



Bund für
Umwelt und
Naturschutz
Deutschland



KLIMAFREUNDLICHER VERKEHR IN DEUTSCHLAND

WEICHENSTELLUNGEN BIS 2050

Herausgeber:

WWF Deutschland
Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (BUND)
Germanwatch e.V.
Naturschutzbund Deutschland e.V. (NABU)
Verkehrsclub Deutschland e.V. (VCD)

Stand: Juni 2014

Autoren/Kontakt:

Johannes Erhard (WWF), johannes.erhard@wwf.de
Dr. Werner Reh (BUND), werner.reh@bund.net
Dr. Manfred Treber (Germanwatch), treber@germanwatch.org
Dietmar Oeliger, Daniel Rieger (NABU), dietmar.oeliger@nabu.de, daniel.rieger@nabu.de
Michael Müller-Görnert (VCD), michael.mueller-goernert@vcd.org

Organisation, Koordination:

Johannes Erhard (WWF Deutschland)

Wissenschaftliche Begleitung und Szenarioberechnung:

Ruth Blanck, Dr. Wiebke Zimmer (Öko-Institut e.V.), r.blanck@oeko.de, w.zimmer@oeko.de

**Konsultierte Institutionen und Personen:**

Michael Holzhey (KCW)
Dr. Franziska Müller-Langer, Stefan Majer, Karin Naumann (Deutsches Biomasseforschungszentrum)
Peter Kasten (Öko-Institut e.V.)
Dr. Boris Krostitz (DB Mobility Logistics)
Dr. Thomas Rössler (Hanseatic Transport Consultancy – HTC)

Redaktionelle Bearbeitung: Thomas Köberich (WWF Deutschland)

Gestaltung: Wolfram Egert

Produktion: Sven Ortmeier, Maro Ballach (WWF Deutschland)

Bildnachweise: Pojoslaw, Simone Becchetti, code6d, Mihajlo Maricic, 7000/Istockphoto

Cornelius Schmitz, Murat Subatli, Stefan Ziese/Zoonar | Morad Hegui, jcg_oida, Marco2811, Fotolia XXV/Fotolia

Dieses Projekt wurde gefördert von:



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz,
Bau und Reaktorsicherheit



Die fachliche Betreuung erfolgte durch das Referat IG I 5 „Umwelt, Verkehr, Elektromobilität“ des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit sowie das Fachgebiet I 3.1. „Umwelt und Verkehr“ am Umweltbundesamt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den AutorInnen.

Abbildungs-, Tabellen- und Abkürzungsverzeichnis	5
Zusammenfassung/Summary	6
1 Problemstellung und Zielvorstellung für den Verkehrssektor	12
2 Projekthintergrund und Vorgehensweise	14
3 Bilanzgrenzen und Methodik	15
4 Ausgestaltung des Szenarios	17
4.1 Verkehrsnachfrage im Personenverkehr	17
4.1.1 Bevölkerungsentwicklung	17
4.1.2 Wegeanzahl	17
4.1.3 Modal Split	18
4.1.4 Wegelängen	21
4.2 Verkehrsnachfrage im Güterverkehr	22
4.2.1 Verkehrsaufkommen und Transportweiten	22
4.2.2 Modal Split	24
4.2.3 Auslastung im Straßengüterverkehr	26
4.3 Luft- und Seeverkehr	26
4.3.1 Luftverkehr	26
4.3.2 Seeverkehr	29
4.4 Antriebstechnologien	30
4.4.1 Pkw-Technologien	30
4.4.2 Technologien leichter Nutzfahrzeuge	35
4.4.3 Lkw-Technologien	35
4.4.4 Luft- und Seeverkehr	36
4.5 Kraftstoffe	37
4.5.1 Biokraftstoffe	38
4.5.2 Strombasierte Kraftstoffe	43
4.5.3 Kraftstoffeinsatz nach Verkehrsmittel	46
5 Ergebnisse	47
5.1 Verkehrsnachfrage im Personenverkehr	47
5.2 Verkehrsnachfrage im Güterverkehr	49
5.3 Endenergiebedarf	51
5.4 Treibhausgasemissionen	54
5.5 Einordnung der Ergebnisse im Vergleich zu bestehenden Studien	56
5.6 Schlussfolgerungen aus den Szenario-Ergebnissen	57
6 Politischer Rahmen zur Umsetzung des Klimaschutzes im Verkehrssektor	60
6.1 Zielgerichtete Verkehrsplanung	60
6.2 Lebenswerte Städte	63
6.3 Effizienz und alternative Antriebe	66
6.4 Internalisierung der externen Kosten	67
6.5 Nachhaltige Kraftstoffalternativen	68
Literaturverzeichnis	70
Fußnoten	74



Abbildungsverzeichnis

Abb. 4.1	Wegeanzahl nach Wegezwecken	18
Abb. 4.2	Modal Split im Personenverkehr nach Raumtypen (ohne Luftverkehr)	21
Abb. 4.3	Anteile an Verkehrsaufkommen und -leistung nach Gütergruppen, heute	22
Abb. 4.4	Aufkommen und Verkehrsleistung nach Gütergruppen	23
Abb. 4.5	Modal Split im Güterverkehr im Jahr 2050	26
Abb. 4.6	Pkw-Neuzulassungen nach Antriebstypen	32
Abb. 4.7	CO ₂ -Emissionen von Pkw-Neuzulassungen in Deutschland (NEFZ)	34
Abb. 5.1	Verkehrsleistung im Personenverkehr	47
Abb. 5.2	Pkw-Fahrleistung nach Größenklassen	48
Abb. 5.3	Pkw-Bestand nach Antriebsarten	48
Abb. 5.4	Verkehrsleistung im Güterverkehr (ohne internat. Seeverkehr)	49
Abb. 5.5	Endenergiebedarf nach Verkehrsmitteln (inkl. internationalem Verkehr)	51
Abb. 5.6	Endenergiebedarf im Verkehrssektor nach Energieträgern	52
Abb. 5.7	Endenergiebedarf im Jahr 2050 nach Verkehrsbereichen	52
Abb. 5.8	Stromnachfrage des Verkehrssektors	53

Tabellenverzeichnis

Tab. 4.1	CO ₂ -Emissionen von Pkw-Neuzulassungen in der EU 2025 und 2030 (NEFZ)	34
Tab. 4.2	Biokraftstoffpotenzialabschätzung aus Abfall- und Reststoffen in Deutschland	42
Tab. 5.1	Erreichte Treibhausgasemissionsminderung im Verkehrssektor und verbleibende Reduktionslücke	55
Tab. 5.2	Vergleich der Kenngrößen bestehender Szenarien	56

Abkürzungsverzeichnis

/a	pro Jahr	Mio.	Millionen
ARA	Antwerpen-Rotterdam-Amsterdam	MIV	motorisierter Individualverkehr
ATRO	absolut trocken	MJ	Megajoule
BAU	business as usual	Mrd.	Milliarden
BEV	Battery Electric Vehicle	Nzl	Neuzulassungen
BtL	biomass-to-liquid	ÖPNV	öffentlicher Personennahverkehr
DBFZ	Deutsches Biomasseforschungszentrum	ÖV	öffentlicher Verkehr
EHS	europäisches Emissionshandelssystem	PHEV	Plug-In Hybrid Electric Vehicle
FQD	Fuel Quality Directive	PJ	Petajoule
FT	Fischer-Tropsch	PV	Personenverkehr
GV	Güterverkehr	RED	Renewable Energy Directive
HEFA	hydroprocessed esters and fatty acids	REEV	Range-Extended Electric Vehicle
HVO	hydrotreated vegetable oil	RFI	Radiation Forcing Index
ICAO	International Civil Aviation Organization	SNG	synthetic natural gas
IMO	International Maritime Organisation	SPFV	Schienenpersonenfernverkehr
iLUC	indirect land use change	SUV	Sport Utility Vehicle
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change	t	Tonnen
KEP	Kurier-Express-Paket	TEN	Trans-European Networks
KV	kombinierter Verkehr	TEU	twenty-foot equivalent unit
kWh	Kilowattstunde	tkm	Tonnenkilometer
LNF	leichte Nutzfahrzeuge	TWh	Terawattstunde
LNG	liquefied natural gas	UCO	used cooking oil
LuFV	Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung	UN	United Nations
LUTRO	lufttrocken	WLTP	Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedures
MiD	Mobilität in Deutschland		

Zusammenfassung

Im vorliegenden Verbändekonzept „Klimafreundlicher Verkehr in Deutschland“ zeigen die Umweltverbände WWF, BUND, Germanwatch, NABU und VCD einen Weg auf, wie sich im deutschen Verkehrssektor die Treibhausgasemissionen bis 2050 um 95% reduzieren lassen. Die Kernaussage lautet: Im Personen- und Güterverkehr müssen neben technischen Maßnahmen zur Verringerung des Energiebedarfs vor allem Maßnahmen zur Verkehrsvermeidung und -verlagerung auf umweltfreundlichere Verkehrsmittel ergriffen werden. Bis 2050 lassen sich so der Endenergiebedarf des Verkehrssektors um knapp 70% (gegenüber 2005) und die Treibhausgasemissionen des Verkehrs um 64% (gegenüber 1990) reduzieren. Damit die verbleibende Lücke zur fast vollständigen Minderung der Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor geschlossen wird, müssen neben Strom aus erneuerbaren Energien auch Gas- und Flüssigkraftstoffe auf regenerativer Basis eingesetzt werden. Ob und wie diese unter anspruchsvollen Nachhaltigkeitsanforderungen verfügbar gemacht werden können, ist heute noch ungewiss.

Deutschland hat sich das Ziel gesetzt, seine Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2050 um 80 bis 95 % gegenüber 1990 zu reduzieren. Soll die globale Erderwärmung bis zum Ende des Jahrhunderts gegenüber der vorindustriellen Zeit auf maximal 2 °C begrenzt werden, muss sich Deutschland als Industrienation am oberen Rand dieser Bandbreite orientieren. Deutschland wird seine Klimaziele jedoch verfehlen, wenn nicht auch der Verkehrssektor eine entsprechende Minderungsleistung erbringt. Während an der Energiewende im Stromsektor intensiv gearbeitet wird, hat die Bundesregierung bisher eine an den Klimazielen ausgerichtete Verkehrspolitik vermissen lassen. Der Verkehrssektor verantwortet derzeit einen Anteil von 20 % der energiebedingten Treibhausgasemissionen. Im Vergleich zu den anderen Sektoren wurden im Verkehrsbereich die Klimaemissionen nur unterdurchschnittlich verringert. Bezieht man den von Deutschland ausgehenden internationalen Luft- und Seeverkehr mit ein, sind die Verkehrsemissionen zwischen 1990 und 2012 sogar um 2,5 % gestiegen.

Den Kern des Verbändekonzepts bildet ein Klimaschutzszenario, das die oben beschriebene Zielvorstellung eines nachhaltigen Verkehrssystems quantifiziert. Das Verbändekonzept bezieht dabei auch den von Deutschland ausgehenden internationalen Luft- und Seeverkehr mit ein und berücksichtigt die höhere Klimawirksamkeit der Luftverkehrsemissionen. Dem Szenario liegen Annahmen zugrunde, die deutlich machen, mit welcher Veränderung der politischen Rahmenbedingungen sowie unseres Mobilitätsverhaltens das oben genannte Ziel zu erreichen ist. Im Vordergrund stehen Maßnahmen, die die Mobilität aufrechterhalten und gleichzeitig mit einer Steigerung der Lebensqualität verbunden sind. So werden zum Beispiel neben den Treibhausgasemissionen auch Lärm und Schadstoffemissionen reduziert und attraktive öffentliche Räume geschaffen.

Der Personenverkehr verringert sich bis 2050 um 15%. Er wird langfristig von einer rückläufigen Bevölkerungszahl und dem demografischen Wandel beeinflusst. In einer alternden Gesellschaft gibt es eine Verschiebung von Arbeits- und Ausbildungswegen hin zu mehr Freizeitverkehr. Da Güter des täglichen Bedarfs zunehmend online eingekauft werden, reduzieren sich die Einkaufswege und der Güterverteilerverkehr nimmt dementsprechend zu. Die Wahl der Verkehrsmittel verändert sich deutlich: Während heute der Pkw-Besitz dominiert, zählt langfristig vor allem Flexibilität. Besonders im urbanen und suburbanen Raum greift man je nach Bedarf auf (Leih-)Fahrräder und Pedelecs sowie auf gut vernetzte Angebote des öffentlichen Verkehrs und elektrisch betriebene Carsharing-

Fahrzeuge zurück. Für längere Strecken steht ein leistungsfähiges Bahn- und Fernbusnetz mit bundesweit aufeinander abgestimmten Anschlüssen zur Verfügung. Dadurch rollen im Jahr 2050 nur noch etwa halb so viele Pkw wie heute auf deutschen Straßen. Die Politik unterstützt diese Entwicklungen durch die integrierte Förderung attraktiver Angebote des öffentlichen Verkehrs sowie durch den Ausbau der Fahrradinfrastruktur. Flankierend wird eine entfernungs- und emissionsabhängige Pkw-Maut eingeführt. Die EU-Grenzwerte für den CO₂-Ausstoß von PKW-Neuwagen werden bis 2025 auf maximal 65–68 Gramm CO₂/km und bis 2030 auf maximal 50 Gramm CO₂/km verschärft.

Der Güterverkehr in Deutschland nimmt zwar bis 2030 weiter zu, stabilisiert sich aber langfristig auf heutigem Niveau. Das Wachstum der durchschnittlichen Transportweiten im Güterverkehr, das in der Vergangenheit vor allem aus der EU-Integration resultierte, setzt sich hingegen nicht fort. Zumindest bei Nahrungs- und Futtermitteln gewinnen regionale Kreisläufe wieder an Bedeutung. Das Transportaufkommen, sprich die Menge der pro Jahr transportierten Güter, wächst bis 2050 nur noch leicht. Während das Transportaufkommen im Transitverkehr noch etwas ansteigt, geht es bei den fossilen Energieträgern, wie zum Beispiel Kohle oder Erdöl, durch die konsequente Umsetzung der Energiewende drastisch zurück. Bahn und Binnenschiff können ihre Anteile an den Transporten deutlich steigern. Insgesamt wird rund die Hälfte der Gütertransporte im Jahr 2050 mit diesen Verkehrsmodi absolviert. Auch die Kombination verschiedener Verkehrsträger gewinnt an Bedeutung. In Städten werden kleine elektrisch betriebene Lkw und Lastenräder in der Auslieferung eingesetzt. Die Politik unterstützt die Entwicklungen im Güterverkehr mit einer Erhöhung und Ausweitung der Lkw-Maut. Das Ziel einer Verdoppelung der Kapazität der Schiene auf 225 Mrd. Tonnenkilometer bis 2050 wird durch eine zielorientierte Verkehrsinfrastrukturplanung in Deutschland begleitet. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Stärkung des Schienenverkehrs zur Hinterlandanbindung der Seehäfen.

Der Luftfrachtverkehr wächst bis 2050 weiter um rund ein Drittel. Die Zunahme des Personenflugverkehrs hingegen schwächt sich ab und geht bis 2050 leicht zurück. Die Einbeziehung des Luftverkehrs inklusive internationaler Flüge in einen wirksamen Emissionshandel wirkt sich zunehmend auf die Ticketpreise aus. Gleichzeitig werden Subventionen für Regionalflughäfen von der Politik abgebaut. Aufgrund der höheren Ticketpreise geht der Trend von vielen Kurztrips wieder zu zeitlich längeren und dafür selteneren Flugreisen. Telemeetings ersetzen vermehrt Geschäftsflüge. Trotzdem stellt der Flugverkehr langfristig aufgrund der höheren Klimawirksamkeit seiner Emissionen in hohen Luftschichten ein erhebliches Problem für das Erreichen der Klimaziele dar.

Trotz ambitionierter Maßnahmen zur Verkehrsvermeidung und -verlagerung und deutlicher Effizienzsteigerungen bei allen Verkehrsmitteln verbleibt auch im Jahr 2050 ein erheblicher Endenergiebedarf des Verkehrssektors von knapp 900 Petajoule. Das Ziel einer Reduktion der Treibhausgasemissionen um 95% lässt sich nur erreichen, wenn ausreichend treibhausgasarme und nachhaltige Kraftstoffalternativen zur Verfügung stehen. Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse bleiben im Verbändekonzept aufgrund der bisher bestehenden Zweifel an ihrer Nachhaltigkeit sowie der effektiv erzielbaren Treibhausgasemissionsreduktion als Lösungsoption unberücksichtigt. Die Bahn, der öffentliche Nahverkehr, Pkw und leichte Nutzfahrzeuge werden im Jahr 2050 weitgehend elektrisch mit Strom aus erneuerbaren Energien angetrieben. Der verbleibende Bedarf an flüssigen und gasförmigen Kraftstoffen von Lkw, Schiffen und Flugzeugen sowie

teilelektrisch betriebenen Pkw und leichten Nutzfahrzeugen kann teilweise mit Biokraftstoffen aus Abfall- und Reststoffen gedeckt werden. Zudem können synthetische Kraftstoffe zum Einsatz kommen, die mit Strom aus erneuerbaren Energien erzeugt werden. Der enorme langfristige Strombedarf des Verkehrssektors unterstreicht die dringende Notwendigkeit einer konsequenten Umsetzung der Energiewende in Deutschland. Die Unsicherheit, die mit der Mengenverfügbarkeit von nachhaltigen Kraftstoffalternativen verbunden ist, macht umso deutlicher, dass die drastische Reduktion des Endenergiebedarfs den unabdingbaren Kern einer erfolgreichen Klimaschutzstrategie für den deutschen Verkehrssektor darstellt.



Ein leistungsfähiges Bahn- und Fernbusnetz mit bundesweit aufeinander abgestimmten Anschlüssen ist für längere Strecken zentral.

Summary

In their concept for “Climate-friendly transport in Germany”, the environmental associations WWF, BUND, Germanwatch, NABU and VCD present a way for the German transport sector to reduce its greenhouse gas emissions by 95 % by 2050.

The core message is that in addition to technical solutions like efficiency improvements, measures to reduce traffic and shift traffic onto more environmentally friendly modes of transport need to be pursued to reduce final energy demand in the transport sector. By 2050, as a result, the transport sector’s final energy demand will fall by nearly 70 % (compared to 2005), with a 64 % cut in greenhouse gas emissions (compared to 1990). To close the remaining “gap” and deliver an almost total reduction in greenhouse gas emissions, the transport sector will need to use electricity from renewable energy sources as well as regenerative gaseous and liquid fuels. Whether and how these can be made available and at the same time fulfil ambitious sustainability requirements is still uncertain today.

Germany has set a target of reducing its greenhouse gas emissions by 80 to 95 % by 2050 compared to 1990. However, if global warming is to be limited to a maximum of two degrees Celsius by the end of the century compared to the pre-industrial age, Germany – as an industrial nation – will need to position itself at the top end of this range. Yet Germany will miss its climate goals unless the transport sector also makes an appropriate reduction. While the energy transition in the electricity sector is the talk of the day, so far the German federal government has completely lacked a transport policy that is aligned with the climate goals. The transport sector is currently responsible for around 20 % of energy-related greenhouse gas emissions, yet has underperformed other sectors in reducing its emissions. Including international air and sea traffic originating in Germany, transport emissions actually rose by 2.5 % between 1990 and 2012.

At the heart of the joint concept is a climate protection scenario which quantifies the target outlined above for a sustainable transport system. The associations’ concept includes international air and sea traffic originating in Germany and takes the higher climate impact of air traffic emissions into account. The scenario is based on assumptions which underline what changes are needed in the political framework and in our mobility patterns to make the target achievable. Priority is given to measures which preserve mobility and at the same time are associated with a better quality of life. For example, noise and pollutant as well as greenhouse gas emissions are reduced, and attractive public spaces are created.

Passenger traffic falls 15 % by 2050. In the long term, this is influenced by a declining population and demographic change. In an ageing society, there is a shift away from journeys to and from places of work and education, towards leisure travel. Since everyday products are increasingly bought online, the number of shopping trips decreases, with a corresponding increase in goods distribution traffic. There is a significant change in the chosen modes of transport. Whereas car ownership is predominant today, what matters most in the long term is flexibility. Especially in urban and suburban areas, people will rely on (shared) bicycles, pedelecs, a good public transport network and electrically powered carsharing vehicles, according to their needs. For longer distances, an effective rail and long-distance bus network will be available with coordinated connections across the country. As a result, by 2050 there will be only around half as many private cars as there are today. Policymakers support these trends by providing integrated funding for attractive public transport offerings, and

expanding the cycling infrastructure. This is accompanied by the introduction of distance- and emissions-based tolls for passenger cars. EU limits for new car CO₂ emissions will be tightened to a maximum of 65–68 grams CO₂/km by 2025 and a maximum of 50 grams CO₂/km by 2030.

While freight transport in Germany will increase further by 2030, in the long term it will stabilize at the current level. Growth in average transportation distances in the freight sector, which in the past was caused mainly by EU integration, will not continue. At least for food and animal feed, regional trade patterns will become more important again. The freight transport volume, i.e. the quantity of goods transported each year, will increase only slightly by 2050. While the transport volume for transit traffic moves somewhat higher, there is a drastic fall in the transportation of fossil fuels such as coal and oil, as a result of the systematic implementation of the energy transition. Rail and inland waterways account for a significantly larger share of transportation. Overall, around half of freight transport in 2050 uses these modes of transport. Also the combination of different modes of transport becomes more important. In cities, electrically powered light duty vehicles and cargo bikes are used for deliveries. Policymakers support these developments in goods traffic by increasing and extending truck tolls. The target of doubling rail capacity to 225 billion tonne-kilometres by 2050 is accompanied by target-oriented transport infrastructure planning in Germany. Its main focus is on boosting seaport hinterland transportation by rail.

Air cargo traffic increases by around one-third by 2050. In contrast, growth in air passenger traffic weakens, resulting in a slight decline by 2050. The inclusion of air traffic and international flights in an effective emissions trading scheme has an increasing impact on airfares. At the same time, policymakers reduce subsidies for regional airports. Because of higher ticket prices, the trend for many short trips reverts to longer-duration and fewer air journeys. Business flights are increasingly replaced by telemeetings. Nevertheless, because of the higher climate impact of its emissions in the upper layers of the atmosphere, aviation constitutes a considerable problem for achieving the climate goals in the long term.

Despite ambitious measures to reduce and shift traffic, and significant efficiency gains in all modes of transport, even in 2050 the transport sector still accounts for a considerable final energy demand of nearly 900 petajoules. The goal of reducing greenhouse gas emissions by 95 % can only be achieved if sufficient low-greenhouse-gas and sustainable fuel alternatives are available. Biofuels made from food crops are not considered as a possible solution in this concept owing to current doubts as to their sustainability and actually achievable greenhouse gas reductions. In 2050, trains, local public transport, cars and light commercial vehicles will largely be powered by electricity from renewable energy sources. The remaining demand for liquid and gaseous fuels from heavy goods vehicles (HGVs), ships and aircraft as well as hybrid cars and light commercial vehicles can be partially covered by biofuels produced from waste and residues. In addition, synthetic fuels generated using electricity from renewable sources can be used. The enormous long-term electricity requirements of the transport sector underline the urgent need for systematic implementation of the energy transition in Germany. Uncertainties regarding the available quantities of sustainable alternative fuels make it all the more clear that a drastic reduction in final energy demand constitutes the essential core of a successful climate strategy for the German transport sector.

Problemstellung und Zielvorstellung für den Verkehrssektor

Stützt man sich auf den dritten Teil des fünften Sachstandsberichtes des Weltklimarats IPCC (2014), so wird unmissverständlich klar, dass die anthropogenen Treibhausgasemissionen weltweit bis zum Jahr 2050 zwischen 40 und 70 % gegenüber 2010 reduziert werden müssen, um die globale Erwärmung bis zum Ende des Jahrhunderts gegenüber der vorindustriellen Zeit auf maximal zwei Grad

Celsius zu halten. Laut UN-Klimakonvention müssen die Industrieländer in der Umsetzung vorangehen sowie Technologien zur Treibhausgasemissionsreduktion entwickeln und marktfähig machen, um Entwicklungs- und Schwellenländern einen längeren Übergangszeitraum für die Umstellung auf erneuerbare Energien zu geben. Die Bundesregierung hat in ihrem Energiekonzept 2010 das Ziel einer Reduktion der Treibhausgasemissionen Deutschlands um 80–95 % bis zum Jahr 2050 gegenüber dem Basisjahr 1990 festgelegt. Soll die Klimaerwärmung auf globaler Ebene erfolgreich auf unter zwei Grad begrenzt werden, muss sich Deutschland als Industrienation jedoch am oberen Rand dieser Bandbreite orientieren. Ohne eine Treibhausgasemissionsreduktion von mindestens 95 % im Verkehrssektor ist dies nicht zu schaffen, da für bestimmte Emissionen aus anderen Sektoren, wie solche aus landwirtschaftlicher Tierhaltung und aus manchen Prozessemissionen der Industrie, deutlich weniger Minderungsoptionen bestehen.

Die CO₂-Emissionen des Luftverkehrs haben sich zwischen 1990 und 2011 mehr als verdoppelt.

Bisher ist der deutsche Verkehrssektor seinen Beitrag zum Erreichen der nationalen Klimaziele im Gegensatz zu den anderen Sektoren weitgehend schuldig geblieben. Er verantwortete im Jahr 2012 einen Anteil von etwa 20 % der energiebedingten Treibhausgasemissionen Deutschlands. Die Emissionen des Verkehrssektors in Deutschland wurden zwischen 1990 und 2012 um lediglich 5,5 % gesenkt (Umweltbundesamt 2013). Bezieht man den von Deutschland ausgehenden internationalen Luft- und Seeverkehr mit ein, so stiegen die Emissionen sogar um 2,5 % (UNFCCC, 2014). Die CO₂-Emissionen des Luftverkehrs haben sich zwischen 1990 und 2011 mehr als verdoppelt (IFEU 2012). EU-weit haben sich die Verkehrsemissionen seit 1990 um rund ein Viertel erhöht (EEA 2014). Erzielte Effizienzverbesserungen im Verkehr wurden in den vergangenen Jahren durch einen Anstieg der Verkehrsleistung, insbesondere im Güter- und Transitverkehr, nahezu kompensiert. Allein der Güterverkehr in Deutschland hat sich zwischen 1990 und 2011 mehr als verdoppelt (DIW 2014). Es besteht weiter eine fast vollständige Abhängigkeit von fossilen Energieträgern.

Zur Mobilitätsvision 2050 gehört aus Sicht der Verbände ein effizientes Verkehrssystem, das die klimafreundlicheren Optionen sowohl des Güter- als auch des Personenverkehrs in den Vordergrund rückt. Der Güterverkehr der Zukunft erfolgt multimodal und vorwiegend mit Bahn und Schiff. Im Verteilverkehr werden leichte (teil)elektrisch angetriebene Nutzfahrzeuge und kleinere Lkw sowie Lastenräder eingesetzt. Lkw und teilweise auch Schiffe werden nach 2030 mit biogenem oder strombasiertem Methan betankt. Durch eine Internalisierung der externen Kosten werden Anreize für umfassende Vermeidungs- und Verlagerungsstrategien im Straßengüterverkehr und bei der Luftfracht gesetzt. Gleichzeitig setzen sich Konzepte der nachhaltigen Logistik durch. Begrenzte Ressourcen- und Rohstoffverfügbarkeiten führen einerseits zu einem Wandel von der „Wegwerfgesellschaft“ hin zu Produkten mit längerer Lebensdauer und andererseits zu geschlossenen Rohstoffkreisläufen. Vor allem beim Transport von Nahrungs- und Futtermitteln dominieren wieder verstärkt regionale Kreisläufe. Der Güterverkehr stabilisiert sich langfristig auf dem heutigen

Insbesondere bei
jungen Erwachsenen
sind Pkw-Besitz
und -Nutzung
zurückgegangen.

Niveau. Der Personenverkehr der Zukunft basiert vor allem im urbanen Raum auf der multimodalen Nutzung von (Leih-)Fahrrädern, Pedelecs, öffentlichem Personennahverkehr (ÖPNV) und einem vielfältigen Angebot an elektrisch betriebenen Carsharing-Fahrzeugen, die je nach Bedarf in unterschiedlichen Größen im öffentlichen Raum bereit stehen. Der Lebensqualität in den Städten kommt das zugute. Sie werden von Lärm und Schadstoffemissionen befreit. Unverhältnismäßig breite Verkehrsadern mit parkenden Autos weichen vermehrt öffentlichen Plätzen mit Grünflächen. Durch die Mischung und Nähe von Wohnen, Einkaufen und Arbeiten können viele Bedürfnisse im Umfeld befriedigt werden, was das Zufußgehen, Fahrradfahren oder die ÖPNV-Nutzung zusätzlich attraktiv macht. Da Parkraum in den Städten nur begrenzt bereit steht, werden für den Pendelverkehr vom Umland in die Zentren neben einem leistungsfähigen öffentlichen Verkehr (ÖV) auch Radschnellwege genutzt. Einkäufe des täglichen Bedarfs werden in den Städten z. B. mit dem (Lasten-) Fahrrad erledigt oder aber bei größeren Entfernungen zur nächsten Einkaufsmöglichkeit online bestellt und dann effizient und gebündelt nach Hause geliefert. Da Flugpreise die externen Umweltkosten widerspiegeln, geht der Personenflugverkehr im Vergleich zu heute leicht zurück.

In den letzten Jahren lassen sich Entwicklungen in der Zivilgesellschaft beobachten, die auf sich verändernde Präferenzen hindeuten und die zuversichtlich stimmen: Danach scheint die Autoaffinität junger Erwachsener zu schwinden. Insbesondere bei jungen Erwachsenen sind Pkw-Besitz und -Nutzung zurückgegangen (Kuhnimhof et al. 2012; Schönduwe et al. 2012). Gleichzeitig hat die Attraktivität von Fahrrad und ÖPNV bei den 18- bis 35-Jährigen in den letzten Jahren deutlich zugenommen (Streit & Weiss 2013). Die Nutzerzahlen von Carsharing verzeichnen seit Jahren einen regelrechten Boom, insbesondere seit in Großstädten hochflexible, nicht stationsgebundene Angebote hinzugekommen sind (BCS 2014). Die Verbreitung von internetfähigen Smartphones und den dazugehörigen Apps fördert die Entwicklung multimodaler Mobilitäts- und Serviceangebote. Getrieben durch entsprechende EU-Vorgaben ist der CO₂-Ausstoß von Neuwagen erheblich gesunken. Überdies kommen mehr und mehr elektrisch betriebene Fahrzeuge auf den Markt. Die veränderte Grundkonzeption für den Bundesverkehrswegeplan 2015 sowie der Netzplan 2030 der Deutschen Bahn zeigen Anzeichen für ein Umdenken hin zu einer integrierteren, nachhaltigeren Infrastrukturplanung mit Priorität für den Erhalt der bestehenden Infrastruktur sowie die Entwicklung leistungsfähiger Netze statt großer Neubau-Prestigeprojekte.

