

Langfassung

# Verkehrswende für Deutschland

Der Weg zu CO<sub>2</sub>-freier Mobilität bis 2035



# Verkehrswende für Deutschland

Der Weg zu CO<sub>2</sub>-freier Mobilität bis 2035

**Autoren: Frederic Rudolph, Thorsten Koska und Clemens Schneider**

**Erstellt im Auftrag von Greenpeace durch:**



Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH  
Döppersberg 19, 42103 Wuppertal  
Tel.: +49 202 2492-0, Fax: +49 202 2492-108  
info@wupperinst.org, www.wupperinst.org

➔ **Greenpeace ist international, überparteilich und völlig unabhängig von Politik, Parteien und Industrie. Mit gewaltfreien Aktionen kämpft Greenpeace für den Schutz der Lebensgrundlagen. Rund 580.000 Fördermitglieder in Deutschland spenden an Greenpeace und gewährleisten damit unsere tägliche Arbeit zum Schutz der Umwelt.**

# VERKEHRSWENDE FÜR DEUTSCHLAND DER WEG ZU CO<sub>2</sub>-FREIER MOBILITÄT BIS 2035

Vorwort

## Verkehrssektor in der Sackgasse

Steigende CO<sub>2</sub>-Emissionen, Tausende vorzeitige Tote durch Luftverschmutzung, ein weiter schwelender Dieselskandal - das sind nur einige der Baustellen in der deutschen Verkehrspolitik. Doch in der letzten Legislaturperiode hat sich nichts bewegt. Vielmehr wurde deutlich, dass nicht nur die Umwelt und die Menschen unter den Auswirkungen des Verkehrssystems leiden, sondern dass die Autobauer selbst zu Sorgenkindern geworden sind, weil sie den Mobilitätswandel so drastisch verschlafen haben..

Der deutsche Mobilitätssektor ist inzwischen die Schmutzecke des Klimaschutzes. Fast 18 Prozent der deutschen Treibhausgasemissionen stammen laut Umweltbundesamt aus dem Verkehrssektor. Tendenz steigend. Dabei müssten die Emissionen dringend sinken. Gelingt es der Bundesrepublik nicht, die Emissionen zügig zu senken, wird Deutschland seinen Beitrag zum Pariser Klimaschutzabkommen und damit die Bemühung die Erderhitzung möglichst auf 1,5 Grad Celsius zu begrenzen, nicht erreichen.

Gleichzeitig herrscht dicke Luft in Deutschlands Städten: Die Luftqualität ist vielerorts mittlerweile so schlecht, dass die EU-weit festgelegten Emissionsgrenzwerte beispielsweise bei Stickstoffdioxid deutlich überschritten werden. Die erhöhten Werte verursachen ernste Gesundheitsprobleme. Laut Europäischer Umweltagentur führt Stickstoffdioxid deutschlandweit jährlich zu mehr als 10.000 vorzeitigen Todesfällen. 64 Prozent der Stickstoffdioxid-Emissionen in Innenstädten stammen laut Umweltbundesamt aus dem Verkehr - der größte Teil davon von Diesel-Pkw.

Zudem wird immer deutlicher, dass sich die deutsche Autoindustrie auf einen gefährlichen Kurs der Ignoranz begeben hat. Statt in Elektromobilität und neue Mobilitätskonzepte zu investieren, hat sie sich auf Gedeih und Verderb an den Dieselmotor geklammert. Dabei ist längst klar, dass das Ende des Verbrennungsmotors vor der Tür steht. Nur wenn die Autoindustrie aus dieser technologischen Sackgasse herausfindet, wird sie auch in Zukunft am Weltmarkt bestehen und die zahlreichen Arbeitsplätze sichern.

## Vorrang für Verkehrswende

Der Schlüssel zu Klima- und Gesundheitsschutz sowie insgesamt einer Erhöhung der Lebensqualität liegt in einer neuen Ausrichtung der Mobilität. Nur so können wir die Verkehrssicherheit erhöhen, Staus vermeiden, Lärm reduzieren und den Stadtraum besser nutzen: **Deutschland braucht eine grundlegende Verkehrswende - und das so schnell wie möglich.**

Wie diese aussehen sollte, zeigt das vorliegende Szenario, das das Wuppertal Institut im

Auftrag von Greenpeace entwickelt hat. Es zeigt erstmals auf, wie der Verkehrssektor bis 2035 CO<sub>2</sub>-frei werden und damit zur Erreichung des im Pariser Klimaschutzabkommen vereinbarten 1,5-Grad-Ziels beitragen kann.

Das bedeutet vor allem auch, dass die Tage des Verbrennungsmotors gezählt sind. Damit wir im Jahr 2035 CO<sub>2</sub>-frei von A nach B kommen, darf es schon ab 2025 keine Neuzulassungen für Autos mit Verbrennungsmotor mehr geben. Eine bloße Umstellung auf Autos mit Elektroantrieb reicht allerdings nicht aus. Wir müssen dort, wo es möglich ist, Personen- und Güterverkehr reduzieren und auf effizientere Verkehrsmittel wie Bus, Bahn und Fahrrad umsteigen.

Emissionsfreier Verkehr im Jahr 2035 kann dann unter anderem so aussehen:

- Radverkehr, ÖPNV und Sharing-Angebote sowie Bus und Bahn im Fernverkehr sind so attraktiv und gut ausgebaut, dass Menschen umsteigen - vom eigenen Auto auf Fahrrad, Bus, Bahn & Co.
- Jene Autos, die etwa in ländlichen Gegenden nicht durch oben genannte Mobilitätsangebote ersetzt werden können, sind elektrisch unterwegs und werden ausschließlich durch Strom aus Erneuerbaren Energien betrieben.
- Der Transport von Gütern wird in großen Teilen auf die Schiene verlagert. Auf der Straße sorgen Oberleitungen für den elektrischen Antrieb von Lastkraftwagen. Wo dies nicht möglich ist, werden synthetische Kraftstoffe aus erneuerbarem Strom eingesetzt.

### **Wie kann Deutschlands Verkehrswende gelingen?**

Der klimafreundliche Umbau des Verkehrssystems ist ohne Frage eine große Herausforderung. Das Szenario des Wuppertal Instituts zeigt aber, dass es zu schaffen ist und die Menschen ohne Abstriche weiter mobil sein können. Um diese Herausforderung erfolgreich anzugehen, braucht es jetzt entschlossenes Handeln der Politik.

Deshalb fordert Greenpeace:

- **Den Ausstieg aus dem Verbrennungsmotor einleiten**  
Damit ab 2025 Neuwagen elektrisch angetrieben sind, muss die Politik heute den Ausstieg aus dem Verbrennungsmotor einleiten. Nur so bekommen die Hersteller Planungssicherheit und konzentrieren ihr Innovationspotential auf die Entwicklung CO<sub>2</sub>-freier Antriebe. Falsche Rücksicht auf die Autoindustrie würde Deutschland neben Klima- und Gesundheitsproblemen auch ein großes wirtschaftliches Problem bescheren: wichtige Exportmärkte wie beispielsweise China haben sich schon für eine elektrische Zukunft entschieden. Ein passendes Angebot haben die deutschen Hersteller bisher allerdings nicht.

- **Klimaschädliche Subventionen abbauen und Anreize für nachhaltige Mobilität setzen**

Das Steuerprivileg für den Diesel muss ebenso wie die Steuerbefreiung für Kerosin abgebaut werden. Auch das Dienstwagenprivileg und die Pendlerpauschale verhindern bisher die Entwicklung nachhaltiger Mobilität. Stattdessen braucht es eine Zulassungssteuer ähnlich der in Dänemark, sowie eine entfernungsabhängige Pkw-Maut. Es müssen Anreize fürs Umsteigen auf Bus, Bahn, Fahrrad & Co. geschaffen werden.

- **Energiewende beschleunigen**

Die Verkehrswende kann nur dann ihre volle Klimaschutzwirkung entfalten, wenn auch der Strom für den Verkehrssektor zu 100 Prozent aus Erneuerbaren Energien stammt. Dazu muss die Energiewende und der Ausbau Erneuerbarer Energien in Deutschland beschleunigt werden.

- **Investitionsprogramm für nachhaltige Mobilität auflegen**

Wir brauchen ein Investitionsprogramm für nachhaltige Mobilität, um den Mobilitätswandel in Städten voranzutreiben und dafür Radverkehr- und ÖPNV-Strukturen zu verbessern und deutlich auszubauen. Außerdem braucht es Investitionen in den Ausbau des Schienennetzes.

Dr. Benjamin Stephan  
Greenpeace e.V.  
Hamburg im August 2017

## Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>3</b>
<b>Verzeichnis der Abkürzungen</b>	<b>5</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>6</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>7</b>
<b>1 Kurzfassung</b>	<b>9</b>
<b>2 Einleitung</b>	<b>13</b>
<b>3 Die Größe der Herausforderung - Klimaschutz und Verkehr</b>	<b>14</b>
<b>4 Methodik des Szenarios: Transitionspfade für Mobilität und Verkehr</b>	<b>17</b>
<b>5 Verkehrssparsame Raumstrukturen</b>	<b>21</b>
5.1 Ausgangslage und Entwicklungstrends	21
5.2 Zielzustand 2035	23
5.3 Maßnahmen und Instrumente	24
5.4 Wirkungsumfang der Maßnahmen und Instrumente	25
<b>6 Digitalisierung, Vernetzung und Sharing</b>	<b>27</b>
6.1 Ausgangslage und Entwicklungstrends	27
6.2 Zielzustand 2035	30
6.3 Maßnahmen und Instrumente	31
6.4 Wirkungsumfang der Maßnahmen und Instrumente	32
<b>7 Stärkung des Umweltverbunds</b>	<b>33</b>
7.1 Ausgangslage und Entwicklungstrends	33
7.2 Zielzustand 2035	36
7.3 Maßnahmen und Instrumente	37
7.4 Wirkungsumfang der Maßnahmen und Instrumente	39
<b>8 Steuerung des motorisierten Individualverkehrs</b>	<b>40</b>
8.1 Ausgangslage und Entwicklungstrends	40
8.2 Zielzustand 2035	41
8.3 Maßnahmen und Instrumente	41
8.4 Wirkungsumfang der Maßnahmen und Instrumente	43
<b>9 Weiterentwicklung von Fahrzeugeffizienz, Antrieben und Kraftstoffen</b>	<b>44</b>
9.1 Ausgangslage und Entwicklungstrends	44
9.2 Zielzustand 2035	46
9.3 Maßnahmen und Instrumente	49
9.4 Wirkungsumfang der Maßnahmen und Instrumente	50
<b>10 Dekarbonisierung des Güterverkehrs</b>	<b>54</b>
10.1 Ausgangslage und Entwicklungstrends	54
10.2 Zielzustand 2035	55
10.3 Maßnahmen und Instrumente	56
10.4 Wirkungsumfang der Maßnahmen und Instrumente	57
<b>11 Weitere Handlungsfelder zur Dekarbonisierung</b>	<b>59</b>
11.1 Notwendige Rahmenbedingungen	59
11.2 Fernreisen und Flugverkehr	60
<b>12 Szenarioergebnisse</b>	<b>63</b>
12.1 Energiebedarf	63

---

12.2	Merkmale des Personenverkehrs	65
12.3	Merkmale des Güterverkehrs	70
12.4	Weitere Umwelteffekte	70
12.5	Soziale Effekte	73
12.6	Einnahmen und Ausgaben: Finanzielle Vorteile der Transformation	74
<b>13</b>	<b>Resümee</b>	<b>77</b>
<b>14</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>80</b>

## Verzeichnis der Abkürzungen

ADAC	Allgemeiner deutscher Automobilclub
AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen
BauGB	Baugesetzbuch
BBSR	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
BCS	Bundesverband Carsharing
BEV	Batterieelektrisches Fahrzeug (Battery Electric Vehicle)
BiB	Bundesinstitut für Bevölkerungsforschung
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BNatschG	Bundesnaturschutzgesetz
BVWP	Bundesverkehrswegeplan
CNG	Compressed Natural Gas (Erdgas)
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
COP21	Conference of the Parties 21
DFS	Deutsche Flugsicherung
DIW	Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung
DLR	Deutsches Luft- und Raumfahrtinstitut
EEA	European Environment Agency
EU	Europäische Union
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
Fzkm	Fahrzeugkilometer
H <sub>2</sub> -BZ	Wasserstoff-Brennstoffzelle
ICAO	International Civil Aviation Organisation
IEA	International Energy Agency
ifmo	Institut für Mobilitätsforschung
infas	Institut für angewandte Sozialwissenschaft
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KBA	Kraffahrtbundesamt
Kfz	Kraffahrzeug
km	Kilometer
km/h	Stundenkilometer
Lkw	Lastkraftwagen
MiD	Mobilität in Deutschland
Mio.	Million
MIV	Motorisierter Individualverkehr
Mrd.	Milliarde
NDC	Nationally Determined Contribution
NDC	National Determined Contributions
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
ÖPFV	Öffentlicher Personenfernverkehr
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
ÖPV	Öffentlicher Personenverkehr
PbefG	Personenbeförderungsgesetz
PJ	Petajoule
Pkm	Personenkilometer
Pkw	Personenkraftwagen
PtL	Power-to-Liquid
RIN	Richtlinie für integrierte Netzgestaltung
SRU	Sachverständigenrat für Umweltfragen
SUV	Sports Utility Vehicle
Tab.	Tabelle
TCO	Total Cost of Ownership
THG	Treibhausgas
tkm	Tonnenkilometer
TTW	tank-to-wheel
TWh	Terrawattstunde
UBA	Umweltbundesamt
WI	Wuppertal Institut

## Tabellenverzeichnis

Tab. 6-1	Gründe für Pkw-Verzicht bei Carsharing. Quelle: BMUB 2016b, 162 -----	28
Tab. 7-1	Entwicklung des ÖPNV-Anteils in ausgesuchten Städten. Quelle: eigene Zusammenstellung -----	34
Tab. 7-2	Entwicklung des Fahrradanteils in ausgesuchten Städten. Quelle: eigene Zusammenstellung -----	35
Tab. 9-1	Veränderung der Pkw-Größe. Quelle: eigenes Dekarbonisierungsszenario 2035 -----	50
Tab. 9-2	Anteile Pkw-Bestand, spezifische Fahraufwände 2035. Quelle: eigenes Dekarbonisierungsszenario 2035 -----	52
Tab. 10-1	Güterverkehrsaufwände nach Verkehrsträgern 2035. Quelle: eigenes Dekarbonisierungsszenario 2035 -----	57
Tab. 10-2	Fahraufwand, Fahranteile und spez. Energieverbrauch nach Fahrzeugtypen im Güterverkehr 2035. Quelle: eigenes Dekarbonisierungsszenario 2035 -----	58
Tab. 11-1	CO <sub>2</sub> -Emissionen im Flugverkehr und Anzahl Flüge. Quelle: IEA 2016 <sup>1</sup> , Website statista <sup>2</sup> , DFS 2016 <sup>3</sup> -----	60
Tab. 12-1	Strombedarf und Verkehrsaufwände 2035. Quelle: eigenes Dekarbonisierungsszenario 2035 -----	63
Tab. 12-2	Anzahl Privatwagen pro 1.000 Personen in 2035. Quelle: eigenes Dekarbonisierungsszenario 2035 -----	65
Tab. 12-3	Verkehrsmittelanteile (Verkehrsaufwand) 2035. Quelle: eigenes Dekarbonisierungsszenario 2035 -----	66
Tab. 12-4	Verkehrsmittelanteile (Verkehrsaufkommen) 2035. Quelle: eigenes Dekarbonisierungsszenario 2035 -----	66
Tab. 12-5	Siedlungs- und Verkehrsfläche in Deutschland 2015 und 2035. Quelle: Statistisches Bundesamt 2016c für 2015, eigene Annahmen für 2035 -----	73
Tab. 12-6	Erreichbarkeiten durch öffentliche Verkehrsmittel in Deutschland. Quelle: eigene Berechnungen auf Basis von Wehmeier und Koch 2010 -----	74
Tab. 12-7	Vergleich Verkehrsverflechtungsprognose 2030 mit Dekarbonisierungsszenario 2035. Quelle: Schubert et al. 2014, eigenes Dekarbonisierungsszenario 2035 -----	75

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1	Modal Split im Jahr 2035. Quelle: eigenes Dekarbonisierungsszenario 2035 -----	10
Abb. 3-1	Verlauf EU Treibhausgasemissionen bei Reduktion um 80% bis 2050 (100% =1990). Quelle: Europäische Kommission 2011 -----	15
Abb. 4-1	Methodische Vorgehensweise. Quelle: eigene Darstellung-----	19
Abb. 5-1	Regelkreis Flächennutzung - Verkehr. Quelle: Wegener 2009, 79 -----	21
Abb. 7-1	Modal Split in Deutschland 2008. Quelle: infas/DLR 2010-----	33
Abb. 9-1	Bestandsentwicklung Pkw in Deutschland. Quelle: Website KBA, eigene Zusammenstellung -----	44
Abb. 9-2	Spezifische CO <sub>2</sub> -Emissionen (g/Pkm) in Deutschland 2014. Quelle: Website UBA -----	45
Abb. 9-3	Strombedarf aus erneuerbaren Energien für verschiedene Antriebs- und Kraftstoffkombinationen (pro 100km). Quelle: Agora Verkehrswende 2017 auf Basis von DLR/ ifeu/ LBST/ DFZ 2015 -----	48
Abb. 9-4	Energieeffizienz der Pkw 2035. Quelle: eigenes Dekarbonisierungsszenario 2035; DLR 2010, DIW 2016 -----	51
Abb. 11-1	Entwicklung von CO <sub>2</sub> -Emissionen im Sektor Verkehr weltweit. Quelle: IEA 2016 -----	61
Abb. 12-1	Endenergiebedarf landgebundener Personenverkehr (Verkehrsträger, Inlandsabsatz). Quelle: DIW 2016, eigenes Dekarbonisierungsszenario 2035-----	64
Abb. 12-2	Endenergiebedarf landgebundener Personenverkehr (Kraftstoffe, Inländerfahraufwand). Quelle: DIW 2016, eigenes Dekarbonisierungsszenario 2035 -----	65
Abb. 12-3	Vergleich von Personenverkehrsaufwänden verschiedener Studien. Quelle: eigene Zusammenstellung -----	67
Abb. 12-4	Endenergiebedarf des Personenverkehrs (ohne Flugverkehr) im Szenarienvergleich. Quelle: eigene Zusammenstellung -----	68
Abb. 12-5	Strombedarf und -deckung verschiedener Szenariostudien im Vergleich. Quelle: eigene Zusammenstellung -----	69
Abb. 12-6	Vergleich von Güterverkehrsaufwänden verschiedener Studien. Quelle: eigene Zusammenstellung -----	70
Abb. 12-7	Flächenverbrauch in Deutschland. Grafik: UBA; Daten: Statistisches Bundesamt 2016c -----	72

## **Liebe Leserinnen und Leser!**

Die vorliegende Studie zeigt in einem ambitionierten Mobilitätsszenario, wie das Ziel des Pariser Klimaabkommens erreicht werden kann, die Erderwärmung auf 1,5 Grad zu begrenzen. Denn sie beschreibt, wie sich die Treibhausgasemissionen des Verkehrs in Deutschland innerhalb von kurzer Zeit auf null senken lassen. Dazu haben wir für alle relevanten Handlungsfelder Herausforderungen beschrieben, Zukunftsbilder entworfen und konkrete Maßnahmen dargestellt, in denen die Politik, Wirtschaft und die Bürgerinnen und Bürger gemeinsam und beherzt tätig werden. Über eine Modellierung werden die Gesamtwirkungen der Maßnahmen quantitativ abgeschätzt.

Die Studie verdeutlicht, dass eine umfassende Wende in vielen Bereichen von Mobilität und Verkehr nötig ist, um die politischen Klimaschutzziele zu erreichen. Eine Elektrifizierung der Antriebssysteme alleine reicht dazu nicht aus. Zusätzlich muss der Verkehrsaufwand sinken, die Pkw-Nutzung signifikant zurückgehen und die Fahrzeuggröße reduziert werden. Dieser Ansatz ist nicht alternativlos, aber das Szenario zeigt deutlich, welche umfassenden Veränderungen notwendig sind, um die derzeit „eingefahrenen“ Routinen abzulegen.

Der Zeitrahmen ist ambitioniert, weil in der Vergangenheit mögliche Weichenstellungen verzögert wurden. Dennoch ist es weiterhin möglich, über eine umfassende Transformation von Mobilität und Verkehr zum Ziel beizutragen, die Erderwärmung auf 1,5 Grad Celsius zu begrenzen. Mehr noch: Unser Verkehr kann zukunftsfähig gestaltet werden, was unsere Städte und Landkreise sicherer, sauberer und lebenswerter macht. Dafür sind innovative Konzepte und eine ganzheitliche Betrachtung der Mobilitätswende unumgänglich – immer auch mit Blick auf die Zusammenhänge hinsichtlich der Energiewende und der Kreislaufwirtschaft. Dazu möchten wir mit unserer Studie einen Beitrag leisten.

Dr. Frederic Rudolph, Thorsten Koska, Clemens Schneider

August 2017

## 1 Kurzfassung

Die Herausforderungen des Klimaschutzes und der nachhaltigen Entwicklung machen eine umfassende Verkehrswende hin zu einer klimaneutralen Mobilität in Deutschland notwendig. In einem Dekarbonisierungsszenario für das Jahr 2035 zeigt das Wuppertal Institut, wie die Treibhausgasemissionen des Verkehrs in Deutschland von 166 Mio. t im Jahr 2016 bis 2035 auf Null gesenkt werden können. Das Dekarbonisierungsszenario folgt dabei der Prämisse, einen adäquaten Beitrag zu leisten, die maximale Erderwärmung möglichst auf 1,5°C zu begrenzen. Die Umsetzung dieser von der Staatengemeinschaft auf dem Klimaschutzgipfel in Paris 2015 vorgegebenen Zielmarke erfordert eine rasche und konsequente Reduktion der Treibhausgasemissionen in allen Sektoren und auf nationaler wie globaler Ebene.

Unter der Maßgabe, ambitionierte Klimaschutzziele zu erreichen und zugleich einen Beitrag zur deutschen Nachhaltigkeitsstrategie zu leisten, reichen inkrementelle Veränderungen nicht aus. Gefordert sind in allen Sektoren ein umfassender Paradigmenwechsel und mutige strukturelle Veränderungen. Die aktuelle Fokussierung der Energiewende in Deutschland auf eine reine Stromwende greift dabei deutlich zu kurz. Allein durch eine Elektrifizierung des motorisierten Verkehrs und der Wärmebereitstellung können die angestrebten Ziele nicht erreicht werden.

Im Verkehrsbereich ist eine umfassende Mobilitätswende notwendig, durch die der Verkehrsaufwand soweit wie möglich reduziert wird und eine Verlagerung auf klimafreundliche Verkehrsmittel erfolgt.<sup>1</sup> Die Transformation des Mobilitätssektors kann dabei so gestaltet werden, dass sie nicht nur den Zugang zu Mobilität sichert, sondern auch positive Beiträge zu anderen Politikzielen leistet wie die Verbesserung der Luftqualität in den Städten, die Reduzierung des Flächenverbrauchs, die Stauvermeidung und die Verkehrssicherheit.

Zentrale Elemente des Szenarios zur Dekarbonisierung von Mobilität und Verkehr in Deutschland („Dekarbonisierungsszenario 2035“) sind eine systematische Senkung des Personenverkehrsaufwands von 1.172 Mrd. Personenkilometern im Jahr 2008 auf 894 Mrd. Pkm in 2035 und eine Wachstumsreduktion des Güterverkehrsaufwands auf 711 Mrd. Tonnenkilometer in 2035 (631 tkm in 2015). Um dies zu erreichen, sind innovative Strategien im Bereich der Verkehrsvermeidung notwendig. Dabei sollen die gleichen Mobilitätsbedürfnisse mit weniger Verkehrsaufwand erfüllt werden. Das Dekarbonisierungsszenario 2035 senkt die Abhängigkeit von einem eigenen Auto und die mittleren Fahraufwände der Pkw in der verbleibenden Flotte. Im Jahr 2035 liegt die Pkw-Verfügbarkeit im Dekarbonisierungsszenario bei 200 privaten Pkw pro 1.000 Einwohnerinnen und Einwohnern, der mittlere Fahraufwand eines Pkw liegt bei 13.900 km.

Zweitens findet im Vergleich zum heutigen Niveau eine deutliche Verkehrsverlagerung weg vom Auto und hin zum Umweltverbund<sup>2</sup> statt, sowohl in Bezug auf die Anzahl aller zurückgelegten Wege (Verkehrsaufkommen), als auch in Bezug auf die zu-

---

<sup>1</sup> Verkehrsaufwand wird in Personenkilometern (Personenverkehr) und Tonnenkilometern (Güterverkehr) gemessen. Er wird häufig auch als „Verkehrsleistung“ bezeichnet.

<sup>2</sup> Umweltverbund bezeichnet die Gruppe der „umweltverträglichen“ Verkehrsmittel als Alternative zum Privatwagen. Er besteht aus nicht-motorisierten Verkehrsmitteln, öffentlichen Verkehrsmitteln (Bahn, Bus und Taxis), sowie Sharing Mobility.

rückgelegten Distanzen in Personenkilometern (Verkehrsaufwand). Abbildung 1.1 verdeutlicht den Modal Split im Personenverkehr: Im Jahr 2035 wird das Auto nur noch für 34% aller Wege verwendet, gegenüber 58% in 2008. In Bezug auf die gefahrenen Distanzen hat das Auto noch einen Anteil von 52%, gegenüber 79% im Jahr 2008.

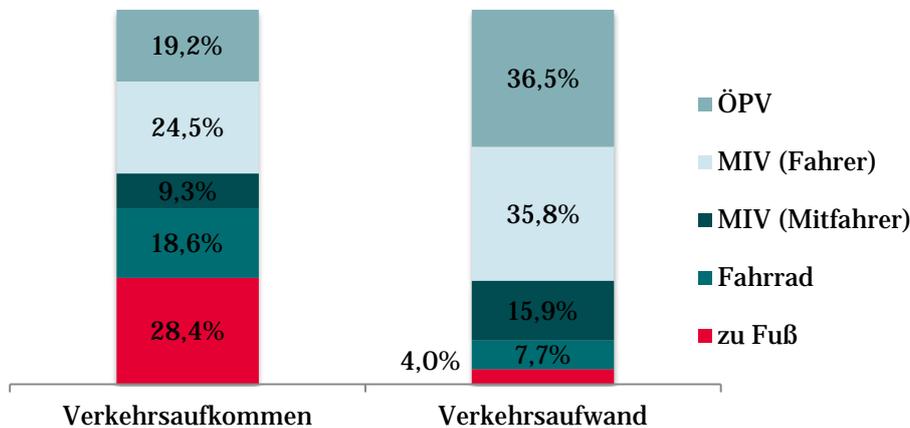


Abb. 1-1 Modal Split im Jahr 2035. Quelle: eigenes Dekarbonisierungsszenario 2035

Im Dekarbonisierungsszenario 2035 sind zudem Maßnahmen vorgesehen, die den Verkehrsaufwand im Straßengüterverkehr deutlich von 459 tkm im Jahr 2015 auf 388 tkm im Jahr 2035 reduzieren und auf die Verkehrsträger Schiene und Binnenschiff verlagern. Bei diesen findet nahezu eine Verdopplung des Aufwands von 172 tkm in 2015 auf 332 tkm in 2035 statt.

Drittens werden für die verbleibenden Verkehrsaufwände im motorisierten Individualverkehr (MIV) und im Straßengüterverkehr Effizienzsteigerungen und Kraftstoffwechsel notwendig. Der Personenverkehr lässt sich weitgehend elektrifizieren, da sein Endenergiebedarf und damit die benötigte Menge erneuerbaren Stroms begrenzt sind. Insbesondere im Güterverkehr ist die Strategie der Elektrifizierung der Antriebssysteme durch eine Power-to-Liquid Strategie zu ergänzen.

Die Zielerreichung erfordert somit im nächsten Jahrzehnt die konsequente Umsetzung einer Vielzahl ambitionierter Maßnahmen. Hierzu bedarf es der Etablierung adäquater Politikinstrumente in verschiedenen Handlungsfeldern:

#### Verkehrssparsame Raumstrukturen

Die Orientierung auf das Konzept der Stadt der kurzen Wege führt zu einer verdichteten und nutzungsgemischten Stadtentwicklung, in der Innenentwicklung und Nachverdichtung Vorrang vor Außenentwicklung erhalten. Der Anteil der Menschen, die in Städten leben, steigt. Im ländlichen Raum werden nicht genutzte Flächen rückgebaut, um eine kompakte Raumstruktur zu erreichen.

#### Digitalisierung, Vernetzung und Sharing

Neue Mobilitätsdienstleistungen und Sharing-Dienste, die Vernetzung von Verkehrsangeboten und die Automatisierung von Fahrzeugen unterstützen eine multimodale Mobilität: Um individuell unterwegs zu sein, braucht der mobile Mensch nicht mehr das eigene Auto, sondern ist mit aufeinander abgestimmten Car- und Ri-

desharing-Systemen, Fahrradverleih und der Integration dieser Dienste in den öffentlichen Verkehr schnell und komfortabel unterwegs. Die Förderung der Sharing-Angebote ermöglicht ein dichtes Angebot dieser Dienste auch außerhalb der Kernstädte.

### **Stärkung des Umweltverbundes**

Der Umweltverbund wird gestärkt, um ein attraktives Verkehrsangebot bieten zu können – auch außerhalb der Ballungszentren. Dazu gehören unter anderem Investitionen in die Schiene, etwa die Reaktivierung von Überholgleisen und Weichen und die Anbindung weiterer Städte an das Netz. Der öffentliche Nahverkehr wird attraktiver, der Fahrplankontakt wird erhöht und die Bedienzeiten ausgeweitet. Neue Mobilitätsdienstleistungen werden mit dem öffentlichen Verkehr integriert. Ein umfangreiches Netz aus Radwegen ermöglicht inner- und außerorts sicheres, schnelles und weites Fahren mit dem Rad oder Pedelec auf Berufs- und Freizeitwegen.

### **Steuerung des motorisierten Individualverkehrs**

Die Analyse der Daten und der Literatur zeigt, dass die Erreichung ambitionierter Ziele nur mit Restriktionen im MIV ermöglicht werden kann. Dieser wird teurer - realisierbar über Zulassungs- und Umlaufsteuern auf Basis des Energieverbrauchs von Pkw sowie eine distanzbasierte und relationsabhängige Pkw-Maut. Wege, auf denen keine sinnvolle Alternative mit dem öffentlichen Personenverkehr (ÖPV) besteht, bleiben auch mit dem Auto erschwinglich, während im mit dem öffentlichen Verkehr gut erschlossenen Raum höhere Mautsätze anfallen. Der Parkraum insbesondere in Städten wird reduziert, wodurch mehr Platz für einen attraktiven öffentlichen Raum entsteht. Die Abschaffung des Dienstwagenprivilegs schafft neue Steuerungsimpulse: Sie führt zu einer Verkleinerung der derzeit oftmals große Dienstfahrzeuge. Außerdem kann die Abschaffung umweltschädlicher Subventionen in einer Übergangsphase zur Unterstützung der Investitionen in die Schiene dienen.

### **Dekarbonisierung des Güterverkehrs**

Im Güterverkehr sind Investitionen in den Schienenverkehr nötig, also Ausbau, Lückenschlüsse, Gleisanschlüsse und neue multimodale Terminals für den kombinierten Verkehr. Die Infrastruktur wird zudem technologisch aufgerüstet, um den Schienengüterverkehr zu beschleunigen. Außerdem findet eine Elektrifizierung des Autobahnnetzes über Oberleitungen statt. Der Bundesverkehrswegeplan kann hier nötige Mittel zur Verfügung stellen. Eine Verringerung des Verkehrsaufwands ist über eine deutliche Verteuerung des Straßengüterverkehrs realisierbar. Bei geringerem Fahraufwand sowohl im Personen- als auch im Güterstraßenfernverkehr entfällt die Notwendigkeit in weitere Investitionen für den Aus- und Neubau von Bundesfernstraßen.

Mit den vorgeschlagenen Maßnahmen sind zweifelsohne große industriepolitische Herausforderungen für den Automobilstandort Deutschland verbunden, die strukturpolitisch zu flankieren sind. Es ergeben sich durch die hierdurch ausgelöste Innovationsdynamik aber auch erhebliche neue technologische Chancen für die zentrale Mitgestaltung der sich global verändernden Mobilitätssysteme.

Im Jahr 2035...

...sind die Raumstrukturen stärker verdichtet und die Wege kürzer. Der Flächenverbrauch wurde gestoppt.

...liegt die Motorisierung im bundesweiten Durchschnitt bei 200 Pkw pro 1.000 Einwohnerinnen und Einwohnern. Bezogen auf die Städte entspricht dies einem Motorisierungsgrad von im Mittel 154 zugelassenen Pkw.

...haben sich der Modal Split des öffentlichen Verkehrs und des Fahrrads auf jeweils 19% der Wege verdoppelt, während der Anteil des MIV bei 33% liegt.

...ist Sharing Mobility in Städten und verdichteten Räumen allgegenwärtig und wird auch im ländlichen Raum zunehmend genutzt.

...hat sich die Flotte privater Pkw auf 43% reduziert und besteht zu 98% aus Elektrofahrzeugen.

...werden 46% des Güterverkehrs auf Schiene und Wasserstraße abgewickelt; 80% des Güterfernverkehrs auf der Straße ist über Oberleitungen elektrifiziert. Für die restlichen Wege kommen Lkw zum Einsatz, die klimaverträgliche synthetische Kraftstoffe nutzen.

...ist die Lebensqualität der Städte höher. Stau, Lärm und Unfälle sind deutlich reduziert.

...wurden Inlandsflüge durch schnelle Bahnverbindungen ersetzt.

## 2 Einleitung

Um die globale Erwärmung auf ein Niveau zu begrenzen, das als wahrscheinlich noch beherrschbar und adaptierbar gilt, müssen die Treibhausgasemissionen in Deutschland und weltweit stark reduziert werden. In Deutschland ist die Aufgabe zu Treibhausgas-Reduktionen spätestens seit den ersten Beschlüssen der Bundesregierung im Jahr 1990 auf der politischen Agenda. Im Jahr 2007 hat sich die Bundesregierung mit ihrem „Integrierten Energie- und Klimaprogramm“ national zu einer 40-prozentigen Minderung der deutschen Treibhausgasemissionen bis 2020 gegenüber 1990 verpflichtet.

Im Jahr 1990 wurden in Deutschland 1.251 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalente emittiert, davon 13,1% bzw. 164 Mio. t im Sektor Verkehr. Während die Treibhausgasemissionen in Deutschland bis 2015 insgesamt um 28% sanken, stagnierten sie im Verkehr und lagen 2015 bei 161 Mio. t, was einem Anteil von 17,8% entspricht. Zwischen 2015 und 2016 stiegen die Emissionen im Verkehrssektor sogar um 5,4 Mio. t.<sup>3</sup> Die tendenzielle Stagnation seit 1990 basiert auf zwei grundsätzlichen Entwicklungen der Vergangenheit: Während die spezifischen Emissionen der Fahrzeuge allmählich sinken, erhöhen sich weiterhin die zurückgelegten Distanzen, insbesondere das Güterverkehrsaufkommen steigt.

Ziel der Studie ist es darzustellen, wie in einem hochmotorisierten Land, in dem die im Jahr 2016 neu zugelassenen Pkw zu 98% ausschließlich mit Verbrennungsmotoren ausgestattet waren, die Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors bis 2035 auf Null reduziert werden können.<sup>4</sup> Dazu hat das Wuppertal Institut ein Szenario zur Dekarbonisierung von Mobilität und Verkehr in Deutschland bis zum Jahr 2035 entwickelt (im Folgenden: „Dekarbonisierungsszenario 2035“). Eine Dekarbonisierung des Sektors bis zu diesem Jahr ist unabdingbar für die Erreichung des Ziels des Pariser Abkommens, die Erderwärmung auf maximal 1,5°C zu begrenzen (vgl. Höhne et al. 2016). Damit die Verkehrswende gelingt, sind Verkehrsvermeidung und Verlagerung, z.B. durch die Schaffung von geeigneten Raum- und Infrastrukturen und besserer Bedingungen zur Änderung des Mobilitätsverhaltens, entscheidend. Technologische Entwicklungen, die die Fahrzeugeffizienz erhöhen und den Einsatz erneuerbarer Energie im Verkehr ermöglichen – insbesondere etwa die Elektromobilität – leisten ebenfalls einen wichtigen Beitrag (vgl. Sims et al. 2014). Diese Transformation einer „Mobilitätswende“ bedarf ambitionierter politischer Gestaltung.

Die Studie ist folgendermaßen aufgebaut: Zuerst wird die Größe der Herausforderung für den Verkehrssektor in Deutschland konkretisiert (Kapitel 3). Daraufhin wird die methodische Vorgehensweise zur Erstellung des Szenarios beschrieben (Kapitel 4). Dann folgt die Ausarbeitung von Transitions- bzw. Transformationspfaden, die als Grundlage des Dekarbonisierungsszenarios dienen (Kapitel 5 bis 11). Darin werden jeweils notwendige Schritte, Maßnahmen und Politikinstrumente zur Dekarbonisierung dargestellt und Wirkungsumfänge zugeordnet. Daraufhin werden die Ergebnisse zusammenfassend dargestellt (Kapitel 12) und schließlich die Kernaussagen resümiert (Kapitel 13).

