

## Sektorale Emissionspfade in Deutschland bis 2050 - Verkehr

Arbeitspaket 1.2 im Forschungs- und Entwicklungsvorhaben des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: **Wissenschaftliche Unterstützung „Erstellung und Begleitung des Klimaschutzplans 2050“** (FKZ UM 15 41 1860)

Berlin, 01.03.2016

### Autorinnen und Autoren

Ruth Blanck  
Öko-Institut e.V.

Dr. Wiebke Zimmer  
Öko-Institut e.V.

**Büro Berlin**  
Schicklerstraße 5-7  
10179 Berlin  
Telefon +49 30 405085-0  
info@oeko.de  
[www.oeko.de](http://www.oeko.de)

**Fraunhofer ISI**  
Breslauer Str. 48  
76139 Karlsruhe  
Ansprechpartnerin Barbara Schlomann  
Telefon +49 721 6809-136  
[www.fraunhofer.de](http://www.fraunhofer.de)

**IREES GmbH**  
Schönfeldstraße 8  
D-76131 Karlsruhe  
Ansprechpartner: Felix Reitze  
Telefon +49 721 915696-0  
[www.irees.de](http://www.irees.de)



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>4</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>5</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>7</b>
<b>2. Vergleich verschiedener Szenarien für den Sektor Verkehr</b>	<b>12</b>
<b>2.1. Rahmenannahmen</b>	<b>12</b>
<b>2.2. Entwicklung sektorspezifischer Indikatoren</b>	<b>13</b>
2.2.1. Verkehrsnachfrage im Personenverkehr	13
2.2.2. Verkehrsnachfrage im Güterverkehr	16
2.2.3. Technologie- und Effizienzentwicklung	19
2.2.4. Endenergiebedarf	25
2.2.5. CO <sub>2</sub> -Emissionen	29
<b>2.3. Vergleichende Auswertung und Identifizierung robuster Strategien</b>	<b>31</b>
<b>3. Ableitung struktureller Entwicklungsschritte (transformative Pfade)</b>	<b>37</b>
<b>3.1. Effizienz Fahrzeuge</b>	<b>37</b>
3.1.1. Effizienzsteigerung	37
3.1.2. Elektromobilität	38
<b>3.2. Verkehrsnachfrage</b>	<b>39</b>
3.2.1. Personenverkehr	39
3.2.2. Güterverkehr	40
3.2.3. Verkehrsinfrastruktur	41
<b>3.3. Dekarbonisierung Kraftstoffe</b>	<b>41</b>
3.3.1. Biokraftstoffe	41
3.3.2. Strombasierte Kraftstoffe	42
<b>3.4. Internationale Verkehre</b>	<b>43</b>
<b>4. Handlungsbedarf bis zum Jahr 2030</b>	<b>45</b>
<b>4.1. Sektorziele</b>	<b>45</b>
<b>4.2. Maßnahmen zur Umsetzung struktureller Entwicklungsschritte</b>	<b>47</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>50</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2–1:	Personenverkehrsnachfrage im Vergleich – 2030	14
Abbildung 2–2:	Personenverkehrsnachfrage im Vergleich – 2050	16
Abbildung 2–3:	Güterverkehrsnachfrage im Vergleich – 2030	18
Abbildung 2–4:	Güterverkehrsnachfrage im Vergleich – 2050	19
Abbildung 2–5:	Pkw–Bestand im Vergleich – 2030	21
Abbildung 2–6:	Pkw–Bestand im Vergleich – 2050	22
Abbildung 2–7:	Endenergieverbrauch differenziert nach Energieträger im Vergleich – 2030	25
Abbildung 2–8:	Endenergieverbrauch differenziert nach Energieträger im Vergleich – 2050	27
Abbildung 2–9:	CO <sub>2</sub> -Emissionen des Verkehrssektors im Vergleich – 2030	30
Abbildung 2–10:	CO <sub>2</sub> -Emissionen des Verkehrssektors im Vergleich – 2050	31

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1:	Überblick über die betrachteten Szenarien	7
Tabelle 2-1:	Entwicklung von Bevölkerung und BIP in den Szenarien	12
Tabelle 2-2:	Kraftstoffkosten im Vergleich in Cent (2010) / Liter	13
Tabelle 2-3:	Effizienzsteigerung konventionelle Pkw 2030 und 2050	23
Tabelle 2-4:	Effizienzsteigerung konventionelle Lkw 2050	24
Tabelle 2-5:	Anteil von Biokraftstoffen und Strom am Endenergiebedarf des Verkehrssektors im Jahr 2030	26
Tabelle 2-6:	Anteil von Biokraftstoffen und Strom am Endenergiebedarf des Verkehrssektors im Jahr 2050	28
Tabelle 2-7:	Vergleichende Übersicht der Veränderung der relevanten Indikatoren – 2030	33
Tabelle 2-8:	Vergleichende Übersicht der Veränderung der relevanten Indikatoren – 2050	34
Tabelle 4-1:	Endenergiebedarfs- und Treibhausgasminderungsziele für den Verkehrssektor	47
Tabelle 4-2:	Maßnahmen zur Umsetzung der strukturellen Entwicklungsschritte im Verkehrssektor	47



## 1. Einleitung

Auf den Verkehrssektor entfallen heute 28% des Endenergiebedarfs und etwa 18% der Treibhausgasemissionen. Eine angestrebte Treibhausgasminderung (THG) von 80 bis 95% bis zum Jahr 2050 kann ohne einen signifikanten Beitrag des Verkehrssektors nicht erreicht werden – auch wenn bisher noch keine Sektorziele für den Verkehr definiert wurden. Spezifische Ziele für den Verkehrssektor existieren bisher nur in Bezug auf die Endenergie: Im Rahmen des Energiekonzepts hat sich die Bundesregierung das Ziel gesetzt, den Endenergiebedarf des Verkehrssektors gegenüber 2005 bis zum Jahr 2020 um 10% und bis zum Jahr 2050 um 40% zu senken.

In mehreren sektorübergreifenden Szenarien wie den Klimaschutzszenarien, Modell Deutschland, dem Zielszenario der Energierferenzprognose oder der Leitstudie wurden bereits Pfade aufgezeigt, wie das Ziel einer THG-Minderung von 80-95% bis 2050 erreicht werden kann. Spezifisch auf den Verkehrssektor ausgerichtete Studien wie eMobil 2050 oder die Verkehrsprognose 2030 ergänzen den Forschungsstand um relevante Detailanalysen für den Verkehrssektor. Im Rahmen dieses Arbeitspapiers werden die wichtigsten Ergebnisse der wesentlichen Studien in übersichtlicher Form für den Verkehrssektor dargestellt.

Bei dem überwiegenden Teil der betrachteten Szenarien handelt es sich um gesamtwirtschaftliche Zielszenarien, die nicht nur den Verkehrssektor betrachten, sondern die gesamte Volkswirtschaft. Meist werden Zielszenarien in Bezug zu Referenz- bzw. Basisszenarien gesetzt, welche eine Fortschreibung der derzeitigen Trends und Politik darstellen. Einen Überblick über die für das vorliegende Sektorpapier ausgewerteten Szenarien gibt Tabelle 1-1. Für den Verkehrssektor relevante Aspekte in den einzelnen Studien sind im Folgenden kurz ausgeführt.

**Tabelle 1-1: Überblick über die betrachteten Szenarien**

Szenario	normativ oder explorativ	verkehrsspezifisch	Implementierung politischer Instrumente und Maßnahmen	Zeithorizont
Klimaschutzszenarien	Ziel 80%, 90% bzw. 95%		Maßnahmen: aktuelle (AMS) bzw. zusätzliche (KS80 / KS95 / KS90)	2050
Projektionsbericht 2015	explorativ		Instrumente: aktuelle (MMS) bzw. zusätzliche (MWMS)	2035
eMobil 2050	explorativ	X	zusätzliche Maßnahmen	2050
Leitstudie 2011			zusätzliche Maßnahmen	2050
Energierferenzprognose			zusätzliche Maßnahmen	2050
Verkehrsprognose 2030	explorativ	X	zusätzliche Maßnahmen	2030
THGND	normativ (THG-neutral)		zusätzliche Maßnahmen	2050
Modell D	normativ		zusätzliche Maßnahmen	2050

### Klimaschutzszenarien (KSZ)

In den Klimaschutzszenarien werden drei Szenarien berechnet (aktuelle Maßnahmen – AMS, Minderung 80% – KS 80, Minderung 95% – KS 95). Im Verkehrssektor unterscheiden sich die Szenarien sowohl durch die Rahmenbedingungen (Kraftstoffpreise, Effizienzstandards, Nutzerkosten ÖV), durch die Technologien (Anteil Elektromobilität, im KS 95 auch Oberleitungs-Lkw), als auch durch die Wirkungen auf die Verkehrsnachfrage. Im Szenario KS 95 wurden zusätzlich Verhal-

tensveränderungen angenommen, z.B. kürzere Wegelängen („Stadt der kurzen Wege“) sowie eine stärkere geteilte Nutzung von Pkw. Zusätzlich wird das KS 90 mit in den Szenarienvergleich aufgenommen, das in der ersten Runde und damit mit anderen Rahmendaten modelliert wurde.

### **Projektionsbericht (PB 2015)**

Im Projektionsbericht wird die Entwicklung der Emissionen in zwei Szenarien bis 2035 ermittelt. Das Mit-Maßnahmen-Szenario (PB 2015 – MMS) enthält die aktuelle politische Beschlusslage mit Stand Ende August 2014. In einem Mit-Weiteren-Maßnahmen-Szenario sind zusätzlich die im Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 beschlossenen Maßnahmen hinterlegt. Diese Ergebnisse liegen derzeit noch nicht final vor, so dass nur das MMS-Szenario mit in den Szenarienvergleich aufgenommen wurde. Im Verkehrssektor wurde für das MMS-Szenario die Verkehrsnachfrageentwicklung der Verkehrsprognose 2030 des BMVI übernommen. Zwar enthält die VP 2030 zusätzliche, über die aktuelle Beschlusslage hinausgehende Maßnahmen; sie stellt dennoch die aktuellste Referenz für die Entwicklung der Verkehrsnachfrage dar.

### **Modell Deutschland (MD)**

Zukünftige Reduktionen von Endenergieverbrauch und Treibhausgasemissionen im Verkehr werden im Referenz- (MD – Ref) wie auch im Innovationsszenario (MD – Inno) vor allem durch Erhöhungen der Fahrzeugeffizienz bei allen Verkehrsmitteln und die Substitution fossiler Energieträger durch Biokraftstoffe erreicht. Für den Pkw-Verkehr und in begrenztem Maße auch im Güterverkehr wird zudem vom Einsatz neuer Antriebstechnologien – insbesondere von Elektrofahrzeugen, aber auch Gas- und Brennstoffzellenfahrzeugen – ausgegangen. In gewissem Umfang werden, hauptsächlich im Güterverkehr, auch Verkehrsverlagerungen von der Straße auf andere Verkehrsträger angenommen. Eine relevante Wirkung hat hier auch der Einsatz von Biomasse: Im Innovationsszenario wird eine verstärkte Biomassenutzung angenommen, so dass die Treibhausgasemissionen im Güterverkehr auf nahezu null gemindert werden. Es werden „strategische Leitplanken“ und verschiedene Maßnahmen empfohlen, um den im Innovationsszenario gezeichneten Pfad zu erreichen (z.B. CO<sub>2</sub>-Emissionsstandards von 70 g CO<sub>2</sub>/ km für Pkw im Jahr 2030, Kapazitätsausbau des Schienennetzes, Lkw-Maut, Mineralölsteuererhöhung, Tempolimit 120 km/h auf Autobahnen).