Obwohl vielerorts positive Ansätze zu erkennen sind, reichen diese bei weitem nicht aus. Die klimapolitisch gebotene Reduktion der Treibhausgasemissionen um 95 % bis 2050 erfordert einen Paradigmenwechsel der deutschen Verkehrspolitik sowie eine umfassende Änderung unseres Mobilitätsverhaltens.

Das vorliegende Klimaschutzkonzept der deutschen Umweltverbände WWF, BUND, Germanwatch, NABU und VCD zeigt einen Weg auf, wie der deutsche Verkehrssektor bis 2050 das oben genannte Ziel einer Minderung der Treibhausgasemissionen um 95 % erreichen kann und welche politischen

Maßnahmen dafür erforderlich sind. Das Konzept wurde in einem mehrmonatigen gemeinsamen Prozess mit der Unterstützung von Fachexperten entwickelt. In diesem Rahmen wurden unter anderem zwei Workshops zu den Themen „Verkehrsverlagerung auf die Schiene“ und „Dekarbonisierung von Kraftstoffen“ durchgeführt. Koordiniert wurde der Prozess durch den WWF; die wissenschaftliche Begleitung erfolgte durch das Öko-Institut. Gefördert wurde das Projekt von Bundesumweltministerium und Umweltbundesamt.

In diesem Verbändekonzept werden die folgenden drei Handlungsfelder zur Minderung der Treibhausgasemissionen im Verkehr adressiert:

- 1. Verkehrsverlagerung und -vermeidung**
- 2. Effizienzsteigerungen bei allen Verkehrsträgern
sowie die Einführung alternativer Antriebe**
- 3. Dekarbonisierung von Kraftstoffen**

Im Gegensatz zu bereits existierenden Studien, die meist sehr stark auf technologische Lösungen abzielen, wird dabei insbesondere auch eine Reduktion der Verkehrsleistung durch Verkehrsverlagerung und -vermeidung ins Visier genommen.¹

Kernelement des Verbändekonzeptes ist ein Szenario zur fast vollständigen Treibhausgasemissionsminderung im Verkehr. Den Rahmen für das Szenario bildet das Leitbild der nachhaltigen Entwicklung. Die Reduktion der Treibhausgasemissionen stellt einen Leitindikator dar. Im Einklang damit ist jedoch insgesamt eine deutliche Reduktion des Ressourcenverbrauchs nötig. Im Vordergrund müssen zudem solche Maßnahmen und Instrumente stehen, welche durch langfristige Sicherung bezahlbarer Mobilität für alle, Effizienzverbesserungen sowie Einsparungen für Wirtschaft und Verbraucher positive soziale Effekte mit sich bringen. Neben der Reduktion der Treibhausgasemissionen kann auch die Rußminderung im Verkehr auf globaler Ebene zur Begrenzung der globalen Erwärmung in einer Größenordnung von bis zu 0,5 Grad Celsius beitragen (UNEP 2011). Viele der in diesem Konzept berücksichtigten Maßnahmen helfen auch dabei, den Ruß im Verkehr vollständig zu reduzieren und so dem Klimawandel zusätzlich entgegenzusteuern.

Nach einer kurzen Einleitung zur Methodik in Kapitel 3 werden in Kapitel 4 die getroffenen Annahmen zur zukünftigen Entwicklung des Verkehrssektors dargestellt. Kapitel 5 zeigt die Ergebnisse zur Entwicklung von Verkehrsleistung, Endenergiebedarf und Treibhausgasemissionen. Auf dieser Basis werden in Kapitel 6 fünf Maßnahmenbündel zur Umsetzung eines klimafreundlichen Verkehrs bis 2050 dargestellt.

3 Bilanzgrenzen und Methodik

Bei dem vorliegenden Szenario handelt es sich um ein Zielszenario für den Verkehrssektor in Deutschland unter der Maßgabe einer Reduktion der Treibhausgasemissionen von 95 % bis zum Jahr 2050 gegenüber 1990.

Das Zielszenario nimmt keine detaillierte Maßnahmenmodellierung (wie zum Beispiel im Projekt „Renewability“²⁾ vor, sondern zeigt einen möglichen Weg auf hin zu einem nahezu treibhausgasneutralen Verkehr. Im Unterschied zu anderen Studien wird daher auch kein „Basisszenario“ oder „BAU-Szenario“ mit einer Fortschreibung bestehender Trends ermittelt, sondern ein exemplarisches Zielszenario dargestellt, das die oben beschriebene Zielvorstellung eines praktisch treibhausgasneutralen Verkehr in 2050 quantifiziert. Die Parameter und Entwicklungspfade werden jedoch soweit möglich mit solchen Maßnahmen hinterlegt, die eine entsprechende Entwicklung unterstützen können. Insbesondere für die Verkehrsnachfrage wird ein vereinfachter parameterbasierter Ansatz gewählt. Für die Berechnung der Technologieentwicklung, des Energiebedarfs und der Treibhausgasemissionen findet das Modell TEMPS³ des Öko-Instituts Verwendung.

Wird der Strahlungsantrieb aller Effekte des Flugverkehrs einbezogen, liegt dieser drei- bis fünfmal so hoch, als wenn nur die CO₂-Emissionen betrachtet würden.

Die Bilanzgrenzen des vorliegenden Szenarios orientieren sich an der Methodik des Treibhausgasinventars, gehen jedoch teilweise darüber hinaus. Den Bilanzraum des Treibhausgasinventars stellen die direkten Treibhausgasemissionen des Verkehrs auf deutschem Bundesgebiet dar, d.h. jene von Straßenverkehr, Schienenverkehr, Binnenschifffahrt und nationalem Luftverkehr. Eckwerte zu den Energieverbräuchen entstammen dabei den Zahlen der AG Energiebilanzen. Der internationale Luftverkehr und die internationale Seeschifffahrt werden in den Treibhausgasinventaren zusätzlich ausgewiesen. Dabei wird der internationale Luftverkehr nach dem „flight stage“-Prinzip bilanziert, das heißt, einbezogen wird die Verkehrsleistung aller abgehenden Flüge bis zur ersten Landung. Diese Abgrenzung passt am ehesten zu den in der Energiebilanz ausgewiesenen, in Deutschland getankten Kerosinmengen. Auch im Seeverkehr werden in den Treibhausgasinventaren nur die in deutschen Häfen getankten Schiffstreibstoffe bilanziert. Der von Deutschland verursachte Export/Import über ausländische Häfen taucht dort nicht auf.

Im vorliegenden Verbändekonzept wird aus Gründen einfacherer Vergleichbarkeit den Bilanzgrenzen des Treibhausgasinventars gefolgt. Wegen seiner hohen Klimarelevanz wird neben dem nationalen Verkehr (einschließlich Fahrrad- und Fußverkehr) auch der internationale Luft- und Seeverkehr betrachtet. Der Personenverkehr internationaler Passagier- und Kreuzfahrtschiffe bleibt hingegen außen vor. Nach der Logik der Treibhausgasinventare werden unter dem Sektor Verkehr nur die direkten Emissionen bilanziert. Die Vorkettenemissionen, z. B. von Strom oder von Biokraftstoffen, werden – soweit sie in Deutschland entstehen – dem jeweiligen Sektor (z. B. Stromsektor oder Landwirtschaft) zugeordnet. Wenn sie außerhalb Deutschlands entstehen, fließen sie nicht in die Bilanz ein. Für den Treibhausgasmininderungsbeitrag alternativer Kraftstoffe (Biokraftstoffe, strombasierte Kraftstoffe) können die Vorkettenemissionen jedoch ausschlaggebend sein, weshalb sie in die Überlegungen dieses Konzeptes eingeflossen sind. Ein Faktor, der in den Treibhausgasinventaren unberücksichtigt bleibt, ist die höhere Treibhausgaswirksamkeit von Emissionen in höheren Luftschichten (RFI-Faktor). Wird der Strahlungsantrieb aller Effekte des Flugverkehrs inklusive der Bildung von Zirruswolken einbezogen, liegt dieser drei- bis fünfmal so hoch, als wenn nur die CO₂-Emissionen betrachtet würden (Umweltbundesamt 2012a). Für die Berechnung der Treibhausgasemissionen des Luftverkehrs wird deshalb in diesem Konzept ein RFI-Faktor von drei zugrunde gelegt.



Arbeits- und Ausbildungswege gehen in einer alternden Gesellschaft zurück, der Freizeitverkehr nimmt dafür zu.

4 Ausgestaltung des Szenarios

Im folgenden Kapitel werden wesentliche Einflussfaktoren auf die Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors und deren zukünftige Entwicklung im Szenario dargestellt – unterteilt nach den Bereichen

Verkehrsnachfrage im Personen- und Güterverkehr, Luft- und Seeverkehr, Fahrzeugtechnologien und Kraftstoffe.

4.1 Verkehrsnachfrage im Personenverkehr

Im folgenden Abschnitt werden wesentliche Parameter zur Entwicklung des Personenverkehrs dargestellt. Im Einzelnen sind dies die Wegezanzahl (differenziert nach Wegezwecken), die Wegelängen, der Modal Split und der Besetzungsgrad bzw. die Auslastung von Fahrzeugen. Der Flugverkehr wird aufgrund der abweichenden Datenlage separat betrachtet.

Im Szenario zur Visualisierung des Verbändekonzeptes werden dabei weder die Entscheidungen einzelner Individuen im Jahr 2050 noch die Wirkung einzelner politischer Instrumente modelliert. Ziel ist es vielmehr, einen plausiblen Entwicklungspfad für die Verkehrsleistung im Jahr 2050 anhand von Annahmen zur Veränderung wesentlicher Parameter aufzuzeigen. Dieser Entwicklungspfad wird durch einen zielgerichteten Maßnahmenkatalog unterstützt (Kapitel 6). Vorteil bei diesem methodischen Vorgehen ist, dass auch Trendbrüche durch sich bereits abzeichnende grundlegende Veränderungen und neue Optionen wie Carsharing oder Pedelecs berücksichtigt werden können. Grundlage sind Daten des Statistischen Bundesamtes sowie Mobilitätshebungen wie Mobilität in Deutschland (MiD) oder das Mobilitätspanel (Follmer et al. 2010; Streit & Weiss 2013).

4.1.1 Bevölkerungsentwicklung

Für die Annahmen zur Bevölkerungsentwicklung wird auf die Variante 1-W2 der zwölften Bevölkerungsvorausberechnung des Statistischen Bundesamtes zurückgegriffen (DESTATIS 2009). Danach sinkt die Bevölkerung in Deutschland bis zum Jahr 2050 auf 73,6 Mio. Einwohner. Davon wohnen 32% in Städten über 100.000 Einwohner (heute 27%). Durch den demografischen Wandel steigt der Anteil der über 65-Jährigen deutlich auf 32 % (heute: 21 %).

4.1.2 Wegezanzahl

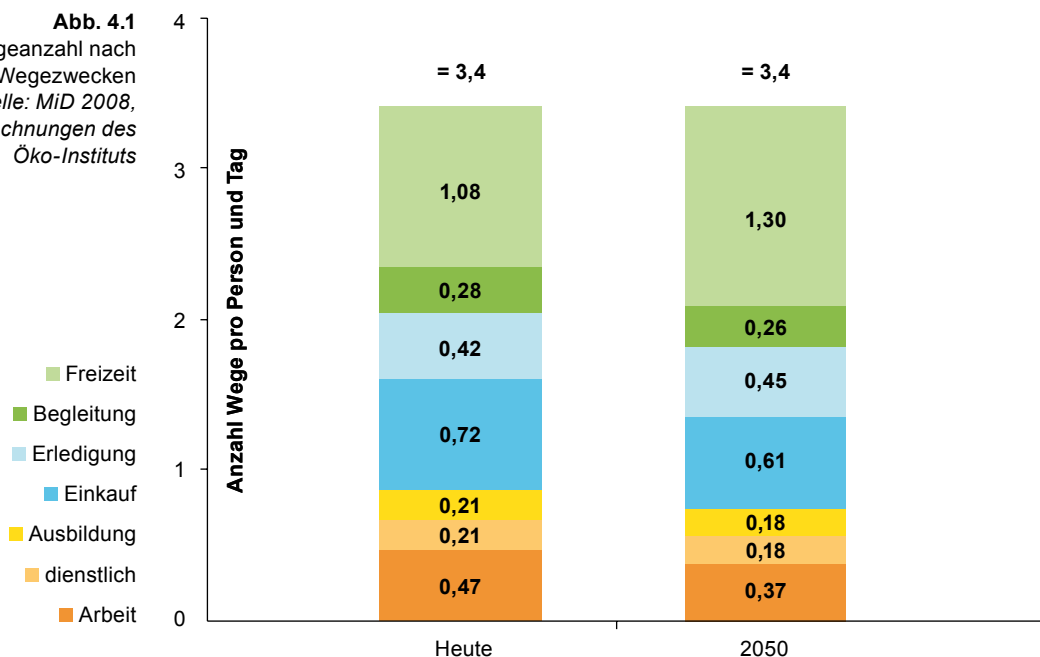
Nach der Studie „Mobilität in Deutschland 2008“ (Follmer et al. 2010) legt derzeit jede Person in Deutschland im Durchschnitt 3,4 Wege pro Tag zurück. Die durchschnittliche Anzahl der Wege hat sich im Zeitverlauf als relativ konstant erwiesen, obgleich es Unterschiede, z. B. je nach Altersgruppe, gibt und sich die Anteile der Wegezwecke im Zeitverlauf ändern können.

Szenarioannahmen

- » Güter des täglichen Bedarfs können zunehmend online eingekauft und direkt nach Hause geliefert werden. Die Anzahl langer Einkaufsfahrten zu Einkaufszentren geht dadurch zurück, und die Anzahl der Einkaufswege reduziert sich insgesamt um 20 %. Durch die Online-Einkäufe nimmt der Güterverteilverkehr zu (siehe Abschnitt zum Güterverkehr). Die „eingesparten“ Einkaufswege werden teils durch zusätzliche Freizeitwege kompensiert (s.u.). Insgesamt jedoch führt die hohe Verkehrsbündelung (viele Auslieferungen auf einer Tour) dazu, dass der Energiebedarf etwas reduziert werden kann.
- » Die Zunahme von Homeoffice-Zeiten und eine größere Anzahl von Angestellten mit einer Vier-Tage-Woche verringert die Anzahl der Arbeitswege um 10 %.
- » Die Anzahl der Wege mit dem Zweck „Freizeit“ wächst um 20 %; insbesondere bei Rentnern gewinnt der Freizeitverkehr an Bedeutung.
- » Es ergeben sich Verschiebungen durch den demografischen Wandel, z. B. geht die Anzahl der Ausbildungswege leicht zurück.

Insgesamt ergibt sich damit folgendes Bild:

Abb. 4.1
Wegeanzahl nach
Wegezwecken
Quelle: MiD 2008,
Berechnungen des
Öko-Instituts



4.1.3 Modal Split

Derzeit dominiert der Pkw-Verkehr den Modal Split – also die Verteilung des Verkehrs auf verschiedene Verkehrsmittel (Modi) – mit einem Anteil von fast 60% an den Wegen. Im Szenario gibt es dagegen eine deutliche Verlagerung auf Fahrrad-, Fuß- und öffentlichen Verkehr.

Trends, die in Richtung einer zunehmenden Verlagerung zeigen, gibt es bereits heute. Der Fahrradanteil an den Wegen lag im Jahr 2008 bei etwa 10 %, hat sich jedoch zwischen 2008 und 2012 von 10% auf 13,7 % erhöht. Der Anteil des motorisierten Individualverkehrs (MIV) ist in derselben Zeit zurückgegangen (Follmer et al. 2010; Streit & Weiss 2013). Insgesamt gewinnt das Fahrrad

Kopenhagen
kalkuliert im Pendel-
verkehr (Arbeit und
Ausbildung) für das
Jahr 2015 mit einem
Fahrradanteil von
50%.

langsam an Akzeptanz und ein besseres Image. Vor allem im urbanen Raum und in Kombination mit anderen Verkehrsmitteln ist es als Fortbewegungsmittel zunehmend attraktiv. Werden jedoch nur kurze Wege vom Pkw auf das Rad verlagert, so ist der Klimaschutzbeitrag begrenzt: 90 % der Pkw-Emissionen entstehen auf Distanzen über 5 km. Durch neue Optionen wie Pedelecs und Lastenfahrräder in Kombination mit einer entsprechenden Infrastruktur steigt der Aktionsradius des Fahrrads und damit dessen Verlagerungspotenzial.

Auch anderen häufig genannten Argumenten, vom Pkw zum Fahrrad nicht umsteigen zu können (z. B. Transport von Waren, stark hügelige Topographie, mangelnde körperliche Fitness, „nicht verschwitzt ankommen wollen“), wird durch Pedelecs und Lastenfahrräder die Grundlage entzogen. Pedelecs stellen zur Überwindung längerer Distanzen, für ältere Verkehrsteilnehmer oder für Berufspendler ein attraktives Verkehrsmittel dar. Lastenfahrräder (ggf. mit elektrischer Unterstützung) lassen sich für Einkaufsfahrten oder für Bring- und Holdienste von Kindern einsetzen. Dass eine Reduktion der MIV-Fahrleistung um 10 % durch Verlagerung auf das Fahrrad möglich ist, zeigen auch die Forschungsergebnisse von Ahrens et al. (2013):⁴ Demnach würde sich der MIV um 11 % verringern, wenn alle „gut oder sehr gut mit dem Fahrrad erreichbaren Ziele“ (gemäß MiD) verlagert würden. Eine Reduktion von 7 %–17 % der MIV-Fahrleistung ergäbe sich, wenn das Verkehrsverhalten von „Trendsetterstädten“ (mit hohem Fahrradanteil) wie Bremen, Kiel oder Jena auf Städte einer ähnlichen Größenordnung überspringt. Auch in Berlin liegt der MIV-Anteil an den Wegen bereits heute bei nur 32 % und ist in den letzten zehn Jahren um 6 % zugunsten des Fahrrad- und Fußverkehrs gesunken (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt 2014). In den Niederlanden wurden bereits 2008 27 % aller Wege mit dem Fahrrad zurückgelegt. Kopenhagen kalkuliert im Pendelverkehr (Arbeit und Ausbildung) für das Jahr 2015 mit einem Fahrradanteil von 50 %. Länder wie Dänemark oder die Niederlande zeigen, welche Bedeutung der Radverkehr im Modal Split erreichen kann.

Die Verfügbarkeit von aktuellen Fahrplanauskünften via Smartphones, auch in intermodaler Kombination mit anderen Verkehrsmitteln wie Leihfahrrädern oder Carsharing, erleichtert die Nutzung des ÖPNV. Sein Anteil stieg von 8 % (2008) auf 11 % (2011). Gerade jüngere Verkehrsteilnehmer zwischen 18 und 35 Jahren nutzen zunehmend den ÖPNV, Führerschein- und Pkw-Besitz gehen hier zurück (Streit & Weiss 2013).

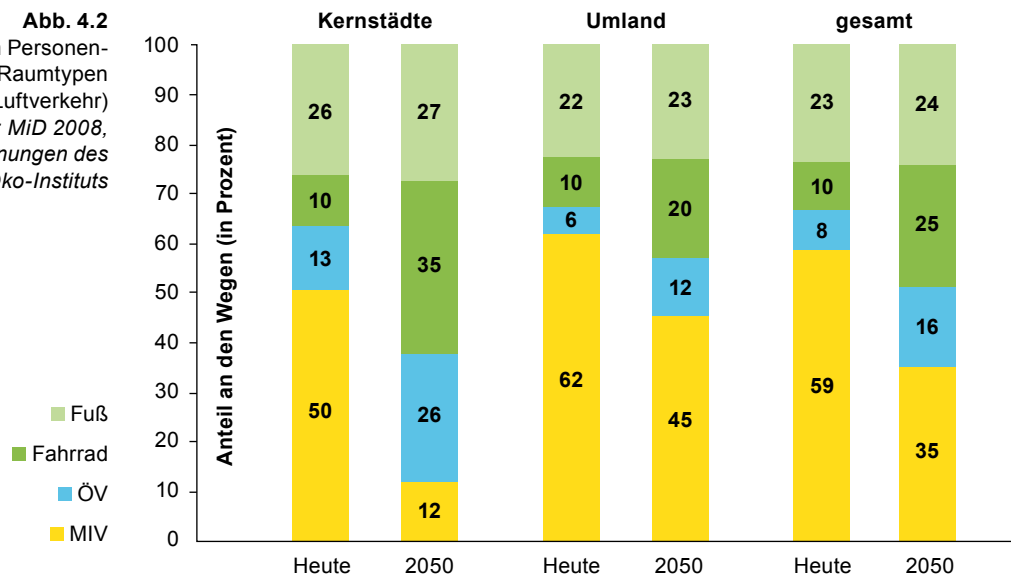
Carsharing erlebt seit 2012 einen regelrechten Boom, vor allem, weil zu den stationsgebundenen Angeboten der geteilten Nutzung von Fahrzeugen in 14 deutschen Großstädten hochflexible stationsunabhängige („free floating“) Angebote hinzugekommen sind. Allein im Jahr 2013 stieg die Zahl der registrierten Carsharing-Nutzer in Deutschland um 67 % auf über 750.000, wobei hier auch Doppelzählungen durch mehrfach registrierte Nutzer enthalten sind (BCS 2014).

Der im November 2013 durchgeführte Expertenworkshop zum Thema „Verkehrsverlagerung auf die Schiene“ kam zu dem Ergebnis, dass im Schienenpersonenfernverkehr (SPFV) nur noch begrenzte Potenziale zur Verkehrsverlagerung auf die Schiene bestehen. Auf den wesentlichen Relationen zwischen großen Zentren hat die Schiene schon heute einen hohen Anteil (bis zu 60 %) am Modal Split, auch wenn der SPFV insgesamt einen Anteil am Modal Split von nur 7 % (2012) hat. Im Schienenpersonennahverkehr bestehen jedoch auf Distanzen bis 200 km noch deutliche Potenziale, zum Beispiel bei der Anbindung von Mittelzentren (50.000–400.000 Einwohner).

Szenarioannahmen

- » Der Fahrradanteil erreicht in Kernstädten 35 % und im Umland 20 %, sodass sich ein durchschnittlicher Fahrradanteil von 25 % an den Wegen ergibt. Der Ausbau von bequemen und sicheren Radverkehrsnetzen, der selektive Neubau von Radschnellwegen, Park & Bike-Angebote sowie die Verbreitung von Pedelecs führen dabei zu einem deutlich erhöhten Aktionsradius des Fahrrads auch über 5 km hinaus. Da immer mehr Menschen in die Städte ziehen, wird der Pendlerverkehr reduziert und kann zunehmend auf das Fahrrad verlagert werden.
- » Die Attraktivität des öffentlichen Verkehrs steigt durch die verbesserte multimodale Kopplung unterschiedlicher Verkehrsträger, den Ausbau von S-Bahn-, Straßenbahn- und Bus-Netzen, ein verbessertes Taktangebot und mobil abrufbare Echtzeitinformationen. Der Anteil des ÖV an den Wegen verdoppelt sich auf 16 %. Die Reform des Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetzes inklusive erhöhter Mittelausstattung nach 2019 sowie die Erhöhung und Dynamisierung der jährlichen Regionalisierungsmittel des Bundes aus dem Regionalisierungsgesetz lösen eine ÖPNV-Offensive aus. Entscheidend für die Stärkung des Schienenpersonenverkehrs ist der Verzicht auf überbeuerte Hochgeschwindigkeitsstrecken ab 2020 zugunsten gezielter Investitionen in Knoten und die bessere Vernetzung von Fern- und Nahverkehr (Deutschlandtakt). Zudem werden die Fernbuslinien deutlich ausgeweitet bei gleichzeitig voller Anrechnung der externen Kosten und Anwendung der Sozial- und Umweltvorschriften. Die Bahn reagiert auf diese Konkurrenz mit einer Senkung ihrer Ticketpreise.
- » Damit geht auch ein verändertes Pkw-Nutzungsmuster einher: Pkw werden seltener für sehr lange Strecken (>300 km) genutzt. Diese Strecken werden häufiger multimodal in Kombination z. B. mit Bahn oder Bus zurückgelegt. Der Pkw dient dann nur noch zur Überwindung der „letzten(n) Meile(n)“.
- » Insbesondere in den Städten ist der Besitz eines eigenen Pkw vergleichsweise unattraktiv (teuer, unflexibel, kaum Parkraum). Der Pkw-Verkehr verliert daher Anteile am wegebezogenen Modal Split an Fahrrad und den ÖV und sinkt von 60 % auf 35 % (in Kernstädten auf 12 % und im Umland auf 45 %).
- » Die geteilte Nutzung des Pkw nimmt stark zu. Vielfältige attraktive Angebote von stationsgebundenem, flexiblem und privatem Carsharing sowie Mietwagen ergänzen sich. Im Jahr 2050 werden in Kernstädten 70 % und im Umland 20 % des Pkw-Verkehrs in geteilten Fahrzeugen zurückgelegt.
- » Der Pkw-Besetzungsgrad erhöht sich von 1,47 auf 1,6 Personen pro Fahrzeug. Durch GPS-fähige Smartphones und internetfähige Navigationssysteme wird spontanes Mitfahren („dynamic ridesharing“) leichter und komfortabler.

Abb. 4.2
Modal Split im Personen-
verkehr nach Raumtypen
(ohne Luftverkehr)
Quelle: MiD 2008,
Berechnungen des
Öko-Instituts



4.1.4 Wegelängen

Die durchschnittlichen Wegelängen sind in der Vergangenheit deutlich gewachsen. Ermöglicht wurde die Zunahme der Wegelängen vor allem durch die Beschleunigung des Verkehrs: Während die Wegelängen zugenommen haben, blieb die durchschnittliche Reisezeit weitgehend konstant. Im Szenario wird der Trend zu einer weiteren Beschleunigung deutlich gedämpft.

Szenarioannahmen

- » Beschleunigung spielt als Ziel der Verkehrsinfrastrukturpolitik im Jahr 2050 keine Rolle mehr. Statt Aus- und Neubau von Straßen und dem Bau von Hochgeschwindigkeitsstrecken liegt der Fokus klar auf dem Erhalt der bestehenden Infrastruktur.
- » Das Konzept der „Stadt und Region der kurzen Wege“ findet zunehmend Berücksichtigung in der Stadtplanung und Raumbewirtschaftung. Es führt zu kompakteren Siedlungsstrukturen, Nutzungsmischungen und zur attraktiven Gestaltung öffentlicher Räume.
- » Die hohe Attraktivität der Städte und der Abbau bzw. Umbau der Entfernungspauschale führen dazu, dass der Wohnort wieder näher an den Arbeitsort rückt und die Pendeldistanzen somit abnehmen.⁵
- » Möglichen Rebound-Effekten im Pkw-Verkehr durch die höhere Effizienz und damit sinkenden Kilometerkosten werden durch eine fahrleistungsabhängige sowie emissionsabhängige Pkw-Maut entgegengewirkt. Durch Carsharing werden die Kilometerkosten für den MIV transparenter.
- » Der Bedeutungsgewinn von Fahrradverkehr und öffentlichem Verkehr sowie Veränderungen in der Stadtplanung und Raumbewirtschaftung führen langfristig zu einem Rückgang der Wegelängen im Personenverkehr um 10 % (ohne Luftverkehr).

4.2 Verkehrsnachfrage im Güterverkehr

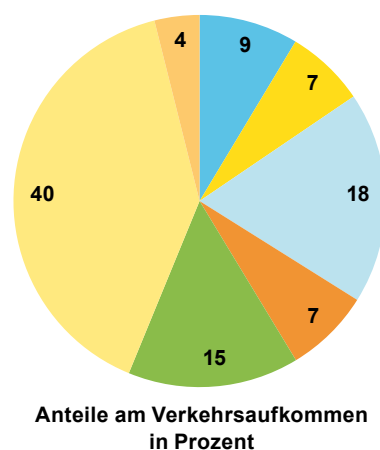
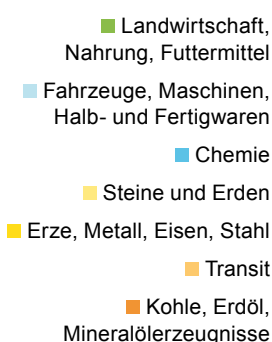
Ähnlich wie die Modellierung der Personenverkehrsnachfrage basiert auch die Modellierung der Güterverkehrsnachfrage auf einem Makroansatz unter Berücksichtigung wesentlicher Parameter. Dazu zählen das Transportaufkommen differenziert nach verschiedenen Gütergruppen (in Tonnen), die durchschnittlichen Transportweiten, der Modal Split und die Auslastung. Luftfracht- und Seeverkehr werden separat betrachtet.

4.2.1 Verkehrsaufkommen und Transportweiten

In der Vergangenheit haben insbesondere die durchschnittlichen Transportweiten im Güterverkehr zugenommen, wogegen das Aufkommen stagnierte (DIW 2013). Zurückzuführen ist dieser Effekt zum einen auf eine Zunahme des Transitverkehrs im Zuge der europäischen Integration (+85 % im Zeitraum 2003–2010). Zum anderen gab es aber auch Verschiebungen in der Güterstruktur. Das Aufkommen in Gütergruppen mit hohen Transportweiten (wie z. B. Fahrzeuge, Maschinen und Erze, Metall) hat zugenommen, wogegen das Aufkommen in Gütergruppen mit niedrigeren Transportweiten (z. B. bei Steinen und Erden) eher zurückgegangen ist.

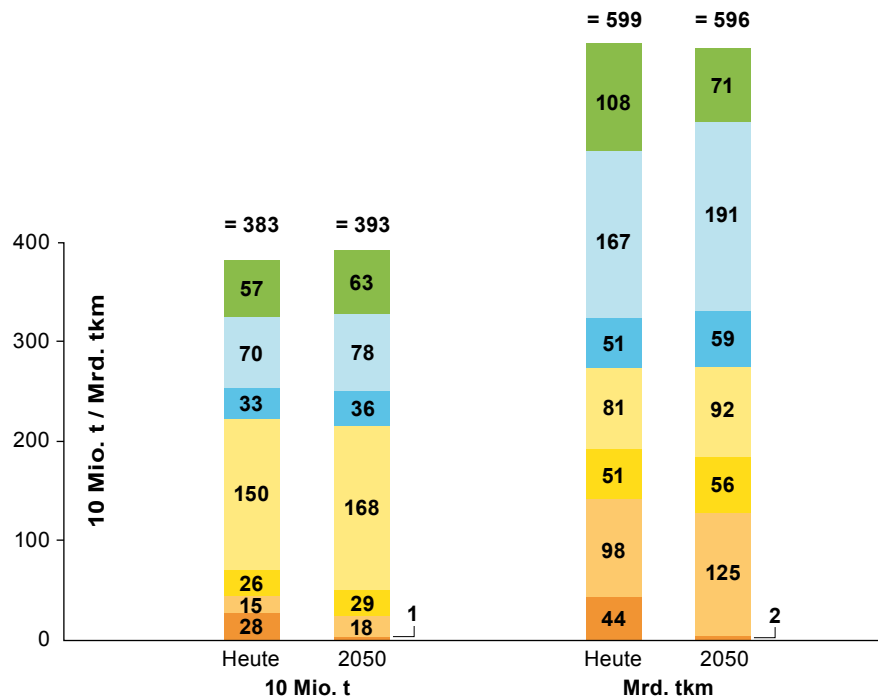
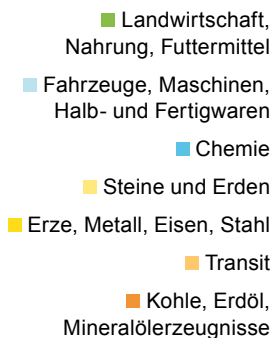
Wenn man diese Trends der letzten 20 Jahre in die Zukunft fortschreibt, ergibt sich weiterhin ein deutliches Güterverkehrswachstum. So gingen z. B. Ickert et al. (2007) von einer Verdopplung der Güterverkehrsleistung bis 2050 auf 1.200 Mrd. Tonnenkilometer (tkm) aus. Die 2014 im Rahmen der Erarbeitung des Bundesverkehrswegeplan 2015 zu veröffentlichenden langfristigen Wachstumsprognosen für die Güterverkehrsleistung werden jedoch nach Aussage der Gutachter deutlich nach unten korrigiert.