<sup>3</sup> ohne Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft; Quelle: UBA 2017a.

<sup>4</sup> betrachtet werden in dieser Studie nur die Inlandsverkehre in Deutschland.

### 3 Die Größe der Herausforderung - Klimaschutz und Verkehr

In 2016 sind die Treibhausgasemissionen in Deutschland gegenüber dem Vorjahr 2015 insgesamt um 4 Mio. t auf 906 Mio. t gestiegen. Mit einer Zunahme um 3,4% (5,4 Mio. t) gegenüber dem Vorjahr auf 166 Mio. t in 2016 hat der Verkehrssektor den größten Anstieg zu verzeichnen (vgl. UBA 2017b). Die Entwicklungen im Verkehrssektor gefährden das Erreichen der bisherigen Klimaschutzziele Deutschlands, denn Effizienzgewinne werden durch das Verkehrswachstum aufgebraucht. Damit steht die Entwicklung im Widerspruch zu den verschiedenen politischen Zielsetzungen Deutschlands, der EU und auch des internationalen Klimaregimes.

Im Dezember 2015 wurde mit dem Pariser Klimaabkommen von 194 Staaten eine Übereinkunft erzielt, den Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur auf deutlich unter 2°C über den vorindustriellen Werten zu halten und darüber hinaus Anstrengungen zu unternehmen, den Temperaturanstieg auf unter 1,5 °C zu begrenzen. Diese Zielsetzung stellt einen ambitionierten Rahmen dar, innerhalb dessen die Unterzeichnerstaaten flexibel agieren können. In „Nationally Determined Contributions (NDCs)“ werden Programme, Politiken und Maßnahmen von den Vertragsstaaten des Pariser Abkommens dargestellt, welche die Beiträge der jeweiligen Staaten zum Erreichen dieser Zielsetzung ankündigen und spezifizieren. Die Bestimmung der Beiträge ist allerdings freiwillig, d.h. ihr Erreichen nicht verbindlich.

Wenn der Temperaturanstieg mit einer 50-prozentigen Wahrscheinlichkeit unter nur 1,5°C beschränkt bleiben soll, müssen alle globalen Emissionen aller Treibhausgase in sämtlichen Sektoren in etwa 2060, spätestens aber bis 2080, null erreichen. Alle weltweit verfügbaren Szenarien, in denen das 1,5°C-Ziel erreicht werden kann, nehmen dabei an, dass Emissionen in großem Stil wieder aus der Atmosphäre entfernt werden, d.h. negative Emissionen generiert werden. Will man nicht darauf vertrauen, dass Emissionen in ferner Zukunft und in großem Umfang wieder aus der Atmosphäre entfernt werden (z.B. durch die Kopplung einer großmaßstäblichen Nutzung von Biomasse in Kombination mit einer CO<sub>2</sub>-Abtrennung und Speicherung), muss der Nullpunkt noch deutlich früher erreicht werden (vgl. IPCC 2013).

Unabhängig davon, ob man bei der Reduktion kostenoptimiert oder gerechtigkeitsbasiert vorgeht, kommt den Industrieländern und damit auch Deutschland die Herausforderung einer Vorreiterrolle zu, um aufzuzeigen, wie strikte Emissionsreduktionen umgesetzt werden können. Einer Analyse von Höhne et al. (2016) zufolge bedeutet dies für den Verkehrssektor Deutschlands eine Dekarbonisierung bis 2035.

**Vor diesem Hintergrund untersucht diese Studie beispielhaft für den Verkehrssektor in Deutschland, wie eine Dekarbonisierung des Sektors bis zum Jahr 2035 möglich ist.**

In ihrer Roadmap 2050 hat die EU schon im Jahr 2011 ausgewiesen, dass die Treibhausgasemissionen bis 2050 um 80-95 % gegenüber 1990 reduziert werden sollten. Abbildung 3.1 zeigt die verschiedenen sektoralen Reduktionspfade der Roadmap 2050, die notwendig sind um das Dekarbonisierungsziel der EU zu erreichen (Europäische Kommission 2011). In ihrem NDC im Rahmen des Pariser Abkommens hat die EU dies auf eine Zielsetzung von 30 % bis 2030 für die nicht am EU Emissionshandel teilnehmenden Sektoren, darunter den Verkehrssektor spezifiziert (Rat der

EU 2014; zusammenfassende Darstellung des klimapolitischen Rahmens in: Bergk et al. 2017).

Die Bundesregierung hat im November 2016 den Klimaschutzplan 2050 vorgelegt. Dieser stellt den Rahmen der langfristigen Klimapolitik Deutschlands dar. Der Klimaschutzplan enthält ein Reduktionsziel für den Verkehrsbereich, so sollen die verkehrsbedingten Treibhausgasemissionen um mindestens 40-42 % bis zum Jahr 2030 reduziert werden (gegenüber den Werten von 1990), was einer Menge von 95 bis 98 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten entspricht (BMUB 2016a).

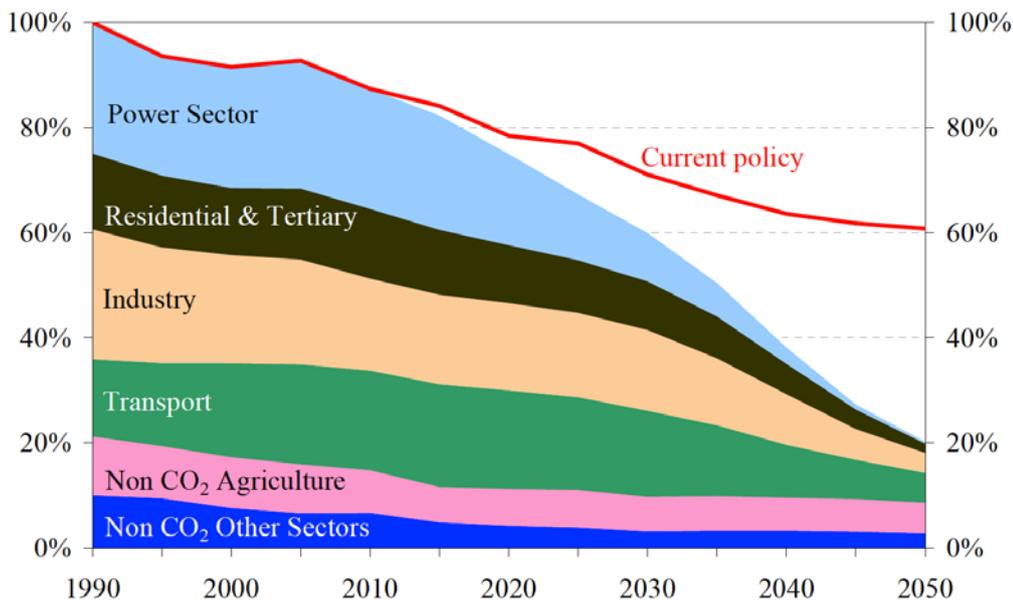


Abb. 3-1 Verlauf EU Treibhausgasemissionen bei Reduktion um 80% bis 2050 (100% =1990). Quelle: Europäische Kommission 2011

Folgt man den aktuellen Trendentwicklungen, wird deutlich, dass ein nachhaltig zukunftsfähiges Verkehrssystem und die entsprechende Mobilitätskultur in Deutschland, in Europa und weltweit bei Weitem noch nicht erreicht werden. Die Verkehrsnachfrage, sowohl im Personen- als auch im Güterverkehr, wird derzeitigen Erwartungen nach weiter ansteigen. Allerdings zeigen sich bereits deutliche regionale und sektorale Unterschiede, der Güterverkehr etwa wächst auf den Hauptverkehrsachsen und im Fernverkehr, während der Personenverkehr besonders im Freizeitverkehr weiter ansteigt. In wirtschaftlich schrumpfenden Gebieten stagniert hingegen in zwischen die Verkehrsnachfrage und geht sogar zurück.

Wie kann also vor dem Hintergrund der realen Entwicklungen die Zielsetzung einer Dekarbonisierung im Verkehrssektor tatsächlich erreicht werden?

Die beiden Soziologen Hartmut Rosa und Ulrich Beck beschreiben moderne Gesellschaft mit ihrer Forderung nach fortlaufendem Wirtschaftswachstum, Innovation und Investitionen als grundsätzlich gebunden an eine Steigerungslogik - einer Steigerung, die auch zu „mehr Bewegung und Erfordernissen zu mehr Beweglichkeit“ führt. In dieser Logik steigen die Mobilitätsbedürfnisse weiter an. Wird Mobilität aus soziologischer Perspektive als individuelles Handeln zum Zweck von Kommunikation und Interaktion betrachtet, lässt sich besser verstehen, dass heute bereits ein Teil

der steigenden Mobilitätsbedürfnisse durch virtuelle Interaktion und digitale Medien erfüllt werden können. So lässt sich beobachten, dass Menschen inzwischen gerne „doppelt mobil“ sind: Während sie sich physisch fortbewegen, sind sie gleichzeitig mobil im Internet und auf sozialen Plattformen unterwegs.

Das Wirtschaftswachstum kann zu mehr Nachfrage nach Güter- und Personenmobilität führen. Diese Steigerung der Mobilität muss jedoch nicht grundsätzlich mit mehr Verkehrsaufwand und der daraus resultierenden negativen Konsequenzen verbunden sein. Der Verkehrsaufwand und die Verkehrsmittelwahl können durch Anreize und Regulierung gezielt gesteuert werden. In pluralistischen Gesellschaften ist jedoch jede Beschränkung des Verkehrs und der Freiheit der Verkehrsmittelwahl politisch kaum durchsetzbar. Auf lokaler Politikebene wird allerdings ein Wandel sichtbar. Im städtischen Raum sind Zufahrtsbeschränkungen sowie eine Einschränkung der Freiheit der Verkehrsmittelwahl (urban access restrictions) zu einer weit praktizierten Maßnahme der Verkehrsvermeidung geworden.

Mit dem gegenwärtigen Verkehrssystem und der mit diesem Verkehrssystem verknüpften Mobilitätskultur werden planetare Grenzen, aber auch lokale ökologische Grenzen (Stickoxid- und Feinstaubemissionen, Lärm) deutlich überschritten. Mit einer rein am technologischen Fortschritt orientierten Entwicklung lässt sich bisher kaum absehen, dass diese Grenzen eingehalten werden können.

Im Vergleich zum Energiesystem (insbesondere der Stromversorgung) sind die Herausforderungen mit Blick auf das Verkehrssystem größer: technischer und organisatorischer Wandel reichen für eine Verkehrswende bisher nicht aus. Notwendig ist soweit wie möglich auch eine Reduzierung des Personen- und Gütermobilitätsaufkommens sowie ein Umstieg auf klimafreundlichere Verkehrsmittel. Nur dann kann ein Verkehrssystem gestaltet werden, welches innerhalb planetarer Grenzen die Mobilitätsbedürfnisse abdeckt, wirtschaftlich funktional ist und Wettbewerbsfähigkeit garantiert sowie eine hohe Lebensqualität für alle ermöglicht. Diese Betrachtung soll in dieser Studie schwerpunktmäßig thematisiert werden.

## 4 Methodik des Szenarios: Transitionspfade für Mobilität und Verkehr

Europas Wirtschaft und die globale Wirtschaft wachsen stetig. Mit wirtschaftlichem Wachstum wächst derzeit die Personenmobilität und auch die Güterverkehrsnachfrage steigt weiter an. Lebenslanges Lernen und Berufswechsel, selbst in fortgeschrittenem Alter, sowie eine Altersarbeitszeit über 70 Jahre verbreiten sich. Mit steigenden Flexibilitätsanforderungen an die Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer steigt die Mobilitäts- und Verkehrsnachfrage, denn Erwerbstätige können nicht so schnell ihren Lebensstandort verändern, wie sie ihren Arbeitsstandort wechseln. Gleichzeitig wird die jüngere Generation der Älteren mobiler und reisefreudiger.

Diese und andere grundlegende Trends sind Ausgangspunkt für sechs Transitions- bzw. Transformationspfade für das vorliegende Szenario zur Dekarbonisierung von Personenmobilität und Güterverkehr in Deutschland bis 2035 („Dekarbonisierungsszenario 2035“). Die Transitionspfade umfassen verschiedene thematische Bereiche von Verkehrssystem, Raumstruktur, Gesellschaft und Mobilitätsverhalten, die für eine Verkehrswende besonders wichtig sind. Sie stellen dar, welche Ausgangslagen und Trends die Entwicklung aktuell bestimmen, welche Ziele bis 2035 erreicht werden sollen, mit welchen Maßnahmen und Instrumenten dies gelingen kann und welche Wirkungen diese im Einzelnen haben.

Ihre Auswahl und Gruppierung folgt den Entwicklungstendenzen und Handlungsstrategien, die für das jeweilige Feld relevant sind. So wirken die dort dargestellten Maßnahmen in erster Linie im jeweiligen Themenfeld, allerdings gibt es auch gegenseitige Abhängigkeiten zwischen den verschiedenen Pfaden. Die Querbezüge werden jeweils dargestellt. Folgende Pfade werden ausgearbeitet:

1. Verkehrssparsame Raumstrukturen
2. Digitalisierung, Vernetzung und Sharing
3. Stärkung des Umweltverbunds
4. Steuerung des motorisierten Individualverkehrs
5. Fahrzeugeffizienz, Antriebe und Kraftstoffe
6. Dekarbonisierung des Güterverkehrs

Ziel ist die Erreichung eines klimaneutralen Verkehrssystems in Deutschland unter der Prämisse, dass eine globale durchschnittliche anthropogen verursachte Erderwärmung von 1,5°C mit ausreichender Wahrscheinlichkeit nicht überschritten werden darf. Wie auch der IPCC-Sachstandsbericht deutlich zeigt, sind diese Transitions- bzw. Transformationspfade nicht als alternative Entwicklungsoptionen zu verstehen. Vielmehr geht es um die notwendige Gesamtwirkung, die nur im Zusammenspiel der verschiedenen Pfade erreicht werden kann; insbesondere mit Blick auf die Erreichung anderer Politikziele nachhaltiger Entwicklung (vgl. Sims et al. 2014).

Die Transitions- bzw. Transformationspfade zur Personenmobilität und zum Güterverkehr in Deutschland werden um einen Exkurs zum internationalen zivilen Luftverkehr ergänzt. Deutschland ist mit seinen Bürgerinnen und Bürgern bzw. mit Starts und Landungen auf seinem Territorium mitverantwortlich für eine ambitio-

nierte Senkung klimaschädlicher Emissionen auch in diesem Bereich. Außerdem werden Rahmenbedingungen aufgezeigt, welche zur Umsetzung für ein nachhaltiges Verkehrssystem notwendig sind.

Die Studie stellt in den sechs genannten thematischen Transitionspfaden dar,

1. wie die Ausgangslage und Trends in den jeweiligen gesellschaftlichen Bereichen aussehen,
2. welche Ziele für 2035 gesetzt werden müssen, um einen klimaneutralen Verkehr zu erreichen, und
3. welche Maßnahmen und Instrumente zur Erreichung dieser Ziele umzusetzen sind.
4. Abschließend wird der Wirkungsumfang der dargestellten Maßnahmen und Instrumente möglichst evidenzbasiert abgeschätzt.

Diese Ausführungen werden mit einer parametrisierten Modellierung quantitativ gestützt. Das Modell leistet darüber hinaus in einem iterativen Prozess einen Input zur Szenarioentwicklung, in dem es die begrenzte Wirkungstiefe bestimmter Mobilitätsstrategien und technischer Entwicklungswege aufzeigt.

Den Rahmen bildet ein am Wuppertal Institut vorhandenes Energiesystemmodell, innerhalb dessen der Verkehr technologie- und anwendungsscharf abgebildet ist. In diesem Modell werden Personen- und Tonnenkilometer auf verschiedene Verkehrsträger sowie Fahrzeugarten und Größenklassen verteilt. Anhand dieses Modells werden der Gesamtenergiebedarf und die assoziierten Treibhausgasemissionen bestimmt.

Das Energiemodell wurde mit verschiedenen vorhandenen Modulen gekoppelt, um spezifische Strategien abzubilden:

- Ein Mobilitätsmodul mit spezifischen Mobilitätskennzahlen zur Ableitung (bottom-up) des zukünftigen Verkehrsaufwands im Personenverkehr.
- Ein Flottenmodul zur Modellierung der zukünftigen Zusammensetzung der Pkw-Flotte nach Haltergruppen.
- Eine Technologiematrix für Fahrzeuge zur Abbildung technologischer Entwicklungen.

### **Mobilitätsmodul**

Die Veränderung der spezifischen Mobilitätskennzahlen im Zeitverlauf bis 2035 erfolgte parameterbasiert. Als Parameterwerte wurden die spezifischen Verkehrsaufwände, der Auslastungsgrad von Fahrzeugen sowie Marktanteile von Fahrzeugtypen mit ihren jeweiligen spezifischen Energiebedarfen und die Anteile bestimmter Kraftstoffe für das Zieljahr 2035 bestimmt. Zukünftige Raumstrukturen waren ebenfalls Gegenstand von Parameterfestlegungen.

Datengrundlage der Modellierung ist die Studie „Mobilität in Deutschland 2008“ (vgl. infas/DLR 2010), eine Paneluntersuchung im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), sowie regionaler Partner. Die MiD 2008 wird zum Zwecke der Modellierung auf folgendem Aggregationsniveau für die nachfolgenden Analyseschritte ausgewertet:

- Alter (fünf Kategorien): 0 bis unter sechs Jahre, sechs bis unter 19 Jahre, 19 bis unter 30 Jahre, 30 bis unter 65 Jahre, ab 65 Jahre.
- Siedlungsstruktureller Regionstyp (drei Kategorien): Städtische Regionen, Regionen mit Verstärkeransätzen, Ländliche Regionen.
- Wegezweck (drei Kategorien): beruflich, Einkauf oder Erledigung, Freizeit.
- Verkehrsmittelwahl (Modal Split, fünf Kategorien): zu Fuß, Fahrrad, MIV (Fahrer), MIV (Mitfahrer), ÖPV.
- Pkw-Besitz (drei Kategorien): Personen mit mindestens einem im Haushalt verfügbaren eigenen Auto, Personen ohne im Haushalt verfügbarem Auto und solche, die kein eigenes Auto verfügbar haben aber Carsharing nutzen.

Die verwendeten Mobilitätskennzahlen sind somit aus dem Jahr 2008, anhand der statistisch erfassten Veränderungen der Soziodemografie und der Raumstrukturen wurden diese jedoch bis 2015 als Basisjahr fortgeschrieben. Als Grundlage für die Bestimmung einer „baseline“ (Trendentwicklung) für das Szenario dient die aktuelle Raumordnungsprognose 2035 des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR, vgl. BBSR 2015), anhand derer die Zahlen zur Bevölkerungsverteilung nach Alter pro siedlungsstrukturellem Raumtyp bis 2035 fortgeschrieben wurden. Dadurch werden räumliche und soziodemografische Kohorteneffekte berücksichtigt, also eine tendenzielle Alterung insbesondere in peripheren Gebieten, sowie leichte Urbanisierungstendenzen.

Die den Altersgruppen zugeordneten Mobilitätsattribute wie Wegezanzahl und -länge pro Wegezweck werden in der Baseline entsprechend mitgeführt. Abbildung 4.1 visualisiert die hier beschriebene Vorgehensweise.

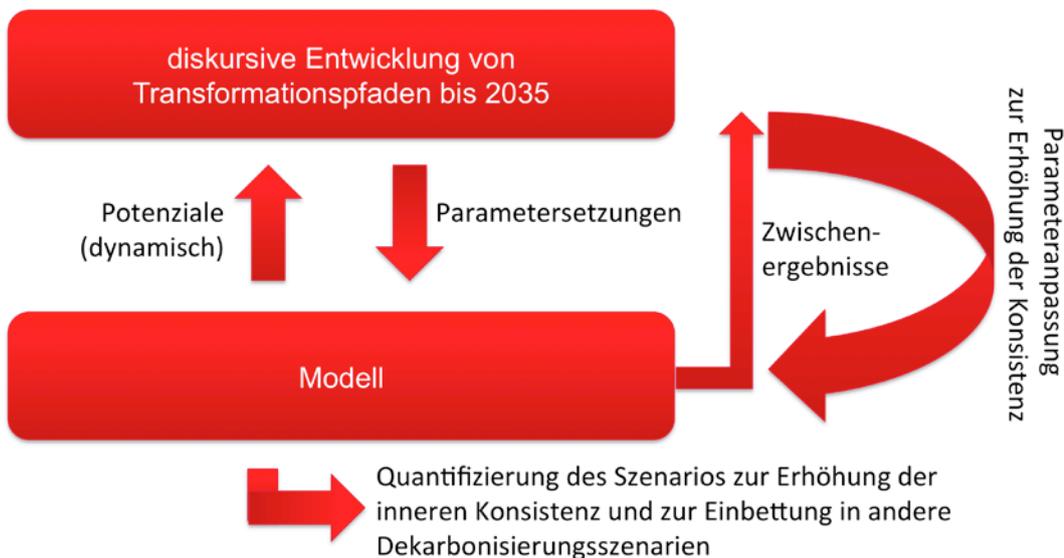


Abb. 4-1 Methodische Vorgehensweise. Quelle: eigene Darstellung

### Flottenmodul und Technologiematrix

Als Grundlage des Flottenmoduls dient wiederum die MiD-Studie, ergänzt um langjährige Zeitreihen der Pkw-Halterstatistik des Kraftfahrtbundesamts (KBA). Verwendet wurde hier eine MiD-Aggregation nach Altersgruppen und Pkw-Größe. Für das Szenariojahr 2035 wurden die Kennzahlen je nach Altersgruppen top-down ange-

passt, um nach Abgleich mit den kumulierten Daten aus dem Mobilitätsmodul plausible Jahresfahraufwände der Pkw abzubilden. Zur Fortschreibung der Flottenstruktur nach Größen und Antrieben wurden Annahmen zur Durchdringung der unterschiedlichen Antriebsarten in den Größenklassen getroffen und jeweils mit typischen Jahresfahraufwänden hinterlegt, abgeleitet aus den Hochrechnungen des DIW im Rahmen von Verkehr in Zahlen bzw. der vorhandenen Szenarioliteratur. Dadurch konnten die Annahmen zur Pkw-Ausstattung bzw. zur Flottenstruktur iterativ validiert werden.

Die gesamten Endenergiebedarfe wurden dann im Energiesystemmodell mit Hilfe einer Technologiematrix gemäß der Dissertation von Mock (2010) für das Szenariojahr 2035 bestimmt.

### **Güterverkehr**

Für den Güterverkehr wurden Daten des Statistischen Bundesamtes zu Verkehrsaufwand (in Tonnenkilometern sowie in Fahrzeugkilometern), Modal Split und Verteilung des Straßengüterverkehrs auf verschiedene Lkw-Größenklassen als Grundlage der Status-Quo-Analyse verwendet (vgl. KBA 2015, Statistisches Bundesamt 2016a). Hinsichtlich der Entwicklungen technischer Optionen zur Dekarbonisierung orientiert sich das Szenario an Ergebnissen vorliegender Szenariostudien (vgl. Zimmer et al. 2016) sowie Potenzialanalysen zu Fahrzeugtechnologien (vgl. Hülsmann et al. 2014). Zu den Verkehrsaufwänden und dem Modal Split im Güterverkehr werden eigene Annahmen getroffen, die ambitionierteren Maßnahmen (insbesondere starke Mauterhöhung sowie Ausbau der Schieneninfrastruktur) entsprechen und deren Wirkungen zum Teil in anderen Szenariostudien modelliert wurden (vgl. DLR et al. 2016).

## 5 Verkehrssparsame Raumstrukturen

### 5.1 Ausgangslage und Entwicklungstrends

Raumstrukturen sind ein zentraler Faktor für Mobilität und Verkehr. Das dünne Angebot wirtschaftlicher, sozialer und verkehrlicher Infrastrukturen in ländlichen Räumen ist verbunden mit im Durchschnitt langen Wegen und einer dominanten Rolle des motorisierten Individualverkehrs (MIV). Dichte Siedlungsräume mit nahegelegenen Verkehrszielen und gut ausgebaute öffentliche Verkehrsangebote in Städten hingegen ermöglichen relativ kurze Wege und stärken den Umweltverbund aus öffentlichem und nicht-motorisiertem Verkehr. Während die Bevölkerung in Millionenstädten im Alltagsverkehr durchschnittlich 27 km pro Tag zurücklegt, sind es in Gemeinden unter 5.000 Einwohnern 40 km (vgl. Holz-Rau und Scheiner 2016; nach MiD 2008).

Ausgehend von einem relativ konstanten Zeitbudget, das für Mobilität aufgewendet wird, führten zunehmende Autoverfügbarkeit und der Ausbau von Verkehrsinfrastrukturen zu einer Ausweitung von Aktionsradien. Der Zusammenhang zwischen Verkehr und Raumstruktur bzw. Flächennutzung lässt sich als Regelkreis darstellen (vgl. Abb. 5.1).

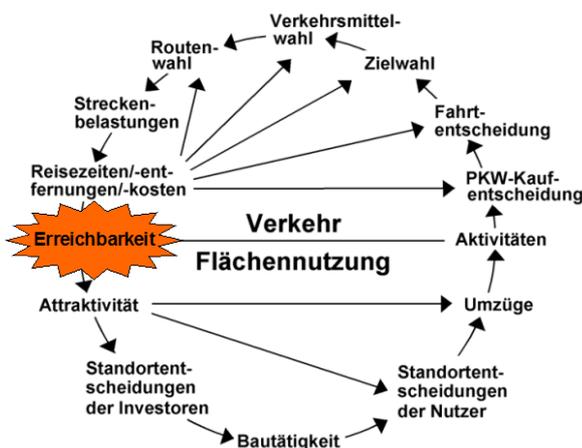


Abb. 5-1 Regelkreis Flächennutzung - Verkehr. Quelle: Wegener 2009, 79

Neben den im Regelkreis berücksichtigten Faktoren von Standortstruktur und Verkehr spielen jedoch auch externe Faktoren eine Rolle – sowohl für die Flächennutzung als auch für die beobachtete Zunahme des Verkehrsaufwands. Hierzu gehören unter anderem die wirtschaftliche Entwicklung, (internationale) Arbeitsteilung und der soziale Wandel, der mit der Zunahme von Fernreisen, überregionalen und internationalen sozialen Kontakten sowie mit dem Wandel der Geschlechterrollen und einer zunehmenden Frauenerwerbstätigkeit verbunden ist (vgl. Holz-Rau und Scheiner 2016). Diese Faktoren werden in den weiteren Transitions Pfaden entsprechend berücksichtigt.

Aus raumstruktureller Perspektive entscheiden die konkrete Ausgestaltung der Stadt-, Raum und Verkehrsstrukturen sowie die Verteilung der Bevölkerung in den verschiedenen Raumstrukturtypen darüber, wieviel Verkehr entsteht. Hierzu werden im Folgenden der Status quo und die Entwicklungstrends dargestellt.

## **Großräumige Raumstruktur und Wanderungsbewegungen**

Die regionale Bevölkerungsverteilung zeigt, dass sich großräumige inländische Wanderungsbewegungen abgeschwächt haben. Zogen die Menschen zwischen 1991 und 2011 in Deutschland noch über Bundesländergrenzen hinweg von Nord nach Süd und von Ost nach West, finden die Dynamiken nun darunter statt. Der Fachkräftemangel sorgt dafür, dass Arbeitsplatzwanderer nun kleinräumiger unterwegs sind (d.h. innerhalb der jeweiligen Bundesländer). Das sinkende Rentenniveau führt zu ebenfalls kleinräumigeren Ruhestandswanderungen. Zudem wechseln insgesamt weniger Menschen den Wohnort, da viele bereits in den Jahrzehnten zuvor dorthin gewandert sind, wo es Arbeitsplätze gibt. Nur Studenten und Auszubildende ziehen auch weiterhin großräumig um (vgl. Phleps et al. 2015: 15).

Strukturell schwache und periphere Räume werden mit einer anhaltenden Abwanderungsproblematik zu kämpfen haben. Neben dem lokalen Bevölkerungsrückgang ist damit eine verstärkte Überalterung der verbleibenden Bevölkerung verbunden. Ländliche Räume geringerer Dichte weisen im Vergleich zu allen anderen BBSR-Regionstypen erheblich längere Wege auf - ihr Anteil an der Gesamtbevölkerung ist gleichwohl gering. Die durchschnittliche Wegelänge liegt laut MiD 2008 in diesen peripheren Gebieten, also ländlichen Räumen geringerer Dichte, bei ca. 24 km, in allen anderen bei ca. 18 km.

## **Entwicklung der Städte und Landkreise**

Wachstumsaussichten bestehen für wirtschaftlich dynamische Regionen, in der Regel Ballungsräumen und deren Umland. Insgesamt besteht ein Trend zur Urbanisierung, d.h. in vielen Agglomerationsräumen findet die Wohnungssuche eher in den Kernstädten als im Umland statt.

Der Trend zur Urbanisierung hat sowohl positive als auch negative Effekte auf den Verkehrsaufwand. Bewohnerinnen und Bewohner eines städtischen Umfelds legen geringere Alltagsdistanzen zurück. Es ist empirisch erwiesen, dass Bewohnerinnen und Bewohner von dichten, kompakten Städten mit gemischter Nutzung verhältnismäßig kurze Wege zurücklegen und dafür die Verkehrsmittel des ÖPNV nutzen oder nicht-motorisiert unterwegs sind (z.B. Guo und Chen 2007 und andere Beiträge im gleichen Band; Chen et al. 2008 mit Fokus auf Dichte; Forsyth et al. 2008 mit Fokus auf Fußverkehr). Dies kann durch die hohe Dichte und Vielzahl an erreichbaren Aktivitäten erklärt werden, sowie durch die vorhandenen Verkehrsinfrastrukturen und Politikinstrumente, die in den Stadtzentren vorhanden sind bzw. wirksam werden.

Während der Trend der Urbanisierung mehr Menschen in verdichtete Räume bringt, gibt es innerhalb der Städte jedoch auch gegenläufige Tendenzen. So kann die Verdrängung dezentraler, kleiner Geschäfte durch große Einkaufszentren, die Schließung von Bankfilialen oder die Zusammenlegung von Schulen dazu führen, dass die Wege in Städten tendenziell länger werden.

Je kleiner ein Haushalt, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit, dass zum Haushalt ein Pkw gehört – erst recht im urbanen Raum (vgl. infas/DLR 2010). Dies wird momentan durch mehr Langstreckenmobilität kompensiert. So sind eine Zunahme interurbaner Pendlerwege und langläufigen interurbanen Freizeitverkehrs (v.a. für Kurzreisen) zu verzeichnen (vgl. ebd.; Frick et al. 2014).

Es besteht kein Grund zur Annahme, dass sich bestehende Trends nicht fortsetzen. Flexibilität auf dem Arbeitsmarkt, Individualisierung der Freizeitgestaltung, Abnahme des Autos als Statussymbol und Sharing Economy sind Trends, die das genannte Mobilitätsverhalten bestätigen und sich in urbanen Räumen auswirken. Insgesamt sorgt der derzeitige Trend für eine Nachverdichtung in den Städten und einen Wegzug aus ländlichen Gebieten, was den Verkehrsaufwand grundsätzlich senkt. Das Problem ist allerdings das Angebot, denn gleichzeitig steigt der Flächenverbrauch der Agglomerationen und damit steigen dort die Wegelängen.

So ist weiterhin eine deutliche Zunahme der Wohnfläche zu verzeichnen: Sie stieg zwischen 2000 und 2014 von 39,5 auf 46,5 m<sup>2</sup> pro Einwohner bzw. Einwohnerin, also um sieben Quadratmeter (vgl. Statistisches Bundesamt 2016b). Ein Grund dafür war die Zunahme der Einpersonenhaushalte.

## 5.2 Zielzustand 2035

Eine konsequente Orientierung der Stadt- und Raumplanung auf die Konzepte der Stadt der kurzen Wege führt zu einer verdichteten Stadtentwicklung, in der Innenentwicklung und Nachverdichtung Vorrang vor Außenentwicklung erhält.

Im ländlichen Raum, wo aufgrund von Wanderungsbewegungen in die Städte weniger Menschen leben, werden nicht mehr genutzte Wohn- und Gewerbeflächen rückgebaut – ebenfalls unter der Prämisse einer kompakten Raumstruktur. Die tatsächlichen Potenziale sind allerdings begrenzt, da Ortskerne häufig über einen Baubestand verfügen, der nicht oder nur bedingt so nachgerüstet werden kann, dass er heutigen Ansprüchen, etwa nach Barrierefreiheit, energetischen Standards und Raumaufteilung genügt.

Dennoch ist es möglich, den zusätzlichen Flächenverbrauch sukzessive zu reduzieren und bei stagnierender und zukünftig sinkender Bevölkerung schließlich zum Stillstand zu bringen.

Neue Siedlungsflächen entstehen nur entlang von Achsen und Knotenpunkten des öffentlichen Verkehrsnetzes. Die Neuansiedlung von Gewerbe, Handel, öffentlichen Einrichtungen und Freizeitziele wird durch eine überregional und regional abgestimmte Planung so koordiniert, dass diese mit kurzen Wegen erreichbar sind; Einkaufszentren „auf der grünen Wiese“ oder in kommunaler Konkurrenz entwickelte Verkehrsziele werden vermieden.

### 5.3 Maßnahmen und Instrumente

Um diesen Zielzustand zu erreichen und eine dichte, nutzungsgemischte Stadt- und Raumentwicklung und eine Reduzierung des Flächenverbrauchs zu erreichen, ist eine Strategie notwendig, die alle relevanten Einflussgrößen adressiert und planungs- und baurechtliche, ökonomische und informatorische Ansätze umfasst.

Zu den planungs- und baurechtlichen Instrumenten zählen (vgl. insbesondere SRU 2016, 270ff.; UBA 2010a, 18ff.; UBA 2012):

- **Zentrenorientierte flächensparsame Planung:** Obligatorische Erfassung der Innenentwicklungspotenziale und darauf gestützte Neuausweisung von Flächen. Um Leerstand zu nutzen, wird ein kommunales Leerstands- und Umzugsmanagement eingeführt.
- **Obergrenzen für die Flächenausweisung und Flankierung durch Flächenhandel.** Ein „Cap and Trade“-Ansatz für den Flächenverbrauch schafft Anreize zur sparsamen Neuentwicklung sowie zur Renaturierung von Flächen. Eine Neuausweisung darf nur bei Nachweis von Kompensationsflächen stattfinden, siehe Eingriffsregelung in den §§14 und 15 des BNatschG sowie §1a BauGB. Dabei werden Maßgaben für eine dichte Flächenentwicklung berücksichtigt.
- **Überprüfung der Vorschriften der Baunutzungsverordnung und anderer baulich relevanter Vorschriften.** Nachzudenken wäre beispielsweise über die Funktion und Auslegung von §§34 und 35 BauGB (Bauen in Innen- und Außengebieten). Außerdem sollten die Städte und Kreise höhere Traufhöhen und damit mehr Stockwerke im Bestand ermöglichen.
- **Gezielte Funktionsmischung:** Bestehende monofunktionale Siedlungsstrukturen werden gebietsspezifisch mit adäquaten unterrepräsentierten Nutzungen ergänzt, neue Quartiersplanungen sind konsequent nutzungsgemischt umzusetzen.
- **Region der kurzen Wege:** In der Regional- und Landesplanung werden Siedlungsschwerpunkte nur in der Nähe von Zentren und Trassen des öffentlichen Verkehrs ausgewiesen. Einrichtungen der Grundversorgung werden dezentral so eingerichtet, dass sie auf kurzen Wegen mit dem ÖPV, zu Fuß oder mit dem Rad erreichbar sind.
- **Integration der Planungsebenen von Bund, Ländern und Kommunen sowie eine stärkere sektorale Integration der Planung,** um besser aufeinander abgestimmte Stadt- Raum- und Verkehrsplanung zu ermöglichen. Das Gebot der interkommunalen Zusammenarbeit (§2 Abs.2 BauGB) wird zum verbindlichen Planungsleit-satz umgestaltet, um über Gemeindegrenzen hinaus verkehrssparsame Planungen realisieren zu können. Die Planung wird zudem ressortübergreifend so koordiniert, dass bereits frühzeitig im Planungsprozess Aspekte der Verkehrsentstehung adressiert und alternative Entwicklungsmöglichkeiten verpflichtend geprüft werden.

Zu den ökonomischen und informatorischen Instrumenten zählt der Abbau von Fehlanreizen und die Schaffung von Kostentransparenz, im Einzelnen (vgl. SRU 2016, 277ff.):

- **Reformierung der Kommunalfinanzierung:** Insgesamt verfügen die Kommunen über wenig Finanzautonomie – sie haben nur bei der Gewerbe- und Grundsteuer

die Möglichkeit, die Höhe des Steueraufkommens zu beeinflussen. Reformen müssten die Anreizstrukturen für Kommunen ändern, um zu verhindern, dass diese neue Flächen ausweisen, um ihre Steuereinnahmen zu erhöhen.