### **Energierferenzprognose (ERP)**

Kern des Projekts „Entwicklung der Energiemärkte – Energierferenzprognose“ stellt die Prognose der wahrscheinlichen energiewirtschaftlichen Entwicklung bis zum Jahr 2030 dar, ergänzt um ein bis ins Jahr 2050 reichendes Trendszenario (ERP – Trend). Daneben wurde auch ein Zielszenario (ERP – Ziel) erstellt. Das Zielszenario zeigt, was erforderlich wäre, um die im Energiekonzept definierten energie- und klimaschutzpolitischen Ziele zu erreichen. Im ERP – Trend verringert sich der Energieverbrauch im Verkehr im Betrachtungszeitraum vor allem als Folge zunehmend effizienter Pkw und Lkw und einer leichten Zunahme von Elektromobilität; Benzin und Diesel verlieren zugunsten von Biokraftstoffen, Strom und Erdgas an Bedeutung. Dies wird im Zielszenario für den Verkehrssektor durch niedrigere spezifische Kraftstoffverbräuche insbesondere bei Pkw sowie bei Lkw und Sattelschleppern, eine schnellere Marktdurchdringung von Elektro-Pkw und durch verstärkte Substitution fossiler durch biogene Kraftstoffe in allen Verkehrszweigen umgesetzt.

### **Leitstudie 2011 (LS 2011)**

In drei verschiedenen Szenarien werden alle Sektoren betrachtet. Die Szenarien unterscheiden sich vor allem in Bezug auf die im motorisierten Individualverkehr verwendeten Antriebe und Kraftstoffe. Der Anteil der elektrischen Pkw und Plug-In-Hybridfahrzeuge an der Fahrleistung im Jahr 2050 beträgt bei allen Szenarien mindestens 50% und im Szenario C sogar 100%. Szenario A



fokussiert auf die Erzeugung und Nutzung von stromerzeugtem Wasserstoff im Verkehr und wird im Rahmen dieses Studienvergleichs mit aufgenommen; Szenario B modelliert dagegen die Variante einer Methanisierung von Wasserstoff zu stromerzeugtem Methan und dessen Nutzung in Gasfahrzeugen und – nach Rückumwandlung des Methans in Wasserstoff – auch in effizienten Brennstoffzellenfahrzeugen. Als Begründung für die Betrachtung dieser Alternativpfade, die eine Änderung gegenüber der Vorgängerstudie darstellt, wird genannt, dass „das einsetzbare Biokraftstoffpotenzial aus nachhaltiger Biomasse begrenzt ist und batterieelektrische Fahrzeuge auf absehbare Zeit aufgrund der Reichweitenbegrenzung die Fahrleistungen nur zum Teil abdecken können“, was den Einsatz eines „dritten Kraftstoffs“ im Verkehrssektor notwendig macht.

### **Treibhausgasneutrales Deutschland (THGND)**

Zielvorgaben für die Erstellung des Szenarios waren ein treibhausgasneutraler Verkehr bis 2050 sowie der vollständige Verzicht auf den Einsatz von Biokraftstoffen. Vor dem Hintergrund der zunehmenden Diskussion um Biokraftstoffe und die Auswirkungen indirekter Landnutzungsänderungen grenzt sich diese Studie damit wesentlich von den bisher genannten Szenarien ab, bei denen Biokraftstoffe jeweils einen wesentlichen Beitrag zur Zielerreichung leisten. Erstellt wurden ein Basiszenario und ein Zielszenario („Hauptszenario“). Die Veränderungen zwischen Basis- und Hauptszenario werden mit einem Bündel von Maßnahmen hinterlegt. Technologische Restriktionen für alternative Antriebstechnologien insbesondere im Güterverkehr führen dazu, dass als Ersatz für die Biokraftstoffe im Szenario synthetische Flüssigkraftstoffe zum Einsatz kommen, welche mit erneuerbarem Strom erzeugt werden.

Einen etwas anderen Ansatz als die gesamtwirtschaftlichen Zielszenarien haben die Studien eMobil 2050 und die Verkehrsprognose 2030. Beides sind zum einen Szenarien spezifisch für den Verkehrssektor, zu anderen unterliegen sie keiner normativen Zielvorgabe. In beiden Studien wird die Verkehrsnachfrageseite genauer betrachtet.

### **eMobil 2050 (eMobil)**

Im Rahmen des Vorhabens eMobil 2050 wurden die möglichen langfristigen Interaktionen zwischen Verkehrssektor und Energiewirtschaft anhand zweier Szenarien beleuchtet, welche jeweils von einer sehr ambitionierten Entwicklung der Elektromobilität ausgehen. Die Entwicklung der Verkehrsnachfrage im Szenario „Grenzenlos eMobil“ (eMobil – G) geht von einem weiteren Wachstum der Verkehrsnachfrage aus und erzielt die Treibhausgasreduzierung vor allem durch einen Technologiewandel. Im Szenario „Regional eMobil“ (eMobil – R) sind stärkere Änderungen im Verkehrsverhalten hinterlegt, so dass sich auch der Verkehrsaufwand reduziert. In eMobil 2050 wird der elektrische Verkehr umfassend betrachtet. Die Betrachtung und alle Aussagen beziehen sich daher auf den elektrisch betriebenen Straßen- und Schienenverkehr in seiner Gesamtheit (also u.a. Elektro-Pkw, Oberleitungs-Lkw, O-Busse, U-Bahn, Straßen-, Regional- und Fernbahn), jedoch nicht den Flugverkehr und die Seeschifffahrt, da in diesen Bereichen mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht von einer Stromnutzung ausgegangen werden kann.

### **Verkehrsprognose 2030 (VP 2030)**

Grundlage für die derzeit laufenden Arbeiten an einem neuen Bundesverkehrswegeplan 2015, der Mitte 2016 vorgelegt werden soll, ist eine Vorausschätzung der künftigen Verkehrsentwicklung in Deutschland, in der die prognostizierten Gesamtwerte auch auf das konkrete Verkehrswegenetz verteilt (umgelegt) werden. Zu diesem Zweck wurde im Auftrag des BMVI eine aktuelle Verkehrsprognose mit dem Zieljahr 2030 erarbeitet. Einbezogen wurden alle Verkehrsströme, die das Territorium Deutschlands berühren, d.h. zum einen Ströme mit Quelle und/oder Ziel in Deutschland und zum anderen die Transitverkehre, soweit sie die deutsche Verkehrsinfrastruktur beanspruchen –

oder potenziell bei geänderten Angebotsbedingungen beanspruchen könnten. Auf Basis der detailliert modellierten Verkehrsnachfrage für den Personen- und den Güterverkehr wurde auch die Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen des Verkehrssektors bis 2030 abgebildet. Es handelt sich bei der Verkehrsprognose nicht um eine reine Trendentwicklung, da von einem ambitionierten umweltpolitischen Gestaltungswillen ausgegangen wird und beispielsweise eine Fortschreibung der Pkw-Grenzwerte über 2020 hinaus und eine deutliche Anhebung der Mineralölsteuersätze von real 2,3% p.a. hinterlegt wurden.

### **Exkurs 1: Erneuerbare Energien im Verkehr**

Die Studie „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“ ist bezüglich der technischen EE-Optionen für den Verkehrssektor und den daraus resultierenden Energiebedarfen je Energieträger interessant (BMVI 2015). Sie wurde im Rahmen der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie im Auftrag des BMVI erarbeitet, berechnet jedoch keine Treibhausgasemissionen. In dieser Studie werden vielmehr technische Potenziale erneuerbarer Energieträger in Deutschland ermittelt und verschiedenen Szenarien zum Energieverbrauch des Verkehrssektors bis zum Jahr 2050 gegenübergestellt. Zur Abschätzung der Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Verkehr bis 2050 wurden drei Szenarien mit verschiedenen Pfaden der technologischen Entwicklung berechnet

- „Batterie“: Umschichtung der Fahrzeugflotten bis 2050 mit hohen Anteilen Batterieelektrischer Fahrzeuge (64% Anteil von BEV und PHEV beim Pkw-Bestand im Jahr 2050), Einsatz von Oberleitungs-Lkw
- „Verbrenner“: Flottenumschichtung mit Schwerpunkt auf Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor bei verstärkter Nutzung von CNG (64% Anteil der Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor beim Pkw-Bestand im Jahr 2050)
- „Brennstoffzelle“: Hoher Anteil von Fahrzeugen mit Brennstoffzelle bei gleichzeitiger Zunahme der BEV und PHEV (36% der Pkw-Flotte mit Brennstoffzelle, 16% BEV, 18% PHEV)

Die zugrunde liegenden Verkehrs- und Fahrleistungen wurden für alle Szenarien gleich angenommen. Bis 2030 basieren sie auf der Verkehrsprognose 2030. Für die Entwicklung nach 2030 wurde angenommen, dass der Pkw-Verkehrsaufwand konstant bleibt. Für den Lkw-Verkehrsaufwand wurde die Langfristprognose für den Güterverkehr bis 2050 zugrunde gelegt. Die Ergebnisse erlauben es, ein erstes umfassendes Bild vom erwarteten Energieverbrauch des Verkehrs und den Potenzialen geeigneter erneuerbarer Energieträger zu geben. Sie sind jedoch nicht als Klimaschutzszenarien konzipiert und weisen keine Treibhausgasemissionen aus. Daher können sie im Rahmen dieses Szenarienvergleichs nicht mit berücksichtigt werden, da keine direkte Einordnung möglich ist.