Abb. 4.3
Anteile an Verkehrsaufkommen und -leistung nach Gütergruppen, heute
Quelle: Destatis, Verkehr in Zahlen



Die Anteile der Gütergruppen an Verkehrsaufkommen und Verkehrsleistung sind in Abbildung 4.3 dargestellt.⁶ Während Gütergruppen mit niedrigen Transportweiten, wie z. B. die Gruppe „Steine und Erden“ einen relativ hohen Anteil am Verkehrsaufkommen (Tonnen, t) ausmachen, ist ihr Anteil an der Verkehrsleistung (Tonnenkilometer, tkm) deutlich geringer. Andersherum verhält es sich z. B. bei Fahrzeugen oder beim Transitverkehr.

Abb. 4.4
Aufkommen und
Verkehrsleistung nach
Gütergruppen
*Quelle: Destatis, Verkehr
in Zahlen, Berechnungen
des Öko-Instituts.*



Szenarioannahmen

- » Unter anderem aufgrund steigender Transportkosten sowie begrenzter Infrastrukturkapazitäten gibt es in der Logistik wieder einen Trend hin zur Ausweitung der Lagerhaltung und Erhöhung der Fertigungstiefe.
- » Der Transitverkehr wächst zunächst noch an. Die starken Wachstumsraten seit 1990 durch die Vollendung des europäischen Binnenmarktes, die deutsche Wiedervereinigung aber auch die EU-Osterweiterung werden jedoch so nicht mehr erreicht. Auch ein europaweiter Trend zu regionaleren Wirtschaftskreisläufen führt dazu, dass der Anstieg des Aufkommens im Vergleich zu historischen Wachstumsraten moderat ausfällt (+20 %) (Abb. 4.4).
- » Das Aufkommen bei Fahrzeugen, Maschinen, Halb- und Fertigwaren nimmt um 20 % und in den übrigen Gütergruppen um 10 % zu. Aus der Berücksichtigung der Klimaschutzziele ergibt sich eine deutliche Reduktion des Aufkommens fossiler Energieträger (-95 %) (Abb. 4.4). Zwar gibt es im Gegenzug Transporte regenerativer Energieträger. Es ist jedoch davon auszugehen, dass diese deutlich geringer ausfallen, da langfristig in der Stromerzeugung keine transportintensiven fossilen Energien mehr eingesetzt werden und auch der Transportaufwand für alternative Kraftstoffe im Verkehrssektor deutlich reduziert ist (vermehrte Stromnutzung, Transport von Biomethan im Erdgasnetz).
- » Bei landwirtschaftlichen Produkten, Nahrungs- und Futtermitteln gewinnen wieder regionale Kreisläufe an Bedeutung und die durchschnittlichen Transportweiten sinken um 40 %. Dadurch geht die Verkehrsleistung dieser Gütergruppe zurück (Abb. 4.4). Bei den übrigen Gütergruppen bleiben die Transportweiten auf heutigem Niveau.
- » Durch die Zunahme des Onlinehandels wächst der Güterverteilverkehr von Fertigwaren (Abb. 4.4). Wie viel Verteilverkehr entsteht, hängt vor allem von der Flexibilität der Lieferung sowie der Anzahl der Retouren ab (DHL 2012). Bezogen auf die gefahrenen Kilometer errechnen Siikavirta et al. (2002) eine Reduktion der Kilometerleistung um 18–87 %, wenn eine Pkw-Einkaufsfahrt mit dem eigenen Pkw durch eine Onlinebestellung und Lieferung ersetzt wird. In entsprechendem Maße erhöht sich der Verteilverkehr. Nimmt man an, dass 40 % der wegfallenden Pkw-Kilometer durch Lieferverkehr mit leichten Nutzfahrzeugen erbracht werden, so beträgt die durchschnittliche Kilometerleistung je Zustellvorgang 2 km. Entsprechend erhöht sich die Fahrleistung leichter Nutzfahrzeuge um 13,7 Mrd. km.

4.2.2 Modal Split

Im Jahr 2012 wurden etwa 72 % der Verkehrsleistung im Güterverkehr auf der Straße erbracht, 18 % auf der Schiene und 10 % per Binnenschiff. Das Weißbuch Verkehr der EU-Kommission (Europäische Kommission 2011) setzt das Ziel, bis 2050 die Hälfte des Straßengüterverkehrs über 300 Kilometer auf die umweltfreundlicheren Verkehrsträger Bahn und Schiff zu verlagern. Wesentliche Einflussfaktoren für das tatsächliche Verlagerungspotenzial sind neben den Transportweiten und der Güterbeschaffenheit die Qualität (Flexibilität, Zuverlässigkeit, Pünktlichkeit, Schnelligkeit, Temperaturführung) sowie die Entfernung des nächsten Gleisanschlusses/KV-Terminals.

Ergebnis des Expertenworkshops zum Thema Verlagerung auf die Schiene war: Auf dem heutigen Schienennetz – erweitert um die bereits finanzierten Ausbaumaßnahmen – lassen sich voraussichtlich maximal etwa 150 Mrd. tkm Güterverkehr abfahren (2012: 112 Mrd. tkm). Eine Schienengüterverkehrsleistung in Höhe von 213 Mrd. tkm bis 2030 wird möglich, wenn bestehende Kapazitätspotenziale ausgeschöpft, die Netzbewirtschaftung optimiert, Strecken zur Beseitigung von Engpässen gezielt aus-, neugebaut bzw. elektrifiziert und Überholmöglichkeiten geschaffen werden. Aus- und Neubaumaßnahmen sind vor allem auf sechs Hauptkorridoren und deren Bypässen notwendig, da hier bei einer streckenspezifischen Verdoppelung der Zugzahlen eine chronische Überlastung bestünde (Holzhey 2010). Die Korridore sind:

1. Nordseehäfen – Polen/Tschechien
2. Nordseehäfen – Südosteuropa
3. Nordseehäfen – Norditalien
4. Antwerpen-Rotterdam-Amsterdam-Häfen (ARA-Häfen)/
Rhein-Ruhr – Schweiz
5. ARA-Häfen/Rhein-Ruhr – Südosteuropa
6. ARA-Häfen/Rhein-Ruhr – Polen

Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Stärkung des schienengebundenen Hinterlandverkehrs der deutschen, belgischen und holländischen Nordseehäfen. Eine weitere Steigerung der Schienengüterverkehrsleistung jenseits 213 Mrd. tkm erfordert zusätzliche Maßnahmen in den oben genannten Bereichen sowie technologischen Fortschritt unter anderem in der Leit- und Sicherheitstechnik sowie der Verkehrssteuerung und passende Logistikkonzepte (Holzhey et al. 2012).

*Langfristig sollen
noch mehr Transporte
von und zu den
Nordseehäfen auf der
Schiene statt dem
Lkw erfolgen.*



In der Vergangenheit gab es einen deutlichen Rückbau von Netz, Weichen, Gleisanschlüssen und Bahnhöfen.

Dafür ist jedoch ein drastisches Umsteuern notwendig, denn in der Vergangenheit gab es einen deutlichen Rückbau von Netz, Weichen, Gleisanschlüssen und Bahnhöfen. Auch die aktuell durch hohe Trassenpreise gekennzeichnete Kostenstruktur müsste im intermodalen Vergleich mit Transporten auf der Straße so gestaltet werden, dass der Gütertransport auf der Schiene nachfrage-seitig für einen breiteren Kundenkreis interessant wird. Dafür ist auch der Wettbewerb der Deutschen Bahn AG mit anderen Anbietern wichtig. Darüber hinaus ist die drastische Verringerung des Schienenlärms eine Bedingung für die Verlagerung von Güterverkehr auf die Schiene, da dieser in der Bevölkerung zunehmend als störend wahrgenommen wird. Vorteil einer solchen Förderung des Schienengüterverkehrs wäre, dass davon auch der Schienenpersonennahverkehr profitieren könnte, da dieser ähnlich schnell ist. Prinzipiell sind nicht nur Relationen über 300 km auf die Schiene verlagerbar. Die Schiene kommt auch für kürzere Distanzen infrage. Für die Bewertung der Klimawirkung ist zu beachten, dass es bei der Verlagerung des Straßenverkehrs auf Schiene und Binnenschiff zu Umwegen kommen kann, die mit einer höheren Verkehrsleistung einhergehen. Auswertungen auf Basis von Renewability zeigen, dass sich dieser „Umwege-Faktor“ in der Größenordnung von 16 % bemerkbar macht, was bei den Berechnungen berücksichtigt wird.

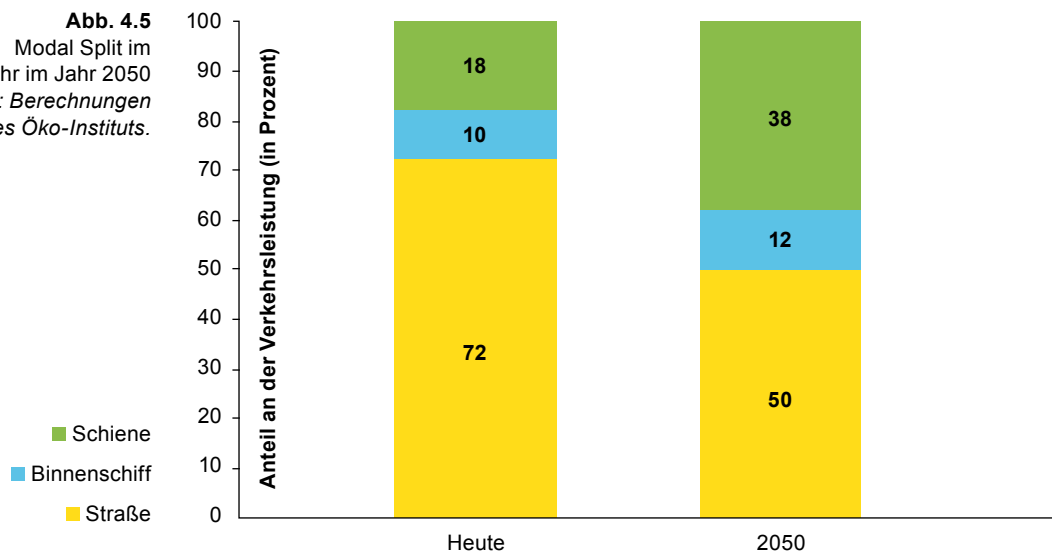
Für den Vor- und Nachlauf von Schiene und Wasserstraße und den Verteilverkehr in die Städte wird wohl auch in Zukunft der Straßenverkehr eine zentrale Rolle spielen. Allerdings sind für bestimmte Anwendungen wie z. B. Kurier-Express-Paket-Dienste (KEP) auch Lastenräder mit elektrischer Unterstützung eine Alternative.

Szenarioannahmen

- » Schiene und Schiff werden im intermodalen Wettbewerb kostenseitig gegenüber der Straße gestärkt. Dadurch wird der Güterverkehr multimodaler. Die Kombination von Schiene, Wasserstraße und Straße gewinnt an Bedeutung. Die Internalisierung der externen Kosten des Straßenverkehrs durch eine Erhöhung und Ausweitung der Lkw-Maut auf Fahrzeuge mit einem zulässigen Gesamtgewicht ab 3,5 Tonnen sowie auf das ganze Straßennetz unterstützt dies.
- » Die Kapazität des Schienennetzes für den Güterverkehr wird dahingehend erweitert, dass im Jahr 2050 bis zu 225 Mrd. tkm auf der Schiene transportiert werden können und entsprechend Transporte von der Straße auf die Schiene verlagert werden.
- » Bahn und Binnenschiff können in den Gütergruppen „Fahrzeuge“, „Chemie“, „Steine und Erden“ ihren Anteil am Modal Split verdoppeln. Der Transitverkehr per Lkw wird zu 50 % auf die Schiene verlagert.
- » Insgesamt sinkt dadurch der Anteil des Straßengüterverkehrs an der Verkehrsleistung von 72 % auf etwa 50 %.
- » Für den Verteilverkehr in Städten (z. B. KEP-Dienste) kommen zunehmend batterieelektrische Lkw und Lastenfahrräder zum Einsatz. Insgesamt sinkt dadurch der Anteil des Straßengüterverkehrs an der Verkehrsleistung von 72 % auf etwa 50 % (Abb. 4.4).

Der Modal Split für den Güterverkehr (bezogen auf die Verkehrsleistung) ist in Abbildung 4.5 dargestellt.

Abb. 4.5
Modal Split im
Güterverkehr im Jahr 2050
Quelle: Berechnungen
des Öko-Instituts.



4.2.3 Auslastung im Straßengüterverkehr

Der Leerfahrtenanteil im Straßengüterfernverkehr ist von 16,5 % im Jahr 1998 auf 10,5 % im Jahr 2005 zurückgegangen und bleibt seitdem relativ konstant. Auch die Auslastung (beförderte Tonnage im Verhältnis zur Ladekapazität) hat seitdem nicht mehr zugenommen (BGL 2014). Bestehende Trends von Massengütern hin zu Volumengütern sprechen eher dagegen, dass sich in Zukunft noch eine deutliche Auslastungssteigerung im Güterfernverkehr erzielen lässt. Anders ist dies im Verteilverkehr, wo der Leerfahrtenanteil deutlich höher liegt und daher Optimierungspotenzial z. B. durch City-Logistik-Konzepte wie Frachtbörsen besteht.

Szenarioannahmen

- » Durch Optimierung der City-Logistik kann die Auslastung der Lkw innerstädtisch um 20 % erhöht werden.
- » Im Straßengüterfernverkehr kommt es zu einer nur geringfügigen Auslastungserhöhung (+5 %).

4.3 Luft- und Seeverkehr

4.3.1 Luftverkehr

Für die Zukunft des globalen Luftverkehrs werden in den meisten Szenarien hohe Wachstumsraten angenommen. So geht die ICAO im Luftverkehr von einem globalen Wachstum von jährlich 4,9 % zwischen 2010–2030 aus und von jährlich 4,0 % zwischen 2030–2040 (ICAO 2013). Die globalen Wachstumsraten lassen sich natürlich unter anderem aufgrund unterschiedlicher Entwicklung der Bevölkerungszahlen nicht ohne Weiteres auf Deutschland übertragen. Für Europa hat EUROCONTROL (2013) in vier Zukunftsszenarien eine Zunahme der Flugbewegungen von 0,3 % bis 2,7 % pro Jahr ermittelt, was im Zeitraum 2012 bis 2050 einer Zunahme des Luftverkehrs um den Faktor 1,1 bis 2,7 entspricht. Die EU-Kommission geht in einer Studie von einer jährlichen Wachstumsrate von 2,1 % aus (European Commission 2013). Auch in Deutschland gehörte der Luftverkehr mit einer durchschnittlichen Zunahme von über 3 % pro Jahr im Zeitraum 1990–2010 (Knörr et al. 2012) zu den am stärksten wachsenden Verkehrssektoren. Laut DESTATIS (2014) hat allerdings die Anzahl



Die Einbeziehung des Luftverkehrs in einen wirksamen Emissionshandel wirkt sich zunehmend auf die Ticketpreise aus.

der Flugbewegungen in Deutschland zwischen 2011 und 2013 um 7 % abgenommen. Gleichzeitig gibt es in Deutschland einen Verlagerungstrend weg von kleineren und mittleren Flughäfen hin zu größeren Flughäfen. Auf den kleineren Flughäfen dominieren Low Cost Carrier („Billigflieger“). Diese können aber seit einigen Jahren nicht mehr an ihre früheren Wachstumsraten anknüpfen (Thießen & Haucke 2013). Größter Verursacher von Treibhausgasemissionen ist der Langstreckenflugverkehr. Nationale Flüge machen nur etwa 5 % der Personenverkehrsleistung im Luftverkehr aus, Flüge unter 1.000 km haben einen Anteil von nur etwa 10 %. Rund 70 % der Personenverkehrsleistung des Flugverkehrs sind auf Privatreisen und 30 % auf Geschäftsreisen zurückzuführen. Gut ein Viertel der Gesamtemissionen des Luftverkehrs wird durch den Luftfrachtverkehr erzeugt (Knörr et al. 2012). Hierbei handelt es sich praktisch ausschließlich um internationalen Verkehr. Ähnlich wie der Personenflugverkehr hat auch der Luftfrachtverkehr (aus Deutschland abgehender Flüge) in den letzten 20 Jahren kontinuierlich zugenommen und sich im Zeitraum 1991–2010 mehr als verdreifacht (Knörr et al. 2010).

Gegenüber anderen öffentlichen Verkehrsträgern wird der Luftverkehr in mehrfacher Hinsicht privilegiert. So wird auf Kerosin keine Energiesteuer erhoben, gleichzeitig sind grenzüberschreitende Flüge Mehrwertsteuerfrei. Auch die Infrastruktur, wie zum Beispiel der Bau und Betrieb von Regionalflughäfen, ist vielfach subventioniert. Vor dem Hintergrund der Wachstumsprognosen und der höheren Klimawirksamkeit der Luftverkehrsemissionen ist hier ein Umsteuern notwendig.

Szenarioannahmen

- » Luftverkehr wird in Zukunft teurer werden. Die realen Ticketkosten steigen trotz der Einsparungen durch die zunehmende Effizienz des Luftverkehrs inflationsbereinigt um 40 % gegenüber dem Basisjahr 2010. Die erheblichen externen Umweltkosten des Luftverkehrs werden durch verschiedene Instrumente auf nationaler und internationaler Ebene internalisiert. Die 2011 in Deutschland eingeführte Luftverkehrsteuer wird beibehalten und weiterentwickelt. Der Luftverkehr wird ab 2017 wieder vollständig, das heißt inklusive der internationalen Flüge, in den EU Emissionshandel (EHS) eingebunden (Ende von „stop-the-clock“). Die dem Emissionshandel zugrunde liegenden Treibhausgasreduktionsziele werden ab 2021 verschärft. Ab 2021 wird auf eine Vollauktionierung der Emissionszertifikate des Luftverkehrs umgestellt. Ein internationaler marktbasierter Mechanismus zur Reduktion der Treibhausgasemissionen des Luftverkehrs löst ab 2021 die Einbindung des Luftverkehrs in den EU EHS ab, falls ICAO sich bis 2016 auf ein emissionshandelbasiertes System einigt, das an ambitionierten Klimazielen sowie der Internalisierung der externen Umweltkosten des Luftverkehrs orientiert ist. Zusätzlich werden Subventionen für Regionalflughäfen abgebaut.
- » Auf Basis sich stetig weiterentwickelnder Internet- und Kommunikationstechnologien sind Telemeetings eine zunehmend attraktive Alternative zu Dienstreisen. Schroten (2012) geht auf Basis einer Literaturrecherche und in Anlehnung an Buttazzoni & Rossi (2009) davon aus, dass sich bereits 2020 40 % der Dienstreisen durch Telemeetings ersetzen lassen und in 2030 sogar 60 %. Im Folgenden wird mit einer Substitution von 30 % in 2050 eine konservativere Schätzung vorgenommen.
- » Aufgrund steigender Kosten sinkt die Attraktivität von Wochenend- und Kurztrips per Flugzeug. Langfristig geht der Trend bei Privatreisen per Flug-

Fast 20 % des
Güterumschlags
in den deutschen
Häfen im Jahr 2012
entfielen auf fossile
Energieträger.

zeug wieder in Richtung (zeitlich) längerer und dafür seltenerer Urlaubsreisen. Die durchschnittliche Dauer von Privatreisen per Flugzeug nimmt um 25 % zu und die Anzahl der privaten Flugreisen reduziert sich entsprechend. Damit einher geht auch ein Abbau von Überkapazitäten bei den Billigfliegern und die Schließung subventionsabhängiger Regionalflughäfen.

- » Das Wachstum der Personenverkehrsleistung im Luftverkehr schwächt sich daher in Zukunft ab. Bis 2050 ergibt sich ein Rückgang der Personenverkehrsleistung um 10 % gegenüber 2010.
- » Durch die Internalisierung der externen Kosten nehmen die Kosten im Luftfrachtverkehr ebenso wie im Personenverkehr in Zukunft deutlich zu. Der Luftfrachtverkehr steigt insgesamt weiter an, allerdings weniger stark als in der Vergangenheit (+30 % bis 2050 gegenüber 2010).

4.3.2 Seeverkehr

Ebenso wie der internationale Luftverkehr ist derzeit der internationale Seeverkehr ein Wachstumstreiber. Der Umschlag über deutsche Seehäfen ist im Zeitraum von 2001–2010 um 1,4 % gestiegen. Erste Eckwerte der Seehafenprognose für den Bundesverkehrswegeplan gehen von einem durchschnittlichen jährlichen Wachstum von 2,8 % pro Jahr aus (Makait 2013).

Die International Maritime Organization (IMO) nimmt – je nach Szenario – bis zum Jahr 2050 global ein Wachstum um den Faktor 2,5 bis 4 im Vergleich zu 2007 an (Buhaug et al. 2009). Wie viel Seeverkehr dabei von Deutschland verursacht wird, hängt eng mit dem deutschen Außenhandel zusammen. Der Seeverkehr über deutsche Häfen, der in dieser Studie betrachtet wird, lag im Jahr 2010 bei 1.741 Mrd. tkm (DIW 2013). Dies entspricht etwa 2,7 % des weltweiten Seeverkehrs. Allerdings ist zu beachten, dass deutscher Außenhandel nicht zwangsläufig über deutsche Seehäfen abgewickelt wird, sondern beispielsweise auch über niederländische Häfen stattfinden kann. Mit einem Anteil Deutschlands von etwa 6 % an der Weltwirtschaftsleistung sowie der starken Exportorientierung ist davon auszugehen, dass der von Deutschland verursachte Seeverkehr höher liegt als die oben genannten 2,7 %. Fast 20 % des Güterumschlags in den deutschen Häfen im Jahr 2012 entfielen auf fossile Energieträger (DESTATIS 2013).

Durch eine vermehrte Nutzung von Kurzstrecken-Seeverkehren („short-sea shipping“) lassen sich landgebundene Straßengüterverkehre durch Europa auf das Schiff verlagern. Die EU-Kommission fördert das Vorhaben „motorways of the sea“ im Rahmen der TEN-Projekte sowie im Rahmen der „Connecting Europe Facility“. Das Weißbuch Verkehr der EU-Kommission formuliert das Ziel, bestehende Hindernisse abzubauen.⁷

Szenarioannahmen

- » Der Seeverkehr nimmt bis 2050 global um den Faktor 2,5 zu.
- » Der Anteil Europas und Deutschlands an der Weltwirtschaft und am Seeverkehr geht jedoch zurück: So sinkt der Anteil Deutschlands an der Weltwirtschaftsleistung auf 4 %.
- » Bis 2050 kann durch regionale, erneuerbare Energieversorgung der Umschlag fossiler Energieträger um 95 % reduziert werden.
- » Insgesamt wächst damit der Seeverkehr über deutsche Häfen bis 2050 um den Faktor 1,35.

4.4 Antriebstechnologien

4.4.1 Pkw-Technologien

Mit einem Anteil von über 40 % der verkehrsbedingten Treibhausgasemissionen Deutschlands sind Pkw derzeit eine wesentliche Emissionsquelle.⁸ Die spezifischen Emissionen in Deutschland neu zugelassener Pkw lagen im Jahr 2010 bei 153 g CO₂/km und damit 7,5 % über dem EU-Durchschnitt (Mock 2012). Dies ist vor allem auf das hohe Fahrzeuggewicht zurückzuführen, das 6,5 % über dem EU-Schnitt liegt. Im Jahr 2012 lag die Diskrepanz zwischen deutschen Pkw (141,8 g CO₂/km) und europäischen Pkw (132,2 g CO₂/km) sogar noch höher (KBA 2012; EEA 2013).

Aufgrund steuerlicher Begünstigungen werden derzeit in Deutschland mehr als die Hälfte der Pkw als Firmenwagen, d.h. durch nicht private Halter zugelassen und beeinflussen damit über den Gebrauchtwagenmarkt auch den Pkw-Bestand. Gewerblich zugelassene Pkw haben im Schnitt einen höheren Verbrauch und damit höhere Emissionen als Privat-Pkw. Nach den umweltökonomischen Gesamtrechnungen 2011 des statistischen Bundesamtes betrug der Mehrverbrauch von Firmenwagen im Bestand 2008 knapp 5 %. Die Fahrleistung von Pkw gewerblicher Halter ist im Durchschnitt beinahe doppelt so hoch wie die Fahrleistung privater Halter. Rund 68 % der Firmenwagen werden auch privat genutzt und fallen somit in die Kategorie „Dienstwagen“ (Diekmann et al. 2011). Die meisten Dienstwagennutzer müssen nicht vollumfänglich für die mit der Pkw-Nutzung verbundenen Kosten aufkommen. Das heißt, sie bekommen signifikante Zuschüsse zu den Kraftstoffkosten. Der Anreiz zur Nutzung umweltschonenderer Verkehrsmittel ist gering und die Fahrleistungen sind tendenziell hoch. Berücksichtigt man die höhere Fahrleistung sowie den Mehrverbrauch, so ergibt sich, dass Firmenwagen zwar nur rund 10 % des Pkw-Bestands ausmachen, jedoch rund 18 % der Pkw-Emissionen.

Bis zum Jahr 2015 müssen die CO₂-Emissionen europäischer Neuwagen nach EU-Vorgaben auf 130 g CO₂/km und bis 2021 auf 95 g CO₂/km sinken, wobei Fahrzeuge mit spezifischen Emissionen unter 50 g CO₂/km bis 2022 mehrfach auf die Berechnung des Neuwagenflottenschnitts eines Herstellers angerechnet werden können.⁹ Durch die Vorgaben der EU wird es eine stärkere Angleichung des deutschen und des europäischen CO₂-Emissionsdurchschnitts geben. Dennoch hat es in den vergangenen Jahren einen Trend zu immer stärkerer Motorisierung gegeben. Zudem führte der viel zitierte „SUV-Trend“ zu einer drastischen Steigerung des Anteils schwerer Geländewagen an den Zulassungszahlen zwischen 2008 und 2012 von 6,4 % auf 15 % (DIW 2013). Zukünftige Minderungsoptionen der spezifischen CO₂-Emissionen sind: 1. eine Entwicklung hin zu kleineren, leichteren und weniger stark motorisierten Fahrzeugen; 2. weitere Effizienzsteigerungen bei konventionellen Antrieben und 3. zunehmende Elektrifizierung des Antriebs in Kombination mit einem Einsatz von zusätzlichen erneuerbaren Energien.

Die maximalen
Minderungspotenziale der
CO₂-Emissionen
konventioneller
Pkw liegen bei
50–60 % gegenüber
2010.

Nach Ergebnissen des Öko-Instituts aus dem Forschungsvorhaben „eMobil 2050“ liegen die maximalen Minderungspotenziale konventioneller Pkw bei 50–60 % gegenüber 2010, wobei nur bereits heute bekannte Technologien berücksichtigt sind. Hybridantriebe – ohne eine externe Möglichkeit der Stromaufladung mit einem Stecker – spielen als Effizienztechnologie konventioneller Antriebe eine zunehmend wichtige Rolle. Parallel zu den Effizienzsteigerungen konventioneller Antriebe kommen vermehrt Fahrzeuge mit alternativen Antrieben auf den Markt. Die Bundesregierung hat das Ziel formuliert, bis 2020 eine Million und bis 2030 sechs Millionen Elektroautos auf deutsche Straßen zu bringen. Der Vorteil von Elektroautos ist, dass sie mit Strom aus erneuerbaren Energien versorgt werden können und der elektrische Antrieb gleichzeitig deutlich höhere Wirkungsgrade

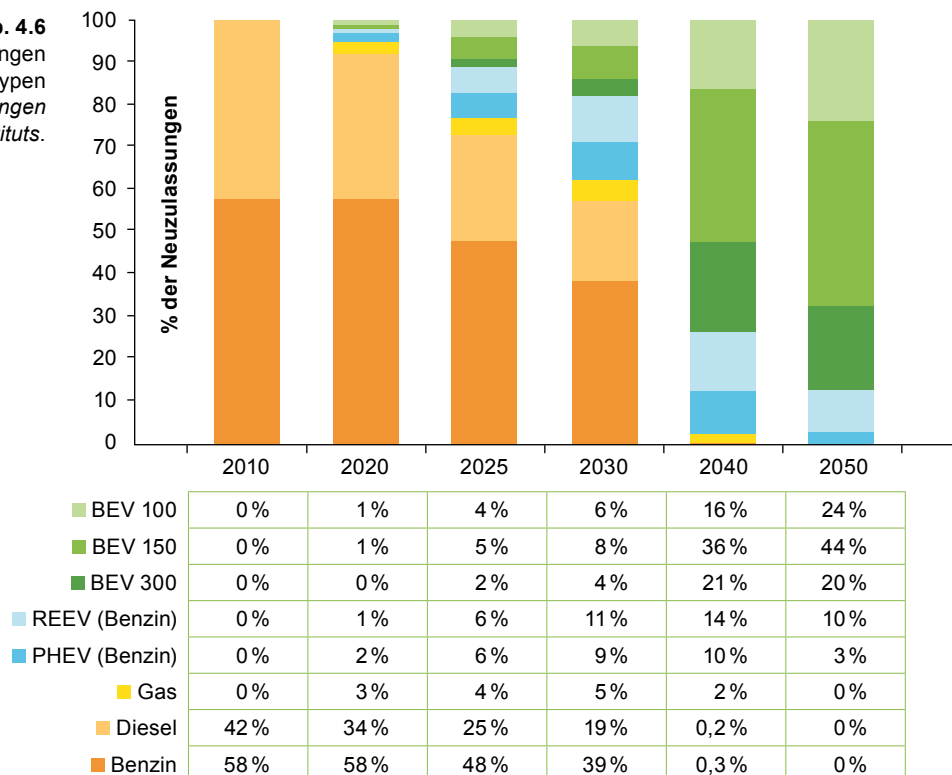


Die Elektromobilität kann langfristig einen großen Beitrag zur Senkung der CO₂-Emissionen des Verkehrs leisten.

erzielt als der Verbrennungsmotor. Es gibt mehrere Varianten von Elektroautos, die mit einem rein elektrischen oder teilelektrischen Antrieb verschiedene Reichweiten zulassen. Reine Elektroautos (Battery Electric Vehicle, BEV) werden ausschließlich mit einem Elektromotor betrieben. Je nach Energiedichte und Größe der Batterien sowie je nach Gewicht des Fahrzeugs sind unterschiedliche Reichweiten möglich. Heute liegen diese meist bei 100–150 km, in der Zukunft werden auch deutlich größere Reichweiten möglich sein. Die zweite Variante der Elektromobilität stellen sogenannte Plug-in-Hybride (Plug-in Hybrid Electric Vehicle, PHEV) dar. Diese Fahrzeuge kombinieren ein elektrisches und ein konventionelles Antriebssystem und können ebenso wie BEVs extern geladen werden. Rein elektrisch sind mit PHEVs meist Reichweiten von ca. 50 km möglich, womit sich jedoch die meisten Alltagsfahrten abdecken lassen. Längere Fahrten sind durch den konventionellen Antrieb aber bei Bedarf trotzdem ohne Zwischenladung möglich. Der dritte Fahrzeugtyp sind sogenannte Range Extender (Range-Extended Electric Vehicle, REEV). Dabei handelt es sich wie bei den BEVs um Fahrzeuge mit einem rein batterieelektrischen Antrieb, allerdings haben REEVs einen kleinen Verbrennungsmotor an Bord, mit dem sich bei Bedarf die Batterie aufladen lässt. So werden auch mit REEVs größere Entfernungen möglich. Der Großteil der Fahrleistung wird allerdings rein elektrisch absolviert.

