker, lässt sich technologischer Fortschritt in drei Phasen unterteilen: Erfindung, Innovation und Technologiediffusion.

Dabei versteht man unter Innovation die kommerzielle Umsetzung einer Erfindung (Ferguson 1988). In der Industrieökonomik werden in erster Linie Produkt- und Prozessinnovationen unterschieden (Bester 2007). Ist eine Innovation erfolgreich, finden sich Nachahmer, so dass sich eine neue Technologie im Markt verbreitet (Technologiediffusion) und selbst zum neuen Standard wird.

Erfolgt die Diffusion einer neuen Technologie sehr schnell und wird hierdurch eine alte Technologie rasch und nahezu vollständig abgelöst, spricht man auch von disruptiven Technologien (Christensen 1997).

Bei Pkw und Antriebstechniken ist zunächst an Produktinnovationen zu denken, das heißt neue Antriebstechnologien. Tatsächlich können Innovationen jedoch weit vielfältiger sein. Innovationen im Bereich Pkw und Antriebe können sich nicht nur auf Produkte, sondern auch auf Dienstleistungen rund um den Pkw-Antrieb richten. Innovationen verbessern Produktionsverfahren und optimieren

betrieblich-organisatorische Abläufe. Sie erschließen neue Absatzmärkte oder auch neue Rohstoffquellen. Entscheidend für den Markterfolg miteinander konkurrierender Antriebstechniken – wie Verbrennungsmotor und elektrischer Antrieb – ist letztendlich die relative Innovationsgeschwindigkeit.

### Energieversorgung

Schließlich wird der Antriebsmix des Pkw-Bestandes durch technisch-ökonomische Trends bei Kraftstoffen und Energieversorgung für das Automobil maßgeblich beeinflusst. Die Versorgung von Endverbrauchern mit Endenergieträgern (Kraftstoffen) ist ein mehrstufiger Vorgang. Zunächst wird mit Hilfe von Förder- und Produktionsanlagen Primärenergie gefördert, produziert oder angebaut.

Die Primärenergieerzeugung hängt von der Verfügbarkeit von primären Rohstoffen wie Rohöl, Erdgas oder Biomasse ab. In der Regel muss die gewonnene Primärenergie anschließend über verschiedene Verarbeitungsstufen wie Raffinerien, Erdgasaufbereitung, Vergärung/Destillation oder Kraftwerke zu Endenergie weiter veredelt und anschließend verteilt und vermarktet werden.

Jeder Produktionsstufe entspricht wiederum eine eigene Marktstufe. Die mit Abstand größten und liquidesten Märkte für Energieträger für den Straßenverkehr sind die globalen Märkte für Rohöl und Kraftstoffe (Otto- und Dieselmotoren) und deren Komponenten). Alle anderen Kraftstoff- und Endenergiemärkte für den motorisierten Individualverkehr sind weiter weniger entwickelt.

Von großer Relevanz für den Endverbraucher sind letztendlich eine zeitlich unbegrenzte und räumlich flächendeckende Verfügbarkeit sowie schließlich die Bezahlbarkeit von Kraftstoffen und anderen Endenergieträgern.

Dabei müssen die Kraftstoffe die in Produktstandards definierten Anforderungen ihrer jeweiligen Antriebstechnologien sowie teilweise zusätzlich Mindestanforderungen an die Art und Weise ihrer Herstellung erfüllen.

Im Folgenden werden zwei für die künftige Entwicklung von Pkw-Antrieben und Kraftstoffen besonders relevante Einflussfaktoren ausführlicher behandelt: zum einen die EU CO<sub>2</sub>-Regulierung für neue Pkw, zum anderen Autokosten-Vergleiche unterschiedlicher Antriebs-Kraftstoff-Kombinationen.

### CO<sub>2</sub>-REGULIERUNG FÜR PKW

→ Eine wichtige Randbedingung für Auswahl und Marktdurchdringung alternativer Antriebe bei Neuwagen sind der spezifische Kraftstoffverbrauch und die spezifischen Treibhausgasemissionen. Während die Pkw-Energieverbrauchskennzeichnung in erster Linie der Verbraucherinformation dient (dena 2011a) macht die EU-Richtlinie 443/2009/EG (bis 2020) bzw. 333/2014/EG (ab 2020) zur Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von Pkw den Fahrzeugherstellern verbindliche Vorgaben und übt damit maßgeblichen Einfluss auf das Neuwagenangebot, insbesondere deren Antriebe und Kraftstoffe (EP/Rat 2009c, 2014).

Was sind die wichtigsten regulatorischen Vorgaben zur CO<sub>2</sub>-Minderung bei Pkw? Welche Handlungsoptionen bei Antriebstechniken (und Kraftstoffen) gibt es für Pkw-Hersteller zu deren Einhaltung? Und wie könnte es künftig mit der Energieeffizienz- und CO<sub>2</sub>-Regulierung weitergehen?

### Aktuelle EU-CO<sub>2</sub>-Regulierung für Neufahrzeuge

Zunächst ist gemäß EU-CO<sub>2</sub>-Grenzwert-Richtlinie 443/2009/EG der durchschnittliche CO<sub>2</sub>-Ausstoß aller Neuwagen im Zeitraum 2012 bis 2015 auf 130 Gramm CO<sub>2</sub> pro Kilometer zu senken; darin ist bereits eine Reduzierung um 10 g CO<sub>2</sub>/km für technische Verbesserungen und den Einsatz von Biokraftstoffen enthalten. Die nominellen Grenzwerte beziehen sich auf ein durchschnittliches Gewicht der Herstellerflotte von derzeit 1372 kg.

Der herstellereigene CO<sub>2</sub>-Grenzwert ist linear vom Gewicht seiner jeweiligen Neuzulassungen abhängig. Pro 100 kg Mehrgewicht dürfen 4,57 g CO<sub>2</sub>/km mehr emittiert werden. Dieser Gewichtungsfaktor sinkt 2020 auf 3,33 g CO<sub>2</sub>/km. Bei Überschreitungen des herstellereigenen Grenzwertes werden Strafzahlungen von bis zu 95 Euro pro Gramm Grenzwert-Überschreitung fällig. Zudem kann ein Hersteller für den Einsatz innovativer Technologien (Ökoinnovationen) Gutachten von insgesamt bis zu 7 g CO<sub>2</sub>/km für Maßnahmen außerhalb des Fahrzyklus auf seine Neuwagenflotten-Grenzwerte erreichen. Dies ist jedoch mit strengen Anforderungen verbunden. Mittelfristig – bis 2020 zu

95 % und bis 2021 vollständig – sollen nach der fortgeschriebenen EU-CO<sub>2</sub>-Grenzwert-Richtlinie 333/2014/EG die CO<sub>2</sub>-Emissionen auf durchschnittlich nur noch 95 g CO<sub>2</sub>/km sinken; das entspricht etwa 3,6 Liter Diesel bzw. 4,1 Liter Benzin auf 100 Kilometer.

### Handlungsoptionen: Antriebe und Kraftstoffe

Wichtige fahrzeugtechnische Optionen zur Reduzierung spezifischer Kraftstoffverbräuche und spezifischer CO<sub>2</sub>-Emissionen sind zum einen die Minimierung der Fahrwiderstände, zum Beispiel durch bessere Aerodynamik, Leichtbau und geringere Rollwiderstände, zum anderen die Steigerung der Motoreffizienz konventioneller Otto- und Dieselantriebe durch technische Maßnahmen.

Darüber hinaus lassen sich Verbrauch und Emissionen des Neuwagenangebotes senken, wenn der Anbieter vermehrt Pkw mit effizienteren und emissionsärmeren Antrieben absetzt. Die bedeutendste CO<sub>2</sub>-Minderungsoption der deutschen und der europäischen Autoindustrie der vergangenen Jahre war der Dieselantrieb, denn Dieselmotoren sind deutlich effizienter als Ottomotoren. Dabei kann der Dieselantrieb den höheren

Kohlenstoffgehalt des Dieselmotors (ca. 13 % gegenüber Ottomotors) durch Motor-effizienz sogar überkompensieren.

Eine weitere Antriebsalternative sind Erdgas- und Flüssiggasmotoren. Sie sind können heute ähnlich effizient gebaut werden wie moderne Ottomotoren. Aber sowohl Erdgas als auch Flüssiggas weisen (pro Benzinliteräquivalent) 10 % bzw. 23 % weniger spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen auf als Ottomotors.

Eine weitere Handlungsoption ist schließlich die Hybridisierung (Elektrifizierung) von Antrieben. Durch optimales Zusammenwirken der Antriebsarten (Verbrennungs- und Elektromotor) lässt sich der spezifische Kraftstoffverbrauch von Otto- und Dieselantrieben deutlich senken.

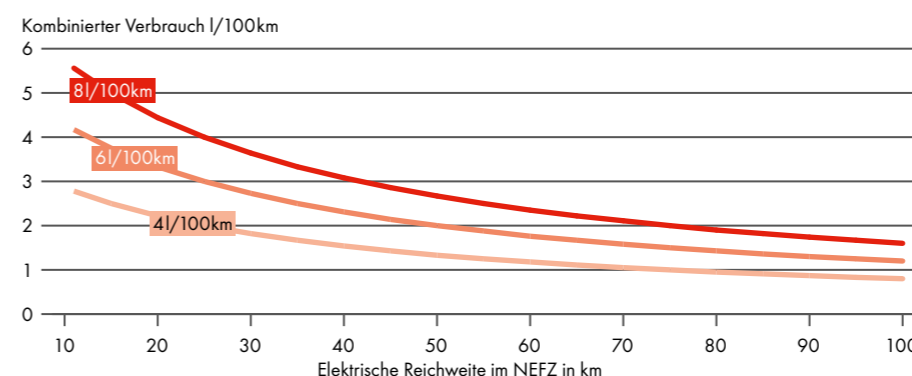
Eine besondere Rolle in den CO<sub>2</sub>-Minderungsstrategien der Autohersteller kommt dem Plug-in-Hybrid zu, da er aufgrund der Ermittlung seines Kraftstoffverbrauchs bzw. seiner CO<sub>2</sub>-Emissionen vergleichsweise geringe Normwerte ausweist: Nach der geltenden CO<sub>2</sub>-Regulierung durchfährt ein Plug-in den Messzyklus (nach *Neuem Europäischen Fahrzyklus* NEFZ) zweimal: Einmal wird nur mit Verbrennungsmotor gefahren und einmal inklusive Plug-in-Funktionalität mit am Stromnetz aufgeladener Batterie.

Anschließend werden die jeweiligen Energieverbräuche miteinander verrechnet. Wenn ein kompletter Messzyklus (NEFZ, ca. 11 km) rein elektrisch gefahren werden kann, werden der Energieverbrauch und die CO<sub>2</sub>-Emissionen in diesem Durchgang mit Null bewertet.

Der Stromverbrauch geht beim Plug-in folglich in der Regel nicht in die Berechnung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs bzw. CO<sub>2</sub>-Ausstoßes mit ein. Durch die Gewichtung des Plug-in-Normverbrauchs mit der elektrischen Reichweite der Batterie sinkt der ausgewiesene Normverbrauch des Plug-ins ferner mit steigender elektrischer Reichweite.

Abbildung 30 zeigt den Normverbrauchs-Zulassungswert in Abhängigkeit von der elektrischen Reichweite für drei verschiedene Fahrzeuge, die im rein verbrennungsmotorischen Betrieb 8 l, 6 l, bzw. 4 l/100 km verbrauchen würden. Bei einer elektrischen Reichweite von 25 km wird der gemessene Kraftstoffverbrauch rechnerisch halbiert, zum Beispiel von 6 l/100 km auf 3 l/100 km für einen Plug-in-Hybrid; bei einer elektrischen Reichweite von 50 km würde der Plug-in nur noch 2 l statt 6 l/100 km ausweisen.

### 30/GEWICHTETER KRAFTSTOFFVERBRAUCH FÜR PLUG-IN-HYBRIDE



Hieraus ergibt sich ein Anreiz, die rein elektrische Reichweite von Plug-in-Hybriden etwa durch den Einbau von Batterien mit hoher Speicherkapazität zu vergrößern, um den Ausweis von CO<sub>2</sub>-Emissionen und Kraftstoffverbrauch zu senken. Allerdings setzen hohe Kosten für Batterien sowie ihr Gewicht der elektrischen Reichweite von Plug-ins ökonomische und technische Grenzen. Besonders attraktiv sind schließlich rein batterieelektrische Antriebe und Brennstoffzellen, die keinerlei direkte Abgasemissionen verursachen.

#### Ausblick: CO<sub>2</sub>-Grenzwerte und Alternativen

Auch künftig wird die Regulierung der fahrzeugbezogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen ein wichtiger Ansatzpunkt für Klimapolitik im Verkehrsbereich darstellen. Es stellt sich jedoch die Frage, wie tief CO<sub>2</sub>-Emissionen heutiger Pkw überhaupt gesenkt werden können. Für das kommende Jahrzehnt wird bereits über CO<sub>2</sub>-Grenzwerte von 68 bis 78 Gramm CO<sub>2</sub> pro Kilometer diskutiert. Pkw die nur 50 Gramm emittieren, werden von der CO<sub>2</sub>-Regulierung als Niedrigemissionsfahrzeuge bevorzugt behandelt – durch eine Mehrfachanrechnung bei der Berechnung der durchschnittlichen spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Allerdings zeichnen sich für konventionelle Antriebe zunehmend physikalische Grenzen der Verbrauchs- und CO<sub>2</sub>-Optimierung ab, so dass CO<sub>2</sub>-Grenzwerte dann nur noch mit

Hilfe von Plug-in-Hybriden und Elektro-Pkw (einschließlich Brennstoffzellenfahrzeugen) erreicht werden können. Der verstärkte Einsatz (lokal) emissionsfreier Pkw führt allerdings nicht notwendigerweise zu geringeren Gesamtemissionen, sondern zunächst zur Verlagerung von Emissionen (und Primärenergieaufwand) in die Vorketten. Die Einbeziehung der Vorketten wird folglich immer wichtiger.

Statt CO<sub>2</sub>-Emissionen am Auspuff zu messen, wird daher gefordert, die Energieeffizienz von Antrieben zum Beispiel anhand des spezifischen Energieverbrauchs pro Fahrleistung auszuweisen (UBA 2013a).

Alternative Antriebe, insbesondere elektrische, wären dann prinzipbedingt (durch den hohen Wirkungsgrad des Antriebs) immer noch begünstigt, gleichzeitig würden aber auch

Die EU-CO<sub>2</sub>-Regulierung für neue Pkw übt schon heute maßgeblichen Einfluss auf den Antriebs-Kraftstoffmix bei den Neuzulassungen aus. Da bisher nur Abgasemissionen betrachtet werden, werden elektrische Antriebe gegenüber Verbrennungskraftmaschinen bei der CO<sub>2</sub>-Bewertung begünstigt. Werden die CO<sub>2</sub>-Grenzwertpfade über einen längeren Zeithorizont in die Zukunft projiziert, nimmt der Einfluss der CO<sub>2</sub>-Grenzwerte auf die Pkw-Neuzulassungen weiter zu.

Mittelfristig könnte es dabei zu einer Überprüfung und Überarbeitung der heutigen CO<sub>2</sub>-Regulierung kommen – zum Beispiel unter Einbeziehung der Vorketten der Kraftstoffnutzung und/oder Endenergieeffizienz der Pkw. In der aktuellen Pkw-Studie wird jedoch unterstellt, dass sich die heute geltende Pkw-CO<sub>2</sub>-Regulierung vom Grundsatz her (vorerst) nicht ändert. Sie wird daher in den folgenden Pkw-Szenarioprognosen entsprechend weiter fortgeschrieben.

#### AUTOKOSTENVERGLEICH

Ein wichtiger Parameter für die Entscheidung, einen Pkw zu kaufen oder zu halten, ist seine Wirtschaftlichkeit bezogen auf eine bestimmte Fahr- oder Transportleistung. Sie kann mit Hilfe von Autokosten-Berechnungen analysiert werden. In Betriebswirtschaft, Flottenmanagement und Logistik verfolgt man einen *Total-Cost-of-Ownership-Ansatz* (TCO), mit dem alle relevanten Kosten der Fahrzeughaltung (Ownership) zur Erbringung einer gewünschten Personen- oder Güterverkehrsleistung untersucht werden.

Der TCO-Ansatz empfiehlt sich vor allem für rational entscheidende und handelnde Akteure; hierzu zählen insbesondere juristische Personen und gewerbliche Fahrzeughalter. Auch Privathaushalte können ihre Pkw-Anschaffungs- und Pkw-Haltungsentscheidung mit Hilfe von Autokosten-Vergleichen treffen bzw. überprüfen. In automobilen Fachzeitschriften

werden regelmäßig unterschiedlichste Autokostenvergleiche angeboten. In der Realität orientiert allerdings nur ein (kleiner) Teil der privaten Haushalte seine automobilen Wahlentscheidung ausschließlich oder hauptsächlich an den (niedrigsten) Autokosten (Wietschel et al. 2013), sondern auch an anderen als Kosten-/Fahrleistungsrelationen. Wichtige Entscheidungsparameter, die sich nicht in Autokosten oder Transportleistung ausdrücken lassen, werden vom TCO-Ansatz jedoch nicht erfasst.

Die Möglichkeiten und Varianten des Autokostenvergleichs sind zahlreich. In einem vollständigen Autokostenvergleich werden idealerweise sämtliche Anschaffungs- und Betriebskosten zur Auswahl stehender Pkw miteinander verglichen. Hierunter fallen die Pkw-Anschaffungskosten, das ist der Anschaffungspreis (meist der Grund-/Basisversion) oder im Finanzierungsfall Ratenzahlungen

für konventionelle Antriebe stärkere Optimierungsanreize gesetzt.

Schließlich wird der CO<sub>2</sub>-Ausstoß im Rahmen der Typprüfung unter Anwendung des Neuen Europäischen Fahrzyklus gemessen. Dabei weichen die ermittelten Normverbräuche zum Teil deutlich (etwa 25 %) von realen Kraftstoffverbräuchen ab (ICCT 2014).

Deshalb wird unter dem Dach der UN-Wirtschaftskommission (UN ECE) an einer neuen globalen *Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure* (WLTP) gearbeitet, die realere Fahrbedingungen abbildet und möglichst weltweit gelten soll. Mit dem Inkrafttreten wird erst mittelfristig gerechnet, zumal die heutigen Normvorgaben vom geltenden NEFZ auf den künftigen WLTP noch umbasiert werden müssten.

zuzüglich Zinsen. Soll der Pkw wieder veräußert werden, muss zusätzlich der Wertverlust über die gewünschte Haltedauer bzw. der Wiederverkaufswert geschätzt werden. Zu den Fixkosten werden Kfz-Steuer und Pkw-Versicherung gezählt. Ferner müssen Werkstattkosten (für Wartung und Verschleißreparaturen) und Kraftstoffkosten berücksichtigt werden (ADAC 2014). Ein (möglichst) vollständiger Vergleich verschafft Kostentransparenz. Gleichwohl muss eine ganze Reihe von Annahmen zu einzelnen Kostenpositionen getroffen werden, die zum Teil wie Versicherungstarife sehr individuell sind und die das Vergleichsergebnis wie zum Beispiel der Wertverlust maßgeblich beeinflussen können.

Der einfachste Vergleichsansatz beschränkt sich demgegenüber auf die wichtigsten differenzierenden Kostenpositionen. Dazu gehören zum einen der einmalige Anschaffungspreis,

zum anderen die laufenden Kraftstoffkosten. Im Folgenden soll ein vereinfachter Autokostenvergleich für einen neuen Pkw der Kompakt- bzw. unteren Mittelklasse – dem bedeutendsten Pkw-Segment in Deutschland – durchgeführt werden.

In den Vergleich wird eine Auswahl von Pkw-Antrieben einbezogen: reine Otto-Pkw, voll hybridisierte Otto-Pkw, Diesel-Pkw, Plug-in-Hybride mit unterschiedlichen elektrischen Fahranteilen und schließlich rein batterieelektrische Pkw. Reine Gasfahrzeuge (LPG und CNG) werden nur mit dem heutigen Energiesteuersatz abgebildet. Nach Energiesteuererhöhung ab 2019 steigen; es ist jedoch beabsichtigt, die heutige substanzielle Steuerermäßigung fortzuschreiben. Nicht betrachtet werden Diesel-Hybride, die aufgrund vergleichsweise hoher Anschaffungskosten eher kleine Marktanteile aufweisen dürften und Brennstoffzellenfahrzeuge, da dazu noch keine ausreichenden Preis- und Kosteninformationen für einen Autokosten-Vergleich vorliegen.

Im Autokostenvergleich betrachtet werden neue Pkw-Modelle, die Anfang bis Mitte der 2020er Jahre auf den Markt kommen. Sie müssen die CO<sub>2</sub>-Grenzwertvorgabe von 95 Gramm pro Kilometer erfüllen. Der Kraftstoffverbrauch lässt sich aus dem spezifischen CO<sub>2</sub>-Faktor des jeweiligen Kraftstoffs rückrechnen. Soll ein Diesel-Pkw nur 95 Gramm CO<sub>2</sub> emittieren, darf er nur einen Normverbrauch in Höhe von gut 3,5 Litern pro 100 Kilometer aufweisen; im Realbetrieb entspricht das – bei einem Aufschlag von etwa 25 % – rund 4,4 Liter Diesel pro 100 Kilometer.

Ein vergleichbarer Ottoantrieb (mit Ottokraftstoff, Erdgas oder Flüssiggas) wäre prinzipbedingt knapp 15 % weniger energieeffizient als ein Dieselantrieb. Fahrzeuge mit Erdgas- oder Autogasantrieb sind dennoch aufgrund geringerer kraftstoffspezifischer Treibhausgasemissionen in der Lage, das 95 Gramm-Ziel zu erreichen (Autogas bzw. LPG) bzw. sogar zu unterbieten (Erdgas).

Lediglich der Vergleichs-Pkw mit reinem Otto-Antrieb schafft die 95 Gramm nicht. Es besteht die Möglichkeit, den reinen Otto-Antrieb mit zusätzlichen Technikpaketen effizienter zu machen – eine Option ist die Hybridisierung. Über einen etwa 20 % geringeren spezifischen Kraftstoffverbrauch gegenüber dem Referenz-Otto-Pkw kann der Otto-Hybrid den spezifischen Verbrauchs- und Emissionsnachteil des reinen Ottoantriebes wettmachen, allerdings bei höheren Anschaffungskosten.

Neben Pkw mit Verbrennungsmotoren werden noch zwei Arten elektrischer Antriebe betrachtet, nämlich rein batterieelektrische Pkw sowie Plug-in-Hybride. Beide Pkw-Antriebskonzepte haben keine Probleme, die vorgegebenen CO<sub>2</sub>-Grenzwerte einzuhalten, da sie Strom aus dem Netz laden können, der im Fahrzyklus mit Null CO<sub>2</sub>-Emissionen gerechnet wird.

In einer Trend- und in einer Alternativ-Betrachtung werden zwei unterschiedliche Kostenstrukturen für Antriebe und Kraftstoffe unterstellt. Unter Trend-Bedingungen bleiben die heutigen Autokostenstrukturen für Pkw mit Verbrennungsmotor und mit Elektroantrieb grundsätzlich erhalten. Unter Alternativbedingungen entwickeln sich die wichtigen Autokostenparameter (Neuwagenpreis, Kraftstoffpreis und Wirkungsgrade) zugunsten von elektrischen Antrieben. Die Autokosten der jeweiligen Antriebs-Kraftstoff-Kombinationen werden in einem XY-Diagramm miteinander verglichen. Die X-Achse zeigt die jeweilige gesamte Pkw-Lebensfahrleistung, die Y-Achse die bei einer bestimmten Fahrleistung insgesamt aufgelaufenen Autokosten (Anschaffungs- und Energiekosten). Der Schnittpunkt einer Autokostenkurve mit der Y-Achse gibt die Anschaffungskosten einer bestimmten Pkw-Antriebs-Kraftstoff-Konfiguration an.

Die Steigung der Autokostenkurve spiegelt die jeweiligen Kraftstoff- bzw. Energiekosten eines Pkw-Antriebs wieder. Dabei werden die Kraftstoff- bzw. Energiekosten (in €/km) nicht nur von den Kraftstoffpreisen (in €/Liter oder kWh), sondern auch wesentlich vom Wirkungsgrad bzw. der Effizienz des betrachteten Pkw-Antriebes bestimmt. Je niedriger eine Autokostenkurve verläuft, desto günstiger ist der zugehörige Pkw-Antrieb und je höher die Kurve, desto teurer die Antriebs-Kraftstoff-Kombination. Schneiden sich zwei Autokostenkurven, wird ein Pkw-Antrieb ab einer

bestimmten Pkw-Lebensfahrleistung günstiger als ein anderer.

#### Autokosten-Vergleich Trend-Kostenstrukturen

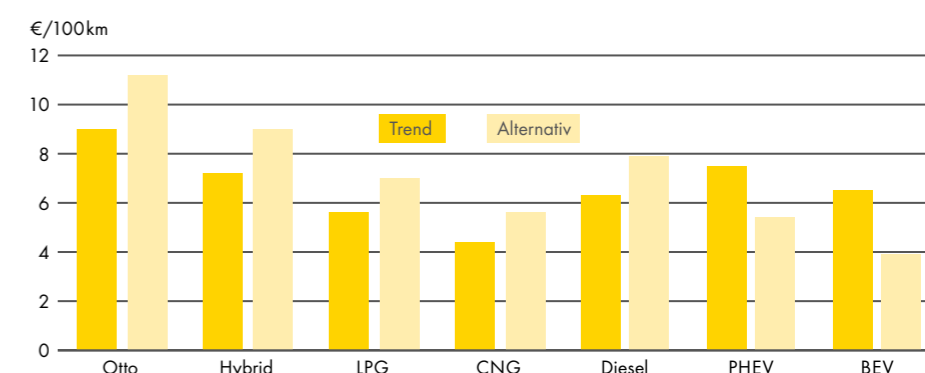
Bei Trend-Kostenstrukturen bleiben elektrische Antriebstechniken vergleichsweise teuer; gegenüber Otto- und Dieselantrieben liegt der Aufschlag bei den Neuwagen-Anschaffungskosten weiterhin bei etwa 50 %.

Die Struktur der Kraftstoffpreise ändert sich gegenüber heute (2013) kaum. Bezogen auf den Energiegehalt ist Dieselmotorkraftstoff weniger als halb so teuer pro Energieeinheit wie Strom; Ottokraftstoffe sind immerhin noch ein Drittel günstiger als der in Elektro-Pkw verwendete Haushaltsstrom. Noch günstiger sind Gaskraftstoffe (LPG und CNG), die aktuell aber beide noch von einer substanziellen Steuerermäßigung profitieren – diese soll ab 2019 deutlich abgeschmolzen werden.

Beim Betriebskostenvergleich ändert sich hingegen die Reihenfolge der Antriebstechniken (siehe Abbildung 31): Elektrische Antriebe sind effizienter als Verbrennungsmotoren und weisen daher niedrigere Kraftstoffkosten pro gefahrenen Kilometer als Otto-Pkw auf. Da als Fahrstrom genutzter Haushaltsstrom teuer ist und elektrische Antriebe unter Trend-Bedingungen im realen Fahrbetrieb nur etwa doppelt so effizient wie Ottoantriebe sind, haben Gasantriebe und auch Diesel-Pkw weiterhin leichte Kraftstoffkostenvorteile pro Kilometer. Das gilt auch für Plug-in-Hybride mit mittleren elektrischen Fahranteilen (hier ca. 60%), die immer noch etwas teurer als Diesel-Pkw sind.

Im Hinblick auf die gesamten Autokosten für Pkw-Anschaffung und Kraftstoffe sind reine Otto-Pkw bei geringen Fahrleistungen die kostengünstigste Lösung. Steigen die Fahrleistungen, werden zunächst – bei etwa 50.000 bis 60.000 km – Gasantriebe aufgrund niedriger Kraftstoffpreise vorteilhafter. Stiege die

31/TREND VS. ALTERNATIV (2020/25): PKW-ENERGIEKOSTEN IM VERGLEICH



Energiesteuer auf LPG und CNG, verschiebe sich die Wirtschaftlichkeit von CNG- und LPG-Pkw weiter nach rechts. Ab etwa 100.000 bzw. 140.000 km wird der Diesel-Pkw und schließlich der Otto-Hybrid aufgrund niedrigerer spezifischer Kraftstoffverbräuche und damit verbundenen niedrigeren Betriebskosten günstiger.

Rein elektrische Antriebe, aber auch Plug-ins sind unter Trend-Kostenstrukturen – zumindest im Rahmen eines normalen Pkw-Lebens – (noch) nicht wettbewerbsfähig gegenüber Pkw mit Verbrennungsmotor (Abbildung 32).

### Autokosten-Vergleich

#### Alternativ-Kostenstrukturen

Unter Alternativ-Bedingungen sinken die Kosten der Pkw-Elektrifizierung schneller. Gegenüber einem Otto-Referenzfahrzeug reduziert sich der Aufschlag bei den Neuwagen-Anschaffungskosten mittelfristig auf nur noch ein Zehntel beim Otto-Hybrid und etwa ein Drittel beim Plug-in-Hybrid und beim rein batterieelektrischen Fahrzeug. Neue Otto- und Gas-Pkw halten ihr Anschaffungskosten-niveau weitgehend, während der Diesel-Pkw etwas teurer wird.