### **Exkurs 2: Postfossile Energieversorgungsoptionen für einen THG-neutralen Verkehr 2050**

Die Studie „Postfossile Energieversorgungsoptionen für einen treibhausgasneutralen Verkehr im Jahr 2050: Eine verkehrsträgerübergreifende Bewertung“ im Auftrag des Umweltbundesamtes zeigt auf, welche Kombinationen aus Antriebssystem und Kraftstoff – auch als Energieversorgungsoption bezeichnet – einen treibhausgasneutralen Verkehr in Deutschland im Jahr 2050 möglich machen. Auf Basis bestehender Forschungsarbeiten und Studienergebnisse wurde ein syste-

matischer Überblick über postfossile Optionen gegeben. Zu den potentiellen postfossilen Kraftstoffen zählen regenerativer Strom, aus regenerativem Strom hergestellte Kraftstoffe wie Power-to-Gas (PtG-Wasserstoff, PtG-Methan) und Power-to-Liquid (PtL) sowie Biokraftstoffe, zu den Antrieben neben Verbrennungsmotoren Elektromotoren, Hybride (Plug-in-Hybride, Elektrofahrzeuge mit Range-Extender) sowie Brennstoffzellen. Für Pkw, Lkw, Linienbus, Flugzeug und Seeschiff wurde untersucht, mit welcher postfossilen Energieversorgungsoption die jeweils höchsten Treibhausgasminderungen erreicht werden können. Außerdem wurden weitere ökologische, ökonomische, technische, infrastrukturelle sowie systemische Aspekte in die ganzheitliche Bewertung der Energieversorgungsoptionen einbezogen. Ergebnis des Vorhabens ist eine umfassend hergeleitete Übersicht über die präferierten postfossilen Energieversorgungsoptionen für eine treibhausgasneutrale Mobilität im Jahr 2050 differenziert nach Verkehrsmittel. Diese Optionen werden jedoch nicht in Szenarien abgebildet, sondern einzeln ausgewiesen und analysiert, so dass diese Studie ebenfalls nicht in den Szenarienvergleich mit aufgenommen werden kann. Fazit der Studie ist auch, dass eine postfossile Energieversorgung im Verkehr ein zentraler Baustein ist, um ambitionierte Klimaschutzziele in Deutschland zu erreichen. Jedoch braucht es nicht nur neue Kraftstoffe und Antriebe. Stattdessen ist es notwendig, die postfossile Energieversorgung in ein Gesamtkonzept einzubetten, in dem auch der Energieverbrauch des Verkehrs deutlich gesenkt wird. Maßnahmen zur Verkehrsvermeidung, Verlagerung und Verbesserung als Kernelemente einer Verkehrswende sind unabhängig von einer postfossilen Energieversorgung des Verkehrs und für die Zukunft unverzichtbar.

### **Exkurs 3: Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr**

In dem vom BMWi geförderten Forschungsprojekt „Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr“ wurde die Interaktion zwischen diesen Sektoren in Deutschland untersucht. Im Mittelpunkt der Untersuchung stand dabei die Frage, wie ein kostenoptimiertes Gesamtenergiesystem im Jahr 2050 aussehen könnte, das dem Ziel gerecht wird, eine Minderung der Treibhausgasemissionen in Deutschland und Europa um 80% gegenüber 1990 zu erreichen. Es wurden sowohl modellbasierte Analysen zur Entwicklung des Energieverbrauchs als auch zu den Kosten für den Strom-, Wärme- und Verkehrssektor durchgeführt. Als zentrales Bewertungsmodell stand hierbei die sektorenübergreifende (Strom, Wärme, Verkehr) Zubauoptimierung (Europa und Deutschland) im Mittelpunkt, welche es ermöglicht, für das Klimaziel entsprechend der Rahmendaten das kostenminimale Energieversorgungssystem (Investition und Anlageneinsatz) zu ermitteln. Im Rahmen dieser Zubauoptimierung wurden in verschiedenen Verkehrsszenarien eine Reihe von Technologieoptionen für das Jahr 2050 betrachtet, die über die Energienachfrage und Emissionen des Verkehrs sowie die Charakteristik der Stromnachfrage in Rückkopplung mit dem Gesamtsystem stehen. Hierdurch konnte der Technologie- und Entwicklungspfad des Verkehrssektors ermittelt werden, welcher für das Gesamtsystem kostenoptimal ist. Die zentralen Aussagen zur Ausgestaltung der Interaktion zwischen den Energiesektoren Strom und Verkehr wurden in Kernaussagen zusammengefasst. So z.B. dass das kostenoptimale Szenario im Jahr 2050 mit einer Minderung der THG-Emissionen im Verkehrsbereich von 74% gegenüber 1990, die Variante mit der höchsten THG-Reduktion aller betrachteten Technologieoptionen und möglichen Entwicklungspfade im Verkehr ist. Die Schlüsseltechnologie des kostenoptimalen Verkehrsszenarios ist die direkte Stromnutzung: Oberleitungshybrid-Lkw bei den SNF, BEV und PHEV bei den Pkw. Eine zusätzliche Kostenminderung des Gesamtsystems erfolgt durch den Ersatz von derzeit Flüssigkraftstoff-betriebenen Verbrennungsmotoren in den PHEV durch Gas-angetriebene. Wesentliche Aussage ist auch, dass die Minderung des Endenergieverbrauchs im Verkehr (- 52% gegenüber 2005) durch die Dominanz der direkten Stromnutzung deutlich über die Ziele des Energiekonzepts der Bundesregierung (- 40% im Jahr 2050 ggü. 2005) hinaus geht. Der Endbericht des Vorhabens liegt noch nicht vor, so dass die Szenarien nicht mit in diese Studie aufgenommen werden können.

## 2. Vergleich verschiedener Szenarien für den Sektor Verkehr

### 2.1. Rahmenannahmen

Die für die Verkehrsnachfrage relevanten Rahmendaten Bevölkerungs- und Wirtschaftsentwicklung sind in der Tabelle 2–1 dargestellt. Für die Bevölkerungsentwicklung ergeben sich zwischen den Studien nur geringfügige Unterschiede, die keinen maßgeblichen Einfluss auf die Ergebnisse haben. Die BIP-Entwicklung unterscheidet sich dagegen zum Teil, was u.a. unterschiedliche Annahmen zur Entwicklung des Güterverkehrsaufwands erklärt (siehe auch Kapitel 2.2.2).

**Tabelle 2-1: Entwicklung von Bevölkerung und BIP in den Szenarien**

Szenario	Bevölkerung 2030 in Mio.	Bevölkerung 2050 in Mio.	Durchschnittliche jährliche BIP- Wachstumsraten bis 2030	Durchschnittliche jährliche BIP- Wachstumsraten 2030–2050
Klimaschutzszenarien 1. Runde	79,0	71,8	0,97%	0,7%
Klimaschutzszenarien 2. Runde	77,7	74,0	0,94%	0,62%
Projektionsbericht 2015	79,0	-	1,2%	-
eMobil 2050	k.A.	73,6	k.A.	k.A.
Leitstudie 2011	79,1	73,8	0,93%	1,24%
Energierferenzprognose	78	73	1,12%	0,94%
Verkehrsprognose 2030	78,2	-	1,14%	-
THGND	78,6	72,2	0,7%	0,7%
Modell D	78,6	72,2	0,81%	0,69%

Quelle: Eigene Darstellung

Einen wesentlichen Einfluss auf die Verkehrsnachfrage haben die Kraftstoffkosten. Für die Studien, bei denen die Verkehrsnachfrage auf Basis von Kilometerkosten modelliert wurde, sind die zu Grunde gelegten Kosten in der folgenden Tabelle dargestellt (umgerechnet auf Preisbasis 2010).

**Tabelle 2-2: Kraftstoffkosten im Vergleich in Cent (2010) / Liter**

	Benzin 2030	Diesel 2030	Benzin 2050	Diesel 2050
Klimaschutzszenarien AMS	151	137	176	168
Klimaschutzszenarien KS 80	215	208	258	258
Klimaschutzszenarien KS 95	230	251	290	316
Klimaschutzszenarien 1. Rd. KS 90	215	k.A.	290	k.A.
eMobil 2050	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Leitstudie 2011	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
ERP	187	174	212	200
Verkehrsprognose 2030	210	181		
THGND	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Modell D	185	175	258	237

Quelle: Eigene Darstellung

## 2.2. Entwicklung sektorspezifischer Indikatoren

Im Folgenden werden zentrale Indikatoren für den Verkehrssektor zwischen den verschiedenen Szenarien verglichen. Dazu gehören die Verkehrsnachfrage im Personen- und Güterverkehr, die Technologie- und Effizienzentwicklung, der Endenergiebedarf und die CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Insbesondere beim Luft- und Seeverkehr unterscheiden sich die in den Studien zu Grunde gelegten Abgrenzungen, so dass sinnvolle Vergleiche teilweise nur bei den landbasierten Verkehrsträgern (Straße, Schiene, Wasserstraße) möglich sind.

### 2.2.1. Verkehrsnachfrage im Personenverkehr

#### Relevanz und Besonderheiten des Indikators

Zentrale Einflussgrößen auf die zukünftige Entwicklung der Verkehrsnachfrage im Personenverkehr sind überwiegend gesamtwirtschaftliche Faktoren, u.a. die Bevölkerungsentwicklung, Motorisierungsraten, Raum- und Siedlungsstrukturen sowie die Angebotsstruktur (Verfügbarkeit, Reisezeiten, Nutzerkosten). Wie sich die Personenmobilität entwickelt, lässt sich wiederum beschreiben mit den beiden Faktoren „Anzahl der Wege“ und „durchschnittliche Wegelänge“.

Der Personenverkehr hat derzeit einen Anteil von rund 65% an den (nationalen) Treibhausgasemissionen des Verkehrs. Die Treibhausgasintensität des motorisierten Individualverkehrs liegt – wenn man nur die direkten Emissionen berücksichtigt – etwa 6-Mal so hoch wie diejenige des öffentlichen Verkehrs, so dass die Entwicklung der Verkehrs- und Fahrleistung des MIV (Motorisierter Individualverkehr) einen zentralen Einflussfaktor auf die Emissionen des Verkehrs darstellt.<sup>1</sup>

Häufig wird in Szenarien nur der „energierrelevante“ Verkehrsaufwand dargestellt; Fuß- und Radverkehr werden nicht ausgewiesen. Veränderungen des Personenverkehrsaufwands sind dann nicht nur auf Bevölkerungsentwicklung und Wegelängen zurückzuführen, sondern können auch auf eine Verlagerung von MIV auf Fuß- und Radverkehr zurückzuführen sein.

<sup>1</sup> Bei Berücksichtigung der Kraftstoffvorketten und der Stromherstellung sinkt dieser Faktor auf 2-3.