Die Marktpotenziale von Elektrofahrzeugen sind relativ unsicher und hängen stark von den Rahmenbedingungen (v.a. Batteriepreisentwicklung, Kraftstoffpreisentwicklung, Strompreisentwicklung, Nutzerakzeptanz und Mehrpreisbereitschaft) ab. Unsicher ist ebenso die zukünftige Entwicklung der Brennstoffzellentechnologie. Da jedoch der Aufbau einer flächendeckenden Wasserstoffinfrastruktur mit hohen Kosten verbunden wäre, wird in diesem Szenario nicht davon ausgegangen, dass sich Brennstoffzellenfahrzeuge durchsetzen.

Abb. 4.6
Pkw-Neuzulassungen
nach Antriebstypen
Quelle: Berechnungen
des Öko-Instituts.



Szenarioannahmen

- » Der Umgang mit dem Pkw wird pragmatischer. Das Prinzip „Nutzen statt Besitzen“ gewinnt an Bedeutung. Der Anteil geteilter Nutzung an der Pkw-Fahrleistung erreicht im Jahr 2050 36 % (in Städten 70 %, im Umland 20 %).
- » Es gibt langfristig eine Segmentverschiebung hin zu kleineren Pkw. Die Neuzulassungen mittlerer und großer Pkw sinken um 20 % zugunsten von kleinen Pkw und Microcars. Die durchschnittliche Fahrzeuggröße neu zugelassener Pkw gleicht sich dadurch langfristig dem heutigen EU-Schnitt an und der „SUV-Trend“ setzt sich nicht bis 2050 fort.
- » Der EU-Emissionsstandard wird auf 65–68 g CO₂/km im Jahr 2025 und 50 g CO₂/km im Jahr 2030 festgelegt. Spätestens ab 2030 werden in der EU-Regulierung nicht nur die direkten Emissionen, sondern die Lebenszyklus-Emissionen („Well-to-Wheel“-Emissionen) reguliert, um die Klimawirkung von Fahrzeugen adäquat zu berücksichtigen.
- » Konventionelle Antriebe erreichen bis 2030 eine Minderung des durchschnittlichen Energieverbrauchs von 52 % gegenüber 2010, vor allem durch eine starke Verbreitung von Hybrid-Antrieben (ohne externe Stromauflademöglichkeit) (Tab. 4.1).
- » Parallel setzen sich Elektroautos durch: Die Batteriepreise sinken bis 2030 auf maximal 190 Euro/kWh und bis 2050 auf maximal 150 Euro/kWh (heute: 400–600 Euro/kWh). Die Energiedichte der Batterien und damit auch die Reichweite nimmt durch neuartige Batterietechnologien, z. B. auf Lithium-Schwefel- und Lithium-Luft-Basis, deutlich zu. Da sich die Nutzungsmuster von Pkw verändern und diese deutlich seltener für Langstrecken genutzt werden (siehe oben), stellen Reichweiten von 150–300 km nur noch selten eine Restriktion dar. Neben rein elektrisch betriebenen Fahrzeugen mit unterschiedlichen Batteriekapazitäten und Reichweiten von 100, 150 oder 300 km (BEV100, BEV150, BEV300) kommen auch Plug-in-Hybride (PHEV) und Fahrzeuge mit Range-Extender (REEV) auf den Markt. Vor 2030 dominieren PHEVs die Neuzulassungen von Elektroautos, langfristig geht jedoch der Trend in Richtung von BEVs sowie REEVs. Der Anteil von Elektroautos an den Neuzulassungen in Deutschland steigt insgesamt auf bis zu 5 % in 2020 und 38 % in 2030. Ab 2040 werden fast ausschließlich Elektroautos zugelassen (siehe Abb. 4.6).
- » Gasfahrzeuge (Flüssiggas und Erdgas) gewinnen nur vorübergehend bis 2030 an Bedeutung. Ihr Anteil geht dann aber zugunsten der Elektromobilität fast vollständig zurück (Abb. 4.6).
- » Durch eine Umgestaltung der Pkw-Emissionsstandards auf eine Well-to-Wheel-Bilanzierung gibt es auch für Elektroautos einen Anreiz zur Effizienzsteigerung (–30 % bis 2050 gegenüber 2010). Wesentlicher Faktor für die Effizienzsteigerung ist dabei auch das sinkende Batterie- und damit Fahrzeuggewicht.

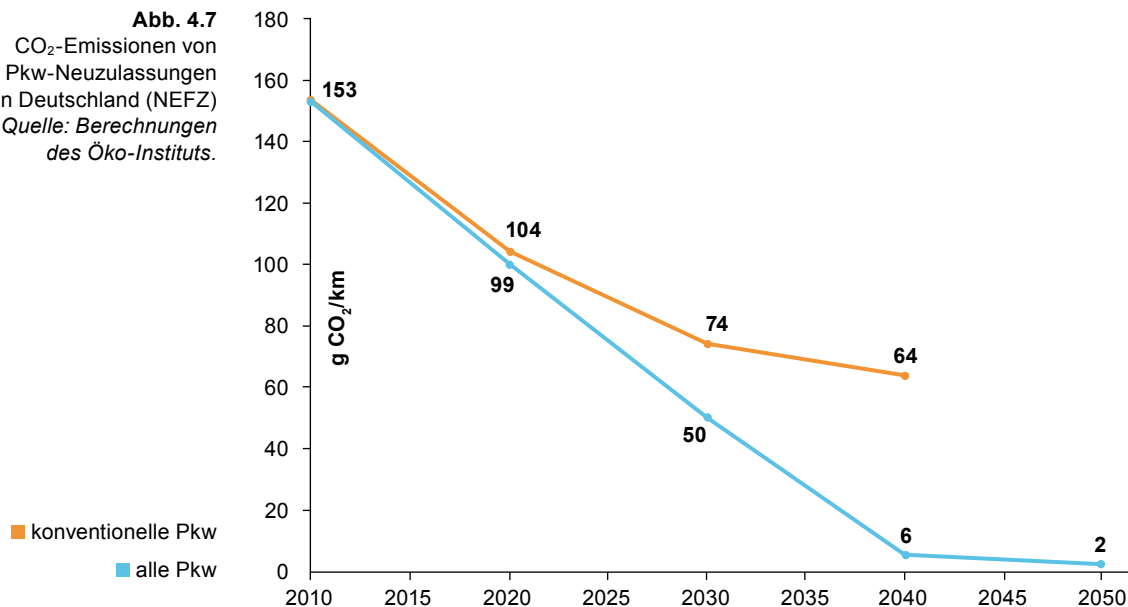
Exkurs: Entwicklung der CO₂-Emissionen von Pkw-Neuzulassungen in Deutschland und Europa

Tab. 4.1
CO₂-Emissionen von Pkw-Neuzulassungen in der EU 2025 und 2030 (NEFZ)
Quelle: Berechnungen des Öko-Instituts.

	2025		2030		2040	
Minderung konventioneller Fahrzeuge gegenüber 2010	-42 %		-52 %		-58 %	
	Nzl.	g CO ₂ /km	Nzl.	g CO ₂ /km	Nzl.	g CO ₂ /km
konventionell	79 %	81	68 %	67	2 %	58
BEV	9 %	0	16 %	0	74 %	0
REEV/PHEV	12 %	30	16 %	27	24 %	22
alle PKW	100 %	68	100 %	50	100 %	6

Wie der Zielwert von 65–68 g im Jahr 2025 und von 50 g im Jahr 2030 in der EU erreicht werden kann, ist in Tabelle 4.1 dargestellt. Die Effizienzsteigerungen entsprechen dabei den im Szenario für deutsche Neuzulassungen hinterlegten Minderungen. Wesentlich für die Erreichung des Zielwertes ist vor allem die Minderung der spezifischen CO₂-Emissionen konventioneller Fahrzeuge von 42 % bis 2025 und 52 % bis 2030 (gegenüber dem Basisjahr 2010). Der angenommene Marktanteil der Elektromobilität an den Pkw-Neuzulassungen liegt im EU Durchschnitt etwas niedriger als in Deutschland (Abb. 4.6).

Abb. 4.7
CO₂-Emissionen von Pkw-Neuzulassungen in Deutschland (NEFZ)
Quelle: Berechnungen des Öko-Instituts.



In Abbildung 4.7 sind die durchschnittlichen CO₂-Emissionen der Neuzulassungen in Deutschland dargestellt. Während diese im Jahr 2020 mit 99 g CO₂/km noch über dem EU-Zielwert liegen, wird im Jahr 2030 durch die Angleichung der Fahrzeuggröße und Motorisierung an den EU-Schnitt der Wert von 50 g CO₂/km erreicht. Bis 2040 reduzieren sich die durchschnittlichen direkten

Emissionen auf nahe null, da fast nur noch (teil)elektrische Fahrzeuge zugelassen werden. Die Gesamtbilanz der Fahrzeuge hängt dann zunehmend von der Art der Strombereitstellung ab, was durch eine entsprechende Umgestaltung der Regulierung berücksichtigt werden sollte. Damit elektrisch betriebene Fahrzeuge wirklich als „Nullemissionsfahrzeuge“ gelten können, müssen sie mit zusätzlich erzeugtem Strom aus regenerativen Quellen betrieben werden. Ist dies nicht der Fall, ist der deutsche Strom-Mix maßgebend für die Gesamtbilanz.

4.4.2 Technologien leichter Nutzfahrzeuge

Auch leichte Nutzfahrzeuge, das heißt Lkw mit einem zulässigen Gesamtgewicht von unter 3,5 t (im Folgenden LNF), unterliegen einer EU-Regulierung: Ihre Emissionen müssen bis 2017 auf 175 g und bis 2020 auf 147 g CO₂/km reduziert werden.

Der CO₂-Emissionszielwert von 175 g CO₂/km wurde auf Basis von Neuzulassungsdaten aus dem Jahr 2007 festgesetzt. Neuere Daten für das Zulassungsjahr 2010 mit einer höheren Datenqualität weisen wesentlich geringere spezifische CO₂-Emissionen auf als die für die Benennung des Emissionszielwerts verwendeten. Smokers (2012) geht davon aus, dass die durchschnittlichen CO₂-Emissionen von LNF im Jahr 2010 bei 181,4 g CO₂/km lagen und somit nur 3,7 % über dem Zielwert für 2017. Durch die für das Ausgangsjahr hoch angesetzten spezifischen CO₂-Emissionen der LNF stellt die derzeitige Regulierung bis zum Jahr 2019 kein besonders ambitioniertes Reduktionsziel dar.

Der Schwerpunkt der Diskussionen zur Novellierung der beiden Regulierungen 443/2009 und 510/2011 lag – zumindest in Deutschland – bisher bei der Ausgestaltung der Regulierung für Pkw. Dies liegt zum einen an der geringeren Zulassungszahl der LNF im Vergleich zu Pkw. Es werden annähernd zehn Mal so viele Pkw wie LNF in einem Jahr in der EU zugelassen. Zudem ist der Anteil der deutschen Hersteller bei den Neuzulassungen im Vergleich zu italienischen und französischen Automobilherstellern eher gering.

Szenarioannahmen

- » Bei leichten Nutzfahrzeugen wird eine ähnliche Neuzulassungsstruktur wie bei Pkw angenommen.
- » Der spezifische Energieverbrauch konventioneller leichter Nutzfahrzeuge reduziert sich bis 2030 um 40 % gegenüber 2010.

4.4.3 Lkw-Technologien

Fast 80 % der CO₂-Emissionen im Straßengüterverkehr mit Lkw über 3,5 t zulässigem Gesamtgewicht werden durch Last- und Sattelzüge verursacht und sind vor allem auf den überregionalen Verkehr zurückzuführen. Heute kommen fast ausschließlich flüssigkraftstoffbetriebene Motoren auf Benzin- und Dieselsbasis zum Einsatz.

Für die Zukunft sind drei verschiedene Technologiepfade für Klimaschutz im Lkw-Verkehr denkbar: Flüssigkraftstoffbetriebene oder gasbetriebene Lkw mit alternativem Kraftstoffeinsatz oder elektrisch betriebene Lkw mit externer Stromzufuhr („Oberleitungs-Lkw“). Während für kleinere Lkw durchaus batterieelektrische bzw. Plug-in-Lösungen infrage kommen, sind diese nach heutigem Kenntnisstand für große Lkw allein auf Grund der dafür nötigen Batteriegröße eher keine Option. Um bei rein batterieelektrischen Sattelzügen mittelfristig

Fast 80 % der
CO₂-Emissionen im
Straßengüterverkehr
mit Lkw über 3,5 t
zulässigem Gesamt-
gewicht werden durch
Last- und Sattelzüge
verursacht.

eine Reichweite von 500 km sicherzustellen, müsste die Batterie acht Tonnen wiegen. Alle drei Technologiepfade sind mit spezifischen Vor- und Nachteilen behaftet. Sowohl flüssigkraftstoffbetriebene als auch gasbetriebene Lkw können nur den benötigten Beitrag zur Senkung der Treibhausgasemissionen leisten, wenn sie mit nachhaltig erzeugten Biokraftstoffen oder aus erneuerbarem Strom generierten Kraftstoffen versorgt werden. Bei Einsatz erneuerbaren Methans können dabei voraussichtlich höhere Wirkungsgrade erzielt werden als bei Einsatz von strombasierten Flüssigkraftstoffen (Kasten et al. 2013). Spezifische Herausforderungen sowie Vor- und Nachteile beim Kraftstoffeinsatz werden in Kapitel 4.5 beleuchtet. Gas-Lkw haben gegenüber Flüssigkraftstoff-Lkw den Nachteil des erhöhten Platzbedarfs für den Tank und der damit einhergehenden reduzierten Reichweite. Auch wenn sich mit dem direkten Einsatz von Strom mit Abstand die höchsten Wirkungsgrade und die beste Treibhausgasbilanz erzielen lassen, stellt die benötigte Infrastruktur bei Oberleitungs-Lkw das vermutlich größte Hindernis dar.

Neben alternativen Antrieben gibt es aber auch weitere Effizienzpotenziale, welche auch bei konventionellen Antrieben zum Einsatz kommen können, z. B. durch Verbesserung der Aerodynamik und Hybridisierung. Mittelfristig ist dies ein wichtiger Baustein zur Reduktion der Treibhausgasemissionen im Straßengüterverkehr. Derzeit wird auf EU-Ebene für Lkw über 3,5 t zulässigem Gesamtgewicht die Einführung von Emissionsstandards vorbereitet. Wenn diese ambitioniert ausgestaltet werden, könnten sie die Ausschöpfung der Effizienzpotenziale vorantreiben.

Szenarioannahmen

- » Innerstädtischer Verteilverkehr erfolgt zunehmend und in 2050 ausschließlich batterieelektrisch (Ziel emissionsfreie Innenstädte). Dafür werden vorwiegend batterieelektrische (bis 12 t) bzw. Plug-in-Hybrid-Fahrzeuge (>12 t) mit moderater elektrischer Reichweite (100 km) eingesetzt.
- » Knapp die Hälfte der Verkehrsleistung im Güterverkehr werden per Schiene und Binnenschiff erbracht (s. o.). Der verbleibende Langstrecken- und Regionalverkehr auf der Straße erfolgt zunächst vor allem mit Diesel- und nach 2030 überwiegend mit Gasfahrzeugen.
- » Der Energieverbrauch von neu zugelassenen Diesel- und Gas-Lkw reduziert sich in Abhängigkeit von Größenklasse und Einsatzprofil um durchschnittlich gut 30 % bis 2050 gegenüber dem Basisjahr 2010. Effizienzpotenziale werden dabei großteils schon bis zum Jahr 2030 realisiert.

4.4.4 Luft- und Seeverkehr

Die Treibhausgasemissionen des internationalen Luftverkehrs sind ebenso wie der internationale Seeverkehr nicht Bestandteil der Verpflichtungen unter dem Kyoto-Protokoll. Vielmehr soll sich die ICAO auf internationaler Ebene um den Klimaschutz im Luftverkehr kümmern. Die ICAO hat auf ihrer 37. Versammlung in 2010 einen Plan zur Reduktion der Luftverkehrsemissionen beschlossen. In einer freiwilligen Selbstverpflichtung soll die Effizienz der eingesetzten Flugzeuge jährlich um 2 % in Bezug auf das Kraftstoffvolumen verbessert werden. Zudem ist vorgesehen, die absoluten Treibhausgasemissionen ab 2020 – vorwiegend durch die Verwendung alternativer Kraftstoffe – konstant zu halten.

In der Seeschifffahrt sind deutliche Effizienzzuwächse durch immer größere Containerschiffe (Ladepazität bis zu 20.000 TEU) zu erwarten. Darüber hinaus

arbeitet die International Maritime Organization (IMO) an Maßnahmen zur Erhöhung der Effizienz von neuen Schiffen und Bestandsschiffen. Als alternatives Antriebskonzept für den Seeverkehr sind derzeit mit Flüssiggas (LNG, liquefied natural gas) betriebene Schiffe in der Diskussion. Vor allem vor dem Hintergrund neuer Regulierungen von Schwefeldioxid- und Stickoxidemissionen stellen LNG-Schiffe eine Alternative dar. Vergleicht man den Einsatz von Schiffsdiesel und fossilem Flüssiggas, so hängt die Reduktion der Treibhausgasemissionen wesentlich von der Höhe des Methanschlupfes bei der Kraftstoffbereitstellung und der Verbrennung ab. Die Reduktion liegt in der Größenordnung von 0–27 %, wobei eine Größe von 10 % als wahrscheinlicher Wert angesehen wird (Lowell et al. 2013). Zukünftig könnte jedoch das Flüssiggas auf biogener oder strombasierter Basis bereitgestellt werden und damit stärker zur Treibhausgasminderung beitragen.

Szenarioannahmen

- » Der Energieverbrauch im Luftverkehr (je Tonnenkilometer bzw. Personenkilometer) geht gemäß dem ICAO-Ziel um 2 % p.a. zurück.
- » Der Energieverbrauch je Tonnenkilometer sinkt im Seeverkehr um 50 % gegenüber 2010. 15 % des Seeverkehrs aus deutschen Häfen im Jahr 2050 basieren auf LNG.

4.5 Kraftstoffe

Derzeit wird der Verkehr nahezu ausschließlich mit Kraftstoffen auf Kohlenwasserstoffbasis angetrieben. Wie oben dargestellt, ist nicht nur für den ÖV, sondern auch für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge die direkte Stromnutzung in Kombination mit zusätzlichen erneuerbaren Energien die beste Option zur Dekarbonisierung des Verkehrs nach Ausschöpfung von Verkehrsvermeidungs- und Verlagerungspotenzialen sowie nach Effizienzsteigerungen. Bei direkter Stromnutzung lassen sich zudem mit Abstand die besten Wirkungsgrade erzielen.

Der Einsatz von Kraftstoffalternativen ist keinesfalls als Alternative zu Maßnahmen im Bereich von Vermeidung, Verlagerung und Effizienz zu sehen.

Es gibt jedoch Verkehrsträger, für die nach heutigem Wissensstand auch zukünftig keine plausible Alternative zum Antrieb auf Basis von Gas- und Flüssigkraftstoffen zu erwarten ist. Dies gilt vor allem für den Schwerlast-, Luft- und Seeverkehr. Es ist natürlich nicht ausgeschlossen, dass zukünftige Entwicklungen diese Prämisse der „Alternativlosigkeit“ widerlegen werden. Geht man jedoch zunächst von dieser Prämisse aus, so folgt: Auch mit prioritär zu implementierenden ambitionierten Maßnahmen zur Verlagerung, Vermeidung und Effizienzsteigerung verbleibt im Jahr 2050 ein „Restbedarf“ an flüssigen oder gasförmigen Kraftstoffen im Verkehrssektor, der in Kapitel 5.3 quantifiziert wird. Wichtig ist dabei, dass der Einsatz nachhaltiger Kraftstoffalternativen keinesfalls als Alternative zu den Maßnahmen im Bereich von Vermeidung, Verlagerung und Effizienz zu sehen ist, sondern diese gezielt und komplementär ergänzen sollte, um langfristig zum Ziel einer fast vollständigen Reduktion der Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor zu gelangen.

Während Maßnahmen wie zum Beispiel die Verlagerung von Pkw-Verkehren auf ÖPNV und Fahrrad vergleichsweise unstrittig und zudem mit positiven Gesundheitseffekten (weniger Lärm und Luftschadstoffe) verbunden sind, ist der Beitrag alternativer Kraftstoffoptionen zum Klimaschutz sehr viel umstrittener. Wesentliche Lösungsoptionen, die nach aktueller Erkenntnis infrage kommen, sind Biokraftstoffe oder strombasierte Kraftstoffe.

4.5.1 Biokraftstoffe

Im Jahr 2012 wurden ca. 3,8 Mio. t Biokraftstoffe in Deutschland eingesetzt (FNR 2013a). Dies entspricht ca. 34 TWh oder 121 Petajoule (PJ) Endenergie. Aktuell liegt damit der Biokraftstoffanteil (energetisch) am gesamten Kraftstoffverbrauch in Deutschland bei etwa 5,2 % (DBFZ 2014). Hierbei handelt es sich beinahe ausschließlich um Flüssigkraftstoffe (Biodiesel, Bioethanol sowie sehr eingeschränkt Pflanzenöle) der „ersten Generation“, das heisst auf Basis von Anbaubiomasse aus öl- oder stärkehaltigen Pflanzen. In begrenztem Maße kommen bereits heute Biodiesel auf der Basis von Altspeiseölen und -fetten sowie Biomethan, vornehmlich aus Rest- und Abfallstoffen (BLE 2013), zum Einsatz. Bislang wird der Einsatz von Biokraftstoffen in der EU durch die Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED) sowie die Kraftstoffqualitätsrichtlinie (FQD) vorangetrieben.¹⁰ Während die RED einen von den Mitgliedsstaaten im Jahr 2020 zu erfüllenden Anteil von 10 % erneuerbaren Energien am Bruttoendenergieverbrauch des Verkehrssektors festlegt, schreibt die FQD den Anbietern von Kraftstoffen vor, die Lebenszyklus-Treibhausgasemissionen pro Energieeinheit der von ihnen gelieferten Kraftstoffe bis zum 31.12.2020 um 6 % zu reduzieren.¹¹

Für Biodiesel aus Soja oder Raps kann die Treibhausgasemissionsbilanz unter Umständen schlechter ausfallen als die der fossilen Referenz.



Zusätzliche Treibhausgasemissionen in erheblichem Ausmaß können bei Biokraftstoffen durch indirekte Landnutzungsänderungen (iLUC) anfallen.

4.5.1.1 Treibhausgasbilanz von Biokraftstoffen und iLUC

Biokraftstoffe werden in den deutschen Emissionsinventaren des Verkehrssektors mit null Treibhausgasemissionen bilanziert. Dies verschweigt, dass bei Anbau, Verarbeitung und Transport der Rohstoffe durchaus Emissionen entstehen. Zusätzliche Treibhausgasemissionen in erheblichem Ausmaß können durch indirekte Landnutzungsänderungen (iLUC) anfallen, falls der Anbau von Pflanzen für die Biokraftstoffproduktion den Anbau von Nahrungspflanzen auf kohlenstoffreiche Wald- oder Brachflächen verdrängt. Studien im Auftrag der EU-Kommission zur Quantifizierung des iLUC-Effektes deuten darauf hin, dass eine Ausweitung der Biokraftstoffproduktion zur Erreichung der EU-Ziele bis 2020 die beabsichtigte Treibhausgasemissionsminderung deutlich reduzieren würde, wenn man dabei mögliche iLUC-Emissionen berücksichtigt (Laborde 2011; Laborde et al. 2014). Für Biodiesel aus Soja oder Raps kann die Treibhausgasemissionsbilanz – unter Berücksichtigung von iLUC – sogar schlechter ausfallen als die der fossilen Referenz. Auch wenn die genaue Quantifizierung und Abgrenzung von iLUC-Emissionen wissenschaftlich umstritten ist, wird in der EU das effektive Potenzial eines großflächigen Einsatzes von Biokraftstoffen aus Anbaubiomasse zur Treibhausgasemissionsreduktion deutlich angezweifelt. Bezieht man alle Nutzungen ein, so liegt der derzeitige Flächenverbrauch Deutschlands (je Einwohner) deutlich über dem weltweiten Durchschnitt, da durch Warenimporte „virtuelle Flächenimporte“ stattfinden (Lugschitz et al. 2011; Bringezu et al. 2012). Der globale Druck auf Land wird bei wachsender Weltbevölkerung noch weiter steigen. Auch Berichte über negative soziale Auswirkungen in Biokraftstoffproduktionsländern der Dritten Welt (u.a. Landgrabbing, Ausbeutung) sowie gesundheits-, boden- und biodiversitätsschädigende Anbaupraktiken (siehe z. B. EMPA 2012 oder Cotula et al. 2009) haben dazu geführt, die Sinnhaftigkeit eines großflächigen Einsatzes von Biokraftstoffen aus Anbaubiomasse zu hinterfragen.

Die Kommission, das Europäische Parlament sowie die litauische Ratspräsidentschaft haben in den letzten beiden Jahren Vorschläge zur Änderung von RED und FQD vorgelegt, um möglichen Treibhausgasemissionen aus indirekten Landnutzungsänderungen Rechnung zu tragen, die durch die Produktion von nahrungsmittelpflanzenbasierten Biokraftstoffen entstehen.¹² Auch wenn eine endgültige Einigung noch nicht in Sicht ist, soll nach Ansicht der EU-Kommission die Biokraftstoffproduktion auf Nahrungsmittelpflanzenbasis zur Erreichung der Ziele aus RED und FQD nicht ausgeweitet werden. Nach 2020 sollen nahrungsmittelpflanzenbasierte Biokraftstoffe in der EU keine öffentliche Förderung mehr erhalten. Auch die Fortschreibung des Mengenziels für den Einsatz erneuerbarer Energien im Verkehrssektor aus der RED oder des Ziels zur Reduktion der Treibhausgasintensität von Kraftstoffen aus der FQD wird von der Kommission derzeit nicht angestrebt (Europäische Kommission 2014).

4.5.1.2 Biokraftstoffoptionen aus Sicht der Verbände

Wegen der oben genannten Zweifel an ihrer Nachhaltigkeit bleiben Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse im vorliegenden Konzept als Option für die Treibhausgasemissionsreduktion im Verkehrsbereich unberücksichtigt.

Der langfristige Fokus richtet sich auf biogene Kraftstoffalternativen, deren Produktion keine Flächen beansprucht und nicht in Konkurrenz mit der Nahrungsmittelproduktion steht. Dazu zählen Biokraftstoffe, die unter Anwendung physikalisch-chemischer, biochemischer oder thermochemischer Konversionsverfahren aus Abfällen und Reststoffen gewonnen werden.¹³ Auch aus Algen und Bakterien könnten zukünftig Kraftstoffe gewonnen werden. Diese Alternativen

Für die meisten Rohstoffe bestehen schon etablierte Verwertungswege in der stofflichen sowie der energetischen Nutzung zur Strom- und Wärmeerzeugung.

werden oftmals als „Biokraftstoffe der zweiten und dritten Generation“ bezeichnet. Darunter fallen

- » bereits heute verfügbare Kraftstoffoptionen wie Biodiesel und HVO/HEFA-Kraftstoffe auf Basis tierischer Fette und Altfette sowie Biomethan auf Basis vergärbare Rohstoffe (u.a. Exkrementen aus der landwirtschaftlichen Produktion, Bioabfall);
- » zukünftige Optionen wie Bioethanol, Bio-SNG (synthetic natural gas) und Biomass-to-Liquid-Kraftstoffe (BtL) auf Basis von lignozellulosem Material (u.a. Stroh, Waldrestholz, Altholz) sowie Kraftstoffe auf Basis von Algen und Bakterien.

Je nach Rohstoffkategorie und Berechnungsmethodik liegen die Treibhausgasemissionen von Biokraftstoffen aus Abfall- und Reststoffen bei umfangreicher Lebenszyklusbilanzierung um 60–90 % niedriger als bei der fossilen Referenz Benzin/Diesel (Malins et al. 2014).

Allerdings sind auch bei der Nutzung von Abfall- und Reststoffen kritische Punkte zu beachten: Erstens bestehen für die meisten Rohstoffe schon etablierte Verwertungswege in der stofflichen Nutzung sowie der energetischen Nutzung zur Strom- und Wärmeerzeugung. Nutzungskonkurrenzen werden in Zukunft eher zu- als abnehmen. Während die Bioökonomiestrategie der Bundesregierung aufgrund höherer bestehender Wertschöpfungspotenziale für Ausweitung und Priorität der stofflichen Nutzung von Biomasse eintritt, will die Bundesregierung gleichzeitig die Förderung der Strom- und Wärmeerzeugung aus Biomasse im Zuge der Reform des Erneuerbare-Energien-Gesetzes vorwiegend auf Abfall- und Reststoffe begrenzen (BMEL 2013; Bundesregierung 2014). Eine Nutzung der begrenzten Potenziale ist somit von zukünftigen politischen Allokationsstrategien abhängig. Zweitens erfüllen manche Rohstoffe, vor allem Getreidereststroh, eine wichtige humusbildende Funktion – bei vollständiger Nutzung dieser Rohstoffe ginge damit eine wichtige Ökosystemdienstleistung verloren. Holzarartige Biomasse dient als besonders langfristiger Kohlenstoffspeicher, was bei der Treibhausgasemissionsbilanzierung berücksichtigt werden muss. Drittens kann es bei Inwertsetzung von Abfall- und Reststoffen durch politische Anreize zu Missbrauch, wie z. B. der künstlichen Produktion von Altspeisefett kommen.