Darüber hinaus ändert sich auch die Struktur bei den Kraftstoffpreisen. Fossile Kraftstoffe verteuern sich parallel zum allgemeinen Verbraucherpreisanstieg. Auf der anderen Seite sinken die Preise für elektrischen Fahrstrom – zum Beispiel wenn Autofahrer verstärkt selbst erzeugten Strom nutzen oder überschüssiger erneuerbarer Strom verfügbar wird. Damit hätten sich die fossilen Kraftstoffpreise und Fahrstrompreise bereits pro Energieeinheit stark angenähert. Lediglich Gaskraftstoffe könnten dann noch unter den Fahrstrompreisen pro Energieeinheit liegen.

Aufgrund des deutlich besseren Wirkungsgrades gegenüber dem Verbrenner werden damit deutliche Kraftstoffkostenvorteile bezogen auf die Pkw-Fahrleistung für den Elektroantrieb gegenüber allen anderen Antrieben erreicht – wobei elektrische Antriebe unter Alternativ-Bedingungen in den kommenden Jahren größere Effizienzfortschritte im realen Fahrbetrieb erzielen. Und auch Plug-in-Hybride mit hohen elektrischen Fahranteilen (etwa 80%) liegen noch vor verbrennungsmotorischen Antrieben. Rein batterieelektrische Fahrzeuge haben dann die niedrigsten Kraftstoffkosten pro 100 km von allen Antriebsarten. Plug-in-Hybride und Erdgas-Pkw liegen etwa gleich auf dem zweitniedrigsten Niveau.

Bei den gesamten Autokosten (Anschaffungs- und Kraftstoffkosten) wären reine Otto-Pkw nur noch bei relativ geringen Pkw-Fahrleistungen die kostengünstigste Lösung. Schon nach 20.000 bis 30.000 km Pkw-Lebens-fahrleistung weisen Gasantriebe geringere Autokosten auf.

Die noch etwas höheren Anschaffungskosten von effizienteren Otto-Hybriden lassen sich nun schon nach weniger als 100.000 km wieder einfahren, während der Dieselantrieb hier dafür etwas mehr als 100.000 km Gesamtfahrleistung benötigt.

Rein elektrische Antrieb und auch Plug-in-Hybride könnten sich unter Alternativ-Kostenstrukturen ab dem letzten Drittel eines Pkw-Lebens gegenüber Otto- und Diesel-Pkw rechnen. Voraussetzung hierfür sind hohe Fahrleistungen von 140.000 km und mehr. Dem steht allerdings die geringere Reichweite und damit geringeren Jahreslaufleistungen als Otto- und vor allem Diesel-Pkw entgegen.

### Neuwagen vs. Gebrauchtwagen

Bei der Neuwagenanschaffung spielt der Pkw-Anschaffungspreis für die Wirtschaftlichkeitsanalyse eine überragende Rolle. Für Neuwagenkäufer, die ihren Pkw wieder veräußern wollen, ist daher eine Vorstellung von der Wertentwicklung (Wertverlust) ihres Pkw von zentraler Bedeutung.

Meist beträgt der Wertverlust von Neuwagen schon in den ersten Jahren 50% oder mehr. Mögliche Pkw-Wertverluste können je nach Szenario unterschiedlich verlaufen. Bei raschem technologischen Fortschritt beschleunigt sich der Wertverlust veralteter Technologien, denn neue bessere Technologien und Produkte führen zur Entwertung alter.

Auf der anderen Seite fehlen bei neuen Antriebstechnologien Erfahrungswerte über deren Dauerhaltbarkeit im Feld (zum Beispiel zur Batterie-Lebensdauer), woraus sich erhöhte Restwert Risiken für den Käufer ergeben. Um die (finanziellen) Risiken bei der Neuanschaffung alternativer Antriebe gleichmäßiger zu verteilen und die Akzeptanz beim Verbraucher zu erhöhen, werden schon heute vielfach neue Finanzierungs-, Miet- oder andere Dienstleistungsmodelle angeboten.

Viele Privathaushalte kaufen jedoch gar keine Neuwagen, sondern gebrauchte Pkw. Zuletzt (2013) kamen auf rund 3 Mio. Neuwagen über 7 Mio. Besitzumschreibungen, also Gebrauchtwagenkäufe.

Für Gebrauchtwagenkäufer sinkt die Bedeutung des Anschaffungspreises. So lag der Anschaffungspreis für Gebrauchtpkw 2013 unter 10.000 Euro, während für Neuwagen über 27.000 Euro ausgegeben wurden (DAT 2014). In einer TCO-Analyse

für Gebrauchtwagen spielt der Anschaffungspreis folglich eine wesentlich geringere Rolle. Die Bedeutung der Betriebskosten nimmt dagegen zu; das gilt für die Kraftstoffkosten, aber auch für alle anderen operativen Kosten – von der Kfz-Steuer über die Versicherung bis zu den Werkstattkosten.

In der Folge werden die Antriebstechniken mit den geringeren Betriebskosten wirtschaftlich vorteilhafter. Allerdings dürfte die Etablierung eines substanziellen Gebrauchtwagenmarktes für alternative Antriebe mindestens eine halbe Fahrzeuggeneration – bei beschleunigtem Markthochlauf – in Anspruch nehmen, denn immerhin waren im Jahr 2013 gehandelte Gebrauchtpkw im Durchschnitt über 7 Jahre alt (DAT 2014).



Der Autokosten-Vergleich zeigt, dass elektrische Antriebe bei heutigen Trend-Kostenstrukturen noch nicht wettbewerbsfähig sind. Auf der Basis von Autokosten allein wird ein rationaler Verbraucher sich heute eher für etablierte Pkw-Antriebstechnologien mit Verbrennungsmotor entscheiden. Auf der anderen Seite sind aber auch alternative Autokostenstrukturen denkbar und möglich, bei denen elektrische Pkw-Antriebe im kommenden Jahrzehnt – unter bestimmten weiteren Bedingungen – wettbewerbsfähig gegenüber Otto- und Diesel-Pkw werden könnten.

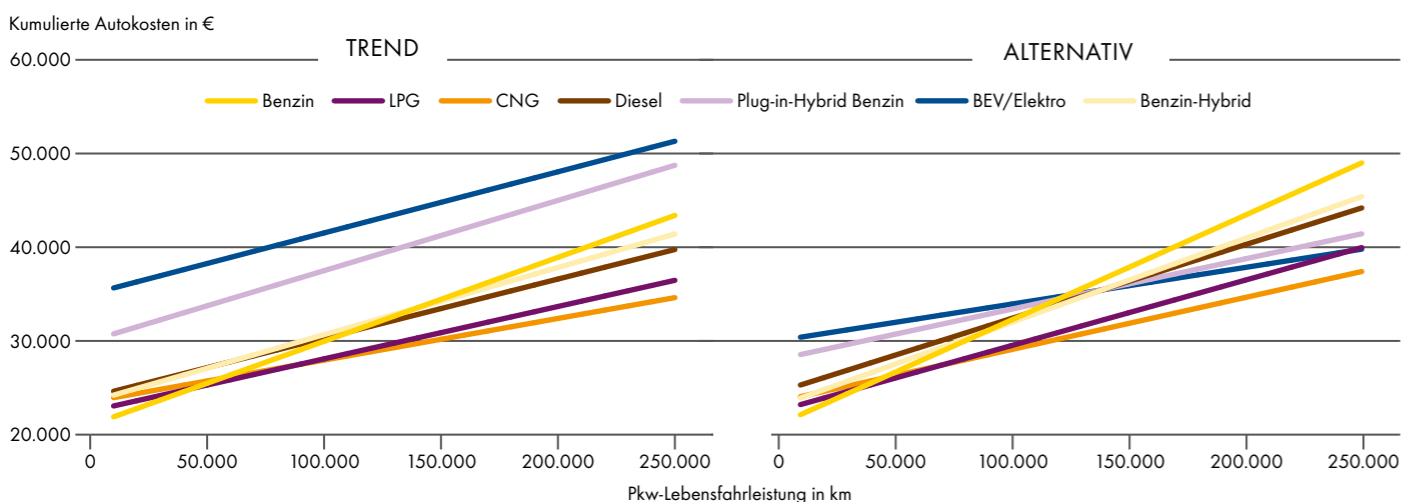
Allerdings müssten hierfür mehrere Faktoren zusammen kommen: Die Anschaffungskosten von Pkw mit alternativen Antrieben müssen deutlich sinken – absolut sowie insbesondere im Verhältnis zu verbrennungsmotorisch angetriebenen Pkw. Die relativen Kraftstoff- bzw. Endenergiepreise müssen sich zugunsten von elektrischer Energie für Verkehrszwecke ändern. Zudem müssen die Effizienz elektrischer Antriebstechnologien unter Alltagsbedingungen und ihre Reichweite erhöht werden sowie die Langlebigkeit von elektrischen Komponenten gewährleistet sein. Um das Hemmnis hoher Anschaffungskosten sowie hoher Wertverlust- bzw. Restwert Risiken alternativer Antriebe zu mindern, bedarf es schließlich neuer Vertriebsmodelle für Pkw, die nicht nur auf (vollständigen) Pkw-Kauf oder Finanzierung durch private Halter setzen.

## AUTOMOBILE ZUKUNFTSSZENARIEN

Von unterschiedlichen Rahmenbedingungen für Autokosten (Trend vs. Alternativ) war bereits die Rede. In diesem Abschnitt werden zwei unterschiedliche Szenarien für Pkw-Antriebe und Kraftstoffe der Zukunft entwickelt: zum einen ein **Trendszenario**, welches die wichtigsten Entwicklungen der jüngeren Vergangenheit einschließlich absehbarer bzw. bereits beschlossener Maßnahmen fortschreibt; zum anderen ein ambitioniertes **Alternativszenario**, in dem sich neue Antriebstechnologien und Kraftstoffe bzw. Energieträger gegenüber dem Trend beschleunigt im Markt durchsetzen. Zusätzlich wird auf Basis des Trendszenarios noch eine **Gasszenarete** untersucht. Hier geht es um die Frage, welchen Beitrag gasbasierte Antriebe und Kraftstoffe – das sind Erdgas und Flüssiggas – im motorisierten Individualverkehr in den kommenden Jahren leisten könnten.

Die Szenarien-Darstellungen orientieren sich dabei auf die unmittelbar auf Antriebs-Kraftstoff-Konfigurationen einwirkenden Einflussfaktoren: Rahmenbedingungen durch Gesellschaft und Politik, Verbrauchernutzen und Verbraucherpräferenzen, technologischer Fortschritt bei Pkw-Antrieben sowie die Energieversorgung für den Verkehrssektor. Die folgenden Szenariopfadbeschreibungen sind keine Prognosen; sie beschreiben vielmehr mögliche künftige Entwicklungen als – teilweise notwendige – Voraussetzung für bestimmte Antriebs-Kraftstoff-Szenarien für Pkw.

### 32/TREND VS. ALTERNATIV (2020/25): AUTOKOSTENVERGLEICH



### TREND-SZENARIO

Das Trendszenario geht von relativ stabilen Umweltbedingungen aus und lehnt sich daher an die langfristigen Trends der Vergangenheit an: gesellschaftlich-politische Rahmenbedingungen und auch Verbraucherpräferenzen verändern sich nur sehr allmählich. Bei Antriebstechnologien gibt es einen stetigen moderaten Technologiefortschritt, der heutige Kraftstoffmix steht weiter zur Verfügung und ändert sich ebenfalls nur langsam.

Das Trendszenario ist keine *Business-as-Usual*-Projektion, denn es bezieht bereits beschlossene, bekannte und auch schon absehbare Änderungen der Rahmenbedingungen mit ein. Der Trendszenariopfad 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 2013).

**Politik:** Im Trendszenario setzen staatliche Akteure grundsätzlich auf marktwirtschaftliche und technologieoffene Lösungen und verfolgen dabei moderate Energie-, Umwelt- und Verkehrspolitik. Die Emissionen des motorisierten Individualverkehrs sind seit der Jahrtausendwende gesunken, sollen aber noch weiter zurückgeführt werden. Allerdings ist Bezahlbarkeit von und Zugang zu Automobilität ein wichtiges Ziel der Politik. Die scharfen Vorgaben für CO<sub>2</sub>-Emissionen von Neuwagen verteuern Automobilität und lassen sich aufgrund zunehmender Widerstände bei Wählern und Verbrauchern jenseits 2020 nicht linear fortschreiben. Nachdem zu Beginn der 2020er Jahre der Grenzwert von 95 g CO<sub>2</sub>/km mit hohem Aufwand gerade noch erreicht wird, ist die europäische Politik gezwungen, das Regulierungstempo für die Folgejahre zu drosseln. Für Neuwagen werden schließlich (im Durchschnitt) 70 g CO<sub>2</sub> als verbindlich zu erreichendes Ziel für Pkw-Hersteller bis 2040 festgesetzt. Zudem greift die (nationale) Politik auch nicht über Steuern oder Ordnungsrecht in die relativen Preise für Antriebe und Kraftstoffe ein. Lediglich Biokraftstoffe werden weiter gefördert, allerdings nur

nachhaltige Biokraftstoffe bzw. zunehmend nur noch Biokraftstoffe zweiter Generation. Von Seiten der Lokalpolitik erfolgen ebenfalls keine neuen antriebspezifischen Nutzungseinschränkungen oder -privilegierungen für Pkw, insbesondere keine neuen (Ein)-Fahrverbote für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor.

**Verbraucher:** Die Menschen wollen mobil sein und dabei stellt der Pkw das wichtigste Transportmittel dar. Autofahrer setzen bei der Verwirklichung ihrer Mobilitätsbedürfnisse auf Leistung, Komfort und Sicherheit. Technologischer Fortschritt wird daher immer auch teilweise in die Steigerung von Leistung, Komfort und Sicherheit wandern – was sich letztendlich auch in der Pkw-Ausstattung bemerkbar macht. Eine Mehrpreisbereitschaft für neue Antriebstechniken ist nicht gegeben; im Gegenteil, Verbraucher bleiben skeptisch und vorsichtig, halten vielfach am Bewährten fest. Notwendige Einschränkungen bei elektrischen Antrieben, insbesondere bei in der Reichweite, bei der Betankung sowie bei Ausstattung und Komfort werden von der Masse der Verbraucher nicht hingenommen.

**Antriebe:** Aufgrund anhaltender technologischer Innovationen bleiben Pkw mit Verbrennungsmotor gegenüber alternativen Antrieben ökonomisch und auch ökologisch noch lange wettbewerbsfähig. Dabei erfolgt bereits im Trendszenario eine zunehmende Elektrifizierung des Antriebsstrangs – vorzugsweise mit Ottomotor. Die technologische Entwicklung beim Dieselantrieb ist ebenfalls noch nicht ausgereift, was diesem zu weiterhin hohen Neuzulassungsanteilen verhilft. Verbesserte Abgasreinigungstechniken lassen auch Pkw-Antriebe mit Verbrennungsmotor in Zukunft nahezu emissionsfrei fahren. Eine Option, die Treibhausgasemissionen von Verbrennungsmotoren weiter zu reduzieren, sind Biokraftstoffe. Biokraftstoffe müssen

jedoch kompatibel mit dem jeweiligen Fahrzeugbestand sein. Mittelfristig lassen sich aber nur bei Otto-Pkw die Beimischungsgrenzen (*Blending Wall*) erhöhen – durch E20-kompatible Ottomotoren. Bei den alternativen Antrieben kommen Gas-Antriebe nicht über eine Nischenrolle hinaus. Auch bei LPG-Fahrzeugen flacht der Trend ab, da höhere Euro-Abgasstandards mit umgerüsteten LPG-Antrieben aufwändiger zu erfüllen sind. Aufgrund hoher Kosten für wichtige Rohstoffe wie Lithium und Platin, geringer Stückzahlen und fehlender Skaleneffekte kommt schließlich die reine Elektrotraktion in Form von Batterie- und Brennstoffzellen-Pkw nur sehr verzögert im Markt an; jedoch erfolgt allmählich eine moderate Marktdurchdringung von Plug-in-Hybriden.

**Kraftstoffe:** Die Rohstoffvorkommen – Rohöl und so genannte *Natural Gas Liquids* – für die Erzeugung von flüssigen ölbasierten Kraftstoffen sind reichlich vorhanden. Aus ihnen können Otto- und Dieselmotoren durch Raffinerien in ausreichenden Mengen hergestellt und geliefert werden. Die sich verändernde jeweilige Otto-/Dieselnachfrage-Relation kann durch zusätzliche Konversionsanlagen für Dieselmotoren sowie etwa über Dieselimporte bzw. Benzinexporte über den Weltmarkt gedeckt werden. Fossile Kraftstoffe werden in den 2020er Jahren verstärkt durch beigemischte Biokraftstoffe ergänzt. Zu wachsenden Teilen handelt es sich dabei um neue Biokraftstoffe 2. Generation, die gegebenenfalls nahtlos beigemischt werden können. Insgesamt steigt der Biokraftstoffanteil bis 2040 auf etwa 20% Volumenprozent an. Alle anderen alternativen Kraftstoffe bleiben mehr oder weniger Nischenkraftstoffe. Insbesondere die Fahrstrompreise verharren aufgrund hoher Kosten für die Energiewende im Stromsektor auf hohem Niveau.

## ALTERNATIV-SZENARIO

Das Alternativszenario setzt einen massiven Wandel der Umweltbedingungen und damit deutliche Brüche der Vergangenheitstrends voraus: gesellschaftlich-politische Rahmenbedingungen und auch Verbraucherpräferenzen verschieben sich merklich. Innovation und technischer Fortschritt schreiten generell schneller voran, insbesondere bei Antriebstechnologien gibt es einen starken technologischen Wandel in Richtung Elektrifizierung von Pkw-Antrieben. Antriebsbedingte Nachfrageverschiebungen sowie Veränderungen auf den (globalen) Energiemärkten führen zu deutlichen Verschiebungen im Kraftstoffmix.

**Politik:** Im Alternativszenario verfolgen staatliche Akteure überaus anspruchsvolle Energie-, Umwelt- und Verkehrspolitik mit starken, zum Teil drastischen Eingriffen in den motorisierten Individualverkehr. So sollen die Emissionen des Pkw zügig weiter sinken. Kosten spielen angesichts einer weitgehend unelastischen Nachfrage nach Automobilität nur eine geringe Rolle und werden Energie- und Klimazielen eindeutig untergeordnet. Die scharfen Vorgaben für CO<sub>2</sub>-Emissionen von Neuwagen werden von Seiten der EU-Politik auch nach 2020 fortgeschrieben. Sie erreichen bereits 2040 nur noch 50 g CO<sub>2</sub>/km für Neuwagen. Hierdurch wird der Markteintritt von Nullemissionsfahrzeugen forciert – Pkw, die keine (direkten) Emissionen verursachen wie Elektro- oder Brennstoffzellenfahrzeuge. Darüber hinaus greift die (nationale) Politik über Steuern

und Ordnungsrecht in die relativen Preise für Antriebe und Kraftstoffe zugunsten elektrischer Antriebe ein. Für die Integration des Autoverkehrs in einen zunehmend dekarbonisierten Strommarkt werden zusätzliche regulatorische Anreize gewährt. Der Auf- und Ausbau neuer Infrastrukturen für Elektro- und Wasserstofffahrzeuge wird gefördert. Die (Lokal)-Politik verhängt antriebspezifische Nutzungseinschränkungen für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor – zum Beispiel über immer strengere Umweltzonen – und vergibt zusätzlich Nutzungsprivilegien für Nullemissionsfahrzeuge.

**Verbraucher:** Die Menschen wollen auch hier möglichst uneingeschränkt mobil sein. Sie können oder wollen dabei nicht auf das Automobil verzichten, möchten es aber möglichst nachhaltig nutzen bzw. bei der Pkw-Nutzung möglichst geringe externe Effekte auf Menschen und Umwelt ausüben. Autofahrer setzen daher auf sparsame, effiziente und saubere Pkw. Pkw mit neuen Antrieben verleihen Prestige. Dafür sind immer mehr Menschen bereit, auch einen Mehrpreis in Kauf zu nehmen. Und sie sind bereit, zumindest Einbußen bei Pkw-Leistung und Komfort hinzunehmen, wenn auch nicht bei der Sicherheit – zumal elektrische Antriebe geringere Betriebskosten verheißten. Die rasch zunehmende Verfügbarkeit von bezahlbaren Elektromodellen durch Massenhersteller erhöht schließlich nochmals die Akzeptanz.

**Antriebe:** Technologischer Fortschritt kann unter Alternativbedingungen auf eine verbesserte Nachhaltigkeitsperformance des Pkw fokussiert werden. Der technologische Fortschritt schreitet auch bei

## GAS-SZENARETTE

Die Gasszenarete basiert auf denselben Grundannahmen wie das Trendszenario. Schon heute liegt die Reichweite der globalen Gasressourcen bei 235 Jahren (IEA 2013, 107). Die technisch-wirtschaftlich erschließbaren Gasvorkommen erweisen sich jedoch noch größer als erwartet. Andererseits sind Gasantriebe und -kraftstoffe sauberer und emissionsärmer als Verbrennungsmotoren auf Basis von Flüssigkraftstoffen. Die Gasszenarete stellt Umfeldbedingungen vor, unter denen Gasantriebe und -kraftstoffe bis 2040 substantielle Marktanteile bei Neuwagen – sowie später im Pkw-Bestand – erreichen könnten und welche Auswirkungen dies auf Antriebs- und Kraftstoffmix sowie Kraftstoffverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen haben könnte.

**Politik:** In der Gasszenarete setzt die Politik ebenfalls auf marktwirtschaftliche Ansätze. Da sich die ambitionierten CO<sub>2</sub>-Grenzwertpfade jenseits 2020 mit Otto- und Dieselantrieben und ohne große Fortschritte bei der Elektrotraktion so nicht weiter fortschreiben lassen, setzt die Politik auf kohlenstoffarme Kraftstoffe, insbesondere Erdgas und auch Flüssiggas. Die CO<sub>2</sub>-Grenzwertvorgabe fällt gegenüber dem Trendszenario anspruchsvoller aus: 65 g CO<sub>2</sub>/km für Neuwagen 2040. Um Gasantriebe stärker zu verbreiten, unterstützt Politik den Infrastrukturausbau für Gaskraftstoffe, insbesondere Erdgas und greift zusätzlich (weiter) in die relativen Kraftstoffpreise zugunsten von Gaskraftstoffen ein. Ferner wird der Einsatz von Gaskraftstoffen aus Biomasse begünstigt; denn Biogas weist besonders geringe spezifische CO<sub>2</sub>-Faktoren auf (dena 2011b).

**Verbraucher:** Autofahrer haben Gasantriebe als vollwertige Alternative zu konventionellen Otto- und Diesel-Pkw akzeptiert, zumal Gas-Pkw eine Otto- und Diesel vergleichbare Performance hinsichtlich Leistung, Komfort und Sicherheit bieten und die Gas-Tankstelleninfrastruktur, insbesondere für Erdgas, inzwischen flächendeckend verdichtet wurde. Zudem ist es „in“, saubere Gas-Pkw zu fahren, die auch deutlich niedrigere Kraftstoffkosten verursachen.

**Antriebe:** Aufgrund steigender Stückzahlen und daraus resultierender Skaleneffekte in der Produktion profitieren Gasantriebe vom technischen Fortschritt beim Verbrennungsmotor. LPG-Pkw werden vermehrt als Neuwagen angeboten. Erdgas-Pkw werden dank Modulbauweise ähnlich wie Otto-Pkw hybridisiert. Aufgrund der sauberen Verbrennung von Gaskraftstoffen profitieren Gasantriebe zusätzlich vom geringeren Aufwand für die Abgasreinigungstechnik.

**Kraftstoffe:** Erdgaskraftstoffe – sowohl komprimiertes Erdgas für Pkw als auch parallel dazu verflüssigtes Erdgas (LNG) für Nutzfahrzeuge – können aus den umfangreichen Erdgasvorkommen problemlos bereitgestellt werden. Zusätzliche Flüssiggasnachfrage für den motorisierten Individualverkehr kann über Importe vom Weltmarkt gedeckt werden. Flüssiggas fällt unter anderem verstärkt als Begleitgas bei der Erdgas- und Erdölförderung an. Erdgaskraftstoffe werden dabei zunehmend – direkt oder bilanziell – von Biogas ergänzt, der Bioanteil im Erdgaskraftstoff steigt auf 40% im Jahr 2040. Für Flüssiggas zeichnet sich zwar kein kommerziell relevantes biogenes Flüssiggasangebot ab, gleichwohl weist verstärkt importiertes Flüssiggas günstigere Treibhausgasbilanzen auf als bisher aus Raffinerieproduktion eingesetztes LPG.

den Verbrennungsmotoren schneller voran aber die kommerzielle Umsetzung technologischer Innovationen wird beim Verbrennungsmotor immer teurer. Der rasche Markteintritt alternativer, insbesondere elektrifizierter Antriebe verdrängt den (reinen) Verbrennungsmotor zunehmend vom Neuwagenmarkt.

Auf der anderen Seite können zusätzliche Lithium- und Platinvorkommen wirtschaftlich erschlossen werden. Die Leistung elektrischer Antriebe und Speicher wird schnell und deutlich gesteigert. Skaleneffekte führen zu sinkenden Produktionskosten für Elektro-Pkw. Hierdurch wird ein breiterer Markteintritt von Plug-in-Hybriden und rein batterieelektrischen Antrieben möglich. Durch Kostensenkung und Leistungssteigerung bei Brennstoffzelle und Wasserstoffspeichertechnik kann das Antriebsspektrum schließlich um Brennstoffzellenfahrzeuge ergänzt werden.

Andere alternative Antriebe wie Gasmotoren spielen hier kaum eine Rolle. Im Zuge der Pkw-Elektrifizierung verliert die Frage der Fahrzeugtechnischen Kompatibilität mit Biokraftstoffen ebenfalls an Bedeutung.

**Kraftstoffe:** Die Öl- und Gasvorkommen sind auch hier reichlich: Ihre Erschließung wird jedoch aufwändiger – was sich ungünstig auf Verfügbarkeit und relative Preise auswirkt. Die Entwicklung von Biokraftstoffen zweiter Generation kommt kaum voran. Biogene Kraftstoffe spielen als Ergänzung bzw. Substitut für Flüssigkraftstoffe auf einem Elektrifizierungspfad eine weniger bedeutendere Rolle. Ihr Anteil am Kraftstoffmix steigt bis 2040 nur noch leicht auf etwa 10 Volumenprozent an.

Fahrstrom steht zu günstigen Tarifen zur Verfügung, weil die Kosten der Energiewende im Stromsektor sinken. Zusätzlich erfolgt vermehrt die direkte Nutzung (gegebenenfalls bilanziell zugerechnet) überschüssiger und daher nahezu kostenfreier Strommengen aus erneuerbaren Energien. Später kommt die Erzeugung von Wasserstoff aus Power-to-Gas-Anlagen für die direkte Nutzung in Brennstoffzellenfahrzeugen hinzu.

Nachdem Umfeld und Rahmenbedingungen für mögliche unterschiedliche Zukunftspfade für Pkw-Antriebe qualitativ beschrieben worden sind, sollen im Folgenden mit Hilfe eines Pkw-Prognosemodells quantitative Trends und Zukunftsentwicklungen bei Antrieben, Kraftstoffen und Treibhausgasemissionen untersucht werden.

## SZENARIENMODELL: PKW-BESTAND, ENERGIE UND CO<sub>2</sub>-EMISSIONEN

### METHODIK UND VORGEHEN

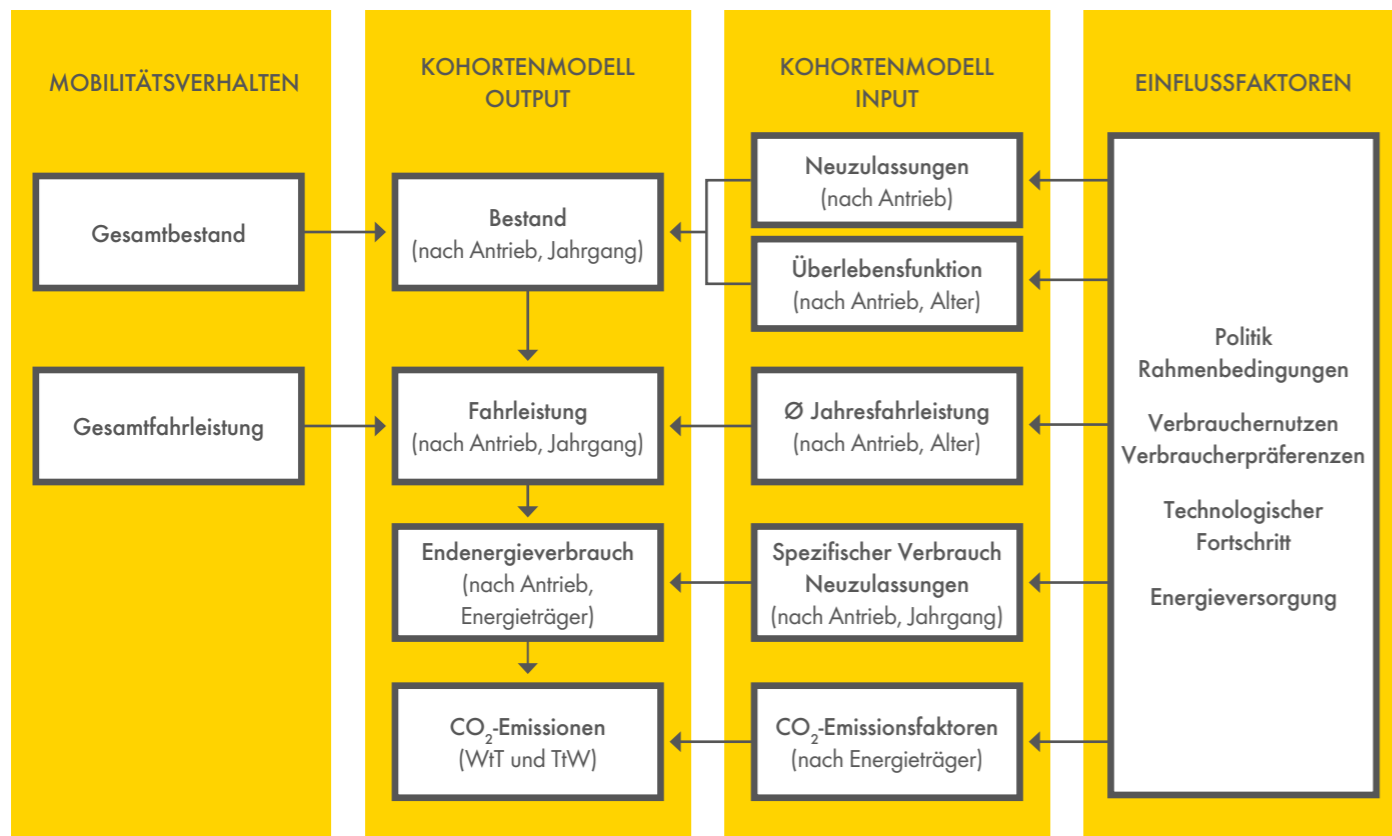
Im Folgenden wird beschrieben, wie sich die unterschiedlichen Szenariannahmen zunächst auf die Pkw-Neuzulassungen und wie sich diese weiter auf den Fahrzeugbestand auswirken. Im Zentrum des Interesses steht dabei zum einen die Entwicklung von Antriebsarten und Antriebs-effizienz bei den Neuzulassungen, zum anderen die Entwicklung im Pkw-Bestand. Zusammen mit den antriebs-spezifischen Pkw-Fahrleistungen können dann der Kraftstoff- bzw. Energieverbrauch und die damit verbundenen CO<sub>2</sub>-Emissionen der deutschen Pkw untersucht werden.