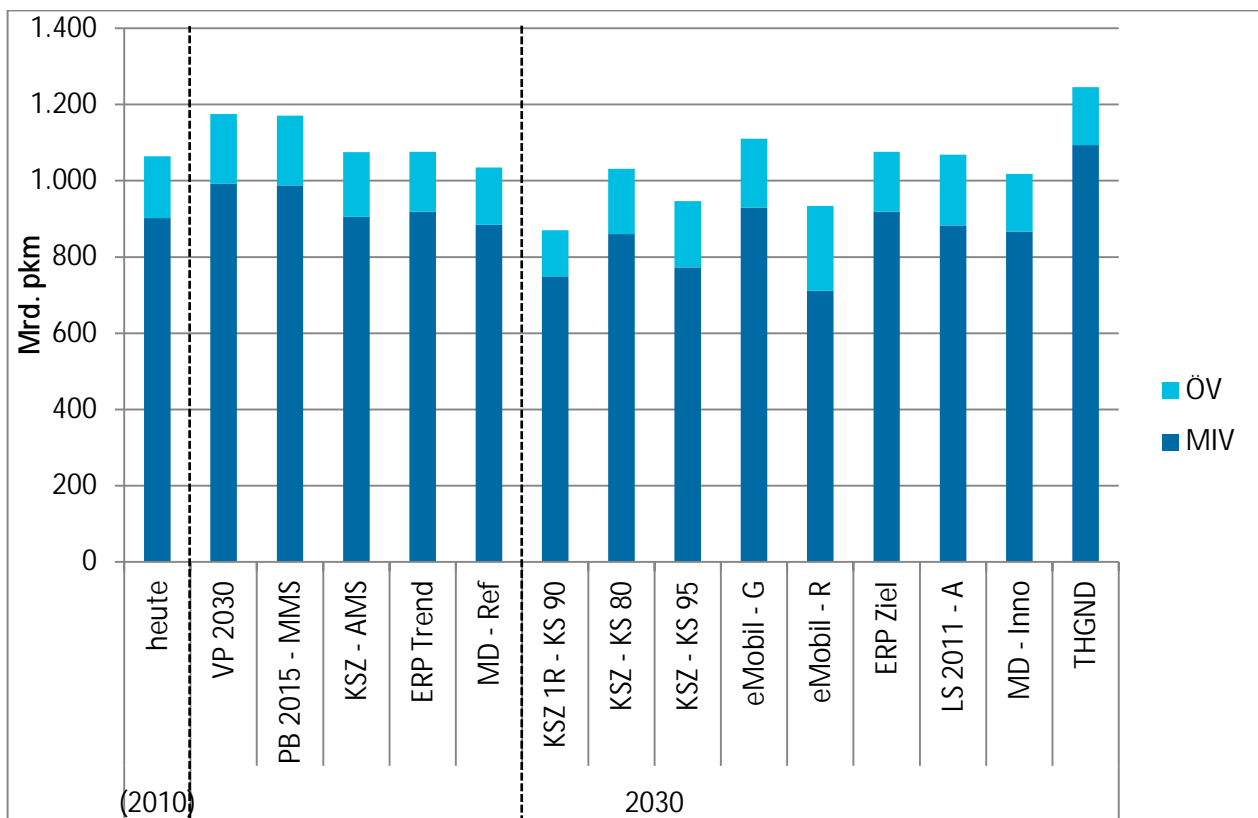
Beim Luftverkehr ist zu beachten, dass dieser je nach Studie unterschiedlich dargestellt wird. In älteren Studien wurde zumeist in Übereinstimmung mit der in „Verkehr in Zahlen“ verwendeten Vorgehensweise der über Deutschland erbrachte Verkehrsaufwand ausgewiesen („Territorialprinzip“, 61 Mrd. pkm in 2010). In neueren Studien wird dagegen eher der Verkehrsaufwand der aus Deutschland abgehenden Flüge dargestellt („Standortprinzip“), denn dieser korreliert eher mit dem für die Treibhausgasbilanzierung relevanten Kerosinabsatz.

### Vergleich für 2030

In Abbildung 2–1 ist die Entwicklung der Verkehrsnachfrage der untersuchten Szenarien im Vergleich für das Jahr 2030 dargestellt.

Alle Studien gehen von einem leichten Bevölkerungsrückgang bis 2030 aus. Dennoch steigt der Verkehrsaufwand im MIV vor allem in der VP 2030 und dem darauf basierenden PB 2015-MMS-Szenario um rund 10% weiter an. Grund hierfür ist u.a. die „nachholende Motorisierung“ der weiblichen und der älteren Bevölkerung.

**Abbildung 2–1: Personenverkehrsnachfrage im Vergleich – 2030**



Quelle: eigene Darstellung

In der Energierferenzprognose wird die Verkehrsnachfrage als externe Inputgröße behandelt und zwischen Trend- und Zielszenario nicht verändert. Dagegen haben in den Klimaschutzszenarien, dem Projektionsbericht und in der Studie „eMobil 2050“ die unterschiedlichen Rahmenbedingungen, Trends bzw. Maßnahmen jeweils einen Effekt auf die Verkehrsnachfrage. Auch im Vergleich von alter und neuer Verkehrsprognose (VP 2025 zu VP 2030) zeigen sich die Effekte des in der

aktuellen Verkehrsprognose hinterlegten „ambitionierten umweltpolitischen Gestaltungswillens“. Die Verkehrsnachfrage in der Energierferenzprognose liegt deutlich niedriger als diejenige der VP 2030 – obwohl in letzterer die Nutzerkosten deutlich stärker ansteigen. Da die Modellierung der Verkehrsnachfrage der Energierferenzprognose auf Basis des Berichtes nicht ganz nachzuvollziehen ist, kann dies an dieser Stelle nicht erklärt werden.

Die Verkehrsnachfrage der Studie „Treibhausgasneutrales Deutschland“ (THGND) wurde auf Grundlage des Basisszenarios von Renewbility II abgeleitet und fortgeschrieben. Renewbility II wiederum wurde auf Grundlage der Verkehrsprognose 2025 erstellt, welche von einer deutlich stärkeren Zunahme des MIV (+21%) ausging als aktuellere Prognosen und Szenarien.

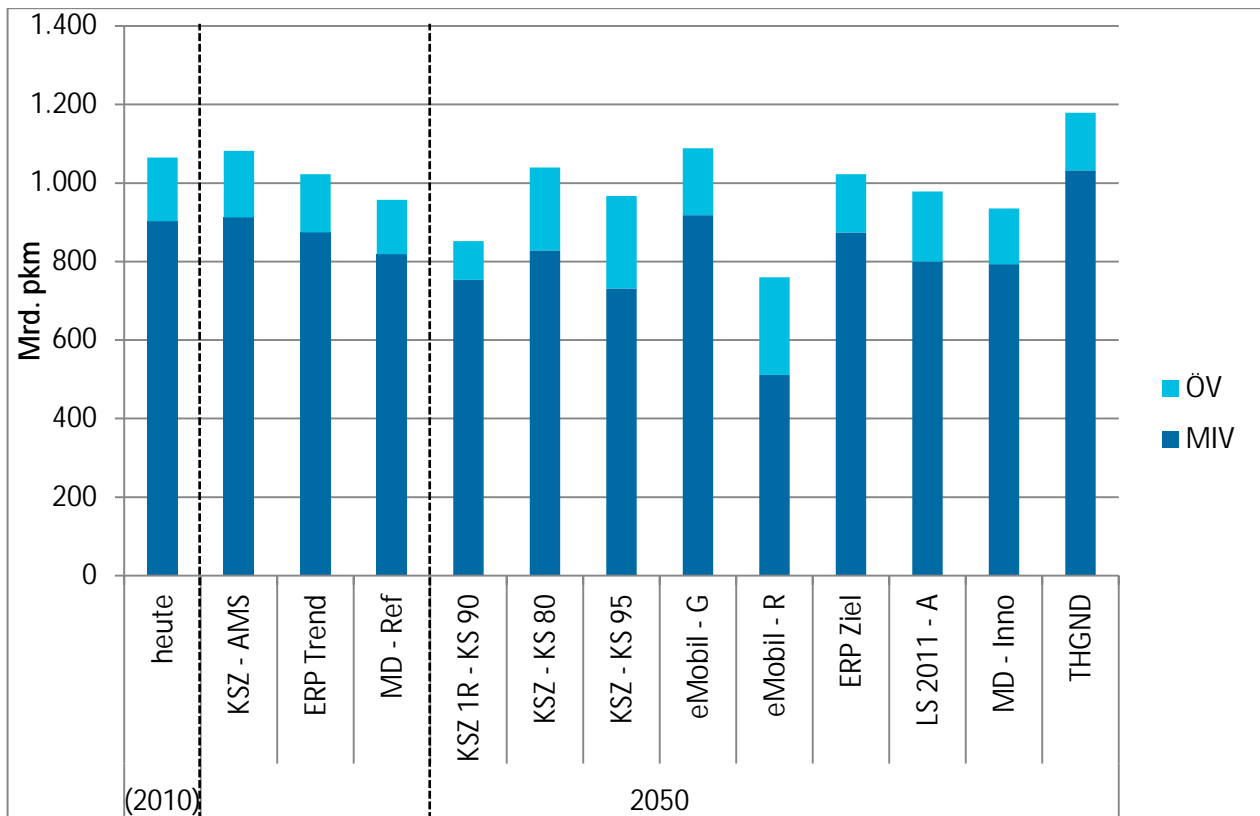
Signifikante Abnahmen beim MIV sind vor allem in eMobil – R, KS 90 und KS 95 von 21%, 17% bzw. 14% zu verzeichnen. Dies hängt mit verschiedenen Maßnahmen zur Vermeidung und Verlagerung des motorisierten Verkehrs zusammen, wie z.B. eine deutliche Stärkung des Umweltverbunds bei gleichzeitiger Erhöhung der Nutzerkosten des MIV.

Der Anteil des ÖV ändert sich im Vergleich zu 2010 in den meisten Szenarien nicht wesentlich und bleibt bei einem Anteil von rund 15%.

### **Vergleich für 2050**

Die Veränderung des motorisierten Individualverkehrs gegenüber dem Jahr 2010 bewegt sich zwischen -43% (eMobil – R: ambitionierte Annahmen zur Verkehrsverlagerung und -vermeidung) und +14% (THGND: Aufbauend auf die Verkehrsprognose 2025). Die meisten Studien gehen langfristig von einem Bevölkerungsrückgang bis 2050 in einer Größenordnung von rund 10% aus. Während bei den Szenarien ERP – Trend und Ziel, AMS und eMobil – G nahezu keine Veränderung im Verkehrsaufwand des MIV zu verzeichnen ist, was bei reduzierter Bevölkerung eine höhere Aktivität impliziert, reduziert sie sich in den Szenarien MD – Inno, LS 2011 – A, MD – Ref und KS 80 entsprechend des Bevölkerungsrückgangs um rund 10%. In den Szenarien KS 90 mit einer Reduktion des MIV um knapp 17% (hier zusätzlicher Einfluss einer im Vergleich mit den anderen Szenarien niedrigeren Bevölkerungsentwicklung), KS 95 mit einer Reduktion um fast 20% und in eMobil – R mit einer Reduktion um 43% gegenüber 2010 wird zusätzlich eine Veränderung des Mobilitätsverhaltens im Sinne von z.B. kürzeren Wegen, einem hohen Anteil von Carsharing und einer weiteren Verlagerung auf den nichtmotorisierten Verkehr angenommen. Eine deutliche Verschiebung hin zum ÖV wird auch im Jahr 2050 vor allem in eMobil und in den Klimaschutzszenarien abgebildet: In den Klimaschutzszenarien steigt der ÖV auf einen Anteil von 20% im KS 80 und auf über 24% im KS 95. Noch stärker fällt der Anstieg im Szenario „Regional eMobil“ aus, wo sich der Anteil des ÖV bis zum Jahr 2050 verdoppelt auf dann 32%.

Abbildung 2–2: Personenverkehrsnachfrage im Vergleich – 2050



Quelle: eigene Darstellung

### 2.2.2. Verkehrsnachfrage im Güterverkehr

#### Relevanz und Besonderheiten des Indikators

Bei Prognosen und Szenarien des Güterverkehrs wird häufig eine starke Abhängigkeit von der Wirtschaftsleistung angenommen. Eine Methode für die Prognose der Güterverkehrsnachfrage beruht daher auf der Fortschreibung auf Basis des Indikators der leistungsbezogenen Transportintensität, welche definiert ist als das Verhältnis von Verkehrsaufwand und Bruttoinlandsprodukt (tkm/BIP). Bei gegebener Entwicklung des BIP lässt sich daraus der Verkehrsaufwand ableiten. Je nach Detaillierungsgrad lässt sich dieser einfache Ansatz beliebig verfeinern.