- Der Grundsteuerhebesatz könnte nach Regionstyp und auch nach kleinräumiger Lage innerhalb einer Stadt/Agglomeration so gestuft werden, dass das Wohnen in peripheren Gebieten deutlich teurer wird.
- Weiterentwicklung der Grunderwerbssteuer zu einer Neuversiegelungssteuer und der Grundsteuer zu einer Flächennutzungssteuer, um Anreize für eine Begrenzung des Flächenverbrauchs zu setzen. Dies bedeutet insbesondere eine Erhöhung der Grundsteuer für unbebaute baureife Grundstücke.
- Fördermittel zur Revitalisierung von Brachflächen und zur Schließung von Baulücken: Hierdurch wird eine Nachverdichtung der Siedlungsstruktur erreicht, wodurch kürzere Wege ermöglicht werden.
- Abschaffung der Pendlerpauschale: Die Pendlerpauschale begünstigt das Wohnen in größerer Entfernung vom Arbeitsplatz; ihre Abschaffung erhöht die Attraktivität von Wohnorten, die näher am Arbeitsplatz gelegen sind.
- Folgekostenrechner zur Abschätzung der Folgekosten kommunaler Flächenerschließung und Infrastrukturen anwenden und für bestehende Infrastrukturen fortentwickeln.<sup>5</sup>
- Anreize für generationenübergreifendes Wohnen und einen Generationenwechsel im Bestand schaffen. Lebenslanges Wohnen im Eigenheim sollte kein Normalfall sein, sondern ältere Menschen sollten dabei unterstützt werden, sich zunehmend für einen Umzug in eine kleinere Wohnung zu entscheiden, nachdem die Haushaltsgröße geschrumpft ist, etwa weil die eigenen Kinder ausgezogen sind. In diesem Zuge kann auch ein Regionswechsel in dichter besiedelte Gebiete möglich werden, etwa um die Grundversorgung aufrecht zu erhalten.

#### 5.4 Wirkungsumfang der Maßnahmen und Instrumente

Zusätzlich zum Trend des Wegzuges vom Land werden durch die Maßnahmen Anreize gesetzt, die eine leichte relative Zunahme der Stadtbevölkerung erreichen (+5% bei Personen bis 65 Jahre, bei Rentnerinnen und Rentnern +2,5%).<sup>6</sup>

Der Zugang um 5% bzw. 2,5% in den verschiedenen Altersklassen in den Jahren 2016 bis 2035 entspricht einer zusätzlichen Wanderung der Bevölkerung von ländlichen Räumen in städtische Regionen um jährlich 2,2 von 1.000 Personen. Zum Vergleich: Entscheidende Faktoren für einen Umzug sind erstens persönliche Gründe (Partnerschaft, Familiengründung) und zweitens die regionalen Arbeits-, Bildungs- und Wohnungsmärkte (vgl. BiB 2014). Die Wanderungshäufigkeit über Gemeindegrenzen hinweg beträgt derzeit jährlich abhängig vom Alter zwischen 10 und 170 Wandernde je 1.000 Personen. Menschen im Ausbildungsalter wandern demnach am häufigsten (etwa 170), während die Quote bei 70 bis 80-Jährigen am niedrigsten ist (etwa 10). Die als Folge der oben angenommenen Instrumente und Maßnahmen

---

<sup>5</sup> Das Land Rheinland-Pfalz bietet seit 2015 einen solchen Folgekostenrechner für seine Kommunen an (vgl. Website Folgekostenrechner Rheinland-Pfalz).

<sup>6</sup> Damit ist wegen des Rückgangs der Gesamtbevölkerung keine absolute Zunahme der städtischen Bevölkerung verbunden.

angenommene Zahl von 2,2 liegt demnach deutlich unter den entscheidenden Gründen für Migration.

Die relativen Veränderungen führen zu einer klimafreundlicheren Mobilitätsnachfrage bezogen auf die Gesamtbevölkerung, nämlich zu kürzeren Wegen und einer stärkeren Nutzung des Umweltverbunds. Der Anteil der Stadtbevölkerung liegt in 2035 bei 48,5% (37,9 Mio. von 78,2 Mio. Inländerinnen und Inländern), in 2015 lag sie bei 47,5% (38,6 von 80,9 Mio. Inländerinnen und Inländern).

Wichtiger als eine Wanderung zwischen verschiedenen Regionstypen ist allerdings die Erhaltung und gar Erhöhung der Dichte in den Kerngebieten der städtischen Regionen und der Regionen mit Verstärkerungsansätzen. In städtischen Regionen verkürzen sich die Wegelängen um 20% bei Freizeit- sowie Einkaufs- und Erledigungswegen (in Kombination mit Preismechanismen, siehe Kapitel 8). Im teilweise verstädertem Raum sind es immer noch 10% kürzere Wege. Bei geringerer Einwohnerdichte verringert sich die Dichte an Einkaufs- und Freizeitangeboten, so dass hier die mögliche Verkürzung der Wegelängen geringer ausfällt. Auf dem Land kann ein Ansteigen der Wegelängen zumindest vermieden werden, da Zentralisierung der Märkte und zusätzliche Flächenausweisung gestoppt werden.

Beim Wegezweck Arbeit können kürzere Strecken wegen der zunehmenden Flexibilisierung der Arbeitswelt nicht erreicht werden. Die Entwicklung hin zu innerstädtischem Wohnen bei gleichzeitiger Steigerung der Kilometerkosten im Fernverkehr wird neutralisiert durch den Trend zu längeren Pendlerwegen – hervorgerufen u. a. durch Spezialisierung, häufigere Arbeitsplatzwechsel sowie Haushalte mit zwei Erwerbstätigen – wodurch sich arbeitsplatznahes Wohnen schwerer realisieren lässt (vgl. Pütz 2015; Holz-Rau und Scheiner 2016).

## 6 Digitalisierung, Vernetzung und Sharing

### 6.1 Ausgangslage und Entwicklungstrends

Mobilitätsangebote und Mobilitätsverhalten befinden sich derzeit in einem Umbruch: multi- und intermodales Mobilitätsverhalten nehmen zu, neue Dienstleistungen wie flexibles Carsharing oder Ridesharing werden angeboten. Dies liegt nicht zuletzt an den Möglichkeiten, die sich schon heute durch Digitalisierung und mobiles Internet bieten. Smartphones ermöglichen mobile Navigation, Echtzeit-Fahrplanauskünfte und die Lokalisierung von Car- und Bikesharing-Angeboten.

Im Gegensatz zu den älteren Teilen der Bewohnerinnen und Bewohner Deutschlands spielt bei den jüngeren Personen der private Pkw eine weniger prominente Rolle im modalen Verhalten, als dies früher der Fall war. Die Zahlen der Langzeitstudie „Mobilität in Deutschland“ (MiD) und des Mobilitätspanels legen einen Rückgang der intensiven Pkw-Nutzung in den jüngeren Altersgruppen zwischen 18 und 39 Jahren nahe. Auch der Zeitpunkt des Führerscheinerwerbs verschiebt sich in das dritte Lebensjahrzehnt. In diesem Zusammenhang kann allerdings (noch) nicht von einer Trendwende gesprochen werden, da das Auto noch immer von 55% der 18-29 Jährigen üblicherweise fast täglich genutzt wird und von 67% bei den 30-39 Jährigen (vgl. infas/DLR 2010, 181; sowie Weiß et al. 2016).

Im deutschen Taxi- und Mietwagenmarkt finden erste Veränderungen statt. Das Teilen von Ressourcen ist prinzipiell nichts Neues, denn Mitfahrzentralen sind schon immer der Idee gefolgt, Ressourcen und Fixkosten zu teilen. Vor dem Aufkommen professioneller Online-Vermittlungen war die Konkurrenz durch Mitfahrzentralen für die öffentlichen Verkehrsmittel und Taxis jedoch überschaubar, erst durch die Digitalisierung und die damit einhergehenden technischen Möglichkeiten ist das rasante Wachstum der Sharing Economy ausgelöst worden.

Eine Umfrage des IFAK-Instituts aus dem Jahre 2014 (vgl. IFAK 2014: 11) ergab, dass 74% aller Taxifahrten telefonisch über Taxizentralen vermittelt wurden. Vom Taxistand und vom Straßenrand wurden 14% bzw. 10% aller Fahrten durchgeführt. Der Anteil der Vermittlung über Apps und das Internet war mit einem Anteil von 0,4% noch sehr gering. Der Taxi- und Mietwagenmarkt ist in Deutschland derzeit stark reguliert. Zulassungskriterien für die Konzessionserteilung sind im Personenbeförderungsgesetz (PbefG) geregelt, Konzerne wie Uber und seine Services können in Deutschland derzeit nur ihre Betriebskosten decken.

Generell steigt aber die Akzeptanz für technologische Innovationen. Darüber hinaus steigt die Emotionalisierung technischer Entwicklungen, so dass schnellere Entwicklungszyklen akzeptiert werden. Das führt auch zu einer schnelleren Marktdurchdringung mit neuen Produkten. Entsprechend wächst auch die Bereitschaft, neue Mobilitätsangebote zu akzeptieren. Der Trend und die Bereitschaft, zu nutzen statt zu besitzen, wächst – und damit auch die multimodale Orientierung.

Bereits heute kann als sich verstetigender Trend festgehalten werden, dass gerade Autofahrerinnen und Autofahrer zunehmend auch andere Verkehrsmittel nutzen. In Deutschland ist nämlich der Anteil des MIV an den Wegen junger Erwachsener noch stärker zurückgegangen als der Anteil der Autobesitzerinnen und -besitzer in dieser Altersgruppe (vgl. ifmo 2011). Als wichtigste Treiber für diese Entwicklung hin zu

Multimodalität werden Pragmatismus und Flexibilität bei Mobilitätsentscheidungen genannt, die auf geändertem Kostenbewusstsein fußen. Daneben „dürften [...] in den letzten Jahren neue Symbole des expressiven Konsums an Bedeutung gewonnen haben, die neben dem Auto für die Stilisierung der eigenen Person eingesetzt werden“ (ebd., 27).

Neue Geschäftsmodelle und Services in der Taxivermittlung, Taxisharing, Carsharing, Ridesharing sowie Mietwagenvermittlung gewinnen somit weltweit an Bedeutung. Mit dem globalen Wachstum von Carsharing steigen auch die Erkenntnisse über Wirkungen von Carsharing auf die Nutzung von Pkw insgesamt. Es lässt sich feststellen, dass Nutzerinnen und Nutzer von Carsharing weniger Pkw-km fahren als ohne ein solches Angebot, gleichzeitig steigt die Nutzung des ÖPNV (vgl. Cervero et al. 2007; Shaheen und Cohen 2008; BMUB 2016b).

Auch in Deutschland steigt die Nutzung von Carsharing kontinuierlich an, von 1,26 Mio. Fahrtberechtigten am Stichtag 1.1.2016 auf 1,73 Mio. Fahrtberechtigte am 1.1.2017 (vgl. BCS 2017a). Zunehmend etablieren sich dabei stationsungebundene Systeme („Free Floater“). Das BMUB hat im Zeitraum von 2012 bis 2015 im Rahmen des Projektes WiMobil anhand des stationsungebundenen Angebotes *DriveNow* und des stationsgebundenen Angebotes *Flinkster* untersuchen lassen, in welcher Form sich stationsgebundene und -ungebundene Angebote auf das Mobilitätsverhalten ihrer Nutzerinnen und Nutzer auswirken (vgl. BMUB 2016b). Die Untersuchung der Angebote in München und Berlin hat gezeigt, dass Carsharing derzeit in erster Linie von Personen mit überdurchschnittlichem Einkommen in Anspruch genommen wird und dass stationsgebundene Angebote eher von älteren und stationsungebundene Angebote eher von jüngeren Menschen in Anspruch genommen werden. Es hat sich auch gezeigt, dass Carsharing sich in beiden Angebotsformen erheblich auf das Mobilitätsverhalten seiner Nutzerinnen und Nutzer auswirkt. Beispielsweise weisen beide Gruppen gegenüber dem Münchener bzw. Berliner Durchschnittshaushalt eine geringere Pkw-Ausstattung auf und besitzen häufiger eine ÖPNV-Zeitfahrkarte (vgl. ebd., 87f.). Kundinnen und Kunden von Carsharing-Angeboten legen auch weniger Wege mit dem MIV zurück (vgl. ebd., 112). Als Gründe dafür, dass oftmals kein eigener Pkw besessen wird, nennen sie an erster Stelle die fehlende Notwendigkeit, einen eignen Pkw zu besitzen. Dass das Carsharing-Angebot ausreicht, um den Bedarf an Pkw-Fahrten abzudecken, wird als zweithäufigster Grund genannt. Nachfolgende Tabelle 6.1 zeigt die Ausprägung der Gründe für den Verzicht auf einen privaten Pkw und differenziert nach Form des Angebots.

Tab. 6-1 Gründe für Pkw-Verzicht bei Carsharing. Quelle: BMUB 2016b, 162

	kein privates Auto nötig	Kosten	Carsharing ist ausreichend	knapper Parkraum	Umweltschutz
stationsgebundenes Carsharing	77%	58%	67%	35%	48%
stationsungebundenens Carsharing	62%	52%	42%	21%	20%

Zehn Prozent der Nutzerinnen und Nutzer des stationsungebundenen und gar 20 Prozent des stationsgebundenen Angebotes gaben zudem an, einen Pkw nach Anmeldung zum Carsharing abgeschafft zu haben (vgl. ebd., 164). Zudem widerlegt die

Untersuchung die These, dass es in erster Linie Zweitwagen sind, die mit der Nutzung eines Carsharing-Angebotes abgeschafft werden. Bei 80 Prozent der abgeschafften Pkw handelte es sich nämlich um den einzigen Pkw des Haushalts. Vor allem in innerstädtischen Wohnlagen wurden die meisten der abgeschafften Pkw vorher im öffentlichen Straßenraum abgestellt. Hier zeigt sich, dass Carsharing gerade in innerstädtischen und von einem hohen Parkdruck geprägten Wohnquartieren zu einer Minderung des Parkdrucks beitragen kann (vgl. ebd., 168).

Außerdem nutzen Personen, die Carsharing in stationsgebundener und ungebundener Form betreiben, zu einem großen Teil regelmäßig und teils deutlich häufiger als Nicht-Nutzerinnen bzw. Nicht-Nutzer die Verkehrsmittel des Umweltverbundes, während der Pkw eine wesentlich geringere Rolle spielt. In wenigen Fällen ersetzen die Free Floater auch Fahrten mit öffentlichen Verkehrsmitteln, so dass nicht nur stationsgebundenes Carsharing als Ergänzung zum ÖPV angesehen werden kann (vgl. ebd., 113).

Im Mai 2016 veröffentlichte die Ford AG eine europaweite Umfrage mit 10.000 Befragten zur Sharing Economy, die zu folgenden Ergebnissen kommt (vgl. Website Presseportal):

- 48 Prozent der Studienteilnehmerinnen und -teilnehmer in Deutschland würden ihr Auto gegen Geld verleihen, europaweit sind es 55 Prozent.
- Bis zu 76 Prozent würden Fahrgemeinschaften nutzen und bis zu 72 Prozent Carsharing.
- Besonders für 16- bis 34-Jährigen ist Teilen wichtig - und das nicht nur aus finanziellen Gründen. Die Sharing Economy bedeutet für sie Freiheit und Flexibilität.

### **Fahrerassistenzsysteme und autonomes Fahren**

Die Automobilkonzerne forschen derzeit intensiv zu selbstfahrenden Fahrzeugen. Gerade auf den Langstrecken und damit auf Autobahnen und Bundesstraßen wird es in wenigen Jahren möglich sein, ohne eigenes Eingreifen zu fahren. Wann dies im urbanen Verkehr bei deutlich höherer Interaktion der Verkehrsteilnehmerinnen und -teilnehmer möglich wird, ist derzeit noch schwer einzuschätzen. Die rechtlichen Rahmenbedingungen lassen dies derzeit noch nicht zu (vgl. Gasser et al 2015).

Unklar ist derzeit, inwieweit sich dies auf die Klimafreundlichkeit von Verkehr und Mobilität auswirkt, also automatisiertes Fahren Einfluss ausübt auf andere Verkehrsmittelangebote. Le Vine et al. (2014) weisen auf den positiven Beitrag zu Sharing Mobility hin, da selbstfahrende Fahrzeuge flexibler dort bereitgestellt werden können, wo hohe Nachfrage besteht. Szenarienstudien zur Dekarbonisierung des Verkehrs, die explizit Wirkungen autonomen Fahrens ausweisen, existieren derzeit nicht (vgl. Zimmer et al. 2016).

Einerseits kann konstatiert werden, dass geringere Höchstgeschwindigkeiten und Unfallrisiken sich tendenziell positiv auf den nicht-motorisierten Verkehr auswirken (vgl. Hoogendorn et al. 2014). Andererseits führen besserer Verkehrsfluss, die Möglichkeit des Fahrens ohne Führerschein sowie Parkunterstützung einen Komfortgewinn herbei und können daher zukünftig auch den MIV befördern (vgl. Heinrichs 2016; Trommer et al. 2016).

## 6.2 Zielzustand 2035

Die Tendenz des Nutzens statt Besitzens führt zu weniger Fahrten mit dem Pkw und in der Konsequenz zu geringerem Verkehrsaufwand im MIV insgesamt, da ÖPV und nicht-motorisierter Verkehr vermehrt als Option in Frage kommen. Dies wird erreicht, da der mobile Mensch stärker vor seinen jeweiligen Wegen Kosten und Nutzen der Optionen eruiert.

Die Abschaffung eines eigenen Pkw wird befördert, indem Sharing-Dienste zumindest in der Stadt ubiquitär zur Verfügung stehen und auch der ÖPNV und nicht-motorisierte Verkehr flächendeckend gute Anbindungen bieten bzw. Rahmenbedingungen vorfinden. Reisezeiten und Wegekosten sprechen dann vielfach gegen eine Fahrt im Pkw. Auch andere Gründe für die Verkehrsmittelwahl, etwa eigene Bewegung ohne Unfallrisiko oder die Parkplatzsituation am Zielort können abhängig von der jeweiligen Quell-Ziel-Relation zur Bevorzugung des nicht-motorisierten Verkehrs führen (vgl. Rudolph 2014).

Neben klassischem Carsharing stehen bedarfsgerechte, umsteigefreie Tür-zu-Tür-Angebote des Ridesharing zur Verfügung, bei denen verschiedene Fahrzeuge – Autos oder Kleinbusse – mehrere Fahrgäste abholen und auf einer optimalen Route zu ihrem Ziel bringen. Über solche Sharing-Systeme, die den Transportzeiten mit dem individuellen Fahrzeug nicht nachstehen, könnte der Bedarf an Fahrzeugen in der Gesamtflotte drastisch reduziert werden (vgl. OECD/ITF 2016). Autonome Fahrzeuge, die bis 2035 verfügbar sein könnten, machen dieses System noch effizienter.

Sharing Mobility übernimmt aus dieser Perspektive die Rolle des funktionstüchtigen „Lückenfüllers“ zwischen dem Individualverkehr und dem öffentlichen Verkehr. Sollten wichtige Gründe für die Nutzung eines Pkw sprechen, etwa der Transport von sperrigem Gepäck, dann stehen in verdichteten Gebieten entsprechende Dienstleistungen zur Verfügung.

In den Räumen mit Verstärkeransätzen und ländlichen Räumen ist die Verfügbarkeit von Sharing-Diensten geringer als in Städten, entsprechend höher bleibt dort für viele Menschen die Notwendigkeit, ein eigenes Auto zu besitzen und damit der Anteil des MIV am Verkehrsaufkommen und -aufwand. Dennoch kann Sharing Mobility in Form nachbarschaftlicher Hilfe und unterstützt durch Apps ein zentraler Baustein zur Sicherung von Mobilität und Daseinsvorsorge sein.

Fahrersassistentensysteme und autonomes Fahren können für den Verkehrsfluss notwendige Geschwindigkeiten bzw. Geschwindigkeitsbegrenzungen umsetzen. Der Klimaschutzbeitrag durch autonomes Fahren auf Bundesautobahnen beruht vor allem auf der hierfür notwendigen Geschwindigkeitsbeschränkung, der Verflüssigung des Verkehrs bei gleichmäßiger Geschwindigkeit und der Möglichkeit, dass die Fahrzeuge in Kolonne fahren können. Dies ist in einer Übergangsphase ab 2025 relevant, in der das phasing-out von Verbrennungsmotoren stattfindet.

Digitalisierte Vernetzung und Abrechnung kann sich auch die öffentliche Hand zunutze machen, etwa zur Abrechnung einer Pkw-Maut oder für Parkplatzgebühren (vgl. Kapitel 8.3 zur Steuerung des MIV).

### 6.3 Maßnahmen und Instrumente

Die Möglichkeiten der Digitalisierung können der Sharing Economy zu weiterhin starkem Wachstum verhelfen. Taxivermittlung, Taxisharing, Ridesharing und Carsharing können vor allem in urbanen Räumen ein gemeinsames Angebot schaffen, welches die Abschaffung eines eigenen Pkw befördert (BMUB 2016b). Das Teilen der Ressource Auto wirkt umweltentlastend. Entsprechend müssen politische Rahmenbedingungen gesetzt werden.

Wesentliche Impulse für Carsharing sind durch die Ausweisung von Stellplätzen im öffentlichen Straßenraum bzw. die Bereitstellung kommunaler Abstellflächen für Carsharing-Fahrzeuge zu erwarten. Das am 30. März 2017 vom Bundestag verabschiedete Carsharing-Gesetz soll im September in Kraft treten. Mit dem Gesetz wird eine bundesweit rechtlich einheitliche Möglichkeit bestehen, Stellplätze für stationsbasiertes Carsharing im öffentlichen Straßenraum zu reservieren, um beispielsweise eine bessere bauliche und organisatorische Verknüpfung von Carsharing und ÖPNV zu ermöglichen (vgl. BMVI 2017). Zudem soll das Gesetz den Kommunen die Möglichkeit geben, Carsharing-Fahrzeuge von Parkgebühren zu befreien oder ermäßigte Tarife anzubieten (vgl. BCS 2017b).

Die neuen Möglichkeiten der Digitalisierung erfordern auch eine Überprüfung der Regulierung am Taximarkt. Beispielsweise sind derzeit quantitative und qualitative Zugangsbeschränkungen bei der Konzessionserteilung möglich. In einem Gutachten der Monopolkommission wird deren Zeitmäßigkeit angezweifelt, etwa bestehen durch GPS in mobilen Geräten kaum noch Informationsasymmetrien zwischen Anbietern und Kunden durch mangelnde Ortskenntnis (vgl. Haucap et al. 2016). Nutzerfreundliche Taxivermittlung und Taxisharing können dazu beitragen, private Pkw zu reduzieren und multimodales Verhalten fördern.

Die Stärkung des ÖPV kann zudem durch häufig diskutierte Maßnahmen wie Ausbau, Modernisierung und Taktverdichtung stattfinden (vgl. Transitionspfad zur Stärkung des Umweltverbundes, Kapitel 7.3). Von Seiten der Carsharing-Unternehmen wurde in diesem Zusammenhang schon früh darauf hingewiesen, dass neben Öffentlichkeitsarbeit und Werbung bundesweit standardisierten Angeboten eine erhebliche Bedeutung zukommen kann. Durch sie könnten die Produkte und Dienstleistungen von Unternehmen der Sharing Mobility und ÖPV-Anbietern gemeinsam angeboten und abgerechnet werden (vgl. Behrendt 2000).

Von grundlegender Bedeutung sind außerdem höhere Kosten für Anschaffung und Besitz eines privaten Pkw, um zusätzliche Anreize zu bieten, sich gegen eine Anschaffung zu entscheiden. Denkbar sind hier Zulassungs- und höhere Umlaufsteuern für Pkw (vgl. Kapitel 8.3 und 9.3). Eine zeitliche Kopplung der Einführung dieser fiskalischen Instrumente zur Förderung autofreier Mobilität ist daher sinnvoll. Ein schrittweises Einführen vor 2025 hätte den Vorteil, dass sich die Verbraucherinnen und Verbraucher bereits mit Alternativen zum eigenen Wagen auseinandersetzen, bevor eine potenzielle Neuanschaffung konkret wird. Oder anders formuliert: Statt der Neuanschaffung eines Elektroautos sollte auch ein Abonnement des öffentlichen Verkehrs erwogen werden.

Gleichzeitig sind höhere Nutzungskosten für den motorisierten Individualverkehr insgesamt unabdinglich, um den öffentlichen Verkehr sowie nicht-motorisierte Verkehre zu stärken. Autofreie Haushalte denken stärker über ihre Mobilität nach, denn sie haben ein breiteres Verkehrsmittelportfolio. Gleichwohl muss es Anreize zur Reduzierung von Pkw-Fahrten geben, die aber bei zunehmender Verfügbarkeit von Sharing-Diensten sinken können. Solche Anreize werden im Transitionspfad zur Steuerung des MIV diskutiert (vgl. Kapitel 8.3).

## 6.4 Wirkungsumfang der Maßnahmen und Instrumente

Nutzerinnen und Nutzer von Carsharing positionieren sich in ihrem Mobilitätsverhalten zwischen dem Verhalten von Menschen, die ein eigenes Auto besitzen und solchen, die auf die Verfügbarkeit eines eigenen Wagens im Haushalt verzichten und gleichzeitig auch kein Carsharing nutzen.

Die mittlere Anzahl der Wege von Car-/Ridesharerinnen und -sharern wird in 2035 diejenige von Autobesitzerinnen und Autobesitzern heute sein. Sie liegt in 2035 also im Durchschnitt aller Wegezwecke und Altersgruppen etwas höher als bei Personen von Haushalten, die heute kein eigenes Auto besitzen und auch nicht auf Car-/Ride-/Taxisharing sowie Taxivermittlung zurückgreifen. Dies ist auf die Möglichkeiten der Digitalisierung zurückzuführen (Anzahl liegt zwischen 3,5 und 4 Wegen pro mobiler Person und Tag abhängig von der Personengruppe).

Die durchschnittliche Wegelänge der Nutzerinnen und Nutzer von Car-/Ridesharing und anderen digitalen Diensten in 2035 entspricht abhängig vom Wegezweck denjenigen von heutigen Haushalten mit Privatwagen oder denjenigen der nicht-besitzenden Haushalte:

- Bei den beruflichen Wegen gilt der gleiche Wert wie für Haushalte mit verfügbarem eigenem Pkw, denn hätten sie einen guten Wohnstandort für den Weg zur Arbeit mit dem Umweltverbund, dann wären sie nicht auf Car-/Ridesharing angewiesen und würden ausschließlich auf den Umweltverbund vertrauen.
- Bei den Wegezwecken Erledigung/Einkauf und Freizeit gilt der Wert für nicht-besitzende Haushalte, denn hier haben die Carsharerinnen und Carsharer ihre Priorität auf dem klassischen Umweltverbund und bevorzugen deshalb kurze Wege.

Bei der Verkehrsmittelwahl wird für die Wegezwecke Einkauf/Erledigung und Freizeit für die Haushalte, die sich Taxivermittlung, Taxi-/Car-/ und Ridesharing als Option offen halten, beim Anteil aller Verkehrsmittel ein Mittelwert zwischen Personen in Haushalten mit Autobesitz und Personen in Haushalten ohne Autobesitz und ohne Verwendung der genannten digitalen Dienste gebildet. Für den Wegezweck Arbeit wird für den MIV die Verkehrsmittelwahl von Personen in Haushalten ohne Autobesitz und ohne Verwendung der genannten digitalen Dienste angenommen. Ein eigener Pkw würde sich nämlich für (annähernd) tägliches Pendeln gegenüber Mietwagen und ähnlichen Optionen der Sharing Economy lohnen.

Das Szenario geht für alle Städte von gleichen Potenzialen aus (vgl. Sommer et al. 2016). Die Anteile der nutzenden Personen sinken im Szenario in den Räumen mit Verstärkeransätzen und ländlichen Räumen deutlich.

## 7 Stärkung des Umweltverbunds

### 7.1 Ausgangslage und Entwicklungstrends

Der Umweltverbund aus öffentlichem Verkehr, Fuß- und Radverkehr ist ein zentrales Element der Wende hin zu klimaneutraler Mobilität: Die Verkehrsmittel des Umweltverbunds sind emissionsfrei (Fuß- und Radverkehr) oder deutlich energieeffizienter als der Autoverkehr. Zudem machen sie Mobilität auch in anderen Dimensionen nachhaltig: sie sparen Verkehrsraum, verursachen weniger Unfälle und sind öffentlich zugänglich bzw. erschwinglich. Heute wird der Umweltverbund für 42% der Wege genutzt, deckt aber nur 21% des Verkehrsaufwands (in Personenkilometern) ab (infrac/DLR 2010; vgl. Abb. 7.1).

Das modale Verhalten wird einerseits über alltagsorganisatorische Anforderungen und individuelle Präferenzen geprägt, andererseits spielt das Angebot wie Raum- und Verkehrsinfrastruktur, sowie Verkehrsmittelverfügbarkeit eine wichtige Rolle für die Personenverkehrsnachfrage (vgl. z.B. SRU 2005, 71; Hunecke 2006, 31). Das Mobilitätsangebot limitiert die Nachfrage insbesondere deshalb, weil das Zeitbudget eines jeden Menschen für Mobilität sowohl historisch in Deutschland als auch in unterschiedlichen Ländern mit verschiedenen Kulturkreisen sehr konstant bei etwa 80 Minuten pro Tag liegt (vgl. infas/DLR 2010, 31 bzw. Schafer und Victor 2000, 175).

Die Verkehrsmittelwahl wird in Deutschland vom Pkw bestimmt. Der Motorisierte Individualverkehr (MIV) hat sowohl in Bezug auf die beförderten Personen (Verkehrsaufkommen) als auch in Bezug auf alle zurückgelegten Kilometer der verschiedenen Verkehrsträger (Verkehrsaufwand) die höchsten Anteile. Laut MiD 2008 wurden im Jahr 2008 58% aller gefahrenen Wege und 79% aller gefahrenen Kilometer mit dem Pkw zurückgelegt (vgl. Abb. 7.1).

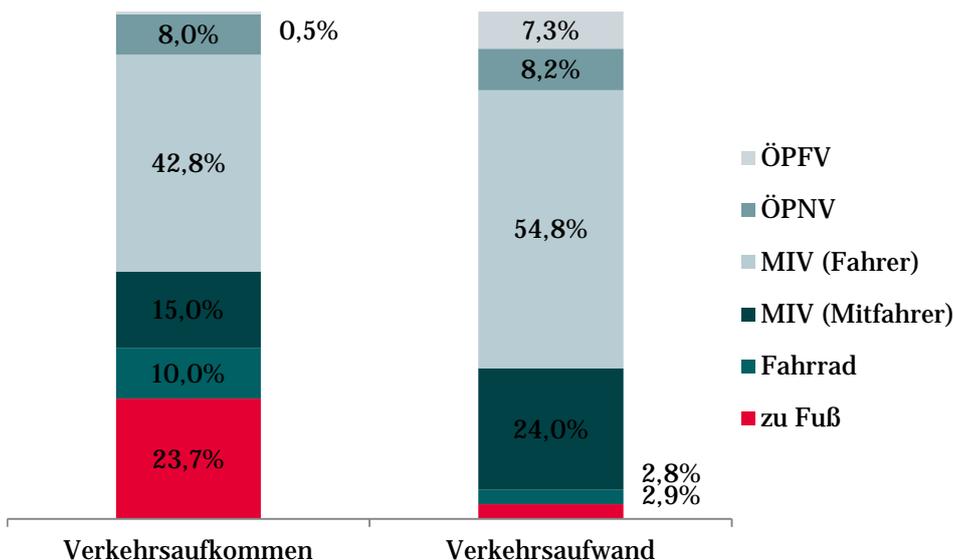


Abb. 7-1 Modal Split in Deutschland 2008. Quelle: infas/DLR 2010

Die Diskrepanz der Anteile ist mit der hohen durchschnittlichen Wegelänge bei Wegen mit dem Auto zu erklären. Im Gegensatz dazu sind Wege zu Fuß und mit dem Fahrrad tendenziell kürzer. Dennoch ist das Verlagerungspotenzial vom Pkw auf die-

se im Betrieb emissionsfreien Verkehrsträger sehr hoch, denn 61% aller Wege in Deutschland sind kürzer als fünf, 76% sind kürzer als zehn Kilometer. Das Auto hat auf Wegen bis fünf Kilometer einen Anteil von 44%, bei Wegen zwischen fünf und zehn Kilometern sind es 76% (vgl. infas/DLR 2010).

Tatsächlich zeichnet sich auf lokaler Ebene ein vorsichtiger Trend weg vom Auto ab. Das tägliche Verkehrsaufkommen, also die zurückgelegten Wege aller Personen, ist zwischen 2002 und 2008 moderat von 3,3 auf 3,4 Wege für einen durchschnittlichen Tag im Jahr gestiegen, wobei „die Zahlen des Motorisierten Individualverkehrs stabil bleiben und Fahrrad und Öffentlicher Verkehr zulegen“ (ebd., 23f.).

### Situation des Öffentlichen Personenverkehrs

In Ballungsräumen stellt der öffentliche Verkehr bereits heute ein Rückgrat der Personenmobilität dar. In wachsenden Städten wie beispielsweise Berlin, Köln, Stuttgart oder Düsseldorf stößt er sogar in Teilen an die Grenzen seiner Kapazität. Gleichzeitig wird bundesweit der Investitions- und Modernisierungsbedarf thematisiert (vgl. Hans Böckler Stiftung 2015). Anders stellt sich die Situation in vielen ländlichen Regionen dar, in denen der demographische Wandel zu einem Bevölkerungsrückgang und vor allem zu einem Sinken der Schülerinnen- und Schülerzahlen führt, welche die Wirtschaftlichkeit des ÖPNV mitbestimmen. Da der ÖPNV sich in der Regel nicht selbst trägt, ist er auf öffentliche Mittel angewiesen. Jedoch hält die Mittelausstattung insgesamt nicht mit den Wachstumsperspektiven und dem Anspruch an einen qualitativ hochwertigen ÖPNV Schritt. Zwar wurden die Regionalisierungsmittel zur Finanzierung des Schienenpersonennahverkehrs aufgestockt und für künftige Jahre dynamisiert; im öffentlichen Straßenpersonenverkehr mit Bussen und Bahnen fehlen jedoch zukunftsorientierte Finanzierungsmodelle (vgl. VDV 2016).

Vielen Städten in Deutschland und im europäischen Ausland ist es in der jüngeren Vergangenheit gelungen, durch die Ausweitung und Aufwertung des bestehenden Netzes den Anteil des ÖPNV an der Verkehrsmittelwahl deutlich zu erhöhen. Maßnahmen zum Ausbau waren die Ausweitung des Liniennetzes, die Ausweitung der Betriebszeiten und Erhöhung der Taktung. Maßnahmen zur qualitativen Verbesserung zielten in erster Linie darauf ab, den Zugang zum bestehenden Angebot zu erleichtern, beispielsweise durch die Erhöhung der Barrierefreiheit von Haltestellen und Fahrzeugen, die Einrichtung zusätzlicher Haltestellen im bestehenden Netz oder die Vereinfachung des Tarifsystems. So erreichte die Stadt Wien einen Anstieg ihres ÖPNV-Anteils insbesondere durch die Einführung eines Jahrestickets für 365 Euro (vgl. Tab. 7.1).

Tab. 7-1 Entwicklung des ÖPNV-Anteils in ausgesuchten Städten. Quelle: eigene Zusammenstellung

	Anteil ÖPNV		Anteil ÖPNV		Quelle
	Jahr	Prozent	Jahr	Prozent	
Wien	1993	29	2015	39	Website Wiener Stadtwerke
Freiburg	1982	11	2016	16	Website Freiburg
Zürich	2005	34	2010	39	Stadt Zürich 2012

Im Fernverkehr gibt es auf der Schiene und auf der Straße viele Verbindungen mit hoher Angebotsqualität. Die Bahn bietet gegenüber dem Pkw häufig deutlich schnellere Verbindungen. Die Wettbewerbsfähigkeit des Fernbusses gegenüber dem Pkw beruht aus Sicht vieler mobiler Menschen auf seinen Kostenvorteilen.

Als Schwäche des öffentlichen Fernverkehrs auf der Schiene gilt jedoch das Fehlen einer integrierten Netzplanung („Deutschlandtakt“), die kurze Umsteigeverbindungen zwischen Nah-, Regional- und Fernverkehr ermöglichen würde. Auch sind viele Städte nur unzureichend an das Netz des Schienenfernverkehrs angebunden. Hinzu kommen Zugausfälle und Verspätungen, die auf mangelnde Wartung und Instandhaltung von Fahrzeugen und Netz beruhen. In den 1990er Jahren waren viele Überholgleise und Weichen zurückgebaut worden.

### Situation des Radverkehrs

Bei der Förderung des Radverkehrs haben viele Kommunen in den vergangenen Jahren erhebliche Fortschritte gemacht, etwa durch die Aufstellung von Radverkehrsplänen, die Ausweisung von Radnetzen und den Neu- oder Ausbau von Abstellmöglichkeiten. Gefördert wurde diese Entwicklung durch den Nationalen Radverkehrsplan des Bundes, sowie durch Initiativen auf Länderebene.<sup>7</sup>

Zuwächse im Radverkehr sind oftmals auch das Ergebnis direkter Initiativen von Städten wie beispielsweise Münster oder Karlsruhe mit infrastrukturellen Maßnahmen als Basis (vgl. Tab. 7.2).