Ein Einsatz von Biokraftstoffen auf Abfall- und Reststoffbasis als langfristige Option für den Klimaschutz im Verkehrssektor ist nur zu befürworten, wenn

- » bei ganzheitlicher Treibhausgasemissionsbilanzierung (inkl. „carbon debt“ und eventuellen iLUC-Effekten) eine Emissionsreduktion von mindestens 60 % gegenüber der fossilen Referenz erreicht wird,
- » klare Nachhaltigkeitskriterien für die Nutzung von Abfall- und Reststoffen etabliert werden,
- » ökologische Grenzen der Nutzung eingehalten werden, die einen Verlust von Ökosystemdienstleistungen wie einer humusbildenden Funktion oder Schäden für die Biodiversität verhindern,
- » Umwelt- und Sozialstandards bei der Rohstoffgewinnung eingehalten werden,
- » das Prinzip einer kaskadischen Nutzung mit Vorrang für die stoffliche Nutzung realisiert wird und
- » regionale Rohstoffkreisläufe gestärkt werden.

Während die Nutzung von Abfall- und Reststoffen zur Strom- bzw. Wärmeerzeugung aktuell meist ein höheres Treibhausgasvermeidungspotenzial als die Nutzung als Biokraftstoff bietet, stehen für den Energieerzeugungssektor mit

Wie viele Abfall- und Reststoffe für eine energetische Nutzung im Verkehrssektor zur Verfügung stehen, lässt sich für den Zeithorizont bis 2050 kaum einschätzen.

Windkraft und Photovoltaik in Kombination mit Speichern langfristig Alternativen zur Verfügung. Im Verkehrssektor besteht hingegen – wie oben beschrieben – auch nach Ausschöpfung der Alternativen langfristig ein Restbedarf an Gas- und Flüssigkraftstoffen. Zudem hängt das Treibhausgasvermeidungspotenzial maßgeblich von der zu ersetzenden fossilen Referenz ab. Deren Emissionsbilanz droht sich im Verkehrssektor durch vermehrte Verwendung von Kraftstoffen aus nicht konventionellen Erdölen, wie z. B. Ölsanden oder Tiefseeöl, deutlich zu verschlechtern (DBFZ 2014).

4.5.1.3 Biokraftstoffpotenzialabschätzungen bis 2050

Wie viele Abfall- und Reststoffe für eine energetische Nutzung im Verkehrssektor zur Verfügung stehen, lässt sich für den Zeithorizont bis 2050 kaum einschätzen. Zu unklar ist die weitere Entwicklung bestehender Nutzungskonkurrenzen, die Verfügbarkeit der benötigten Technologien sowie die weitere Entwicklung der Rahmenbedingungen. Eine approximative Annäherung kann jedoch über die heute theoretisch verfügbaren Potenziale („technisches Brennstoffpotenzial“) geleistet werden, wenn man die technischen, strukturellen, gesellschaftlichen, gesetzlichen sowie ökologischen Restriktionen berücksichtigt. Dabei wird der stofflichen Nutzung prinzipiell Vorrang eingeräumt. Eine energetische Nutzung kann sich dann z. B. im Falle von Altholz aber im Sinne einer kaskadischen Nutzung der stofflichen Nutzung anschließen. Nutzungskonkurrenzen des Strom- und Wärmemarktes sind allerdings nicht berücksichtigt, da hier bis 2050 andere Dekarbonisierungsoptionen zur Verfügung stehen (WWF 2009). Unter Berücksichtigung des jeweils bevorzugten Konversionsverfahrens und dessen Wirkungsgrad lässt sich aus dem Brennstoffpotenzial das Biokraftstoffpotenzial zur Deckung des Endenergiebedarfs errechnen.

In erster Linie hängen die Potenzialabschätzungen von der Auswahl der infrage kommenden Rohstoffe ab. Für die hier vorgenommene Potenzialabschätzung werden folgende Rohstoffkategorien berücksichtigt:

- » Altspeisefette und -öle (UCO) aus Gastronomie und Nahrungsmittelindustrie
- » tierische Exkremente aus Großbetrieben der Rinder-, Schweine- und Hühnerhaltung
- » Bio- und Grünabfälle¹⁴ sowie gewerbliche Speiseabfälle nach Abzug von Störstoffanteilen, Sammelverlusten und Wassergehalt
- » holziges und halmgutartiges Material aus der Pflege öffentlicher Grünflächen sowie Golf- und Sportplätzen, der Landschafts-, Naturschutz- und privater Gartenpflege
- » Getreide- und Rapsstroh nach Abzug der stofflichen Nutzung (u.a. als Einstreu) sowie unter Beachtung der Humusfunktion
- » bereits heute energetisch genutztes Derbholz inkl. Rinde sowie ungenutzter Zuwachs (Derb- und Reisholz)
- » Waldrestholz, das Kronenderbholz (gemessen vom Trennschnitt bis zum Mindestschaftdurchmesser von 7 cm), Reisholz (alle oberirdisch verholzten Teile mit einem Durchmesser von weniger als 7 cm) und kurze Stammabschnitte (X-Holz) umfasst
- » Altholz sowie Industrieholz aus der stofflichen Holznutzung inklusive Holzresten aus der Holzbe- und -verarbeitenden Industrie nach Abzug der stofflichen Wiederverwertung

Wie in Tabelle 4.2 dargestellt, ergeben aktuelle Quellen für diese Rohstoffkategorien ein Biokraftstoffpotenzial von maximal 485 PJ/Jahr zur Deckung des Endenergiebedarfs des Verkehrssektors.¹⁵ Dieses Potenzial stellt jedoch einen theoretischen und kaum zu realisierenden Idealwert dar. In diesem Szenario

	Altspeisefette und -öle	Tierische Exkremente	Bioabfall	Landschaftspflegematerial	Getreidestroh	Derbholz (genutzt/ ungenutzt)	Waldrestholz	Alt- und Industrieholz
Jährliches Aufkommen	45.000t bis 200.000t	95 Mio.t Rinder-, 36 Mio.t Schweine- sowie 6 Mio.t Hühnerexkremente; $\Sigma = 140 \text{ Mio.t}$	8,5 Mio. t Bio- und Grünabfall; 1,8 Mio. t gewerbliche Speiseabfälle	7,9 Mio. t halmgutartige Frischmasse	8,6 Mio. t Trocken- substanz	12,8 Mio. t _{airo} (bereits genutzt); 5,1 Mio. t _{airo} (ungenutzter Zuwachs)	8,6 Mio. t _{airo}	ca. 7 Mio. t _{uro} ; abzüglich stofflicher Nutzung ~3,7 Mio. t TM
Technisches Brennstoffpotenzial (PJ/a)*	1,6 bis 7,9 PJ/a	77,9 PJ/a	Bioabfälle: 10,43 PJ/a; Grünabfälle: 2,58 PJ/a; Speiseabfälle: 2,61 PJ/a; $\Sigma = 15,62 \text{ PJ/a}$	6,16 PJ/a Biogaspotenzial	153 PJ/a	347 PJ/a (246 PJ/a bereits genutzt; 101 PJ/a ungenutzter Zuwachs)	164 PJ/a (Derholzanteil 111 PJ/a, Reisholzanteil 53 PJ/a)	58 PJ/a (110 PJ/a abzüglich stofflicher Nutzung)
Datenquelle	Europ. Abfallverzeichnis ¹⁶ ; MVAk (2014)	FNR (2014)	FNR (2014)	FNR (2014)	Majer et al. (2013)	Majer et al. (2013)	Majer et al. (2013)	Majer et al. (2013)
Technisches Biokraftstoffpotenzial (PJ/a)	~1,5–6,5 PJ/a Biodiesel	~56 PJ/a Biomethan	~15,6 PJ/a Biomethan	~7,5 PJ/a Biomethan	~39 PJ/a Bioethanol oder ~58 PJ Biomethan oder ~51 PJ BtL	~161,7 PJ/a BtL* oder ~208,2 PJ/a Bio-SNG	~77,7 PJ/a BtL oder ~98,4 PJ/a Bio-SNG	~33,4 PJ/a BtL oder ~34,8 PJ/a Bio-SNG
Kraftstoffpotenzial Szenarioannahme	5 PJ/a Biodiesel	45 PJ/a Biomethan	12 PJ/a Biomethan	6 PJ/a Biomethan	31 PJ/a Bioethanol	81 PJ/a BtL oder 104 PJ/a Bio-SNG	39 PJ/a PtL oder 49 PJ/a Bio-SNG	27 PJ/a BtL oder 28 PJ/a Bio-SNG

* PJ = Petajoule;

* BtL = Biomass-to-liquid-Kraftstoff

Tab. 4.2

Biokraftstoffpotenzialabschätzung aus Abfall- und Reststoffen in Deutschland. Quelle: Eigene Darstellung der Verbände. Potenzialberechnungen mit Hilfe des DBFZ.

wird von einem nachhaltig nutzbaren Biokraftstoffpotenzial von maximal 245–280 PJ/a ausgegangen. Auch wenn Nachhaltigkeitsgesichtspunkte in den in Tabelle 4.2 ausgewerteten Brennstoff-Potenzialschätzungen berücksichtigt wurden, wird in diesem Szenario zur Sicherung einer gesunden Nährstoffbilanz der Böden sowie zum Schutz der Biodiversität eine noch geringere Nutzung von Getreidestroh und Waldrestholz angenommen. Auch Nahrungsmittelabfälle sollen im Rahmen der Entwicklung hin zu einer nachhaltigeren Gesellschaft in Zukunft deutlich reduziert werden. Es ist zudem zu erwarten, dass die stoffliche Nutzung vorhandener Potenziale, insbesondere von Holz, zukünftig weiter zunimmt. Des Weiteren ist eine Fortschreibung dieser Potenzialeinschätzung bis 2050 mit großen Unsicherheiten verbunden. Aus diesen Gründen wurde jeweils eine Nutzung von nur 80 % des technischen Kraftstoffpotenzials angenommen. Bei der forstwirtschaftlichen Biomasse wurde eine Nutzung von 50 % des technischen Kraftstoffpotenzials unterstellt. Es ist durchaus möglich, dass weitere Potenziale, unter anderem auch aus Algen und Bakterien, langfristig erschlossen werden können. Dies lässt sich jedoch aus heutiger Sicht nicht abschätzen.

Die ermittelten Potenziale an Gas- und Flüssigkraftstoffen aus Abfall- und Reststoffen können langfristig einen Teil des verbleibenden Energiebedarfs des Verkehrssektors decken. Dessen Mengenbedarf wird in Kapitel 5 diskutiert.

Szenarioannahmen

- » Aufgrund der bestehenden Zweifel an Nachhaltigkeit und Klimaschutzbeitrag landbasierter Biokraftstoffe verzichtet der Verkehrssektor langfristig auf die Verwendung von Biokraftstoffen aus Anbaubiomasse.
- » Das langfristige nationale Kraftstoffpotenzial von Biokraftstoffen aus Abfall- und Reststoffen beträgt 245–280 PJ/Jahr. Dieses setzt sich zusammen aus 5 PJ Biodiesel (UCO), 31 PJ Bioethanol (Getreidestroh), 63 PJ Bio-Methan (Gülle, Bioabfall, Landschaftspflegematerial) sowie wahlweise weiteren 181 PJ Bio-SNG (Biomethan) oder 147 PJ BtL aus forstwirtschaftlicher Biomasse und Alt-/Industrierestholz. Mögliche Importe werden nicht berücksichtigt.
- » Biokraftstoffe aus Abfall- und Reststoffen erreichen eine Reduktion der Treibhausgasemissionen gegenüber der heute eingesetzten fossilen Referenz Benzin/Diesel von 60–90 %.

4.5.2 Strombasierte Kraftstoffe

Neben Biokraftstoffen werden in den letzten Jahren verstärkt strombasierte Kraftstoffe als langfristige Lösungsoption für den Verkehrsbereich diskutiert. Basis für die Herstellung strombasierter Kraftstoffe ist die Elektrolyse. Unter Einsatz von Strom wird Wasser in die beiden Gase Wasserstoff und Sauerstoff getrennt. In Synthese-Prozessen lässt sich aus Wasserstoff und CO₂ wahlweise Methan oder Flüssigkraftstoff (Fischer-Tropsch-Kraftstoff, FT-Kraftstoff) herstellen. Diese Kraftstoffe könnten wie Biokraftstoffe als Ersatz für Erdgas oder fossile Flüssigkraftstoffe dort zum Einsatz kommen, wo auch langfristig voraussichtlich noch eine gewisse Menge an Gas- und Flüssigkraftstoffen benötigt wird: in Lkw, Langstreckenbussen, Schiffen, im Flugverkehr oder auch zur Deckung des verbleibenden Flüssigkraftstoffbedarfs von Pkw und kleineren Lkw mit Plug-In-Hybrid- oder Range-Extender-Antrieben.



Der enorme langfristige Strombedarf des Verkehrssektors unterstreicht die dringende Notwendigkeit einer konsequenten Umsetzung der Energiewende in Deutschland.

Für die Herstellung strombasierter Kraftstoffe wird neben Strom auch Kohlenstoff benötigt. Grundsätzlich kommen drei mögliche Kohlenstoffquellen infrage: biogenes, atmosphärisches und fossiles Kohlenstoffdioxid (aus Industrie- und Kraftwerksprozessen). Der Energieaufwand zur Bereitstellung von Kohlenstoff aus der Luft ist jedoch sehr groß und hat einen deutlich negativen Effekt auf den Wirkungsgrad der Kraftstoffherstellung. Da flüssige Kohlenwasserstoffe einen höheren Kohlenstoffgehalt je Megajoule (MJ) aufweisen, ist der Kohlenstoffbedarf für FT-Kraftstoffe deutlich höher als der Bedarf bei der Synthese zu Methan. Bei Methan liegt der Wirkungsgrad der Kraftstoffherstellung – von der Erzeugung bis zur Tankstelle – je nach Kohlenstoffquelle bei ca. 50 %, das heißt, je MJ fertigen Kraftstoff werden zwei MJ Strom benötigt. Bei FT-Kraftstoffen hingegen liegt der Wirkungsgrad bei maximal 40 % (Kasten et al. 2013).

Vergleicht man die CO₂-Bilanz strombasierter und fossiler Kraftstoffe, so zeigt sich, dass erst mit fortschreitender Energiewende die CO₂-Intensität des deutschen Strom-Mixes niedrig genug ist, um den strombasierten Kraftstoffen zu einer besseren Bilanz als fossilen Kraftstoffen zu verhelfen. Legt man für die Entwicklung des Stromsektors die Annahmen aus der Leitstudie zugrunde (Nitsch et al. 2012), so gilt dies für Methan ca. ab 2035 und für FT-Kraftstoff ca. ab 2035–2040. Strombasierte Kraftstoffe sind demnach nur dann ein nahezu treibhausgasneutraler Energieträger, wenn erneuerbarer Strom als Ausgangsbasis dient. Dies kann gegebenenfalls durch zusätzliche erneuerbare Stromkapazitäten geschehen, was allerdings bei einer inländischen, aber auch globalen Produktion mit zusätzlichen Kosten verbunden wäre.

Prinzipiell bieten strombasierte Kraftstoffe die Möglichkeit der chemischen Speicherung ansonsten ungenutzten erneuerbaren Stroms. Die zu erwartenden „Überschüsse“ im Stromsektor sind jedoch begrenzt – insbesondere dann, wenn effizientere und kostengünstigere Optionen wie Demand Side Management, d.h. eine Steuerung der Stromnachfrage, ausgeschöpft werden. Zudem fallen Überschüsse diskontinuierlich an, sodass bei einer ausschließlichen Nutzung von Überschussstrom Elektrolyseure unter Umständen nur geringe Volllaststunden aufweisen. Eine solch niedrige Auslastung würde jedoch zu hohen Kosten führen.

Langfristig könnten strombasierte Kraftstoffe im Gesamtsystem 2050 eine begrenzte, aber sinnvolle Rolle zur Deckung des verbleibenden Endenergiebedarfs des Verkehrssektors spielen. Dabei ist zu beachten, dass aufgrund des niedrigen Wirkungsgrades von maximal 40–50 % erhebliche zusätzliche Mengen aus regenerativ erzeugtem Strom benötigt würden. Mittelfristig besteht jedoch die Gefahr, dass die Gesamtbilanz strombasierter Kraftstoffe aufgrund der CO₂-Intensität des deutschen Strom-Mix schlechter ausfällt als diejenige konventioneller Kraftstoffe. Die großflächige Ausdehnung von Erzeugungskapazitäten strombasierter Kraftstoffe ist daher zum jetzigen Zeitpunkt nicht sinnvoll, sondern sollte frühestens nach 2030 geschehen. Die nächsten Jahre sollten für weitere Forschung und Entwicklung im Bereich strombasierter Kraftstoffe genutzt werden, um dann auf Basis fundierterer Kenntnisse und unter Berücksichtigung der Entwicklung im Stromsektor einen angemessenen Pfad für die Entwicklung strombasierter Kraftstoffe abzuleiten. Für einen großflächigen Einsatz müssen die Effizienz in der Kraftstoffproduktion erhöht und die Kosten zukünftig gesenkt werden. Dennoch unterstreicht der langfristige zusätzliche Strombedarf aus erneuerbaren Energien des Verkehrssektors die dringende Notwendigkeit der konsequenten Umsetzung der Energiewende im Strommarkt.

Szenarioannahmen

- » Bis etwa zum Jahr 2030 wird die Herstellung strombasierter Kraftstoffe in Deutschland in Demonstrations- und Pilotanlagen erprobt; ein Massenmarkt wird jedoch nicht etabliert.
- » Im Jahr 2050 wird eine begrenzte Menge strombasierter Kraftstoffe in Deutschland produziert.

4.5.3 Kraftstoffeinsatz nach Verkehrsmittel

Wie am Anfang des Kapitels 4.5 beschrieben, sollte der langfristig im Verkehrssektor verbleibende Endenergiebedarf wo dies möglich ist prioritär mit direktem Einsatz von Strom aus erneuerbaren Energien gedeckt werden. Dieses Konzept trifft zudem die Annahme, dass im Lkw-Verkehr sowie im Langstreckenbusverkehr der Zukunft gasförmige Kraftstoffe eingesetzt werden. Welche Mengen an gasförmigen und flüssigen Kraftstoffen der Verkehrssektor langfristig noch benötigt und wie schwierig es ist, diese Potenziale bereitzustellen, wird in Kapitel 5 dargestellt.

Szenarioannahmen

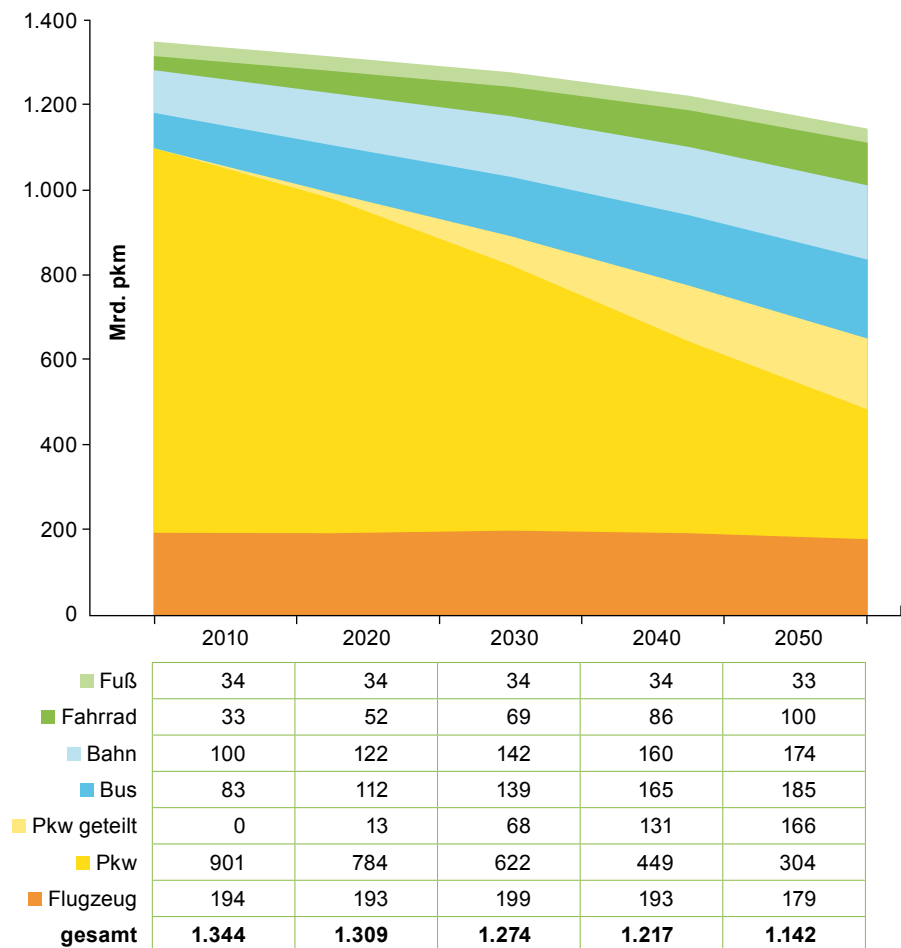
- » Schienenverkehr, Oberleitungsbusse, Straßenbahnen, S- und U-Bahnen, Krafträder und Pedelecs werden im Jahr 2050 mit Strom aus erneuerbaren Energien vollständig elektrisch angetrieben. Pkw und leichte Nutzfahrzeuge werden teil- oder vollelektrisch angetrieben. Auch Langstreckenbusse, die in 2050 mit Gas betrieben werden, verfügen über eine Batterie mit begrenzter Reichweite und können damit bei der Einfahrt in Städte elektrisch fahren.
- » Der Flüssigkraftstoffbedarf von Flugzeugen, See- und Binnenschiffen sowie Pkw und leichten Nutzfahrzeugen mit teilelektrischen Antrieben wird 2050 mit Biokraftstoffen aus Abfall- und Reststoffen (Bioethanol, Biodiesel, BtL) oder strombasierten FT-Kraftstoffen gedeckt.
- » Schwere Lkw (über 10 t), Langstreckenbusse sowie ein Teil der Seeschiffe werden in 2050 mit Biomethan aus Abfall- und Reststoffen oder strombasiertem Methan angetrieben.

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Szenarioberechnungen dargestellt. Dabei wird zunächst auf die Verkehrsnachfrage im Personen- und Güterverkehr und anschließend auf Endenergiebedarf und Treibhausgasemissionen eingegangen.

5.1 Verkehrsnachfrage im Personenverkehr

Durch den Bevölkerungsrückgang und die kürzeren Wege sinkt die Personenverkehrsleistung bis 2050 von 1.344 Mrd. Personenkilometer auf 1.142 Mrd. Personenkilometer und damit um 15 % (Abb. 5.1).

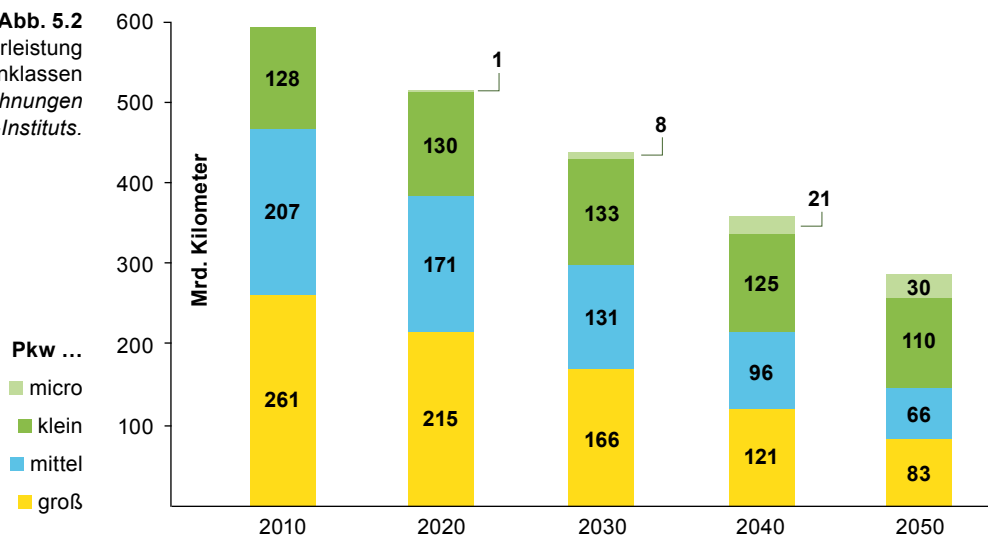
Abb. 5.1
Verkehrsleistung im
Personenverkehr
Quelle: Berechnungen
des Öko-Instituts.



Im Jahr 2050 wird noch rund die Hälfte des bodengebundenen Verkehrs mit dem Pkw zurückgelegt. Die andere Hälfte nutzt den öffentlichen Verkehr sowie den Fahrrad- und Fußverkehr. Eine besonders starke Zunahme verzeichnet das Fahrrad, welches seine Verkehrsleistung bis 2050 verdreifacht. Beim öffentlichen Verkehr gewinnen sowohl die Schiene als auch die Straße an Bedeutung. Der Luftverkehr geht leicht zurück auf 179 Mrd. Personenkilometer.

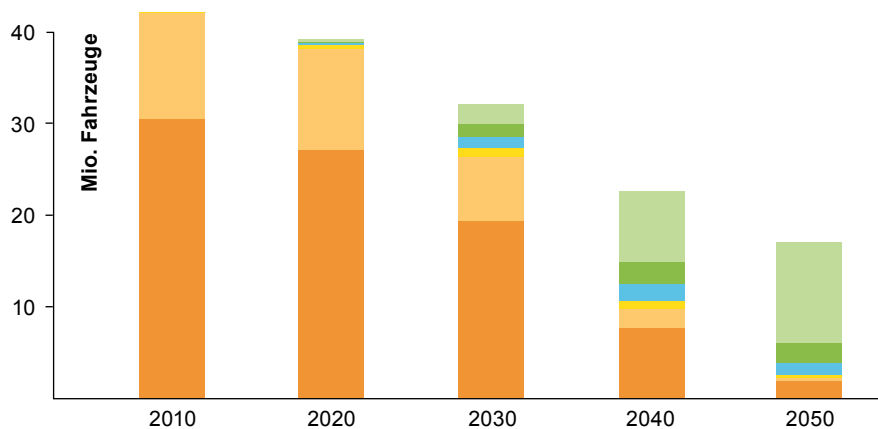
Durch den steigenden Besetzungsgrad geht die Fahrleistung der Pkw stärker zurück als deren Verkehrsleistung und sinkt bis 2030 um 26 % und bis 2050 um

Abb. 5.2
Pkw-Fahrleistung
nach Größenklassen
Quelle: Berechnungen
des Öko-Instituts.



knapp die Hälfte auf 289 Mrd. Kilometer (Abb. 5.2). Rund 10 % davon werden im Jahr 2050 durch batterieelektrische Microcars erbracht, die vor allem als Carsharing-Fahrzeuge in Städten zum Einsatz kommen. Der Anteil großer Pkw an der Fahrleistung sinkt von 44 % auf 29 %.

Abb. 5.3
Pkw-Bestand nach
Antriebsarten
Quelle: Berechnungen
des Öko-Instituts.



BEV	0	0,3	2,26	7,66	10,99
REEV	0	0,12	1,31	2,48	2,26
PHEV	0	0,24	1,23	1,9	1,28
Gas	0,07	0,44	0,95	0,78	0,31
Diesel	11,55	10,99	7,05	2,13	0,34
Benzin	30,47	27,06	19,28	7,62	1,87
gesamt	42	39	32	23	17

Der Pkw-Bestand sinkt bis zum Jahr 2030 auf 32 Mio. Fahrzeuge und bis zum Jahr 2050 auf 17 Mio. Fahrzeuge (Abb. 5.3). Ursache für den Rückgang des Pkw-Bestandes ist neben der abnehmenden Pkw-Fahrleistung und der intensiveren Nutzung der Fahrzeuge durch Carsharing und andere Formen geteilter Nutzung auch die rückläufige Bevölkerungsentwicklung. Der Bestand von Dieselfahrzeugen geht nach 2020 aufgrund des angenommenen Wegfalls des Steuervorteils für Diesel besonders deutlich zurück.

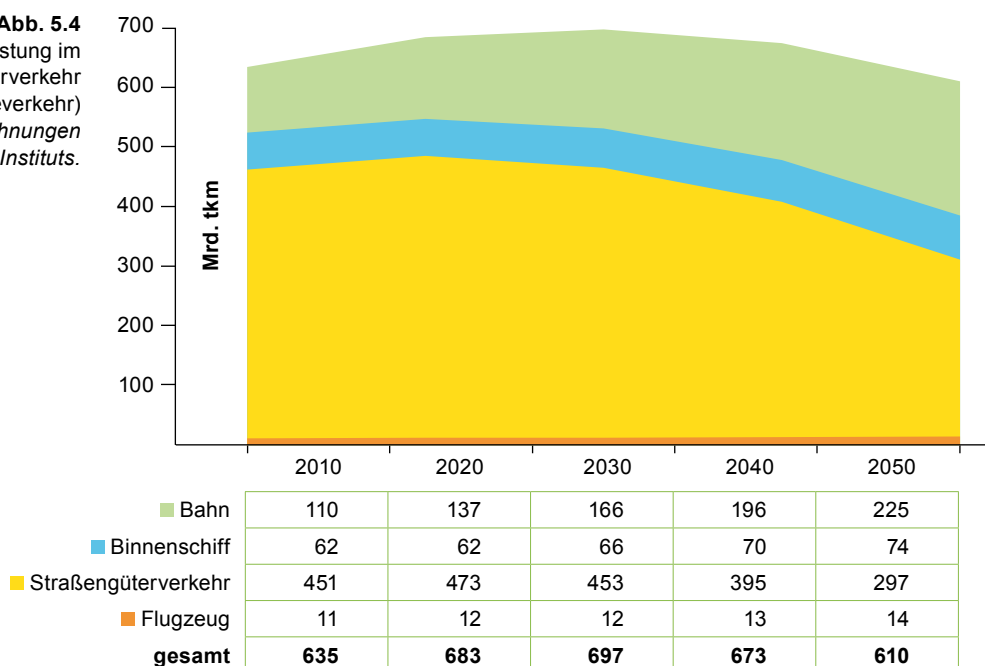
Im Jahr 2020 sind 660.000 und im Jahr 2030 4,8 Mio. (teil)elektrische Fahrzeuge im deutschen Bestand. Dazu zählen reine Elektroautos (BEV), Plug-in-Hybride (PHEV) und Range Extender (REEV). Das Ziel der Bundesregierung von einer Million elektrischer Fahrzeuge im Jahr 2020 und sechs Millionen E-Fahrzeugen im Jahr 2030 wird demnach nicht ganz erreicht. Für die Erreichung der Klimaschutzziele ist das jedoch von untergeordneter Bedeutung. Der wesentliche Klimaschutzbeitrag wird bis 2030 durch die Effizienzsteigerung konventioneller Antriebe und die Verlagerung auf umweltfreundliche Verkehrsträger erzielt.