Der Güterverkehr hat derzeit einen Anteil von rd. 35% an den (nationalen) Treibhausgasemissionen des Verkehrs. Diese werden zum Großteil vom Straßengüterverkehr verursacht.

Beim Luftverkehr gilt ebenso wie beim Personenverkehr, dass unterschiedliche Bilanzgrenzen je nach Studie auftreten können. Die Verkehrsnachfrage des Luftfrachtverkehrs sieht in Darstellungen häufig „vernachlässigbar“ aus. Wegen des hohen spezifischen Energiebedarfs des Luftverkehrs ist das jedoch ein Trugschluss.<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Mit der Faustformel „100 kg pro Person“ gilt, dass der Energieaufwand für einen Tonnenkilometer Luftfracht in etwa dem Energieaufwand von 10 Personenkilometern entspricht.



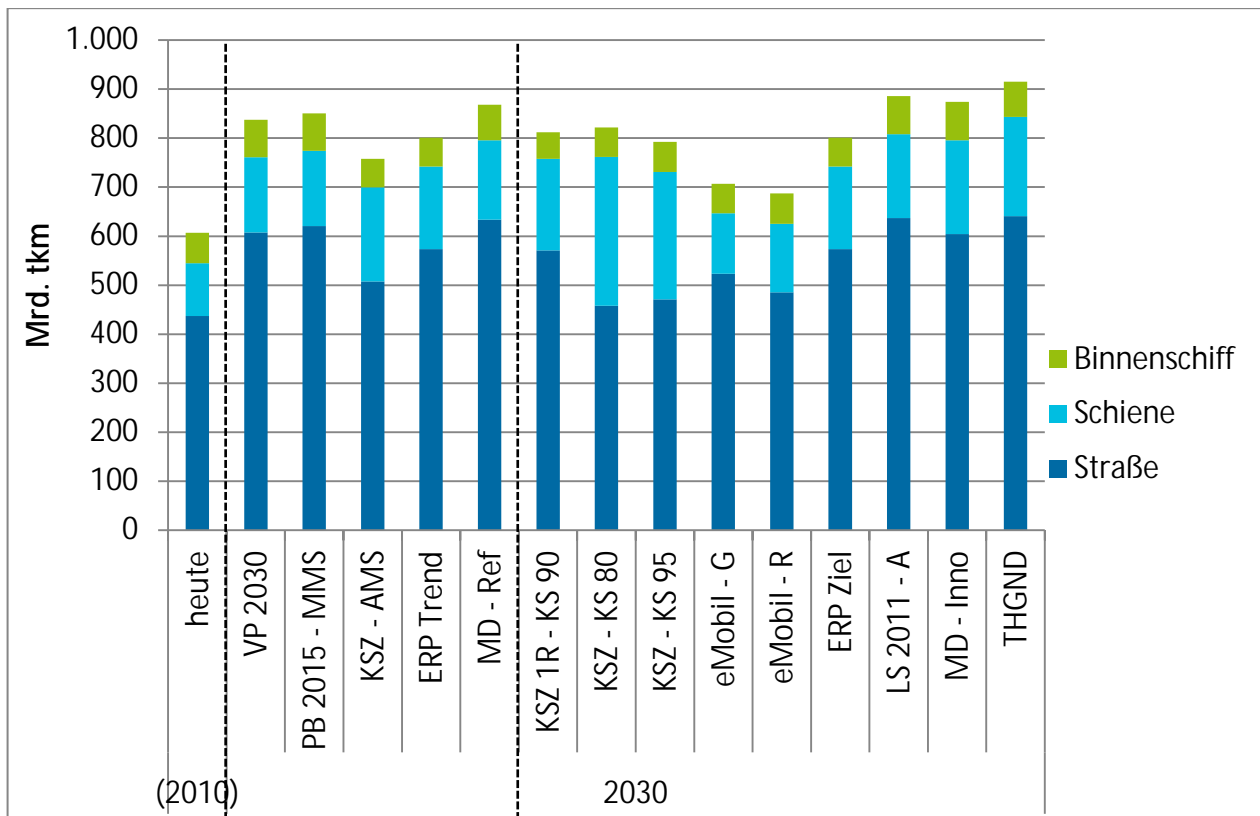
## Vergleich für 2030

In Abbildung 2–3 ist die Entwicklung der Verkehrsnachfrage im Güterverkehr der untersuchten Szenarien im Vergleich für das Jahr 2030 dargestellt. Gegenüber heute steigt diese über alle Verkehrsträger hinweg in allen Szenarien an. Der Anstieg zwischen 2010 und 2030 spielt sich vor allem im Bereich 25% bis 45% ab. In der Studie eMobil liegt er mit 13 bzw. 16% am niedrigsten, im THGND – das noch auf einer älteren Prognose beruht – mit 50% am höchsten.

Vor allem in KS 80 und 95 findet ein Großteil des Wachstums des Güterverkehrsaufwands zu Gunsten des Schienenverkehrs statt. Dies spiegelt sich im Modal Split des Güterverkehrs mit einem Anteil der Schiene von rund 35% ggü. einem Durchschnitt von 17–20% wider. Für die genannten Szenarien bedeutet dies eine Güterverkehrsleistung auf der Schiene von 260 bzw. 304 Mrd. t/km bereits im Jahr 2030. Nach (Holzhey 2010) wird eine Schienengüterverkehrsleistung in Höhe von 213 Mrd. tkm bis 2030 infrastrukturseitig möglich, wenn bestehende Kapazitätspotenziale ausgeschöpft, die Netzbewirtschaftung optimiert, Strecken zur Beseitigung von Engpässen gezielt aus-, neugebaut bzw. elektrifiziert und Überholmöglichkeiten geschaffen werden. Aus- und Neubaumaßnahmen sind vor allem auf sechs Hauptkorridoren und deren Bypässen notwendig, da hier bei einer streckenspezifischen Verdoppelung der Zugzahlen eine chronische Überlastung bestünde. Eine weitere Steigerung der Schienengüterverkehrsleistung jenseits 213 Mrd. tkm erfordert zusätzliche Maßnahmen in den oben genannten Bereichen sowie technologischen Fortschritt unter anderem in der Leit- und Sicherheitstechnik sowie der Verkehrssteuerung und passende Logistikkonzepte und ist damit mit hohen, u.a. finanziellen, Anstrengungen verbunden (Holzhey et al. 2012).

In den KSZ–Szenarien der 2. Runde tritt das Phänomen auf, dass der Gesamtverkehrsaufwand in den im KS 80 und im KS 95 höher liegt, als im AMS. Das liegt daran, dass eine deutliche Verlagerung von der Straße auf die Schiene stattfindet, diese allerdings mit einer Erhöhung der Gesamtverkehrsnachfrage einhergeht. Der Schienenverkehr kann in der Regel nicht so direkt beliefern wie der Straßengüterverkehr, so dass vermehrt Umwege gefahren werden müssen. Zudem erhöht sich zusätzlich noch der benötigte Verteilerverkehr.

Abbildung 2–3: Güterverkehrsnachfrage im Vergleich – 2030



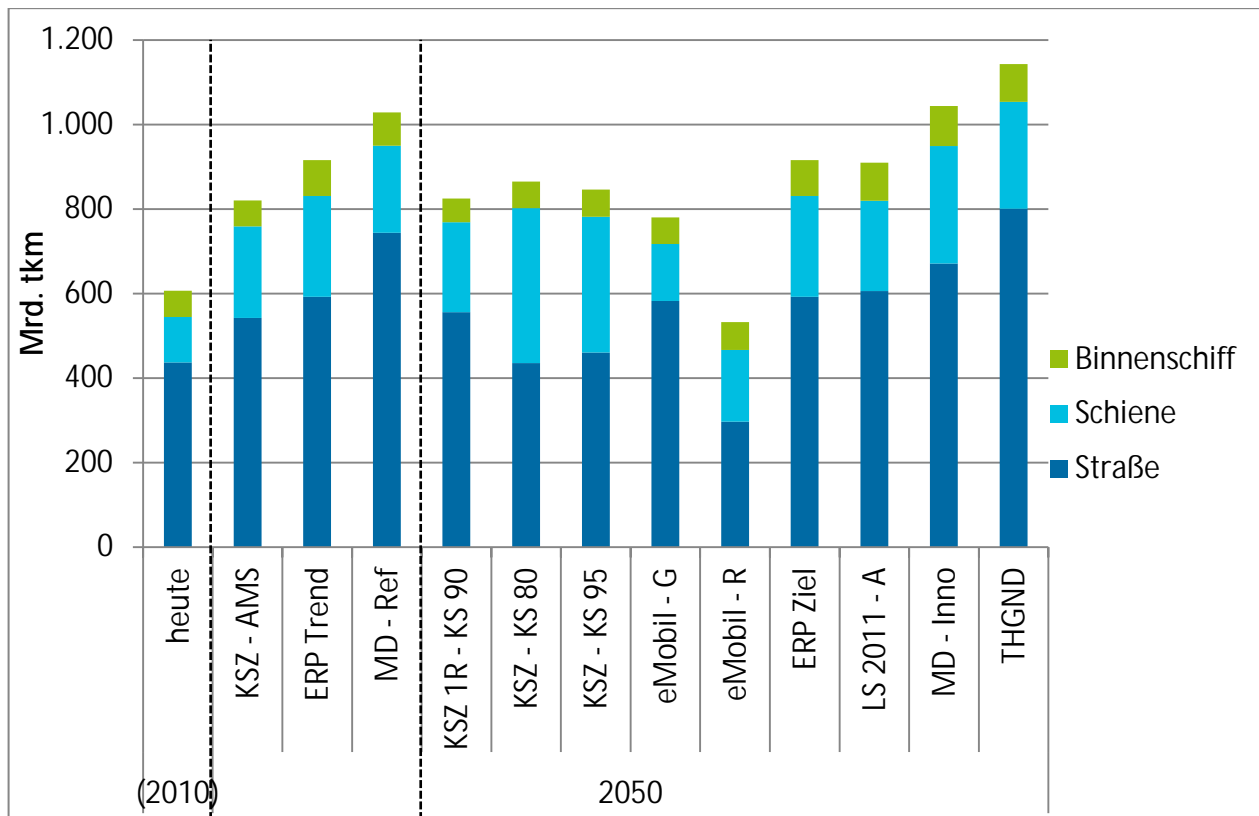
Quelle: eigene Darstellung

### Vergleich für 2050

Bis zum Jahr 2050 wird außer in eMobil – R ein weiteres Wachstum des Güterverkehrsaufkommens angenommen. Dieses liegt in THGND sogar bei 88% und in den MD-Szenarien bei rund 70%. Ansonsten bewegt es sich im Bereich 40 bis 50%. Einzige Ausnahme sind die eMobil-Szenarien. Hier liegt grundsätzlich die Annahme zu Grunde, dass das Transitaufkommen nicht mehr mit den gleichen Wachstumsraten wie in der Vergangenheit ansteigen wird, so dass das Aufkommen in eMobil – G nur um 28% wächst. Im Szenario eMobil – R sinkt der Güterverkehrsaufwand sogar um 13% bezogen auf 2010 auf 532 Mrd. Tonnenkilometer, was in etwa dem Niveau von 2003 entspricht. Hier kommt u.a. noch die Annahme hinzu, dass durch entsprechende Maßnahmen die Transportweiten nicht weiter zunehmen werden.