Tab. 7-2 Entwicklung des Fahrradanteils in ausgesuchten Städten. Quelle: eigene Zusammenstellung

	Anteil Fahrrad		Anteil Fahrrad		Quelle
	Jahr	Prozent	Jahr	Prozent	
<b>Vitoria-Gasteiz</b>	2002	1	2014	13	Stadt Vitoria-Gasteiz 2015
<b>Bremen</b>	2008	22	2013	25	Stadt Bremen 2013
<b>Münster</b>	2007	37	2013	39	Stadt Münster 2008 und 2014
<b>Karlsruhe</b>	2002	16	2012	25	Stadt Karlsruhe 2016
<b>Kopenhagen</b>	1998	30	2010	36	Stadt Kopenhagen 2012 (Arbeit/Ausb.)
<b>München</b>	2002	10	2008	14	Stadt München 2010 (MiD)
<b>Freiburg</b>	1982	15	2016	34	Website Freiburg

Dennoch schöpft das Fahrrad in der Alltagsmobilität der Menschen seine Potenziale in vielen Kommunen noch nicht aus. Oftmals fehlen integrierte Konzepte für ein Radwegenetz. Notwendige Maßnahmen werden nicht konsequent umgesetzt aus Angst, den Raum für den (fließenden oder ruhenden) Autoverkehr zu beschränken. Dies wäre jedoch notwendig, um Raum für den Radverkehr zu schaffen. Die Konsequenz sind geringe Radverkehrsanteile in vielen großen Städten – z.B. in denen des Ruhrgebiets, Wiesbaden, Saarbrücken und anderen (vgl. Jansen et al. 2016; BMVI 2014). Hier wird deutlich, dass es zur Anhebung des Radverkehrsanteils eines klaren

<sup>7</sup> Beispielsweise sind dies die Arbeitsgemeinschaft fußgänger- und fahrradfreundlicher Städte, Kreise und Gemeinden in Nordrhein-Westfalen (AGFS NRW), die Arbeitsgemeinschaft Fahrradfreundlicher Kommunen in Baden-Württemberg (AGFK BW) oder die Arbeitsgemeinschaft Fahrradfreundliche Kommunen in Thüringen (AGFK TH).

politischen Willens und der Verschiebung der Prioritäten in der kommunalen Verkehrsplanung hin zum Umweltverbund bedarf.

## 7.2 Zielzustand 2035

Der Umweltverbund aus öffentlichen Verkehrsmitteln, Rad- und Fußverkehr und Angeboten von Car- und Ridesharing wird so attraktiv gestaltet, dass ein großer Teil der Menschen in Deutschland auf den Besitz privater Pkw verzichtet oder den (eigenen) Pkw seltener nutzt als bislang.

Der öffentliche Personenverkehr in Deutschland wird flächendeckend so ausgestaltet, dass er eine vollwertige und attraktive Alternative zum Auto bietet. Die Verfügbarkeit und die Taktung der öffentlichen Verkehrsangebote steigt sowohl im Nah- als auch im Fernverkehr deutlich an. Zudem wird das öffentliche Verkehrsangebot komfortabler zu nutzen sein – Haltestellen sind durchgehend barrierefrei, sicher, sauber und mit Fahrradabstellanlagen ausgestattet. Die eingesetzten Fahrzeuge sind ebenfalls barrierefrei, hochwertig ausgestattet und bieten den Nutzerinnen und Nutzern genügend Ablagefläche für Gepäck, sowie Internet- und Stromanschlüsse.

Der Ausbau schienengebundener öffentlicher Verkehrsmittel ist im Gegensatz zum Ausbau des straßengebundenen ÖPVs in der Regel mit einem erheblichem Aufwand verbunden. Die vollständige Neuplanung und Realisierung von schienengebundenen ÖPV-Angeboten ist in der Regel nicht nur kostenintensiv, sondern erfordert auch zeitlichen Vorlauf.<sup>8</sup> Daher muss mit den Planungen bereits jetzt begonnen werden, um bis 2035 deutlich mehr Fahrgäste in einem dichteren Streckennetz transportieren zu können. Weniger zeitintensiv dürfte die Reaktivierung stillgelegter, aber noch nicht abgebauter Schienenstrecken oder Streckenabschnitte sein. Auch die Kapazitätserhöhung im bestehenden Schienennetz durch die Beseitigung von Engpässen oder den Bau von Weichen und Überholgleisen ist innerhalb einer Dekade möglich.

Darüber hinaus wird der öffentliche Verkehr bis 2035 individueller: Durch räumliche, organisatorische, bauliche, tarifliche und informatorische Verknüpfung lässt sich der ÖPNV unproblematisch in Wegekettensystemen mit Rad-, Car- und Ridesharing-Angeboten nutzen. Digitale Buchungsplattformen und Routenalgorithmen machen Tür-zu-Tür-Angebote flexibler Bedienformen möglich, die nicht nur als privatwirtschaftliche Ridesharing-Dienstleistungen organisiert werden müssen, sondern integraler Bestandteil des öffentlichen Verkehrs werden.

Schließlich sorgen neue Finanzierungs- und Ticketformen dafür, dass das Preisniveau niedriger ist als heute, sowohl im Nah- als auch im Fernverkehr, um den ÖPV gegenüber dem MIV zu attraktivieren. Einheitliche und einfach verständliche Preisstrukturen bauen Zugangshemmnisse zum öffentlichen Verkehr ab.

---

<sup>8</sup> Als Beispiel kann die Realisierung des Rhein-Ruhr-Expresses dienen. Erste Planungen begannen im Jahr 2005, mit der entgeltlichen Fertigstellung wird in 2030 bis 2035 gerechnet (vgl. VRR 2016).

Dass der Ausbau der Systeme auch in kurzer Zeit möglich ist, lässt sich an der Renaissance von Straßenbahnen (etwa in Frankreich und den USA) sowie der systematischen Einführung von Bus Rapid Transit in Lateinamerika und Asien beobachten.<sup>9</sup>

Im Radverkehr ermöglichen flächendeckende und sicher nutzbare kommunale Netze zügige und sichere Wege auch für Distanzen über 5 km. Hinzu kommt eine ausreichende Zahl witterungs- und diebstahlgeschützter Abstellanlagen sowohl in den Wohnvierteln als auch an anderen relevanten Stellen. Dies schafft Anreize für den Umstieg vom Auto auf den Umweltverbund auch in inter- und multimodaler Kombination.

### 7.3 Maßnahmen und Instrumente

#### Maßnahmen für den öffentlichen Personenverkehr

Zur dauerhaften Sicherstellung eines leistungsstarken und ausreichend finanzierten ÖPNV sind folgende Maßnahmen denkbar:

- Allgemeiner ÖPNV-Beitrag / Bürgerticket
- ÖPNV-Fonds aus Steuermitteln (Gewerbsteuer, Grunderwerbssteuer u.a.)
- Drittnutzerfinanzierung durch Arbeitgeber, Einzelhandel und Veranstalter
- Verwendung der Einnahmen eines Road Pricing für die Bereitstellung des Angebotes öffentlicher Verkehrsmittel.

Durch die Erhebung eines allgemeinen Beitrags von allen Bürgern würde es möglich, ein kostenreduziertes oder kostenfreies Bürgerticket einzuführen. Dies setzt Anreize zur Nutzung des ÖPNV. Zudem können Steuermittel, Erlöse aus einer Drittnutzerfinanzierung von Verkehrserzeugern sowie einer Pkw-Maut in die ÖPNV-Finanzierung fließen, die mit der Ausweitung des Angebots deutlich ansteigen muss.

Folgende Maßnahmen können das Angebot des ÖPV auf Kurz- und Langstrecken attraktivieren:

- Erhöhung der Netzdichte: Reaktivierung stillgelegter Strecken(abschnitte) und Haltepunkte, Ausbau der Straßenbahnnetze, Ausbau des Schienennetzes für Regional- und Fernverkehr.
- Fahrzeitverkürzungen durch Ausweitung des Angebots von Schnellbuslinien insbesondere dort, wo schienengebundene Angebote fehlen, sowie durch verstärkte Umwidmung von Verkehrsflächen für den Pkw in Busspuren.
- Ausweitung der Bedienzeiten in Früh- und Nachtstunden; Erhöhung der Taktung.
- Einführung flexibler Bedienformen in nachfrageschwachen Räumen in Verknüpfung zwischen öffentlichem Verkehr und Ridesharing-Angeboten.
- Verringerung von Verspätungen und Zugausfällen durch engere Wartungsintervalle für Fahrzeuge, die Beseitigung von Engstellen im Netz und die (Wieder)einrichtung von Überholstrecken und Weichen.
- Anschlussgarantie und kostenfreie Anschluss- bzw. Alternativangebote bei Verspätungen.

<sup>9</sup> Bus Rapid Transit steht im Kern für die infrastrukturelle Aufwertung städtischer Linienbusse, um einen höheren Qualitätsstandard als Vorgängerbuslinien zu erreichen. Ziel ist es, sich dem Qualitätsstandard von schienengebundenen Nahverkehrssystemen anzunähern, dabei aber die Kostenvorteile des straßengebundenen Verkehrsmittels Bus zu nutzen.

- Vereinfachung des Ticket- und Tarifsystems (siehe Bürgerticket) bzw. gemeinsame Informations- und Buchungsplattformen, integriertes Ticketing.
- Echtzeit-Information flächendeckend an Haltestellen sowie in allen Fahrzeugen über Fahrzeiten, Ankunftszeiten und Umsteigemöglichkeiten.
- Barrierefreie, saubere und sichere Haltestellen mit attraktiven Fahrradabstellanlagen, sowie barrierefreie Fahrzeuge, ausreichende Gepäck- und Radmitnahmemöglichkeiten.
- Intermodale Mobilitätsstationen mit ÖPV-Halten, Bike & Ride, Fahrradstationen, Car- und Bikesharing.

### Maßnahmen zur Förderung des Radverkehrs

Für mehr Nutzung des Fahrrads kommen insbesondere folgende Maßnahmen in Frage:

- Konsequente Schließung von Netzlücken durch die Bereitstellung großzügig dimensionierter, komfortabel zu nutzender und sicher befahrbarer Fahrradstreifen, die mindestens die Empfehlungen der FGSV für Radverkehrsanlagen umsetzen.
- Anlage von Fahrradstraßen und (weitere) Öffnung von Einbahnstraßen für den Radverkehr.
- Netzlücken können auch durch Tempo 30 an Hauptverkehrsstraßen geschlossen werden. Dies stärkt den Fahrradverkehr insbesondere durch die Erhöhung der Verkehrssicherheit. Es gibt zudem keine Hinweise für Verlagerungseffekte in untergeordnete Straßen (vgl. Rudolph 2014, Heinrichs et al. 2016).
- Bundesweiter Aufbau eines Radschnellwegenetzes für schnelle regionale Verbindungen mit dem Rad oder Pedelec. Distanzen von bis zu 20 km werden damit im Alltagsverkehr mit Rad oder Pedelec überbrückbar.
- Verbesserung des Fahrradparkens in Wohnquartieren und an Zielorten: Aufgebaut wird ein flächendeckendes Netz von Fahrradbügeln und -haltern, zudem werden sichere und wettergeschützte Abstellanlagen (Radstationen, Fahrradboxen, automatische Fahrradparkhäuser, ebenerdige Fahrradräume) an wichtigen Zielorten aufgestellt und für Neubauten verpflichtend.
- Stellplatzsatzungen für Fahrräder mit Vorgaben für qualitativ hochwertige Abstellanlagen.
- Fahrrad- und fußgängerfreundliche Lichtsignalanlagen bzw. sichere bauliche Gestaltung von Kreuzungs- und Querungspunkten für den nicht-motorisierten Verkehr. Dies beinhaltet beispielsweise ausreichend lange Räumzeiten und Fahrrad-schleusen.

Vergleichbar zu den Interventionen im ÖPNV sind auch zur Umsetzung der (hier exemplarisch genannten) Maßnahmen zur Förderung des Radverkehrs zusätzliche Flächen erforderlich. Diese stehen jedoch gerade in stark verdichteten Innenstadtbereichen kaum zur Verfügung. Daher ist eine Neuverteilung des Verkehrsraums, insbesondere eine Umwidmung von Verkehrsflächen für den fließenden und ruhenden Pkw-Verkehr in Verkehrsflächen für das Fahrrad unabdingbar und mit Abnahme der Nachfrage nach Pkw-Wegen auch sinnvoll.

## 7.4 Wirkungsumfang der Maßnahmen und Instrumente

Die Stärkung des Umweltverbundes führt zu einer Attraktivierung der Verkehrsmittelwahl des öffentlichen Nah- und Fernverkehrs sowie des Radverkehrs. Durch bessere Radwegenetze, dichtere öffentliche Verkehrsnetze, eine Erhöhung der Taktung und der Bedienzeiten verkürzen sich die Wegezeiten (einschließlich Wartezeiten) im Umweltverbund. Zugleich sorgt die Qualitätsverbesserung dafür, dass auch bislang wenig ÖPV- und Rad-affine Bevölkerungsgruppen die Verkehrsmittel des Umweltverbunds als attraktive Alternative zum Auto akzeptieren. Schließlich sinken die Nutzungskosten des ÖPV im Verhältnis zum MIV deutlich, wodurch weitere Anreize für eine häufigere Nutzung des öffentlichen Verkehrs gesetzt werden. Studien zeigen, dass es notwendig ist, mehrere dieser Einflussfaktoren gemeinsam zu verbessern, um eine substantielle Änderung der Verkehrsmittelwahl zu erreichen (vgl. Fearnley et al. 2016).

Dadurch steigt der Modal Split des öffentlichen Verkehrs von heute 8% auf insgesamt 19% der Wege; im verstärkten Raum, wo das Angebot besonders dicht ist und die Wegezeiten im ÖPV meist kürzer sind als mit dem Auto, erhöht er sich auf 24%, in Raumtypen mit Verstärkeransätzen auf 15%, im ländlichen Raum auf 12%. Die Steigerung orientiert sich an den von den Vorreiterstädten erreichten Möglichkeiten (vgl. Tab. 7.1).

Der Radverkehrsanteil steigt insgesamt von 10 Prozent auf 19 Prozent der Wege. Dabei fallen die Unterschiede zwischen den Raumtypen weniger stark aus – im verstärkten Raum liegt der Radverkehrsanteil bei 20%, im verstärkten und ländlichen Raum bei 17 bzw. 18%. Dies ähnelt dem derzeitigen Radverkehrsanteil von Städten und Landkreisen mit ambitionierter Radverkehrsförderung, liegt aber noch unter dem Niveau der Spitzenreiter (vgl. Tab. 7.2). Dies zeigt, dass eine langfristige Radverkehrsförderung im weiteren Zeitverlauf noch Potenzial für Steigerungen bietet.

Insgesamt verändert sich die Verkehrsmittelwahl der Personengruppen ohne Autoverfügbarkeit nur geringfügig. Allerdings wächst die Gruppe von Personen, die Car-sharing in Verbindung mit dem ÖPV nutzen und über kein eigenes Auto verfügen. Diese nutzen beispielsweise im verstärkten Raum in der Altersgruppe der 19 bis 30-jährigen den ÖPV für 55% der Arbeits- und Ausbildungswege, bei den 30 bis 65-jährigen werden 49,5% dieser Wege mit dem ÖPV zurückgelegt.

Doch auch die Menschen, die über ein Auto verfügen, steigen häufiger auf den ÖPV um – bei den beruflichen und Ausbildungswegen liegt der Modal Split des ÖPV im verstärkten Raum je nach Altersgruppe bei 21 bis 43 Prozent, womit sich der Anteil des ÖPV dort etwa verdoppelt.

Eine noch stärkere Entwicklung wird für den Radverkehr angenommen: Dort steigt etwa bei den Personen mit Autoverfügbarkeit der Wegeanteil im verstärkten Raum für Berufs-/Ausbildungswege sowie für Einkäufe und Erledigungen etwa um den Faktor zwei bis drei, mit leichten Unterschieden je nach Altersgruppe.

## 8 Steuerung des motorisierten Individualverkehrs

### 8.1 Ausgangslage und Entwicklungstrends

Die Pkw-Ausstattung der Haushalte in Deutschland hat sich nach dem 2. Weltkrieg rasant entwickelt und ist in den vergangenen Jahren nahezu stagniert. In den letzten beiden Jahren der Langzeiterhebung „Mobilität in Deutschland“ 2002 und 2008 waren jeweils 53% der Haushalte mit genau einem Pkw ausgestattet, der Anteil der Haushalte ohne Pkw sank von 19% auf 18%, entsprechend stieg der Anteil der Haushalte mit mindestens zwei verfügbaren Pkw von 28% auf 29% (vgl. infas/DLR 2010). Da gleichzeitig die Anzahl der Haushalte deutlich stieg und deren mittlere Größe sank, ein sich vermutlich fortsetzender Trend, hat der Motorisierungsgrad ausgedrückt in Pkw pro 1.000 Einwohnerinnen und Einwohnern in Deutschland auch im letzten Jahrzehnt deutlich zugenommen.

Waren es im Jahr 2000 noch 532 Pkw pro 1.000 Einwohnerinnen und Einwohnern, ist diese Zahl auf 548 im Jahr 2015 angestiegen. (vgl. Website KBA<sup>10</sup>). Unter den Gründen für den Pkw-Verzicht nennen die Hälfte aller autofreien Haushalte „zu teuer“ als Grund, während 21% ein Auto nicht für nötig halten oder bewusst verzichten. In den Städten liegt dieser Anteil mit 27% etwas höher (vgl. infas/DLR 2010). Für den Bereich Verkehr wurden in 2015 durchschnittlich 13% der Konsumausgaben aufgewendet, während Haushalte weniger für Freizeit, Unterhaltung und Kultur ausgaben, nämlich knapp 11% ihres Konsumbudgets von monatlich durchschnittlich 2.391 €. Gleichzeitig stiegen die Fixkosten für Wohnen, Energie, Wohnungsinstandhaltung rasant, nämlich von 738 € in 2010 auf 859 € in 2015 (vgl. Statistisches Bundesamt 2017).

Dies legt die Vermutung nahe, dass die Verbraucherinnen und Verbraucher auf strukturell höhere Preise für Pkw-Mobilität sensibel reagieren würden. Allerdings sind Kraftstoffpreise in ihrer jetzigen Größenordnung kein Hebel: Bei einem Fahrtaufwand eines privaten Pkw von derzeit jährlich etwa 12.000 km würde eine (jetzt hypothetisch angenommene) Verteuerung um 50 ct pro Liter bei einem (tatsächlichen) Verbrauch von sechs Litern auf 100 km monatlich 30 € ausmachen, dies entspricht nur etwa 1% der mittleren Konsumausgaben 2015.

Zur Einordnung: Laut ADAC haben sich die Kraftstoffpreise seit der Wiedervereinigung kaum erhöht, denn Diesel kostete im Jahresdurchschnitt 1991 1,07 € und lag im Mittel des Jahres 2016 bei 1,08 € (vgl. Website ADAC). Der höchste durchschnittliche Dieselpreis wurde mit 1,60 € im Jahr 2001 gemessen. Netzweite ÖPNV-Abonnements sind derzeit in den großen Verkehrsverbänden des Landes für monatlich etwa 150 € erhältlich, und eine Abschaffung des eigenen Pkw würde entsprechend großen finanziellen Spielraum hinterlassen.

---

<sup>10</sup> Aufgrund einer statistischen Umstellung sind die Werte seit dem Jahr 2008 nicht mehr vollständig mit denen früherer Jahre vergleichbar. So wurden bis 2007 vorübergehend abgemeldete Fahrzeuge dem Bestand zugerechnet. Das geschieht seit 2008 nicht mehr. Ohne diese Änderung in der Statistik würde der gegenwärtige Motorisierungsgrad und somit auch der Anstieg im Vergleich zu 2000 auf Basis dieser Quellen noch höher ausfallen und läge 2015 rechnerisch laut Umweltbundesamt bei rund 600. Diese Zahl schließt gewerbliche Halter, sowie als Saisonwagen oder Oldtimer angemeldete Autos ein. Demgegenüber hat die Paneluntersuchung „Mobilität in Deutschland“ im Jahr 2008 458 Wagen pro 1000 Einwohnerinnen bzw. Einwohnern erfasst, die privaten Haushalten zur eigenen Nutzung zur Verfügung stehen. Mit dieser letzteren Zahl wurde im Szenario gerechnet.

## 8.2 Zielzustand 2035

Im Jahr 2035 genießen die Bewohnerinnen und Bewohner der Städte erhebliche finanzielle Vorteile, wenn sie autofrei leben. Gleiches gilt auch für die Bürgerinnen und Bürger von weniger dicht besiedelten Räumen, allerdings mit der Einschränkung, dass hier der Umweltverbund nicht immer die (häufig subjektiven) Mobilitätsbedürfnisse befriedigen kann.

Eine deutliche Senkung des Verkehrsaufwandes kann der mobile Mensch aber nicht nur durch einen Verzicht auf ein eigenes Auto erreichen, sondern abhängig von den eigenen Mobilitätsbedürfnissen und raum- bzw. infrastrukturellen Gegebenheiten auch durch den Verzicht auf bestimmte Fahrten mit dem Pkw.

Viele Wohnquartiere insbesondere in den Innenstädten werden auto- und autoverkehrsfrei sein. Es findet praktisch kein Parken mehr im öffentlichen Straßenraum statt. Dieses erfolgt in Quartiersgaragen am Rande der Wohnquartiere. Die Straßen werden (wieder) vom fast ausschließlichen Verkehrsraum zu einem Raum sozialer Interaktion und hoher Aufenthaltsqualität, in denen sich Kinder, Jugendliche, Erwachsenen und ältere Menschen aufhalten. Praxisbeispiele zeigen, dass dieser Gewinn an Lebensqualität die Bürger überzeugt und den vermeintlichen Komfortverlust durch die geringere Nutzung des Pkw mehr als kompensiert (vgl. Greenpeace 2016).

## 8.3 Maßnahmen und Instrumente

Die Wirkung der Kosten von Fahrten mit dem Pkw können abhängig von der Ausgestaltung unterschiedliche Wirkungsmechanismen hervorrufen. Ein Anstieg der Kosten für die fossilen Kraftstoffe Diesel und Benzin kann entscheidend die Flottenstruktur verändern, wenn der mobile Mensch sich wegen (zu) hoher Pkw-Fahrtenkosten für Alternativen interessiert. Da für eine vollständige Dekarbonisierung aber vor allem auch der Verkehrsaufwand sinken muss, um Energieproduktion insgesamt zu senken, bleiben Instrumente wie die heutige Mineralölsteuer selbst bei einer deutlichen Anhebung hinter der Ambition zurück.

Die Renewbility III-Studie hat in verschiedenen Szenario-Varianten für 2030 die Pkw-Fahrtenkosten variiert (vgl. Zimmer et al. 2016). Es zeigt sich, dass der Verkehrsaufwand in vier von fünf Varianten ähnlich hoch ist (zwischen 1.131 und 1.115 Milliarden Pkm in Deutschland), sich in diesen Varianten aber die Pkw-Flotte deutlich unterscheiden kann. Je nach Kostenstruktur werden nämlich Verbrennungsmotoren stärker durch Elektromotoren ersetzt. Erst wenn über eine Pkw-Maut die Pkw-Fahrtenkosten deutlich angehoben werden, nämlich auf 15,7 ct pro km statt 9,8 ct bis 11,3 ct in den anderen vier Varianten, sinkt der Verkehrsaufwand aller Pkw auf 997 Milliarden km.

In der Studie „Städte und Klimawandel: Ruhrgebiet 2050“ wurden mehrere Szenarien zur Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Verkehrsbereich des Ruhrgebiets bis 2050 erstellt. Das Szenario, in dem die Treibstoffpreise von 2015 bis 2050 um 4% pro Jahr zunehmen, reduziert die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Verkehrs (t/E/J) im Jahr 2050 um rund 40 Prozent im Vergleich zu dem Szenario, in dem die Treibstoffpreise um 1% pro Jahr zunehmen (vgl. Schwarze et al. 2017).

Die im Folgenden aufgelisteten Instrumente sind denkbar, um die externen Kosten des Pkw an seine Nutzerinnen und Nutzer weiterzugeben und damit Anreize für die Verlagerung von Konsumausgaben zu geben. Haushalte können sich häufiger für eine Kombination aus Carsharing, öffentlichem Verkehr und nichtmotorisiertem Verkehr entscheiden, sodass die Motorisierung insgesamt sinkt:

- Eine Zulassungssteuer für Pkw, wie sie in unterschiedlicher Höhe bereits in vielen europäischen Ländern erhoben wird.
- Eine schrittweise Weiterentwicklung der Kfz-Steuer hin zu einer Pkw-Umlaufsteuer. Zunächst erfolgt eine starke, dynamische Erhöhung der Kfz-Steuer auf Basis von CO<sub>2</sub>-Emissionen und Schadstoffklassen; Gewicht und Größe werden irrelevant. Ab 2025 richtet sich die neue Pkw-Umlaufsteuer nach dem Energieverbrauch des Wagens, während CO<sub>2</sub>-Emissionen keine Rolle mehr spielen.
- Zudem werden – in der Phase bis 2025 – fossile Kraftstoffe verteuert.
- Eine distanzbasierte Pkw-Maut für alle Straßen im Verantwortungsbereich des Bundes und der Länder. Denkbar sind hier unterschiedlich hohe Entgelte in Agglomerationen im Vergleich zu dünner besiedelten Gebieten, um sozialen Ausgleich zu schaffen: Wege, auf denen keine sinnvolle Alternative mit dem ÖPV besteht, bleiben auch mit dem Auto erschwinglich, während im mit dem öffentlichen Verkehr gut erschlossenen Raum höhere Tarife anfallen. Die Möglichkeiten von Ortserkennung und digitaler Datenübermittlung und -abrechnung können hier ausgeschöpft werden, die Kfz-Flotte muss im vorliegenden Szenario im Zeitraum 2025 bis 2035 ohnehin nahezu vollständig ausgetauscht werden.

Auf kommunaler Ebene sind darüber hinaus folgende Maßnahmen wirksam (vgl. z.B. Reutter und Reutter 2016; Schwarze et al. 2017):

- Reduzierung von Fahrspuren für den Straßenverkehr. Sie sollten in Spuren für Fuß- und Radverkehr umgewidmet werden oder könnten den Fahrzeugen des ÖPNV zur Verfügung stehen (vgl. Kapitel 7.3).
- Reduzierung von Parkplätzen und flächendeckendes Parkraummanagement, sowie Reduzierung von Stellplätzen durch Änderung/Einführung entsprechender Satzungen bzw. ggf. Änderung der jeweiligen Landesbauordnung, sofern diese eine konsequente Reduktion von Stellplätzen noch nicht vorsieht. Da Maßnahmen im Neubau eine langfristige Wirkung entfalten, sollten die zuständigen Behörden an dieser Stelle schnellstmöglich tätig werden.
- Eine Höchstgeschwindigkeit von 30 km/h in Städten. In geschlossenen Ortschaften sollte flächendeckend Tempo 30 gelten, auch auf Hauptverkehrsstraßen. Ein Herabsetzen der Geschwindigkeitsbegrenzung von 50 auf 30 km/h dient in erster Linie der Verbesserung der Verkehrssicherheit und des Lärmschutzes. Es kann zusätzlich zu Verlagerung vom MIV auf E-Bikes bei Personen führen, die Spaß an schnellem Fahren haben (vgl. Rudolph 2014, sowie Kapitel 7.3).
- Ausweisung/Erweiterung von autofreien Innenstädten bzw. Fußgängerzonen.
- Erhebung einer City-Maut. Bei der Einführung einer City-Maut werden die CO<sub>2</sub>-Emissionen verringert, indem die gefahrenen Kilometer von mautpflichtigen Fahrzeugen abnehmen. So gingen die gefahrenen Kilometer in London beispielsweise nach Einführung der City-Maut innerhalb der Gebührenzone um 27 Prozent zurück, in Stockholm um 19 Prozent (Hautzinger et al. 2011: 38). Für Hamburg ist

in einer Potenzialstudie ein Minderungspotenzial der verkehrsbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen von 3,3 bis 4,0 Prozent berechnet worden (ebd., 211).

#### **8.4 Wirkungsumfang der Maßnahmen und Instrumente**

Die Restriktionen und Verteuerungen im MIV führen in erster Linie zu deutlich geringerem Pkw-Besitz, insbesondere in den verstädterten Räumen, aber auch in den Räumen mit Verstärkeransätzen und im ländlichen Raum.

Der höchste Anteil von Personen mit Autobesitz im Haushalt liegt derzeit bei Familien mit Kindern (bis 97%), die Gruppe der 19 bis 30 Jährigen besitzt derzeit selbst in den Städten bzw. verstädterten Gebieten zu 82% ein Auto. Hier werden die Anteile deutlich sinken: Der niedrigste Anteil liegt bei den in 2035 19 bis unter 30-Jährigen in den verstädterten Gebieten: 27% leben dort in einem Haushalt mit eigenem Auto. Entsprechend steigt der Anteil der Car-/Ridesharer, die Zahl der autolosen Haushalte bleibt gegenüber 2015 konstant. Die Anteile von Haushalten im Besitz von mindestens einem Privatwagen steigen, je weniger dicht besiedelt die Räume sind, sowie über die Altersgruppen. Lediglich bei den ganz Alten (ab 75 Jahren) sinkt die Autoverfügbarkeit wieder.

Im Vergleich zu anderen Altersgruppen nutzen wenige Rentnerinnen und Rentner die digitalen Dienste, die Zahl der komplett autofreien Haushalte bleibt in dieser Altersklasse gegenüber 2015 konstant. Einerseits wird nämlich über den Eintritt in eine neue Lebensphase (Rente) das Auto als nötige Mobilitätsoption hinterfragt, andererseits sind die digitalen Dienste für diese Gruppe im Gegensatz zu den jüngeren Personen zumindest nicht schon das ganze Leben präsent.

Die Verkürzung der Wegelängen wird im Wesentlichen durch verdichtete, nutzungsgemischte Raumstrukturen erreicht, wobei die Erhöhung der Kosten für Anschaffung und Nutzung eines Pkw dazu beiträgt (vgl. Kapitel 5.4).

## 9 Weiterentwicklung von Fahrzeugeffizienz, Antrieben und Kraftstoffen

### 9.1 Ausgangslage und Entwicklungstrends

Im Jahr 2016 wurden insgesamt 3,4 Millionen Pkw neu zugelassen und somit 4,5% mehr als im Vorjahr. Benzin- (52,1%) und Dieselmotoren (45,9%) dominierten weiterhin den Automobilmarkt, wobei der Anteil der dieselpbetriebenen Fahrzeuge um mehr als zwei Prozentpunkte abnahm. Die Anzahl von neuen Pkw mit Elektroantrieb stieg von 46.000 auf 59.000 und blieb damit auf einem geringen Niveau, wobei die Neuzulassungen rein elektrisch betriebener Pkw sogar sank (11.410; -7,7%). Insgesamt befanden sich 2016 etwa 200.000 Pkw mit (Plug-in-) Hybrid oder reinem Elektroantrieb im deutschen Bestand.

Abbildung 9.1 stellt die Marktentwicklung von Pkw in Deutschland seit 2008 dar. Die Pkw-Bestandsflotte lag 2016 bei 45 Mio. Fahrzeugen, wobei das Segment der mittelgroßen Pkw mit 23,6 Mio. Fahrzeugen den größten Anteil ausmachte (52%). Innerhalb dieser Segmentklassen erfuhr das Segment der Geländewagen das stärkste Wachstum. Gab es 2008 noch 1,2 Mio. dieser Fahrzeuge, wuchs die Zahl bis 2016 auf 3,7 Mio. Aufgrund des starken Wachstums führte das KBA 2012 das neue Segment der „Sports Utility Vehicles“ (SUV) ein. In diesem Segment werden kleinere Geländewagen geführt.

In der Abbildung werden Geländewagen bis 2012 als mittelgroße Pkw subsummiert, ab 2013 als große Wagen, während das neue Segment der SUV im mittleren Segment erfasst ist. Beispielsweise firmieren der Audi Q7 oder der Porsche Cayenne in dieser Darstellung bis 2012 als mittelgroße und seit 2013 als große Fahrzeuge.

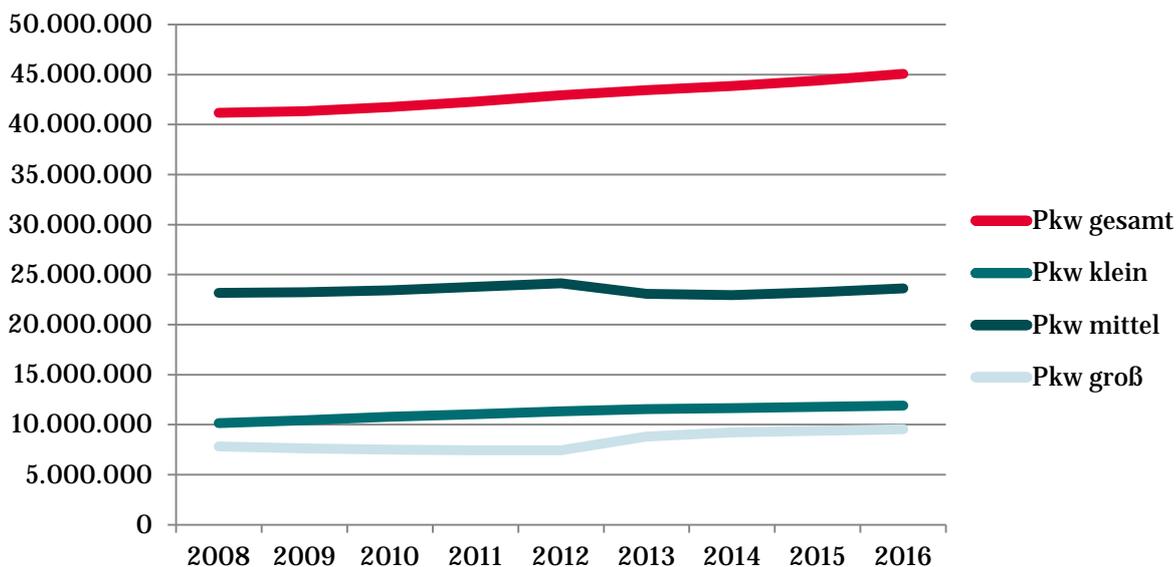


Abb. 9-1 Bestandsentwicklung Pkw in Deutschland. Quelle: Website KBA, eigene Zusammenstellung

Pkw bestimmen nach wie vor das modale Verhalten (vgl. Kapitel 7.1) in Deutschland und damit auch die Bilanz klimarelevanter Emissionen im Sektor Personenverkehr. Dabei schlägt einerseits mit jährlich 1,76 Mio. gefahrenen Kilometern der hohe Ver-

kehrsaufwand zu Buche (vgl. infas/DLR 2010), andererseits der nach wie vor hohe spezifische Kraftstoffverbrauch und die damit einher gehenden CO<sub>2</sub>-Emissionen pro zurückgelegtem Fahrzeugkilometer.

Die Personenverkehrsaufwände des MIV in Deutschland haben sich zwischen 1960 und 2010 nahezu verfünffacht. Da die Fahrzeugbesetzung in diesem Zeitraum abnahm, war der Fahraufwand aller deutschen Pkw und Krafträder in 2010 gegenüber 1960 sogar sechsmal höher (vgl. Knörr 2013).

Gleichzeitig sinken die spezifischen Emissionen nur langsam. So hatte sich die europäische Automobilindustrie 1998 dazu verpflichtet, den durchschnittlichen Flottenverbrauch *neu zugelassener* Pkw gemäß eines genormten Fahrzyklus von damals über 190 auf 140 g CO<sub>2</sub> pro km in 2009 zu senken. In 2010 lag der so berechnete durchschnittliche CO<sub>2</sub>-Wert eines neuen Pkw in Deutschland mit 151,7 g/km deutlich über dieser Zielmarke (vgl. Thordsen und Bückle 2011).

Geht man von der Pkw-Bestandsflotte von 2014 mit entsprechendem Anteil der Kraftstoffe Diesel und Benzin aus, sowie einen durchschnittlichen Besetzungsgrad von 1,5 Personen, dann werden in Deutschland gemäß genormten Fahrzyklus 142 g CO<sub>2</sub> pro Personenkilometer emittiert (also rund 6% weniger als im Jahr 2010), dies entspricht einem Benzinäquivalent von 6,1 Litern pro 100 km (vgl. Abb. 9.2). Die Fahrzeuge des ÖPNV zeichnen für ungefähr halb so viele spezifischen Emissionen verantwortlich, der (landgebundene) ÖPFV ist insbesondere aufgrund besserer Besetzungsgrade noch klimafreundlicher.

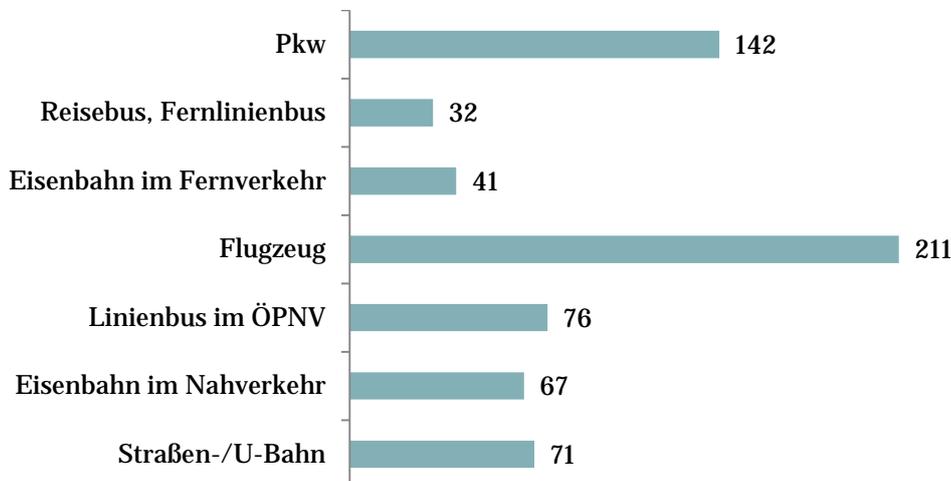


Abb. 9-2 Spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen (g/Pkm) in Deutschland 2014. Quelle: Website UBA

Da es den beschriebenen Trend zu größeren Pkw gibt, sinken auch die spezifischen Emissionen der *Neuzulassungen* seit 2010 nur langsam und lagen in 2015 bei 128,9 g CO<sub>2</sub> pro km (vgl. Website KBA). Zu beachten bei den genannten Zahlen ist allerdings sowohl für die Neuzulassungen als auch für die Bestandsflotte der Unterschied zwischen Verbrauch gemäß genormtem Testzyklus und tatsächlichem Verbrauch.<sup>11</sup> Laut

<sup>11</sup> Die Operationalisierung des Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) bietet festgelegte Fahrzyklen und Flexibilitäten, die von den Herstellern zunehmend ausgenutzt wurden, etwa Abkleben von Fugen der Außenhülle oder Verwendung des minimalen Fahrzeuggewichtes. Dadurch wuchs die Diskrepanz des Verbrauchs bei der Zulassung (bei der der NEFZ Anwendung findet) und dem tatsächlichen Verbrauch von 10% in 2001 auf 40% in 2015 (vgl. Tietge et al. 2016).