Im Jahr 2040 haben (teil)elektrische Fahrzeuge dann jedoch bereits einen Anteil von über 50 % am Pkw-Bestand. Zu diesem Zeitpunkt werden im Stromsektor bereits überwiegend erneuerbare Energien eingesetzt, sodass die Klimabilanz eines Elektroautos dann auch unter Berücksichtigung der Vorkettenemissionen und Zugrundelegung des allgemeinen Strom-Mix einen relevanten Vorteil gegenüber einem effizienten verbrennungsmotorischen Fahrzeug bietet. Während bis 2030 unter den elektrischen Fahrzeugen Plug-in-Hybridfahrzeuge und Range Extender dominieren, verschiebt sich das Verhältnis zusehends in Richtung rein batterieelektrischer Fahrzeuge. Im Jahr 2050 sind nur noch 2,5 Mio. rein verbrennungsmotorische Fahrzeuge im Pkw-Bestand.

5.2 Verkehrsnachfrage im Güterverkehr

Der Güterverkehr steigt von 635 Mrd. tkm im Jahr 2010 zunächst bis zum Jahr 2030 weiter an auf knapp 700 Mrd. tkm (Abb. 5.4). Perspektivisch gibt es jedoch durch den Rückgang fossiler Energieträger, die sparsamere Ressourcennutzung sowie kürzere Transportweiten und auch durch den Bevölkerungsrückgang einen leichten Rückgang der Güterverkehrsleistung, die im Jahr 2050 in etwa das heutige Niveau erreicht (610 Mrd. tkm). Mit 225 Mrd. tkm werden 37 % des Güterverkehrs auf der Schiene erbracht, was gegenüber heute in etwa einer Verdopplung der Verkehrsleistung entspricht. Auch die Binnenschifffahrt legt um 20 % auf 74 Mrd. tkm zu.

Abb. 5.4
Verkehrsleistung im
Güterverkehr
(ohne internat. Seeverkehr)
Quelle: Berechnungen
des Öko-Instituts.



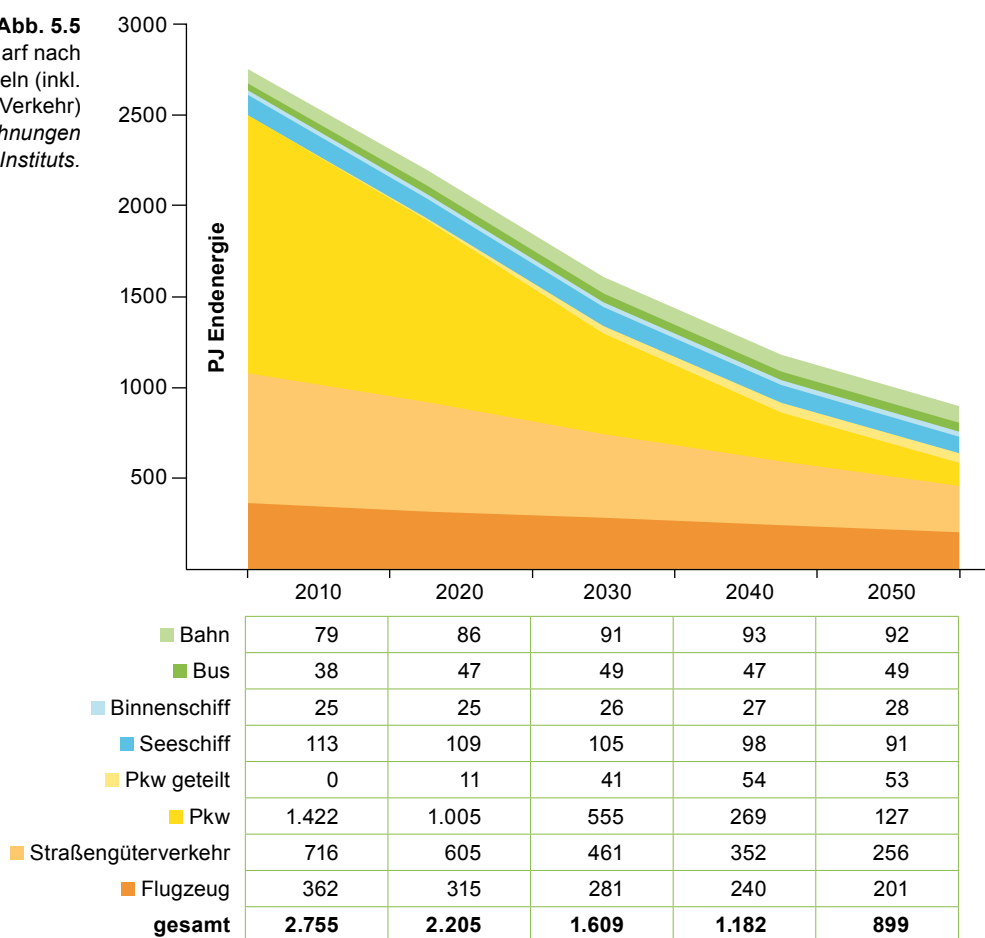


Neben der Bahn sollte auch das Binnenschiff seinen Anteil an den Gütertransporten langfristig deutlich steigern.

5.3 Endenergiebedarf

Die Bundesregierung hat sich das Ziel gesetzt, den Endenergiebedarf im nationalen Verkehr (ohne den internationalen See- und Luftverkehr) um 10 % bis 2020 und 40% bis 2050 (gegenüber dem Basisjahr 2005) zu reduzieren. Im Szenario werden diese Ziele deutlich übererfüllt: Der Endenergiebedarf des Verkehrssektors in Deutschland geht bis 2020 um 21% und bis 2050 um 73 % zurück. Eine Minderung von 40 % wird bereits bis zum Jahr 2030 erreicht. Berücksichtigt man auch den internationalen Verkehr (Abb. 5.5), so liegen die Minderungen etwas niedriger (67% bis 2050), stellen aber immer noch eine deutliche Übererfüllung der Ziele dar.

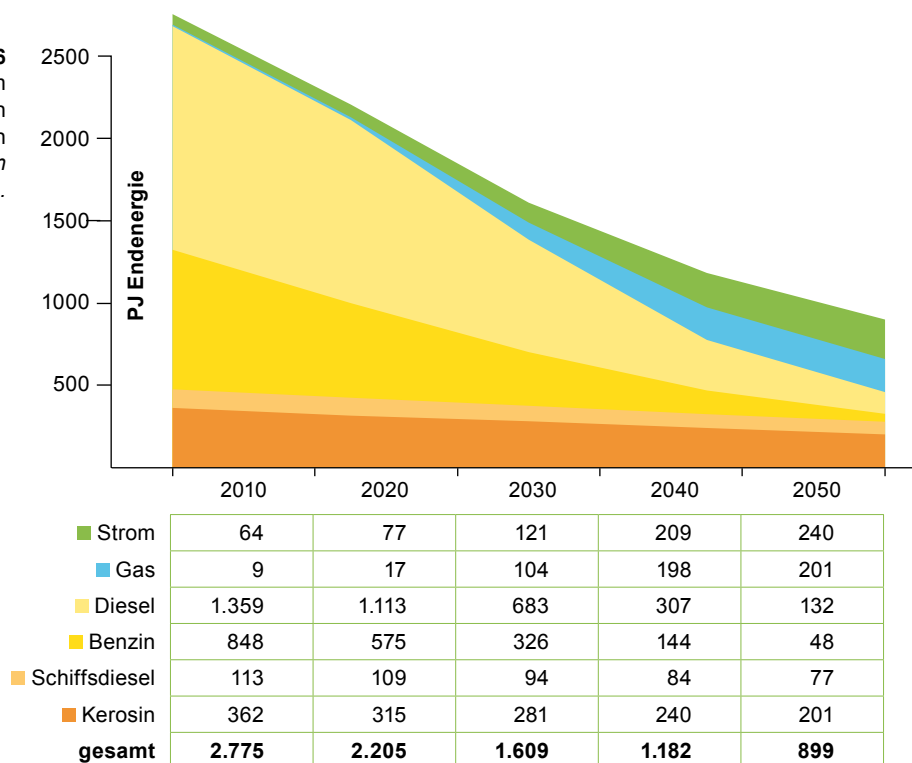
Abb. 5.5
Endenergiebedarf nach Verkehrsmitteln (inkl. internationalem Verkehr)
Quelle: Berechnungen des Öko-Instituts.



Besonders deutlich ist der Rückgang beim Pkw-Verkehr (-88 % ggü. 2010), aber auch der Straßengüterverkehr reduziert seinen Energiebedarf um 64 %. Wesentlicher Treiber für die Minderung ist langfristig neben der Reduktion der Verkehrsleistung der hohe Grad der Elektrifizierung. Mittelfristig sind aber auch die Effizienzsteigerungen konventioneller Antriebe von hoher Bedeutung.

In den Abbildungen 5.6 und 5.7 ist die Entwicklung des Endenergiebedarfs nach Energieträgern dargestellt. Die Herkunft der Energieträger (fossil, biogen oder strombasiert) wird in den Abschnitten 4.5.3 und 5.4 diskutiert und ist in diesen Darstellung nicht berücksichtigt.

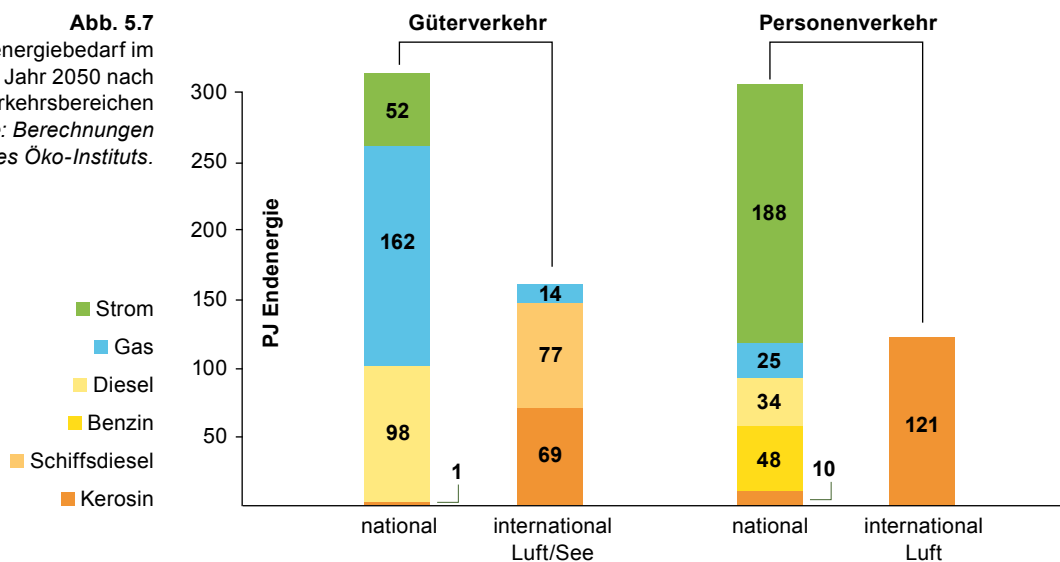
Abb. 5.6
Endenergiebedarf im
Verkehrssektor nach
Energieträgern
Quelle: Berechnungen
des Öko-Instituts.



Es zeigt sich eine deutliche Verschiebung im Energiemix des Verkehrssektors: Wird dieser heute noch von Benzin und Diesel dominiert, so gibt es bis 2050 eine deutliche Verschiebung hin zu Strom und Gas. Die restliche Nachfrage nach Diesel und Benzin im Jahr 2050 wird vor allem von den Plug-in-Hybrid- und Range-Extender-Fahrzeugen im Personen- und Güterverkehr verursacht.

Abbildung 5.7 zeigt den Endenergiebedarf im Personen- und Güterverkehr im Jahr 2050. Der (nationale) Personenverkehr im Jahr 2050 basiert zum überwiegenden Teil auf Strom. Die verbleibende Nachfrage nach Diesel und Benzin im Personenverkehr ist vor allem auf die teilelektrischen Pkw (PHEV und REEV) sowie auf die wenigen verbleibenden rein konventionellen Pkw zurückzuführen.

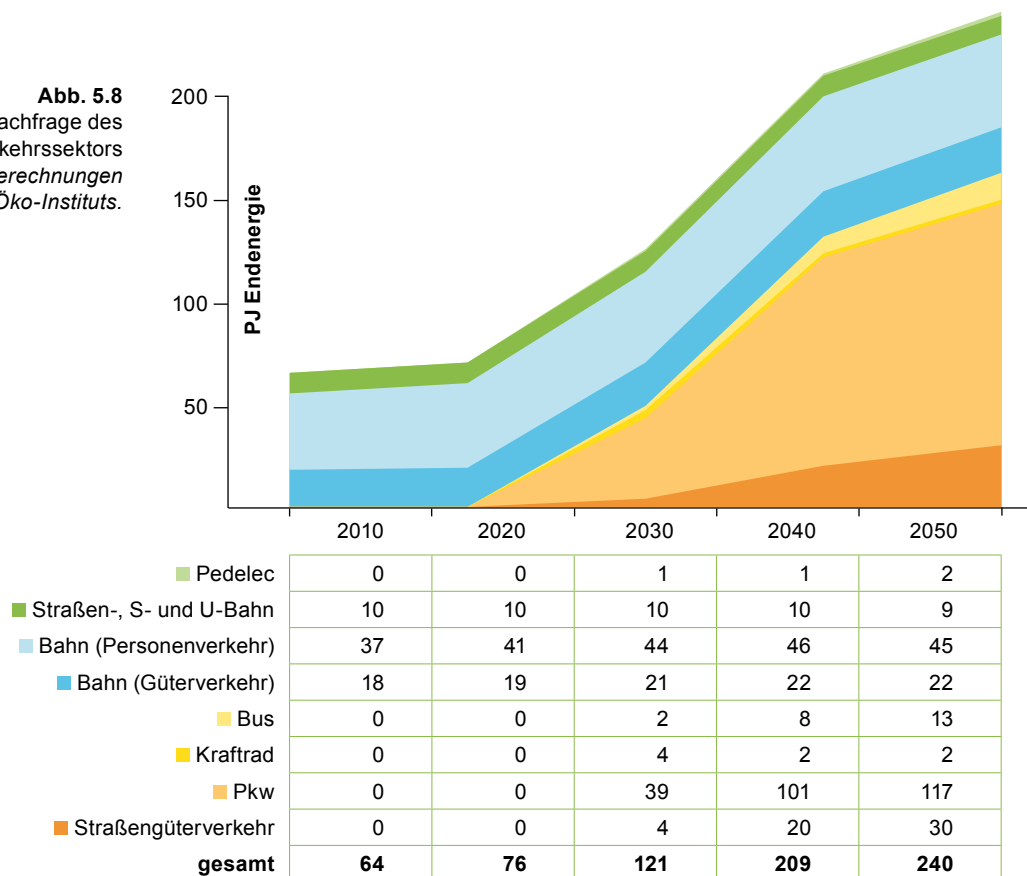
Abb. 5.7
Endenergiebedarf im
Jahr 2050 nach
Verkehrsbereichen
Quelle: Berechnungen
des Öko-Instituts.



Hinzu kommt die Gasnachfrage von Bussen. Deutlich anders als im Personenverkehr ist die Zusammensetzung der Energienachfrage im Güterverkehr, denn hier dominieren vor allem die Gas-Lkw.

Die Endenergienachfrage des internationalen Verkehrs liegt im Jahr 2050 knapp halb so hoch wie die Endenergienachfrage des nationalen Verkehrs. Sie basiert zum Großteil auf Flüssigkraftstoffen und nur zu einem kleinen Teil auf der Gasnachfrage von LNG-Schiffen.

Abb. 5.8
Stromnachfrage des
Verkehrssektors
Quelle: Berechnungen
des Öko-Instituts.



Die Stromnachfrage des Verkehrssektors steigt deutlich an auf 240 PJ bzw. 67 TWh im Jahr 2050, wobei der deutlichste Anstieg im Zeitraum zwischen 2030 und 2040 zu verzeichnen ist. Dies entspricht einer Größenordnung von gut 11 % des gesamten heutigen Brutto-Inlandstromverbrauchs Deutschland. Der Verkehrssektor ist damit im Jahr 2050 ein relevanter Stromnachfrager. Die Stromnachfrage der „klassischen“ Stromnachfrager im Verkehrssektor Schienenpersonenverkehr, Schienengüterverkehr sowie Straßen-, Stadt- und U-Bahnen (SSU) erhöht sich leicht, da die Zunahme der Verkehrsnachfrage größer ausfällt als die Effizienzsteigerung.

Größter zusätzlicher Nachfrager sind die Pkw, aber auch durch den Güterverkehr und durch elektrische Busse wird mehr Strom nachgefragt. Die Stromnachfrage des Schienenverkehrs steigt trotz der wachsenden Nachfrage aufgrund von Effizienzsteigerungen und einer besseren Auslastung nur geringfügig an. Der Strombedarf von Pedelecs ist mit rund 1,6 PJ im Vergleich zu den anderen Stromnachfragern sehr gering, obwohl ein nicht unwesentlicher Teil der Verkehrsleistung mit Pedelecs erbracht wird.

5.4 Treibhausgasemissionen

Die Treibhausgasemissionen des deutschen Verkehrssektors inklusive des internationalen von Deutschland ausgehenden Verkehrs betrugen im Basisjahr 1990 185 Mio. t CO₂-Äquivalente (CO₂e). Zur Erreichung des Ziels einer Treibhausgasemissionsminderung um 95 % dürften im Jahr 2050 noch maximal 9 Mio. t CO₂e emittiert werden. Im vorliegenden Szenario soll jedoch die höhere Klimawirksamkeit der Treibhausgasemissionen des Luftverkehrs mit einem RFI-Faktor von 3 unbedingt berücksichtigt werden. Dies bedeutet allerdings, dass die Treibhausgasemissionen des Verkehrs im Jahr 1990 mit 213 Mio. t CO₂e höher lagen. Der maßgebende Zielwert für das Jahr 2050 sind somit 10,7 Mio. t CO₂e.

Wie im vorigen Abschnitt dargestellt, kann der Endenergiebedarf im vorliegenden Klimaschutzszenario deutlich reduziert werden. Wie in Kapitel 5.3 beschrieben, liegt der verbleibende Endenergiebedarf 2050 bei 899 PJ pro Jahr. Neben 240 PJ direktem Einsatz von Strom aus erneuerbaren Energien besteht dann noch ein Bedarf von 201 PJ gasförmigen Kraftstoffen sowie 458 PJ in flüssiger Form. Würde – rein theoretisch – der im Jahr 2050 verbleibende gasförmige und flüssige Endenergiebedarf nur aus fossilen Quellen gedeckt, so würden noch Treibhausgasemissionen von rund 78 Mio. t CO₂e verbleiben.¹⁷ Dies entspricht einer Minderung des Treibhausgasausstoßes um 64 % gegenüber 1990. Den wesentlichen Beitrag zur Reduktion der Treibhausgasemissionen leistet der Rückgang des Energiebedarfs.

Zum Erreichen des klimapolitisch dringend gebotenen Ziels einer Minderung der Emissionen des Verkehrssektors um 95 % müsste allerdings zusätzlich die Treibhausgasintensität der dann noch eingesetzten Gas- und Flüssigkraftstoffe maximal gegenüber der fossilen Referenz reduziert werden. Für dieses Szenario kommen wie beschrieben zur Deckung des Bedarfs Biokraftstoffe aus Abfall- und Reststoffen sowie strombasierte Kraftstoffe infrage (Kapitel 4.5). Mit beiden Optionen lässt sich auch unter Berücksichtigung der indirekten Emissionen aus der Kraftstoffvorkette (Erzeugung) eine Minderung der Treibhausgasintensität um mindestens 80 % gegenüber der heute eingesetzten fossilen Referenz Benzin/Diesel erreichen. Allerdings sind die verfügbaren Mengenpotenziale mit großen Fragezeichen behaftet. Mit dem angenommenen Biokraftstoffpotenzial aus Abfall- und Reststoffen von 245 bis 280 PJ ließen sich maximal etwa 40 % des verbleibenden flüssigen und gasförmigen Restenergiebedarfs decken. Allerdings verbleibt auch dann noch ein Restenergiebedarf von mindestens 379 PJ. Die Erschließung größerer Biokraftstoffpotenziale kann mit ökologischen Nebenwirkungen verbunden sein. Insbesondere bei einem großflächigen Einsatz von Biokraftstoffen aus heimischer und importierter Anbaubiomasse bestehen – wie oben beschrieben – erhebliche Zweifel an deren Nachhaltigkeit sowie der damit effektiv erzielbaren Treibhausgasemissionsreduktion. Ohne eine weitere Erforschung und erfolgreiche Minimierung bestehender Risiken kommen Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse als Klimaschutzoption für den Verkehrssektor nicht infrage.

Eine Deckung des im Szenario verbleibenden Restenergiebedarfs von 379 PJ mit strombasierten Gas- und Flüssigkraftstoffen bedeutet aufgrund des geringen Wirkungsgrades bei der Kraftstofferzeugung einen zusätzlichen Strombedarf aus erneuerbaren Energien von 842 PJ oder 234 TWh.¹⁸ Inklusiv des direkten Stromeinsatzes liegt der Bedarf des Verkehrssektors für Strom aus erneuerbaren Energien im Jahr 2050 somit bei rund 1074 PJ bzw. 298 TWh. Dies entspricht der Hälfte des Brutto-Inlandstromverbrauchs Deutschlands im Jahr 2013. Diese

Menge erneuerbaren Stroms zusätzlich zu einer vollständigen Umsetzung der Energiewende im Strom- und Wärmemarkt im Jahr 2050 bereitzustellen, bedeutet eine gewaltige Herausforderung, die wohl ohne Importe von erneuerbarem Strom oder daraus erzeugten Kraftstoffen nicht zu schaffen ist. Dabei ist allerdings zu beachten, dass auch andere Länder vor der Herausforderung stehen, ihre Treibhausgasemissionen erheblich zu reduzieren.

Zum Erreichen des Ziels kommt erschwerend hinzu, dass die höhere Klimawirksamkeit des Luftverkehrs auch beim Einsatz von biogenem oder strombasiertem Kerosin zum Tragen kommt, da es sich in allen Fällen um einen Verbrennungsprozess flüssiger Kohlenwasserstoffe mit entsprechender Klimawirkung handelt. Selbst wenn zur Deckung des aus dem Szenario resultierenden Endenergiebedarfs des Luftverkehrs von 201 PJ nur vollständig kohlenstoffneutrales Kerosin eingesetzt würde, betrügen die Emissionen des Luftverkehrs allein durch die Klimawirksamkeit des Kerosins in hohen Luftschichten noch rund 30 Mio. t CO₂e. Dazu kommen allerdings für alle im Verkehrssektor eingesetzten Kraftstoffe die indirekten Treibhausgasemissionen aus der Vorkette (Erzeugung).

Tab. 5.1
Erreichte Treibhausgasemissionsminderung im Verkehrssektor und verbleibende Reduktionslücke
Quelle: Darstellung der Verbände.

Basisjahr 1990	213 Mio. t CO ₂ e
Treibhausgasemissionen nach Reduktion des Endenergiebedarfs	78 Mio. t CO ₂ e
(Minderung gegenüber Basis in %)	(-64 %)
Treibhausgasemissionen nach Einsatz nachhaltiger Kraftstoffalternativen	mind. 30 Mio. t CO ₂ e
(Minderung gegenüber Basis in %)	(-86 %)
Zielwert 2050	10,7 Mio. t CO ₂ e
(Minderung gegenüber Basis in %)	(-95 %)
Verbleibende Reduktionslücke	mind. 19,3 Mio. t CO₂e

Der Flugverkehr steht der Erreichung der Klimaziele im Wege.

Dies unterstreicht, dass der Flugverkehr der Erreichung der deutschen Klimaziele im Wege steht. Solange keine alternative Technologie (wie z. B. elektrische Flugzeuge) existiert, die das Fliegen ohne Kohlenwasserstoffe möglich macht, sind die Reduktion der Verkehrsleistung sowie Effizienzsteigerungen zur Reduktion der Klimawirksamkeit des Luftverkehrs zentral. Um das 95 %-Ziel im Verkehrssektor zu erreichen, müsste die Verkehrsleistung im Luftverkehr gegenüber dem vorliegenden Szenario nochmals deutlich reduziert werden, da Effizienzpotenziale im vorliegenden Szenario bereits vollständig ausgeschöpft sind.

Die erhöhte Klimawirkung des im Luftverkehr eingesetzten Kerosins sowie die äußerst begrenzten Potenziale nachhaltiger und treibhausgasarmer Kraftstoffe machen umso deutlicher, dass die maximale Reduktion des Endenergiebedarfs durch verkehrsvermeidende, verkehrsverlagernde sowie effizienzsteigernde Maßnahmen wie in diesem Szenario beschrieben den unabdingbaren Kern einer erfolgreichen Klimaschutzstrategie für den deutschen Verkehrssektor darstellen.

5.5 Einordnung der Ergebnisse im Vergleich zu bestehenden Studien

In mehreren Szenarien wie Modell Deutschland (WWF 2009), den Energieszenarien (prognos 2010) oder der Leitstudie (Nitsch et al. 2012) werden Pfade aufgezeigt, wie das Ziel einer Treibhausgasminderung von 80–95 % bis 2050 erreicht werden kann. Bei diesen betrachteten Szenarien handelt es sich um gesamtwirtschaftliche Zielszenarien, die nicht nur den Verkehrssektor betrachten, sondern die gesamte Volkswirtschaft. Anhand eines vorgegebenen Ziels zur Treibhausgasemissionsminderung von 80–95 % gegenüber 1990 werden Wege aufgezeigt, wie diese Minderung erreicht werden kann. Meist werden dazu die Zielszenarien in Bezug zu Referenz- bzw. Basisszenarien gesetzt, die eine Fortschreibung der derzeitigen Trends und Politik darstellen. Spezifisch auf den Verkehrssektor konzentrierte Studien wie Renewbility oder Treibhausgasneutraler Verkehr 2050 (Blanck, 2012) ergänzen den Forschungsstand um wichtige Detailanalysen.

Tab. 5.2

Vergleich der Kenngrößen bestehender Szenarien
Quelle: Darstellung der Verbände.

		Verkehrsleistung PV 2010–2050	Verkehrsleistung GV 2010–2050	Energieverbrauch 2050	Anteil Biokraftstoffe 2050	Anteil Strom 2050	Anteil EE-Kraftstoffe 2050	Mio. t CO ₂ 2050
Verbändekonzept		-15 %	-4 %	806		30 %		9
Energiekonzept	Referenz	-7 %	61 %	1.940	16 %	8 %	1 %	85
	Ziel I/IV	-10 %	63 %	1.512	51 %	15 %	1 %	18
Modell Deutschland	Referenz	-8 %	61 %	1.890	17 %	7 %	1 %	103
	Innovation	-10 %	63 %	1.560	59 %	12 %	1 %	30
	Modell D	-10 %	63 %	1.560	78 %	12 %	1 %	8
THGNV 2050	Basis	16 %	103 %	2.412	8 %	3 %	0 %	125
	Ziel	11 %	87 %	1.623	0 %	20 %	80 %	0
Leitstudie	Sz. A	-7 %	46 %	1.521	20 %	14 %	16 %	56
	Sz. B	-7 %	46 %	1.564	19 %	14 %	17 %	57
	Sz. C	-7 %	46 %	1.379	22 %	25 %	0 %	54

In Tabelle 5.2 sind die wesentlichen Kenngrößen der genannten Szenarien in der Übersicht dargestellt. Berücksichtigt sind in dieser Darstellung alle Verkehrsträger bis auf den von Deutschland ausgehenden internationalen Seeverkehr, da dieser in keinem der Szenarien außer im Verbändekonzept berücksichtigt wird. In der Spalte zu den verbleibenden Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors in 2050 (Mio. t CO₂e) ist zur besseren Vergleichbarkeit der Szenarioergebnisse nicht die höhere Klimawirksamkeit des Flugverkehrs berücksichtigt, da diese nur im Verbändekonzept eingeschlossen wurde. Alle Szenarien basieren auf ähnlichen sozioökonomischen Rahmendaten (Bevölkerungsrückgang auf 72–74 Mio. Einwohner, Wirtschaftswachstum von 0,7–1 % p.a.) und gehen von einem weiteren Anstieg der Personenmobilität (km pro Einwohner) und einer Zunahme der Güterströme aus. Dass der Endenergiebedarf dennoch deutlich sinkt (rund 40 % in allen Szenarien), ist vor allem auf die deutlichen Effizienzsteigerungen

Die ausschließliche Fokussierung auf den Markterfolg CO₂-armer Technologien stellt eine riskante Klimaschutzstrategie dar.

zurückzuführen. Zum Erreichen einer deutlichen Treibhausgasminderung im Verkehr sind alle Szenarien stark abhängig von der Verfügbarkeit alternativer Technologien sowie Kraftstoffen aus Biomasse oder erneuerbarem Strom. Neben den Effizienzsteigerungen der Fahrzeuge als Strategien zur Treibhausgasemissionsminderung werden in gewissem Umfang auch Verkehrsverlagerungen berücksichtigt, besonders im Personenverkehr allerdings auf vergleichsweise niedrigem Niveau. Eine wesentlich wichtigere Rolle spielt der Ersatz von fossilen Kraftstoffen durch Biokraftstoffe bzw. strombasierte Kraftstoffe.

Die Nichtberücksichtigung der erhöhten Klimawirksamkeit der Treibhausgasemissionen des Luftverkehrs stellt eine erhebliche Erleichterung bei der Erreichung der in den Szenarien anvisierten Zielniveaus dar. Im vorliegenden Verbändekonzept würde ohne Berücksichtigung des RFI-Faktors eine 95 %-Minderung von 185 Mio. t CO₂e auf maximal 9 Mio. t CO₂e erreicht. Allerdings würde dabei, wie im Konzept beschrieben, ein erheblicher Emissionsfaktor ignoriert, der für die erfolgreiche Erreichung der Klimaziele Deutschlands dringend adressiert werden muss. Aus diesem Grund haben sich die Verbände für eine Einbeziehung des RFI-Faktors entschieden.

5.6 Schlussfolgerungen aus den Szenario-Ergebnissen

Effizienztechnologien, alternative Antriebe und neue Kraftstoffe – ob noch im Anfangsstadium der Entwicklung oder bereits auf dem Markt verfügbar – sind der Hauptfokus bestehender Szenarien zum langfristigen Klimaschutz. In ihnen spielt die Verkehrsvermeidung und eine deutliche Verlagerung hin zu umweltfreundlicheren Verkehrsträgern auch im Personenverkehr meist eine nur untergeordnete Rolle. Angesichts der Unsicherheiten zum Zeitpunkt der Funktions- und Marktfähigkeit sowie zum langfristigen Potenzial stellt die ausschließliche Fokussierung auf den Markterfolg CO₂-armer Technologien eine riskante Klimaschutzstrategie dar.