Eigenschaften und Nutzung der Pkw hängen stark vom Baujahr bzw. Alter der Fahrzeuge ab. Dabei wirken sich politische Rahmen-vorgaben, Verbraucherpräferenzen sowie technisch-ökonomische

Entwicklungen bei Antrieben und Kraftstoffen, welche sich in den Szenarien unterscheiden, meistens direkt auf die Neuzulassungen aus. Die Auswirkung auf das durchschnittliche Fahrzeug auf der Straße erfolgt indirekt und zeitlich verzögert.

Um modellmäßig und altersabhängige Eigenschaften der Fahr-zeuge abbilden zu können, wird der Bestand auf Basis der Neu-zulassungen in der Vergangenheit nachgebildet und mit der amt-lichen Pkw-Statistik abgeglichen. Das Pkw-Kohortenmodell bildet somit den Pkw-Bestand nach Antrieb und Baujahr (bzw. Alter) ab. Das folgende Modellschema veranschaulicht die Berechnungs-schritte vom Pkw-Bestand bis zu den CO<sub>2</sub>-Emissionen des deutschen Pkw-Verkehrs.

### 33/PKW-KOHORTENMODELL: VON DEN NEUZULASSUNGEN BIS ZU DEN CO<sub>2</sub>-EMISSIONEN



Da in der Pkw-Statistik keine Informationen zum Baujahr verfügbar sind, wird für die Unterteilung des Pkw-Bestandes in Kohorten das Jahr der ersten Zulassung verwendet, welches in engem Zusammenhang zum Baujahr steht. Die Bestands-Kohorten werden durch die Neuzulassungen und die Überlebensfunktion bestimmt. Letztere gibt an, wie der Bestand einer Kohorte sich mit der Zeit entwickelt – das heißt, wie viele Fahrzeuge eines Jahrgangs nach einer bestimmten Anzahl von

Jahren noch in Deutschland gemeldet sind. Die Überlebensfunktionen der Kohorten werden für die Vergangenheit aus der Pkw-Statistik (KBA 2014b) entwickelt und in die Zukunft fortgeschrieben.

Fahrleistungserhebungen zeigen (Infas/DLR 2010b; BASt 2004), dass mit zunehmendem Fahrzeugalter die durchschnittlichen Jahres-fahrleistungen deutlich abnehmen. Jüngere Fahrzeuge fahren deutlich mehr und haben

folglich größeren Einfluss auf die antriebs-spezifischen Gesamtfahrleistungen und den Kraftstoffverbrauch als ältere Jahrgänge. Über Annahmen zur Abhängigkeit der Jahres-fahrleistungen vom Alter können aus den Bestandskohorten schließlich auch Pkw-Fahr-leistungskohorten generiert werden.

Weiter erlaubt es die Differenzierung in Jahr-gangsklassen (Kohorten), den spezifischen Verbrauch der Neuzulassungen als Input

vorzugeben – das KBA veröffentlicht den mittleren Verbrauch der Neuzulassungen von Benzin- und Dieselfahrzeugen (KBA 2014c) – und den durchschnittlichen Verbrauch des Pkw-Bestandes im Modell zu berechnen. Die spezifischen Energieverbräuche der Pkw sind demnach vom Jahr der Neuzulassung und vom Antrieb abhängig; sie werden dann für einen Jahrgang bei Alterung konstant gehalten. Über die Fahrleistung der Pkw nach Antrieb und Jahrgang lässt sich der Energiever-brauch nach Energieträger berechnen und aus den absoluten Energieverbräuchen werden mit Hilfe von energieträgerspezifischen Treibhausgasfaktoren die direkten und indi-rekten CO<sub>2</sub>-Emissionen ermittelt.

### ENTWICKLUNG DER NEUZULASSUNGEN

Die Anzahl der Pkw-Neuzulassungen war in den vergangenen Jahren – nach Deckung des ostdeutschen Nachholbedarfs in den 1990er Jahren – relativ konstant. Seit dem Jahr 2000 schwanken die jährlichen Neu-zulassungen jeweils zwischen 2,9 und 3,5 Mio. Pkw. Einen Ausreißer bildet das Jahr 2009. In jenem Jahr wurden über 3,8 Mio. Neufahrzeuge zugelassen, denn im Gefolge der globalen Wirtschaftskrise wurde mit einer Umwelt- oder auch Abwrackprämie der Pkw-Absatz in Deutschland maßgeblich stimuliert. Im Folgejahr 2010 wurden aufgrund vorgezogener Pkw-Käufe dann unterdurch-schnittlich viele Fahrzeuge neu zugelassen. Die Pkw-Prämie hatte nicht nur Auswirkungen auf die Zahl der Pkw-Neuzulassungen, sondern auch trendverzerrende Effekte auf die Antriebs- und Segmentstruktur, das heißt, es wurden verstärkt kleinere Pkw mit Ottoantrieb neu zugelassen.

Im Trendszenario wird angenommen, dass die Neuzulassungen in Höhe von 3,0 Mio. Neufahrzeugen im Jahr 2015 auf 2,9 Mio. im Jahr 2040 leicht zurückgehen. Im Alternativszenario kommt es zu einer schnelleren Modernisierung der Flotte, welche durch eine höhere Anzahl an Neuzulassungen erreicht wird. Die Anzahl an Neuzulassungen im Alternativszenario beträgt konstant 3,3 Mio. Pkw pro Jahr. In beiden Szenarien wird damit gerechnet, dass alternative Antriebe in der Zukunft deutlich an Marktanteilen gewinnen.

Der Antriebsmix für Neuwagen leitet sich aus den Einflussfaktoren für Antriebe und Kraft-stoffe ab. Zu den wichtigsten Einflussfaktoren gehören auf der Angebotsseite politisch ge-setzte Rahmenbedingungen wie CO<sub>2</sub>-Grenz-wertvorgaben für Pkw und auf der Nach-frageseite Verbraucherpräferenzen. Dabei orientieren sich die Verbraucher bei ihren

Pkw-Mobilitätsentscheidungen am Verbra-uchernutzen, im Besonderen aber (auch) an den Autokosten der jeweiligen Antriebs-Kraft-stoff-Pkw-Konfigurationen. Während im Trend-szenario die heutigen Autokostenstrukturen annähernd beibehalten werden, ändern sie sich im Alternativszenario zugunsten von elek-trifizierten bzw. elektrischen Antrieben (ein-schließlich Brennstoffzellenfahrzeugen). Die Verschiebung bei den Autokosten-Strukturen führt zusammen mit veränderten Verbraucher-präferenzen bei Antrieben, Kraftstoffen und Pkw-Mobilität zu einer erhöhten Nachfrage nach alternativen Antrieben im Alternativ-szenario (im Vergleich zum Trendszenario).

Für den Antriebsmix der Pkw-Neuzulassun-gen spielen CO<sub>2</sub>-Grenzwertvorgaben eine zentrale Rolle. Heute (2013) liegen die durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen für neu-zugelassene Pkw in Deutschland bei 136 Gramm CO<sub>2</sub> pro Kilometer (g CO<sub>2</sub>/km) (KBA 2014 c)

Für 2015 fordert die EU-Richtlinie EG/443/-2009 für Neuzulassungen in Europa im Durchschnitt 130 g CO<sub>2</sub>/km. Die Vorgaben für die einzelnen Hersteller hängen dabei von der durchschnittlichen Fahrzeugmasse ab. Mit zunehmender mittlerer Fahrzeugmasse gilt für den Hersteller ein höherer Grenzwert. Da in Deutschland neu zugelassene Pkw schwerer sind als im EU-Durchschnitt, ist – auf nationale Ebene umgerechnet – ein etwas höherer CO<sub>2</sub>-Grenzwert als im europäischen Mittel erlaubt.

Über die weitere Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Grenz-werte herrschen unterschiedliche Vorstellun-gen (DLR 2013). Für die Neuzulassungen wurden die folgenden CO<sub>2</sub>-Grenzwertpfade bis 2040 zugrunde gelegt (Abbildung 34): Im Trendszenario müssen im Jahr 2040 72 g CO<sub>2</sub>/km und im Alternativszenario 50 g CO<sub>2</sub>/km erreicht werden.

Im Trendszenario (und auch in der Gasse-narett) sind die in Deutschland zugelassenen

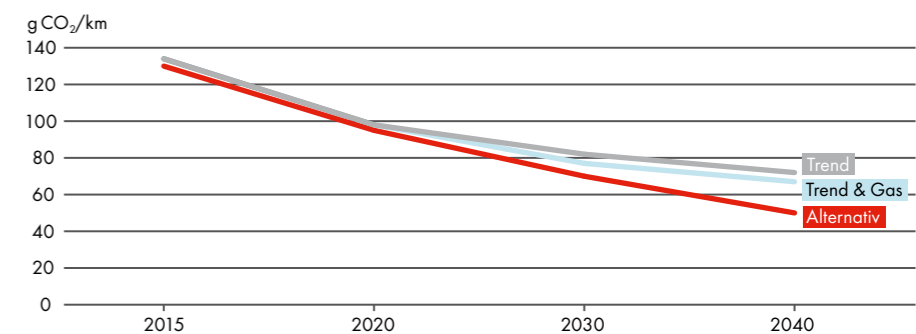
Neuwagen weiterhin etwas schwerer als der EU-Durchschnitt, woraus sich der leicht erhöhte CO<sub>2</sub>-Grenzwert gegenüber EU-Vor-gabe (70 bzw. 65 g CO<sub>2</sub>/km) ergibt; im Alternativszenario sinkt das Durchschnitts-gewicht der Neuzulassungen in Deutschland auf EU-Durchschnitt.

Um den Antriebsmix der Pkw-Neuzulassun-gen zu bestimmen, werden die CO<sub>2</sub>-Emis-sionen der jeweils neu zugelassenen Pkw pro Jahr modelliert. Die Modellierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen (g CO<sub>2</sub>/km) der Neuzulas-sungen erfolgt anhand eines repräsentativen Fahrzeugs. Dabei werden die Unterschiede zwischen den Antriebsarten bei den Wirkungsgraden und den Kraftstoffeigenschaften berücksichtigt. Eine Reduktion der spezifi-schen CO<sub>2</sub>-Emissionen aller Neuzulassun-gen wird durch Effizienzsteigerungen des Basis-Pkw (ein reiner Otto-Pkw) und vor allem durch eine Veränderung der Antriebsstruktur hin zu effizienteren bzw. emissionsärmeren Pkw-Antrieben hin erzielt. So erhöht sich etwa der Hybridanteil, während der Anteil des weniger effizienten Ottomotors sinkt, um so strengere Flottengrenzwerte zu erfüllen.

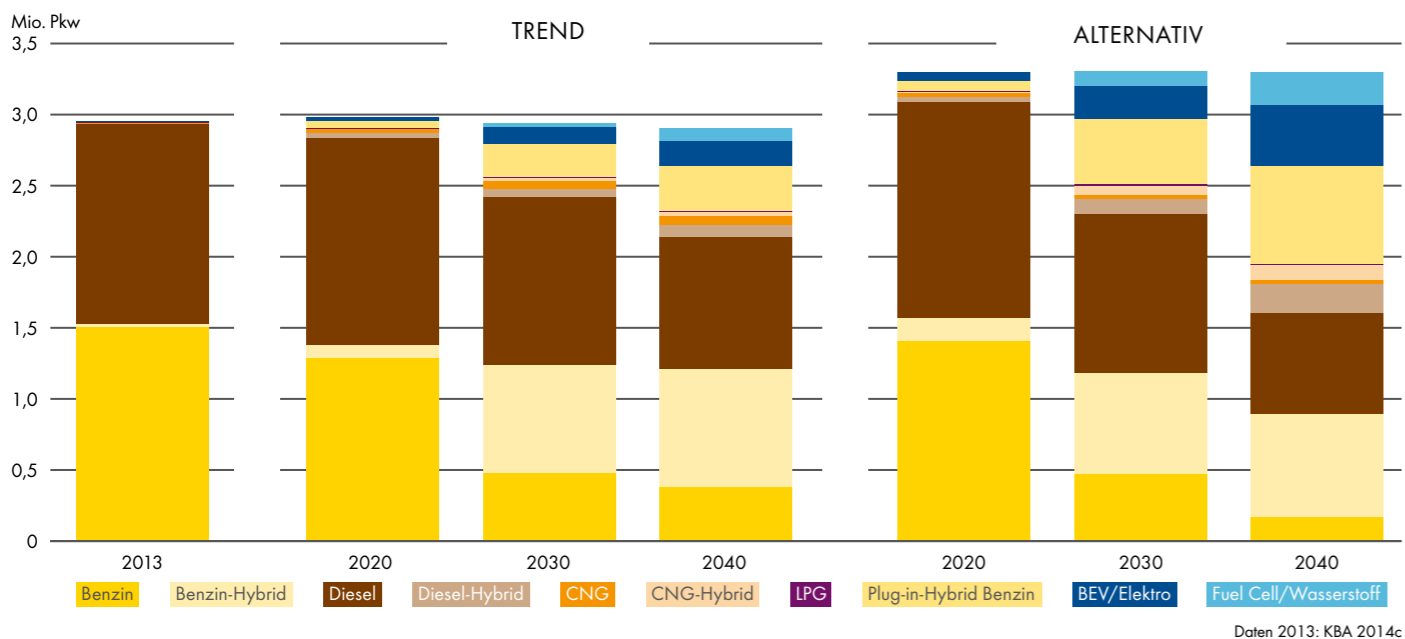
Die Antriebsarten sind nicht über alle Fahr-zeugklassen gleich verteilt: So sind im Klein- und Kleinstwagenbereich hauptsächlich Ottomotoren zu finden, während in der Ober-klasse und bei den Geländewagen der Die-selanteil sehr hoch ist. Das führt dazu, dass Fahrzeuge mit Ottomotoren im Mittel deut-lich leichter sind als Fahrzeuge mit Dieselmotoren. Somit müssen bei der Berechnung der CO<sub>2</sub>-Emissionen und des Kraftstoffverbrauchs der Neuzulassungen die unterschiedlichen antriebs-spezifischen Fahrzeuggewichte be-rücksichtigt werden.

Elektrische Fahranteile bei Plug-in-Hybriden und reinen Elektrofahrzeugen werden entsprechend EU-CO<sub>2</sub>-Grenzwert-Richtlinie EG/443/2009 für Pkw mit Null bewertet. Plug-in-Hybride werden ausschließlich in Kombination mit Ottomotor angenommen.

### 34/CO<sub>2</sub>-GRENZWERTPFADE FÜR NEUZULASSUNGEN



## 35/PKW-NEUZULASSUNGEN NACH ANTRIEBEN

**TREND**

Im Trendszenario wächst der Pkw-Dieselanteil – seinem langfristigen Aufwärtstrend folgend – zunächst (bis 2020) noch leicht weiter. Es kommt jedoch nicht mehr zu einer weiteren deutlichen Zunahme des Neuzulassungsanteils, da sich der Neuwagenmarkt bei rund 50% Dieselanteil allmählich einer Sättigungsgrenze nähert. Aufgrund immer strengerer Abgasanforderungen und technisch weiter entwickelter alternativer Antriebe sinkt der Dieselanteil bei den Neuzulassungen dann allmählich wieder. Im Jahr 2040 werden im Trendszenario 32% der Neuwagen einen Dieselmotor haben; das entspricht in etwa dem Neuwagenmarktanteil von Dieselantrieben im Zeitraum der Jahrtausendwende.

Getrieben durch strengere CO<sub>2</sub>-Grenzwerte gewinnen Pkw mit hybriden Antrieben ab 2020 markant an Neuzulassungsanteilen. Dabei wird vor allem der konventionelle Ottoantrieb durch einen Benzin-Hybridantrieb ersetzt, da der Benzin-Hybrid gegenwärtig das höchste Potenzial zur CO<sub>2</sub>-Minderung aufweist. Im Jahr 2030 wird angenommen, dass rund eine Mio. der insgesamt 2,9 Mio. neu zugelassenen Pkw mit einem hybriden Antrieb ausgestattet sind, wobei davon über 70% Otto-Hybrid-Pkw sind. Darunter erobert auch der Plug-in-Hybrid substantielle Marktanteile. Im Jahr 2040 werden rund 11% oder 320.000 Pkw-Neuzulassungen einen Plug-in-Hybrid-Antrieb haben. Beim batterieelektrischen Antrieb erfolgt im Trendszenario ein moderater Markteinstieg. Im Jahr 2020 werden rund 30.000 Pkw mit Elektromotor neu zugelassen, was einem Anteil von 1%

entspricht. Bis zum Jahr 2040 wird der Anteil von Elektrofahrzeugen bei den Neuzulassungen auf 6% steigen.

In Teilsegmenten werden auch Fahrzeuge mit Gasantrieb verstärkt neu zugelassen. Besonders CNG-Fahrzeuge bieten für Pkw-Hersteller eine Möglichkeit, ihre durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen zu reduzieren. Die Anzahl der Neuzulassungen von Fahrzeugen, die mit Erdgas betrieben werden, steigt von rund 8.000 Pkw im Jahr 2013 auf 87.000 Pkw im Jahr 2040 an, wobei rund 29.000 davon als Erdgas-Hybrid-Pkw neu zugelassen werden. Die Zahl der Flüssiggas-Neuzulassungen bleibt auf niedrigem Niveau, da in beiden Szenarien angenommen wird, dass Flüssiggas-Pkw eher Umrüstungen von Benzinfahrzeugen sind als Neuzulassungen. Von den etwa 67.000 Flüssiggas-Pkw, die jährlich neu in den Bestand kommen, werden über 85% umgerüstet. Dieses Verhältnis wird in Zukunft als konstant angenommen.

**ALTERNATIV**

Der konventionelle Pkw-Antrieb mit Otto- oder Dieselmotoren wird im Alternativszenario deutlich stärker durch alternative Antriebe substituiert. Bereits im Jahr 2020 erreichen alternative Antriebe (inkl. Hybride und Gas-Pkw) einen Anteil von 11% bei den Neuzulassungen. Bis im Jahr 2040 werden die konventionellen Verbrennungsmotoren weiter zurückgedrängt, so dass alternative Antriebe einen Neuzulassungsanteil von 73% ausmachen. Bis 2040 sind nur noch 5% der zugelassenen Pkw mit einem (reinen) Ottomotor und 22% mit einem Diesel-Antrieb

ausgerüstet. Unter Berücksichtigung der Hybridantriebe sind im Jahr 2040 jedoch fast 50% der Pkw mit einem Ottomotor ausgestattet. Dies ist vor allem auf die Entwicklung des Plug-in-Hybrids zurückzuführen, der im Alternativszenario auf 21% Neuzulassungsanteile kommt. Die Neuzulassungen von Diesel-Pkw sinken von 1,4 Mio. im Jahr 2013 (48%) auf rund 700.000 Fahrzeuge im Jahr 2040 (22%).

Die Hybridisierung fällt beim Dieselantrieb deutlich niedriger aus als beim Ottomotor, denn Diesel- sind ohnehin effizienter als Ottoantriebe; zudem ist Diesel- (einschließlich Abgasreinigung) aufwändiger als Ottotechnik.

Der Elektroantrieb mit batterieelektrischen Pkw und Plug-in-Hybriden wird im Alternativszenario im Jahr 2030 mit über 20% Marktanteil den Marktdurchbruch schaffen. Neuwagen mit batterieelektrischem Antrieb erreichen immerhin 13% der Neuzulassungen und damit mehr als doppelt so viele wie beim Trendszenario. Ab 2020 etablieren sich auch Fahrzeuge mit Brennstoffzelle im Neuwagenmarkt. Von niedriger Basis ausgehend gewinnen Brennstoffzellen-Pkw laufend Marktanteile: Im Jahr 2040 werden schließlich jährlich über 200.000 Brennstoffzellen-Pkw (7% der Neuzulassungen) verkauft. Damit werden wie im Trendszenario halb so viele Brennstoffzellenfahrzeuge wie batterieelektrische Fahrzeuge zugelassen. Bei den Gasantrieben ist die Entwicklung mit derjenigen vom Trendszenario vergleichbar. Lediglich die Hybridisierung der Erdgas-Pkw fällt leicht höher aus als im Trendszenario.

**FAHRZEUGALTER & LEBENSERWARTUNG**

Aus der Pkw-Bestandsprognose auf Basis demografischer sowie sozioökonomischer Leitgrößen ergibt sich der absolute Fahrzeugbestand bis 2040. Die Prognose des Pkw-Bestandes ist erforderlich, um das gewünschte Motorisierungs- und (Pkw)-Mobilitätsniveau zu erreichen. Das Pkw-Kohortenmodell errechnet den Fahrzeugbestand aus der Anzahl der Neuzulassungen und der Anzahl der Fahrzeugabmeldungen pro Jahr. Die zweite Größe ist maßgeblich durch die durchschnittliche Lebenserwartung der Fahrzeuge bestimmt. In Bezug auf das Lebensalter sind zwei Zahlen für die Charakterisierung des Pkw-Bestandes relevant: das Lebensalter (auch Lebensspanne), das Pkw durchschnittlich beim Ausscheiden aus dem Pkw-Bestand erreichen sowie das Durchschnittsalter des Pkw-Bestandes zu einem bestimmten Zeitpunkt. Das durchschnittliche Lebensalter endgültig stillgelegter Pkw wird für 2009 auf 13,2 Jahre geschätzt (KBA 2011a).

Das durchschnittliche Fahrzeugalter bezieht sich auf das mittlere Alter aller im Bestand befindlichen Fahrzeuge. Es hängt nicht nur von der Lebenserwartung, sondern auch von der Altersverteilung des Pkw-Bestands ab (vgl. Abbildung 36) und somit auch von der Anzahl der Neuzulassungen. Die meisten Pkw sind relativ jung. Am stärksten besetzt ist der Jahrgang 2009, was auf die hohen Neuzulassungen in jenem Jahr zurückzuführen ist. Auf der anderen Seite verweilen viele Pkw durchaus lange im Bestand. Nach 15 Jahren sind noch immer etwa die Hälfte der ursprünglich 1999 neu zugelassenen Pkw in Betrieb; mehr als ein Zehntel aller Pkw wird

**ENTWICKLUNG DES PKW-BESTANDS**

Der Bestand sowie auch die Fahrleistungen der Pkw werden insgesamt aus demografischen und sozioökonomischen Entwicklungen abgeleitet und über die alters- und geschlechtsspezifischen Motorisierungsgrade sowie die altersspezifischen Fahrleistungen bestimmt.

Von großem Interesse ist zunächst die Entwicklung der heutigen Hauptantriebe für Pkw – von Otto- und Dieselantrieben: Benzin-Pkw machen heute noch rund 70% am Pkw-Bestand aus; da die Benziner-Neuzulassungen seit Jahren schon unter den Bestandsanteilen liegen, ist die Benziner-Flotte heute überdurchschnittlich alt. Aufgrund dieser Altersstruktur wird die Benziner-Flotte in den nächsten Jahren deutlich schrumpfen. Die

mindestens 20 Jahre alt. Mit anderen Worten sind über 8 Mio. Pkw bzw. fast ein Fünftel des Pkw-Bestandes so genannte Youngtimer; das sind Pkw, die zwischen 15 und 30 Jahren alt sind.

Seit 2000 ist das durchschnittliche Fahrzeugalter von 6,9 auf 8,8 Jahre im Jahr 2014 kontinuierlich angestiegen und hat sich damit in nur eineinhalb Jahrzehnten um zwei Jahre erhöht. In einzelnen Hubraumklassen sind die Pkw durchschnittlich bereits über 10 Jahre alt; das gilt insbesondere für hubraumstarke Fahrzeuge (KBA 2014c).

**TREND**

In Anlehnung an die jüngere Vergangenheit steigt das durchschnittliche Lebensalter der Fahrzeuge im Trendszenario weiter an. Im Zeitverlauf werden Benzinfahrzeuge deutlich älter als diesel- und alternativbetriebene Fahrzeuge. Das durchschnittliche Fahrzeugalter steigt im Trendszenario auf 10,9 Jahre, bei Benzin-Pkw werden es dann über 14,2 Jahre sein. Einerseits werden Benzinfahrzeuge weniger stark genutzt als Diesel-Pkw, was einen positiven Einfluss auf die Lebenserwartung dieser Pkw hat. Andererseits haben reine Otto-Pkw zukünftig immer kleinere Anteile bei den Neuwagen. In der Folge gibt es auch immer weniger junge Benzin-Pkw. Dieser Alterungseffekt der Benzinflotte spiegelt sich in einem weiter ansteigenden durchschnittlichen Lebensalter wider.

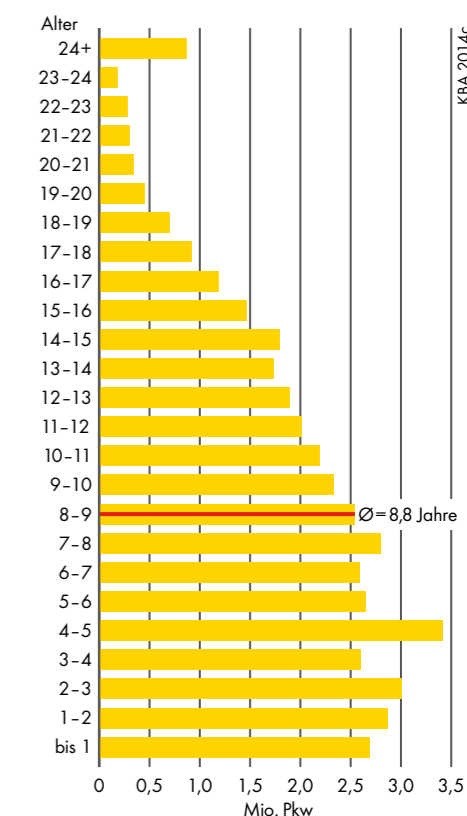
**ALTERNATIV**

Das Alternativszenario stellt gegenüber dem Trendszenario höhere Modernisierungsanforderungen an die Pkw-Flotte. Alte Pkw mit

deutlich jüngeren Diesel-Pkw verweilen demgegenüber noch länger im Bestand. Zudem liegen die Neuzulassungsanteile – zumindest bis etwa zum Jahr 2020 – weiterhin über den Bestandsanteilen, weshalb die Anzahl an Diesel-Pkw und auch deren durchschnittliches Lebensalter im Fahrzeugbestand weiter zunimmt. Ab etwa 2035 wird es szenariunabhängig mehr Diesel- als Benzin-Pkw im deutschen Fahrzeugbestand geben.

Da die alternativen Antriebe im Basisjahr 2013 noch kaum Anteile bei der Pkw-Flotte aufweisen, ist die Bestandsentwicklung der alternativ betriebenen Pkw hauptsächlich durch die Anzahl der Neuzulassungen – und weniger durch die Abmeldungen aus dem Fahrzeugbestand aufgrund hohen Alters – getrieben. In beiden Szenarien gewinnen

## 36/PKW-BESTAND AM 1.1.2014 NACH FAHRZEUGALTER



konventionellen Antrieben werden eher gegen neue mit effizienteren oder alternativen Antrieben ausgetauscht. Folglich ist die Anzahl an jährlichen Neuzulassungen höher. Das Durchschnittsalter der Pkw-Flotte bleibt niedriger als beim Trendszenario. Allerdings steigt das durchschnittliche Lebensalter bis 2020 auch im Alternativszenario noch leicht an; danach stabilisiert es sich jedoch bei 9,4 Jahren.