Statistischem Bundesamt hat sich der tatsächliche Verbrauch von Pkw in den vergangenen 15 Jahren nicht wesentlich verändert, er lag in 2001 bei 7,1 und in 2015 bei 6,8 Litern auf 100 km. Hier kompensieren sich Effizienzfortschritte und der Trend zu größeren, leistungsstärkeren Pkw größtenteils.

Zusammengefasst lässt sich für die drei zentralen Einflussgrößen folgendes feststellen:

- Größenklassen: leichte Tendenz zu größeren Autos aufgrund eines Trends zum Geländewagen
- Kraftstoffverbräuche: annähernde Stagnation aufgrund der Kompensation gegenläufiger Trends
- Antrieb (Kraftstoffart): weitere Dominanz von Diesel und Benzin

Es ist zu hinterfragen, in wie weit dieser „ingeschwungene“ Zustand zukünftig Bestand haben wird. Aufgrund der hohen Innovationsdynamik im System kann sich der jetzige Trend in Zukunft sehr schnell und sehr radikal verändern. Einer Recherche von Bloomberg zu Folge könnten die Gesamtbetriebskosten (Total Cost of Ownership, TCO) von batterie-elektrisch betriebenen Pkw ohne Berücksichtigung von Beihilfen bis 2022 unter diejenigen eines Pkw mit Verbrennungsmotor fallen. Dies könnte einen Wendepunkt im Verkauf von Neuwagen bedeuten und erhebliche, sich selbstverstärkende Impulse auslösen. Bis dahin rechnet Bloomberg allerdings mit einem Marktanteil von batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) von nur 5% der Neuzulassungen (vgl. Morsy 2016).<sup>12</sup>

## 9.2 Zielzustand 2035

Welche Antriebsformen und Kraftstoffe sich zukünftig durchsetzen werden, hängt von zahlreichen Einflussfaktoren ab und kann hier nicht im Detail diskutiert werden. Für die Modellberechnungen ist hier entsprechend eine mögliche Entwicklung illustrativ für andere mögliche Entwicklungen betrachtet worden. Das vorliegende Szenario setzt im Bereich des Personenverkehrs auf eine weitgehende Elektrifizierung mit dem Einsatz von Batteriefahrzeugen. Für den Güterverkehr wird eine auf Methan (zunächst in Form von Erdgas, später in Form eines synthetischen Gases) basierende Strategie verfolgt.

Die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen der (motorisierten) Fahrzeuge müssen vor dem Hintergrund der angestrebten Dekarbonisierung bis 2035 auf nahezu Null sinken (tank-to-wheel, TTW). Hierfür wird, den Annahmen des Szenarios folgend, die Pkw-Flotte zu 98% und damit fast vollständig auf Elektroantriebe umgestellt. Die verbleibenden 2% sind Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren. Diese sind vor 2025 zugelassene Fahrzeuge, die noch im Bestand verblieben sind, bzw. Fahrzeuge für spezifische Sonderanwendungen. Sie werden soweit möglich mit synthetischen strombasierten Kraftstoffen und damit ebenfalls weitgehend klimaneutral betrieben. Das vorliegende Szenario trifft zudem die Annahme, dass der für die Pkw-Flotte benötigte Strom primär in Deutschland bereitgestellt werden soll. Dies erhöht den Druck, auf eine

---

<sup>12</sup> Morsy (Bloomberg) beobachtet unter anderem die Preisentwicklung von Lithium-Ionen-Batterien verschiedener Hersteller und erstellt auf dieser Basis Lernkurven. Bei den TCO wird ein Rohölpreis von unter 70 \$ pro Barrel unterstellt.

weitgehend direkte Elektrifizierung zu setzen. Eine elektrifizierte Flotte senkt im Vergleich zu Szenarien, die in großem Maße auf Power-to-Gas oder Power-to-Liquid Strategien setzen, aufgrund der geringeren Umwandlungsverluste den Bedarf an erneuerbaren Energien deutlich. Da die Menge an inländisch zur Verfügung stehenden erneuerbaren Energien begrenzt ist und auch in anderen Sektoren benötigt wird, muss zusätzlich der Wirkungsgrad des Fahrzeuggesamtsystems steigen, um Ressourcen und Landschaftsverbrauch (auch außerhalb Europas) zu schonen. Dies wird sowohl durch technische Maßnahmen als auch eine bedarfsgerechte Verminderung der Fahrzeuggrößen erreicht. Der verbleibende Energieaufwand kann so durch erneuerbare Energien (in erster Linie Strom) bereitgestellt werden. Von der Politik werden dafür die entsprechenden Rahmenbedingungen geschaffen.

Ein deutlicher Schwerpunkt liegt im Dekarbonisierungsszenario 2035 für den Pkw-Verkehr somit nicht zuletzt aus Gründen der Energieeffizienz auf einer direkten Elektrifizierung (vgl. Abb. 9.3). Dies umfasst auch H2-Hybrid-Fahrzeuge, die eine wasserstoffbetriebene Brennstoffzelle als Range Extender für die Fahrzeugbatterie nutzen können.

Die Batteriefahrzeuge erreichen ab 2025 eine deutlich verbesserte Reichweite und sind somit vollständig alltagstauglich, zumal ein flächendeckendes Netz an Schnellladestationen zur Verfügung steht, wo die Fahrzeug-Batterien innerhalb von einer halben Stunde vollständig aufgeladen werden können. Damit die Batteriefahrzeuge nicht nur neue Verbraucher darstellen, die die Dekarbonisierung des Stromsektors sogar verlangsamen können, werden sie Teil des Stromsystems. Neben gesteuertem Laden wird deshalb auch eine Rückspeisung von in den Batterien gespeichertem Strom ermöglicht, um Minutenreserve im Bereich der Stromversorgung insbesondere im Bereich der Verteilnetze zur Verfügung zu stellen.

Neben der dezentralen Bereitstellung von Fahrstrom werden im Dekarbonisierungsszenario entsprechend Wasserstoff und (primär für den Güterverkehr) synthetische Kraftstoffe (inkl. synthetische Gase) zentral bereitgestellt. Die Einführung von Wasserstoff-Brennstoffzellenfahrzeugen, die spätestens ab 2025 verstärkt in den Markt kommen müssten, ist technisch zwar anspruchsvoll, birgt aber Effizienzvorteile gegenüber der Verwendung von Verbrennungsmotoren und dem Einsatz von synthetischen (ebenfalls strombasierten) Kraftstoffen. Durch die relativ hohe Systemeffizienz lassen sich auch hohe inländische Versorgungsgrade und damit eine geringere Importabhängigkeit realisieren als etwa beim Einsatz von flüssigen Kraftstoffen.

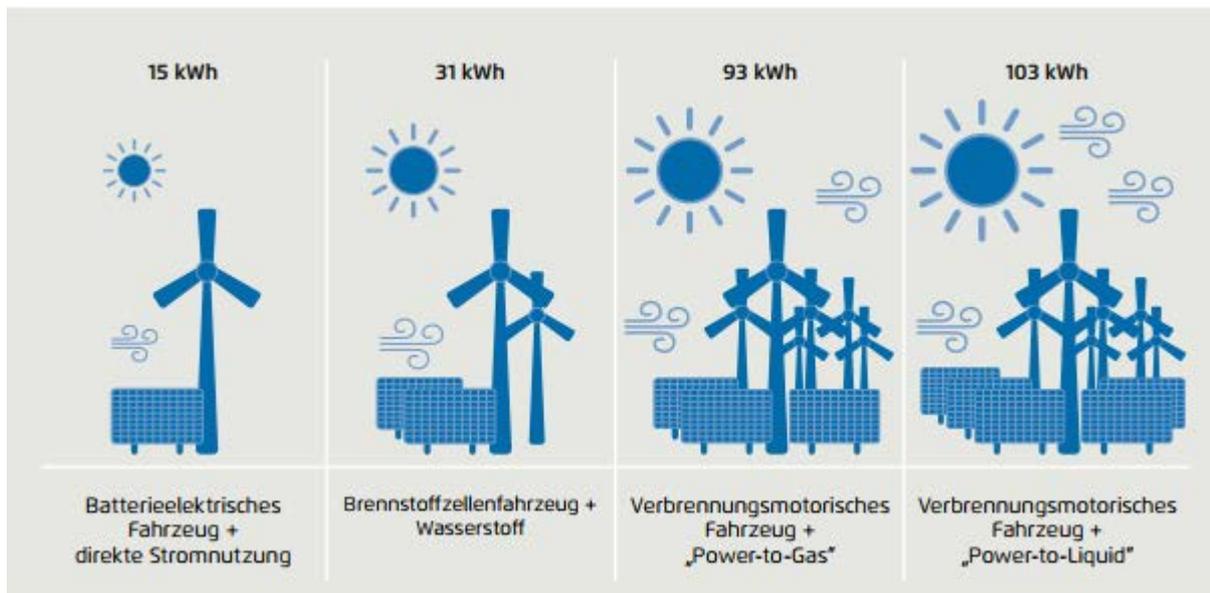


Abb. 9-3 Strombedarf aus erneuerbaren Energien für verschiedene Antriebs- und Kraftstoffkombinationen (pro 100km). Quelle: Agora Verkehrswende 2017 auf Basis von DLR/ ifeu/ LBST/ DFZ 2015

Im Güterverkehr kommt primär Methan als Kraftstoff zum Einsatz. Methan hat den Vorteil eines gegenüber Mineralöl geringen spezifischen Kohlenstoffgehalts und einer sauberen Verbrennung. Grundsätzlich kann die Klimabilanz von Methan durch die Einspeisung von Methan biogenen Ursprungs verbessert werden, wobei berücksichtigt werden muss, dass die nachhaltigen Biomassepotentiale begrenzt sind.

Durch den hohen Wasserstoffanteil und seine Gasförmigkeit bei Umgebungstemperatur weist Methan zwar eine ungünstigere Energiedichte auf als flüssige Kraftstoffe, durch Kompression (Compressed Natural Gas: CNG) wird dennoch eine akzeptable Energiedichte erreicht. Methan kann zudem in nur leicht modifizierten Ottomotoren eingesetzt werden. Im Gegensatz zu elektrischen Antrieben gibt es zwar weiter lokalen Emissionen (Partikel und  $\text{NO}_x$ ), diese sind aber deutlich günstiger als etwa bei der Verbrennung von Otto- oder gar Dieselmotoren.

Mit Blick auf die Klimaschutzziele ist es aber notwendig, dass die Versorgung der Gasfahrzeuge bis 2035 schrittweise auf einen regenerativ erzeugten (synthetischen) strombasierten Kraftstoff umgestellt wird (Power-to-Gas). Verfolgt man für den Verkehrsbereich – getrieben durch die Notwendigkeit, einen adäquaten Beitrag zur Erreichung des  $1,5^\circ\text{C}$  Ziels leisten zu müssen – die Zielsetzung der Dekarbonisierung bis zum Jahr 2035, müssten ältere Lkw mit Verbrennungsmotor entweder sukzessive bis zu diesem Zeitpunkt aus dem Bestand gehen oder auf alternative Antriebe (respektive Verträglichkeit alternativer Kraftstoffe) umgerüstet werden.

Wie erwähnt, sind aber grundsätzlich auch andere Pfade auf Basis flüssiger synthetischer Kraftstoffe für die Zukunft denkbar. Beispiele hierfür wären Methanol (Einsatz in Brennstoffzellen oder Verbrennungsmotoren) oder der Einsatz von synthetischem Diesel in Dieselmotoren (wie auch analog im Lkw-Verkehr). Entscheidende Faktoren für die Auswahl des Kraftstoffs der Zukunft sind neben den Herausforderungen der Dekarbonisierung nicht zuletzt der Ausstoß an klassischen Schadstoffen, die Akzep-

tanz der Nutzer, der Infrastrukturbedarf sowie grenzüberschreitende Entwicklungen. Bei den flüssigen synthetischen Kraftstoffen entstehen auch weiterhin  $\text{NO}_x$ -Emissionen. Das Emissionsniveau ist im Vergleich zu heutigen Kraftstoffen allerdings deutlich günstiger. Nicht zu vernachlässigen sind in Bezug auf flüssige synthetische Kraftstoffe übergreifende Effekte, die hier aber nicht weiter vertieft werden können. Dies gilt in erster Linie für den bei einer flächendeckenden Einführung hohen Strombedarf sowie die damit verbundene Notwendigkeit Strom oder Kraftstoffe zu importieren.

### 9.3 Maßnahmen und Instrumente

Folgende Maßnahmen können dazu beitragen, eine Entwicklung zu generieren wie sie in Kapitel 9.2 beispielhaft unterstellt worden ist:

Erstens kann ein Verbot von Neuzulassungen von Pkw mit Verbrennungsmotoren nach 2025 erwirkt werden. Alternativ können die Flottenemissionslimits der EU Neuwagen verschärft und bis zum Jahr 2025 auf Null zurückgeführt werden. Es wird davon ausgegangen, dass der Pkw-Bestand entsprechend der Erneuerungszyklen dann bis 2035 weitgehend auf Pkw mit elektrischen Antrieben umgestellt werden kann.

Zweitens und als kurzfristig wirkende Maßnahmen wird im Szenario die pauschale Versteuerung von Dienstwagen weiterentwickelt. Dienstwagen sind Firmenwagen, die dem Arbeitnehmer auch zur privaten Nutzung zur Verfügung gestellt werden. Für die private Nutzung ist monatlich im Rahmen der Einkommensteuer 1% des Listenpreises des Fahrzeugs bei Erstzulassung als geldwerter Vorteil zu versteuern.

Diese niedrige pauschale Besteuerung ist ein Anreiz für die Arbeitgeber, einen Teil des Gehalts an den Arbeitnehmer in Form von Dienstwagen auszuzahlen. Für die Arbeitnehmer hat es den Vorteil, keinen Privatwagen kaufen zu müssen und, wenn der Arbeitgeber zusätzlich eine Tankkarte stellt, können auch Fahrten umsonst sein. Auf diese Weise kommen vor allem viele große Pkw in den Bestand, deren Anschaffung und Wartung für die rein private Nutzung deutlich teurer ist. Die Wagen werden häufig nach etwa drei Jahren verkauft und prägen damit den Gebrauchtwagenmarkt. Ziel einer Reform sollte sein, dass es für den Nutzer oder die Nutzerin keinen ökonomischen Unterschied macht, ob ein Wagen privat gehalten wird oder als Dienstwagen zur Verfügung steht. Dadurch werden die Autos kleiner.

Drittens führt eine Staffelung der bereits diskutierten Pkw-Zulassungs- bzw. Registrierungssteuer nach Energieverbrauch des Wagens zu geringeren  $\text{CO}_2$ -Emissionen der Pkw-Neuzulassungen. Bei solchen Personen, die sich trotz hoher Kosten einen Pkw anschaffen, besteht dann nämlich ein Anreiz für die Anschaffung eines möglichst kleinen Wagens. Eine solche Staffelung existiert beispielsweise in Dänemark, die über den Preis wirksam wird. Dort lagen die  $\text{CO}_2$ -Emissionen gemäß NEFZ in 2015 bei durchschnittlich 106,2 g und damit deutlich niedriger als in Deutschland (128,9 g, vgl. Website EEA).

Flankiert werden können diese Instrumente folgendermaßen:

- Einführung von Umweltzonen und CO<sub>2</sub>-basierten Fahrverboten in Städten, sowie Parkplatzbeschränkung und höhere Parkplatzgebühren für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor.
- Verteuerung der Kraftstoffe Diesel und Benzin für den Übergang bis 2035, um zumindest Kostenparität mit alternativen synthetischen Kraftstoffen zu erreichen. Dies ginge konform mit dem Verursacherprinzip als anerkanntem Grundsatz des Umweltschutzes und würde dazu beitragen, die externen Umweltkosten der Verbrennung fossiler Kraftstoffe (insbesondere die Kosten des Klimawandels) zu internalisieren.
- Berücksichtigung von externen Umwelteffekten des Pkw-Verkehrs auch bei der Besteuerung der alternativen Kraftstoffe.
- Förderung neuer Antriebe, insb. Elektromobilität (batteriebetriebenen, Wasserstoff-Brennstoffzellen).
- Mindestquoten für Elektrofahrzeuge bei den Neuzulassungen (wie z.B. in China geplant).
- Ambitionierte Kraftstoffrichtlinien auf europäischer Ebene, die die Einführung von synthetischen Kraftstoffen auf Basis von Elektrolyse-Wasserstoff erleichtern.
- In der Fahrzeugtechnik können Tempolimits (30 km/h innerorts und 120 km/h auf Autobahnen) einen Anreiz bilden, Innovationspotentiale verstärkt auf die Senkung des Durchschnittsverbrauchs der Kraftfahrzeuge zu lenken, anstatt die möglichen Kraftstoffeinsparungen durch für hohe Geschwindigkeiten entwickelte Fahrzeuge zu kompensieren.
- Fortgesetzte und intensiviertere Anstrengungen der Automobilindustrie, um durch F&E sowie strategische Investitionen die alternativen Antriebe zur Serienreife zu bringen.

#### 9.4 Wirkungsumfang der Maßnahmen und Instrumente

Die folgende Tabelle 9.1 gibt die angenommene Verschiebung der Anteile der Fahrzeugklassen innerhalb der Personengruppen wieder. Für alle Altersgruppen wird eine Verminderung der Fahrzeugausstattung angenommen sowie eine Verschiebung hin zu Kleinwagen. Die Gruppe der Personen im Alter ab 65 Jahren besitzt heute überdurchschnittlich häufig große Fahrzeuge, aber auch in dieser Altersgruppe gibt es kräftige Verschiebungen zu Kleinwagen.

Tab. 9-1 Veränderung der Pkw-Größe. Quelle: eigenes Dekarbonisierungsszenario 2035

Bevölkerungsgruppe	Anteil Pkw klein		Anteil Pkw mittel		Anteil Pkw groß	
	2015	2035	2015	2035	2015	2035
0 bis unter 6	0%	0%	0%	0%	0%	0%
6 bis unter 19	33%	55%	55%	41%	12%	4%
19 bis unter 30	33%	55%	55%	41%	12%	4%
30 bis unter 65	27%	51%	52%	42%	21%	7%
ab 65	18%	45%	49%	44%	33%	11%
gesamt	26%	48%	52%	43%	21%	9%

Durch die Verschiebung hin zu Kleinwagen können die Maßnahmen zur Verbrauchsreduktion verstärkt werden. Die Effizienz der Flotte im Jahr 2035 (tank-to-wheel,

TTW) ist in der folgenden Abbildung 9.4 dargestellt. Die Kombination der Effizienzeffekte durch verminderte Fahrzeuggröße und technische Maßnahmen ist in der fahraufwandsgewichteten Gesamteffizienz ganz rechts in der Abbildung dargestellt. Zumindest in einer TTW-Betrachtung sind die Effekte enorm. In der Systembetrachtung fallen sie durch höhere Umwandlungsverluste in der Kraftstoffbereitstellung etwas ungünstiger aus (vgl. Kapitel 12.1).

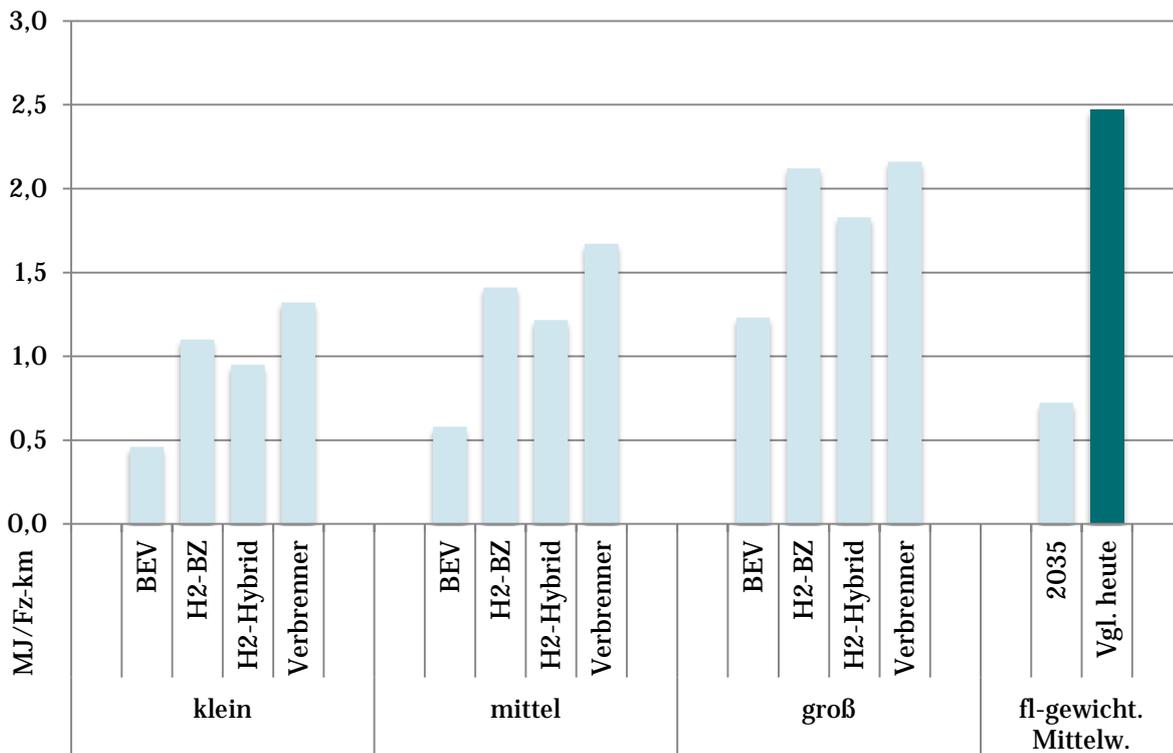


Abb. 9-4 Energieeffizienz der Pkw 2035. Quelle: eigenes Dekarbonisierungsszenario 2035; DLR 2010, DIW 2016

Die hier dargestellte Entwicklung der Energieeffizienz ließe sich bereits mit heute bekannten technischen Maßnahmen erreichen. Ein derartiger Pfad wurde schon in der Dissertation von Mock (2010) im Rahmen eines Projektes des DLR erarbeitet. Es handelt sich somit um eine konservative Abschätzung für das hier entwickelte Dekarbonisierungsszenario auf Basis schon etwas älterer Daten. Andererseits ist festzustellen, dass die dort dargestellten Maßnahmen durch die Automobilhersteller immer noch nicht flächendeckend umgesetzt worden sind.<sup>13</sup>

Die Gesamtzusammensetzung der Pkw-Flotte im Jahr 2035 zeigt Tabelle 9.2. Hier ist auch die Carsharing-Flotte gesondert dargestellt. Die verstärkte Nutzung von Carsharing statt Anschaffung eines eigenen Pkw ermöglicht eine sehr viel intensivere und damit ressourcenschonendere Nutzung eines Pkw. Die Fahrzeuge erreichen im Schnitt einen höheren Lebensfahraufwand. Durch die intensivere Nutzung müssen diese Fahrzeuge aber dennoch schneller ausgetauscht werden, wodurch Effizienzfortschritte und alternative Antriebe schneller im Bestand wirksam werden können.

<sup>13</sup> Aktuellere Studien mit konservativen Abschätzungen wie etwa die von JRC/EUCAR/CONCAWE 2014 wurden hier nicht genutzt, weil sie nur ein Standard-Referenzfahrzeug (der unteren Mittelklasse) analysieren.

**Tab. 9-2 Anteile Pkw-Bestand, spezifische Fahraufwände 2035. Quelle: eigenes Dekarbonisierungsszenario 2035**

	Flotte ohne Carsharing-Fz.	Carsharing-Flotte	Flotte ohne Carsharing-Fz. [km/(Fz*a)]	Carsharing-Flotte [km/(Fz*a)]
<b>Pkw gesamt</b>	17.455.000	3.466.000	13.900	20.300
<b>Pkw klein</b>	8.334.000	1.714.000	12.600	20.300
BEV	7.500.000	1.543.000	12.500	20.000
H <sub>2</sub> -BZ	83.000	17.000	13.500	24.600
H <sub>2</sub> -Hybrid	750.000	154.000	13.500	23.000
Verbrenner	0	0	-	-
<b>Pkw mittel</b>	7.591.000	1.386.000	14.900	20.300
BEV	5.314.000	1.109.000	14.900	20.000
H <sub>2</sub> -BZ	380.000	14.000	17.100	23.100
H <sub>2</sub> -Hybrid	1.518.000	263.000	17.100	21.500
Verbrenner	380.000	0	5.000	-
<b>Pkw groß</b>	1.530.000	365.000	15.300	20.300
BEV	995.000	256.000	15.000	20.000
H <sub>2</sub> -BZ	153.000	4.000	17.700	22.600
H <sub>2</sub> -Hybrid	306.000	106.000	17.600	21.000
Verbrenner	77.000	0	5.000	-

Insgesamt ergibt sich auf der Basis der getroffenen Annahmen, dass Privat-Pkw in Zukunft eher weniger intensiv genutzt werden als heute, was mit dem Modal Shift hin zu anderen Verkehrsmitteln (auch bei Autobesitzerinnen und -besitzern) erklärt werden kann. Haushalte mit höherem Mobilitätsbedarf, die das Fahrzeug in der Regel auch flexibler einsetzen möchten, setzen eher auf wasserstoffbetriebene Fahrzeuge und schaffen sich keine BEV an.

Carsharing bietet aber durchaus auch für auf Flexibilität angewiesene Akteure Möglichkeiten. Durch Pooling lassen sich auch höhere Jahresfahraufwände erzielen. Intelligente Prognosemodelle können den Nutzerinnen und Nutzern dasjenige Fahrzeug anbieten, dessen Batterie zum Zeitpunkt des Nutzungsbegins einen hinreichenden Ladestand aufweist und somit insgesamt für eine Optimierung von Be- und Entladung sorgen.

Aus der Entwicklung der restlichen Flotte heraus besteht jedoch die Gefahr, dass sich die Modal Shift-Strategie und die konsequente Erneuerung des Fahrzeugparks gegenseitig behindern. Es steht zu erwarten, dass Fahrzeuge bei geringerer Nutzung auch deutlich länger im Bestand verbleiben, bzw. dass Investitionen in Neuwagen bei nur geringer Attraktivität des Pkw insgesamt bewusst zeitlich verschoben werden.

Auch die Auslastung einer neu zu schaffenden Wasserstoffinfrastruktur wird durch geringe Stückzahlen am Anfang ggf. in Frage gestellt. Insofern wären mit einem solchen Szenario eher schlanke Infrastrukturen (lean infrastructures), z.B. mit einer Erzeugung von Wasserstoff direkt an der Tankstelle, kompatibel als die direkte vollständige Errichtung eines flächendeckenden Wasserstoff-Pipeline-Netzes.

Zudem bestehen für die Automobilindustrie durch die geringeren Stückzahlen (zumindest in Deutschland) insgesamt kleinere Spielräume für F&E-Budgets. Jedoch könnten die Automobilkonzerne Marktausweitungen in Schwellen- und Entwick-

lungsländern realisieren. Sofern sie dort ebenfalls gezwungen werden, innovative Antriebe abzusetzen, könnte dies die notwendigen Impulse für eine Erneuerung geben. Instrumente wie die für 2018 geplante Quote für Elektroautos in China sind Zeichen für die weltweite (politische) Änderung (vgl. Giesen und Fromm 2016).

Die dargestellten eher hemmenden Faktoren machen deutlich, dass eine derartige Entwicklung keineswegs ein Selbstgänger ist, sondern politischer Flankierung erfordert.

## 10 Dekarbonisierung des Güterverkehrs

### 10.1 Ausgangslage und Entwicklungstrends

Im Güterverkehr hat der Verkehrsaufwand in den vergangenen Jahren deutlich zugenommen. So wurde im Jahr 2014 in Deutschland insgesamt eine Beförderungsleistung von 653 Tonnenkilometern erbracht – das waren 12,4% mehr als noch zehn Jahre zuvor (Hütter 2016). Auch wenn die Wirtschaft in diesem Zeitraum mit über 13% (real) etwas stärker gewachsen ist als die Beförderungsleistung, sind nur sehr schwache Tendenzen einer relativen Entkopplung des Güterverkehrs vom Wirtschaftswachstum erkennbar. Der generelle Anstieg von Produktion und Konsum sowie von internationalen wie nationalen Verflechtungen bei Produktion und Konsum führen zu diesem Wachstum des Güterverkehrs, unterstützt vom europäischen Binnenmarkt und internationalen Freihandelsabkommen.

Der mit Abstand größte Anteil dieses Güterverkehrsaufwands in Deutschland entfällt mit 70,8% auf den Straßenverkehr, ein Prozentpunkt mehr als 2004. Nur 16,1% der Beförderungsleistung werden von der Bahn, 11,1% mit dem Binnenschiff erbracht (vgl. ebd.).

Ein höherer Anteil von Schiene und Wasserstraße kann die CO<sub>2</sub>-Emissionen im Güterverkehr deutlich senken, denn der Transport mit dem Lkw verursacht viermal so hohe CO<sub>2</sub>-Emissionen je Tonnenkilometer im Vergleich mit der Schiene und rund dreimal so hohe Emissionen wie der Transport mit dem Binnenschiff (vgl. UBA 2016a).

Die Gründe für den hohen Lkw-Anteil sind vielfältig: zum einen sind durch das gut ausgebaute Straßennetz die Transportzeiten auf der Straße im Vergleich zur Schiene kürzer und flexibler, während viele Engpässe in der Schieneninfrastruktur den Gütertransport mit der Bahn verlangsamen (vgl. UBA 2010b). Es fehlen Überhol- und Ausweichgleise, die Mischung von Personen- und Güterverkehr auf denselben Gleisen sorgt für Verspätungen, und es gibt Lücken im Schienennetz insgesamt sowie mit Blick auf noch nicht elektrifizierte Streckenabschnitte (vgl. DLR et al. 2016). Der aktuelle Bundesverkehrswegeplan ändert daran wenig, da weiterhin mehr Mittel für einen Aus- und Neubau von Fernstraßen vorgesehen sind als für die Schieneninfrastruktur (vgl. BMVI 2016). Die Gesamtstreckenlänge im Schienennetz ist auch in den letzten Jahren noch leicht zurückgegangen (vgl. DIW 2016).

Da die Verkehrsanbindung vieler Unternehmen ans Schienennetz fehlt, und viele Gleisanschlüsse in den vergangenen Jahren stillgelegt wurden – seit 2003 hat sich die Anzahl angeschlossener Betriebe halbiert (vgl. DIW 2016) – ist der Gütertransport auf der Schiene oft nur im kombinierten Verkehr möglich, was mit erhöhtem Organisations- und Zeitaufwand einhergeht.

Schließlich sind die Mehrkosten des Lkw-Transports gegenüber der Beförderung auf Schiene und Wasserstraße so gering, dass sich für viele Gütergruppen und Wegerelationen der Umstieg vielfach nicht lohnt; ebenso unterbleiben daher vielfach die notwendigen Investitionen in eine technologische Aufrüstung des Rollmaterials, für effiziente Umschlagtechnologien und für den Aufbau von Terminals für den kombinierten Verkehr (vgl. DLR / Ifeu 2016).

Business-as-usual-Szenarien und Verkehrsprognosen sehen entsprechend dieses Status Quo nahezu durchgängig einen weiteren Anstieg der Beförderungsleistung voraus, von der weiterhin ein Großteil auf der Straße gesehen wird. So geht die Verkehrsverflechtungsprognose 2030 (vgl. Schubert et al. 2014) von einem Anstieg auf 837,6 tkm bis 2030 aus, bei einem Anteil des Straßengüterverkehrs von 72,5%.

## 10.2 Zielzustand 2035

Das bislang starke Wachstum des Güterverkehrs wird bis 2035 deutlich verlangsamt: Leerfahrten werden durch eine optimierte Logistik reduziert, so dass für die gleiche Beförderungsleistung (in tkm) weniger Fahraufwand (in Fzkm) notwendig ist. Auch das Wachstum der Beförderungsleistung ist gebremst: Gütertransporte, die aufgrund relativ geringer regionaler oder europäischer Kostendifferenzen für Güter oder Dienstleistungen entstehen, gehen zurück, da die Kosten für den Gütertransport steigen. Dies sorgt für einen Rückgang weiterer Transporte und einer Stärkung der regionalen Wirtschaftsverflechtungen.

Zudem steht eine leistungsfähigere Infrastruktur für den Gütertransport auf der Schiene und Wasserstraße sowie für den kombinierten Verkehr zur Verfügung. Diese entsteht im Zusammenspiel dreier Faktoren. Zum einen wird die Dichte und Kapazität der Schieneninfrastruktur durch Netzlückenschlüsse, neue Gleisanschlüsse und Überholgleise erweitert. Zudem werden durch eine technologische Aufrüstung der Infrastruktur und der Fahrzeuge (etwa automatische Kupplung und Umschlagtechnik) der Güterumschlag beschleunigt und längere Züge ermöglicht. Schließlich entsteht ein dichtes Netz aus multimodalen Terminals, die neben dem konventionellen kombinierten Verkehr auch Sendungen unterhalb einer Containerladung massenleistungsfähig umschlagen können. Auf kommunaler Ebene werden Güterverteilzentren auf Quartiersebene eingerichtet. Zusammen mit preislichen Anreizstrukturen sorgt dieser Infrastrukturausbau für einen erheblichen Modal Shift: Im Güterfernverkehr von der Straße auf Schiene und Wasserstraße, im urbanen Raum auf Lastenrad und elektrifizierte Kleintransporter.

Auch der Straßengüterverkehr selbst ist effizienter und umweltschonender. Bei leichten Nutzfahrzeugen gewinnen batterieelektrische Fahrzeuge, Hybrid-Antriebe und Brennstoffzellenfahrzeuge an Bedeutung. Bei den Lkw ist ein großer Teil des Bestands mit Hybrid-Antrieb ausgestattet und für Last- und Sattelzüge dominieren Oberleitungs-Hybrid-Antriebe. Oberleitungs-Lkw sind mit einem Hybrid-Antrieb ausgestattet, der auch abseits der elektrifizierten Strecke elektrisch betriebenes Fahren ermöglicht. Zudem kommen klimaverträgliche synthetische Kraftstoffe zum Einsatz und verbessern die Klimabilanz.

Da Investitionen in die Schieneninfrastruktur eine lange Vorlaufzeit haben, kann bis 2035 nur ein Teil der sinnvoll möglichen Verlagerungen von der Straße auf die Schiene erreicht werden. Weitere Verlagerungspotenziale machen einen weiteren Ausbau der Infrastruktur notwendig und können daher erst nach 2035 erschlossen werden.

### 10.3 Maßnahmen und Instrumente

Die Transformation im Güterverkehr wird durch das Zusammenwirken verschiedener Instrumente erreicht, die auf den Verkehrsaufwand bzw. die Fahrleistungen, die Verkehrsmittelwahl und die Fahrzeugeffizienz zielen.

#### Preisliche Instrumente

Um den Anstieg des Güterverkehraufwands zu dämpfen und einen Modal Shift weg von der Straße auf Schiene und Wasserstraße zu ermöglichen, ist eine grundlegende Reform der Anreizstrukturen notwendig.

Hierfür wird zunächst die Lkw-Maut stark ausgeweitet. Zum einen wird die Erhebungsgrundlage auf alle leichten Nutzfahrzeuge und Lkw ausgeweitet – bislang (seit 2015) wird sie erst ab einem zulässigen Gesamtgewicht von 7,5 t fällig. Zudem wird das Mautniveau deutlich angehoben und - zusätzlich zur Schadstoffklasse - künftig auch entsprechend der spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen der Fahrzeuge gespreizt. Die Erlöse fließen in den verstärkten Ausbau von Schienennetz und Wasserstraßen. Dadurch werden mehrfache Anreize gesetzt: Die Ausweitung und Anhebung des Gesamtniveaus trägt zur Vermeidung von Transporten und zur Verlagerung auf dann kostengünstigere Verkehrsträger bei. Die Spreizung setzt Anreize für den Einsatz effizienterer Fahrzeuge und alternativer Antriebe. Der Mautsatz, der heute je nach Schadstoffklasse und Achszahl zwischen 12,5 und 21,8 ct/km liegt, steigt auf das zehnfache Niveau.

Zudem steigen die Kraftstoffpreise im Lkw-Verkehr stark an. Ein Liter Dieselmotorkraftstoff (der dann als PtL-Kraftstoff auf Basis erneuerbaren Stroms gewonnen wird) wird im Jahr 2035 deutlich mehr kosten als Diesel heute. Das Preisniveau resultiert zum einen aus den höheren Kosten für die Herstellung des PtL-Kraftstoffs, zum anderen wird eine Energiesteuer dynamisch angelegt, welche kontinuierlich ansteigt, um ihre Anreizwirkung für die Verkehrsvermeidung bei zunehmender Energieeffizienz der Fahrzeuge nicht zu verlieren.