Große Unterschiede weisen die Szenarien auch beim Anteil des Schienenverkehrs auf. In eMobil – G bleibt dieser konstant mit rund 17%, in den meisten anderen Szenarien steigt er auf 20 bis 26% an. In den KS 80 und 95 beträgt er sogar 42 bzw. 38%. Damit liegen die Wachstumsraten des Schienengüterverkehrs im Zeitraum 2010 bis 2050 nur in eMobil 2050 unter 60%. In ERP Trend und ERP Ziel, in AMS, LS 2011 – A, MD Ref und THGND liegen sie im Bereich 90 bis 120% und in KS 80 und 95 sogar bei 240 bzw. 199%.

Abbildung 2–4: Güterverkehrsnachfrage im Vergleich – 2050



Quelle: eigene Darstellung

### 2.2.3. Technologie- und Effizienzentwicklung

#### Relevanz und Besonderheiten der Indikatoren

Auf Ebene der Fahrzeuge lassen sich Energie- und Treibhausgaseinsparungen (je Kilometer) einerseits durch Effizienzsteigerungen bei bereits im Markt befindlichen Technologien und andererseits durch den Einsatz alternativer Antriebskonzepte realisieren. Beide Faktoren sind in den betrachteten Szenarien wesentlich. In den Szenarien kommen alternative Antriebskonzepte wie batterieelektrische Fahrzeuge oder Brennstoffzellenfahrzeuge vor allem bei den Pkw und leichten Nutzfahrzeugen in größerem Umfang zum Einsatz, für Lkw bieten sich weniger Alternativen. In einigen Studien werden alternative Antriebe mit pauschalen Anteilen hinterlegt (z.B. LS 2011), in anderen wird auch die Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens mit berücksichtigt. Eine gute Grundlage für entsprechende Überlegungen bietet hier die eingangs erwähnte Studie UBA (2015), die umfassend verschiedene postfossile Mobilitätsoptionen bewertet und auf deren Basis für Klimaschutzszenarien plausible Annahmen zur zukünftigen Marktdurchdringung alternativer Antriebe getroffen werden können.

#### Pkw und leichte Nutzfahrzeuge

Bei den Pkw und leichten Nutzfahrzeugen ist eine Reihe von alternativen Antrieben denkbar. In den betrachteten Studien kommen folgende Alternativen zum Einsatz:

- Elektrifizierung

- Brennstoffzellenfahrzeuge
- Gasfahrzeuge

In den Abbildungen Abbildung 2–5 und Abbildung 2–6 ist die Bestandsstruktur der Pkw für die Jahre 2030 und 2050 dargestellt – für diejenigen Studien, wo entsprechende Daten verfügbar sind. Für die Leitstudie und das Szenario ERP – Ziel sind entsprechende Informationen nicht im Detail veröffentlicht worden, so dass diese nicht mit in die Abbildungen aufgenommen werden können. In den folgenden Abbildungen werden Benzin, Diesel und Hybrid-Fahrzeuge gemeinsam als konventionelle Pkw dargestellt.

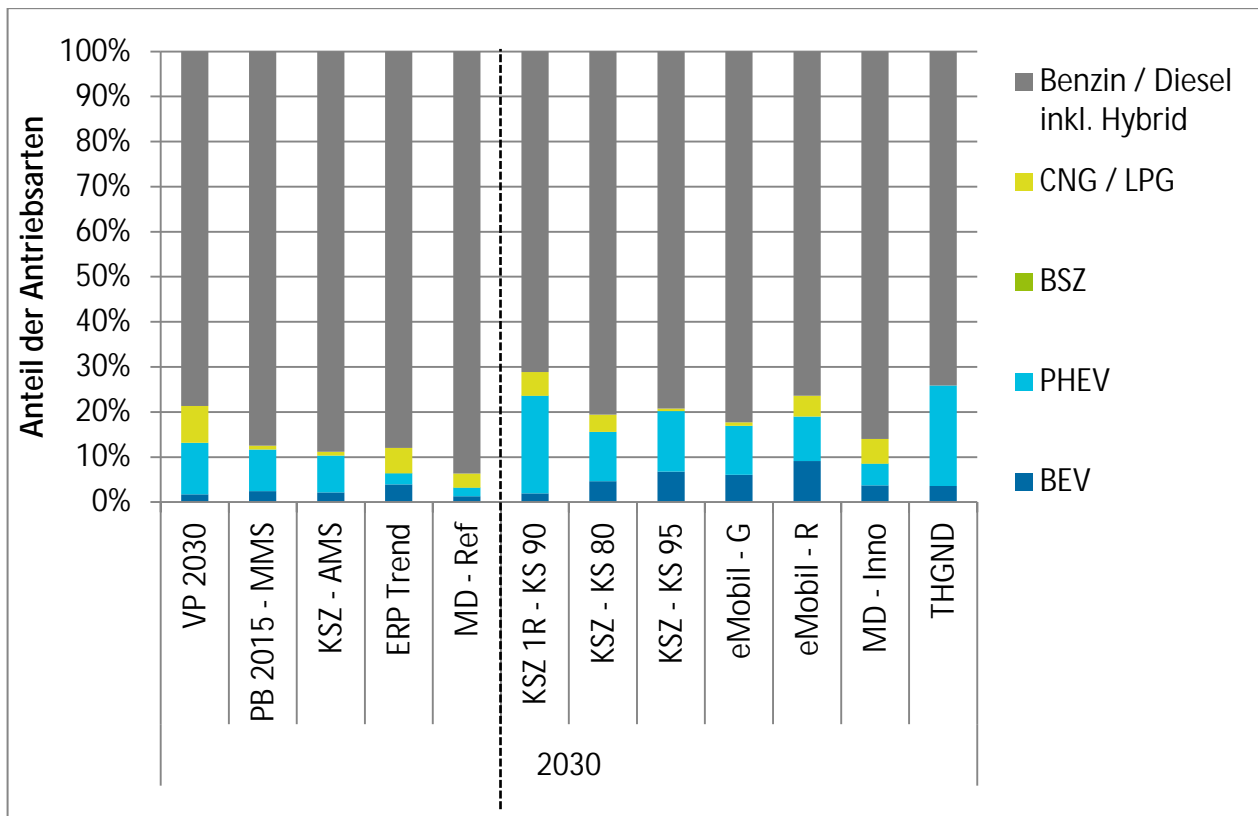
In allen Szenarien dominiert im Jahr 2030 weiterhin der konventionelle Antrieb mit 75 bis 90%. Alle aktuelleren Klimaschutzszenarien erreichen im Jahr 2030 das Ziel der Bundesregierung von rund 6 Mio. Elektrofahrzeugen, wobei der Anteil der reinen, batterieelektrisch betriebenen Pkw (BEV) zwischen den Szenarien mit 13% (VP 2030) bis fast 50% (eMobil – R) stark variiert. Der Anteil erd- bzw. flüssiggasbetriebener Pkw liegt – wenn separat ausgewiesen – zwischen 0,55% (KS 95) und 8% (VP 2030).<sup>3</sup>

Im ERP – Ziel, für das in der Studie keine detaillierten Bestandszahlen angegeben werden, sondern nur pauschale Annahmen getroffen werden, liegt der Anteil der Fahrzeuge mit Elektroantrieb etwa doppelt so hoch wie in ERP – Trend. Im Jahr 2020 wird das Ziel von einer Million Fahrzeugen annähernd erreicht. Im Jahr 2030 machen sechs Millionen Elektro-Pkw einen Anteil von 14% am Bestand aus.

---

<sup>3</sup> In der Verkehrsprognose wird der Pkw-Bestand differenziert nach BEV, PHEV, Hybrid, Benzin, Diesel und „Sonstigen“ Fahrzeugen dargestellt. Es wurde hier davon ausgegangen, dass es sich bei den „Sonstigen“ Fahrzeugen um Erdgas- und Flüssiggasfahrzeuge handelt.

Abbildung 2–5: Pkw-Bestand im Vergleich – 2030

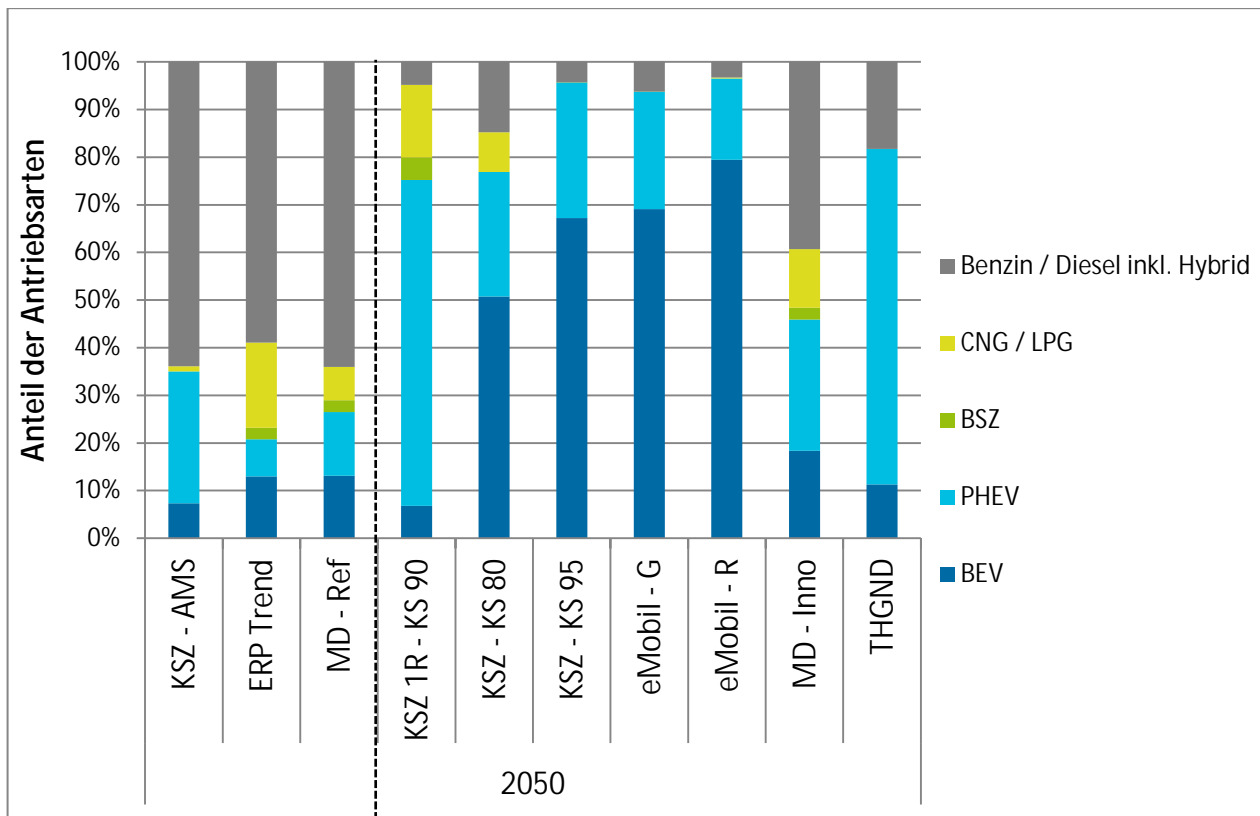


Quelle: eigene Darstellung

Alle Klimaschutzszenarien weisen im Jahr 2050 einen hohen Anteil elektrifizierter Pkw im Bestand auf. Im Jahr 2050 sind es im ERP – Ziel 22 Mio. Elektro-Fahrzeugen und damit rund die Hälfte des Pkw-Bestandes. In MD und ERP wird zur Erreichung der Klimaschutzziele noch stärker auf Biokraftstoffe gesetzt, was den hohen Anteil an konventionellen Pkw von rund 60% im Bestand erklärt. In ERP wird zusätzlich stark auf gasbetriebene Fahrzeuge mit einem Anteil von 18% im Bestand gesetzt. Je nachdem, welches Klimaschutzziel erreicht werden soll und ob strombasierte Kraftstoffe als Option berücksichtigt werden, liegt der Anteil konventioneller Antriebe bei den übrigen Klimaschutzszenarien im Bereich von 3% (eMobil – R) bis 18% (THGND).