Für ambitionierten Klimaschutz auch im Verkehrssektor müssen aus Sicht der Verbände auch ein Wandel im Mobilitätsverhalten und eine Änderung im Güterverkehrssystem als zentrale Handlungsoptionen verfolgt werden. Dies spiegelt sich in den Ergebnissen des Szenarios wider: Die Annahmen zur Marktdurchdringung von (teil)batterieelektrischen Fahrzeugen und Effizienzsteigerungen liegen in ähnlichen Größenordnungen wie in anderen Klimaschutzszenarien. Dagegen sinkt die Personenverkehrsleistung im Szenario der Verbände bis 2050 um 15 %, was auf den Bevölkerungsrückgang und auf die Abnahme der durchschnittlichen Wegelängen zurückzuführen ist. Zusätzlich gibt es eine deutliche Veränderung im Modal Split: Noch rund die Hälfte des bodengebundenen Personenverkehrs wird im Jahr 2050 mit dem Pkw zurückgelegt. Die andere Hälfte nutzt den öffentlichen Verkehr, Fahrrad- und Fußverkehr. Durch den steigenden Besetzungsgrad geht die Fahrleistung der Pkw stärker zurück als deren Verkehrsleistung und sinkt bis 2050 um 51 %. Der Pkw-Bestand reduziert sich bis zum Jahr 2030 auf 32 Mio. und bis zum Jahr 2050 auf 17 Mio. Fahrzeuge. Ursachen für den Rückgang des Pkw-Bestandes sind neben der abnehmenden Pkw-Fahrleistung auch die intensivere Nutzung von Fahrzeugen durch Carsharing und andere Formen geteilter Nutzung sowie abnehmende Bevölkerungszahlen.

Der Güterverkehr steigt von 614 Mrd. tkm im Jahr 2012 zunächst bis zum Jahr 2030 weiter auf knapp 700 Mrd. tkm an. Perspektivisch gibt es jedoch durch den Rückgang fossiler Energieträger, eine sparsamere Ressourcennutzung,

kürzere Transportweiten und sinkende Bevölkerungszahlen einen leichten Rückgang der Güterverkehrsleistung, die im Jahr 2050 in etwa das heutige Niveau erreicht und damit deutlich von anderen Klimaschutzszenarien abweicht. Auch favorisiert das Verbände-Konzept eine starke Verlagerung auf die Schiene. Im Jahr 2050 wird mit 225 Mrd. tkm ein Anteil von 40 % des Güterverkehrs auf der Schiene erbracht, was gegenüber heute in etwa einer Verdopplung der Verkehrsleistung entspricht.

Das Ergebnis aus der Kombination von verkehrsverlagernden und -vermeidenden Maßnahmen sowie deutlichen Effizienzsteigerungen ist, dass der Endenergiebedarf des nationalen Verkehrs (ohne den internationalen See- und Luftverkehr) bis 2020 um 20 % und bis 2050 um 73 % zurückgeht. Eine Minderung von 40 % wird bereits bis zum Jahr 2030 erreicht. Die Bundesregierung hat sich das Ziel gesetzt, den Endenergiebedarf im nationalen Verkehr um 10 % bis 2020 und 40 % bis 2050 (gegenüber dem Basisjahr 2005) zu reduzieren. Diese Zielsetzung gründete allerdings auf der Annahme, dass neben der Reduktion des Endenergiebedarfs der großflächige Einsatz von landbasierten Biokraftstoffen zum Klimaschutz beitragen kann. Wie in Kapitel 4.5 diskutiert, sollten nach Ansicht der Verbände in Deutschland langfristig keine Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse zum Einsatz kommen. Auch der Klimaschutzbeitrag des Einsatzes von Biokraftstoffen aus Abfall- und Reststoffen ist aufgrund von Mengenrestriktionen begrenzt. Gleichzeitig hat ebenso der Einsatz strombasierter Kraftstoffe seine Grenzen, da er die Bereitstellung erheblicher zusätzlicher Kapazitäten regenerativ erzeugten Stroms erfordert. Ohne entsprechende Mengen CO₂-freier Kraftstoffe reichen die Ziele des Energiekonzeptes der Bundesregierung von 2010 zur Endenergiereduktion des Verkehrssektors aber bei weitem nicht aus, um sicherzustellen, dass der Sektor mit einer fast vollständigen Reduktion der Treibhausgasemissionen einen adäquaten Beitrag zur Erreichung der deutschen Klimaschutzziele leistet.

Daher ist zum einen eine deutlich höhere Reduktion des Endenergiebedarfs notwendig. Die Reduktion müsste aufgrund der Potenzialrestriktionen CO₂-armer Kraftstoffoptionen sowie der verbleibenden erhöhten Klimawirkung von Kerosin bei mindestens 73 % im Jahr 2050 liegen. Zum anderen macht das Szenario zum Verbändekonzept deutlich, dass zur notwendigen Reduktion des Endenergiebedarfs und damit auch der Treibhausgasemissionen die Verkehrsnachfrage sowohl im Personen- als auch im Güterverkehr zwingend einbezogen werden muss. Bei einer Trendfortschreibung der Verkehrsnachfrage wird auch bei maximalem technischen Einsatz aufgrund der Potenzialrestriktionen von emissionsarmen Kraftstoffen keine drastische Treibhausgasminderung im Verkehrssektor erreichbar sein.

Für die Umsetzung des hier skizzierten Weges hin zu einem klimafreundlichen Verkehrssektor bis zum Jahr 2050 bedarf es folglich eines klaren politischen Willens, dieses Ziel mit entsprechenden Maßnahmen zu verfolgen. Auch wenn die langfristige Entwicklung des Mobilitätsverhaltens mit Unsicherheit behaftet ist, gibt es – wie im Konzept beschrieben – bereits heute positive Trends. Dieser „Wandel von unten“ sollte auch von der Politik unterstützt werden, um so zum Beispiel die deutlich vermehrte Nutzung von Fahrrad, öffentlichem Verkehr, kleineren und effizienteren Fahrzeugen, Elektromobilität sowie Carsharing in der Breite zu verankern.

Für die Umsetzung
des Weges hin zu
einem klimafreund-
lichen Verkehrssektor
2050 bedarf es eines
klaren politischen
Willens, dieses Ziel
mit entsprechenden
Maßnahmen zu
verfolgen.



Neben den politischen Rahmenbedingungen ist eine Änderung unseres Mobilitätsverhaltens zentral für einen klimafreundlicheren Personenverkehr.

Politischer Rahmen zur Umsetzung des Klimaschutzes im Verkehrssektor

Die in diesem Konzept beschriebene Veränderung des deutschen Verkehrssektors lässt sich nur durch zielgerichtete, strukturelle, verkehrspolitische Reformen auf Bundes- sowie EU-Ebene und eine Etablierung geeigneter politischer Rahmenbedingungen realisieren. Das Verbändekonzept skizziert fünf Maßnahmenbündel, deren Umsetzung in Richtung der für den Verkehrssektor erforderlichen

Reduktion der Treibhausgasemissionen um 95 % wirkt. Ein Großteil der Maßnahmen muss bereits vor 2030 umgesetzt werden. Die Erreichung des Ziels kann jedoch zusätzliche Maßnahmen erfordern.

6.1 Zielgerichtete Verkehrsplanung

Aktuell werden 71 % des Güterverkehrs in Deutschland auf der Straße geleistet. Im Personenverkehr dominiert der motorisierte Individualverkehr mit gut 80 % Anteil an der Verkehrsleistung (DIW 2014). Soll der Verkehrssektor den benötigten Beitrag zur fast vollständigen Reduzierung der Treibhausgasemissionen Deutschlands bis 2050 leisten, kann dies nicht ohne eine langfristig geplante Verkehrsverlagerung auf umweltfreundlichere Verkehrsträger und eine Ausschöpfung der Potenziale der Verkehrsvermeidung geschehen.

Zentral ist im Güterverkehr die Festlegung des Ziels, den Anteil von Schiene und Binnenschiff an der Verkehrsleistung auf 30 % in 2030 und 50 % in 2050 zu erhöhen.

Maßnahme 1 –

Definition von langfristigen verkehrlichen Zielen

Für den Verkehrssektor in Deutschland werden langfristige Ziele festgelegt, an denen sich die weitere Bundesverkehrswegeplanung orientiert.

Zentral ist im Güterverkehr die Festlegung des Ziels, den Anteil von Schiene und Binnenschiff an der Verkehrsleistung auf 30 % in 2030 und 50 % in 2050 zu erhöhen (ohne int. Seeverkehr). Dafür wird mindestens eine Verdoppelung der auf der Schiene abgewickelten Transportleistung von 112 Mrd. tkm im Jahr 2012 auf 225 Mrd. tkm in 2050 durch gezielte Maßnahmen der Kapazitätserweiterung (siehe Maßnahme 2 und 3) anvisiert. Für das Jahr 2030 wird eine Transportleistung von 170 Mrd. tkm auf der Schiene als Zwischenziel anvisiert.

Auch für das Binnenschiff wird eine Steigerung der Transportleistung um mindestens 20 % von heute 62 Mrd. tkm auf mindestens 75 Mrd. tkm in 2050 als Ziel festgelegt.

Zur Stärkung des umweltfreundlichen Fahrradverkehrs wird eine Steigerung seines Anteils am Modal Split der Wege im Personenverkehr von heute knapp 14 % auf mindestens 20 % in 2030 und 25 % in 2050 anvisiert. Für den ÖV wird eine Verdoppelung des Anteils am Modal Split bis 2050 von heute 8 % auf mindestens 16 % als Ziel gesetzt. Bis 2030 soll der Wegeanteil im Personenverkehr auf mindestens 12 % steigen.

Maßnahme 2 –

Zielorientierte Verkehrsinfrastrukturplanung für Deutschland

Langfristige Ziele der Verkehrsverlagerung auf die umweltfreundlichen Verkehrsträger Schiene, Schiff und öffentlichen Verkehr bis 2030 und 2050 werden zum grundlegenden Bestandteil einer integrierten, strategischen, effizienten und nachhaltigen Mobilitäts- und Transportplanung.

Die Potenziale der Verkehrsverlagerung auf Schiene und Schiff werden durch gezielte Infrastrukturmaßnahmen und nachhaltige Logistikstrategien des Bundes und der Länder konsequent genutzt.

Der Bundesverkehrswegeplan 2015 setzt die in der „Grundkonzeption für den Bundesverkehrswegeplan 2015“ des BMVI (2014) formulierten Prioritäten

- » Erhalt und Sanierung vor Aus- und Neubau,
- » Reduktion der Emissionen von Schadstoffen und Klimagasen,
- » Vermeidung von weiterem Verlust unzerschnittener Räume,
- » Lärmvermeidung und Lärmminderung

in geeignete Maßnahmen um. Die Potenziale der Verkehrsverlagerung auf Schiene und Schiff werden durch gezielte Infrastrukturmaßnahmen und nachhaltige Logistikstrategien des Bundes und der Länder konsequent genutzt. Sie reduzieren den Straßengüterverkehr in hoch belasteten Korridoren. Die Ausweitung der Lkw-Maut auf alle Straßen ab 2018 und die Einführung einer entfernungsabhängigen sowie emissionsabhängigen Pkw-Maut auf allen Straßen ab 2020 (Kapitel 6.4) sichert den Erhalt und den zielorientierten Ausbau aller Verkehrsnetze ab. Der zusätzliche Erhaltungs- und Nachholbedarf für alle Verkehrsträger von 7,2 Mrd. Euro pro Jahr (Preisstand 2012) wird dadurch gedeckt. Auf Projekte mit hohen infrastrukturbedingten Umwelteingriffen sowie auf Neubaumaßnahmen wird nach Prüfung aller sinnvollen Alternativen weitgehend verzichtet. Im Bereich der Straßeninfrastrukturplanung ebnet der Plan erstmals den Weg zu integrierten, nachhaltigen kommunalen Verkehrsinfrastrukturlösungen, statt die Kommunen weiter mit dem Bau einer Vielzahl von Ortsumgehungen zu belohnen, die verkehrsträgerübergreifende Planungen vermissen lassen.

Seit 2008 nehmen an vielen großen Flughäfen Deutschlands die Flugbewegungen durch den Einsatz größerer Flugzeuge ab. Raumordnerische Vorgaben zur Stärkung großer Flughäfen und Linienflüge auf Kosten kleinerer Flughäfen und Billigflieger-Unternehmen sowie der von der EU vorgegebene Beihilfeabbau für Regionalflughäfen intensivieren diesen Trend. Das bereits 2013 in der Koalitionsvereinbarung angekündigte Luftverkehrskonzept der Bundesregierung führt zu einer effizienteren Flughafenstruktur in Deutschland und zu einer Verlagerung von Flügen auf die Bahn für Ziele, die in bis zu vier Stunden per Zug erreichbar sind.

Maßnahme 3

Stärkung des Verkehrsträgers Schiene

Als Bestandteil einer zielorientierten Verkehrswegeplanung wird ein leistungsfähiges Schienenverkehrskonzept bis 2050 unter Berücksichtigung des Güterverkehrs sowie des Personenfern- und -nahverkehrs entwickelt.

Die Einführung eines integralen Taktfahrplans („Deutschland-Takt“) mit bundesweit aufeinander abgestimmten Anschlüssen (Bus und Bahn) sowie leistungsfähigen Güterverkehrstrassen erhöht das Zugangebot, steigert die Attraktivität des Schienenpersonenverkehrs und verbessert die Koordination mit dem Schienengüterverkehr.

Auf Basis der Zielnetzkonzeption 2030 der Deutschen Bahn AG, die die Kritik der Umweltverbände an überteuerten Prestigeprojekten zugunsten besserer Vernetzung mit dem Nahverkehr in den Knoten aufgreift, wird im BVWP 2015 ein Netz des Vordringlichen Bedarfs plus (VB+) für den Schienengüterverkehr entwickelt, das insbesondere den Schienengüterverkehr in den Korridoren des Seehafen-Hinterlandverkehrs verdoppelt.

Zur Umsetzung der im BVWP anvisierten Maßnahmen zur Stärkung des Verkehrsträgers Schiene werden sämtliche Gewinne von DB Netz aus Trassen-

**Im Fokus steht die
Beseitigung von
Engpässen durch
Schaffung von sechs
leistungsfähigen
Hauptkorridoren
inklusive Bypässen.**

und Stationseinnahmen sowie von DB-Regio aus den Subventionen der Regionalisierungsmittel mit Hilfe von Baukostenzuschüssen und ohne Erhöhung der Trassenpreise in das Netz reinvestiert. Es wird ein „Sondertopf Schienengüterverkehr“ zur Finanzierung gezielter „kleiner“ Ausbau-, Neubau- und Elektrifizierungsmaßnahmen (Kappungsgrenze bei 50 Mio. Euro) mit hoher Hebelwirkung eingerichtet. Die Ausrichtung erfolgt hier am Verkehrsbedarf und am Ziel des Trassenzugewinns. Im Fokus steht die Beseitigung von Engpässen durch Schaffung von sechs leistungsfähigen Hauptkorridoren inklusive Bypässen, die auch für eine Stärkung des schienengebundenen Hinterlandverkehrs der deutschen und holländischen See- und Binnenhäfen sorgen.

Eine 2015 reformierte Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung (LuFV) sorgt für den langfristigen Erhalt des Schienennetzes und den gezielten Abbau von Langsamfahrstellen. Die zusätzlichen Haushaltsmittel des Bundes im Umfang von 500 Mio. Euro für die LuFV werden verstetigt. Die „neue LuFV“ schafft die infrastrukturellen Voraussetzungen zur Kapazitätsausweitung und Steigerung des Modal Split und orientiert sich am Ziel des Trassenzugewinns.

Zur Finanzierung der Betriebskosten des Schienenpersonennahverkehrs werden die Regionalisierungsmittel des Bundes aus dem Regionalisierungsgesetz auch nach 2014 erhalten und mit mindestens 2,5 % im Jahr (Inflationsausgleich plus Mehrkosten) dynamisiert, um eine Verdoppelung der Nachfrage des SPNV zu unterstützen.

Zur Stärkung multimodaler Logistikkonzepte und der Verlagerung von Güterverkehr auf die Schiene werden die Fördermittel des Bundes für den kombinierten Verkehr bis 2020 mindestens verdoppelt und die Gleisanschlussprämie deutlich erhöht.

Der Bahnlärm wird durch die konsequente Umrüstung der lauten Graugussbremsen von Güterwagen auf leise Verbundstoffbremsen (LL-Sohle oder K-Sohle) in Verbindung mit der Ausschöpfung der vorhandenen technischen Maßnahmen wie Schienenschleifen, Schallabsorber und dem wirkungsvollen Anreiz lärmabhängiger Trassenpreise bis 2020 halbiert und Richtung 2050 weiter deutlich vermindert. Ab 2018 gilt ein Fahrverbot für Güterwagen mit herkömmlichen Bremsen. Die Akzeptanz des Verkehrsträgers Schiene wird damit erfolgreich gestärkt.

Maßnahme 4

Stärkung des Verkehrsträgers Wasserstraße

Der Anteil des Verkehrsträgers Binnenschiff am Modal Split wird mit gezielten Infrastrukturmaßnahmen und Investitionen vor allem in das westdeutsche Kanalnetz gestärkt. Logistische, multimodale sowie nautische Kapazitäten werden ausgebaut. Zu den Maßnahmen zählt die Nutzung von insgesamt 25 wettbewerbsfähigen Binnenhäfen als trimodale Hinterlandhubs, der Neubau der Scharnebecker Schleuse für Großmotor-Güterschiffe sowie der Aufbau eines umfassenden Flussinformationssystems. Zum nachhaltigen Schutz der Biodiversität und wichtiger Ökosystemdienstleistungen wird auf den Bau weiterer Staustufen sowie auf den Ausbau unverbauter Flussabschnitte verzichtet.

6.2 Lebenswerte Städte

Innerhalb des Verkehrssektors verursacht der Stadtverkehr europaweit ca. ein Viertel aller CO₂-Emissionen (Europäische Kommission 2011). Rund 23 % der Pkw-Emissionen Deutschlands entstehen in Kern- und Großstädten.¹⁹ In puncto Luftverschmutzung und Lärm in Städten ist der Verkehr einer der Hauptverursacher. Allerdings stehen hier aufgrund der hohen Bevölkerungsdichte und kurzer Wege vielfältige Optionen für einen klima- und umweltfreundlichen Verkehr zur Verfügung. Ziel dieses Maßnahmenbündels ist die maximale Reduktion der Treibhausgasemissionen des städtischen Verkehrs bei gleichzeitig deutlicher Erhöhung der Lebensqualität im urbanen Raum. Dafür werden Städte attraktiver für Fußgänger, und der Umweltverbund aus Fahrradverkehr, öffentlichem Personennahverkehr (ÖPNV) und geteilten Fahrzeugen (Carsharing) wird deutlich gestärkt.

Die Bundesregierung formuliert das Ziel „emissionsfreie Innenstädte 2030“ und erarbeitet einen Umsetzungsplan.

Maßnahme 1

Zieldefinition „emissionsfreie Mobilität in Innenstädten 2030“

Die Bundesregierung formuliert das Ziel „emissionsfreie Innenstädte 2030“ und erarbeitet einen Umsetzungsplan. Ab 2030 dürfen in deutschen Innenstädten im Wesentlichen nur noch elektrisch betriebene motorisierte Fahrzeuge fahren. Damit geht die Bundesregierung deutlich über das von der EU-Kommission (2011) formulierte Ziel des Verzichts auf konventionell betriebene Fahrzeuge bis 2050 im Stadtverkehr (und deren Halbierung bis 2030) sowie einer im Wesentlichen CO₂-freien Stadtlogistik in größeren städtischen Zentren bis 2030 hinaus.

Im Rahmen der 2020 auf allen Straßen eingeführten entfernungs- und emissionsabhängigen Pkw-Maut erhalten die Städte die Möglichkeit, die Maut selektiv zu erhöhen, um zum Beispiel Staukosten anzulasten und schrittweise den Anteil konventioneller Fahrzeuge zu reduzieren. Auch Ausnahmen für lokal CO₂-emissionsfreie Fahrzeuge sowie Carsharing werden auf der Grundlage einer bundesweiten Regelung zugelassen. Finanziell attraktive ÖPNV-Angebote und andere kommunale Maßnahmen, z. B. in der Parkraumbewirtschaftung, unterstützen den Umstieg von Pkw-Besitzern auf den ÖPNV.

Maßnahme 2

Stärkung des Umweltverbundes

Während vor allem der Pkw-Verkehr mit konventionellen Fahrzeugen in Städten schrittweise reduziert wird, werden die umweltfreundlichen Alternativen ÖPNV, Fahrrad und Carsharing deutlich gestärkt.

Das ÖPNV-Angebot wird vor allem in urbanen Räumen durch dichtere Taktung, zusätzliche Linien und bessere intermodale Vernetzung mit anderen Verkehrsmitteln gestärkt. Die finanzielle Förderung durch das Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz wird auch nach 2019 fortgesetzt. Zentral ist jedoch die verkehrliche Zweckbindung sowie die Umstellung auf erfolgswirksame Projekte (mit dem Ziel, neue Kunden zu gewinnen) mit ÖPNV-Vorrang. Der Bund legt bei der Fortschreibung des Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetzes ein Investitionsprogramm zur Förderung des elektrisch betriebenen ÖPNV und zur Attraktivitätssteigerung der Innenstädte auf, um Defizite von zahlreichen deutschen Städten hinsichtlich der Ausstattung mit elektrischen Straßenbahnen und Oberleitungs- sowie Elektrobussen abzubauen.

Der Fahrradverkehr wird durch eine Verdoppelung der Bundesmittel zur Radverkehrsförderung sowie eine Erhöhung der Mittel der sonstigen Gebietskörper-



Fahrradverkehr und öffentlicher Verkehr profitieren langfristig von einer besseren Integration der Verkehrs- und Siedlungsplanung.

schaften finanziell gestärkt. Pro Kopf werden jährlich mindestens 25 Euro für den Fahrradverkehr in Deutschland aufgewendet.

Die Fahrradinfrastruktur wird vor allem durch folgende Maßnahmen ausgebaut: Straßenerneuerungsmaßnahmen werden verpflichtend mit der Prüfung der Einführung von Radverkehrsstreifen verbunden. Das Fahrradrouthenetz wird ausgebaut und Fahrradschnellwege geschaffen. Mehr Nebenstraßen werden in Fahrradstraßen umgewandelt und Einbahnstraßen in Gegenrichtung für den Fahrradverkehr freigegeben. An allen größeren Bahnhöfen und Verkehrsknotenpunkten werden Fahrradstationen (Abstellplätze, Verleih, Reparaturdienst) geschaffen.

Carsharing wird durch eine Bevorrechtung in der Parkraumbewirtschaftung gefördert. Innerorts wird Tempo 30 als Regelgeschwindigkeit eingeführt. Tempo 50 ist nur noch als Ausnahme, z. B. für Hauptachsen zulässig. Dadurch wird der motorisierte Verkehr verlangsamt, was den Umstieg auf den „Langsamverkehr“ (Fuß, Fahrrad, ÖPNV) deutlich attraktiver macht.

Maßnahme 3

Förderung einer geeigneten Raum- und Siedlungsstruktur

Das Leitkonzept „Stadt der kurzen Wege“, das auf einer verkehrsarmen Siedlungsstruktur basiert, wird durch eine stärkere Integration der Verkehrs- und Siedlungsplanung umgesetzt. Dazu gehören Anreize zur Ansiedlung im (sub-) urbanen Raum sowie der Nutzung von Bestandsimmobilien und Brachflächen statt Ausweitung von Neuerschließungsgebieten. In Städten wird unter anderem durch eine Änderung der Baunutzungsverordnung eine stärkere Nutzungsmischung von Wohnen, Arbeiten und Einkaufen erreicht, die zu kürzeren Wegen führt und zu Fuß gehen bzw. Fahrrad- und ÖPNV-Nutzung attraktiver macht. Dadurch werden der Verkehr und die damit verbundenen Emissionen reduziert sowie – als positiver Sekundäreffekt – die weitere Flächenversiegelung und Zersiedelung gestoppt. Eine Reform der Grunderwerbssteuer mit dem Ziel, die Attraktivität des Grundstückskaufs in Neuerschließungsgebieten zu mindern und den Kauf von Bestandsimmobilien zu fördern, wird geprüft. Der interkommunale Finanzausgleich wird reformiert, damit die Fehlanreize beseitigt werden, die von der kommunalen Konkurrenz um Einwohner- und Gewerbeansiedlung ausgehen.

Die maximale Gesamtausweitung der Siedlungs- und Verkehrsfläche in Deutschland wird bis 2020 gemäß der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie von 2002 sowie der Nationalen Strategie zur Sicherung der biologischen Vielfalt auf 30 ha pro Tag sowie bis 2030 auf netto null reduziert.

Die entfernungsabhängige Pendlerpauschale wird schrittweise abgebaut und umgestaltet, da sie Fehlanreize zum Wohnen fern der urbanen Zentren setzt und somit mehr Verkehr induziert.

6.3 Effizienz und alternative Antriebe

Im Kern einer erfolgreichen Klimaschutzstrategie für den Verkehrssektor steht die maximale Reduktion des Endenergiebedarfs. Zentral hierfür ist neben verkehrsvermeidenden und -verlagernden Maßnahmen die vollständige Ausschöpfung der Effizienzsteigerungspotenziale der Antriebe aller Verkehrsträger und die Einführung alternativer Antriebstechnologien. Vor allem im Pkw-Verkehr lässt sich bis 2050 durch weitere Effizienzsteigerungen und den parallel anlaufenden sukzessiven Umstieg auf die Elektromobilität eine fast vollständige Dekarbonisierung erreichen.

Für das Jahr 2025 wird ein bindender CO₂-Grenzwert von 65–68 g CO₂/km für Pkw-Neuzulassungen festgelegt, der bis 2030 auf maximal 50 g CO₂/km verschärft wird.

Maßnahme 1

EU-Effizienzvorgaben für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge

Die Effizienzsteigerung herkömmlicher fossiler Antriebe sowie der Markthochlauf alternativer (teil)elektrischer Antriebe wird durch die Weiterentwicklung der entsprechenden EU-Richtlinie nach 2020 konsequent fortgesetzt. Für das Jahr 2025 wird ein bindender CO₂-Grenzwert von 65–68 g CO₂/km für Pkw-Neuzulassungen festgelegt, der bis 2030 auf maximal 50 g CO₂/km verschärft wird.²⁰ Die CO₂-Emissionen des Pkw-Bestands werden bis 2050 fast vollständig reduziert.

Auch für leichte Nutzfahrzeuge werden über die Weiterentwicklung der EU-Grenzwerte nach 2020 konsequente Effizienzsteigerungen sowie eine sukzessive Verbreitung (teil)elektrischer Antriebe erwirkt, die äquivalent zur Entwicklung bei den Pkw zu einer fast vollständigen Dekarbonisierung des Bestands bis 2050 führen.

Spätestens ab 2030 erfasst die europäische CO₂-Regulierung für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge auch die indirekten Emissionen und schafft auch für Elektrofahrzeuge einen Anreiz zur Effizienzsteigerung.

Durch die sofortige Einführung des neuen WLTP zur Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs und der CO₂-Emissionen von Neuwagen wird die Lücke zwischen Testwerten und realem Verbrauch noch vor 2020 geschlossen.

Maßnahme 2

EU-Effizienzvorgaben für schwere Nutzfahrzeuge (>3,5t)

Spätestens ab 2020 führt die EU Effizienzvorgaben auch für schwere Nutzfahrzeuge (>3,5t) ein. Dafür wird ein EU-weites Messverfahren zur Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs für schwere Nutzfahrzeuge ausgearbeitet. Neben der maximalen Ausschöpfung der Effizienzpotenziale (u.a. durch die Aerodynamikmaßnahmen und neue Fahrzeugdesigns) kommen zunehmend batterieelektrische Lkw (<10t) und Plug-in-Hybrid-Lkw (<10t) zum Einsatz.

Maßnahme 3

Ökologische Reform der Dienstwagenbesteuerung

Die Regelungen zur steuerlichen Behandlung von Dienstwagen in Deutschland werden bis spätestens 2020 reformiert. Sie fördern so die Nachfrage nach hoch-effizienten sowie alternativ betriebenen Fahrzeugen bei gleichzeitigem Abbau umweltschädlicher Subventionen. Die steuerliche Absetzbarkeit von Firmenwagen wird an den spezifischen CO₂-Ausstoß des Fahrzeugs gekoppelt. Die Berechnung des geldwerten Vorteils bei privater Nutzung des Firmenwagens wird an den tatsächlichen Anschaffungskosten des Fahrzeugs, an der tatsächlichen Fahrleistung und am Kraftstoff- bzw. Stromverbrauch des Fahrzeugs ausgerichtet.

6.4 Internalisierung der externen Kosten

Der Verkehr verursacht neben den Kosten für Bau und Erhalt der Infrastruktur erhebliche Umweltkosten resultierend aus Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen, Lärm, Flächenverbrauch sowie negativen Effekten auf Natur und Landschaft wie etwa den Verlust von Artenvielfalt. Diese Kosten variieren – abhängig vom Verkehrsträger – erheblich: So liegen die durchschnittlichen Umweltkosten pro Tonnenkilometer eines Diesel-Lkw in etwa achteinhalb Mal über denen eines elektrisch betriebenen Güterzugs. Im Personenverkehr sind die Umweltkosten eines Pkw pro Personenkilometer rund zweieinhalb (Benzin) bis dreieinhalb (Diesel) Mal so hoch wie die der elektrisch betriebenen Bahn und in etwa 50–90 % höher als die eines Dieselsebusses (Umweltbundesamt 2012). Nur wenn diese externen Kosten den Verkehrsträgern verursachergerecht angelastet werden, können sich die umweltfreundlicheren Verkehrsmodi wie Bahn, Binnenschiff, Fernbus und ÖPNV im intermodalen Kostenvergleich durchsetzen.

Maßnahme 1

Reform und Ausweitung der Energiebesteuerung

Die EU-Energiesteuerrichtlinie wird reformiert und spätestens mit Gültigkeit ab 2030 nach Energiegehalt und CO₂-Intensität berechnet. Die Mindeststeuersätze werden sukzessive angehoben, dadurch steigt auch die deutsche Mineralölsteuer (Energiesteuer) schrittweise an. Das in der Energiesteuerrichtlinie formulierte Verbot der Kerosinbesteuerung von Flügen ins EU-Ausland sowie die des internationalen Seeverkehrs wird abgeschafft.

Die Besteuerung von Kerosin wird zunächst für nationale Flüge eingeführt, dann EU-weit und nach 2030 im Zuge einer internationalen Einführung auch auf Flüge außerhalb der EU ausgeweitet. Die Einführung sowie Höhe der Kerosinbesteuerung wird mit der Einbindung des Luftverkehrs in den Emissionshandel koordiniert. Ebenso wird die Energiebesteuerung zunächst in der kommerziellen nationalen Binnenschiffahrt, ab 2030 dann auch im internationalen Seeverkehr eingeführt.

Auch die Mehrwertsteuer auf internationale Flüge wird spätestens 2030 eingeführt.

Maßnahme 2

Einführung Pkw-Maut und Ausweitung Lkw-Maut

Eine fahrleistungs- und emissionsabhängige Pkw-Maut wird bis 2020 auf allen Straßen eingeführt. Die Einnahmen werden verkehrsträgerübergreifend zur Sicherung des Erhalts der Infrastruktur eingesetzt.

Die Lkw-Maut wird bis 2018 auf Fahrzeuge mit einem zulässigen Gesamtgewicht ab 3,5 t (langfristig ab 2,5 t) sowie auf alle Straßen ausgeweitet und schrittweise bis zur vollen Internalisierung der externen Kosten angehoben.