#### Ausbau und Lückenschlüsse der Infrastruktur

Da die Planung und Umsetzung von Verkehrsinfrastrukturen über lange Zeiträume hinweg erfolgt, muss in der Verkehrswegeplanung bereits jetzt umgesteuert werden, um die ambitionierten Verlagerungsziele erreichen zu können. Im Alternativszenario des Bundesverkehrswegeplans 2030 wurde gezeigt, dass durch eine Verschiebung der Investitionen in Schiene und Wasserstraße deutliche Verlagerungen möglich sind. Eine Bundesverkehrswegeplanung, die ambitionierte Verlagerungsziele setzt, verzichtet weitgehend auf Neu- und Ausbau von Straßeninfrastruktur und investiert stattdessen in Ausbau und Lückenschlüsse (u.a. im Hafenhinterland) im Schienen- und Wasserstraßennetz. Bestehende Schienentrassen werden mit Überholmöglichkeiten ausgestattet und nötigenfalls elektrifiziert. Dieser Ausbau von Schiene und Wasserstraße ermöglicht neue Verbindungen sowie eine deutliche Beschleunigung des Verkehrs auf diesen Verkehrsträgern. Für die Schiene wird eine Verkürzung der Transportzeiten um 40 Prozent angenommen – durch weniger engpassbedingte Halte und eine Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit. Dabei werden konsequent Lärmschutzmaßnahmen an den Strecken sowie den Schienenfahrzeugen umgesetzt, um die Lärmbelastung durch den Schienengüterverkehr zu reduzieren.

Ausgebaut werden zudem die Infrastrukturen des kombinierten Verkehrs durch den Ausbau bestehender und die Schaffung zusätzlicher multimodaler Terminals. Automatisierte Verladeterminale, die auch den Massenumschlag unterhalb einer Containerladung ermöglichen, beschleunigen die Umschlagzeiten, eine höhere Netzdichte macht längere Transportstrecken auf der Schiene möglich (vgl. DLR / Ifeu 2016).

Für den Einsatz von Oberleitungs-Lkw werden große Teile des Bundesautobahnnetzes entsprechend elektrifiziert. Sie tragen die Hauptlast des Straßengüterverkehrs.

### Regulierungen

CO<sub>2</sub>-Flottengrenzwerte für Lkw: Während für leichte Nutzfahrzeuge bereits verbindliche Flottengrenzwerte gelten, ist eine solche Regulierung für Lkw noch nicht umgesetzt. Bislang plant die EU ab 2018 allein ein CO<sub>2</sub>-Monitoring; aufgrund des modularen Aufbaus von Lkw gestaltet sich eine Regulierung bislang schwierig. Dieses sollte zu verbindlichen Flottengrenzwerten weiterentwickelt werden, die ab 2025 einzuführen sind und verschiedene Größenklassen und Einsatzzwecke berücksichtigen.

Eingeführt wird zudem eine Zulassungsquote für elektrifizierte Lkw, die schrittweise ansteigt, so dass bis 2035 rund 80 Prozent der Last- und Sattelzüge oberleitungsfähig elektrifiziert werden und die weiteren Lkw-Klassen schrittweise mit Hybrid-Antrieben auszustatten sind (vgl. Zimmer et al. 2016).

Für Lang-Lkw (sogenannte Giga-Liner) wird die Regelzulassung zurückgenommen. Lkw, die länger als 18,75 m sind, wurden per Verordnung im April 2017 grundsätzlich zugelassen. Die Lkw mit einer Kapazität von 1,5 regulären Sattelzügen attrahiert den Güterverkehr auf der Straße und macht eine Verlagerung auf Schiene und Wasserstraße schwieriger.

## 10.4 Wirkungsumfang der Maßnahmen und Instrumente

Die Kombination der bis 2035 umgesetzten Maßnahmen und Instrumente führt zu einem nur noch moderaten Anstieg des Güterverkehrsaufwands und zu einer starken Verlagerung von der Straße auf Schiene und Wasserstraße: Der Verkehrsanteil auf der Schiene steigt um 73 Prozent an, zusammen mit der Verkehrszunahme bedeutet dies nahezu eine Verdopplung des Verkehrsaufwands auf der Schiene; dagegen geht der Anteil des Straßengüterverkehrs um ein Viertel zurück, der Verkehrsaufwand auf der Straße sinkt insgesamt um mehr als 15% (vgl. Tab. 10.1).

Tab. 10-1 Güterverkehrsaufwände nach Verkehrsträgern 2035. Quelle: eigenes Dekarbonisierungsszenario 2035

Verkehrsaufwand	2015 (DIW 2016)		2035	
	Mrd. tkm	%	Mrd. tkm	%
<b>Straße</b>	459,9	72,8	388,1	54,6
<b>Schiene</b>	116,6	18,5	228,5	32,2
<b>Binnenschiff</b>	55,3	8,8	94,1	13,2
<b>Gesamt</b>	630,9		710,8	

Mit Blick auf die hier unterstellte Zielsetzung der vollständigen Dekarbonisierung des Sektors Verkehr bis zum Jahr 2035 wird der Anstieg der Verkehrsaufwände etwas stärker gedämpft als in anderen ambitionierten Klimaschutzszenarien (etwa Re-

newbility III; Zimmer et al. 2016), was durch eine starke Verteuerung des Güterverkehrs auf der Straße ermöglicht wird. Der Modal Shift auf Schiene und Wasserstraße steigt auf ein ähnliches Niveau, wie es im ambitionierten Szenario der Studie „Verkehrsverlagerungspotenzial auf den Schienengüterverkehr in Deutschland“ (DLR / ifeu 2016), fällt aber hier durch die genannten preislichen Anreize noch geringfügig stärker aus.

Die Verlagerung greift dabei insbesondere für lange Transportwege und für Transporte, die mit großen Lkw, insbesondere mit Last- und Sattelzügen durchgeführt werden. Auf der anderen Seite sorgt die Verringerung von Einkaufsfahrten im Personenverkehr und die Zunahme von Lieferdiensten für einen erhöhten Verkehrsaufwand kleiner Lkw und leichter Nutzfahrzeuge. Damit verschiebt sich die Aufteilung der verbleibenden Fahrleistungen im Straßengüterverkehr anteilig zu den kleineren Lkw (vgl. Tab. 10.2).

Tab. 10-2 Fahraufwand, Fahranteile und spez. Energieverbrauch nach Fahrzeugtypen im Güterverkehr 2035. Quelle: eigenes Dekarbonisierungsszenario 2035

	Fahraufwände (Mrd. Fzkm)	Fahranteil elektrisch	Spez.Verbrauch elektr. Betrieb	Spez.Verbrauch elektr. Betrieb
Lkw 3,5-7,5t PtL-Diesel	8,64	0%		3,3 MJ/km
Lkw 3,5-7,5t Plugin-Hybrid	4,06	60%	1,7 MJ/km	3,3 MJ/km
Lkw 7,5-12t PtL-Diesel	4,06	0%		4,6 MJ/km
Lkw 7,5-12t Plugin-Hybrid	4,76	50%	2,3 MJ/km	4,6 MJ/km
Solo-Lkw >12t PtL-Diesel	5,08	0%		6,9 MJ/km
Solo-Lkw >12t Plug in-Hybrid	0,51	40%	3,5 MJ/km	6,9 MJ/km
Sattel-/Gliederzüge PtL-Diesel	5,08	0%		8,0 MJ/km
Sattel-/Gliederzüge Oberleitung	22,36	80%	3,9 MJ/km	8,0 MJ/km

Sowohl die durch Maut und Kraftstoffbesteuerung geschaffenen Anreize, als auch die Flottengrenzwerte für Lkw verändern den Fuhrpark. Neben weiterhin bestehenden Dieselfahrzeugen, die mit Power-to-Liquid-Kraftstoff aus erneuerbarem Strom betrieben werden, nimmt der Anteil von Plug-In-Hybrid-Fahrzeugen deutlich zu. In der Szenarioberechnung wurde dabei nicht der Flottenbestand selbst modelliert, sondern der Fahraufwand in Fahrzeugkilometern mit den entsprechenden Fahrzeugtypen.

Der Verkehrsaufwand in Tonnenkilometern wurden auf Basis von Daten des KBA zur Tonnage in Fahrzeugkilometer umgerechnet (vgl. KBA 2015). Für den spezifischen Energieverbrauch werden Annahmen zu konventionellen und alternativen Fahrzeugtechnologien abgeleitet (vgl. Hülsmann et al. 2014). Zu den Oberleitungs-Lkw wird angenommen, dass 80% ihres Fahraufwands elektrisch erbracht werden (siehe Tab. 5.5, vgl. Zimmer et al. 2016).

Die Fahrzeugeffizienz im Schienen- und Schiffsverkehr steigt ebenfalls, aber nur geringfügig. Der Verkehrsaufwand auf der Schiene findet zu 5% Diesel- (PtL-) basiert bei einem Energieverbrauch von 0,27 MJ/tkm und zu 95% elektrisch bei einem Energieverbrauch von 0,30 MJ/tkm statt. Das Binnenschiff hat im Durchschnitt einen Energieverbrauch von 0,32 Megajoule pro Tonnenkilometer.

## 11 Weitere Handlungsfelder zur Dekarbonisierung

### 11.1 Notwendige Rahmenbedingungen

Zur Umsetzung der Maßnahmen für ein nachhaltiges Mobilitätssystem sind geänderte Rahmenbedingungen notwendig. Dies betrifft politische Prozesse und Organisationsstrukturen. So mangelt es in der Praxis räumlicher Planung häufig an Kooperation und Integration benachbarter Kommunen, was in der Vergangenheit insbesondere zur Expansion der Siedlungs- und Verkehrsflächen beigetragen hat. Kooperationsbedarf bei der Verkehrsplanung besteht zudem zwischen den politischen Ebenen (Bund-Länder-Kommunen) sowie zwischen den verschiedenen Politikfeldern und Ressorts – so ist eine stärkere Koordination der Verkehrs- und Mobilitätspolitik etwa mit der Stadt- und Raumplanung, der Wirtschafts- und Arbeitsmarktpolitik und der Bildungspolitik notwendig (vgl. Jansen et al. 2016).

Auch die Finanzierung von (Verkehrs-) Infrastruktur muss sich neuen Rahmenbedingungen anpassen. Die öffentliche Hand zieht sich aufgrund der Schuldenbremse zunehmend aus der Finanzierung des ÖPNV zurück, der Defizitausgleich des öffentlichen Nahverkehrs durch den steuerlichen Querverbund kommunaler Unternehmen wird unsicherer und der demografische Wandel führt in vielen Regionen zu rückläufigen Schülerzahlen und damit zu verminderten tariflichen Ausgleichszahlungen für den Ausbildungsverkehr (vgl. Maaß und Waluga 2014).

#### Maßnahmen und Instrumente

Folgende Maßnahmen sind als unterstützend für die Umsetzung der Transitionspfade zu verstehen:

- Aufstellung von Leitbildern, Zielen und Plänen für nachhaltige Mobilität und Evaluierung der Zielerreichung.
- Integration von Planungsebenen (Bund-Länder-Kommunen) sowie von Handlungsbereichen (Verkehrsplanung, Stadt- und Raumplanung, Wirtschaftsförderung u.a.).
- Die Mobilitätswende sollte partizipativ gestaltet werden, etwa durch Bürgerbeiräte und „runde Tische“ z.B. zum Radverkehr.
- Ergänzung bestehender Finanzierung durch Drittnutzer, also Personengruppen oder Institutionen, die den ÖPNV nicht selbst nutzen und somit auch keine Entgelte bezahlen, aber einen Nutzen aus dem Vorhandensein des ÖPNV ziehen, etwa Arbeitgeber oder der Einzelhandel.
- Zeitpolitik und Versorgungsökonomie: selbstbestimmte, familienfreundliche Arbeitsformen und -zeiten, Einrichtung von Unterstützungsnetzwerken, Mehrgenerationenwohnen, Bedarfsgerechte Kinderbetreuungszeiten in Schulen und Kitas: Im Szenario kann Homeoffice die Anzahl aller Berufswege der Berufstätigen um 5% reduzieren.

## 11.2 Fernreisen und Flugverkehr

Der zivile Luftverkehr trägt erheblich zu den globalen Emissionen bei - und das mit stark steigender Tendenz.<sup>14</sup> Zur Erreichung der Ziele des Pariser Abkommens - das 1,5°C Ziel - müssen auch im Flugverkehr ambitionierte Minderungen stattfinden und Deutschland seinen Teil dazu beitragen.

Der Fernverkehr durch Bus und Bahn hat in Deutschland einerseits erheblichen Investitionsbedarf, andererseits stellt er ein leistungsfähiges Rückgrat des Personenverkehrs dar. Der Luftverkehr ist sehr emissionsintensiv, bringt aber für viele innerdeutsche Relationen keine oder nur wenig Zeitvorteile für seine Kundinnen und Kunden, wenn man die Reisezeiten von Tür-zu-Tür berücksichtigt.

Tabelle 11.1 stellt den Umfang des Luftverkehrs in Deutschland und weltweit, sowie die aus der Verbrennung von Kerosin resultierenden CO<sub>2</sub>-Emissionen dar. Es ergibt sich ein Anteil von 4,8% als rechnerischer Anteil Deutschlands am internationalen Luftverkehr. Dies sind 13,5% bezogen auf die deutschen Gesamtemissionen im Verkehr (inkl. des rechnerischen Anteils am internationalen Luftverkehr).

Tab. 11-1 CO<sub>2</sub>-Emissionen im Flugverkehr und Anzahl Flüge. Quelle: IEA 2016<sup>1</sup>, Website statista<sup>2</sup>, DFS 2016<sup>3</sup>

	CO <sub>2</sub> -Emissionen (Mio. t 2014)	Anzahl Flüge (2016)
Verkehr in Deutschland	154,5 <sup>1</sup> (Straße, inländischer Schiffs- und Flugverkehr, andere)	326.000 <sup>3</sup> (nur Inlandsflüge)
Flugverkehr international	504,34 <sup>1</sup> (Flugverkehr weltweit)	40,4 Mio. <sup>2</sup> (Flugverkehr weltweit)
Flugverkehr international von/nach Deutschland	24,06 <sup>1</sup> (in D getankter Treibstoff)	1,6 Mio. <sup>3</sup> (Starts und Landungen)
Anteil Deutschland an Flugverkehr international	4,8%	4,0%
rechnerischer Anteil des Flugverkehrs international von/nach D am Verkehr in Deutschland zzgl. Flugverkehr in- ternational von/nach Deutschland	13,5%	-

Der Kerosin-Inlandsabsatz, der sowohl für den nationalen Luftverkehr als auch für die Auslandsflüge mit Start in Deutschland verwendet wird, hat eine ansteigende Tendenz. Wurden in Deutschland im Jahr 2004 noch 298,8 PJ Kerosin abgesetzt, waren es im Jahr 2014 bereits 361,9 PJ. Davon entfielen 2014 29,7 PJ (8,2%) auf den nationalen Flugverkehr. Potenziell könnte man zukünftig den Inlandsabsatz über PtL-Kraftstoffe indirekt elektrifizieren und damit dekarbonisieren. Zur Einordnung der benötigten Menge Stroms: Dies hätte für den gesamten Inlandsabsatz des Jahres 2014 einen Strombedarf von 190 TWh zur Folge gehabt.

<sup>14</sup> Die Klimawirkung im Luftverkehr entsteht nicht nur durch die Verbrennung von (fossilen) Kraftstoffen, sondern wird durch „Radiative Forcing“ verstärkt. Damit ist gemeint, dass insbesondere in den sensiblen Schichten der Atmosphäre zusätzlich die aus der Verbrennung von Kerosin resultierenden Emissionen von Stickoxiden, Ruß und Wasserdampf zur Klimawirkung beitragen.

Die Absatzzahlen für Kerosin und Flugbenzin des nationalen Flugverkehrs und die daraus resultierenden Treibhausgas-Emissionen sind seit 1990 insgesamt stagnierend, mit Spitzen in den Jahren 2000 und 2008 (vgl. UBA 2017a).

Abbildung 11.1 veranschaulicht die Entwicklungen der CO<sub>2</sub>-Emissionen von 1990 bis 2014, die sich weltweit im Verkehrssektor aus Kraftstoffverbrennung ergeben. Die Tendenz ist kontinuierlich steigend, sowohl insgesamt als auch im Bereich des internationalen Luftverkehrs.

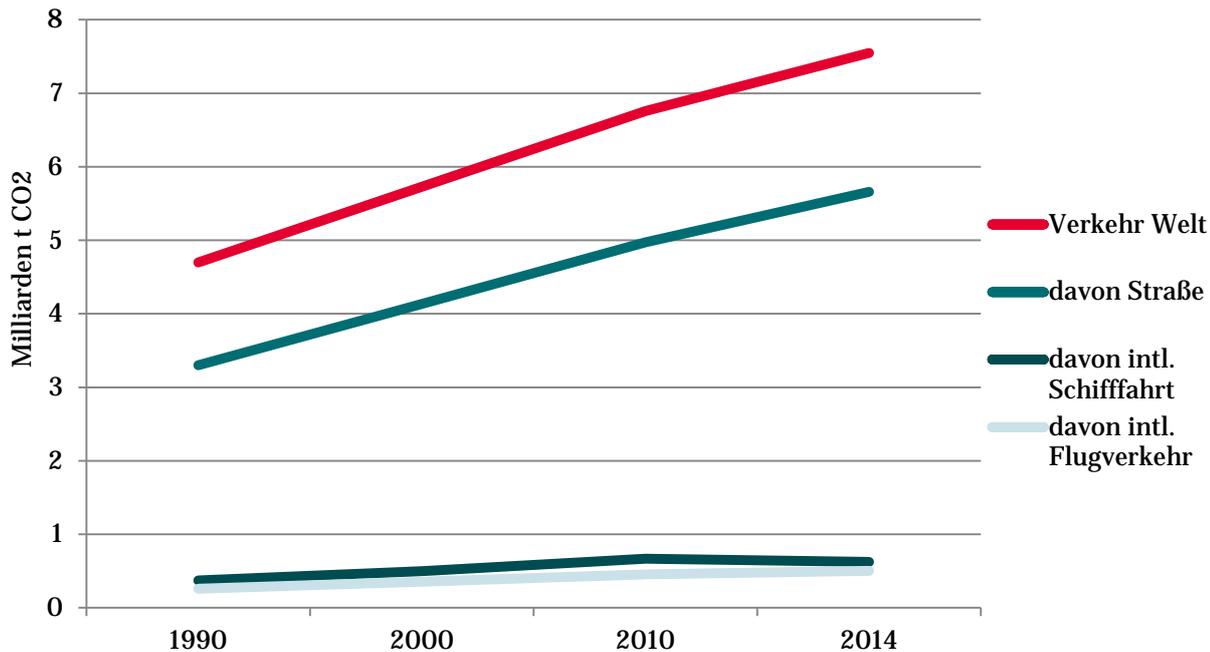


Abb. 11-1 Entwicklung von CO<sub>2</sub>-Emissionen im Sektor Verkehr weltweit. Quelle: IEA 2016

### Maßnahmen und Instrumente

Die Dekarbonisierung des inländischen zivilen Flugverkehrs kann über eine Verlagerung der entsprechenden Wege auf die Bahn vorgenommen werden. Demnach könnte eine sukzessive Reduktion der Inlandsflüge dazu führen, dass ab 2035 keine mehr stattfinden. Bei frühzeitiger Ankündigung wäre dies über eine jährlich steigende Besteuerung des Kerosins bzw. über sinkende Obergrenzen der (genehmigungspflichtigen) Starts und Landungen umzusetzen.

Die Möglichkeiten zur effektiven Reduktion der THG-Emissionen aus internationalem Luftverkehr können hier nur kurz andiskutiert werden. Aufgrund der potenziell großen Menge nachgefragten PtL-Kraftstoffs, der im Zuge einer Senkung der THG-Emissionen auf möglichst Null zu produzieren wäre, kann der internationale Luftverkehr realistisch nur über eine möglichst starke Reduktion von Starts bzw. zurückgelegten Distanzen effektiv zum Klimaschutz beitragen.

Die Bundesrepublik Deutschland könnte Obergrenzen (Caps) auf Starts von Deutschland und Landungen in Deutschland beschließen. Darüber hinaus könnte sie die Befreiung des Kerosins von der Energiesteuer und die Befreiung internationaler Flüge

von der Mehrwertsteuer abschaffen. Auch die häufig gewährten Betriebsbeihilfen für Flughäfen wirken als Subvention kontraproduktiv.

Darüber hinaus wäre ein Emissionshandelssystem hilfreich, wenn es wirksame Preissignale entfaltet. In Europa sind grundsätzlich alle Luftfahrzeugbetreiber Teil des Emissionshandels, die Flüge durchführen, die im Hoheitsgebiet des Europäischen Wirtschaftsraums (Territorium der EU-Mitgliedstaaten und Island, Norwegen und Liechtenstein) starten oder landen. Allerdings gibt es derzeit Ausnahmen und keine Preiswirkung für die Kundinnen und Kunden. Ein globales Emissionshandelssystem würde Chancengleichheit für alle Airlines mit sich bringen und das Klima auch in globaler Kooperation schützen. Die Internationale Zivilluftfahrtorganisation (ICAO) könnte es einführen.

Derzeit besteht Kritik am 2016 in Montreal beschlossenen Ausgleichs- und Reduktionsmechanismus für den internationalen Flugverkehr „Corsia“ (Carbon Offsetting and Reduction Scheme in International Aviation), bei dem es sich nicht um ein Emissionshandelssystem mit einer festen Obergrenze handelt. Corsia soll erst im Jahr 2027 für alle Airlines verpflichtend werden, bis dahin ist die Teilnahme freiwillig. Der Kompensationsmechanismus deckt nur einen Teil der Emissionen ab. Zudem generiere Corsia nicht wie geplant Einnahmen zur Finanzierung internationaler Klimaschutzaktivitäten (vgl. Website BUND).

## 12 Szenarioergebnisse

Das Dekarbonisierungsszenario 2035 geht von einer Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Verkehr auf Null aus. Im Folgenden werden die Energiebedarfe und Charakteristika des Personen- und Güterverkehrs vorgestellt, die bei der unterstellten Dekarbonisierung des Verkehrssektors bis 2035 maßgeblich sind. Daraufhin werden weitere Umwelteffekte, soziale Effekte sowie Kostenvorteile des Szenarios diskutiert.

### 12.1 Energiebedarf

Die wesentlichen den Energieverbrauch bestimmenden Faktoren sind die Fahrzeugflotte mit dem starken Technologie-Shift zur Elektrifizierung, sowie die deutliche Reduktion des Verkehrsaufwands des motorisierten Straßenverkehrs im Personen- und Güterverkehr. Tabelle 12.1 stellt den Strombedarf sowie den Verkehrsaufwand der landgebundenen Verkehrsträger im Dekarbonisierungsszenario 2035 dar, jeweils aufgeteilt in Personen- und Güterverkehr.<sup>15</sup>

Auch für den Güterverkehr werden trotz seines insgesamt sehr ambitionierten Entwicklungspfades sehr große Mengen Strom benötigt, was insbesondere auf die energieaufwändige Erzeugung von PtL-Diesel für den Lkw-Verkehr zurückgeht.

Tab. 12-1 Strombedarf und Verkehrsaufwände 2035. Quelle: eigenes Dekarbonisierungsszenario 2035

	Personenverkehr (TWh)	Güterverkehr (TWh)
1) Strom zum Laden von Batterien, inkl. Ladeverluste	55,5	10,0
2) Fahrstrom (Leitungen)	22,3	37,5
3) Strom zur Produktion und Kompression von H <sub>2</sub>	30,2	9,1
4) Strom zur Produktion von Syn-Methan	0,6	-
5) Strom zur Produktion für Syn-Diesel	-	50,6
6) Strom zur Abscheidung von CO <sub>2</sub> aus der Atmosphäre	-	1,9
7) Strombedarf für H <sub>2</sub> für Wassergas-Shift-Reaktion	-	17,3
<b>Gesamt</b>	<b>108,6</b>	<b>126,4</b>
Verkehrsaufwand	894,0 Mrd. Pkm	710,8 Mrd. tkm

Die Zeilen 1-7 in Tabelle 12.1 unterscheiden den Strombedarf nach Herstellungsprozessen. Bestimmte Verfahren sind aufgrund klimatischer Bedingungen in anderen Ländern deutlich kostengünstiger durchführbar, wodurch sich ein Import anbieten kann. Insbesondere der für den Güterverkehr benötigte Strom kann nach Strombedarf für Ladestrom inklusive desjenigen aus Oberleitungen für den Schwerlasttransport, und nach Strombedarf für PtL-Kraftstoffe unterschieden werden. Letztere Stromnachfrage von insgesamt 69,8 TWh (Summe aus Zeilen 5-7) wäre vergleichsweise kostengünstig importierbar. Denkbar ist aber auch, dass nicht der Strom für die Herstellung synthetischer Produkte, sondern diese selber aus sonnen- und windreichen Ländern importiert werden.

<sup>15</sup> innerdeutscher Flugverkehr findet nicht mehr statt, internationaler Flug- und Schiffsverkehr wird nicht betrachtet.

Die nachfolgenden Abbildungen 12.1 und 12.2 visualisieren den Endenergiebedarf des Verkehrs in Deutschland im Vergleich der Jahre 2013 und 2035.<sup>16</sup> Abbildung 12.1 unterteilt für den Personenverkehr zunächst in die Verkehrsträger schienengebundener Verkehr, Busse und motorisierter Individualverkehr (MIV). Der absolute Bedarf sinkt deutlich um 76%, was insbesondere auf den sinkenden Bedarf des motorisierten Individualverkehrs zurückzuführen ist (weniger Fahrten, kleinere Fahrzeuge, höhere Wirkungsgrade der verbleibenden elektromobilen Flotte). Der MIV sinkt um 82% und macht in beiden Bezugsjahren den größten Anteil aus. Der Bedarf des ÖPV steigt sogar, was auf den Modal Shift zurückzuführen ist.

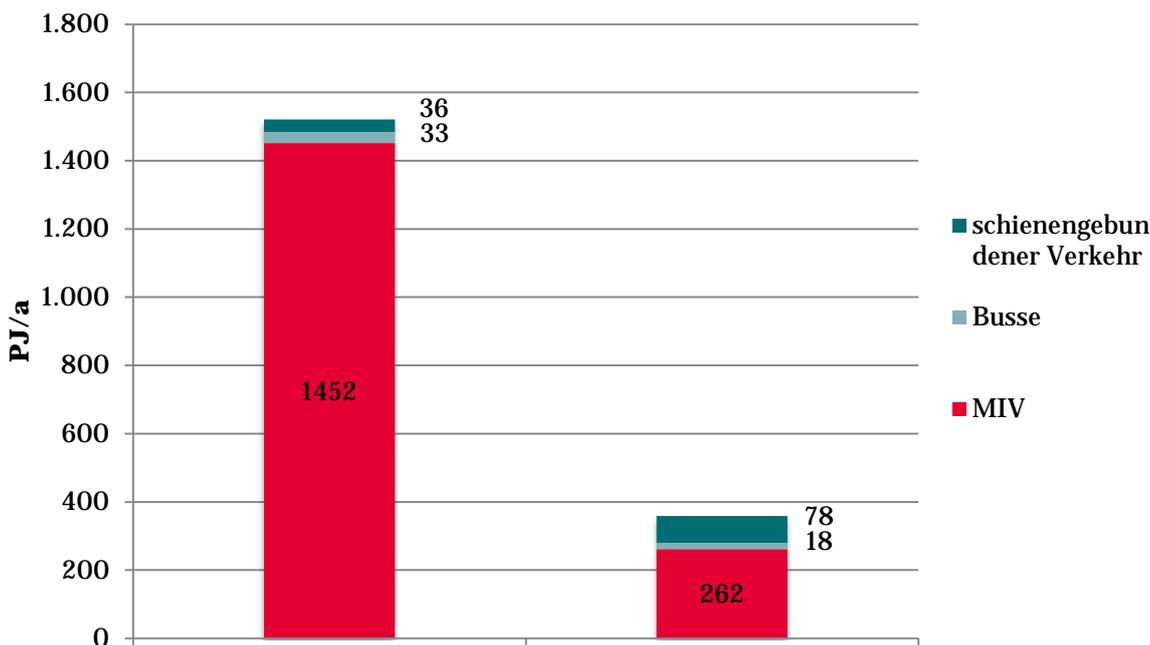


Abb. 12-1 Endenergiebedarf landgebundener Personenverkehr (Verkehrsträger, Inlandsabsatz).  
Quelle: DIW 2016, eigenes Dekarbonisierungsszenario 2035

Folgende Abbildung 12.2 unterscheidet im Vergleich beider Bezugsjahre 2013 und 2035 nach Kraftstoffarten. Für den Personenverkehr ergibt sich ein Endenergiebedarf von 358 PJ, davon 271 PJ für Strom, 84 PJ für Wasserstoff und 4 PJ für Bio- bzw. synthetisches Methan. Letzteres ist aufgrund der geringen Menge im Balkendiagramm kaum erkennbar. Im Jahr 2013 lag der Energieverbrauch noch bei 1.564 PJ, wovon Diesel und Benzin 1.423 PJ ausmachten (91%).<sup>17</sup>

Im Güterverkehr lag der Energieverbrauch 2013 bei 651 PJ, wovon Diesel und Benzin 605 PJ ausmachten (93%). Im Szenariojahr 2035 wird der Endenergiebedarf auf 300 PJ gesunken sein. Eine große Rolle spielt dann synthetischer Diesel (PtL) mit 107 PJ. Die fossilen Kraftstoffe Benzin und Diesel spielen 2035 sowohl im Güter- als auch im Personenverkehr keine Rolle mehr.

<sup>16</sup> Im Gegensatz zu Tabelle 12.1 sind hier keine Wirkungsgradverluste aus der Energieträgerbereitstellung berücksichtigt.

<sup>17</sup> Das DIW (2016) verwendet in „Verkehr in Zahlen“ für die Darstellung der Verkehrsträger eigene Modellrechnungen für den Fahraufwand, für die Darstellung der Kraftstoffe greift es auf den Inlandsabsatz gemäß AGE (2016) zurück. Daraus ergeben sich in den Abbildungen 12.1 und 12.2 unterschiedliche Endenergiebedarfe.

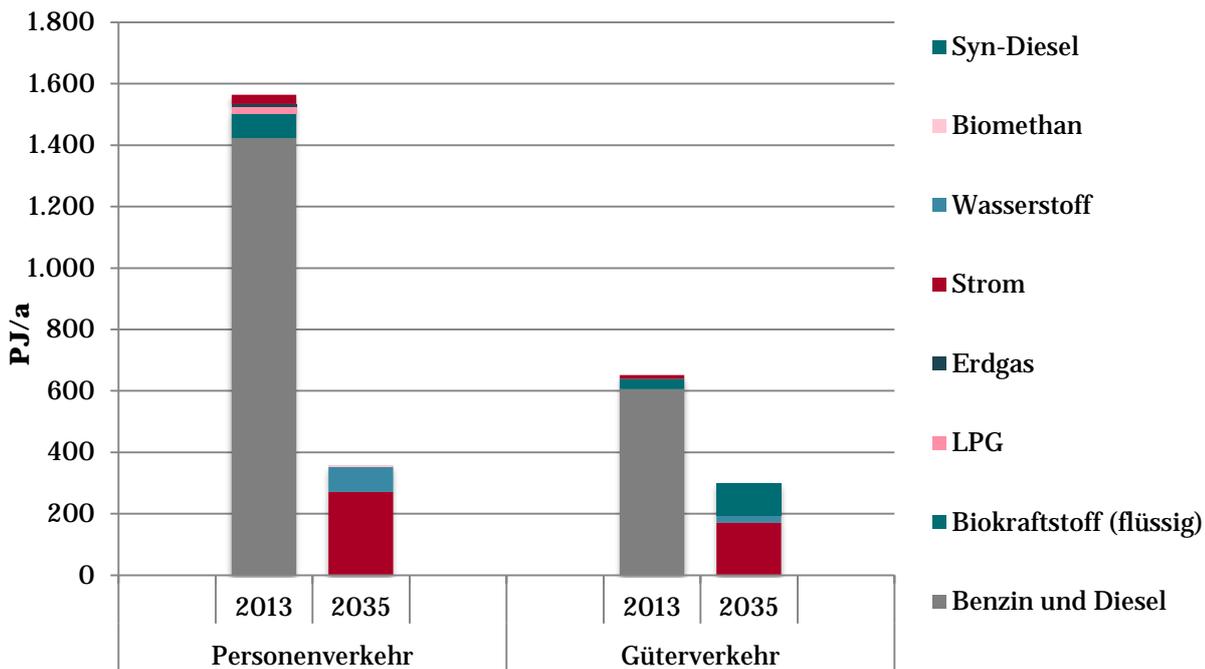


Abb. 12-2 Endenergiebedarf landgebundener Personenverkehr (Kraftstoffe, Inländerfahraufwand).  
Quelle: DIW 2016, eigenes Dekarbonisierungsszenario 2035

## 12.2 Merkmale des Personenverkehrs

Die Transitions- bzw. Transformationspfade haben deutlichen Einfluss auf die Ausstattung mit Privatwagen. Tabelle 12.2 vergleicht die Pkw-Ausstattung in den Jahren 2008 und 2035, zunächst nach Altersgruppen und dann nach den Raumordnungsgruppen „Verstädterte Räume“, „Räume mit Verstädterungsansätzen“ und „Ländliche Räume“. Die Pkw-Verfügbarkeit sinkt deutlich auf im Durchschnitt 200 privat verfügbare Pkw pro 1.000 Einwohnerinnen und Einwohner.

Tab. 12-2 Anzahl Privatwagen pro 1.000 Personen in 2035. Quelle: eigenes Dekarbonisierungsszenario 2035

Bevölkerungsgruppe	2008 (MiD)	2035
0 bis unter 6	0	0
6 bis unter 19	5	2
19 bis unter 30	261	90
30 bis unter 65	691	300
ab 65	446	200
	(baseline)	
Verstädtert	438	154
Verstädterungsansätze	461	240
Ländlich	460	274
<b>Gesamt</b>	<b>458</b>	<b>200</b>

Die im Vergleich zu heute geringe Nachfrage nach Mobilität mit dem Pkw bzw. die geringe private Pkw-Ausstattung führt zu einer deutlichen Reduktion von mit dem Pkw gefahrenen Distanzen. Tabelle 12.3 vergleicht den Modal Split in Bezug auf die zurückgelegten Distanzen, d.h. den Verkehrsaufwand der verschiedenen Verkehrsmittel.

**Tab. 12-3 Verkehrsmittelanteile (Verkehrsaufwand) 2035. Quelle: eigenes Dekarbonisierungsszenario 2035**

	2015 (MiD 2008)		2035	
	Mrd. Pkm/a	%	Mrd. Pkm/a	%
zu Fuß	34	3%	36	4%
Fahrrad	33	3%	69	8%
MIV (Mitfahrer)	281	24%	143	16%
MIV (Fahrer)	643	55%	320	36%
ÖPV	182	15%	327	37%
<b>Gesamt</b>	<b>1.172</b>	<b>100%</b>	<b>894</b>	<b>100%</b>

Beim Verkehrsaufkommen sinkt der Anteil des MIV von 58% im Jahr 2015 auf 34% im Jahr 2035. In den Städten sinkt der Anteil sogar auf 27% (vgl. Tab. 12.4).

**Tab. 12-4 Verkehrsmittelanteile (Verkehrsaufkommen) 2035. Quelle: eigenes Dekarbonisierungsszenario 2035**

	2015 (MiD 2008)	2035 gesamt	2035 Stadt	2035 Verstädt.	2035 Land
zu Fuß	24%	28%	29%	27%	28%
Fahrrad	10%	19%	20%	17%	18%
MIV (Mitfahrer)	15%	9%	10%	9%	7%
MIV (Fahrer)	43%	24%	17%	32%	35%
ÖPV	8%	19%	24%	15%	12%

Abbildung 12.3 bildet den Verkehrsaufwand der Vergangenheit in Deutschland ab (vgl. DIW 2016) und vergleicht die Verkehrsaufwände verschiedener Prognosen und Szenarien ausgedrückt in Mrd. Pkm pro Jahr. Unter den aufgeführten Verkehrs- und Mobilitätsszenarien ist das Dekarbonisierungsszenario 2035 das ambitionierteste bei der Reduktion von Verkehrsaufwänden im Personenverkehr. Damit wird einmal mehr deutlich, welche umfassende Veränderungen mit der Anforderung einer vollständigen Dekarbonisierung des Sektors verbunden sind.