Einige Szenarien gehen von einer optimistischeren Batterieentwicklung aus, bei der höhere Reichweiten hinterlegt sind, was erklärt, dass in dem etwas älteren THGND der Anteil an Plug-In-Pkw deutlich höher liegt, als in den aktuelleren Klimaschutzszenarien.

Abbildung 2–6: Pkw-Bestand im Vergleich – 2050



Quelle: eigene Darstellung

Neben dem Einsatz alternativer Antriebe ist – vor allem in den nächsten Jahren – auch die Effizienzentwicklung konventioneller Fahrzeuge, d.h. der Energieverbrauch je gefahrenen Kilometer (MJ/km), relevant für den Energieverbrauch. Bei konventionellen Fahrzeugen steht der Kraftstoffverbrauch über den Kohlenstoffgehalt der Kraftstoffe in direktem Zusammenhang mit dem CO<sub>2</sub>-Ausstoß, so dass sich die Effizienz auch über die Entwicklung der Kohlendioxidemissionen messen lässt. Hierbei ist zwischen der Effizienzentwicklung der Neuzulassungen und der letztlich für den Energieverbrauch relevanten Effizienz des Pkw-Bestandes zu unterscheiden. Die Darstellungen in den Studien sind nicht immer der gleichen Kategorie zuzuordnen und können daher nicht vergleichend grafisch dargestellt werden.

**Tabelle 2-3: Effizienzsteigerung konventionelle Pkw 2030 und 2050**

Studie	Angabe	2030	2050
ERP – Trend	Verbrauchsminderung bei konventionellen Fahrzeugen im Bestand ggü. 2011	30%	39%
ERP – Ziel	Verbrauchsminderung bei konventionellen Fahrzeugen im Bestand ggü. 2011	35%	50%
MD – Inno	Pkw-Bestand ggü. 2005	40%	50%
eMobil 2050	Effizienzsteigerung der verbrennungsmotorischen Neuwagen ggü. 2010	39%	bei mittelgroßen Benzinfahrzeugen 62% und bei Dieselfahrzeugen 54%
KSZ – AMS	Effizienzsteigerung der verbrennungsmotorischen Neuwagen ggü. 2010	Benzin: 28% Diesel: 24%	Benzin: 36% Diesel: 30%
KSZ – KS 80 und 95	Effizienzsteigerung der verbrennungsmotorischen Neuwagen ggü. 2010	Benzin: 33% Diesel: 29%	Benzin: 57% Diesel: 49%
KSZ 1. Rd. – KS 90	Effizienzsteigerung der verbrennungsmotorischen Neuwagen ggü. 2010	Benzin: 47% Diesel: 42%	Benzin: 52% Diesel: 46%
THGND	Verbrauchsminderung bei konventionellen Neuzulassungen ggü. 2010	37%	Im Zeitraum 2030 bis 2050 wird eine Verbesserung um weitere 8% angenommen.
PB 2015 MMS	Verbrauchsminderung bei konventionellen Neuzulassungen (real) ggü. 2010	Benzin: 28% Diesel: 24%	
VP 2030	Effizienzverbesserung im Bestand	1,5% p.a.	

Quelle: eigene Darstellung

Übereinstimmend gehen die Studien davon aus, dass die Minderungspotenziale bei den bereits sehr effizienten batterieelektrischen und Plug-In-Hybridfahrzeugen niedriger ausfallen.

Zu den leichten Nutzfahrzeugen werden in den meisten Studien keine konkreten Annahmen publiziert.

### Schwere Nutzfahrzeuge

Bezüglich des Einsatzes alternativer Antriebe unterscheiden sich die Szenarien vor allem durch den Einsatz von Oberleitungs-Lkw und Flüssiggas.

Im Szenario eMobil – G wird beispielsweise davon ausgegangen, dass ab dem Jahr 2025 in die Infrastruktur für Oberleitungs-Lkw investiert wird und im Jahr 2040 das Kernautobahnnetz mit Oberleitungen ausgestattet ist. Dementsprechend steigt der Anteil der Oberleitungsfahrzeuge auf 90%. Der verbleibende Langstrecken- und Regionalverkehr erfolgt konventionell verbrennungsmo-

torisch mit Flüssigkraftstoffen. Im Szenario eMobil – R liegt dagegen der Fokus auf der Regionalisierung von Wirtschaftskreisläufen und der Verlagerung von Lkw-Verkehren auf die Schiene und es wird nicht in die Ausstattung der Autobahnen mit Oberleitungen investiert. Allerdings gewinnen Gas-Lkw an Bedeutung, welche perspektivisch auch mit Biogas oder strombasiertem Methan betrieben werden können.

Oberleitungs-Lkw sind in den hier ausgewählten Szenarien nur in eMobil – G und im KS 95 hinterlegt.

Bezüglich der Effizienzsteigerung im Straßengüterverkehr sind folgende Informationen aus den Studien verfügbar:

**Tabelle 2-4: Effizienzsteigerung konventionelle Lkw 2050**

Studie	Angabe	2050
ERP – Trend	Reduktion des spezifischen Verbrauchs ggü. 2011	Lkw und Sattelschlepper 30%
ERP – Ziel	Reduktion des spezifischen Verbrauchs ggü. 2011	Lkw und Sattelschlepper 42%
MD – Inno	Minderung der Verbräuche von Dieselfahrzeugen im Straßengüterverkehr ggü. 2005	28%
eMobil 2050	Verbrauchsminderung ggü. 2010	Lkw <12 t und LZ/SZ < 40 t rund 30%, Lkw >12 t 35%  2030 wird bereits ein Großteil der Minderung realisiert.
KSZ AMS	Verbrauchsminderung konventioneller Antriebe ggü. 2010	30%
KSZ KS 80 und 95	Verbrauchsminderung konventioneller Antriebe ggü. 2010	35%
KSZ 1. Rd. KS 90	Effizienzsteigerung bei den Neuzulassungen ggü. 2010	LNF und kleine Lkw: 45% Sattelzüge: 51%
THGND	Effizienzsteigerung bei den Neuzulassungen ggü. 2010	LNF und kleine Lkw: 34% Lkw und Sattelzüge: 29%
PB 2015 MMS	Verbrauchsminderung der Neuzulassungen ggü. 2010	bis 2030: 21%
VP 2030	Verbrauchsminderung im Fahrzeugbestand ggü. 2010	bis 2030: 1% p.a. (d.h. ca. 18% bis 2030)

Quelle: eigene Darstellung



## 2.2.4. Endenergiebedarf

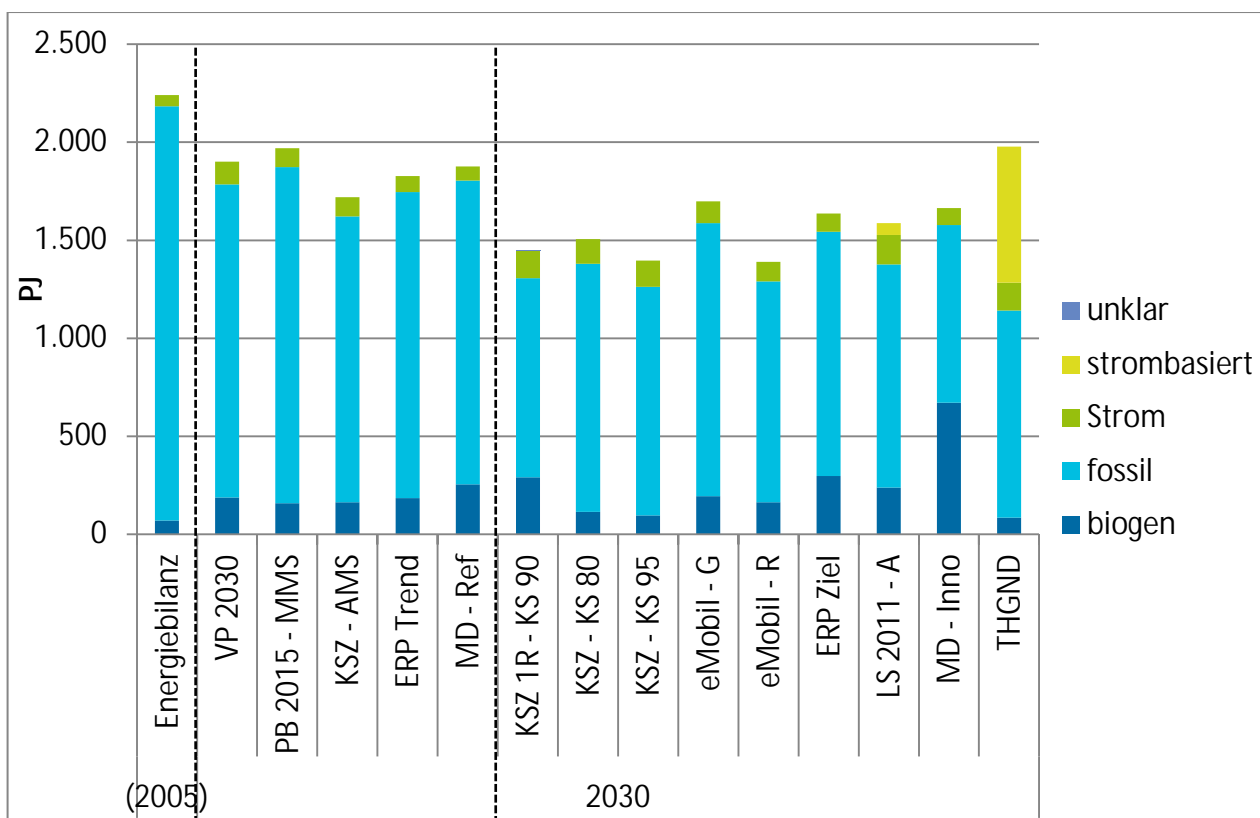
### Relevanz und Besonderheiten des Indikators

Der Endenergiebedarf und die zugrunde liegenden Energieträger sind ausschlaggebend für die Treibhausgasemissionen. Auch spielen die eingesetzten Mengen eine Rolle in der Interaktion mit anderen Sektoren, vor allem, wenn der Strombedarf des Verkehrssektors anwächst, oder wenn es um die verfügbaren Potenziale nachhaltiger Biomasse geht.