Maßnahme 3

Internalisierung externer Kosten im Luft- und Seeverkehr

Die erheblichen externen Umweltkosten des Luftverkehrs werden durch verschiedene Instrumente auf nationaler und internationaler Ebene internalisiert. Die 2011 in Deutschland eingeführte Luftverkehrsteuer wird beibehalten und weiterentwickelt sowie auch in anderen europäischen Ländern als erster Schritt zum Abbau schädlicher Subventionen, wie z. B. der Befreiung internationaler Flüge von der Mehrwertsteuer, im Luftverkehr eingeführt. In Deutschland wird die politische Deckelung der Einnahmen aus Luftverkehrsteuer und EU-Emissionshandel auf 1 Mrd. Euro pro Jahr abgeschafft.

Eine fahrleistungs-
und emissions-
abhängige Pkw-
Maut wird bis 2020
auf allen Straßen
eingeführt.

Der Luftverkehr wird ab 2017 wieder inklusive der internationalen Flüge in den EU-Emissionshandel (EHS) eingebunden (Ende von „stop-the-clock“). Die dem Emissionshandel zugrunde liegenden Treibhausgasreduktionsziele werden ab 2021 verschärft. Ab 2021 wird auf eine Vollauktionierung der Emissionszertifikate des Luftverkehrs umgestellt. Die Einnahmen werden zu einem guten Teil zur internationalen Klimaschutzfinanzierung in Entwicklungsländern eingesetzt.

Ein internationaler marktbasierter Mechanismus zur Reduktion der Treibhausgasemissionen des Luftverkehrs kann ab 2021 die Einbindung des Luftverkehrs in das EU-EHS ablösen, falls ICAO sich bis 2016 auf ein emissionshandelbasiertes System einigt, das an ambitionierten Klimazielen sowie der Internalisierung der externen Umweltkosten des Luftverkehrs orientiert ist.

Gemäß dem Beschluss der EU-Kommission sind Betriebsbeihilfen für Regionalflughäfen mit weniger als 3 Mio. Passagieren jährlich spätestens ab 2024 nicht mehr erlaubt.

Im internationalen Seeverkehr wird ab 2030 ein globaler marktbasierter Mechanismus zur Senkung der Treibhausgasemissionen durch die IMO eingeführt. Als Vorstufe wird ab 2020 das Monitoring der Emissionen vorgeschrieben.

6.5 Nachhaltige Kraftstoffalternativen

Eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um 95 % bis 2050 kann nur durch den Einsatz nachhaltiger, emissionsarmer Kraftstoffalternativen gelingen.

Auch bei maximaler Reduktion des Endenergiebedarfs des Verkehrssektors kann eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um 95 % bis 2050 nur durch den Einsatz nachhaltiger, emissionsarmer Kraftstoffalternativen gelingen. Diese sollten allerdings erst langfristig in größerem Maße zur Schließung der nach Umsetzung von Maßnahmen zur Reduktion des Endenergiebedarfs verbleibenden „Lücke“ bei der Treibhausgasemissionsminderung eingesetzt werden und nicht anstatt der oben beschriebenen Maßnahmen der Verkehrsvermeidung und -verlagerung sowie Effizienzsteigerung. Auch wenn ein großflächiger Einsatz von Biokraftstoffen oder strombasierten Kraftstoffen zum jetzigen Zeitpunkt nicht zielführend ist, bedarf es klarer politischer Rahmenbedingungen zur Weiterentwicklung effizienter Konversionsverfahren und Technologien.

Maßnahme 1

Reduktion der Treibhausgasintensität der eingesetzten Kraftstoffe

Die Kraftstoffqualitätsrichtlinie (FQD) wird inklusive der ab 2015 geltenden Treibhausgasreduktionsquote für in der EU eingesetzte Kraftstoffe von den Mitgliedstaaten voll implementiert. Dafür wird auf EU-Ebene die lange verzögerte Festlegung spezifischer Standardwerte für die Treibhausgasintensität verschiedener fossiler Kraftstoffe wie Öl auf Teersandbasis, Schieferöl, Öl aus Kohleverflüssigung, Tiefseeöl und konventionelles Rohöl zügig abgeschlossen. Die Treibhausgasreduktionsquote der FQD wird auch nach 2020 aufrechterhalten, um marktgetrieben neue Kraftstoffalternativen mit gesicherter Treibhausgasemissionsminderung aufzubauen und besonders emissionsintensive fossile Kraftstoffe aus unkonventionellen Quellen vom europäischen Markt fernzuhalten. Mögliche iLUC-Emissionen von landbasierten Biokraftstoffen werden in der Treibhausgasbilanzierung berücksichtigt.

Die EU-Richtlinien für Erneuerbare Energien (RED) und Kraftstoffqualität (FQD) werden zur Berücksichtigung von iLUC-Emissionen noch im Jahr 2014 geändert. Damit wird der Einsatz von Anbaubiomasse zur Erreichung des 10 %-

Ziels für erneuerbare-Energien aus der RED zugunsten eines größeren Beitrags von erneuerbarem Strom und Biokraftstoffen auf Abfall- und Reststoffbasis begrenzt. Ein wissenschaftlich gesicherter iLUC-Faktor zur Berücksichtigung von Emissionen aus indirekten Landnutzungsänderungen wird ab 2017 in die Treibhausgasbilanzierung von RED und FQD integriert.

2020 endet in der EU die finanzielle Förderung für Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse. Stattdessen wird vor allem die Forschung und Entwicklung alternativer Biokraftstofftechnologien auf Basis von Abfall- und Reststoffen sowie Algen und Bakterien gefördert.

Maßnahme 2

Nachhaltigkeitskriterien für alternative Kraftstoffoptionen

Die Nachhaltigkeitskriterien für Biokraftstoffe auf Abfall- und Reststoffbasis werden auf EU-Ebene entwickelt und implementiert, um unerwünschte ökologische Nebenwirkungen (z. B. durch die Übernutzung von Stroh und Waldrestholz) und Missbrauch auszuschließen. Dazu gehört auch eine einheitliche Definition der auf die EU-Ziele der RED und FQD anrechenbaren Abfall- und Reststoffe.

Maßnahme 3

Sektorübergreifende Biomassestrategie mit Allokationsplan

Die Bundesregierung entwickelt eine sektorübergreifende Biomassestrategie inklusive eines langfristigen Allokationsplans. Realistische Mengenpotenziale sowie Sektorbedarfe werden darin gegenübergestellt. Den sich verschärfenden Nutzungskonkurrenzen zwischen der stofflichen sowie der energetischen Nutzung zur Strom-, Wärme- oder Kraftstoffproduktion trägt sie durch klare Allokationskriterien Rechnung, bei denen der langfristig zu erzielende Klimaschutznutzen als Kriterium zentrale Berücksichtigung findet.

Literaturverzeichnis

Ahrens, G.-A., Becker, U., Böhmer, T., Richter, F., & Wittwer, R., 2013. Potenziale des Radverkehrs für den Klimaschutz. Online verfügbar unter: <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4451.pdf> (zuletzt aufgerufen am 08.05.2014).

BGL, 2014. Daten & Fakten zum gewerblichen Güterkraftverkehr. Online verfügbar unter: <http://www.bgl-ev.de/web/daten/index.htm> (zuletzt aufgerufen am 08.05.2014).

Blanck, R. (2012). Treibhausgasneutraler Verkehr 2050: Ein Szenario zur zunehmenden Elektrifizierung und dem Einsatz stromerzeugter Kraftstoffe im Verkehr. Online verfügbar unter: <http://www.oeko.de/oekodoc/1829/2013-499-de.pdf> (zuletzt aufgerufen am 26.05.2014).

Buhag, Ø., Corbett, J.J., Endresen, Ø., Eyring, V., Faber, J., Hanayama, S., Lee, D.S., Lee, D., Lindstad, H., 2009. Second IMO GHG Study 2009. Online verfügbar unter: http://www.imo.org/blast/blastDataHelper.asp?data_id=27795 (zuletzt aufgerufen am 26.05.2014)

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), 2013. Nationale Politikstrategie Bioökonomie: Wachsende Ressourcen und biotechnologische Verfahren als Basis für Ernährung, Industrie und Energie. Online verfügbar unter: http://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Broschueren/BioOekonomiestrategie.pdf;jsessionid=1DEF0FD226EB22A7B9E3F3A87A1A7073.2_cid376?__blob=publicationFile (zuletzt aufgerufen am 08.05.2014).

Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE), 2013: Evaluations- und Erfahrungsbericht für das Jahr 2012. Online verfügbar unter: http://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/02_Kontrolle/05_NachhaltigeBiomasseerzeugung/Evaluationsbericht_2012_2_Auflage.pdf?__blob=publicationFile (zuletzt aufgerufen am 08.05.2014).

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), 2014: Grundkonzeption für den Bundesverkehrswegeplan 2015. Bonn. Online verfügbar unter: http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/bvwp-2015-grundkonzeption-langfassung.pdf?__blob=publicationFile (zuletzt aufgerufen am 26.05.2014).

Bundesregierung, 2014: Deutschlands Zukunft gestalten: Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD. 18. Legislaturperiode. Online verfügbar unter: http://www.bundesregierung.de/Content/DE/_Anlagen/2013/2013-12-17-koalitionsvertrag.pdf;jsessionid=F0B4B2A20F4E06482EB12499FF995E4F.s3t1?__blob=publicationFile&v=2 (zuletzt aufgerufen am 08.05.2014).

Bringezu, S., O'Brien, M. & Schütz, H., 2012. Beyond biofuels: Assessing global land use for domestic consumption of biomass. Land Use Policy, 29, pp.224–232.

BUND, 2012: Pendlerzulage – Mehr Klimaschutz und soziale Gerechtigkeit, Online verfügbar unter: http://www.bund.net/fileadmin/bundnet/pdfs/verkehr/autoverkehr/20120228_verkehr_erhoehung_pendlerpauschale_hintergrund.pdf (zuletzt aufgerufen am 08.05.2014).

Bundesverband CarSharing (BCS), 2014. Carsharing Boom hält an. Pressemitteilung, Online verfügbar unter: http://www.carsharing.de/sites/default/files/uploads/presse/pdf/pm_carsharing-bilanz_2013.pdf (zuletzt aufgerufen am 08.05.2014).

Buttazzoni, M. & Rossi, A., Pamlin, D., Pahlman, S., 2009. From workplace to anyplace: Assessing the opportunities to reduce greenhouse gas emissions with virtual meetings and telecommuting.

Cotula, L., Vermeulen, S., Leonard, R. & Keeley, J., 2009. Land grab or development opportunity? Agricultural investment and international land deals in Africa. Online verfügbar unter: <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/011/ak241e/ak241e00.pdf> (zuletzt aufgerufen am 08.05.2014).

DESTATIS, 2009. Bevölkerung Deutschlands bis 2060-12. Koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung. Online verfügbar unter: https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Bevoelkerung/VorausberechnungBevoelkerung/BevoelkerungDeutschland2060Presse5124204099004.pdf?__blob=publicationFile. (zuletzt aufgerufen am 08.05.2014).

DESTATIS, 2013. Seeschifffahrt 2012. Fachserie 8 Reihe 5. (Vol. 49). Online verfügbar unter: <https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/TransportVerkehr/Schifffahrt/SeeschifffahrtJ.html> (zuletzt aufgerufen am 08.05.2014).

DESTATIS, 2014. Genesis Datenbank.

Deutsches Biomasseforschungszentrum (DBFZ), 2014. DBFZ-Report Nr. 11: Monitoring Biokraftstoffsektor (2. Auflage). Online verfügbar unter: https://www.dbfz.de/web/fileadmin/user_upload/DBFZ_Reports/DBFZ_Report11A_web.pdf (zuletzt aufgerufen am 08.05.2014).

DHL, 2012. Delivering Tomorrow, Bonn.

Diekmann, L., Gerhards, E. & Klinski, S., 2011. Steuerliche Behandlung von Firmenwagen in Deutschland. Online verfügbar unter: http://foes.de/pdf/2011_Firmenwagenbesteuerung_lang.pdf [Accessed November 10, 2013]. (zuletzt aufgerufen am 08.05.2014).

DIW, 2013. Verkehr in Zahlen 2013/2014.

EEA, 2014. Transport emissions of greenhouse gases (TERM 002). Online verfügbar unter: <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/transport-emissions-of-greenhouse-gases/transport-emissions-of-greenhouse-gases-3> (zuletzt aufgerufen am 08.05.2014).

EEA, 2013. CO₂ emissions performance of car manufacturers in 2012. Online verfügbar unter: <http://www.eea.europa.eu/publications/co2-emissions-performance-of-car-1> (zuletzt aufgerufen am 08.05.2014).

EMPA, 2012. Harmonisation and extension of the bioenergy inventories and assessment. Online verfügbar unter: http://www.empa.ch/plugin/template/empa/*125527 (zuletzt aufgerufen am 08.05.2014).

EUROCONTROL, 2013. Challenges of Growth. Task 7: European Air Traffic in 2050.

Europäische Kommission, 2011. Weissbuch. Fahrplan zu einem einheitlichen europäischen Verkehrsraum – Hin zu einem wettbewerbsorientierten und ressourcenschonenden Verkehrssystem. Online verfügbar unter: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0144:FIN:DE:PDF> (zuletzt aufgerufen am 08.05.2014).

Europäische Kommission, 2014. Ein Rahmen für die Klima- und Energiepolitik im Zeitraum 2020–2030. COM/2014/015 final, Online verfügbar unter: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?jsessionid=zYWhTZ0bYj3TLThMH7hDKLTCg4kCNm85T4c2wbWmzqK1wWyJnJz4!-1692601169?uri=CELEX:52014DC0015> (zuletzt aufgerufen am 08.05.2014).

European Commission, 2013. EU Energy, Transport and GHG Emissions Trends to 2050. Online verfügbar unter: http://ec.europa.eu/energy/observatory/trends_2030/doc/trends_to_2050_update_2013.pdf (zuletzt aufgerufen am 26.05.2014).

European Commission, 2014. Motorways of the Sea. Online verfügbar unter: http://ec.europa.eu/transport/modes/maritime/motorways_sea/index_en.htm (zuletzt aufgerufen am 08.05.2014).

FNR, 2013a. Die Bedeutung der Bioenergie unter den erneuerbaren Energien. Online verfügbar unter: <http://mediathek.fnr.de/grafiken/daten-und-fakten/bioenergie/die-bedeutung-der-bioenergie-unter-den-erneuerbaren-energien-endenergie.html> (zuletzt aufgerufen am 08.05.2014).

FNR, 2013b. Leitfaden Biogas: Von der Gewinnung zur Nutzung. 6. vollständig überarbeitete Auflage. Gülzow.

FNR, 2014. Leitfaden Biogasaufbereitung und -einspeisung. 5., vollständig überarbeitete Auflage.

Follmer, R., Gruschwitz, D., Jesske, B., Quandt, S., Lenz, B., Nobis, C., Mehlin, M., 2010. Mobilität in Deutschland 2008. Online verfügbar unter: http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/MiD2008_Abschlussbericht_I.pdf (zuletzt aufgerufen am 26.05.2014).

Holzhey, M., Naumann, R., Berschin, F., Kühl, I., & Petersen, T., 2012. Schienengüterverkehr 2050 – Szenarien für einen nachhaltigen Güterverkehr. Online verfügbar unter: http://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/03_Materialien/2012_2016/2013_MzU_45_Schienengueterverkehr2050.pdf?__blob=publicationFile (zuletzt aufgerufen am 26.05.2014).

Holzhey, M., 2010. Schienennetz 2025/2030. Online verfügbar unter: <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4005.pdf> (zuletzt aufgerufen am 26.05.2014).

ICAO, 2013. Destination Green: 2013 Environmental Report. Online verfügbar unter: http://www.icao.int/publications/journalsreports/2013/6802_en.pdf (zuletzt aufgerufen am 26.05.2014).

Ickert, L., Matthes, U., Rommerskirchen, S., Weynad, E., Schlesinger, M., & Limbers, J., 2007. Abschätzung der langfristigen Entwicklung des Güterverkehrs in Deutschland bis 2050.

IFEU, 2012. Aktualisierung „Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960–2030“ (TREMODO) für die Emissionsberichterstattung 2013 (Berichtsperiode 1990–2011). Online verfügbar unter: [http://www.ifeu.de/verkehrundumwelt/pdf/IFEU\(2012\)_Bericht%20TREMODO%20FKZ%20360%2016%20037_121113.pdf](http://www.ifeu.de/verkehrundumwelt/pdf/IFEU(2012)_Bericht%20TREMODO%20FKZ%20360%2016%20037_121113.pdf) (zuletzt aufgerufen am 08.05.2014).

IPCC, 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. IPCC Working Group I Contribution to AR5.

IPCC, 2014: Summary for Policymakers. IPCC WG III AR 5. Online verfügbar unter: http://www.de-ipcc.de/_media/ipcc_wg3_ar5_summary-for-policymakers_approved.pdf (zuletzt aufgerufen am 08.05.2014).

Kasten, P., Blanck, R., Loreck, C., & Hacker, F., 2013. Strombasierte Kraftstoffe im Vergleich – Stand heute und Langfristsperspektive (No. 1/2013) (pp. 1–35). Online verfügbar unter: <http://www.oeko.de/oekodoc/1826/2013-496-de.pdf> (zuletzt aufgerufen am 08.05.2014).

Knörr, W., Schacht, A. & Gores, S., 2010. Entwicklung eines eigenständigen Modells zur Berechnung des Flugverkehrs (TREMODO-AV).

Knörr, W., Schacht, A. & Gores, S., 2012. Entwicklung eines Modells zur Berechnung der Energieeinsätze und Emissionen des zivilen Flugverkehrs – TREMOD AV.

Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), 2012. Jahresbericht 2012. Online verfügbar unter: http://www.kba.de/cln_031/nn_124834/DE/Presse/Jahresberichte/jahresbericht__2012__pdf.templateId=raw.property=publicationFile.pdf/jahresbericht_2012__pdf.pdf (zuletzt aufgerufen am 08.05.2014).

Kuhnimhof, T., Buehler, R. Wirtz, M. & Kalinowska, D. Travel trends among young adults in Germany: increasing multimodality and declining car use for men, *Journal of Transport Geography* 24 (2012) 443–450.

Laborde, D., 2011. Assessing the Land Use Change Consequences of European Biofuel Policies. Online verfügbar unter: http://trade.ec.europa.eu/doclib/docs/2011/october/tradoc_148289.pdf (zuletzt aufgerufen am 08.05.2014).

Laborde, D. Padella, M., Edwards, R. & Marelli, L., 2014. Progress In Estimates of iLUC with Mirage Model. European Commission Joint Research Center Policy Reports. Online verfügbar unter: http://iet.jrc.ec.europa.eu/bf-ca/sites/bf-ca/files/documents/ifpri-jrc_report.pdf (zuletzt aufgerufen am 08.05.2014).

Lowell, D., Wang, H. & Lutsey, N., 2013. Assessment of the fuel cycle impact of liquefied natural gas as used in international shipping.

Lugschitz, B., Bruckner, M. & Giljum, S., 2011. Europe's global land demand. Online verfügbar unter: http://seri.at/wp-content/uploads/2011/10/Europe_Global_Land_Demand_Oct11.pdf (zuletzt aufgerufen am 08.05.2014).

Majer, S., Stecher, K., Adler, P., Thrän, D. & Müller-Langer, F., 2013. Biomassepotenziale und Nutzungskonkurrenzen: Kurzstudie im Rahmen der Wissenschaftlichen Begleitung, Unterstützung und Beratung des BMVBS in den Bereichen Verkehr und Mobilität mit besonderem Fokus auf Kraftstoffen und Antriebstechnologien sowie Energie und Klima. Online verfügbar unter: http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/UI-MKS/mks-kurzstudie-nutzungskonkurrenzen.pdf?__blob=publicationFile (zuletzt aufgerufen am 08.05.2014).

Makait, M., 2013. Verkehrsverflechtungsprognose 2030. Los 2 – Seeverkehrsprognose – Eckwerte der Hafenumschlagsprognose. Online verfügbar unter: http://www.bmfvw.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/verkehrsverflechtungsprognose-2030-seeverkehr-hafen.pdf?__blob=publicationFile (zuletzt aufgerufen am 08.05.2014).

Malins, C., Searle, S., Baral, A., Turley, D. & Hopwood, L., 2014. Wasted: Europe's Untapped Resource: An Assessment of Advanced Biofuels from Wastes & Residues. Online verfügbar unter: <http://europeanclimate.org/wp-content/uploads/2014/02/WASTED-final.pdf> (zuletzt aufgerufen am 08.05.2014).

Mittelstandsverband Abfallbasierter Kraftstoffe (MvaK), 2014: Präsentation von Herrn Fiedler-Panajotopoulos im Netzwerk Bioenergie der Deutschen Umwelthilfe am 9. April 2014.

Mock, P., 2012. European Vehicle Market Statistics Pocketbook 2012. Online verfügbar unter: http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/Pocketbook_2012_opt.pdf (zuletzt aufgerufen am 08.05.2014).

Mock, P., German, J., Bandivadekar, A., Riemersma, I., 2012: Discrepancies between type approval and "real-world" fuel consumption and CO₂ values: Assessment for 2001-2011 European passenger cars. Online verfügbar unter: http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_EU_fuelconsumption2_workingpaper_2012.pdf (zuletzt aufgerufen am 26.05.2014).

Nitsch, J., Pregger, T., Scholz, Y., Naegler, T., Sterner, M., Gerhardt, N., von Oehsen, A., Pape, C., Saint-Drenan, Y., 2012. „Leitstudie 2011“: Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Schlussbericht. Stuttgart, Kassel, Teltow.

Prognos, 2010. Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung Array, ed., Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. Online verfügbar unter: http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/energieszenarien_2010.pdf (zuletzt aufgerufen am 08.05.2014).

Schönduwe, R., Bock, B. & Deibel, I., 2012. Alles wie immer, nur irgendwie anders? Trends und Thesen zu veränderten Mobilitätsmustern junger Menschen. InnoZ-Baustein 10. Innovationszentrum für Mobilität und gesellschaftlichen Wandel (InnoZ) GmbH.

Schroten, A., 2012. Behavioural Climate Change Mitigation Options. Domain Report Transport.

Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt, 2014: Mobilitätsdaten für Berlin und seine Bezirke – „Mobilität in Städten – SrV 2008“. Online verfügbar unter: http://www.stadtentwicklung.berlin.de/verkehr/politik_planung/zahlen_fakten/mobilitaet/ (zuletzt aufgerufen am 08.05.2014).

Siikavirta, H. et al., 2002. Effects of E-Commerce on Greenhouse Gas Emissions: A Case Study of Grocery Home Delivery in Finland. *Journal of Industrial Ecology*, 6(2), pp.83–97. Online verfügbar unter: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=9319969&lang=pt-br&site=ehost-live>. (zuletzt aufgerufen am 08.05.2014)

Smokers, R., 2012. Support for the revision of regulation on CO₂ emissions from light commercial vehicles.

Streit, D.T. & Weiss, C., 2013. Deutsches Mobilitätspanel (MOP) – Wissenschaftliche Begleitung und Auswertungen Bericht 2012/2013: Alltagsmobilität und Fahrleistungen.

Thießen, F. & Haucke, A., 2013: Die Luftverkehrssteuer – Auswirkungen auf die Entwicklung des Luftverkehrs in Deutschland. Schlussfolgerungen aus den Jahren 2011 und 2012. Technische Universität Chemnitz. Online verfügbar unter: http://foes.de/pdf/2013-11-20_Gutachten_TUChemnitz_Luftverkehrssteuer.pdf (zuletzt aufgerufen am 08.05.2014).

Umweltbundesamt, 2012a. Klimawirksamkeit des Flugverkehrs. Online verfügbar unter: http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/dokumente/klimawirksamkeit_des_flugverkehrs.pdf (zuletzt aufgerufen am 26.05.2014).

Umweltbundesamt, 2012b: Schätzung der Umweltkosten in den Bereichen Energie und Verkehr: Empfehlungen des Umweltbundesamtes. Online verfügbar unter: http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/hgp_umweltkosten.pdf (zuletzt aufgerufen am 26.05.2014)

Umweltbundesamt, 2013. Treibhausgasausstoss in Deutschland 2012, pp.1–4. Online verfügbar unter: http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/hintergrund_treibhausgasausstoss_d_2012_bf.pdf. (zuletzt aufgerufen am 08.05.2014).

UNEP, 2011. Integrated Assessment of Black Carbon and Tropospheric Ozone. Online verfügbar unter: http://www.unep.org/dewa/portals/67/pdf/BlackCarbon_report.pdf. (zuletzt aufgerufen am 08.05.2014).

UNFCCC, 2014. National inventory submissions. Online verfügbar unter: http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/8108.php (zuletzt aufgerufen am 08.05.2014).

WBGU, 2009. Welt im Wandel – Zukunftsfähige Bioenergie und nachhaltige Landnutzung, Berlin: Mercedes. Online verfügbar unter: http://www.wbgu.de/wbgu_jg2008.html (zuletzt aufgerufen am 08.05.2014).

WWF, 2009. Modell Deutschland, Basel/Berlin. Online verfügbar unter: <http://www.wwf.de/themen-projekte/klima-energie/modell-deutschland/klimaschutz-2050> (zuletzt aufgerufen am 08.05.2014).

- 1) Die Verkehrsleistung ist im Güterverkehr das Produkt aus der in einem Jahr insgesamt transportierten Menge (Verkehrsaufkommen, in Tonnen) und der durchschnittlichen Transportweite. Im Personenverkehr ist die Verkehrsleistung das Produkt aus der pro Jahr und Person durchschnittlich zurückgelegten Strecke (Personenmobilität, in km) und der Gesamtanzahl an Personen.
- 2) Siehe <http://www.renewability.de/>.
- 3) Transport Emissions and Policy Scenarios. Für eine Modellbeschreibung siehe z. B. Blanck (2012).
- 4) Die Fahrleistung eines Verkehrsträgers ist definiert als die insgesamt zurückgelegte Strecke in einem Jahr in Kilometern.
- 5) Vgl. z. B. den Vorschlag des BUND (2012) für eine – einkommensunabhängige und nach Entfernung degressiv gestaffelte – Pendlerzulage.
- 6) Zur besseren Übersicht wurden die 10 Hauptgütergruppen der Verkehrsstatistik nach NST/R zu 6 Gruppen zusammengefasst; der Transitverkehr ist separat dargestellt. Datenbasis ist der Durchschnitt der Jahre 2004–2008. Im Jahr 2009 wurde die Gütergruppensystematik in der EU auf die NST 2007 umgestellt. Da es für die neue Gütergruppensystematik jedoch keine langen Zeitreihen gibt und um die Vergleichbarkeit mit anderen Studien zu gewährleisten, sind die Gütergruppen hier nach NST/R dargestellt.
- 7) Zum „motorways of the seas“ Konzept der EU siehe European Commission (2014).
- 8) Die Prozentzahl bezieht sich auf die Treibhausgasemissionen des Verkehrs inklusive des von Deutschland ausgehenden internationalen Luft- und Seeverkehr und unter Berücksichtigung der höheren Klimawirksamkeit des Luftverkehrs. Ohne Berücksichtigung des internationalen Verkehrs sowie des RFI-Faktors liegt der Anteil bei über 50 %.
- 9) Neufahrzeuge mit spezifischen Emissionen unter 50 g CO₂/km können im Jahr 2020 mit Faktor 2, 2021 mit Faktor 1,67 und 2022 mit Faktor 1,33 angerechnet werden.
- 10) Siehe Richtlinie 98/70/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Oktober 1998 über die Qualität von Otto- und Dieselmotoren und zur Änderung der Richtlinie 93/12/EWG des Rates sowie Richtlinie 2009/30/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April zur Änderung der Richtlinie 98/70/EG.
- 11) Weitere 2% sollen flexibel durch die Bereitstellung von Strom für den Verkehrsbereich oder den Einsatz von CCS Technologie erbracht werden. Nochmals weitere 2% durch den Kauf von CDM Zertifikaten.
- 12) Im Kern drehen sich die Vorschläge um die Begrenzung („Cap“) des Beitrags nahrungsmittelpflanzenbasierter Biokraftstoffe zur Erreichung des 10 %-Ziels der EU-RED, die Berücksichtigung von iLUC-Emissionen bei der den Richtlinien zugrunde liegenden Bilanzierung der Treibhausgasemissionen sowie um ein Sub-Ziel und stärkere Anreize für alternative Biokraftstoffe aus Abfall- und Reststoffen oder Algen/Bakterien. Bislang konnten sich jedoch die Mitgliedsstaaten auf keine gemeinsame Position festlegen, da die Höhe des Caps, die wissenschaftliche Fundierung des iLUC-Konzeptes sowie die Höhe einer eventuellen Mehrfachanrechnung für alternative Biokraftstoffe und den Einsatz von Strom aus erneuerbaren Energien umstritten sind.
- 13) Eine indirekte Beanspruchung von Land erfolgt streng genommen auch bei der Nutzung von Reststoffen wie Getreidestroh oder Waldrestholz.
- 14) Nach EU-Abfallrahmenrichtlinie umfassen die Bio- und Grünabfälle „biologisch abbaubare Garten- und Parkabfälle, Nahrungs- und Küchenabfälle aus Haushalten, aus dem Gaststätten- und Cateringgewerbe und aus dem Einzelhandel sowie vergleichbare Abfälle aus Nahrungsmittelverarbeitungsbetrieben“ (FNR, 2013b).
- 15) Unterstellt wurde dabei jeweils der aus heutiger Sicht sinnvollste Konversionspfad.
- 16) Aus dem Europäischen Abfallverzeichnis 200125 und 19080917.
- 17) Hierbei sind nur die direkten Emissionen berücksichtigt, d. h., die Emissionen von Strom werden mit null bilanziert.
- 18) Für die Erzeugung stromgenerierter Gas- und Flüssigkraftstoffe ist hier überschlagsmäßig ein durchschnittlicher Wirkungsgrad von 45 % angenommen.
- 19) Hierzu zählen kreisfreie Städte und Oberzentren mit mehr als 100.000 Einwohnern (Follmer et al. 2008).
- 20) Die hier genannten Grenzwerte orientieren sich am aktuell gültigen NEFZ-Fahrzyklus der EU zur Messung der CO₂-Emissionen eines Neufahrzeugs. Die realen Fahrzeugemissionen weichen im Schnitt um über 20 % vom NEFZ-Wert ab (Mock et al. 2013).

**100%
RECYCLED**



WWF Deutschland

Reinhardtstraße 18
10117 Berlin
Tel. 030 311 777-0

**Bund für Umwelt und
Naturschutz Deutschland e.V.
(BUND)**

Bundesgeschäftsstelle
Am Köllnischen Park 1
10179 Berlin
Tel. 030 275 86-40

Germanwatch e.V.

Dr. Werner-Schuster-Haus
Kaiserstraße 201
53113 Bonn
Tel. 0228 604 92-0

**Naturschutzbund Deutschland e.V.
(NABU)**

Charitéstraße 3
10117 Berlin
Tel. 030 284 984-0

**Verkehrsclub Deutschland e.V.
(VCD)**

Bundesverband
Wallstraße 58
10179 Berlin
Tel. 030 280 351-0