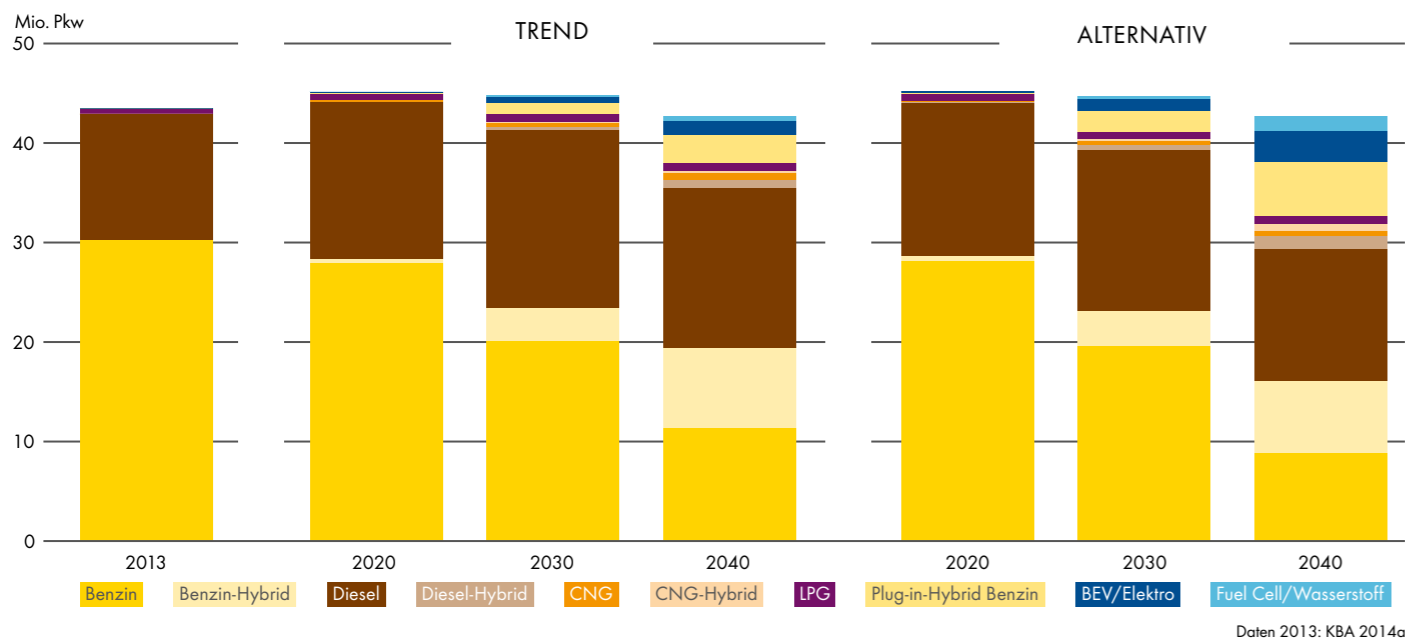
alternative Antriebe kontinuierlich Bestandsanteile, wobei sich in der kommenden Dekade vor allem der Benzin-Hybrid und in den 2030er Jahren auch der Plug-in-Hybrid durchsetzen wird.

**TREND**

Im Trendszenario sinkt der Bestand an reinen Benzin-Pkw von über 30 Mio. Pkw im Jahr 2013 auf unter 28 Mio. im Jahr 2020 und auf rund 11 Mio. im Jahr 2040 signifikant ab. Ersetzt werden die Benzinfahrzeuge hauptsächlich durch Benzin-Hybrid-Pkw. Gemäß der Trendprognose werden im Jahr 2030 knapp 18 Mio. Diesel-Pkw im deutschen Fahrzeugbestand sein, danach geht der Bestand an reinen Diesel-Pkw langsam auf rund 16 Mio. im Jahr 2040 zurück. Immerhin knapp 14 Mio. Pkw (32%) haben



37/PKW-BESTAND NACH ANTRIEBEN



im Trendszenario 2040 einen elektrischen oder einen hybriden Antriebsstrang. Die Zahl der Benzinhybride steigt im Jahr 2040 auf 8 Mio., was einem Bestandsanteil von 19% entspricht. Der Plug-in-Hybrid kommt auf rund 3 Mio. Pkw (6,5%) im Jahr 2040. Aufgrund des langsamen Markthochlaufs erreicht das Elektroauto einen Bestandsanteil von gut 3%. Die Millionengrenze bei Elektro-Pkw wird im Trendszenario erst im Jahr 2035 erreicht.

**ALTERNATIV**

Im Gegensatz zum Trendszenario werden durch die beschleunigte Modernisierung der Pkw-Flotte konventionell betriebene Otto- und Diesel-Pkw beim Alternativszenario schneller durch effizientere bzw. alternative Antriebe ersetzt. Der Bestand an Otto-Pkw geht - altersstrukturbedingt und wegen der

niedrigeren Neuzulassungsanteile - ab 2020 deutlich zurück. Statt der einst über 30 Mio. Otto-Pkw wird es in 2040 weniger als 9 Mio. (21%) Ottofahrzeuge geben. Wie im Trend- steigt auch im Alternativszenario der Dieselbestand mittelfristig an, ab 2030 kommt es dann jedoch auch beim Diesel-Pkw zu sinkenden Bestandszahlen. Im Alternativszenario steigt der Dieselbestand weniger stark an und vermindert sich gegenüber dem Trendszenario im Jahr 2040 auch deutlich stärker auf rund 13 Mio. Pkw.

Die alternativen Antriebe erreichen im Alternativszenario eine höhere Marktdurchdringung. Im Jahr 2040 wird fast die Hälfte der Pkw im Bestand mit einem alternativen Antrieb ausgestattet sein. Speziell der Elektro- und Plug-in-Hybrid-Antrieb wird im

Alternativszenario stärker nachgefragt als beim Trendszenario. Im Alternativszenario ist der Plug-in-Hybrid im Jahr 2040 mit rund 5,5 Mio. Pkw hinter dem Benzin-Hybrid der am zweitstärksten vertretene alternative Antrieb im deutschen Pkw-Bestand. Dies entspricht einem Flottenanteil von knapp 13%.

Auch die Elektrofahrzeuge sind mit gut 3 Mio. Pkw (7%) im Jahr 2040 beim Alternativszenario deutlich stärker vertreten als beim Trendszenario. Eine Million Elektrofahrzeuge werden im Alternativszenario im Jahr 2029 erreicht. Neben einer teilweisen Dieselhybridisierung wird schließlich auch noch eine kleine Wasserstoffflotte aufgebaut. Beide Antriebe kommen auf ca. 1,5 Mio. Pkw oder einem Bestandsanteil von rund 3% im Jahr 2040.

**FAHRLEISTUNG NACH ANTRIEBEN**

Um den Kraftstoff- bzw. Energieverbrauch nach Energieträgern zu berechnen, muss zu jedem Fahrzeugantrieb die durchschnittliche Jahresfahrleistung ermittelt und prognostiziert werden. Gemittelt über alle Pkw lag die Jahresfahrleistung 2012 bei 14.000 km, Benzinfahrzeuge führen durchschnittlich 11.000 km pro Jahr und Diesel-Pkw mit 21.000 km jährlich deutlich mehr (DIW 2013).

Otto-Pkw waren und sind seit langer Zeit der Standardantrieb für private Pkw-Halter. Diesel-Pkw sind im Vergleich zu Otto-Pkw teurer. Die steuerliche Begünstigung des Dieselmotors sowie der höhere Wirkungsgrad von Diesel- gegenüber Ottomotoren führen dazu, dass Dieselfahrzeuge eher bei Vielfahrern

eingesetzt werden und somit die durchschnittlichen Jahresfahrleistungen höher liegen als bei Benzinfahrzeugen. Die Entwicklung der durchschnittlichen Pkw-Jahresfahrleistungen über die Zeit war insgesamt in den letzten Jahren relativ konstant. Betrachtet man jedoch Benzin- und Diesel-Pkw für sich, sinken jeweils die durchschnittlichen Jahresfahrleistungen. Ausschlaggebend dafür sind die mittelgroßen Pkw mit durchschnittlicher Jahresfahrleistung zwischen 12.000 und 20.000 km. Diese kommen vermehrt als Dieselantrieb in den Bestand und tragen somit zu einer geringeren mittleren Jahresfahrleistung bei Diesel-Pkw bei. Auch der Fahrleistungsschnitt der Benzinflotte wird dadurch verringert, da Benzin-Pkw mit relativ hohen Fahrleistungen wegfallen. Zu den durchschnittlichen antriebspezifischen

Fahrleistungen der alternativ betriebenen Pkw liegen kaum repräsentative empirische Erhebungen vor; aus den ebenfalls geschätzten Kraftstoffverbräuchen kann auch nicht ohne weiteres auf Durchschnittsfahrleistungen geschlossen werden. Zur Abschätzung antriebspezifischer Fahrleistungen muss daher auf Plausibilitätsannahmen zurückgegriffen werden.

Bei fast allen alternativen Antrieben sind - ähnlich wie bei Diesel-Pkw - die Kraftstoff- bzw. Energiekosten geringer, dafür aber die Anschaffungskosten höher, was tendenziell dazu führt, dass sich diese Antriebe erst ab einer gewissen jährlichen Fahrleistung rechnen. Eine stark ökonomisch ausgerichtete Pkw-Haltung dürfte am ehesten im

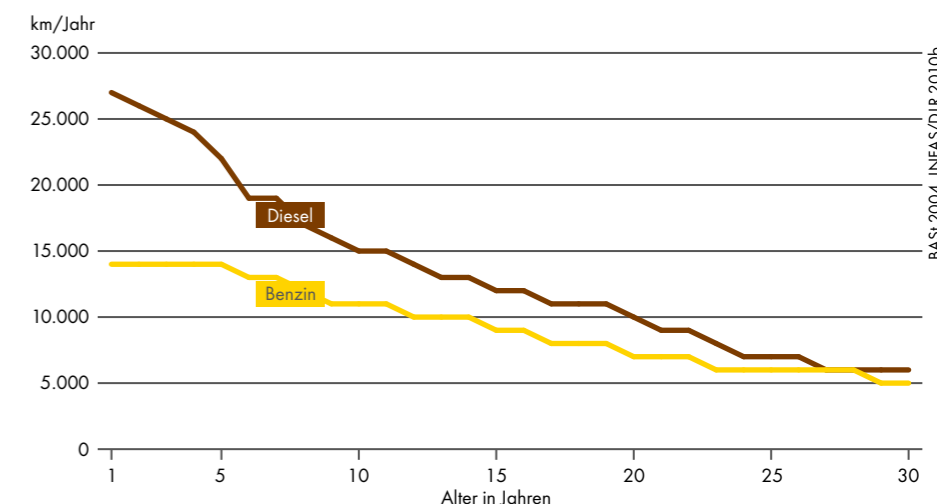
Nutzersegment der Vielfahrer anzutreffen sein.

Die Anschaffung von Gasfahrzeugen ist etwas teurer als die von Referenzbenzinern; gegebenenfalls ist bei Autogas eine Fahrzeugumrüstung zu finanzieren. Die Betriebskosten sind jedoch deutlich niedriger als bei Otto- und Diesel-Pkw. Folglich kann davon ausgegangen werden, dass die durchschnittliche Jahresfahrleistung bei Gasfahrzeugen überdurchschnittlich hoch ist. Für die Fahrleistungsberechnung werden bei Gasantrieben deshalb dieselben überdurchschnittlichen Fahrleistungen wie bei Diesel-Pkw angenommen.

Hybridfahrzeuge sind technikbedingt teurer als konventionelle Benzinern. Gerade Benzin-Hybride dürften aber quasi als neuer Otto-Standard vorzugsweise reine Otto-Pkw ersetzen, so dass hier kein zusätzlicher Leistungsbedarf entsteht. Aus denselben Gründen dürften Diesel-Hybride die gleiche jährliche Fahrleistung aufweisen wie der Basis-Diesel-Pkw. Plug-in-Hybrid-Pkw ersetzen ebenfalls vorläufig hauptsächlich Benzinern. Zudem weisen Plug-in-Pkw weiterhin noch Einschränkungen auf, die sie für Vielfahrer weniger geeignet erscheinen lassen. Folglich werden für Plug-in-Hybride ebenfalls die mittleren Fahrleistungen der Basis-Benziner unterstellt.

Bei Elektrofahrzeugen ist zumindest mittelfristig nicht damit zu rechnen, dass überdurchschnittliche Jahresfahrleistungen erzielt werden, obwohl sich ein Elektrofahrzeug aus finanziellen Gründen erst bei deutlich

38/DURCHSCHNITTICHE JAHRESFAHRLEISTUNG NACH ALTER



überdurchschnittlichen Fahrleistungen lohnt. Aufgrund eingeschränkter Reichweiten kommt dieser Antrieb tendenziell bei kurzen Distanzen in urbanen Gebieten zum Einsatz und somit wird die Jahresfahrleistung von Elektrofahrzeugen eher geringer ausfallen. Für die Zukunft ist jedoch davon auszugehen, dass die Reichweiten von batterieelektrischen Pkw zunehmen werden und dann auch die jährlichen Fahrleistungen steigen. Im Trendszenario steigt die durchschnittliche Fahrleistung von Elektrofahrzeugen auf 8.600 km und im Alternativszenario wird bei E-Pkw eine durchschnittliche Pkw-Jahresfahrleistung von 10.800 km im Jahr 2040 angenommen.

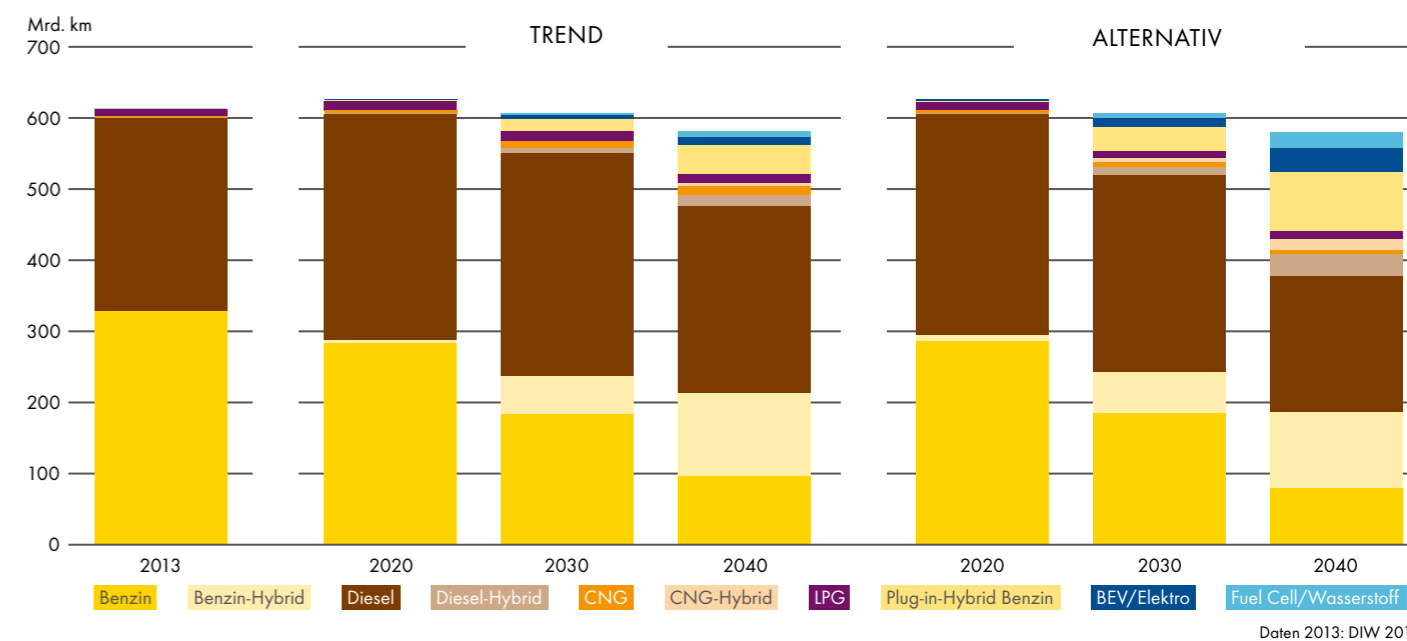
Da die Gesamtfahrleistungen der Pkw in beiden Szenarien identisch sind, sich aber die Zusammensetzung im Pkw-Bestand nach Antriebsarten in den Szenarien unterscheidet,

ergeben sich je nach Szenario unterschiedliche durchschnittliche Jahresfahrleistungen nach Antriebsarten. Die Unterschiede bei den mittleren Jahresfahrleistungen nach Antriebsarten in den Szenarien sind jedoch gering.

Außer vom Antrieb hängt die Jahresfahrleistung auch vom Alter der Fahrzeuge ab (bast 2004; Infas/DLR 2010b). Die durchschnittliche Jahresfahrleistung nimmt mit zunehmendem Fahrzeugalter deutlich ab und liegt bei Diesel-Pkw speziell in den ersten Jahren viel höher als bei Benzinern (Abbildung 38). Zur Berechnung der Fahrleistungskohorten im Modell wird die Fahrleistung in Abhängigkeit des Alters und der Antriebsart berücksichtigt.

Auf der Grundlage oben beschriebenen Annahmen zur Jahresfahrleistung nach Fahrzeugalter und -antrieb wird die Gesamtfahr-

39/PKW-FAHRLEISTUNGEN NACH ANTRIEBEN



leistung nach Antrieb im Kohortenmodell berechnet. Hierfür wird der Pkw-Bestand nach Alter und Antrieb mit der Jahresfahrleistung nach Alter und Antrieb multipliziert (Abbildung 39).

Im **Trendszenario** machen die Benzin-Pkw im Jahr 2040 noch gut 26 % des Bestands aus, die Fahrleistung der Otto-Pkw hingegen kommt lediglich auf 17 % der Gesamtfahrleistung. Dies ist zum einen auf die unterdurchschnittlichen mittleren Fahrleistungen sowie auf das steigende mittlere Fahrzeugalter der Benzin-Flotte zurückzuführen. Bei den Diesel-Pkw sind die Fahrleistungsanteile höher als die Bestandsanteile. Im Trendszenario werden im Jahr 2040 rund 260 Mrd. km oder rund 45 % der Pkw-Fahrleistung mit Diesel-Pkw zurückgelegt, dem steht ein Bestandsanteil von 38 % gegenüber. In Bezug auf die Fahrleistung haben konventionelle Antriebe, das heißt reine Otto- und Diesel-Pkw, im Trendszenario einen Anteil von

62 %; inklusive der hybridisierten Otto- und Diesel-Pkw kommen sie auf einen Anteil von 85 % im Jahr 2040 gegenüber einem Fahrleistungsanteil von 98 % im Jahr 2012. Die restlichen 15 % teilen die Plug-in-Hybride (7 %), die Gas-Pkw (5 %), die Elektro-Pkw (2 %) und die Wasserstoff-Pkw (1 %) im Jahr 2040 unter sich auf.

Im **Alternativszenario** erbringen die alternativen Antriebe eine Fahrleistung von 172 Mrd. Kilometern im Prognosejahr 2040, dies entspricht einem Anteil von 30 % (doppelt so viel wie im Trendszenario). Inklusive den konventionellen Hybriden (Benzin-Hybrid und Diesel-Hybrid) kommen die alternativen Antriebe sogar auf einen Fahrleistungsanteil von über 53 % im Jahr 2040. Sowohl im Bestand wie auch bei den Fahrleistungen machen die Gas-Pkw weiterhin kleine Anteile aus. CNG-Pkw inkl. CNG-Hybrid kommen im Alternativszenario auf 4 % der Pkw-Fahrleistung im Jahr 2040. Bei Flüssiggas-Pkw sind

die Fahrleistungsanteile mit rund 2 % noch etwas tiefer.

Die Fahrleistung mit elektrisch betriebenen Pkw (Plug-in-Hybride, Elektro-Pkw und Brennstoffzellenfahrzeuge) nehmen in beiden Szenarien kontinuierlich zu. Beim Alternativszenario ist der Bestand an elektrisch betriebenen Pkw größer und zudem werden höhere durchschnittliche Jahresfahrleistungen bei batterieelektrischen Fahrzeugen angenommen – dies führt zu höheren Fahrleistungsanteilen im Alternativszenario gegenüber dem Trend.

Beim Trendszenario sind es rund 10 % und beim Alternativszenario 24 % der Fahrleistung, die mit elektrisch betriebenen Pkw zurückgelegt werden im Jahr 2040. Zusammen mit den spezifischen Verbräuchen bilden die Fahrleistungen nach Antrieb die Grundlage zur Berechnung der Energieverbräuche und der CO<sub>2</sub>-Emissionen der Pkw.

## ENERGIE- UND KRAFTSTOFFVERBRAUCH

Ausgehend von den spezifischen Energie- und Kraftstoffverbräuchen der neu zugelassenen Pkw werden mit dem Kohortenmodell die spezifischen Verbräuche des Pkw-Bestandes und die absoluten Kraftstoff- bzw. Energieverbräuche nach Energieträger berechnet. Hinsichtlich Kraftstoff- bzw. Energieverbrauch wird dabei ausschließlich der Endenergieverbrauch betrachtet, auch wenn grundsätzlich nur der Begriff Energieverbrauch verwendet wird.

### Spezifischer Energie- und Kraftstoffverbrauch der Neuzulassungen

Beim spezifischen Verbrauch ist zwischen Normverbrauch und realem Kraftstoffverbrauch zu unterscheiden. Fahrzeughersteller sind verpflichtet, den Normverbrauch für Neufahrzeuge anzugeben. Im Jahr 2013 lag er im deutschen Mittel für Otto-Pkw bei 5,8 Liter pro 100 km und für Diesel-Pkw bei 5,2 Liter (KBA 2014c). Normangaben werden unter genau definierten Bedingungen – im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) – auf dem Rollenprüfstand zusammen mit den spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen ermittelt. Da ein Liter Diesel und ein Liter Benzin unterschiedlich viel Energie enthält, werden spezifische Verbräuche im Folgenden für eine bessere Vergleichbarkeit in Liter Benzin-Äquivalent<sup>2)</sup> pro 100 km angegeben. Der spezifi-

sche Normverbrauch von neu zugelassenen Diesel-Pkw betrug im Jahr 2013 aufgrund der gut 10 % höheren Energiedichte von Diesel 5,9 Liter Benzin-Äquivalent (l<sub>BÄ</sub>) pro 100 km.

Der tatsächliche Kraftstoffverbrauch hängt im Einzelfall immer auch von den jeweiligen Einsatzbedingungen und der Fahrweise des Fahrers ab und kann dabei höher oder niedriger ausfallen als der Normverbrauch. Im Mittel fällt der reale Verbrauch deutlich höher aus. Die Realverbräuche für Fahrzeuge mit Erstzulassungsjahr 2000 lagen im Schnitt 7 % über dem NEFZ-Verbrauch, bis zum Erstzulassungsjahr 2012 stieg die Abweichung auf 25 % (ICCT 2013).

Mittel- bis langfristig ist davon auszugehen, dass anstelle des NEFZ stärker an reale Verbrauchszyklen angepasst wird, so dass die Abweichung ab Neuzulassungsjahrgang 2020 dann auf 20 % sinkt. Diese Abweichungen zwischen Norm- und Realverbrauch werden für alle Verbrennungsmotoren identisch angenommen.

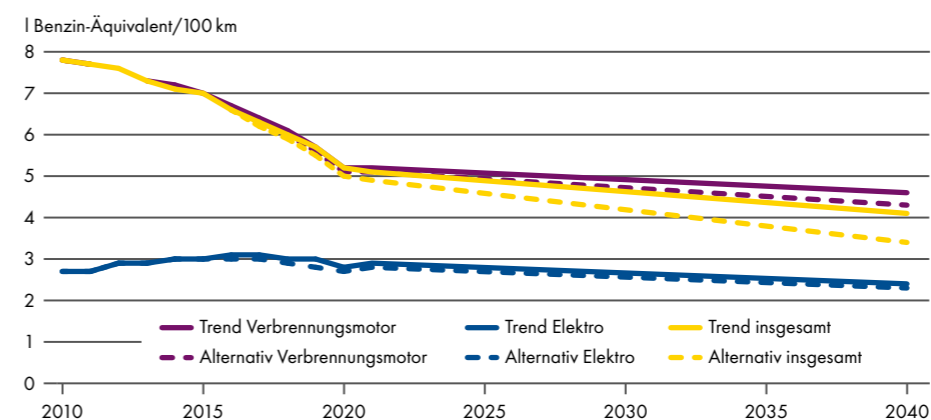
Für Elektrofahrzeuge liegen aufgrund der geringen Verbreitung wenige Analysen über die Abweichungen zwischen Norm- und Realverbräuchen vor. Wie bei konventionellen Antrieben ist davon auszugehen, dass der reale Fahrbetrieb im Mittel auch hier gegenüber dem Testzyklus eine höhere mittlere Leistung erfordert und damit zu einem höheren Energieverbrauch führt. Aufgrund des effizienteren

Antriebs haben elektrische Nebenverbraucher insbesondere Heizung und Klimatisierung beim Elektro-Pkw einen höheren Anteil am Gesamtenergieverbrauch. Auch wird der Verbrauch stark von den klimatischen Bedingungen beeinflusst. Untersuchungsergebnisse zu den Abweichungen zwischen NEFZ- und Realverbrauch bei Elektrofahrzeugen weisen sehr große Spanneiten auf (EMPA 2010; Frischknecht 2012); es besteht jedoch Einigkeit, dass es im Praxisbetrieb zu einem signifikanten Mehrverbrauch kommt.

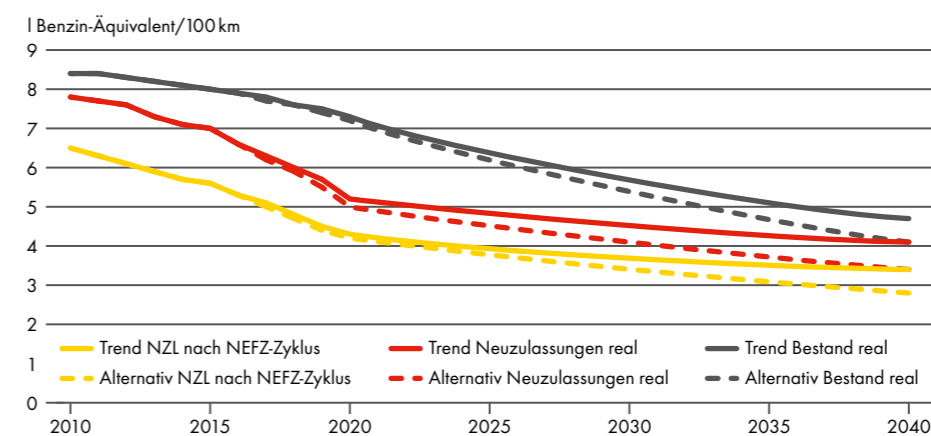
Deshalb wird in den Berechnungen bei Elektrofahrzeugen ein Aufschlag für den realen Kraftstoffverbrauch in Höhe von 50 % zum NEFZ-Verbrauch vorgenommen. Neben den batterieelektrischen Fahrzeugen wird der höhere Aufschlag auch auf die elektrischen Fahrleistungsanteile der Plug-in-Hybride angewendet. Diese machen im Jahr 2012 60 % der Plug-in-Gesamtfahrleistung aus und steigen im Trendszenario bis im Jahr 2040 auf 75 % und im Alternativszenario auf 90 %.

Im Jahr 2013 lag der durchschnittliche spezifische Realverbrauch der Neuzulassungsflotte nach den Annahmen zum Mehrverbrauch gegenüber Normverbrauch bei 7,3 Liter Benzin-Äquivalent pro 100 km. Getrieben durch technologischen Fortschritt und die verschärften CO<sub>2</sub>-Grenzwerte für Pkw-Hersteller sinken die spezifischen Realverbräuche der Neuzulassungen im Trendszenario bis 2040 auf 4,1 Liter Benzin-Äquivalent/100 km und damit

## 40/SPEZIFISCHER REALVERBRAUCH DER NEUZULASSUNGEN NACH ANTRIEBSGRUPPEN



## 41/VERGLEICH DER SPEZIFISCHEN VERBRÄUCHE DER NEUZULASSUNGEN UND DES FAHRZEUGBESTANDS



um insgesamt 44 % gegenüber dem Ausgangswert (Abbildung 40).

Besonders starke Effizienzfortschritte sind wegen der CO<sub>2</sub>-Grenzwertvorgaben bis 2020 erforderlich und werden primär durch Optimierung der konventionellen Antriebe erreicht. Nach 2020 werden weitere Effizienzfortschritte bei verbrennungsmotorischen Pkw-Antrieben zunehmend durch Elektrifizierung und Hybridisierung erreicht. Im Alternativszenario kommt es zu einer stärkeren Substitution von Otto- und Diesel-Pkw durch deutlich effizientere Elektroantriebe, zu denen batterieelektrische, Plug-in-Hybride und Brennstoffzellenfahrzeuge zählen. Im Alternativszenario sinkt der spezifische Realverbrauch im Durchschnitt über alle Antriebe auf 3,4 l<sub>BÄ</sub>/100 km und sinkt damit gegenüber dem Ausgangsniveau in 2013 um 53 %.