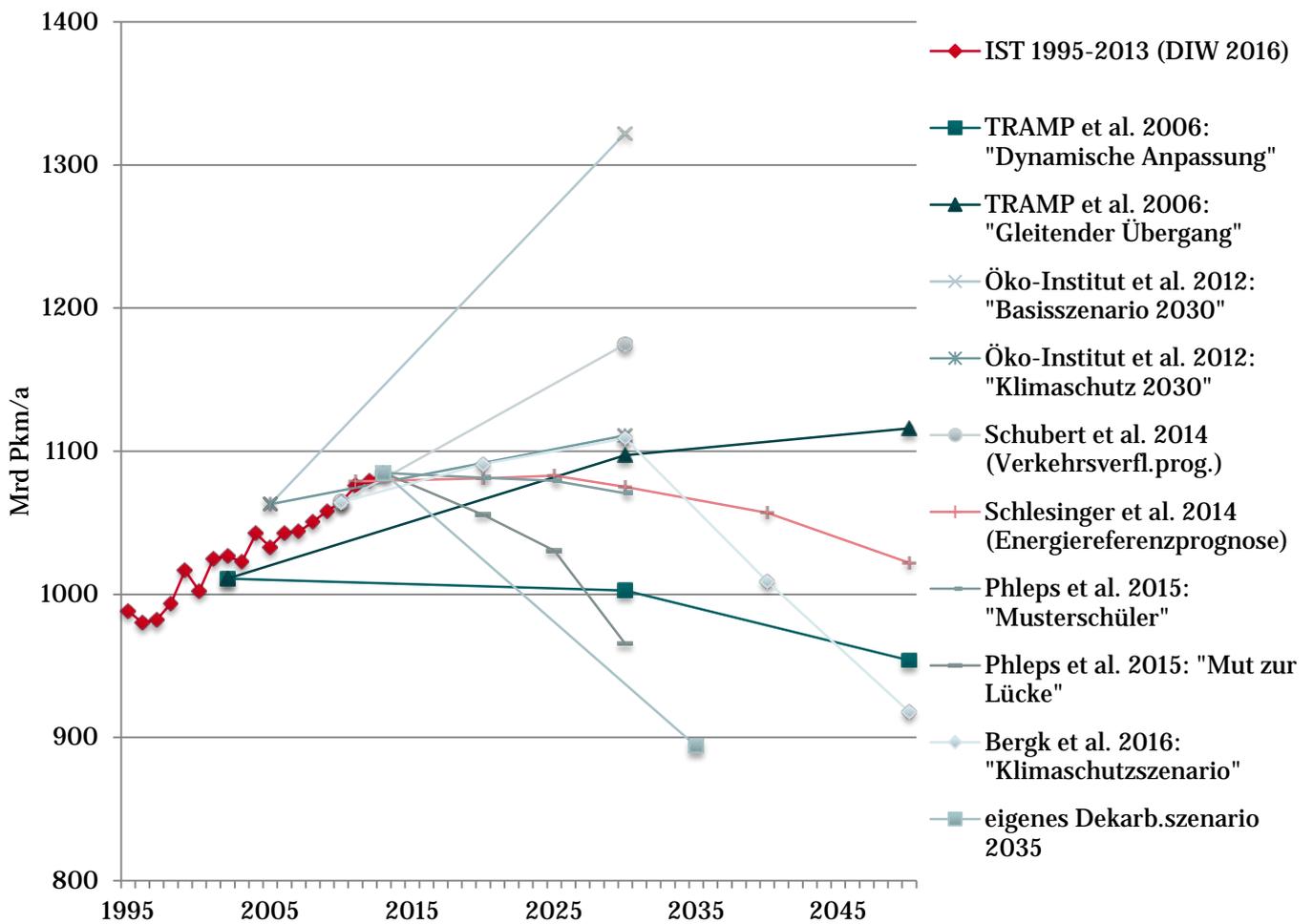


Abb. 12-3 Vergleich von Personenverkehrsaufwänden verschiedener Studien. Quelle: eigene Zusammenstellung

Im Gegensatz zu Abbildung 12.3 vergleicht Abbildung 12.4 die Endenergienachfrage im Personenverkehr des vorliegenden Dekarbonisierungsszenarios 2035 mit der Nachfrage in den Szenarien von Greenpeace („Der Plan“, vgl. Greenpeace 2015) und von Öko-Institut/Fraunhofer ISI („Klimaschutzszenario Deutschland 2050“, vgl. Repenning et al. 2015). Die Zielsetzung jener beiden Szenarien ist die wahrscheinliche Begrenzung einer durchschnittlichen Erderwärmung von 2°C gegenüber vorindustriellen Zeiten. Das 1,5°C Ziel des Pariser Klimaschutzabkommens, welches Grundlage für das hier vorliegende Dekarbonisierungsszenario ist, würde über sie nicht erreicht.

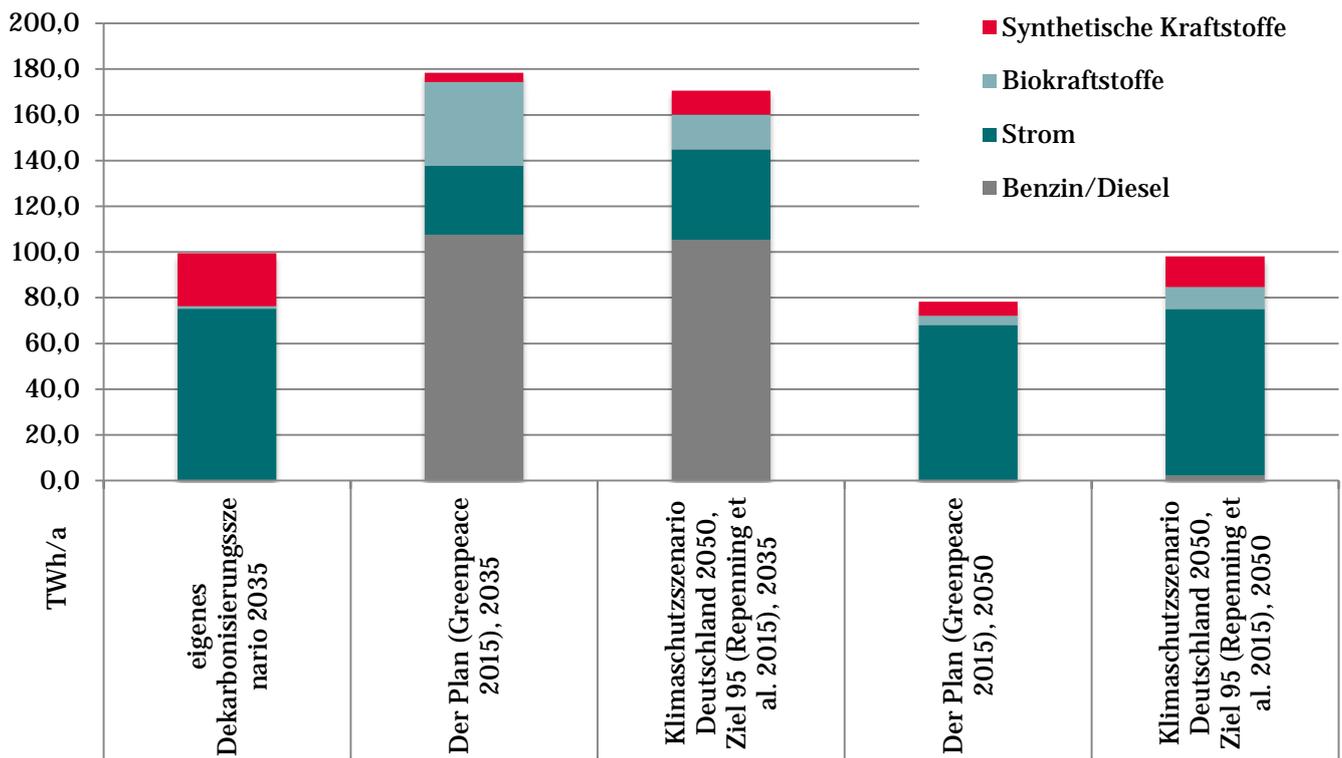
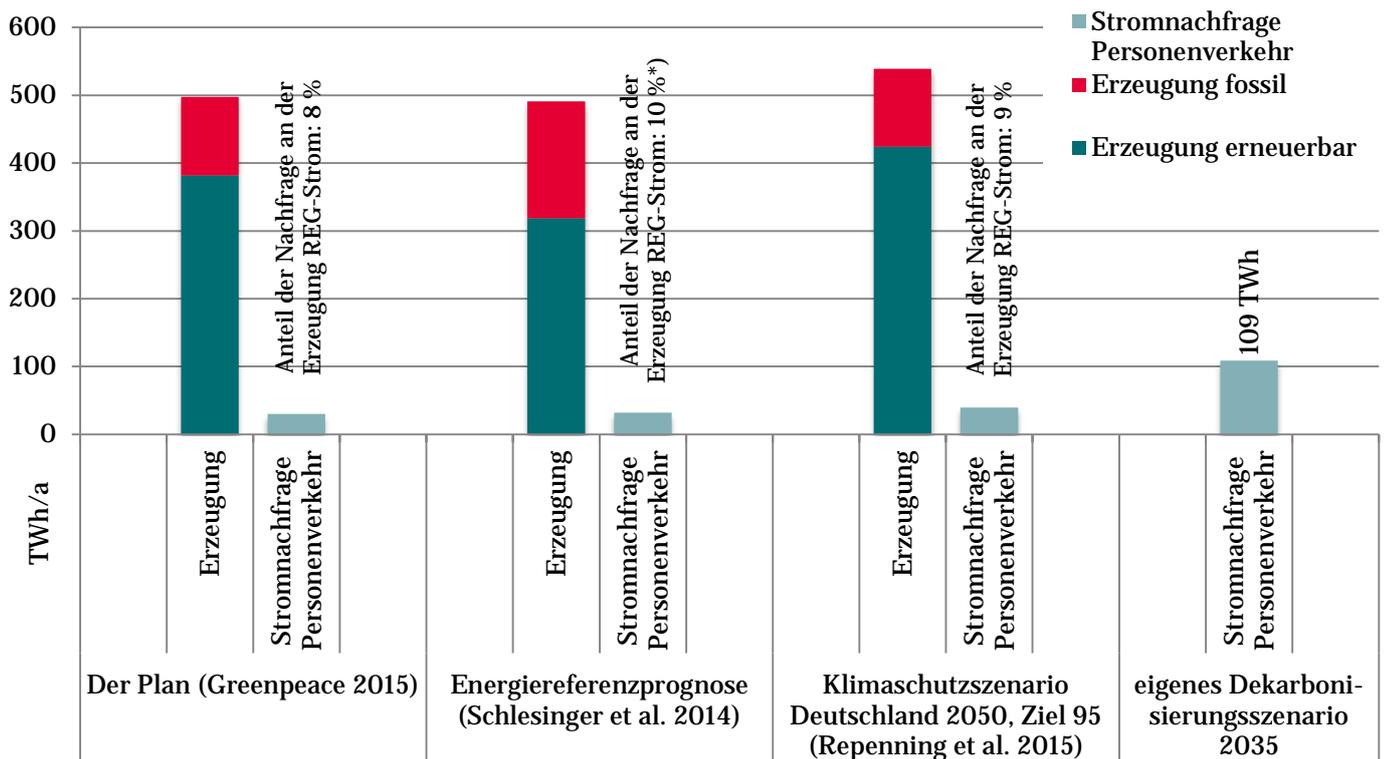


Abb. 12-4 Endenergiebedarf des Personenverkehrs (ohne Flugverkehr) im Szenarienvergleich. Quelle: eigene Zusammenstellung

Hier wird der sehr schnelle Rückgang des Endenergiebedarfs gegenüber den anderen Szenarien deutlich, der auf die Kombination der Verkehrsaufwandsentwicklung, den Modal Shift, sowie auf den höheren Anteil kleinerer Fahrzeuge und alternativer Antriebe (insbesondere die direkte Elektrifizierung) zurückzuführen ist. Im Vergleich zu den Szenarioergebnissen für 2050 zeigen sich noch mögliche weitere Effizienzpotenziale in der langen Frist.

Abschließend soll der notwendige Strombedarf für eine schnelle vollständige Dekarbonisierung des Personenverkehrs dargestellt werden. Abbildung 12.5 stellt die vorliegenden Szenarioergebnisse hierfür in den Kontext der Szenarioliteratur.



**Abb. 12-5 Strombedarf und -deckung verschiedener Szenariostudien im Vergleich. Quelle: eigene Zusammenstellung**

\*) Im Falle des Klimaschutzszenarios der Energierferenzprognose (vgl. Schlesinger et al. 2014) ist der Strombedarf für den gesamten Verkehrssektor angegeben.

Im direkten Vergleich der Szenarien für das Jahr 2035<sup>18</sup> liegt die Stromnachfrage des hier dargestellten Szenarios deutlich über dem Niveau der anderen Szenarien, die eine vollständige Dekarbonisierung (wenn überhaupt) erst für das Jahr 2050 vorsehen. Es ist allerdings zu beachten, dass im vorliegenden Dekarbonisierungsszenario 2035 auch der (indirekte) Strombedarf für die Herstellung von Wasserstoff und synthetischen Kraftstoffen dargestellt ist. Solche Strategien sehen die anderen Szenarien erst ab 2040 vor.

Es wird deutlich, dass eine vollständige Dekarbonisierung höhere Strommengen erfordert als es die Stromnachfragepfade in den bisher vorhandenen Energiesystem-szenarien abbilden. Insofern muss (erst recht bei Berücksichtigung des Güterverkehrs) der Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien entsprechend schneller erfolgen – zum einen um den Stromsektor vollständig zu dekarbonisieren, zum anderen um den zusätzlichen Bedarf für die Sektorkopplung mit dem Verkehr (und anderen Sektoren) decken zu können. Alternativ sind entsprechende Importstrukturen für Strom oder die zum Einsatz kommenden synthetischen Kraftstoffe zu schaffen.

<sup>18</sup> Werte für 2035 lagen in der Szenarioliteratur überwiegend nicht vor. Hier wurde dann zwischen Werten für die Stützjahre 2030 und 2040 interpoliert.

## 12.3 Merkmale des Güterverkehrs

Der Güterverkehr zeichnet sich durch ein niedrigeres Wachstum des Fahraufwands im Vergleich zur Verkehrsverflechtungsprognose 2030 und eine deutliche Verlagerung auf Schiene und Schiff aus. Abbildung 12.6 vergleicht die Güterverkehrsaufwände verschiedener Szenariostudien und Prognosen. Die grüne Linie stellt das IST der Vergangenheit dar, hier deutlich zu sehen der Knick bedingt durch die Wirtschaftskrise 2009 (vgl. DIW 2016). Das Dekarbonisierungsszenario 2035 verläuft deutlich unter der Verkehrsverflechtungsprognose 2030 (vgl. Schubert et al. 2014), aber nur wenig unter dem „Klimaschutzszenario Deutschland 2050“ von Öko-Institut/Fraunhofer ISI (vgl. Repenning et al. 2015) oder der „Effizienz Plus“ Variante von „Renewability III“ (vgl. Zimmer et al. 2016).

Herausfordernd ist in erster Linie ein Modal Shift hin zur Schiene und zum Binnenschiff - dort besteht ein hoher Ausbaubedarf der Infrastrukturen. Um den Anteil des Straßengüterverkehrs am Modal Split um 25% zu senken, muss der Güterverkehrsanteil auf der Schiene am Modal Split um 75% wachsen, der des Binnenschiffs um 50%, was im Rahmen der heutigen Infrastruktur nicht möglich ist.

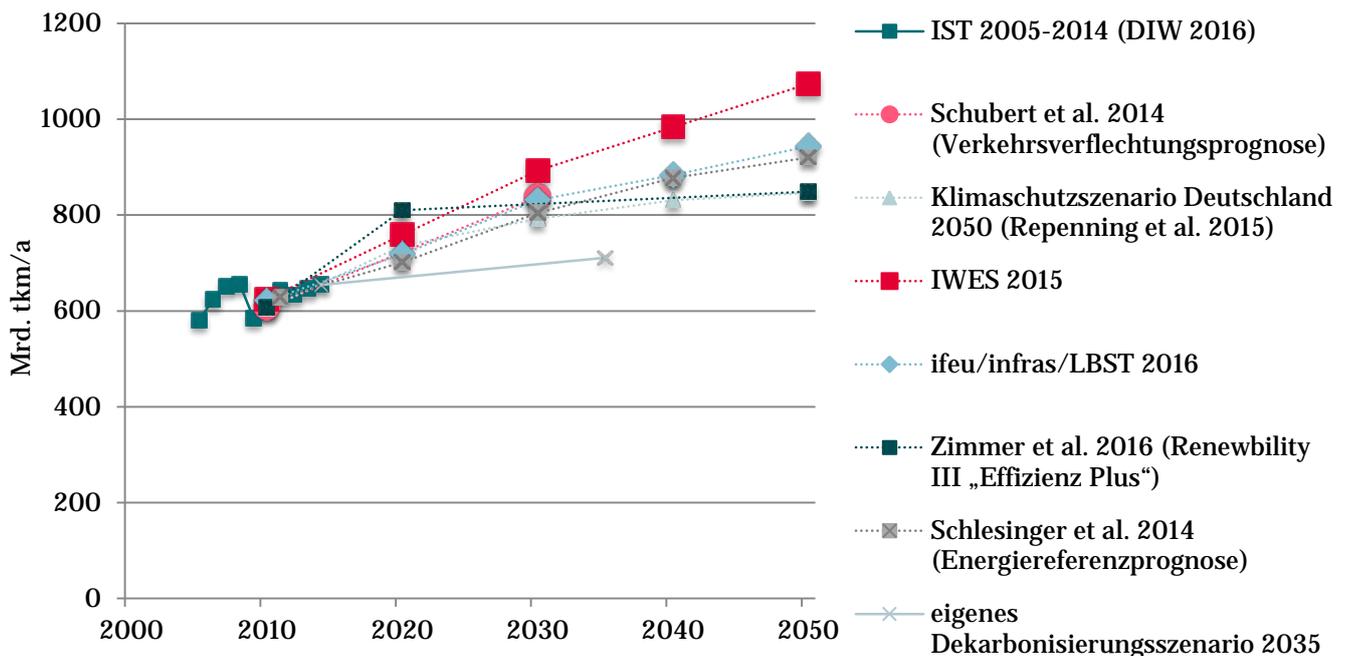


Abb. 12-6 Vergleich von Güterverkehrsaufwänden verschiedener Studien. Quelle: eigene Zusammenstellung

## 12.4 Weitere Umwelteffekte

### Luftqualität

Die Luftschadstoffemissionen des Straßenverkehrs – darunter insbesondere Feinstaub und Stickoxid – stellen eine massive Gesundheitsbelastung dar. Sie tragen zu Atemwegsinfekten, Lungenfunktionsstörungen und Herz-Kreislaufferkrankungen bei und erhöhen die Sterblichkeit der Bevölkerung (WHO 2016). In vielen Städten Deutschlands werden die geltenden Immissionsgrenzwerte regelmäßig überschritten – so wurde 2015 an 57 Prozent der städtischen Messstationen NO<sub>x</sub>-Konzentrationen

oberhalb des Grenzwert von  $40\mu\text{g}/\text{m}^3$  im Jahresmittel gemessen (vgl. UBA 2017c). Für die Stickoxidemissionen sind insbesondere Dieselfahrzeuge verantwortlich, zu den Feinstaubemissionen tragen auch moderne Benzinfahrzeuge maßgeblich bei.

Beim  $\text{NO}_x$ -Ausstoß stellt der Verkehr mit knapp 40 Prozent den mit Abstand größten Emittenten dar; bei den Feinstäuben machen die Emissionen des Verkehrs zwar nur einen Anteil von gut 20 Prozent der  $\text{PM}_{2,5}$ -Emissionen aus, jedoch sind jene Rußpartikel aufgrund ihrer Größe und chemischen Zusammensetzung besonders gesundheitsgefährdend.

Bislang wurden nur kurzfristig oder partiell wirksame, punktuelle Lösungen gefunden und umgesetzt - wie Umweltzonen (vgl. UBA 2017d); oder diskutiert und teilweise sogar von Gerichten gefordert - wie Diesel-Fahrverbote (vgl. zuletzt das Urteil des VG Stuttgart, 28.07.2017, Az. 13 K 5412/15). Der Diesel-Skandal um Volkswagen und weitere Automobilhersteller hat den Blick auf die Differenz zwischen der Erfüllung der Schadstoffnormen auf dem Prüfstand und der deutlichen Überschreitung im Realbetrieb gelenkt – im realen Fahrbetrieb sind die innerstädtischen Emissionen neuer Schadstoffklassen teilweise sogar höher als bei älteren Fahrzeugen (vgl. UBA 2017e; Becker und Schmidt 2017).

Der Skandal hat nicht nur gezeigt, wie leicht die bestehende EU-Regulierung der Fahrzeugemissionen zu umgehen war, sondern auch deutlich gemacht, dass konventionelle Fahrzeugkonzepte vor dem Zielkonflikt zwischen  $\text{CO}_2$ -Reduzierung und Luftreinhaltung scheitern, wenn zugleich erschwingliche und leistungsstarke Fahrzeuge vermarktet werden sollen. Mit einer grundlegenden Verkehrswende kann dieses Dilemma aufgelöst werden – wenn der Autoverkehr insgesamt deutlich verringert und Verbrennungsmotoren weitgehend durch Elektroantriebe ersetzt werden, kann auch die Wende hin zu sauberer Luft in den Städten gelingen.

### Flächenverbrauch

Flächenverbrauch bezeichnet die Inanspruchnahme von Naturflächen oder landwirtschaftlichen Flächen für neue Siedlungs- und Verkehrsflächen. Der Anteil der Siedlungs- und Verkehrsflächen in Deutschland ist bis heute immer weiter angestiegen.<sup>19</sup> Ihr aktueller Anteil liegt bei 13,7%. Der jährliche Anstieg dieses Anteils, also der Flächenverbrauch in Deutschland, ist dagegen rückläufig – in den letzten 15 Jahren ist das Niveau um fast die Hälfte zurückgegangen. Dennoch werden im Saldo täglich 66 Hektar neue Siedlungs- und Verkehrsflächen ausgewiesen. Dabei ist der Anstieg der Gebäude-, Frei- und Betriebsfläche besonders stark zurückgegangen und der relative Anteil der Verkehrsfläche entsprechend gestiegen – diese macht inzwischen rund ein Drittel des Flächenverbrauchs aus (Statistisches Bundesamt 2016c, vgl. Abb. 12.7).

---

<sup>19</sup> Das Statistische Bundesamt erhebt die Siedlungs- und Verkehrsfläche auf Basis der Auswertung der Liegenschaftskataster der Länder als Summe aus den Nutzungsarten: Gebäude- und Freifläche, Betriebsfläche (ohne Abbauland), Erholungsfläche, Verkehrsfläche und Friedhof.

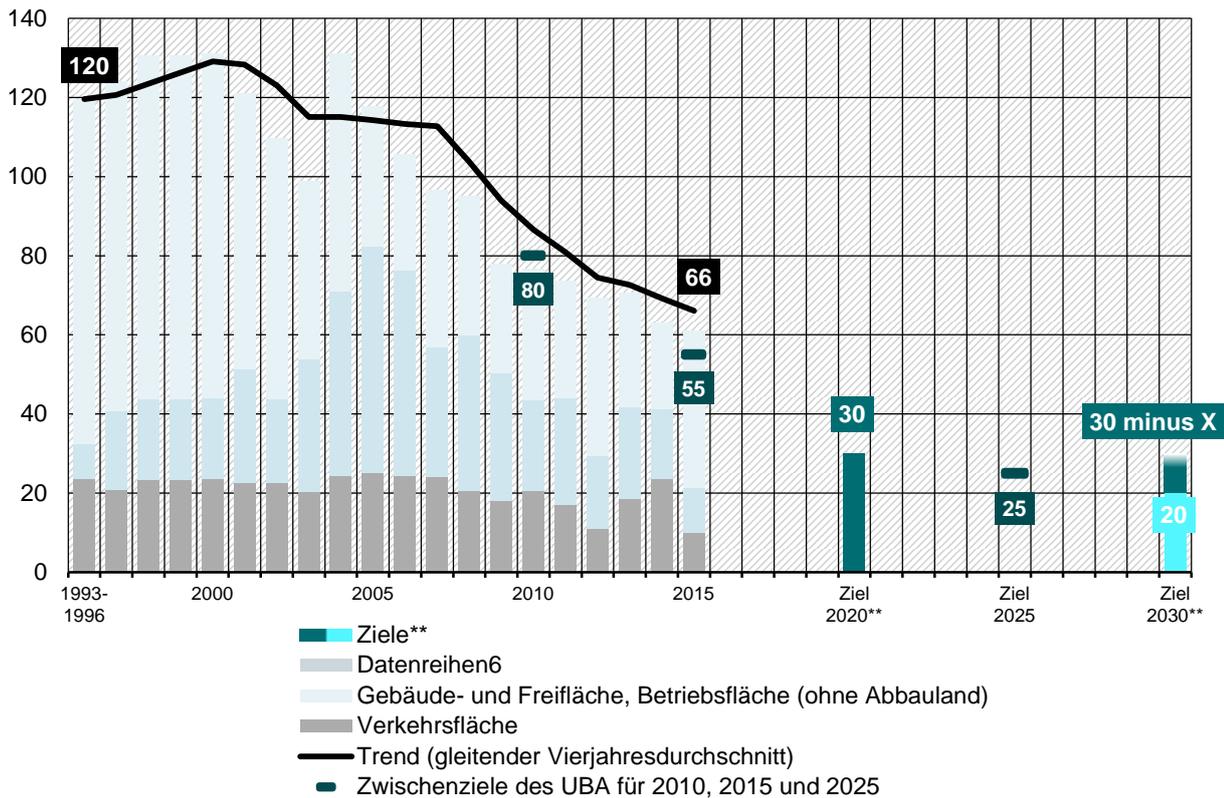


Abb. 12-7 Flächenverbrauch in Deutschland. Grafik: UBA; Daten: Statistisches Bundesamt 2016c

\*\* Ziel 2020: Klimaschutzplan 2050; Ziele 2030: "30 minus X" Hektar pro Tag: Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie 2016; 20 Hektar pro Tag: Integriertes Umweltprogramm 2030

Der Flächenverbrauch hat verschiedene negative Wirkungen auf die Umwelt. Zum einen wird ein großer Teil der neu als Siedlungs- und Verkehrsflächen ausgewiesenen Flächen bebaut und damit häufig versiegelt. Dadurch gehen Lebensräume für Tiere und Pflanzen sowie Ackerland verloren, das Versickern von Regen wird behindert und damit der Wasserhaushalt gestört. Auch Flächen für den Hochwasserschutz gehen verloren. Landschaftszerschneidung durch Verkehrswege führt zur Verkleinerung zusammenhängender Lebensräume und stört Wanderungsbewegungen von Tieren (BMUB 2017).

Zudem hat der Flächenverbrauch selber Auswirkungen auf den Verkehr. So führt die Neuinanspruchnahme von Flächen für neue oder den Ausbau bestehender Verkehrswege in der Regel zu einer Verringerung des Raumwiderstandes für den Verkehr – mit der Folge der Induzierung weiteren Verkehrs. Die Neuausweisung von Siedlungsflächen bei stagnierender Bevölkerung führt zu einer höheren Pro-Kopf-Siedlungsfläche. Da das Wachstum eher in Randlagen stattfindet und mit einer Zersiedlung einhergeht, werden die zurückzulegenden Wege länger und der Verkehr wächst – und damit zudem der Flächenverbrauch für neue Verkehrsflächen. Wird dagegen eine kompakte, dichte Siedlungsentwicklung gefördert, können auch Verkehrsflächen rückgebaut werden.

Die Bundesregierung setzt sich in ihrem Klimaschutzplan (2016) zum Ziel, den Flächenverbrauch bis 2050 auf Null zu reduzieren und eine vollständige Flächenkreislaufwirtschaft zu erreichen. Im vorliegenden Szenario wird angenommen, dass die

ambitionierten Maßnahmen im Transitionsfad „Verkehrersparsame Raumstrukturen“ (vgl. Kapitel 5.1.3) es ermöglichen, dieses Ziel bereits bis 2035 zu erreichen. Bund, Länder und Kommunen haben ambitionierte, vom Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) empfohlene Maßnahmen wie etwa Obergrenzen für die Flächenausweisung und Flankierung durch Flächenhandel oder eine Weiterentwicklung der Grunderwerbssteuer zu einer Neuversiegelungssteuer noch nicht erwogen.

Tabelle 12.5 vergleicht die gesamte Siedlungs- und Verkehrsfläche Deutschlands in km<sup>2</sup> und Prozent des Jahres 2015 mit dem Jahr 2035. Um die Zielmarke eines Nullwachstums ab 2035 zu erreichen, ist ausgehend von 66 ha Flächenverbrauch in 2015 eine lineare Abnahme angesetzt worden. Es zeigt sich, dass die Verkehrsfläche kaum mehr steigt.

Tab. 12-5 Siedlungs- und Verkehrsfläche in Deutschland 2015 und 2035. Quelle: Statistisches Bundesamt 2016c für 2015, eigene Annahmen für 2035

Nutzungsart	Gesamtfläche 2015 (km <sup>2</sup>   %)		Gesamtfläche 2035 (km <sup>2</sup>   %)	
	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%
Bodenfläche insgesamt	357.409	100,0	357.409	100,0
Gebäude- und Freifläche (Wo/Ge/In)	25.077	7,0	25.864	7,2
Betriebsfläche	2.608	0,7	1.404	0,4
darunter Abbauland	1.559	0,4		
Erholungsfläche	4.455	1,2	5.138	1,4
Verkehrsfläche	18.108	5,1	18.676	5,2
Landwirtschaftsfläche	184.332	51,6		
Waldfläche	109.515	30,6		
Wasserfläche	8.552	2,4		
Flächen anderer Nutzung	4.762	1,3		
darunter Friedhof	377	0,1	394	0,1
<b>Siedlungs- und Verkehrsfläche gesamt</b>	<b>49.066</b>	<b>13,7</b>	<b>51.477</b>	<b>14,4</b>

## 12.5 Soziale Effekte

Mobilität bedeutet Teilhabe am öffentlichen Leben. Wenn die Verkehrsräume so sicher und barrierefrei gestaltet werden, dass man sich überall nicht-motorisiert bewegen kann und wenn ausreichend Dichte, funktionale Mischung und Infrastrukturen des ÖPNV gegeben sind, dann können alle frei über die Wahl des Verkehrsmittels entscheiden. In vielen Städten wird dieses Prinzip schon seit vielen Jahren verstärkt umgesetzt. In diesem Sinne ist eine Konzentration der Bevölkerung in Städten, wie sie die Maßnahmen im Transitionsfad zu verkehrersparsamen Raumstrukturen umsetzen, nicht nur klimafreundlich, sondern fördert auch soziale Inklusion. Von der guten Erreichbarkeit von Arbeit, Freizeit und Versorgung in Städten profitieren Personen, die autofrei leben müssen oder wollen. Die in den Transitionsfaden dargestellten Maßnahmen führen aber auch zur Stärkung der ÖPNV-Infrastruktur in ländlichen Regionen und tragen damit zur verbesserten Erreichbarkeit von zentralen Orten bei.

Die „Richtlinie für integrierte Netzgestaltung“ (RIN 2008) gibt als Zielwert eine maximale Fahrzeit mit öffentlichen Verkehrsmitteln von 45 Minuten vom Wohnstandort zum nächsten Mittelzentrum und von maximal 90 Minuten zum nächsten Oberzentrum vor. Die Landesentwicklungspläne der Bundesländer streben dies über Vor-

gaben zur Zentrenstruktur und Überlegungen zur Verkehrsinfrastruktur an. Tabelle 12.6 vergleicht die Erreichbarkeiten von Mittelzentren (bzw. Oberzentren) durch öffentliche Verkehrsmittel im Jahr 2035 im Trend und in der Szenariovariante (linke und mittlere Spalte). Zugangszeiten zu Haltestellen sind dabei nicht berücksichtigt. Zum Vergleich: Über den MIV sind Mittelzentren für nahezu alle innerhalb von 30 Minuten erreichbar (vgl. BBSR 2011).

Tab. 12-6 Erreichbarkeiten durch öffentliche Verkehrsmittel in Deutschland.  
Quelle: eigene Berechnungen auf Basis von Wehmeier und Koch 2010

Bevölkerungsanteile in %	Erreichbares Bevölkerungspotenzial der Mittel- bzw. Oberzentren innerhalb einer Fahrtzeit von maximal...		Anteil der Bevölkerung, der maximal 1 km von einer Haltestelle entfernt wohnt
	30 Minuten	60 Minuten	
Ausgangssituation 2015	68,5	96,7	94,2
Trend 2035	68,8	96,7	94,4
Szenario 2035	69,6	97,0	94,9

Es zeigt sich, dass sich über die in den Transitionspfaden beschriebenen Maßnahmen die Erreichbarkeiten von Ober- und Mittelzentren für die Einwohner Deutschlands verbessern. Allerdings kann der Bevölkerungsrückgang von 81,8 Mio. in 2015 auf prognostizierte 78,2 Mio. in 2035 (vgl. BBSR 2015), kombiniert mit zusätzlicher Urbanisierung, die Versorgungsfunktion bestimmter Mittelzentren in ländlichen Regionen gefährden und in der Konsequenz zu längeren Anfahrtszeiten für die betroffene Bevölkerung führen. Wichtig ist daher auch eine Stärkung des öffentlichen Personenverkehrs wie in den Transitionspfaden beschrieben, sie trägt zur besseren Erreichbarkeit von Mittelzentren auch in Zukunft bei und reduziert die Benachteiligung von Personen, die auf den ÖPV angewiesen sind.

Zur Förderung von sozialer Inklusion sollten sich Entscheidungsträger zusätzlich mit Maßnahmen zur Stärkung der Versorgungsfunktionen in ländlichen Gebieten auseinandersetzen, sie werden als Antwort auf den demografischen Wandel in vielen Veröffentlichungen diskutiert, z.B. in den Raumordnungsberichten des BBSR (vgl. BBSR 2011).

Betrachtet man die Haltestellendichte als Indikator für Teilhabe von Personen, die nicht über Zugang zu einem (privaten) Pkw verfügen, so ergibt sich ein ähnliches Bild. Der Anteil der Bevölkerung Deutschlands, die maximal 1 km entfernt von einer Haltestelle wohnt, beträgt in Städten derzeit 98%, ländlichen Gebieten nur 85% (vgl. Wehmeier und Koch 2010). Sollte sich die Bevölkerung wie angenommen stärker in Städten konzentrieren, kann dies den Anteil der Menschen mit Zugang zu einer Haltestelle des ÖPV im Abstand von unter einem Kilometer erhöhen (siehe Tab. 6.6, rechte Spalte). Dies ist besonders für Kinder und ältere Bevölkerungsteile wichtig.

## 12.6 Einnahmen und Ausgaben: Finanzielle Vorteile der Transformation

### Die Mittelverwendung im Bundesverkehrswegeplan

Der aktuelle Bundesverkehrswegeplan (BVWP) gründet auf einer Verkehrsverflechtungsprognose, welche im Personenverkehr in Deutschland bis zum Jahr 2030 im

Vergleich zu 2010 eine Zunahme des Verkehrsaufwandes („Verkehrsleistung“) im motorisierten Verkehr um 12,9% auf 1.261,7 Mrd. Pkm vorhersieht. Dies entspricht einem jährlichen Wachstum von 0,6%. Der Transportaufwand im Güterverkehr soll im selben Zeitraum mit 38% auf 837,6 Mrd. tkm noch deutlicher stärker ansteigen (vgl. Schubert et al. 2014).

Der aktuelle Entwurf des BVWP (vgl. BMVI 2016) hat auf Basis dieser Prognose seinen Investitionsschwerpunkt im Bereich Erhaltung und Ersatz, sieht aber auch erheblichen Bedarf für Neu- und Ausbau der Fernstraßen, Schienenwege und Wasserstraßen des Bundes. Von den 269,6 Mrd. € für den Planungshorizont 2016 bis 2030 werden demnach

- allein für den Substanzerhalt der Netze von Straße, Schiene und Wasserstraße 141,6 Mrd. € benötigt.
- Für den Aus- und Neubau sieht das BMVI 63,6 Mrd. € vor, von denen 25,1 Mrd. € laufende bzw. bereits fest disponierte Vorhaben sind. Hinzu kommen
- eine sogenannte „Schleppe“ in Höhe von 42,8 Mrd. € (inkl. 8,1 Mrd. € Erhaltungs- bzw. Ersatzanteil) zur Abfinanzierung von Vorhaben, die erst in einer späten Phase des BVWP-Zeitraums begonnen und nach 2030 zu Ende finanziert werden sollen; sowie
- sonstige Investitionen in Höhe von 21,6 Mrd. €.

Der vorliegende Kabinettsplan zum BVWP weist darauf hin, dass der Aus- und Neubau der Bundesfernstraßen volkswirtschaftliche Kosten durch zusätzliche CO<sub>2</sub>-Emissionen verursacht (vgl. ebd., 24f.). Beim Investitionsvolumen für Aus- und Neubau gibt es ein Szenario, welches sich an der Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung orientiert und mit 62% der vorgesehenen Mitteln dem Ausbau der Schiene Priorität einräumt. Gleichwohl würden in diesem Szenario für weiteren Bundesfernstraßenbau 28,4 Mrd. € vorgesehen.

Das Dekarbonisierungs-Szenario 2035 reduziert den Verkehrsaufwand im Vergleich zur Verkehrsprognose 2030 signifikant. Tabelle 12.7 vergleicht die Verkehrsaufwände aus der Verkehrsverflechtungsprognose und dem Dekarbonisierungsszenario 2035 (und lässt dabei die unterschiedlichen Bezugsjahre unberücksichtigt).