### Spezifischer Energie- und Kraftstoffverbrauch des Bestands

Das Pkw-Kohortenmodell bildet Pkw-Bestand und Pkw-Fahrleistung nach Antrieb und Jahr der Erstzulassung ab. Der spezifische Kraftstoff- bzw. Energieverbrauch ist vom

Antrieb und dem Jahr der Zulassung des Pkw abhängig. Für jeden Antrieb wird der mittlere spezifische Verbrauch des Bestands durch Mittelung der spezifischen Verbräuche über alle Zulassungsjahre berechnet, wobei nach der jeweiligen Fahrleistung gewichtet wird. Da der spezifische Verbrauch der Neuzulassungen mit der Zeit abnimmt, reduziert sich auch der Verbrauch der Bestandsfahrzeuge. Die Entwicklung ist allerdings verzögert, da der Bestand auch aus älteren Fahrzeugen besteht. Somit entsteht eine Abhängigkeit des spezifischen Verbrauchs des Bestandes vom Alter der Fahrzeuge. Je älter die Fahrzeuge, desto höher ist der spezifische Bestandsverbrauch – wenn der Kraftstoffverbrauch bei den Neuzulassungen weiter sinkt.

Der mit Hilfe der Mehrverbrauchsfaktoren ermittelte mittlere spezifische Verbrauch des Pkw-Bestands betrug 2013 8,2 l<sub>BÄ</sub>/100 km und sinkt im Trendszenario auf 4,7 (42 %) und im Alternativszenario auf 4,1 l<sub>BÄ</sub>/100 km (-49 %). In Abbildung 41 ist der mittlere spezifische Verbrauch des Bestandes dem mittleren spezifischen Verbrauch der Neuzulassungen real und nach Testzyklus für beide

Szenarien gegenübergestellt. Die starke Absenkung der realen spezifischen Verbräuche bis 2020 wirkt für den Bestand zeitverzögert, so dass zwischenzeitlich der Unterschied zwischen den beiden Größen wächst. Mit einer flacheren Effizienzentwicklung nach 2020 wird der Unterschied zwischen Bestands- und Neuzulassungsverbrauch nach und nach wieder reduziert.

### Gesamter Energie- und Kraftstoffverbrauch der Pkw nach Energieträger

Für den Inländerverbrauch ergeben sich aus den spezifischen Normverbräuchen der Neuzulassungen, Untersuchungen zu deren Abweichung vom Realverbrauch sowie den Annahmen zur Fahrleistung nach Alter und Antrieb für Pkw folgende Energieverbrauchsdaten: Deutsche Pkw verbrauchten im Jahr 2013 rund 50 Mrd. l<sub>BÄ</sub> oder 1.590 PJ Energie. Ottokraftstoffe hatten einen Anteil von 55 %, Dieseldieselkraftstoffe von 43 % am Inländerverbrauch. Daneben wurde etwa 1,5 % Flüssig- und Erdgas getankt. In beiden Szenarien werden bis 2040 deutliche Kraftstoff- bzw. Energieeinsparungen erzielt.

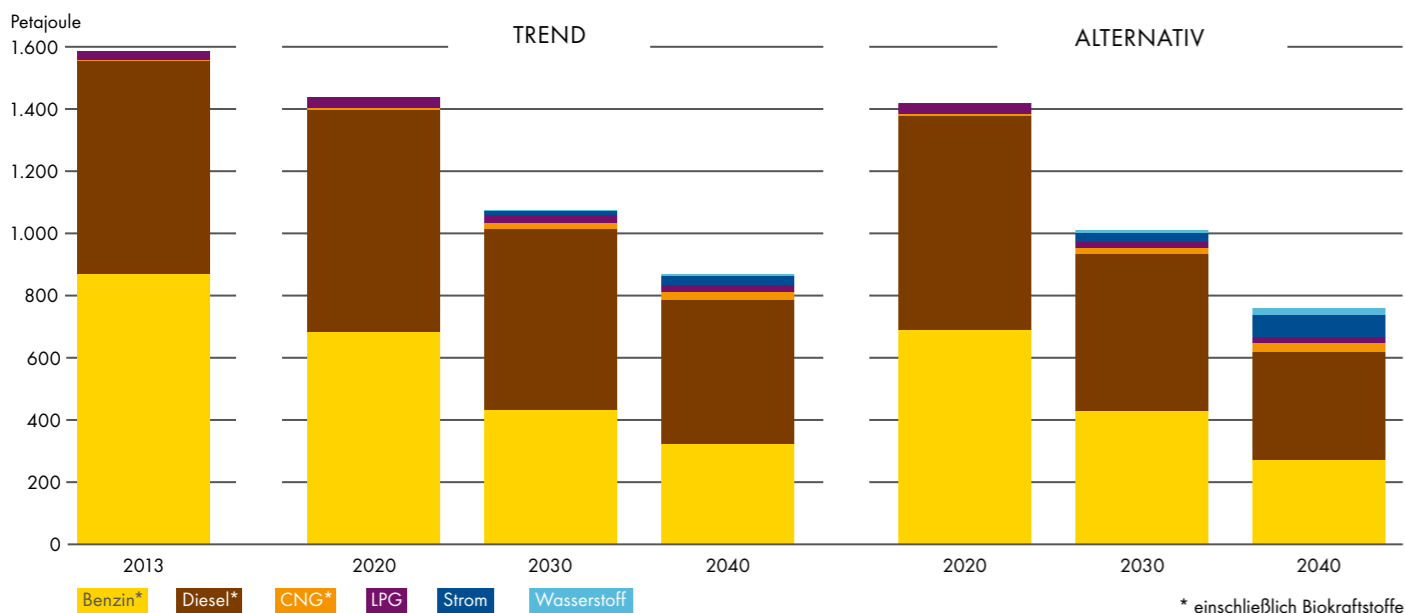
Im Trendszenario geht der Energieverbrauch (Inländerverbrauch) um 45 % auf 27 Mrd. l<sub>BÄ</sub> bzw. 868 PJ Energie zurück, im Alternativszenario wird er mehr als halbiert, und zwar auf dann nur noch 24 Mrd. l<sub>BÄ</sub> bzw. 759 PJ Energie.

Auch im Jahr 2040 werden im Pkw-Bereich hauptsächlich flüssige Otto- und Dieseldieselkraftstoffe eingesetzt: im Trend sind 86 % und im Alternativszenario immerhin noch 80 % der verbrauchten Energie Flüssigkraftstoffe. Innerhalb der Flüssigkraftstoffe setzt sich die Verschiebung von Otto- zu Dieseldieselkraftstoffen weiter fort. Verbrauchen Pkw heute (2013) noch 30 % mehr Otto- wie Dieseldieselkraftstoffe wird es 2020 schon genauso viel Diesel- wie Ottokraftstoff sein. Danach schwächt sich das Verdieselungstempo des Kraftstoffmixes allmählich ab. 2040 liegt das Verhältnis von Otto- zu Dieseldieselkraftstoff dann bei gut 40 zu knapp 60. Hauptursache für den anhaltenden Trend zum Dieseldieselkraftstoff ist, dass der heute relativ alte Bestand reiner Otto-Pkw zugunsten sparsamerer Otto-Hybride und fahrleistungsstarker Dieseldiesel-Pkw zurückgeht.

Die wichtigsten Alternativkraftstoffe sind im Trendszenario Otto- und Dieseldieselkraftstoffen beigemischte Biokraftstoffe, die in den jeweils ausgewiesenen Otto- und Dieseldieselkraftstoffen enthalten sind. Die Anteile biogener Kraftstoffe an den Flüssigkraftstoffen erhöhen sich von etwa 6 Volumenprozent 2012

2) Zusätzlich hängt der Energieinhalt pro Liter auch von der Beimischung von Biokraftstoffen ab und variiert damit in der Zeit. Angaben in Liter Benzin-Äquivalent (l<sub>BÄ</sub>) beziehen sich auf die mittleren Kraftstoffigenschaften 2012.

42/PKW-KRAFTSTOFF- UND ENERGIEVERBRAUCH NACH ENERGIETRÄGER



auf 20 Volumenprozent im Jahr 2040, was etwa einer Steigerung von 2,1 Mrd. Liter Benzin-Äquivalent (oder 66 PJ) auf 3,3 Mrd. Liter Benzin-Äquivalent (106 PJ) entspricht.

Im Alternativszenario entwickelt sich elektrische Energie Ende der 2030er Jahre zum wichtigsten alternativen Energieträger. Ursache hierfür sind steigende Anteile von elektrischen Antrieben sowie von elektrischen

Plug-in-Fahrleistungen. Der Fahrstromverbrauch steigt im Alternativszenario auf 71 PJ an, das sind nahezu 9% des gesamten Energieverbrauchs des motorisierten Individualverkehrs in 2040 und könnten fast 20% des Stromverbrauchs privater Haushalte sein (Prognos/EWI/GWS 2014). Aufgrund des höheren Wirkungsgrades elektrischer Antriebe können mit 10% des verkehrsbedingten Energieverbrauchs rund 20% der Pkw

hauptsächlich bzw. vollständig mit Antriebsenergie versorgt werden.

Alle anderen alternativen Kraftstoffoptionen kommen in beiden Szenarien jeweils nicht über einen Anteil von 5% im Kraftstoffmix. Das gilt auch für Biokraftstoffe, die trotz steigender Beimischung von 2,1 Mrd. Litern Benzin-Äquivalent (66 PJ) auf 1,4 Mrd. Liter Benzin-Äquivalent (44 PJ) sinken.

CO<sub>2</sub>-EMISSIONEN

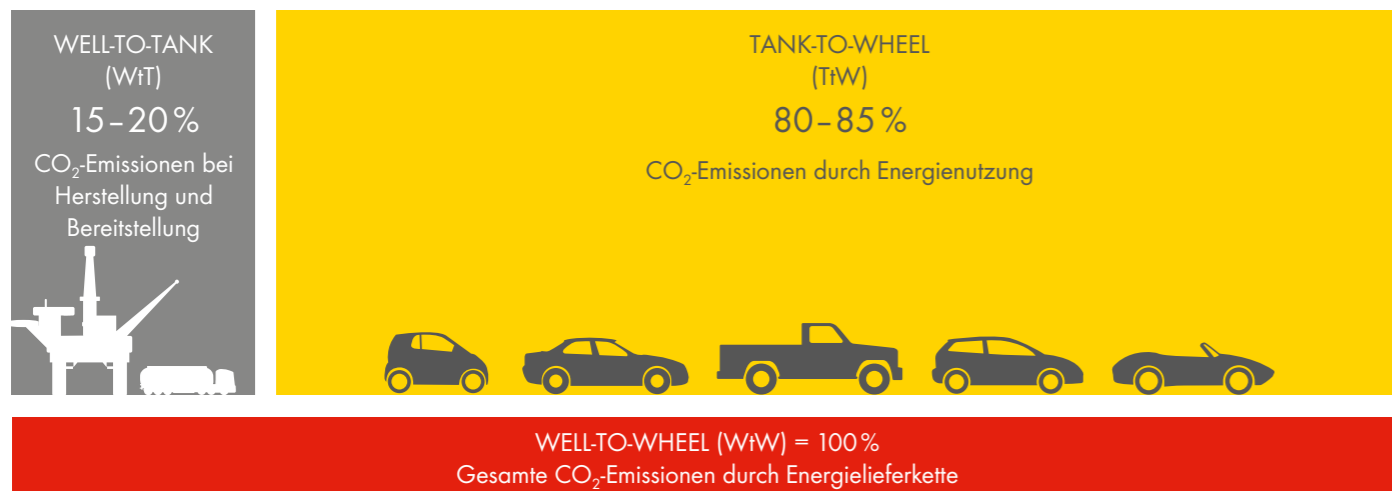
Die Treibhausgasemissionen der deutschen Pkw werden durch Gewichtung der Inländerverbräuche nach Energieträger mit energieträgerspezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren errechnet. Im Folgenden werden zunächst die

relevanten CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren für Kraftstoffe bzw. Energieträger und auch Pkw-Antriebe ermittelt und diskutiert. Anschließend werden die absoluten und spezifischen Treibhausgasemissionen des Pkw-Verkehrs in Deutschland bis 2040 diskutiert.

CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren für Kraftstoffe und Antriebe

Im Hinblick auf die Treibhausgasemissionen ist zunächst zu unterscheiden zwischen Tank-to-Wheel-Emissionen (TiW), welche durch die Verbrennung eines Kraftstoffs im

43/TREIBHAUSGASBILANZ BENZIN UND DIESEL



Motor entstehen und den Well-to-Tank-Emissionen (WtT), welche durch die Produktion und Bereitstellung des Kraftstoffes aus den jeweiligen Rohstoffen verursacht werden. Mit Well-to-Wheel-Emissionen (WtW) wird die Summe bezeichnet und die eingesetzte Energie entlang der Nutzungskette des Kraftstoffes bewertet, von der Quelle bis zur Umwandlung in kinetische Energie. Die Begriffe Treibhausgasemissionen und CO<sub>2</sub>-Emissionen werden hier weitgehend synonym benutzt. Bei der Verbrennung von fossilen Energieträgern entsteht Kohlendioxid; dieses bestimmt die Treibhausgasbilanz von Pkw mit Verbrennungsmotor maßgeblich. In den Vorketten aller Kraftstoffarten bzw. Energieträger können jedoch auch noch andere Treibhausgase anfallen. Die wichtigsten sonstigen Treibhausgase (Methan und Lachgas) werden in den Treibhausgas-Gesamtbilanzen mit berücksichtigt. Wenn dort von CO<sub>2</sub> gesprochen wird, werden damit auch die übrigen Treibhausgase in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten mitgeführt.

Die Auswahl und Zusammenstellung der spezifischen Treibhausgasemissionsfaktoren zur Berechnung der CO<sub>2</sub>-Emissionen erfolgte auf Basis der Kraftstoffherstellungspfade und kraftstoffspezifischen Verbrennungsfaktoren der letzten Ausgabe der Well-to-Wheel-Studie zu Pkw-Antrieben und Kraftstoffen (JEC 2014) der europäischen Forschungsplattform JEC (Joint Research Center of the European Commission, Eucar and Concawe). 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 2009/28/EG (EP/Rat 2009a) sowie der EU-Kraftstoffqualitäten-Richtlinie 2009/30/EG (EP/Rat 2009b) berücksichtigt. Treibhausgasemissionsfaktoren für Fahrstrom basieren auf der aktuellen nationalen Energiereferenzprognose bis 2050 (Prognos/EWI/GWS 2014). Die CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren für die einzelnen Kraftstoffarten wurden wie folgt ermittelt:

**Otto- und Dieselmotorkraftstoff:** Die Emissionsfaktoren für Otto- und Dieselmotorkraftstoff werden für die Berechnungen über den Zeithorizont dieser Pkw-Studie als konstant angenommen. Beide Kraftstoffe werden weltweit in optimierten und standardisierten Raffinerie-Prozessen aus Erdöl hergestellt. Es gibt unterschiedliche Rohölquellen und -qualitäten, die Raffinerie-Konfigurationen können ebenfalls unterschiedlich sein, aber sowohl der Rohölmix als auch die Produktionsbedingungen sowie Kraftstoffimporte nach Deutschland haben

sich in der jüngeren Vergangenheit kaum verändert. Dies ist auch in einer mittelfristigen Projektion für den deutschen Markt nicht in Sicht. In den Emissionsfaktoren für die Produktion und die Bereitstellung von Rohölen (WtT) werden daher keine großen Schwankungen erwartet. Da die Kraftstoffe in ihren Spezifikationen normiert sind, werden auch unveränderte CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren für die Verbrennung (TiW) angenommen.

**Flüssiggas und Erdgas:** Bei (fossilen) Gas-Verbrennungsmotoren (für CNG, LPG) unterliegen die CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Verbrennung (TiW) ebenfalls keinen großen Schwankungen, variieren aber etwas mit den Gasqualitäten. Da das Erdgas im Allgemeinen für die Nutzung aufbereitet wird, werden unter der Annahme einer im Mittel über die Liefermengen homogenen Gasqualität auch hier unveränderte TiW-CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren über die Zeit 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 und LPG ermittelt. Die projizierten Veränderungen der Lieferwege und Liefermengen wurden dabei berücksichtigt.

**Biogene Kraftstoffe** (flüssig und gasförmig) können aus verschiedenen Pflanzen und Stoffen gewonnen sowie mit unterschiedlichen Methoden hergestellt werden. Anders als bei fossilen Kraftstoffen entzieht Biomasse in der Wachstumsphase durch Photosynthese die Menge CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre, die später bei der Verbrennung wieder frei wird. Diese CO<sub>2</sub>-Menge wird WtT als negative CO<sub>2</sub>-Emission berücksichtigt. Die bei der Verbrennung von Biokraftstoffen entstehenden CO<sub>2</sub>-Emissionen werden jedoch TiW vollständig mitgeführt (JEC 2014).<sup>3)</sup> Hierdurch sind die ausgewiesenen TiW-Emissionen pro

<sup>3)</sup> Das Transport Emission Model TREMOD (Ifeu 2012) und der nationale Inventarbericht zur Kyoto-Treibhausgasberichterstattung (UBA 2014) erfassen ebenfalls die direkten Treibhausgasemissionen aller Kraftstoffe, das heißt fossile ebenso wie erneuerbare, auf Basis ihres Kohlenstoffgehaltes. In TREMOD werden die Vorkettenemissionen von Biokraftstoffen jedoch mit einem negativen CO<sub>2</sub>-Faktor berücksichtigt, so dass die WtW-Emissionen von Biokraftstoffen 50% - bis 2018 ansteigend auf 60% - niedriger sind als diejenigen von fossilen Kraftstoffen. Im nationalen Inventarbericht werden Biokraftstoffe nur nachrichtlich ausgewiesen (UBA 2014); die nationalen Trendtabellen für atmosphärische Emissionen des Straßenverkehrs enthalten hingegen nur die Treibhausgasemissionen von fossilen Kraftstoffen (UBA 2013b).

Kilometer den spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen nach CO<sub>2</sub>-Grenzwert-Richtlinie für Neu-Pkw (EG/443/2009) grundsätzlich vergleichbar.

Die WtT-Emissionen von Biokraftstoffen variieren stark in Abhängigkeit von der eingesetzten Biomasse (Pflanzen oder Abfallstoffe), den Anbaumethoden für die genutzte Biomasse, insbesondere der Landnutzung, und der Konversionstechnologie und den dabei eingesetzten Energierohstoffen sowie möglicherweise im Anbau- und Produktionsprozess anfallenden verwertbaren Nebenprodukten. Wie potentielle CO<sub>2</sub>-Emissionen, die durch den Anbau von Energiepflanzen zu einer Umnutzung von Agrar- oder Forstland führen (indirekte Landnutzungsänderungen bzw. ILUC-Effekte), berücksichtigt werden können, ist Gegenstand kontroverser Diskussionen (Fritsche et. al 2012). ILUC-Effekte werden daher an dieser Stelle nicht berücksichtigt.

Die EU-Erneuerbare Energien-Richtlinie 2009/28/EG (EP/Rat 2009a) und die EU-Kraftstoffqualitäten-Richtlinie 2009/30/EG (EP/Rat 2009b) stellen über Nachhaltigkeitskriterien Anforderungen an CO<sub>2</sub>-Mindesteinsparungen von Biokraftstoffen gegenüber fossilen Kraftstoffen. Zusätzlich sieht die Kraftstoffqualitäten-Richtlinie eine CO<sub>2</sub>-Reduktionsquote über alle vermarkteten Kraftstoffe für deren Inverkehrbringer vor. Da die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen bei fossilen Kraftstoffen relativ stabil sind, kann die geforderte CO<sub>2</sub>-Reduktionsquote nur über alternative Kraftstoffe erbracht werden, hauptsächlich über beigemischte Biokraftstoffe.

Da die Vorkette die WtW-Bilanz von Biokraftstoffen bestimmt, wird die Anzahl der möglichen Kombinationen aus Pflanzenarten und Verarbeitungsprozessen, die als Rohstoffe für die Erzeugung von Biokraftstoffen genutzt werden können, dadurch (signifikant) eingeschränkt. Es verbleiben jedoch noch ausreichend verfügbare Optionen für die Herstellung von Biokraftstoffen, mit denen die CO<sub>2</sub>-Minderungsziele eingehalten werden.

In den CO<sub>2</sub>-Berechnungen des Pkw-Prognosemodells erfüllen alle eingesetzten Biokraftstoffe die geforderten CO<sub>2</sub>-Mindesteinsparungen ebenso wie die obligatorische CO<sub>2</sub>-Reduktionsquote über alle Kraftstoffe. Sowohl die Biokraftstoff-Mindestanforderungen als auch die CO<sub>2</sub>-Reduktionsquote über alle Kraftstoffe steigen bis 2040 weiter an - deutlicher im Trendszenario, nur noch geringfügig im Alternativszenario. Deutlich höhere CO<sub>2</sub>-Mindestanforderungen und CO<sub>2</sub>-Quoten - wie im Trendszenario unterstellt - sind allerdings

nur noch mit Hilfe von Biokraftstoffen zweiter Generation zu erreichen. Unabhängig von der Bioquote wurde für CNG ein Biogasananteil von bis zu 20% in Trend und Alternativ und bis zu 40% in der Gasszenarrete angenommen.

**Fahrstrom:** Elektroantriebe weisen in einer TiW-Betrachtung praktisch keine direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen auf. Das CO<sub>2</sub>-Emissionsprofil dieser Antriebe wird ausschließlich durch die WtT-Emissionen der (Fahr)-Stromerzeugung bestimmt. Je nach Art des eingesetzten Primärenergieträgers und der Konversionstechnologien zur Erzeugung von Strom variieren die CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Stromerzeugung über einen weiten Bereich. So weist Strom aus Kohlekraftwerken oft einen doppelt so hohen CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor auf wie Strom aus modernen Gaskraftwerken. Die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen von Strom aus regenerativen Quellen wie Sonne oder Wind liegen noch um eine Größenordnung unter den CO<sub>2</sub>-Faktoren von Stromerzeugung aus Gas (Wagner et al. 2007).

Bei Strom wird in den kommenden Jahren eine deutliche Änderung der Erzeugungsstruktur und folglich auch seines spezifischen Emissionsfaktors erwartet. In Anlehnung an die nationale Energiereferenzprognose (Prognos/EWI/GWS 2014) werden zwei unterschiedliche Entwicklungen der

Emissionsfaktoren für den deutschen Strommix bis 2040 fortgeschrieben: Für das Trend-szenario ein konservativer 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:** Wasserstoff in Brennstoffzellenfahrzeugen verursacht ebenso wie Fahrstrom keinerlei direkte Emissionen. Der Sekundärenergieträger Wasserstoff wird heute in erster Linie durch die Reformierung von Erdgas gewonnen.

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 – gespeist werden. Ein breiterer Einsatz von Brennstoffzellen-Pkw geht dagegen einher mit der Erzeugung von Wasserstoff aus regenerativen Energiequellen (zum Beispiel per Elektrolyse aus Wind-Strom).

Abbildung 44 stellt CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren für ausgewählte Kraftstoffe über deren gesamte Nutzungskette (für das Jahr 2020) vergleichend dar. Dabei wird unterschieden zwischen den CO<sub>2</sub>-Emissionen, die während der

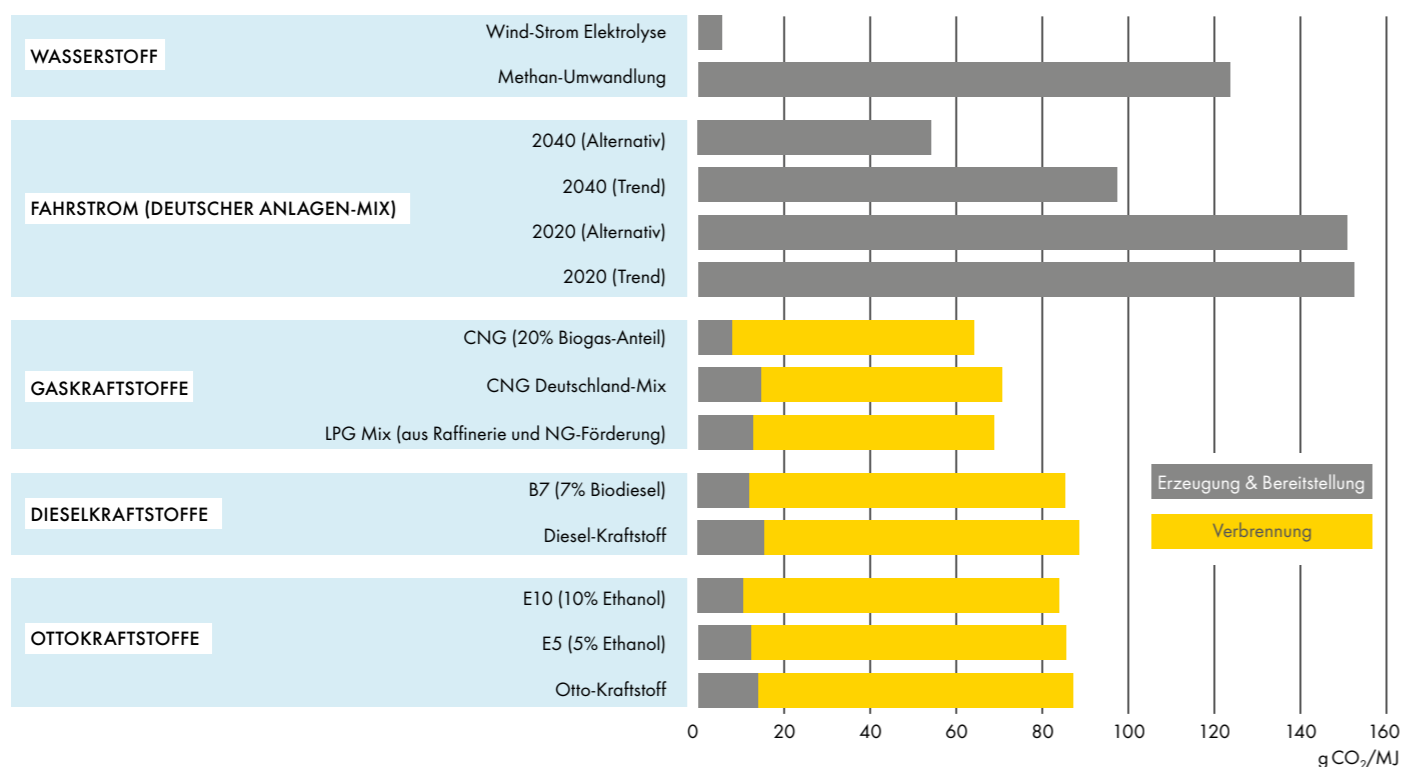
Herstellung und Bereitstellung der Kraftstoffe frei werden, und den CO<sub>2</sub>-Emissionen, die bei der Verbrennung der Menge eines Kraftstoffes mit dem Energieinhalt eines Megajoules (MJ) entstehen. Die Treibhausgasemissionen über die gesamte Nutzungskette lassen sich an der Gesamtlänge des Balkens ablesen.

Bei der Nutzung von fossilen Otto- und Dieselmotoren entstehen mehr als 80–85% der CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Verbrennung und nur 15–20% während der Kraftstoffproduktion und Bereitstellung (Abbildung 43). Bei Gaskraftstoffen ist die Verteilung zwischen Vorkette und direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen ähnlich, jedoch die Spannweite größer, das heißt etwa 15–35% WtT und 65–85% WtW.

Durch die Beimischung von Biokraftstoffen verändert sich das Verhältnis zwischen Vorkette und direkten Emissionen bei den fossilen Kraftstoffen: Die WtT-Emissionen werden geringer, da die negativen CO<sub>2</sub>-Emissionen der Biokraftstoffe von ihnen abgezogen werden.

Die direkten bzw. TiW-Emissionen verändern sich hingegen bei geringen Biokraftstoffbeimischungen aufgrund des ähnlichen spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktors kaum. Über die gesamte Nutzungskette betrachtet (WtW) reduzieren sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Kraftstoffe mit Biokraftstoffbeimischungen gegenüber reinen fossilen Kraftstoffen.

44/CO<sub>2</sub>-EMISSIONEN NACH KRAFTSTOFFNUTZUNGSPFADEN



Gasförmige Kraftstoffe weisen im Vergleich zu handelsüblichen Otto- und Diesel-Kraftstoffen geringere CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Energieeinheit auf. Hierbei kann die Beimischung von Biogas (Biomethan) zu komprimiertem Erdgas (CNG) die CO<sub>2</sub>-Emissionen noch weiter senken, denn Biogas weist vergleichsweise niedrige spezifische Treibhausgasfaktoren auf (dena 2011b).

Fahrstrom weist heute im Durchschnitt den höchsten energieträgerspezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor auf. Eine wesentliche Reduktion wird jedoch im Alternativszenario erreicht, welches eine weitgehende Realisierung der erneuerbare Energienziele im Stromsektor bis 2040 unterstellt.

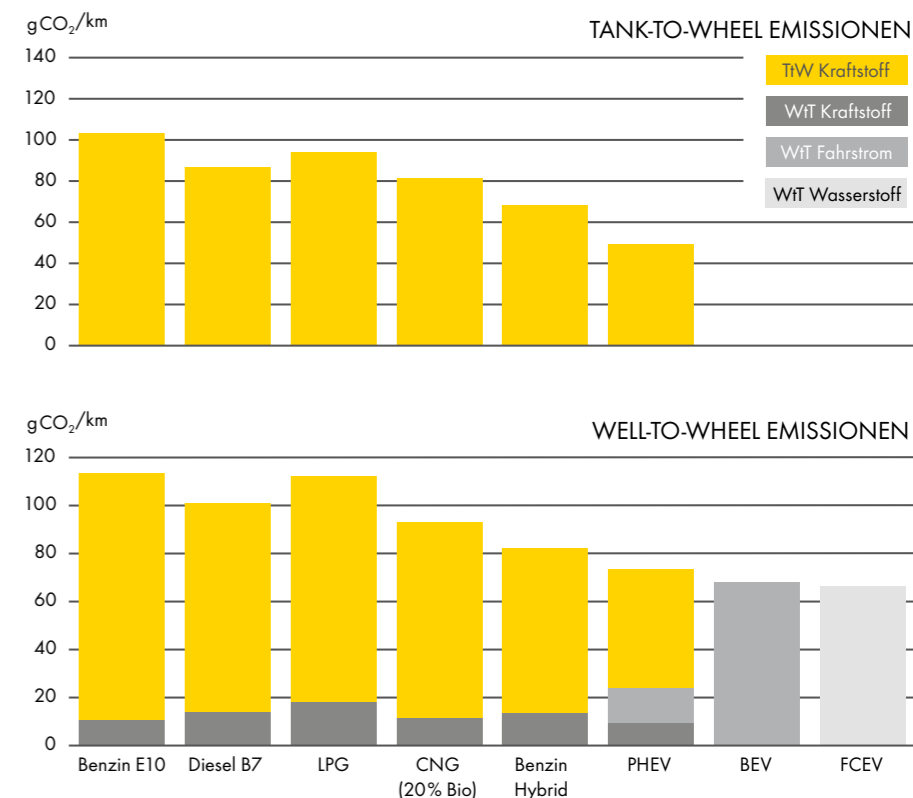
Und auch für die heutige Wasserstoffherzeugung aus Erdgas liegen die WtW-Emissionen über denjenigen fossiler Kraftstoffe, wenn auch unter dem heutigen Strommix. Wasserstoff bietet – ebenso wie Strom – großes CO<sub>2</sub>-Einsparpotential, wenn er aus regenerativen Quellen (wie Windstrom) erzeugt wird.

Um ein Gesamtbild und eine Vergleichbarkeit der CO<sub>2</sub>-Emissionen für die einzelnen Antriebsarten zu ermöglichen, muss zusätzlich zu den obigen CO<sub>2</sub>-Emissionen der Kraftstoffe noch der Wirkungsgrad der jeweiligen Antriebstechnik betrachtet werden. Insbesondere elektrische Antriebe weisen deutlich höhere Wirkungsgrade als verbrennungsmotorische auf. Sie benötigen weniger Energie bzw. Kraftstoff pro Kilometer, wodurch auch die antriebspezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Kilometer geringer ausfallen können.

Von der EU-Richtlinie für CO<sub>2</sub>-Grenzwerte neuer Pkw (EG/443/2009) werden elektrische Pkw-Antriebe gegenüber Biokraftstoffen und Pkw mit Verbrennungsmotoren noch zusätzlich begünstigt: Zum einen werden bei der CO<sub>2</sub>-Messung alle direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen erfasst, unabhängig davon, ob die verwendeten Kraftstoffe fossilen oder biogenen Ursprungs sind. Zum anderen werden Fahrzeuge ohne Verbrennungsmotoren, wie batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) oder Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) in dieser Tank-to-Wheel-Betrachtung grundsätzlich emissionsfrei eingestuft.

In Abbildung 45 oben sind in Anlehnung an das Trendszenario nur die direkten bzw. die TiW-CO<sub>2</sub>-Emissionen (nach NEFZ) für verschiedene Antriebstechnologien auf dem Stand von 2020 in typischen Kompakt-Pkw dargestellt (JEC 2013). In Abhängigkeit von den unterschiedlichen Wirkungsgraden der

45/SPEZIFISCHE TiW- UND WtW-EMISSIONEN NACH ANTRIEB



Antriebe stellen sich die Verhältnisse der spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen pro km anders dar als in der Betrachtung der CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Energieinhalt (MJ).

Ein im Wirkungsgrad gegenüber einem Otto-Antrieb besserer Diesel-Antrieb zeigt hier geringere CO<sub>2</sub>-Emissionen pro km, wohingegen Diesel- und Otto-Kraftstoffe annähernd gleiche CO<sub>2</sub>-Emissionen per MJ aufweisen. Ferner verringert sich beim effizienteren Dieselantrieb der Abstand zum Erdgasantrieb, obgleich Erdgas pro MJ spezifisch deutliche geringere CO<sub>2</sub>-Emissionen verursacht.

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Plug-in-Hybriden beziehen sich auf einen Ottokraftstoffverbrauch, der für eine elektrischen Reichweite von 20 km gemäß der Regelung UN ECE R 101 errechnet wurde (JEC 2013). Elektrische Antriebe (einschließlich Brennstoffzellenfahrzeuge) sind vergleichsweise effizient und ihre direkten Emissionen werden gleich Null gesetzt.

Für einen vollständigen WtW-Vergleich müssten auch die sektoral anders zugeordneten Vorkettenemissionen (WtT) mit berücksichtigt werden. Bei biogenen Kraftstoffen wird die WtW-Emissionsbilanz im Wesentlichen durch die Herstellung der Kraftstoffe bestimmt (WtT) – bei Wasserstoff und Fahrstrom vollständig. Je mehr regenerative Primärenergieträger

eingesetzt werden, desto geringer können diese WtT-CO<sub>2</sub>-Emissionen ausfallen. Bis 2040 ist jedoch keine vollständige Substitution fossiler Primärenergieträger in der Kraftstoffherstellung zu erwarten.

In Abbildung 45 unten sind für unterschiedliche Antriebstechnologien, wiederum eines Kompakt-Pkw mit Technik-Stand 2020 (JEC 2013), die WtW-CO<sub>2</sub>-Emissionen dargestellt, basierend auf den CO<sub>2</sub>-Faktoren 2020. Tatsächlich ist auf WtW-Basis keine der betrachteten Antriebstechnologien CO<sub>2</sub>-emissionsfrei. Die CO<sub>2</sub>-Emissionsvorteile von batterieelektrischen und Brennstoffzellen-Pkw gegenüber Pkw mit Verbrennungsmotor fallen deutlich kleiner als bei einer TiW-Betrachtung aus.

Durch den vermehrten Anteil von regenerativer Erzeugung von Fahrstrom und Wasserstoff können jedoch die WtW-CO<sub>2</sub>-Emissionen dieser Antriebe künftig weiter gesenkt werden.

Auch für den Plug-in-Hybriden erhöhen sich die WtW-CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Einbeziehung des elektrischen Fahranteils. Die Verhältnisse der verbrennungsmotorischen Antriebe einschließlich des Otto-Hybrids untereinander ändern sich auch bei unterschiedlichen Bilanzgrenzen – WtW gegenüber der TiW-Betrachtung – nicht wesentlich.

### CO<sub>2</sub>-Emissionspfade bis 2040

Hinsichtlich der absoluten Treibhausgasemissionen emittierten inländische Pkw im Jahr 2013 Tank-to-Wheel 116 Mio. Tonnen (t) CO<sub>2</sub>. Sie verursachten damit 5 % weniger Emissionen als im Jahr 1990; damals waren es noch 122 Mio. t. Betrachtet man die Emissionen inklusive der Bereitstellung der Kraftstoffe (WtW), lagen diese mit 136 Mio. t 7 % niedriger als 1990 (145 Mio. t) – was unter anderem an höheren Biokraftstoffanteilen am Kraftstoffmix liegt (Abbildung 46).

In beiden Szenarien fällt die zukünftige Treibhausgasemission deutlich stärker als im Vergangenheitszeitraum aus. Ursachen hierfür sind zum einen die rückläufigen Inländerfahrleistungen und sinkenden spezifische Kraftstoff- bzw. Energieverbräuche, zum anderen aber auch Veränderungen im Antriebsmix des Pkw-Bestands, die je nach Szenario wiederum unterschiedlich ausfallen.

Betrachtet man allein die direkten TtW-Emissionen, werden diese zwischen 2013 und 2040 im Trendszenario um 48 % auf 60 Mio. t gesenkt und liegen dann insgesamt 52 % unter dem Niveau von 1990.

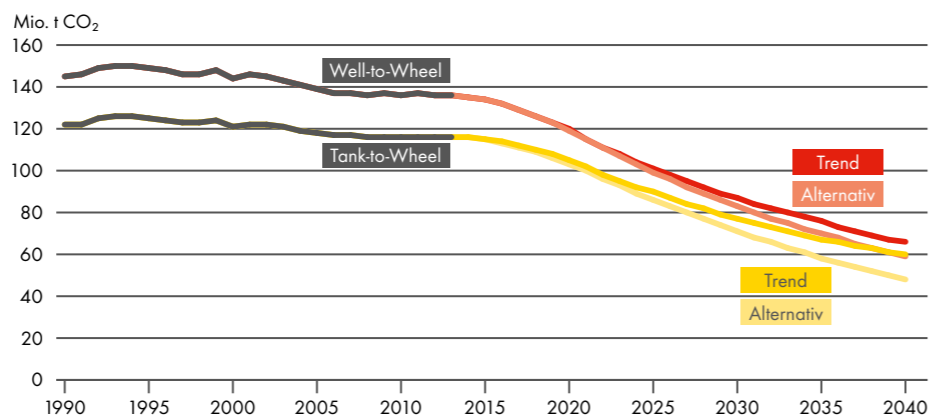
Deutlich stärker fällt mit -58 % gegenüber 2013 (-61 % gegenüber 1990) die Senkung der direkten Emissionen im Alternativszenario aus, welche am Ende des Betrachtungszeitraums dann bei 48 Mio. t liegen. Damit liegen sie 20 % unter dem Niveau des Trendszenarios. Grund für die höhere Minderung ist die verstärkte Substitution von Treibstoff durch Strom und Wasserstoff, welche beide keine direkten Emissionen verursachen.

Bezieht man die Emissionen für die Bereitstellung der verbrauchten Energie mit ein, sinken die WtW-Emissionen im Trendszenario auf 66 Mio. t und im Alternativszenario auf 59 Mio. t. Die relativen WtW-Emissionsminderungen 2040 gegenüber 2013 belaufen sich auf 51 % (Trend) bzw. 57 % (Alternativ). Der Unterschied zwischen beiden Szenarien im Jahr 2040 fällt mit gut 10 % deutlich schwächer aus.

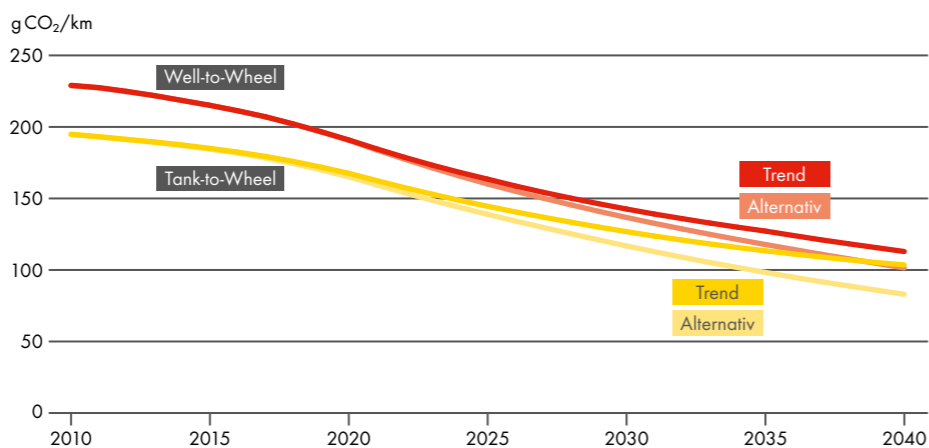
Treibhausgasreduktionen aus höheren Bioanteilen sowie die geringeren Vorkettenemissionen emissionsarmer Biokraftstoffe zweiter Generation führen im Trendszenario zu niedrigeren Well-to-Tank-Emissionen.

Dagegen wirkt der erhöhte Strom- und Wasserstoffverbrauch im Alternativszenario WtT den sinkenden TtW-Emissionen entgegen, obgleich die spezifischen WtT-Emissionen

### 46/TtW- UND WtW-EMISSIONEN NACH SZENARIO



### 47/SPEZIFISCHE TtW- UND WtW-EMISSIONEN DES PKW-BESTANDS



beider Energieträger im Alternativszenario stärker sinken als im Trendszenario. Gegenüber 1990 wird im Trendszenario WtW eine Minderung um 55 % im Alternativszenario um 60 % erreicht (Abbildung 46)

Die durchschnittlichen realen spezifischen TtW-Emissionen des Pkw-Bestands in Deutschland lagen 2013 bei 189 g CO<sub>2</sub>/km (Abbildung 47). Die durchschnittlichen spezifischen TtW-Emissionen der 2013 neu zugelassenen Pkw lagen nach EU-Richtlinie EG/443/2009 bei 136 g CO<sub>2</sub>/km (EEA 2014).

Gründe für die deutliche Abweichung zwischen den spezifischen Emissionen der Neuzulassungen und des Pkw-Bestands sind einerseits die verzögerte Wirkung von neuen Technologien über Neuzulassungen auf den aktuellen Fahrzeugbestand, andererseits der Unterschied zwischen Normzyklus und realer Fahrweise – die realen spezifischen Emissionen des Pkw-Bestands lagen 2013 bei rund 170 g CO<sub>2</sub>/km. Berücksichtigt man zusätzlich die Emissionen der Vorkette, liegen die spezifischen WtW-Emissionen des Pkw-

Bestandes im Jahr 2013 bei 222 g CO<sub>2</sub>/km. Im Trendszenario erreichen die Neuzulassungen die vorgegebenen CO<sub>2</sub>-Grenzwerte für direkte Emissionen von 72 g CO<sub>2</sub>/km (im Normzyklus). Für den realen Fahrbetrieb ergeben sich hieraus spezifische TtW-Emissionen in Höhe von 83 g CO<sub>2</sub>/km. Bis 2040 sinken die realen spezifischen TtW-Emissionen des Pkw-Bestands auf 103 g CO<sub>2</sub>/km – in der WtW-Betrachtung liegen sie dann bei 113 g CO<sub>2</sub>/km.

Im Alternativszenario sinken die CO<sub>2</sub>-Grenzwerte für Neuwagen sogar auf 50 g CO<sub>2</sub>/km (nach Normzyklus), im realen Fahrbetrieb bedeutet dies spezifische TtW-Emissionen von 57 g CO<sub>2</sub>/km. Dadurch werden TtW stärkere Minderungen erreicht – 2040 liegen die realen spezifischen Emissionen des Pkw-Bestands mit 83 g CO<sub>2</sub>/km deutlich unter dem Niveau des Trendszenarios – WtW werden inklusive der Vorkettenemissionen 101 g CO<sub>2</sub>/km erreicht.

### GASSZENARETTE

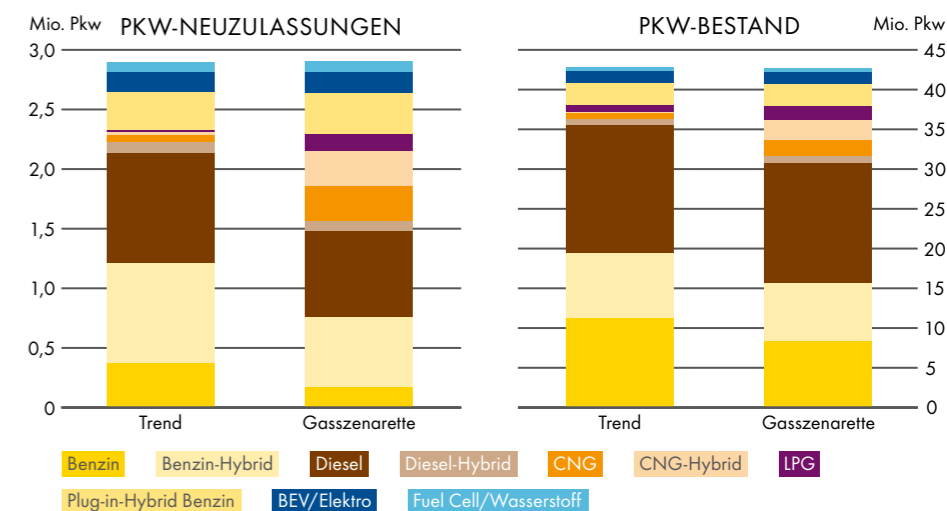
Unter den alternativen Antrieben und Kraftstoffen haben Gasantriebe in der jüngeren Vergangenheit deutlich an Aufmerksamkeit gewonnen. Die erschließbaren globalen Gasressourcen sind sehr groß; Gasangebot und Gasnachfrage, vor allem für bzw. nach Erdgas wachsen weltweit überdurchschnittlich. Im Fahrzeugbau haben Gasantriebe technisch zu den etablierten verbrennungsmotorischen Antrieben aufgeschlossen.

Auf der anderen Seite hat das Trendszenario gezeigt, dass die Reduktion der realen spezifischen und absoluten CO<sub>2</sub>-Emissionen des Pkw-Bestands lange Vorlaufzeiten erfordert. Außerdem sind die für das Alternativszenario vorgesehenen elektrischen Antriebe nach wie vor teuer, während Gasantriebe für Pkw bei den Herstellungskosten fast zum Stand der Technik bei konventionellen Antrieben – namentlich der Benzin-Direkteinspritzer – aufgeschlossen haben. Im Rahmen einer Gasszenarette soll geprüft werden, inwieweit Gasantriebe und Gaskraftstoffe einen zusätzlichen Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion im Pkw-Sektor leisten und wie sie zur Diversifizierung der Energieversorgung des Pkw-Verkehrs beitragen können.

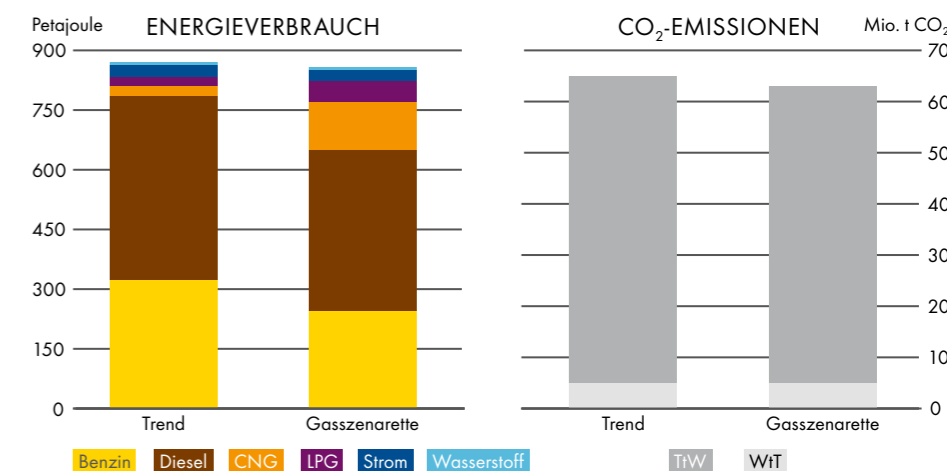
Die Gasszenarette basiert auf den Modellparametern des Trendszenarios – unter anderem demselben Modernisierungsniveau von knapp 3 Mio. Neu-Pkw pro Jahr. Zusätzlich fördern die für Antriebs-Kraftstoff-Konfigurationen zentralen Einflussfaktoren – Politik, Verbraucher, technischer Fortschritt, Energieversorgung – eine verstärkte Marktdurchdringung von Gasantrieben. Die CO<sub>2</sub>-Grenzwerte für Neuwagen werden gegenüber dem Trendszenario noch einmal um 5 g CO<sub>2</sub>/km verschärft auf 67 g CO<sub>2</sub>/km im Jahr 2040. Zudem profitieren Gas-Pkw von anhaltend niedrigen Betriebskosten – so wie im Autokosten-Vergleich dargestellt – und wettbewerbsfähigen Anschaffungspreisen für Neuwagen. Die Versorgungsinfrastruktur für Erdgaskraftstoffe wird in Übereinstimmung mit der steigenden Kraftstoffnachfrage ausgebaut. Diesel- und Benzinantriebe werden verstärkt durch Erdgas- und Erdgas-hybridantriebe substituiert, teilweise auch durch Flüssiggasantriebe. Die Entwicklung der Elektrofahrzeuge verläuft weitgehend parallel zum Trendszenario.

Im Folgenden werden Pkw-Neuzulassungen, Pkw-Bestand, Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen der Gasszenarette für das Jahr 2040 der Situation im Trendszenario gegenübergestellt.

### 48/GAS VERSUS TREND IM JAHR 2040



### 49/GAS VERSUS TREND IM JAHR 2040



Während konventionelle und hybridisierte Benzin- und Dieselantriebe im Trendszenario im Jahr 2040 einen Anteil von über drei Vierteln an den Neuzulassungen haben – sinkt ihr Anteil auf gut 50 % in der Gasszenarette (Abbildung 48). Erd- und Flüssiggasantriebe, die im Trendszenario eine untergeordnete Rolle spielen, machen in der Gasszenarette ein Viertel der Neuzulassungen bzw. 725.000 Pkw aus. Der Anteil von Gasfahrzeugen am Pkw-Bestand liegt dann (2040) in der Gasszenarette insgesamt bei 15 % bzw. 6,3 Mio.; darin sind 2 Mio. herkömmliche Erdgasfahrzeuge, 2,6 Mio. Erdgas-hybrid und 1,7 Mio. Fahrzeuge mit Flüssiggasantrieb enthalten. Die Antriebssubstitution durch Gas-Pkw erfolgt hauptsächlich zu Lasten von Benzin- und Dieselfahrzeugen.

Aufgrund vergleichbarer Motoreffizienz, insbesondere zu Ottoantrieben, werden durch die Substitution mit Gasantrieben keine signifikanten Änderungen des gesamten Energieverbrauchs erreicht (Abbildung 49) Die Struktur nach Energieträgern verschiebt sich durch

überdurchschnittliche Jahresfahrleistungen der Gasfahrzeuge stärker als die Antriebsanteile des Bestands, und zwar werden 2040 gut 20 % des Pkw-Kraftstoffverbrauchs durch Gaskraftstoffe gedeckt. Erdgas trägt dann 14 % und Flüssiggas 6 % zum Kraftstoffmix bei.

Gaskraftstoffe weisen niedrigere spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen auf als flüssige fossile Kraftstoffe. Zusätzlich wird in der Gasszenarette Biogas verstärkt eingesetzt – ansteigend auf 40 % im Erdgas. In der Folge vermindern sich in der Gasszenarette gegenüber Trend die direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen (TtW) um 2,5 Mio. t bzw. 3 Mio. t unter Berücksichtigung der Vorkette (WtT). Während im Alternativszenario mit 5,4 Mio. zusätzlichen hauptsächlich elektrisch angetriebenen Pkw (Plug-in, BEV und FCEV) im Pkw-Bestand gegenüber Trend 6,7 Mio. t CO<sub>2</sub>-Emissionen (WtW) mehr eingespart werden, wird in der Gasszenarette mit 4,6 Mio. zusätzlichen Gasfahrzeugen nahezu die Hälfte (ca. 45 %) der zusätzlichen CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion (WtW) des Alternativszenarios erreicht.



## FAZIT

# PKW-MOBILITÄT 2040: VIELFÄLTIGER UND NACHHALTIGER



Mit Hilfe von Szenariotechnik und eines Pkw-Kohortenmodells wurden automobiler Zukünfte entworfen und quantifiziert. In einem Trend- und einem Alternativszenario sowie in einer Trendvariation (Gasszenarett) wurden künftige Entwicklungspfade des Pkw-Bestands nach Antrieben und Kraftstoffen sowie hinsichtlich seines Energieverbrauchs und seiner Treibhausgasemissionen verglichen.

Die relevanten Einflussfaktoren Politik, Verbraucherpräferenzen, technischer Fortschritt und Energieversorgung entwickeln sich in beiden Szenarien unterschiedlich. Im Trendszenario führen moderate Veränderungen der Rahmenbedingungen und Einflussfaktoren in erster Linie zu Effizienzsteigerung und Hybridisierung; ferner erfolgt ein verstärkter Einsatz von Biokraftstoffen. Im Alternativszenario nimmt das Tempo des automobilen Wandels und damit der Anteil von alternativen Antrieben dagegen deutlich zu – im Vergleich zum Trendszenario erfolgt nur ein moderater Einsatz von Biokraftstoffen.

In beiden Szenarien erfordert die EU-CO<sub>2</sub>-Grenzwertverordnung eine Reduktion der spezifischen Verbräuche der Neuzulassungen bis 2020, allerdings wesentlich stärker im Alternativszenario. Zudem verändern sich die Autokosten-Strukturen im Alternativszenario deutlich zugunsten von elektrischen Antrieben.

Die Entwicklung des künftigen Pkw-Bestands wird von Höhe und Struktur der Pkw-Neuzulassungen bestimmt: Im Trendszenario gehen die jährlichen Neuzulassungen von heute etwa 3 Mio. leicht auf 2,9 Mio. Neuzulassungen pro Jahr zurück, im Alternativszenario beschleunigt sich der automobiler Wandel und die Neuzulassungen steigen auf 3,3 Mio. Pkw pro Jahr. Auch bei höheren Neuzulassungszahlen steigt das Durchschnittsalter

des Pkw-Bestands weiter, und zwar von heute 8,8 Jahre auf 9,4 im Alternativszenario und sogar auf 10,9 Jahre im Trendszenario.

Bei den Antrieben machen Otto- und Diesel-Pkw sowie ihre hybridisierten Pendanten im Trendszenario bis ins Jahr 2040 drei Viertel der Neuzulassungen aus, elektrische Antriebe dagegen 20%. Im Alternativszenario nimmt das Tempo des automobilen Wandels und damit der Anteil von alternativen Antrieben dagegen deutlich zu. Das gilt vor allem für elektrische Antriebe, die ihren Neuzulassungsanteil bis 2040 auf über 40% steigern, während reine und hybridisierte Otto- und Diesel-Pkw auf 55% sinken.

Der Antriebsmix des Pkw-Bestands verändert sich im Trendszenario nur relativ langsam. Von knapp 43 Mio. Fahrzeugen sind über 36 Mio. mit konventionellen Otto- und Diesel-Antrieben und ihren hybridisierten Varianten ausgestattet, 4,7 Mio. mit elektrischen Antrieben (Plug-in, batterieelektrisch und Brennstoffzelle); Gasantriebe können auf 1,7 Mio. Pkw zulegen. Im Alternativszenario wächst der Bestand von Elektroantrieben insgesamt auf 10,1 Mio. Fahrzeuge – darunter 5,5 Mio. Plug-in-Hybride, 3,1 Mio. batterieelektrische Fahrzeuge und 1,5 Mio. mit Brennstoffzelle. Die Anzahl aller Otto- und Diesel-Pkw schrumpft 2040 auf 30,7 Mio. Fahrzeuge, während Gasantriebe auf 1,9 Mio. Pkw zulegen.

In beiden Szenarien gehen die Neuzulassungen und später auch der Bestand an reinen Otto- und Diesel-Pkw deutlich bzw. sehr deutlich zurück. Ihr durchschnittliches Fahrzeugalter steigt hierdurch immer weiter an: Reine Diesel-Pkw erreichen 2040 ein Durchschnittsalter von 10,8 Jahren (Alternativ) bzw. 11,9 (Trend). Reine Otto-Pkw liegen bei 13,5 Jahren (Alternativ) bzw. 14,2 (Trend).

Diesel-Pkw weisen heute mit über 21.000 km wesentlich höhere Jahresfahrleistungen auf als Benziner mit weniger als 11.000 km. Und jüngere Pkw, insbesondere junge Diesel-Pkw fahren deutlich mehr als ältere Fahrzeuge. In beiden Szenarien erbringen Diesel-Pkw die höchsten Pkw-Fahrleistungen insgesamt. Im Trendszenario beläuft sich die Inländerfahrleistung von Dieselantrieben im Jahr 2040 auf insgesamt 260 Mrd. km, was einem Anteil von 45% an den gesamten Pkw-Fahrleistungen in Höhe von 580 Mrd. km entspricht. Mit sinkendem Bestandsanteil und steigendem Alter sinkt der Fahrleistungsanteil von Otto-Pkw auf 17%. Inklusive Hybridantriebe erbringen konventionelle Antriebe insgesamt 85% der Fahrleistung – 10% wird durch Elektroantriebe und 5% durch Gasantriebe erbracht.

Im Alternativszenario wächst der Fahrleistungsanteil der Elektroantriebe auf 24% – insbesondere Plug-in-Hybride spielen mit einer Fahrleistung von dann 83 Mrd. km eine zunehmende Rolle, wobei der elektrische Fahrleistungsanteil dann bei 90% liegt. Der Fahrleistungsanteil aller Otto- und Diesel-Antriebe sinkt hier auf 70%.

Im Jahr 2013 lag der durchschnittliche Verbrauch neu zugelassener Pkw bei 5,9 l<sub>BÄ</sub>/100 km. Gegenüber dem Testverbrauch lag der reale Verbrauch auf der Straße mit 7,3 l<sub>BÄ</sub>/100 km rund 25% höher. Der Bestandsverbrauch, welcher immer auch ältere Fahrzeuge mit höherem spezifischem Verbrauch einschließt, lag wiederum 12% höher als der Realverbrauch der Neuzulassungen und damit bei 8,2 l<sub>BÄ</sub>/100 km. Wenn die EU-CO<sub>2</sub>-Grenzwertverordnung für neue Pkw erfüllt werden soll, muss bis 2020 eine deutliche Senkung der spezifischen Verbräuche erreicht werden. Lag die durchschnittliche jährliche Absenkung der spezifischen Real-

verbräuche der Neuzulassungen zwischen 2005 und 2013 bei jährlich 1,6%, muss zwischen 2013 und 2020 eine jährliche Effizienzsteigerung um durchschnittlich 4,9% sowie im Alternativszenario von 5,3% erreicht werden. Anschließend sinken die durchschnittlichen spezifischen Realverbräuche moderater, im Trendszenario um jährlich 1,1% bis auf 4,1 l<sub>BÄ</sub>/100 km sowie im Alternativszenario mit einer jährlichen Effizienzsteigerung von 1,8% auf 3,4 l<sub>BÄ</sub>/100 km.