Tab. 12-7 Vergleich Verkehrsverflechtungsprognose 2030 mit Dekarbonisierungsszenario 2035.  
Quelle: Schubert et al. 2014, eigenes Dekarbonisierungsszenario 2035

	1) 2010	2) 2030: Verflechtungs- prognose	3) 2035: Dekarbonisie- rungsszenario	1) - 3)	2) - 3)
Verkehrsaufwand Personen- verkehr, Straße/MIV (Mrd. Pkm)	902,4	991,8	462,9	439,5	528,9
Verkehrsaufwand Güter- verkehr, Straße (Mrd. tkm)	437,3	607,4	388,1	49,3	219,3

Unabhängig von der zugrunde liegenden Fahrzeugflotte spricht bei einer Reduktion des Verkehrsaufwandes auf der Straße gegenüber dem Niveau von 2010 nichts für den weiteren Aus- bzw. Neubau der Bundesfernstraßen. Diese Mittel von bis zu 63,6 Mrd. € könnten dem schienengebundenen Verkehr zur Verfügung gestellt werden.

Zusätzliche Investitionen sind allerdings im Bereich der Elektrifizierung des Güterverkehrs auf Bundesautobahnen nötig, um die (EU-weite) Verfügbarkeit der Oberleitungen für den Schwerlastverkehr zu realisieren (vgl. Kapitel 10).

### **Einnahmen durch die Steuerung des MIV**

Im Transitionsfad zur Steuerung des MIV wird vorgesehen, die Preise für die Anschaffung und Nutzung privater Pkw deutlich zu erhöhen, nämlich über eine Zulassungssteuer, eine Weiterentwicklung der Kfz-Steuer hin zu einer Pkw-Umlaufsteuer, die sich ausschließlich nach dem Energieverbrauch des Wagens richtet, sowie über eine distanzbasierte Pkw-Maut (die regional unterschiedlich gestaltet werden kann).

Diese Steuern dienen der Lenkungswirkung hin zu einer Dekarbonisierung des Verkehrs in Deutschland und einer Änderung der deutschen Mobilitätskultur. Je weniger Einnahmen der Staat über diese Abgaben generiert, desto erfolgreicher sind die Instrumente für die Mobilitätswende in Deutschland. Gleichwohl können sie in der Übergangsphase bis 2035 Einnahmen generieren, die für die Stärkung des Umweltverbundes nötig sind (vgl. Kapitel 7).

### **Umweltschädliche Subventionen**

Das Umweltbundesamt veröffentlicht seit 2008 im zweijährigen Turnus eine Fachbroschüre zu umweltschädlichen Subventionen. Der letzte Bericht (vgl. UBA 2016b) zählt im Verkehr für das Bezugsjahr 2012 folgende Subventionen auf:

- Energiesteuervergünstigung für Dieselmotoren: 7,35 Mrd. €
- Entfernungspauschale: 5,1 Mrd. €
- Energiesteuerbefreiung des Kerosins: 7,08 Mrd. €
- Mehrwertsteuerbefreiung für internationale Flüge: 4,76 Mrd. €
- Energiesteuerbefreiung der Binnenschifffahrt: 170 Mio. €
- Energiesteuerbegünstigung von Arbeitsmaschinen und Fahrzeugen, die ausschließlich dem Güterumschlag in Seehäfen dienen: 25 Mio. €
- Pauschale Besteuerung privat genutzter Dienstwagen: 3,1 Mrd. €
- Biokraftstoffe der ersten Generation, die aus der regulären landwirtschaftlichen Erzeugung stammen und somit zu den bestehenden Umweltproblemen vor Ort beitragen bzw. diese verschärfen: 1,05 Mrd. €

Auch hier gilt, dass die Summe der Subventionen bei Abschaffung nicht dem Fiskus zur Verfügung stünden, sondern ihre Abschaffung eine gewünschte Lenkungswirkung für ambitionierten Klima- und Umweltschutz entfalten wird.

## 13 Resümee

Die Dekarbonisierung des Verkehrs in Deutschland erfordert eine grundlegende Verkehrswende. Das vorliegende Szenario des Wuppertal Instituts hat gezeigt, dass eine solche Verkehrswende möglich ist, wenn ambitionierte und aufeinander abgestimmte Maßnahmenbündel umgesetzt werden.

Ein Emissionsreduktionspfad, der konsistent zu den internationalen Bemühungen aus dem Pariser Klimaschutzabkommen und den Absichten der Bundesregierung ist, die Erwärmung der globalen Mitteltemperatur auf einen Wert von 1,5°C gegenüber vorindustriellem Niveau zu begrenzen, erfordert zeitnahe Weichenstellungen. Die Analysen des Dekarbonisierungsszenarios 2035 verdeutlichen die folgenden Herausforderungen für die notwendigen Veränderungen bis zum Jahr 2035 in der Personenmobilität und im Güterverkehr:

- Der Verkehrsaufwand reduziert sich gegenüber einschlägigen Prognosen sowohl im Personen-, als auch im Güterverkehr deutlich.
- Im Personenverkehr übersetzt sich dies in 894 Mrd. Personenkilometer, eine Reduktion gegenüber 2008 (1.172 Mrd. Pkm).
- Im Güterverkehr ist eine Reduzierung des Wachstums auf 711 Mrd. Tonnenkilometer im Jahr 2035 möglich (2015: 631 Mrd. tkm), zugleich muss jedoch eine deutliche Verlagerung weg von der Straße stattfinden – der Verkehrsaufwand des Straßengüterverkehrs sinkt im Szenario auf 388 Mrd. tkm.
- Pkw-Besitz und -Nutzung gehen entsprechend der Analysen deutlich zurück. Vor allem die verdichteten Gebiete und hier die Kernbereiche der Großstädte bieten das Potenzial zur Entmotorisierung und den Umstieg auf Umweltverbund, Car- und Ridesharing. Im Mittel ergeben sich 2035 200 Pkw auf 1.000 Personen.
- Der motorisierte Personenverkehr wird weitgehend elektrifiziert. Gleichzeitig müssen die Pkw in der gesamten Flotte deutlich kleiner und leichter werden, um den Endenergiebedarf zu reduzieren.

Die Verkehrswende bedeutet somit zunächst eine neue Mobilität: die gleichen Mobilitätsbedürfnisse können mit weniger Verkehrsaufwand erfüllt werden, Mobilität wird flexibler und multimodaler, die Autonutzung geht zurück. Zugleich bedeutet sie eine Energiewende im Verkehr – weg vom Öl, hin zu einer auf erneuerbarem Strom basierenden Elektromobilität.

Eine Erreichung dieser ambitionierten Ziele erfordert die konsequente Umsetzung einer Vielzahl an Instrumenten und Maßnahmen. Eine Stärkung des Umweltverbunds, also des öffentlichen Verkehrs in Ballungsräumen sowie generell auf Langstrecken, sowie des nicht-motorisierten Verkehrs insbesondere in Städten und verdichteten Räumen sind notwendige, aber nicht hinreichende Voraussetzungen.

Die Analysen zeigen die Bedeutung einer Verteuerung des MIV über Zulassungs- und Umlaufsteuern auf Basis des Energieverbrauchs von Pkw auf, sowie die Wichtigkeit einer distanzbasierten Pkw-Maut. Diese Vorgaben haben nicht nur eine Steuerungswirkung, sondern bilden eine Quelle für die zusätzlichen Finanzmittel, die für den massiven Ausbau des öffentlichen Verkehrs bzw. Schienenverkehrs notwendig sind.

Hinzu kommen ordnungsrechtliche Maßnahmen wie z.B. eine Ausweitung der Zugangsbeschränkungen für Pkw in Städten, sowie Verbote von Inlandsflügen. Um den Verbraucherinnen und Verbrauchern Übergangsfristen zu bieten, sollte die Pkw-Maut wie von der EU vorgeschlagen noch in diesem Jahrzehnt distanzbasiert eingeführt werden und kann dann im nächsten Jahrzehnt sukzessive verschärft werden. Bei Inlandsflügen kann die Anzahl genehmigter Starts und Landungen kontinuierlich reduziert werden.

Von zentraler Bedeutung ist, dass die steuernden Eingriffe verbunden werden mit einer deutlichen Steigerung der Attraktivität alternativer Angebote (z.B. des ÖPV). Hierzu bedarf es nicht nur auf Quantität ausgerichtete Maßnahmen, sondern auch eine Qualitätsoffensive. Letztlich geht es nicht darum Mobilität einzuschränken, sondern intelligent zu steuern. Neue Technologien bieten dazu die notwendigen Voraussetzungen.

Die Digitalisierung bietet die Möglichkeit, die Sharing Economy und hier die Sharing Mobility möglichst flächendeckend auszuweiten, sodass der Verzicht auf einen eigenen Pkw nicht gleichbedeutend ist mit dem Verzicht, ein Auto für spezifische Fahrten nutzen zu können. Die komfortable Buchung und Nutzung von (bis 2035 möglicherweise automatisierten) Sharing-Fahrzeugen, die optimal mit Fahrgästen ausgelastet werden und die effiziente Routen wählen, haben das Potenzial, die Grenzen zwischen Taxi, Carsharing und flexibler Bedienform des ÖPNV aufzulösen und je nach Bedarf geeignete Verkehrslösungen anzubieten.

Die für den Verkehrssektor zur Verfügung stehenden öffentlichen Mittel sollten fokussiert für die Erreichung der vorgenannten Ziele eingesetzt werden, insbesondere zur Stärkung des Umweltverbundes und zur Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs. Dabei arbeiten verschiedene politische Ebenen zusammen an einer integrierten Verkehrs- und Mobilitätspolitik, die eng mit benachbarten Politikfeldern abgestimmt ist. Ein langfristig orientiertes Zielkonzept kann dabei helfen, ein gemeinsames Verständnis zu schaffen und diese Integration zu ermöglichen.

Das Szenario hat deutlich gemacht, dass die vollständige Dekarbonisierung große Mengen erneuerbar erzeugten Stroms erfordert – mehr, als bisherige Energiesystem-szenarien abbilden. Daher muss der Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung mit noch größeren Schritten vorangehen, um genügend erneuerbare Energie für den Verkehrssektor bereitstellen zu können.

Die Verkehrswende zur Dekarbonisierung von Verkehr und Mobilität in Deutschland bringt aber mehr als nur einen klimafreundlichen Verkehr. Sie bringt zugleich weitere Umweltentlastungen und gesellschaftliche Nutzen mit sich: der Flächenverbrauch wird reduziert und Naturräume bleiben erhalten; Schadstoff- und Lärmemissionen sowie Verkehrsunfälle gehen zurück; verbesserte Nahmobilität und erschwinglicher öffentlicher Verkehr erleichtern soziale Teilhabe, und zusätzlicher öffentlicher Lebensraum insbesondere in den Städten wird gewonnen. Letztlich kann durch eine beherrzte Umsetzung der diskutierten Maßnahmen auch eine starke Innovationsdynamik ausgelöst werden, die dazu beitragen kann, die offensichtlichen industrie- und strukturpolitischen Herausforderungen in Bezug auf den in Deutschland sehr wichtigen Automobilssektor nicht nur zu dämpfen, sondern am Ende mit Blick auf eine globale Mobilitätswende sogar zu kompensieren.

Im Automobilland Deutschland stellt eine solche Verkehrswende die Politik vor große Herausforderungen – eine Abkehr von der Subvention der Automobilität wird nicht ohne Widerspruch bleiben. Die vielfältigen positiven Wirkungen für Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft zeigen jedoch, dass es sich lohnt, den Weg in ein neues Verkehrssystem anzutreten, statt ihn weiter zu verzögern.

## 14 Literaturverzeichnis

AGEB 2016: *Energiebilanz für die Bundesrepublik Deutschland. Online-Ressource.*

Agora Verkehrswende 2017: *Mit der Verkehrswende die Mobilität von morgen sichern. 12 Thesen zur Verkehrswende. Berlin: Agora Verkehrswende. [https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/12\\_Thesen/Agora-Verkehrswende-12-Thesen\\_WEB.pdf](https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/12_Thesen/Agora-Verkehrswende-12-Thesen_WEB.pdf)*

BCS 2017a: *Aktuelle Zahlen und Daten zum CarSharing in Deutschland. <https://carsharing.de/alles-ueber-carsharing/carsharing-zahlen/aktuelle-zahlen-daten-zum-carsharing-deutschland>*

BCS 2017b: *Bundestag verabschiedet CarSharing-Gesetz. <https://carsharing.de/bundestag-verabschiedet-carsharing-gesetz>*

Becker, Udo; Schmidt, Wolfram (2017): *Emissionen: Diesel-Fahrverbote erscheinen unausweichlich. 24. Mai 2017. Online erschienen in: <https://www.internationales-verkehrswesen.de/diesel-fahrverbote-in-staedten-erscheinen-unausweichlich/>*

Behrendt, Siegfried 2000: *Car-Sharing: Nachhaltige Mobilität durch eigentumslose Pkw-Nutzung? IZT Werkstattbericht Nr. 43. Berlin*

Bergk, Fabian; Biemann, Kirsten et al. 2016: *Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050. UBA Texte 56/2016. Dessau: Umweltbundesamt*

Bergk, Fabian; Knörr, Christiane; Lamprecht, Udo 2017: *Klimaschutz im Verkehr. Neuer Handlungsbedarf nach dem Pariser Klimaschutzabkommen. UBA Texte 45/2017. Dessau: Umweltbundesamt*

BiB 2014: *Wanderungshäufigkeit über Gemeindegrenzen nach Alter und Geschlecht in Deutschland, 2014. Abrufbar unter: [http://www.bib-demografie.de/DE/ZahlenundFakten/10/Abbildungen/a\\_10\\_03\\_wanderungshaeufigkeit\\_gemeindegrenzen\\_alter\\_geschl\\_d\\_2014.html?nn=4958496](http://www.bib-demografie.de/DE/ZahlenundFakten/10/Abbildungen/a_10_03_wanderungshaeufigkeit_gemeindegrenzen_alter_geschl_d_2014.html?nn=4958496)*

BBSR 2011: *Raumordnungsbericht 2011. Bonn: Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung*

BBSR 2015: *Die Raumordnungsprognose 2035 nach dem Zensus. Bonn: Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung*

BMUB 2016a: *Klimaschutzplan 2050. Berlin: BMUB.*

[http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan\\_2050\\_bf.pdf](http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_bf.pdf)

BMUB 2016b: *Wirkung von E-Car Sharing Systemen auf Mobilität und Umwelt in urbanen Räumen (WiMobil) – Gemeinsamer Abschlussbericht. [http://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2016-10/Abschlussbericht\\_WiMobil.pdf](http://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2016-10/Abschlussbericht_WiMobil.pdf)*

BMUB 2017: *Flächenverbrauch – Worum geht es? <http://www.bmub.bund.de/themen/strategien-bilanzen-gesetze/nachhaltige-entwicklung/strategie-und-umsetzung/reduzierung-des-flaechenverbrauchs/>*

BMVI 2014: *Radverkehr in Deutschland Zahlen, Daten, Fakten. <http://www.ziv-zweirad.de/fileadmin/redakteure/Downloads/PDFs/radverkehr-in-zahlen.pdf>*

BMVI 2016: *Bundesverkehrswegeplan 2030. Entwurf März 2016. Berlin.*

[https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/BVWP/bvwp-2030-kabinettsplan.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/BVWP/bvwp-2030-kabinettsplan.pdf?__blob=publicationFile) (Zugriff: 22.5.2017)

BMVI 2017: *BMVI unterstützt Carsharing. <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/LA/carsharing-gesetz.html>*

Cervero, R.; Golob, A.; Nee, B. 2007: *City CarShare: Longer Term Travel Demand and Car Ownership impact. In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1992, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C. (2007), 70-80*

Chen, C., Gong, H., Paaswell, R. 2008: *Role of the built environment on mode choice decisions: additional evidence on the impact of density. Transportation 35 (3), 285–300*

DIW 2016: *Verkehr in Zahlen 2016/2017*. Hamburg: DVV Media Group

DFS 2016: *LIZ Annual Summary 2016. IFR flights in the Federal Republic of Germany*.

[https://www.dfs.de/dfs\\_homepage/de/Unternehmen/Zahlen%20und%20Daten/Statistiken/Annual\\_Summary\\_2016.pdf](https://www.dfs.de/dfs_homepage/de/Unternehmen/Zahlen%20und%20Daten/Statistiken/Annual_Summary_2016.pdf)

DLR 2010: *Entwicklung eines Szenariomodells zur Simulation der zukünftigen Marktanteile und CO<sub>2</sub>-Emissionen von Kraftfahrzeugen (VECTOR21)*. DLR-Forschungsbericht 2010-26. Stuttgart.

DLR/ Ifeu/ LBST/ DFZ 2015: *Erneuerbare Energien im Verkehr, Potenziale und Entwicklungsperspektiven verschiedener erneuerbarer Energieträger und Energieverbrauch der Verkehrsträger. Studie im Rahmen der Wissenschaftlichen Begleitung, Unterstützung und Beratung des BMVI in den Bereichen Verkehr und Mobilität mit besonderem Fokus auf Kraftstoffen und Antriebstechnologien sowie Energie und Klima*.

DLR / Ifeu / LBST / DBFZ 2016: *Verkehrsverlagerungspotenzial auf den Schienengüterverkehr in Deutschland. Endbericht. Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Erstellt von A. Lobig, G. Liedtke, A. Lischke, A. Wolfermann (DLR), W. Knörr (Ifeu)*. Berlin / Heidelberg.

Europäische Kommission 2011: *Energy Roadmap 2050*. [http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/;ELX\\_SESSIONID=pXNYJKSF-bLwdq5JBWQ9CvYWyJxD9RF4mnS3ctywT2xXmFYhnlW1!-868768807?uri=CELEX:52011DC0885](http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/;ELX_SESSIONID=pXNYJKSF-bLwdq5JBWQ9CvYWyJxD9RF4mnS3ctywT2xXmFYhnlW1!-868768807?uri=CELEX:52011DC0885)

Fearnley, Nils; Flügel, Stefan; Killi, Marit; Gregersen, Fredrik A; Wardman, Mark; Caspersen, Elise; Toner, Jeremy P 2016: *Triggers of Urban Passenger Mode Shift - State of the Art and Model Evidence*. European Transport Conference 2016 Barcelona.

Forsyth, A., Hearst, M., Oakes, J.M., Schmitz, K.H. 2008: *Design and destinations: factors influencing walking and total physical activity*. *Urban Stud.* 45 (9), 1973–1996

Frick, Roman; Belart, Benjamin; Schmied, Martin; Grimm, Bente; Schmücker, Dirk 2014: *Langstreckenmobilität - Aktuelle Trends und Perspektiven*. Bern/Kiel: INFRAS/NIT

Gasser, Tom et al. 2015: *Bericht zum Forschungsbedarf. Runder Tisch Automatisiertes Fahren – AG Forschung*. [http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/Digitales/bericht\\_zumforschungsbedarf\\_runder\\_tisch\\_automatisiertes\\_fahren.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/Digitales/bericht_zumforschungsbedarf_runder_tisch_automatisiertes_fahren.pdf?__blob=publicationFile). Aufgerufen am 22.1.2016

Giesen, Christoph; Fromm, Thomas 2016: *Deutsche Autohersteller sind entsetzt über chinesische Elektroquote*. In *Süddeutsche Zeitung* vom 30. Oktober 2016

Greenpeace 2015: *Klimaschutz: Der Plan. Energiekonzept für Deutschland*. Hamburg: Greenpeace. <https://www.greenpeace.de/2050-DerPlan>

Greenpeace 2016: *Rollenwechsel. Konzept für eine neue Mobilität in Städten*. Hamburg: Greenpeace. [https://www.greenpeace.de/sites/www.greenpeace.de/files/publications/screen\\_s01851\\_ds\\_studie\\_de\\_mobi\\_22\\_06\\_16.pdf](https://www.greenpeace.de/sites/www.greenpeace.de/files/publications/screen_s01851_ds_studie_de_mobi_22_06_16.pdf)

Guo, J.Y., Chen, C. 2007: *The built environment and travel behavior: making the connection*. *Transportation* 34 (5), 529–533.

Hans Böckler Stiftung 2015: *Branchenanalyse: Zukunft des ÖPNV - Entwicklungstendenzen und Chancen*. Düsseldorf.

Haucap, Justus; Pavel, Ferdinand; Aigner, Rafael; Arnold, Michael; Huttenrott, Moritz; Kehder, Christiane 2016: *Chancen der Digitalisierung auf Märkten für urbane Mobilität: Verbraucherwünsche und neue Anbieter. Eine ökonomische Untersuchung im Auftrag von Uber*. Berlin/Düsseldorf: DIW econ/dice-consult

Hautzinger, H.; Fichert, F.; Fuchs, M.; Stock, W. 2011: *Eignung einer City-Maut als Instrument der Verkehrs- und Umweltpolitik in der Freien und Hansestadt Hamburg*. Heilbronn: Institut für angewandte Verkehrs- und Tourismusforschung e.V. (IVT). <http://www.hamburg.de/contentblob/2929662/data/city-maut.pdf>, Zugriff 17.01.2017

- Heinrichs, D. 2016: *Autonomous Driving and Urban Land Use*. In: Maurer M.; Gerdes, J.C.; Lenz, B; and H. Winner (ed.). *Autonomous Driving. Technical, Legal and Social Aspects*. Wiesbaden: Springer, S. 213-231
- Heinrichs, Eckhart; Scherbarth, Frank; Sommer, Karsten 2016: *Wirkungen von Tempo 30 an Hauptverkehrsstraßen*. Dessau: Umweltbundesamt
- Höhne, Niklas; Kuramochi, Takeshi; Sterl, Sebastian; Röschel, Lina 2016: *Was bedeutet das Pariser Abkommen für den Klimaschutz in Deutschland?*. Köln/Berlin: NewClimate Institute
- Holz-Rau, Christian; Scheiner, Joachim 2016: *Raum und Verkehr - ein Feld komplexer Wirkungsbeziehungen. Können Interventionen in die gebaute Umwelt klimawirksame Verkehrsemissionen wirklich senken?* In: *Raumforschung und Raumordnung 2016*.
- Hoogendoorn, R.; Van, A.; Hoogendoorn, S. 2014: *Automated Driving, Traffic Flow Efficiency and Human Factors: Literature Review*. Proceedings of the 93th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington D.C.
- Hülsmann, Friederike; Mottschall, Moritz; Hacker, Florian 2014: *Konventionelle und alternative Fahrzeugtechnologien bei Pkw und schweren Nutzfahrzeugen – Potenziale zur Minderung des Energieverbrauchs bis 2050*. Öko-Institut Working Paper 3/2014
- Hütter, Andrea 2016: *Güterverkehr in Deutschland 2014*. In: Statistisches Bundesamt (Hrsg.): *WISTA 1/2016*, S.47-62. [https://www.destatis.de/DE/Publikationen/WirtschaftStatistik/2016/01/Wista\\_1\\_2016.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Publikationen/WirtschaftStatistik/2016/01/Wista_1_2016.pdf?__blob=publicationFile)
- Hunecke, M. 2006: *Zwischen Wollen und Müssen. Ansatzpunkte zur Veränderung der Verkehrsmittelnutzung. Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis*, 3(15), S.31–37
- IEA 2016: *CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion. Highlights*. Paris: IEA
- IFAK 2014: *Kundenzufriedenheit mit Taxiunternehmen in Deutschland 2014*. Verfügbar unter: [http://www.bzp.org/Content/INFORMATION/Pressemitteilungen/IFAK\\_Kundenzufriedenheit\\_Taxi\\_2014\\_Komplettfassung.pdf](http://www.bzp.org/Content/INFORMATION/Pressemitteilungen/IFAK_Kundenzufriedenheit_Taxi_2014_Komplettfassung.pdf)
- ifeu/infras/LBST 2016: *Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes*. Dessau-Rosslau
- ifmo (Hrsg.) 2011: *Mobilität junger Menschen im Wandel – multimodaler und weiblicher*, München: ifmo
- infas; DLR 2010: *Mobilität in Deutschland 2008. Ergebnisbericht. Struktur – Aufkommen – Emissionen – Trends*, Bonn und Berlin
- IPCC 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge Univ. Press
- IWES et al. 2015: *Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr*. Kassel u.a., September 2015
- Jansen, Ulrich; Koska, Thorsten; Müller, Miriam; Schäfer-Sparenberg, Carolin 2016: *Mobilität in Nordrhein-Westfalen. Situation und Zukunftsperspektiven*.
- JRC/EUCAR/CONCAWE 2014: *WELL-TO-WHEELS Report Version 4.a, Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context*, JRC Technical Reports, Report EUR 26236 EN, European Commission, Luxembourg.
- KBA 2015: *Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge (VD) Inlandsverkehr. Jahr 2014. VD 3. Flensburg*
- Knörr, W. 2013. *Aktualisierung "Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoff-emissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030" (TREMODO, Version 5.3) für die Emissionsberichtserstattung 2013 (Berichtsperiode 1990-2011)*, Heidelberg: ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH

- Le Vine, S., Zolfaghari, A., and Polak, J.W. 2014: *Carsharing: Evolution, Challenges and Opportunities, Report to the European Automobile Manufacturers Association (ACEA) Scientific Advisory Group*
- Maaß, Christian; Waluga, Gregor 2014: *Neue ÖPNV- Finanzierungsinstrumente für Länder und Kommunen*, in: *Verkehr und Technik* 10/2014, S. 397–401
- Mock, Peter 2010: *Entwicklung eines Szenariomodells zur Simulation der zukünftigen Marktanteile und CO<sub>2</sub>-Emissionen von Kraftfahrzeugen (VECTOR21)*. Dissertation. Universität Stuttgart
- Morsy, Salim 2016: *Global EV sales outlook to 2040*. Advanced transport - research note. Bloomberg New Energy Finance
- OECD / ITF 2016: *Shared Mobility. Innovation for Livable Cities. Corporate Partnership Board Report*. Paris
- Öko-Institut et al. 2012: *Renewability II – Szenario für einen anspruchsvollen Klimaschutzbeitrag des Verkehrs*. Zentrale Ergebnisse. Berlin u.a.
- Phleps, Peter; Feige, Irene; Zapp, Kerstin 2015: *Die Zukunft der Mobilität. Szenarien für Deutschland in 2035*. München: ifmo
- Pütz, Thomas 2015: *Verkehrsbild Deutschland: Pendlerströme. Quo navigant? BBSR-Analysen KOMPAKT 15/2015*. Bonn: Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung
- Rat der EU 2014: *2030 Climate and Energy Policy Framework*. EUCO 169/14. CO EUR 13 CONCL5. [http://www.consilium.europa.eu/uedocs/cms\\_data/docs/pressdata/en/ec/145397.pdf](http://www.consilium.europa.eu/uedocs/cms_data/docs/pressdata/en/ec/145397.pdf)
- Repenning, Julia; Emele, Lukas et al. 2015: *Klimaschutzszenario 2050. 2. Endbericht. Studie im Auftrag des BMUB*. Berlin: Öko-Institut. <https://www.oeko.de/oekodoc/2451/2015-608-de.pdf>
- Reutter, O.; Reutter, U. 2016: *Climate Protection in Urban Transport—Six Scenario Studies in Germany: More Climate Protection, Fewer Carbon Dioxide Emissions, Less Car Traffic*. In: *Journal of Traffic and Transportation Engineering* 4 (2016), S. 75-85
- Rudolph, Frederic 2014: *Klimafreundliche Mobilität durch Förderung von Pedelecs: lokale Langfristszenarien über die Wirkung von Instrumenten und Maßnahmen am Beispiel der Stadt Wuppertal*. Wuppertal: Bergische Universität Wuppertal
- Schafer, A.; Victor, D.G. 2000: *The future mobility of the world population*. In *Transportation Research Part A*, 34, S.171-205
- Schlesinger, Michael; Lindenberger, Dietmar; Lutz, Christian 2014: *Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose*. Projekt Nr. 57/12. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. Basel/Köln/Osnabrück: ewi/gws/prognos
- Schubert, Markus et al. 2014: *Verkehrsverflechtungsprognose 2030. Zusammenfassung der Ergebnisse*. Freiburg/München/Aachen/Essen: BVU/ITP/IVV/planco
- Schwarze, Björn; Spiekermann, Klaus; Wegener, Michael; Huber, Felix; Brosch, Kristine; Reutter, Oscar; Müller, Miriam 2017: *Städte und Klimawandel: Ruhrgebiet 2050*. Dortmund/Wuppertal
- Shaheen, Susan; Cohen, Adam 2008: *Worldwide Carsharing Growth: An international comparison*. In: *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board* 1992 (458718)
- Sims, Ralph; Schaeffer, Roberto et al. 2014: *Transport*. In: *Climate change 2014: mitigation of climate change; contribution of working group III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, S. 599-670

Sommer, Carsten; Mucha, Elena; Roßnagel, Alexander; Anshütz, Maria; Hentschel, Anja; Loose, Wille 2016: *Umwelt- und Kostenvorteile ausgewählter innovativer Mobilitäts- und Verkehrskonzepte im städtischen Personenverkehr*. Dessau: Umweltbundesamt

SRU 2005: *Umwelt und Straßenverkehr. Hohe Mobilität - Umweltverträglicher Verkehr*, Berlin: Hausdruck

SRU 2016: *Umweltgutachten 2016. Impulse für eine integrative Umweltpolitik*. Berlin: Hausdruck

Stadt Bremen 2013: *Verkehrsentwicklungsplan Bremen 2025 - Zwischenbericht zur Chancen- und Mängelanalyse*.

Stadt Karlsruhe (2016): *VEP Karlsruhe – Szenarien und integriertes Handlungskonzept*. Karlsruhe

Stadt Kopenhagen 2012: *Copenhagen City of Cyclists. Bicycle Account 2012*.

[http://copenhagenize.eu/dox/Copenhagen\\_Bicycle\\_Account\\_2012.pdf](http://copenhagenize.eu/dox/Copenhagen_Bicycle_Account_2012.pdf)

Stadt München 2010: *Mobilität in Deutschland (MiD). Alltagsverkehr in München, im Münchner Umland und im MVV-Verbundraum*. [https://www.muenchen.de/rathaus/dam/jcr:2c6c0702-643e.../broschuere\\_MiD.pdf](https://www.muenchen.de/rathaus/dam/jcr:2c6c0702-643e.../broschuere_MiD.pdf)

Stadt Münster 2008: *Verkehrsverhalten und Verkehrsmittelwahl der Münsteraner. Ergebnisse einer Haushaltsbefragung im November 2007*. Münster.

Stadt Münster 2014: *Verkehrsverhalten und Verkehrsmittelwahl der Münsteraner. Ergebnisse einer Haushaltsbefragung im Herbst 2013*. Münster.

Stadt Vitoria-Gasteiz 2015: *2014 Vitoria-Gasteiz Mobility Survey – analysis of the results*. Vitoria-Gasteiz

Stadt Zürich 2012: *Mobilität in Zahlen*. Zürich.

Statistisches Bundesamt 2016a: *Umweltökonomische Gesamtrechnungen. Transportleistungen und Energieverbrauch im Straßenverkehr 2005 – 2014*

Statistisches Bundesamt 2016b: *Bautätigkeit, Wohnungsbestand in Deutschland*

Statistisches Bundesamt 2016c: *Land- und Forstwirtschaft, Fischerei. Bodenfläche nach Art der tatsächlichen Nutzung. Fachserie 4, Reihe 5.1, 2015*. Wiesbaden

Statistisches Bundesamt 2017: *Wirtschaftsrechnungen. Laufende Wirtschaftsrechnungen Einkommen, Einnahmen und Ausgaben privater Haushalte. 2015. Fachserie 15 Reihe 1*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt

Thordsen, F.; Bückle, C. 2011. *Emissionen und Kraftstoffe*, Flensburg: Kraftfahrtbundesamt.

Tietge, Uwe; Díaz, Sonsoles; Mock, Peter; German, John; Bandivadekar, Anup; Ligterink, Norbert 2016: *From Laboratory to Road: A 2016 Update of Official and 'Real-World' Fuel Consumption and CO<sub>2</sub> Values for Passenger Cars in Europe*. Berlin: ICCT/TNO

TRAMP et al. 2006: *Szenarien der Mobilitätsentwicklung unter Berücksichtigung von Siedlungsstrukturen bis 2050*. Berlin: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS)

Trommer, Stefan; Kolarova, Viktoriya; Frädrich, Eva; Kröger, Lars; Kickhöfer, Benjamin; Kuhnimhof, Tobias; Lenz, Barbara 2016: *Autonomous Driving: The Impact of Vehicle Automation on Mobility Behaviour*. München: ifmo

UBA 2010a: *CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung im Verkehr in Deutschland. Mögliche Maßnahmen und ihre Minderungspotenziale. Ein Sachstandsbericht des Umweltbundesamtes. Texte 05/2010*. Dessau-Roßlau

UBA 2010b: *Schiennetz 2025/2030. Ausbaukonzeption für einen leistungsfähigen Schienengüterverkehr in Deutschland. Texte 42/2010*. Dessau-Roßlau

- UBA 2012: *Projekt FORUM: Handel mit Flächenzertifikaten. Fachliche Vorbereitung eines überregionalen Modellversuchs. Texte 60/2012.* <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/projekt-forum-handel-flaechenzertifikaten>
- UBA 2016a: *Vergleich der durchschnittlichen Emissionen einzelner Verkehrsmittel im Güterverkehr. – Bezugsjahr: 2014. Quelle TREMOD 5.63.* <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/emissionsdaten#textpart-4>
- UBA 2016b: *Umweltschädliche Subventionen in Deutschland. Aktualisierte Ausgabe 2016.* Dessau: UBA
- UBA 2017a: *Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2017. Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 - 2015. Climate Change 13/2017.* Dessau: UBA
- UBA 2017b: *Klimabilanz 2016. Pressemitteilung Nr. 09/2017 vom 22.03.2017.* <http://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/klimabilanz-2016-verkehr-kuehle-witterung-lassen>
- UBA 2017c: *Daten – Luftbelastung; Stickstoffdioxid-Belastung. Online verfügbar unter:* <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luftbelastung/stickstoffdioxid-belastung#textpart-1>
- UBA 2017d: *Analyse der Wirksamkeit von Umweltzonen in drei deutschen Städten: Berlin, München und Augsburg. UBA Texte 46/2017.* Dessau. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/analyse-der-wirksamkeit-von-umweltzonen-in-drei>
- UBA 2017e: *Stickoxid-Belastung durch Diesel-Pkw noch höher als gedacht. Pressemitteilung Nr. 16/2017 vom 25.04.2017.*
- VDV 2016: *Zukunftsfähige ÖPNV-Finanzierung. Fortführung des Konsenses zur politischen Verantwortung für Busse und Bahnen. Positionspapier, April 2016.* Köln: VDV
- VRR (Verkehrsverbund Rhein-Ruhr) 2016: *VRR-Nahverkehrsplan 2016.* Gelsenkirchen.
- Wegener, Michael 2009: *Modelle der räumlichen Stadtentwicklung – alte und neue Herausforderungen.* In: *Stadt Region Land 87, 73-81*
- Wehmeier, T.; Koch, A. 2010: *Mobilitätschancen und Verkehrsverhalten in nachfrageschwachen ländlichen Räumen.* In: *Informationen zur Raumentwicklung 7.2010, S. 457-465*
- Weiß, Christine; Chlond, Bastian; von Behren, Sascha; Hilgert, Tim; Vortisch, Peter 2016: *Deutsches Mobilitätspanel (MOP) – Wissenschaftliche Begleitung und Auswertungen Bericht 2015/2016: Alltagsmobilität und Fahrleistung.* Karlsruhe: Institut für Verkehrswesen. [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/mop-jahresbericht-2015-2016.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/mop-jahresbericht-2015-2016.pdf?__blob=publicationFile)
- WHO (World Health Organization) 2016: *Ambient (outdoor) air quality and health. Fact sheet. Updated September 2016.* <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/en/>
- Zimmer, Wiebke; Blanck, Ruth et al. 2016: *Renewability III. Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors. Endbericht.* Berlin/Heidelberg/Zürich: Öko-Institut/DLR/ifeu/Infras

*Websites*

*Website ADAC: <https://www.adac.de/infotestrat/tanken-kraftstoffe-und-antrieb/kraftstoffpreise/kraftstoff-durchschnittspreise/> (Zugriff am 16.5.2017)*

*Website BUND: [http://bund-hamburg.bund.net/fileadmin/bundgruppen/bcmslvhamburg/Proj10\\_Luftverkehr/Reh\\_Klimaschutz\\_im\\_Luftverkehr\\_BUND-Hamburg\\_170404.pdf](http://bund-hamburg.bund.net/fileadmin/bundgruppen/bcmslvhamburg/Proj10_Luftverkehr/Reh_Klimaschutz_im_Luftverkehr_BUND-Hamburg_170404.pdf) (Zugriff am 20.7.2017)*

*Website EEA: <https://www.eea.europa.eu/highlights/reported-co2-emissions-from-new> (Zugriff am 2.2.2017)*

*Website Folgekostenrechner Rheinland-Pfalz: <http://www.folgekostenrechner-rlp.de/pg/allgemein.php> (Zugriff am 18.7.2017)*

*Website Freiburg: <http://www.freiburg.de/pb/,Lde/231648.html> (Zugriff am 18.7.2017)*

*Website KBA: [http://www.kba.de/DE/Statistik/statistik\\_node.html](http://www.kba.de/DE/Statistik/statistik_node.html) (Zugriff am 16.5.2017)*

*Website Presseportal: <http://www.presseportal.de/pm/6955/3331705> (Zugriff am 8.3.2017)*

*Website statista: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/411620/umfrage/anzahl-der-weltweiten-fluege/> (Zugriff am 12.4.2017)*

*Website UBA: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/mobilitaet-privater-haushalte#textpart-1> (Zugriff am 16.5.2017)*

*Website Wiener Stadtwerke: [https://www.wienerlinien.at/media/files/2016/modalsplit\\_173728.pdf](https://www.wienerlinien.at/media/files/2016/modalsplit_173728.pdf) (Zugriff am 18.7.2017)*