Effizienzgewinne nach 2020 werden vor allem durch Verschiebung zu elektrifizierten Antrieben erreicht, deren mittlerer spezifischer Verbrauch für sich genommen auf unter 2,5 l<sub>BÄ</sub>/100 km sinkt. Der mittlere spezifische Verbrauch des Bestands geht im Trendszenario bis 2040 auf 4,7 l<sub>BÄ</sub>/100 km, im Alternativszenario auf 4,1 l<sub>BÄ</sub>/100 km zurück.

Deutsche Pkw verbrauchten im Jahr 2013 rund 50 Mrd. l<sub>BÄ</sub> oder 1.590 PJ Energie. Ottokraftstoffe hatten einen Anteil von 55%, Dieselmotoren von 43% am Inländerverbrauch. Im Trendszenario geht der Energieverbrauch (Inländerverbrauch) um 45% auf 27 Mrd. l<sub>BÄ</sub> bzw. 868 PJ Energie zurück, im Alternativszenario wird er mehr als halbiert, und zwar auf dann nur noch 24 Mrd. l<sub>BÄ</sub> bzw. 759 PJ Energie.

Auch im Jahr 2040 werden im Pkw-Bereich hauptsächlich flüssige Otto- und Dieselmotoren (einschließlich biogener Substitute) eingesetzt: im Trend- sind 86% und im Alternativszenario immerhin noch 80% der verbrauchten Energie Flüssigkraftstoffe.

Im Trendszenario können Otto- und Diesel 20% Biokraftstoffe beigemischt werden; der Biokraftstoffverbrauch steigt in der Folge von 2,1 auf 3,3 Mrd. l<sub>BÄ</sub>. Im Alternativszenario entwickelt sich elektrische Energie Ende der

2030er Jahre zum wichtigsten alternativen Energieträger. Der Fahrstromverbrauch steigt im Alternativszenario auf 71 PJ an, was dann (2040) fast 20% des Stromverbrauchs privater Haushalte ausmachen könnte. Der Biokraftstoffeinsatz geht trotz erhöhter 10%-Beimischung auf 1,4 Mrd. l<sub>BÄ</sub> (44 PJ) zurück.

Effizienzsteigerung, neue Antriebe und Kraftstoffe tragen alle zu substantziellen Treibhausgasminderungen des Pkw-Verkehrs bei: Die direkten bzw. Tank-to-Wheel-Emissionen, welche zwischen 1990 und 2013 von 122 Mio. t auf 116 Mio. t sanken, gehen im Trendszenario weiter bis auf 60 Mio. t und im Alternativszenario auf 48 Mio. t zurück. Bezieht man zusätzlich die Vorketten- bzw. Well-to-Tank-Emissionen mit ein, entwickeln sich die Well-to-Wheel-Emissionen von historisch 145 Mio. t (1990) auf 136 Mio. t (2013) sowie bis 2040 im Trendszenario auf 66 Mio. t und im Alternativszenario auf 59 Mio. t.

Analog zu den realen Bestandsverbräuchen liegen auch die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen des Pkw-Bestands deutlich über den Zielvorgaben nach Normzyklus für Neuzulassungen. Für einen Vergleich der Emissionen von Elektroantrieben und konventionellen Antrieben mit verstärktem Einsatz von Biokraftstoffen eignen sich insbesondere die WiW-Emissionen, da erhebliche Unterschiede in den Vorkettenemissionen vorliegen. Die WiW-Emissionen entwickeln sich von 222 g CO<sub>2</sub>/km im Jahr 2013 auf 113 g CO<sub>2</sub>/km im Jahr 2040 im Trendszenario – im Alternativszenario auf 101 g CO<sub>2</sub>/km.

Der verstärkte Einsatz von Gasantrieben ermöglicht eine zusätzliche (zu Trend) oder alternative Reduktion (zu Alternativ) der Emissionen und auch eine Diversifizierung

des Energieverbrauchs. In der Gasszenarett – einer Variante des Trendszenarios – wächst der Anteil der Gasantriebe bei den rund 3 Mio. jährlichen Neuzulassungen kontinuierlich bis 2040 auf 25% gegenüber 3% im Trendszenario. Innerhalb der neu zugelassenen Gasantriebe liegen die Anteile bei 40% für CNG-Antriebe, ebenfalls 40% für CNG-Hybride sowie 20% LPG-Antriebe. Im Jahr 2040 machen Gasantriebe mit 6,3 Mio. Einheiten dann insgesamt einen Pkw-Bestandsanteil von 15% aus.

Liegt der Anteil des Gasabsatzes am Inländerverbrauch der Pkw heute noch bei rund 2%, wächst er in der Gasszenarett zu Lasten von Otto- und Dieselmotoren bis 2040 auf 20% (120 PJ CNG einschließlich Biogas, 52 PJ LPG). Der Pkw-Erdgasverbrauch 2040 erreichte dann sogar fast ein Viertel des Erdgasverbrauchs privater Haushalte. Durch die niedrigeren spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Energieinhalt von Gas können mit 58 Mio. t direkten bzw. TiW-Emissionen gegenüber dem Trendszenario im Jahr 2040 2,5 Mio. t zusätzlich eingespart werden. WiW sinken die Emissionen auf 63 Mio. t und liegen dann 3 Mio. t unter dem Niveau des Trendszenarios.

Über alle Szenarien nimmt letztendlich künftig nicht nur die Energieeffizienz sondern vor allem auch die Vielfalt von Pkw-Antrieben und Kraftstoffen bzw. Energien zu. Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen gehen hingegen signifikant zurück, wodurch Automobilität künftig nachhaltiger wird bzw. nachhaltiger möglich wird.

# ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die aktuellen Shell Pkw-Szenarien 2014 sind die insgesamt 26. Ausgabe der Shell Pkw-Studie. Ziel der Shell Pkw-Szenarien ist es, die Zukunft der Auto-Mobilität in Deutschland mit Hilfe von Technikabschätzungen durch Experten, Szenario-Technik und quantitativen Prognosen zu erforschen. Die wichtigsten Ergebnisgrößen sind die Pkw-Motorisierung, die Pkw-Fahrleistungen, der Pkw-Bestand, sein Energieverbrauch und seine Treibhausgasemissionen. Die Neuausgabe der Pkw-Studie 2014 reicht erstmals bis 2040 und wurde in Zusammenarbeit mit der Prognos AG, Basel erstellt.

## GLOBALE AUTO-MOBILISIERUNG BESCHLEUNIGT SICH

Heute erleben wir in immer mehr Weltregionen eine zunehmende Prägung des Lebens und der Mobilität durch das Automobil. Weltweit gibt es bereits über 900 Mio. Pkw. In den hochentwickelten Volkswirtschaften liegt die Pkw-Motorisierung meist zwischen 400 und 600 Pkw pro 1.000 Einwohner; in Deutschland sind es rund 530 Pkw pro 1.000 Einwohner. Die weltweite Pkw-Motorisierung liegt zurzeit bei 123 Pkw pro 1.000 Einwohner.

In Schwellen- und Entwicklungsländern liegt die Motorisierung oft noch unter 100 Pkw pro 1.000 Einwohner. In vielen Schwellenländern hat sich das Wachstum der Pkw-Motorisierung in den vergangenen Jahren beschleunigt. Bis zur Jahrhundertmitte könnte die globale Pkw-Flotte auf etwa zwei Milliarden Pkw bei dann weltweit etwa 9,6 Mrd. Menschen anwachsen. Bei steigender Motorisierung und einem immer urbaneren Umfeld stellt sich die Frage, wie Auto-Mobilität künftig stattfinden kann, und zwar möglichst nachhaltig.

## DEMOGRAFISCHER WANDEL IN DEUTSCHLAND

In Deutschland wachsen Wirtschaft und Einkommen weiter, so dass privater Konsum und Verkehrsausgaben ebenfalls weiter steigen können. Die deutsche Bevölkerung geht jedoch, anders als die Weltbevölkerung, zurück – von heute 81 auf knapp 77 Mio. Einwohner 2040. Dabei sinkt der Anteil der jüngeren und mittleren Altersgruppen, während der Anteil der über 65-Jährigen deutlich von 21 auf 31 % zulegt. Die Anzahl der privaten Haushalte legt von 40 auf 41,3 Mio. zu, wobei die durchschnittliche Haushaltsgröße von etwa 2 auf 1,8 Personen sinkt.

## WODURCH WERDEN PKW-BESITZ UND -NUTZUNG BEEINFLUSST?

Für die Prognose zur Pkw-Motorisierung sowie zu den Pkw-Fahrleistungen wurden mögliche Einflussfaktoren auf Pkw-Besitz und auf Pkw-Nutzung anhand aktueller Mobilitäts-erhebungen und Verbraucherbefragungen überprüft. Sozioökonomische Einflussfaktoren auf Auto-Mobilität lassen sich in Treiber und Hemmnisse einteilen.

Zu den die Pkw-Verfügbarkeit und Pkw-Nutzung treibenden Faktoren gehören Erwerbstätigkeit und hohes Einkommen, welches in der Regel auch mit höherer Bildung einhergeht. Mehr Auto-Mobilität ermöglicht die Ausdehnung städtischer Siedlungsstrukturen ins Umland (Suburbanisierung). Zu den stärksten Treibern von Auto-Mobilität gehört die Frauenmotorisierung, Frauen holen bei der Motorisierung seit Jahren gegenüber Männern auf (Aufholeffekt). Und auch ältere Personen nutzen heute häufiger einen Pkw als noch vor 10 Jahren, was sich auch an den deutlich erhöhten Mobilitätsausgaben junger Senioren ablesen lässt.

MEHR AUTO-MOBILITÄT	WENIGER AUTO-MOBILITÄT
Höhere Erwerbsbeteiligung	Längere Ausbildungszeiten
Höheres Einkommen	Mehr Alleinstehende
Motorisierung Frauen	Mobilitätsverhalten Jüngerer
Verkehrsausgaben junger Senioren	Verkehrsausgaben Jüngerer (?)
Suburbanisierung	Verstädterung
Motorisierung Älterer	Weniger Kinder

Zu den Pkw-Verfügbarkeit und -Nutzung hemmenden Faktoren gehört das Mobilitätsverhalten Jüngerer. Jüngere Menschen weisen eine andere Einstellung zum Pkw-Besitz auf und setzen verstärkt auf Informations- und Kommunikationstechnologie. Folglich haben Jüngere heute seltener einen Pkw zur Verfügung als vor 10 Jahren; allerdings kann die Auswirkung des Ausgabeverhaltens Jüngerer

anhand vorliegender Erhebungsdaten (noch nicht verlässlich abgeschätzt werden. Längere Ausbildungszeiten verschieben die Realisierung von Pkw-Mobilität in höhere Altersgruppen. Parallel zur Suburbanisierung nimmt der Verstädterungsgrad in Deutschland zu Lasten des ländlichen Raumes weiter zu. Einen dämpfenden Effekt auf Pkw-Besitz und Pkw-Nutzung haben auch Veränderungen der Haushaltsstrukturen; immer mehr Alleinstehende, Ein- und Zwei-Personenhaushalte und immer weniger Kinder in den Haushalten führen zu weniger Auto-Mobilität.

## PKW-MOTORISIERUNG UND PKW-FAHRLEISTUNGEN

Für die künftige Entwicklung von Pkw-Motorisierung und Pkw-Fahrleistungen in Deutschland wurde ein Trendszenario bis zum Jahr 2040 entwickelt und quantifiziert. Die wichtigsten Ergebnisse zu Pkw-Motorisierung, Pkw-Bestand und Pkw-Fahrleistungen sind folgende:

**Motorisierung:** Die Pkw-Motorisierung der deutschen Bevölkerung (einschließlich juristischer Personen) wird bis etwa 2027/2028 noch leicht ansteigen – von heute (2014) rund 550 auf nahezu 570 in der zweiten Hälfte der 2020er Jahre – und anschließend auf 558 Pkw pro 1.000 Einwohner im Jahr 2040 zurückgehen. Die Motorisierung über alle Einwohner (ohne juristische Personen) betrug 2012 493 Pkw je 1.000 Einwohner. Sie erreicht 2025/26 mit 512 Pkw

je 1.000 Einwohner ihr Maximum und geht dann bis 2040 auf 510 Pkw je 1.000 Einwohner zurück. Eine Hauptursache des Rückgangs ist die teilweise rückläufige Männermotorisierung. Die Motorisierung der Männer erreicht ihren Höhepunkt etwa 2016/17; sie geht von heute (2014) 645 Pkw bis 2040 auf 609 Pkw pro 1.000 Männer zurück. Außerdem sinkt die Motorisierung der unteren

Altersklassen unter 30 bzw. 34 Jahren sowie die der über 75-Jährigen leicht, während die jüngeren Alten bis 75 Jahre ihr Motorisierungsniveau noch steigern. Schließlich schrumpft die zahlenmäßige Besetzung der am stärksten motorisierten Altersklassen (von etwa 35 bis 60 Jahre).

Frauen übernehmen einen zunehmenden Anteil an der Motorisierung. Die Frauenmotorisierung legt von heute 351 auf 414 Pkw je 1.000 Frauen in 2040 zu. Das Verhältnis der Motorisierung von Frauen- zur Männermotorisierung steigt von heute 55 % auf 68 % in 2040 ebenfalls deutlich an. Durch die zunehmende Frauenmotorisierung steigt die Motorisierung in den mittleren Altersklassen (45–75 Jahre) insgesamt sogar noch an, besonders stark in den Altersklassen der 60- bis 70-Jährigen.

**Pkw-Bestand:** Der Gesamt-Pkw-Bestand aller Haltergruppen steigt von heute (2014) 44,2 Mio. auf gut 45,2 in den Jahren 2022/2023 und sinkt anschließend auf 42,7 Mio. Pkw im Jahr 2040 – bei allerdings auch nahezu 4 Mio. weniger Einwohnern. Rund 8,5 % des heutigen Pkw-Gesamtbestands bzw. 3,5 Mio. Pkw sind auf juristische Personen zugelassen; Anteil und Anzahl verändern sich bis 2040 nur wenig.

**Pkw-Fahrleistungen:** Die durchschnittliche Jahresfahrleistung je Pkw, die schon in der Vergangenheit leicht abgesunken ist, wird sich von heute gut 14.000 km bis 2040 auf etwa 13.600 km pro Jahr reduzieren.

Am meisten fahren die 30- bis 39-Jährigen (18.900 Pkw-km pro Jahr) sowie die von juristischen Personen gehaltenen Pkw (knapp 25.000 Pkw-km pro Jahr). Durch eine intensivere Pkw-Nutzung und steigende Bevölkerungsanteile Älterer nimmt jedoch der Anteil älterer Personen an der Pkw-Fahrleistung

## PEAK CAR IN DEUTSCHLAND?

Im Hinblick auf den Pkw-Verkehr in hochmotorisierten Industrieländern wird inzwischen oftmals von Peak Car gesprochen; das heißt, Pkw-Motorisierung oder Pkw-Fahrleistungen erreichen irgendwann einen Höhepunkt (Peak) und gehen dann zurück. Beobachtet wird dieses Phänomen in den USA und in Großbritannien, aber auch in Deutschland – in der Regel bei den Jüngeren (ifmo 2013). Steht auch für Deutschland ein Peak Car bevor? Und wenn ja wann?

Bei allen drei Pkw-Kennziffern wird in Deutschland in den 2020er Jahren ein Höhepunkt erreicht. Die Pkw-Motorisierung (Pkw je 1.000 Einwohner) erreicht ihren Peak etwas später als die Pkw-Nutzungsintensität, gemessen an der Pkw-Verkehrsleistung je Einwohner. Der Rückgang des Pkw-Bestands geht teilweise zurück auf die rückläufige Einwohnerzahl. Das Sinken der Pkw-Motorisierung und auch der Pkw-Nutzung drückt dagegen sowohl Verschiebungen in der Altersstruktur der Bevölkerung als auch ein verändertes Mobilitätsverhalten von Bevölkerungsgruppen aus.

Es zeichnet sich folglich ein Höhepunkt bei Pkw-Besitz und Pkw-Nutzung ab. Allerdings ist der Höhepunkt sehr flach. Alle drei Pkw-Kennziffern bewegen sich auch in 2040 auf dem Niveau des letzten Jahrzehnts oder sogar von heute. Ein Peak Car im Sinne eines plötzlichen Einbruchs der Pkw-Motorisierung und Pkw-Nutzung gibt es folglich nicht. Da das Mobilitätsverhalten von Personen und Gruppen relativ stabil ist, ändert sich Pkw-Mobilität nur sehr allmählich im Rhythmus des Generationenwechsels sowie über den Altersstruktureffekt.

## PKW UND ALTERNATIVE VERKEHRSMITTEL

Mobilität der Zukunft heißt auch, dass sich Mobilitätsverhalten ändert und alternative Verkehrsmittel verstärkt eingesetzt werden; hierzu zählen zum Beispiel das Fahrrad, Carsharing oder auch Fernbusse. Solche neuen Formen der Mobilität könnten künftig einen größeren Beitrag zum Personenverkehr leisten. Schließlich gibt es heute in Deutschland mehr als 70 Mio. Fahrräder, nahezu eine Million Carsharing-Nutzer und bereits über 200 Fernbusrelationen. Doch wie groß ist das Potenzial der neuen Verkehrsmittel wirklich?

Der Anteil des Fahrradverkehrs am (landgebundenen) Personenverkehr liegt bei etwa 3 %, die Anzahl der Carsharing-Fahrzeuge bei 14.000 und die Beförderungsleistung des Fernbusses unter einem Promill der Personenverkehrsleistung über alle motorisierten Landverkehrsträger. Auch wenn es künftig weitere Verschiebungen hin zu neuen Verkehrsmitteln gibt – teilweise könnte es sich aber auch um zusätzliche Verkehre handeln – können sie den Pkw im Mobilitätsmix nicht ersetzen.

Der Anteil des motorisierten Individualverkehrs an den Verkehrsleistungen aller Landverkehrsträger liegt heute bei 83 % und wird auch weiter auf heutigem Niveau liegen, weil sich die unterschiedlichen Einflüsse auf die Wahl motorisierter Landverkehrsmittel (Pkw, Krafträder, Bahnen und öffentlicher Straßenpersonenverkehr) letztlich kompensieren. Folglich muss der Pkw in allen Bereichen der Verkehrs- und Mobilitäts-politik als Hauptverkehrsmittel des Personenverkehrs weiterhin Berücksichtigung finden.

deutlich zu. Die Pkw-Verkehrsleistung je Einwohner steigt von heute 11.330 noch bis 2025 auf dann 11.650 km an und reduziert sich danach bis 2040 auf 11.400 km je Einwohner. Hierin spiegelt sich auch ein Nachfragerückgang bei der Pro-Kopf-Personenverkehrsleistung (in Pkm) insgesamt aufgrund des demografischen Wandels wider.

Die Pkw-Gesamtfahrleistungen legen nur noch bis etwa 2020 zu; von heute 610 auf 626 Mrd. Pkw-Kilometer und sinken anschließend bis 2040 auf das Niveau von 2005 ab.

## PKW-ANTRIEBE UND KRAFTSTOFFE

Eine noch wichtigere Rolle als der Pkw im Verkehrsträgermix spielen Otto- und Dieselantriebe im Pkw-Bestand: Zum 1.1.2014 waren 68,3 % bzw. rund 30,0 Mio. der 43,9 Mio. Pkw in Deutschland zugelassenen Pkw mit Ottomotor, 30,1 % bzw. 13,2

Mio. mit Dieselmotor sowie knapp 1,6 % bzw. 680.000 mit alternativen Antrieben ausgestattet. Unter den alternativen Antrieben führen Flüssiggas-Pkw mit 500.867 vor Hybrid-Pkw mit 85.575 und Erdgas-Pkw mit 79.065 sowie 12.156 Elektro- und 2.081 sonstigen Pkw.

Veränderungen im Antriebsmix des Pkw-Bestands ergeben sich aus dem anhaltend hohen Neuzulassungsanteil von Dieselantrieben von nahezu 50 % (Verdieselung). Bei den alternativen Antrieben weisen Pkw mit elektrischem Antrieb, insbesondere Hybrid-Fahrzeuge eine überdurchschnittliche Dynamik bei den Neuzulassungen auf. Im Bestand erreichen Pkw mit elektrischem Antrieb dagegen erst Flottenanteile von 0,2 %, während Pkw mit Verbrennungsmotor, das heißt mit Otto-, Diesel- oder Gasmotor, 99,8 % der deutschen Pkw bewegen. Und von den rund 100.000 Pkw mit Elektromotor besitzen die meisten – nämlich Hybride einschließlich Plug-in-Hybride – zugleich auch noch einen Verbrennungsmotor.

Das Kraftstoffangebot folgt den Antriebstechnologien im Pkw-Bestand. Die Energieversorgung des Pkw-Bestands erfolgt hauptsächlich über Otto- und Dieselmotoren. Pkw konsumierten im Jahre 2012 19,7 Mio. t Ottokraftstoffe und 14,6 Mio. t Dieselmotoren (DIW 2013).

Als relevante Kraftstoffalternative konnten sich bislang nur Biokraftstoffe etablieren, hauptsächlich in Form von Beimischungen zu fossilen Kraftstoffen. Biokraftstoffe unterliegen allerdings technischen Beimischungsgrenzen und sie müssen strenge Nachhaltigkeitsanforderungen erfüllen. Weitere alternative Kraftstoffe wie Gaskraftstoffe (LPG, CNG), elektrische Energie und auch Wasserstoff spielen im Pkw-Kraftstoffmix zurzeit noch eine untergeordnete Rolle. Umweltvorteilen

alternativer Kraftstoffe (weniger Emissionen) stehen meist Nachteile bei Energiespeicherung und Handling gegenüber. Allerdings erfordern Aufbau und Unterhaltung einer alternativen oder zusätzlichen Erzeugungs- und Verteilungsinfrastruktur hohe Investitionen und entsprechende Pkw-Flotten.

#### VERBRENNUNGSMOTOR VS. ELEKTRISCHER ANTRIEB



Eine wichtige Frage für den künftigen Pkw-Bestand ist das Verhältnis von Pkw mit Verbrennungsmotor zu Pkw mit elektrischen Antrieben. Verbrennungsmotoren werden nach wie vor weiter entwickelt und effizienter. Elektrische Antriebe (Plug-in-Hybride, batterieelektrische und Brennstoffzellenfahrzeuge) weisen gegenüber Verbrennungsmotoren jedoch erheblich höhere motorische Wirkungsgrade auf. Zudem verursachen elektrische Antriebe keine direkten Emissionen. Allerdings unterscheiden sich Effizienz und Ökobilanz bei Verbrennungs- und Elektromotor über die gesamte Nutzungskette deutlich weniger als die motorische Effizienz.

Der bedeutendste Trend bei den Pkw-Antriebstechnologien ist die zunehmende Elektrifizierung von Pkw mit Verbrennungsmotor; der Pkw-Antrieb der näheren und mittleren Zukunft ist eine Kombination von Elektroantrieb und Verbrennungsmotor – der Hybrid-Pkw. Hybride vereinen viele Vorteile beider Antriebstechnologien, darunter Effizienz, Leistung und Reichweite.

#### EVOLUTION STATT REVOLUTION

Elektromobilität ist zwar prinzipiell eine „disruptive Technologie“ (Christensen 1997), die eine etablierte Technologie einst nahezu vollständig ersetzen könnte. Gleichwohl zeichnet sich – sowohl im einzelnen Pkw wie auch im Pkw-Bestand – eher eine Evolution als eine technologische Revolution bei den Pkw-Antrieben ab.

#### SZENARIEN FÜR DEN PKW-BESTAND

Mit Hilfe von Szenario-Technik werden automobiler Zukünfte für unterschiedliche Antriebs-Kraftstoff-Konfigurationen untersucht. Ein Trendszenario, welches Pkw-Trends der jüngeren Vergangenheit fortschreibt und von einem verstärkten Einsatz von Biokraftstoffen ausgeht, sowie ein hinsichtlich Energiepolitik und Klimaschutz sehr ambitioniertes

Alternativszenario, das deutlich stärkere und schnellere Veränderungen im Pkw-Bereich mit sich bringt. Dabei untersucht das Alternativszenario im Besonderen die potenziellen Auswirkungen einer verstärkten Elektrifizierung von Antrieben und Kraftstoffen. Neben Elektromobilität wurde zuletzt vermehrt über Erdgas als weitere Alternative für Pkw-Antriebe und Kraftstoff diskutiert. Um die Potenziale von Gasantrieben und Gaskraftstoffen im motorisierten Individualverkehr zu beleuchten, wird zusätzlich als Variation des Trendszenarios ein Gasszenario (Gasszenarrette) untersucht.

**Neuzulassungen:** Die Entwicklung des künftigen Pkw-Bestands wird von Höhe und Struktur der Pkw-Neuzulassungen bestimmt. Im Trendszenario gehen die jährlichen Neuzulassungen von heute etwa 3,0 Mio. leicht auf 2,9 Mio. Neuzulassungen pro Jahr zurück, im Alternativszenario beschleunigt sich der automobiler Wandel und die Neuzulassungen steigen auf 3,3 Mio. Pkw pro Jahr. Auch bei höheren Neuzulassungszahlen steigt das Durchschnittsalter des Pkw-Bestands weiter, und zwar von heute 8,8 auf 9,4 Jahre im Alternativszenario und sogar auf 10,9 Jahre im Trendszenario.

Bei den Antrieben machen Otto- und Diesel-Pkw sowie ihre hybridisierten Pendanten im Trendszenario bis ins Jahr 2040 drei Viertel der Neuzulassungen aus, elektrische Antriebe dagegen 20%. Im Alternativszenario nimmt das Tempo des automobilen Wandels und damit der Anteil von alternativen Antrieben dagegen deutlich zu. Das gilt vor allem für elektrische Antriebe, die ihren Neuzulassungsanteil bis 2040 auf über 40% steigern, während reine und hybridisierte Otto- und Diesel-Pkw auf 55% sinken.

**Pkw-Bestand:** Der Antriebsmix des Pkw-Bestands verändert sich im Trendszenario nur relativ langsam. Von knapp 43 Mio. Fahrzeugen sind über 36 Mio. mit konventionellen Otto- und Diesel-Antrieben und ihren hybridisierten Varianten ausgestattet; 4,7 Mio. mit elektrischen Antrieben (Plug-in, batterieelektrisch und Brennstoffzelle). Im Alternativszenario wächst der Bestand von Elektroantrieben insgesamt auf 10,1 Mio. Fahrzeuge – darunter 5,5 Mio. Plug-in-Hybride, 3,1 Mio. batterieelektrische und 1,5 Mio. Brennstoffzellenfahrzeuge. Die Anzahl aller Otto- und Diesel-Pkw schrumpft bis 2040 auf 30,7 Mio. Fahrzeuge.

**Energieverbrauch:** Deutsche Pkw verbrauchten im Jahr 2013 rund 50 Mrd. Liter Benzin-Äquivalent (IBÄ) oder 1.590 Petajoule (PJ) Energie. Ottokraftstoffe hatten einen

Anteil von 55%, Dieseldieselkraftstoffe von 43% am Inländerverbrauch. Im Trendszenario geht der Energieverbrauch (Inländerverbrauch) um 45% auf 27 Mrd. IBÄ bzw. 868 PJ Energie zurück, im Alternativszenario wird er mehr als halbiert, und zwar auf dann nur noch 24 Mrd. IBÄ bzw. 759 PJ Energie. Auch im Jahr 2040 werden im Pkw-Bereich hauptsächlich flüssige Otto- und Dieseldieselkraftstoffe (einschließlich biogener Substitute) eingesetzt: im Trendszenario 86% und im Alternativszenario immerhin noch 80% der verbrauchten Energie Flüssigkraftstoffe. Im Trendszenario können Otto- und Dieseldieselkraftstoffen 20% Biokraftstoffe beigemischt werden; der Biokraftstoffverbrauch steigt von 2,1 auf 3,3 Mrd. IBÄ. Im Alternativszenario entwickelt sich elektrische Energie Ende der 2030er Jahre zum wichtigsten alternativen Energieträger. Der Fahrstromverbrauch steigt im Alternativszenario auf 71 PJ an. Der Biokraftstoffeinsatz geht trotz erhöhter 10%-Beimischung auf 1,4 Mrd. IBÄ zurück.

**Treibhausgasemissionen:** Die direkten Treibhausgasemissionen (Tank-to-Wheel), welche zwischen 1990 und 2013 von 122 Mio. t auf 116 Mio. t sanken, gehen im Trendszenario weiter bis auf 60 Mio. t und im Alternativszenario auf 48 Mio. t zurück. Bezieht man zusätzlich die Vorketten- bzw. Well-to-Tank-Emissionen mit ein, entwickeln sich die Well-to-Wheel-Emissionen von historisch 145 Mio. t (1990) auf 136 Mio. t (2013) sowie bis 2040 im Trendszenario auf 66 Mio. t und im Alternativszenario auf 59 Mio. t.

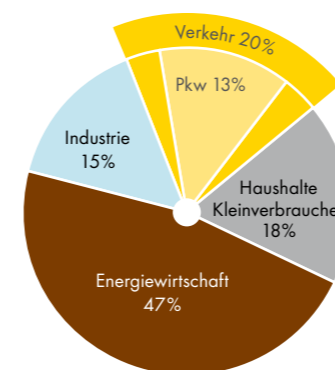
**Gasszenarrette:** In der Gasszenarrette wächst der Anteil der Gasantriebe bei den rund 3 Mio. jährlichen Neuzulassungen kontinuierlich bis 2040 auf 25% gegenüber 3% im Trendszenario; innerhalb der neu zugelassenen Gasantriebe liegen die Anteile bei 40% für CNG-Antriebe, ebenfalls 40% für CNG-Hybride sowie 20% LPG-Antriebe. Im Jahr 2040 machen Gasantriebe mit 6,3 Mio. Einheiten dann insgesamt einen Pkw-Bestandsanteil von 15% aus.

Liegt der Anteil des Gasabsatzes am Inländerverbrauch der Pkw heute noch bei rund 2%, wächst er in der Gasszenarrette zu Lasten von Otto- und Dieseldieselkraftstoffen bis 2040 auf 20% (120 PJ CNG einschließlich Biogas, 52 PJ LPG). Durch die niedrigeren spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Energieinhalt von Gas können mit 58 Mio. t direkten bzw. TiW-Emissionen gegenüber dem Trendszenario im Jahr 2040 2,5 Mio. t zusätzlich eingespart werden. WtW sinken die Emissionen auf 63 Mio. t und liegen dann 3 Mio. t unter dem Niveau des Trendszenarios.

#### AUTO-MOBILITÄT UND ENERGIEWENDE

Der Pkw verbraucht heute rund 15% der Endenergie und verursacht rund 13% der verbrennungsbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland. Wie nachhaltig entwickelt sich Auto-Mobilität in Deutschland im Verhältnis zu nationalen und europäischen Energie- und Klimazielen?

#### 50/CO<sub>2</sub>-EMISSIONEN IN DEUTSCHLAND 2012



Eigene Berechnungen; UBA 2013b

**Energie-Ziele:** Für den Verkehrssektor und damit für den Pkw relevante Energiewende-Ziele lassen sich dem Energiekonzept der Bundesregierung entnehmen. Für den Energieverbrauch des Verkehrssektors gibt es zwei Ziele: Bis 2020 soll der Endenergieverbrauch gegenüber 2005 um 10% und bis 2050 um 40% sinken (BMW 2014, 11).

Das nationale Endenergieziel für den gesamten Verkehrssektor würde der Pkw-Verkehr nach Trendszenario vorzeitig erreichen, denn bis 2020 würde bereits eine Absenkung des Endenergieverbrauchs um 13% und bis 2040 um rund 50% erreicht.

**Klima-Ziele:** Für die Treibhausgasemissionen gibt es kein sektorales, sondern nur ein nationales Ziel: Insgesamt sollen die (direkten) Treibhausgasemissionen im Zeitraum 1990 bis 2020 um 40% und bis 2040 um 70% sinken (BMW 2014, 11). Ferner wird von der europäischen Klima- und Energiepolitik für die Mitgliedsstaaten ein verbindliches Gesamtziel für Treibhausgasemissionen bis 2030 in Höhe von minus 40% gegenüber 1990 gefordert. Dazu sollen die Nicht-Emissionshandelssektoren – darunter der Verkehrssektor – ihre Treibhausgasemissionen um etwa 30% im Zeitraum 2005 bis 2030 reduzieren (EU-KOM 2014). Über weitere

erneuerbare Energien- und Effizienzziele und ihre Verbindlichkeit wird noch diskutiert. Aus dem Energie- und Klimapakete von 2008 ergibt sich schließlich noch ein Treibhausgasemissionsminderungsziel für den deutschen Nicht-Emissionshandelssektor in Höhe von 14% im Zeitraum 2005 bis 2020 (EU-KOM 2008).

Im Hinblick auf die direkten Treibhausgasemissionen erreichen Pkw eine Minderung von etwa 14% im Zeitraum 1990 bis 2020 in beiden Szenarien sowie von 1990 bis 2040 von gut 50% im Trend- und über 60% im Alternativszenario. Die für die Treibhausgas-Gesamtbilanz relevanten Well-to-Wheel-Emissionen sinken ebenfalls zwischen 50 und 60% im Zeitraum 1990 bis 2040. Durch Unterschiede im jeweiligen Energiemix sinken die Vorkettenemissionen im Trendszenario stärker (um fast vier Fünftel) als im Alternativszenario (nur um gut die Hälfte).

In den ausgewiesenen direkten Emissionen sind allerdings in der zwecks Vergleich mit den Pkw-TiW-Emissionen gewählten Abgrenzung – anders als in den nationalen Trendtabellen (UBA 2013b) – auch die Verbrennungsemissionen der Biokraftstoffe enthalten. Werden die direkten Emissionen der Biokraftstoffe vom Trend- bzw. Alternativszenario noch abgezogen, sinken die direkten Treibhausgasemissionen des Pkw-Verkehrs bis 2040 noch deutlicher, und zwar auf etwa 48 Mio. Tonnen im Trendszenario und auf ca. 44 Mio. Tonnen im Alternativszenario. Trotz direkter Emissionsminderungen von nahezu zwei Dritteln wird das nationale Treibhausgasemissionsparziel dennoch nicht erreicht.

Die EU-Klimaziele für Nicht-Emissionshandelssektoren könnten hingegen erreicht werden. Bis 2020 sinken die TiW-Emissionen (ohne Biokraftstoffe) im Vergleich zum Basisjahr 2005 um etwa 14% und bis 2030 um über 40%.

Bei der Realisierung der Energie- und Klimaziele ist zu beachten, dass im Pkw-Sektor alternative Antriebstechniken und Kraftstoffe leichter einzusetzen sind als in anderen Verkehrszweigen; von daher können Gesamtziele für den Verkehrssektor nur erreicht werden, wenn der Pkw überdurchschnittliche Energie- und Treibhausgasemissionen erbringt. Allerdings sind im Verkehr und damit auch für den Pkw-Verkehr die Substitutionspotenziale wegen der für Verkehrszwecke erforderlichen Energiespeicherung geringer als etwa im Umwandlungssektor oder in den anderen Endenergiesektoren mit stationärer Energienutzung.

#### POLITIK-MASSNAHMEN



Das Trendszenario führt bereits zu substantiellen Energieeinsparungen und Treibhausgasreduktionen. Gleichwohl stellen die langfristigen Energie- und Klimaziele für den Pkw-Sektor eine Herausforderung dar. Mit Hilfe von Erdgasantrieben und Erdgaskraftstoffen sowie mit mehr elektrischen Antrieben könnten noch höhere Einsparungen als im Trendszenario realisiert werden. Was könnte die Politik tun, um die Energiewende im Verkehrssektor noch weiter zu beschleunigen?

**Effizienz:** Weitere Energieeinsparungen können durch eine höhere Effizienz der Antriebe erreicht werden. Hier haben Hybrid-, batterieelektrische und Brennstoffzellen-Pkw deutliche Vorteile gegenüber Verbrennungsmotoren. Neue Antriebstechnologien können allerdings nur langsam über die Neuzulassungen auf den Pkw-Bestand einwirken. Für eine beschleunigte Energiewende im Pkw-Sektor müsste der Pkw-Bestand schneller umgeschlagen werden, denn selbst im Alternativszenario steigt das durchschnittliche Fahrzeugalter.

Allerdings sind alternative elektrische Antriebe noch vergleichsweise teuer. Zusätzlich benötigen sie – mit Ausnahme von Hybriden – gänzlich neue Versorgungsinfrastrukturen. Da die technischen, ökonomischen und auch ökologischen Voraussetzungen für eine vollständige Elektrifizierung des Pkw-Verkehrs nach wie vor nicht gegeben sind, ist der voll hybridisierte Pkw zurzeit eine Kompromisslösung für eine Vielzahl von Anwendungen.


**Kraftstoffe:** Zusätzliche CO<sub>2</sub>-Einsparungen können auch über emissionsärmere Kraftstoffe erreicht werden. Hier kommen nachhaltige Bio- oder auch Gaskraftstoffe in Frage. Flüssige Biokraftstoffe haben den Vorteil, dass sie auch im Fahrzeugbestand sowie in der existierenden Versorgungsinfrastruktur eingesetzt werden können – und Antriebstechnik und Kraftstoffe im Fahrzeugbestand, weniger bei den Neuzulassungen entscheiden letztendlich über die aktuellen sektoralen CO<sub>2</sub>-Emissionen. Gaskraftstoffe besitzen gegenüber flüssigen fossilen Kraftstoffen ebenfalls Emissionsvorteile. Um diese zu realisieren, müssen Gas-Pkw substantielle Anteile am Bestand erreichen; teilweise benötigen sie jedoch noch zusätzlicher Infrastruktur. Damit schließlich auch elektrische Antriebe Treibhausgasemissionen einsparen, muss ihre Energie verstärkt aus erneuerbaren Energien kommen – was erst teilweise der Fall ist.



## LITERATURVERZEICHNIS

- ADAC 2014: ADAC Fahrzeugtechnik, Berechnungsgrundlagen für die standardisierte Kostenberechnung, München, Stand 07/2014.
- Adolf 2010: Jörg Adolf, Harte Fakten und Szenarien, in: Antonio Schnieder, Tom Sommerlatte (Hrsg.), Die Zukunft der deutschen Wirtschaft, Erlangen 2010, S. 98-104.
- Adolf 2011: Jörg Adolf, Gastkommentar: Nach Super E10, in: Internationales Verkehrswesen, 63 (3), Mai 2011, S. 94.
- Adolf 2013: Jörg Adolf, Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie – Energiewende im Verkehr? in: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 63. Jg. (2013) Heft 1/2, S. 60/61.
- Augustin 2014: Katrin Augustin, Karen Wanner et al., Neue Fernbushalte und Genehmigungspraxis, Chancen für die Kommunen, Untersuchung im Auftrag von MeinFernbus GmbH, ADAC Postbus, VDA, Berlin 2014.
- BAFA 2014: Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA), Amtliche Mineralölnoten für die Bundesrepublik Deutschland. Monat: Dezember 2013, Eschborn 2014.
- BASt 2004: Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Fahrleistungserhebung 2002, Teil: Begleitung und Auswertung, Band 1: Inländerfahrleistung 2002. Anhang IV Ergebnistabellen. Heilbronn/Mannheim 2004.
- BCS 2014: Bundesverband CarSharing (BCS), Häufig gestellte Fragen, <http://www.carsharing.de/alles-ueber-carsharing/faq>.
- Bester 2007: Helmut Bester, Theorie der Industrieökonomik, 4. Auflage, Berlin u.a.O. 2007.
- BMU 2014: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMU), Erneuerbar mobil, Berlin 2014.
- BMVBS 2012: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), Nationaler Radverkehrsplan 2020, Berlin 2012.
- BMVBS 2013: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), Die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung (MKS). Energie auf neuen Wegen, Berlin 2013.
- BMW 2014: Bundesministerium für Wirtschaft (BMWi), Zweiter Monitoring-Bericht „Energie der Zukunft“, Berlin 2014.
- Chamon et al. 2008: Marcos Chamon, Paolo Mauro, Yohei Okawa, Mass car ownership in the emerging market giants, Economic Policy, April 2008, pp. 243-296.
- Christensen 1997: Clayton M. Christensen, Disruptive Innovations, New York 1997.
- DAT 2014: DAT Group. DAT Report 2014, Ostfildern 2014.
- dena 2011a: Deutsche Energieagentur (dena), Das neue Pkw-Label: Wer vergleicht, fährt besser. Wichtige Informationen für den Neuwagenkauf, Berlin 2011.
- dena 2011b: Deutsche Energieagentur (dena), Erdgas und Biomethan im künftigen Kraftstoffmix. Handlungsbedarf und Lösungen für eine beschleunigte Etablierung im Verkehr. Aktualisierte Fassung, Berlin 2011.
- DIW 2013: Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW), Verkehr in Zahlen 2013/2014, Hrsg. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), Hamburg 2013.
- DIW/TNS 2013: Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW), TNS Infratest Sozialforschung (TNS), Sozio-oekonomisches Panel (SOEP v.29). Daten der Jahre 1984-2012, Berlin/München 2013.
- DLR 2013: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Fahrzeugkonzepte, Der Pkw-Markt bis 2040: Was das Auto von morgen antreibt. Szenario-Analyse im Auftrag des Mineralölwirtschaftsverbandes, Stuttgart 2013.
- DLR et al. 2013: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Energie und Umweltforschung (ifeu), Ludwig Bölkow Systemtechnik (LBST), Deutsches Biomasseforschungszentrum (DBFZ), Analyse aktueller Szenarien zur Entwicklung des Verkehrs in Deutschland und dessen Umweltwirkungen, Heidelberg u.a.O. 2013.
- DLR et al. 2014a: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Energie- und Umweltforschung (ifeu), Ludwig-Bölkow-Systemtechnik (LBST), Deutsches Biomasseforschungszentrum (DBFZ), CNG und LPG – Potenziale dieser Energieträger auf dem Weg zu einer nachhaltigeren Energieversorgung des Straßenverkehrs, Berlin u.a.O. 2014.
- DLR et al. 2014b: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Energie- und Umweltforschung (ifeu), Ludwig-Bölkow-Systemtechnik (LBST), Deutsches Biomasseforschungszentrum (DBFZ), Power-to-Gas (PtG) im Verkehr. Aktueller Stand und Entwicklungsperspektiven, Berlin u.a.O. 2014.
- Döring 2012: Thomas Döring, Hat die Elektromobilität eine Zukunft?, in: Wirtschaftsdienst, Jg. 92, Heft 8, S. 563-571.
- EEA 2014: European Environmental Agency (EEA), Monitoring CO<sub>2</sub> emissions from new passenger cars in the EU: summary of data for 2013, Copenhagen 2014.
- EMPA 2010: Eidg. Materialprüfungs- und Versuchsanstalt für Industrie, Bauwesen und Gewerbe (EMPA), Vergleichende Ökobilanz individueller Mobilität: Elektromobilität versus konventionelle Mobilität mit Bio- und fossilen Treibstoffen, Dübendorf/Schweiz, 2010.
- 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 2001/77/EG und 2003/30/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 98/70/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 CO<sub>2</sub>-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen, in: Amtsblatt der Europäischen Union, L 140/1-15, Brüssel, den 5. Juni 2009.
- EP/Rat 2014: Europäisches Parlament/Rat (EP/Rat), Verordnung 333/2014/EU zur Änderung der Verordnung EG/443/2009 hinsichtlich der Festlegung der Modalitäten für das Erreichen des Ziels für 2020 zur Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen neuer Personenkraftwagen, in: Amtsblatt der Europäischen Union, L 103/115-121, Brüssel, den 5. April 2014.
- EU-KOM 2008: EU-Kommission (EU-KOM), Entscheidung über die Anstrengungen der Mitgliedstaaten zur Reduktion ihrer Treibhausgasemissionen mit Blick auf die Erfüllung der Verpflichtungen der Gemeinschaft zur Reduktion der Treibhausgasemissionen bis 2020, KOM(2008), 17 endgültig, 2008/0014 (COD), Brüssel, den 23.1.2008.
- EU-KOM 2014: EU-Kommission (EU-KOM), Ein Rahmen für die Klima- und Energiepolitik im Zeitraum 2020-2030. Mitteilung, COM(2014) 15 final, Brüssel, den 22.1.2014.
- Ferguson 1988: Paul R. Ferguson, Industrial Economics: Issues and Perspectives, Basingstoke/London 1988.
- Frischknecht 2012: Rolf Frischknecht, Umweltaspekte von Elektroautos – Ein Argumentarium, ESU-services Ltd., Uster/Schweiz 2012.
- Fritsche et al. 2012: Uwe Fritsche, Horst Fehrenbach, Susanne Köppen, Jörg Adolf, Dorothea Liebig, Shell Biokraftstoff-Studie. Nach Super E10: Welche Rolle für Biokraftstoffe? Fakten, Trends und Perspektiven, Darmstadt/Heidelberg/Hamburg 2012.
- Hülsmann et al. 2014: Friederike Hülsmann, Wiebke Zimmer, Konrad Götz, Georg Sunderer, Forschung zum neuen Carsharing. Wissenschaftliche Begleitforschung zu car2go, Vortrag Halbzeitkonferenz, Berlin, 3. Juli 2014.
- ICCT 2013: International Council on Clean Transportation (ICCT), From laboratory to road. A comparison of official and 'real-world' fuel consumption and CO<sub>2</sub> values for cars in Europe and the United States, Peter Mock, John German, Anup Bandivadekar (ICCT), Iddo Riemersma (Sidekick Project Support), Norbert Ligterink (TNO), Udo Lambrecht (IFEU), Washington u.a.O. 2013.
- IEA 2013: International Energy Agency (IEA), World Energy Outlook, Paris 2013.
- IEA 2014: International Energy Agency (IEA), Energy Technology Perspectives, Paris 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“ (TREM-OD, Version 5.3) für die Emissionsberichterstattung 2013 (Berichtsperiode 1990-2011). Version 5.01. Endbericht, Heidelberg 2012.
- ifmo 2008: Institut für Mobilitätsforschung (ifmo), Mobilität 2025 - Der Einfluss von Einkommen, Mobilitätskosten und Demografie, Berlin 2008.
- ifmo 2010: Institut für Mobilitätsforschung (ifmo), Zukunft der Mobilität. Szenarien für das Jahr 2030. Zweite Fortschreibung, München 2010.
- ifmo 2011: Institut für Mobilitätsforschung (ifmo), Mobilität junger Menschen im Wandel – multimodaler und weiblicher, München 2011.
- ifmo 2013: Institut für Mobilitätsforschung (ifmo), „Mobility Y“- The Emerging Travel Patterns of Generation Y, Munich 2013.
- ika 2012: Institut für Kraftfahrzeuge (ika), CO<sub>2</sub>-Reduzierungspotenziale bei Pkw bis 2020, Aachen 2012.
- Infas/DIW 2003: Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH (infas), Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW), Mobilität in Deutschland (MiD) 2002, Kontinuierliche Erhebung zum Verkehrsverhalten, Endbericht, Tabellenband – Basisstichprobe, Bonn/Berlin 2003.
- Infas/DLR 2010a: Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH (Infas), Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). Institut für Verkehrsforschung, Mobilität in Deutschland (MiD) 2008. Ergebnisbericht. Struktur – Aufkommen – Emissionen – Trends, Bonn/Berlin 2010.
- Infas/DLR 2010b: Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH (infas), Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Verkehrsforschung, Mobilität in Deutschland (MiD) 2008. Tabellenband, Bonn/Berlin 2010.
- Intrapolan/BVU (2014): Intrapolan Consult GmbH, Beratergruppe Verkehr + Umwelt GmbH (BVU), Verkehrsverflechtungsprognose 2030. Schlussbericht, Freiburg u.a.O. 2014.
- JEC 2013: 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. Tank-to-Wheels-Report Version 4, Luxemburg 2013.
- JEC 2014: 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.
- KBA 2009: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), Verzeichnis für die Zuordnung der Fahrzeughalter nach der Systematik der Wirtschaftszweige (SV5), 1. Ausgabe, Flensburg 2009.
- KBA 2011a: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), Fahrzeugalter. Fachartikel, Flensburg 2011.
- KBA 2011b: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), Halter der Fahrzeuge. Fachartikel, Flensburg 2011.
- KBA 2012: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Haltern, Wirtschaftszweigen, Jahr 2011, FZ24, Flensburg 2012.
- KBA 2013a: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Haltern, Wirtschaftszweigen am 1. Januar 2013, FZ 23, Flensburg, verschiedene Jahre, zuletzt 2013.
- KBA 2013b: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA): Neuzulassungen, Besitzumschreibungen, Außerbetriebsetzungen von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern Jahr 2012. FZ 7, Flensburg, verschiedene Jahre, zuletzt 2013.
- KBA 2013c: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA): Privat und gewerblich zugelassene Personenkraftwagen (Pkw) – der kleine Unterschied, Kurzbericht, Flensburg 2013.
- KBA 2014a: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen, FZ 13, Flensburg 2014.
- KBA 2014b: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Fahrzeugalter, FZ 15, Flensburg 2014.
- KBA 2014c: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen, FZ 14, Flensburg 2014.
- Kloas et al. 2004: Jutta Kloas, Hartmut Kuhfeld, Uwe Kunert, Straßenverkehr: Eher Ausweichreaktion auf hohe Kraftstoffpreise als Verringerung der Fahrleistungen, in: DIW-Wochenbericht 41/2004, S. 602–612.
- Kuhnimhof et al. 2013: Tobias Kuhnimhof, Matthias Wirtz, Wilko Manz, Decomposing Young Germans' Altered Car Use Patterns: Lower Incomes, More Students, Decrease in Car Travel by Men, and More Multimodality, in: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Issue 2320, pp. 64–71.
- Kunert et al. 2012: Uwe Kunert, Sabine Radke, Bastian Chlond, Martin Kagerbauer, Auto-Mobilität: Fahrleistungen steigen weiter, in: DIW-Wochenbericht Nr. 47/2012, S. 3–14.
- Kunert/Radke 2012: Uwe Kunert, Sabine Radke, Personenverkehr in Deutschland – mobil bei hohen Kosten, in: DIW-Wochenbericht Nr. 24/2012, S.3–12.
- Kunert/Radke 2013: Nachfrageentwicklung und Kraftstoffeinsatz im Straßenverkehr: Alternative Antriebe kommen nur schwer in Fahrt, in: DIW-Wochenbericht 50/2013, S. 13-23.
- Lenz/Bogenberger 2014: Barbara Lenz, Klaus Bogenberger, Wirkung von E-Carsharing-Systemen auf Mobilität und Umwelt in urbanen Räumen, Vortrag Halbzeitkonferenz, Berlin, 3. Juli 2014.
- Loose 2014: Willi Loose, Stand und Entwicklung des CarSharing in Deutschland, Vortrag, 2. AMI-Symposium Carsharing, Leipzig, 2. Juni 2014.
- Ökoinstitut et al. (2013): Öko-Institut e.V., IINAS GmbH, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Fraunhofer ISI, Weiterentwicklung des Analyseinstruments Renewability RENEWABILITY II – Szenario für einen anspruchsvollen Klimaschutzbeitrag des Verkehrs, Dessau 2013.
- Prognos 2014: Prognos, Deutschland Report 2020 | 2030 | 2040. Langfristprognosen zur Zukunft Deutschlands, Basel/München 2014.
- Prognos /EWI/GWS 2014: Prognos, Energiewirtschaftliches Institut (EWI), Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforshung mbH (GWS), Entwicklung der Energiemärkte – Energierferenzprognose, Basel/Köln/Osnabrück, Juni 2014.
- ProgTrans 2010: ProgTrans, World Transport Reports. Analyses and Forecasts. Volume I: 27 EU Member States + Switzerland, Edition 2010/2011, Basel 2010.

- RAND/ifmo 2013: RAND Corporation, Institute for Mobility Research (ifmo), The Future of Mobility. Scenarios for the United States in 2030, by Johanna Zmud, Liisa Ecola, Peter Phleps, Irene Feige, Santa Monica/California 2013.
- RAND/ifmo 2014: RAND Corporation, Institute for Mobility Research (ifmo), The Future of Driving in Developing Countries, Liisa Ecola, Charlene Rohr, Johanna Zmud, Tobias Kuhnimhof, Peter Phleps, Santa Monica/California 2014.
- Schade et al. 2012: Wolfgang Schade, Christoph Zanker, André Kühn, Steffen Kinkel, Angela Jäger, Tim Hettesheimer, Thomas Schmall, Zukunft der Automobilindustrie. Innovationsreport, Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag, Arbeitsbericht Nr. 152, Berlin 2012.
- Shell 2009: Shell Pkw-Szenarien bis 2030. Fakten, Trends und Handlungsoptionen für nachhaltige Auto-Mobilität, Hamburg 2009.
- Shell 2013a: Shell, 40 Years of Shell Scenarios, The Hague 2013.
- Shell 2013b: Shell, New Lens Scenarios, The Hague 2013.
- Shell 2013c: Shell, Erdgas als Kraftstoff – Eine Brückentechnologie für die Mobilität der Zukunft?, Hamburg 2013.
- Shell 2014: New Lenses on Future Cities. A New Lens Scenarios Supplement, The Hague 2014.
- Shell/DLR 2010: Shell Lkw-Studie. Fakten, Trends und Perspektiven im Straßengüterverkehr bis 2030, Berlin/Hamburg 2010.
- Sinus/ADFC 2013: Sinus Markt- und Sozialforschung GmbH/Allgemeiner Deutscher Fahrrad-Club (ADFC), Fahrrad-Monitor Deutschland 2013. Ergebnisse einer repräsentativen Online-Befragung, Heidelberg 2013.
- Sperling/Gordon 2009: Daniel Sperling, Deborah Gordon, Two Billion Cars. Driving toward Sustainability, Oxford/New York 2009.
- StBA 2009: Statistisches Bundesamt (StBA), Bevölkerung Deutschlands bis 2060. 12. Koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung, Wiesbaden 2009.
- StBA 2010a: Statistisches Bundesamt (StBA), Bevölkerung und Erwerbstätigkeit. Entwicklung der Privathaushalte bis 2030 – Ergebnisse der Haushaltsvorausberechnung, Wiesbaden 2010.
- StBA 2010b: Statistisches Bundesamt (StBA), Wirtschaftsrechnungen. Einkommens- und Verbrauchsstichprobe. Aufwendungen privater Haushalte für den Privaten Konsum 2008. Fachserie 15 Heft 5, Wiesbaden 2010.
- StBA 2011: Statistisches Bundesamt (StBA), Preise auf einen Blick, Wiesbaden 2011.
- StBA 2013a: Statistisches Bundesamt (StBA), Wirtschaftsrechnungen, Einkommens- und Verbrauchsstichprobe, Ausstattung privater Haushalte mit ausgewählten Gebrauchsgütern 2013, Fachserie 15, Heft 1, Wiesbaden 2013.
- StBA 2013b: Statistisches Bundesamt (StBA), Zensus 2011. Ausgewählte Ergebnisse. Tabellenband zur Pressekonferenz, Wiesbaden 2013.
- StBA 2014a: Statistisches Bundesamt (StBA), Verkehr aktuell, Fachserie 8, Reihe 1.1, Wiesbaden 2014.
- StBA 2014b: Statistisches Bundesamt (StBA), Wirtschaftsrechnungen. Laufende Wirtschaftsrechnungen. Einnahmen und Ausgaben privater Haushalte 2012. Fachserie 15 Reihe 1, Wiesbaden 2014.
- Streit et al. 2014: Tatjana Streit, Martin Kagerbauer, Bastian Chlond, Christine Weiss, Peter Vortisch, Dirk Zumkeller (Karlsruher Institut für Technologie), Deutsches Mobilitätspanel (MOP) - Wissenschaftliche Begleitung und Auswertungen. Bericht 2012/2013: Alltagsmobilität und Fahrleistungen, Karlsruhe 2014.
- UBA 2013a: Umweltbundesamt (UBA), Konzept zur zukünftigen Beurteilung der Effizienz von Kraftfahrzeugen, Dessau 2013.
- UBA 2013b: Umweltbundesamt (UBA), Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen 1990 – 2012. Arbeitsstand: 25.11.2013, Dessau 2013.
- UBA 2014, Umweltbundesamt (UBA), Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2014. Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2012, Dessau 2014.
- UN 2013: United Nations (UN), Population Division of the Department of Economic and Social Affairs, World Population Prospects. The 2012 Revision, New York 2013.
- UN 2014: United Nations (UN), Population Division of the Department of Economic and Social Affairs, World Urbanization Prospects. The 2014 Revision, New York 2014.
- Varian 1989: Hal R. Varian, Mikroökonomie, 2. Auflage, München/Wien 1989.
- VDA 2013: Verband der Automobilindustrie (VDA), Tatsachen und Zahlen 2013, 77. Folge, Berlin 2013.
- VDA 2014: Verband der Automobilindustrie (VDA), Jahresbericht 2014, Berlin 2014.
- Wagner et al. 2007: Hermann-Josef Wagner, Marco K. Koch, Jörg Burkhardt, Thomas Große Böckmann, Norbert Feck, Philipp Kruse, CO<sub>2</sub>-Emissionen der Stromerzeugung. Ein ganzheitlicher Vergleich verschiedener Techniken, S. 44 – 52, BWK Bd. 59, Nr. 10, Düsseldorf 2007.
- WBCSD 2004: World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), Mobility 2030: Meeting the challenges to mobility. The Sustainability Project. Full Report, Geneva 2004.
- WFCC 2013: Worldwide Fuel Charter Committee (WFCC), Worldwide Fuel Charter. Fifth Edition, Brussels u.a.O. 2013.
- Wietschel et al. 2013: Patrick Plötz, Till Gnann, André Kühn, Martin Wietschel, Markthochlaufszzenarien für Elektrofahrzeuge. Langfassung, Fraunhofer ISI, Karlsruhe 2013.
- Wilkinson/Kupers 2013: Angela Wilkinson, Roland Kupers, Living in the Futures, in: Harvard Business Review, May 2013, S. 119-127.
- World Bank 2014: The World Bank, World Development Indicators 2014, Washington 2014.



Shell Deutschland Oil GmbH  
22284 Hamburg  
[www.shell.de](http://www.shell.de)