Im Rahmen des Energiekonzepts hat sich die Bundesregierung das Ziel gesetzt, den Endenergiebedarf des Verkehrssektors gegenüber 2005 bis zum Jahr 2020 um 10% und bis zum Jahr 2050 um 40% zu senken, so dass zumindest für den Energiebedarf ein messbares Ziel für den Verkehrssektor existiert.

### Vergleich für 2030

Abbildung 2–7: Endenergieverbrauch differenziert nach Energieträger im Vergleich – 2030



Quelle: eigene Darstellung

In Abbildung 2–7 ist die Entwicklung des Endenergiebedarfs der untersuchten Szenarien im Vergleich für das Jahr 2030 (ohne Luftverkehr und internationalem Seeverkehr) dargestellt. Gegenüber 2005 – dem Referenzjahr für das Endenergieziel – nimmt in allen Szenarien der Endenergiebedarf ab. Die Minderungsraten für diesen Zeitraum liegen bei zwischen 12% und 18% in ERP – Trend, MD – Ref, THGND und PB 2015–MMS. In eMobil – G, KSZ – AMS und MD – Inno liegt die Minderung im Bereich 23 bis 26%. In den Szenarien, in denen auch die Verkehrsnachfrage zu-

rückgeht (eMobil – R, KS 90, KS 80 und 95) kann der Endenergiebedarf des Verkehrssektors bereits im Jahr 2030 um 33 bis 38% reduziert werden.

Die Nachfrage nach Strom steigt in den meisten Szenarien deutlich an und erreicht in den Szenarien einer bereits im Jahr 2030 starken Elektrifizierung Zuwächse um bis zu 160% (LS 2001 -A 95) und damit 92 PJ.

Auch die Nachfrage nach biogenen Kraftstoffen nimmt bis 2030 deutlich zu. In einigen Szenarien liegt die Zunahme bei z.T. deutlich mehr als 100 PJ (ERP – Trend und Ziel, MD – Ref, KS 80 THGND), im Zielszenario MD – Inno sogar bei plus 845% und erreicht damit in diesem Szenario bereits 2030 670 PJ.

**Tabelle 2-5: Anteil von Biokraftstoffen und Strom am Endenergiebedarf des Verkehrssektors im Jahr 2030**

	biogen	fossil	Strom	strombasiert
Energiebilanz (2005)	3%	94%	3%	
eMobil – G	11%	82%	7%	
eMobil – R	12%	81%	7%	
ERP Trend	10%	85%	4%	
ERP Ziel	18%	76%	6%	
KSZ – AMS	10%	85%	6%	
KSZ – KS 80	8%	84%	8%	
KSZ – KS 95	7%	84%	10%	
KSZ 1. Rd. – KS 90	20%	70%	10%	
LS 2011 – A	15%	72%	9%	
MD – Inno	40%	54%	5%	
MD – Ref	14%	83%	4%	
PB 2015 – MMS	8%	87%	5%	
THGND	4%	53%	7%	35%
VP 2030	10%	84%	6%	

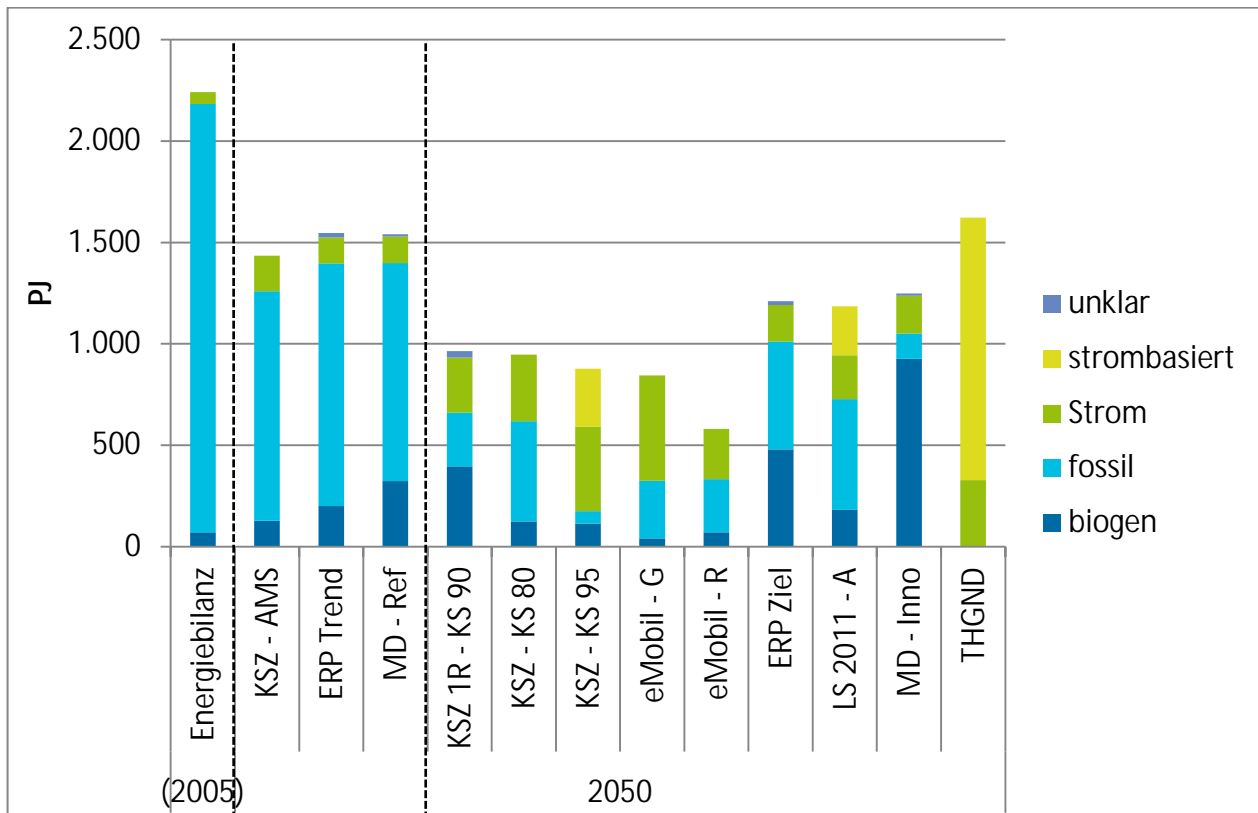
Quelle: eigene Darstellung

Der Anteil biogener Kraftstoffe, strombasierter Kraftstoffe und des direkten Stromeinsatzes ist in Tabelle 2–5 dargestellt. Es zeigt sich, dass viele Szenarien von einer weiteren Erhöhung des Einsatzes von Biokraftstoffen im Verkehr ausgehen (das heutige Niveau beträgt etwa 5%). Vor allem in den älteren Szenarien (Modell Deutschland, Leitstudie, KS 90 der ersten Runde KSZ) liegt der Einsatz von Biokraftstoffen vergleichsweise hoch. Aber auch im Szenario ERP – Ziel wird der Einsatz von Biokraftstoffen als Strategie zur Emissionsreduktion gewählt. Eine Reihe von Szenarien stützt sich auf die in TREMOD verwendete Annahme eines Anteils von 10% Bioethanol und 13% Biodiesel im Straßenverkehr ab dem Jahr 2020, was bezogen auf den gesamten Endenergiebedarf des Verkehrssektors den dargestellten 10% entspricht. Dagegen wurde in der Studie THGND auf Grund der Vorkettenemissionen und bedenklichen Umweltauswirkungen von Biokraftstoffen auf eine weitere Steigerung des Anteils biogener Kraftstoffe verzichtet. Auch im Projektionsbericht wurde vor dem Hintergrund aktueller politischer Entwicklungen die Annahme zum Anteil von Biokraftstoffen nach unten korrigiert.

Beim Einsatz von Strom bewegen sich die Szenarien zwischen 4% (MD – Ref, ERP – Trend) und 10% (KSZ – KS 95 und KS 90). Neben einem „Sockel“ von etwa 3% für den Schienenverkehr spiegelt dies vor allem unterschiedliche Annahmen zur Elektromobilität wider; in geringerem Maße kann auch die Verlagerung auf die Schiene einen Effekt auf die Stromnachfrage des Verkehrssektors haben.

**Vergleich für 2050**

**Abbildung 2–8: Endenergieverbrauch differenziert nach Energieträger im Vergleich – 2050**



Quelle: eigene Darstellung

In praktisch allen Trendszenarien (ERP – Trend, MD – Ref, KSZ AMS) wird das Energieziel der Reduktion des Endenergieverbrauchs um 40% auf unter 1.550 PJ erreicht bzw. fast erreicht. Die Zielszenarien MD – Inno sowie ERP Ziel (beide unter wesentlicher Beteiligung von prognos erstellter) liegen in Bezug auf den Endenergiebedarf mit 1.248 PJ bzw. 1.211 PJ dicht beieinander. In allen anderen Zielszenarien wird das 40%-Ziel deutlich unterboten mit einer Spanne zwischen 580 PJ (eMobil – R) bis 964 PJ (KS 90). Grund hierfür ist, dass in diesen Szenarien auf eine sehr ambitionierte Effizienzsteigerung (v.a. durch Elektrifizierung) gesetzt wird. Um die Klimaschutzziele für 2050 auch im Verkehrssektor zu erreichen, ist das Energieziel der Bundesregierung mit einer Minderung von 40% nicht ausreichend, wenn man strenge Potenzialrestriktionen postfossiler Kraftstoffe (zzgl. der Berücksichtigung energieeffizienter Umwandlungspfade) mit einbezieht. Die aktuellen Zielszenarien reduzieren daher den Endenergiebedarf zum Großteil um 54 bis 74%.

**Tabelle 2-6: Anteil von Biokraftstoffen und Strom am Endenergiebedarf des Verkehrssektors im Jahr 2050**

	Biogen	fossil	Strom	Strombasiert
Energiebilanz (2005)	3%	94%	3%	
eMobil – G	5%	34%	61%	
eMobil – R	12%	45%	43%	
ERP Trend	13%	78%	8%	
ERP Ziel	40%	45%	15%	
KSZ – AMS	9%	79%	12%	
KSZ – KS 80	13%	52%	35%	
KSZ – KS 95	13%	7%	47%	33%
KSZ 1. Rd. – KS 90	41%	28%	28%	
LS 2011 – A	15%	46%	18%	20%
MD – Inno	75%	10%	15%	
MD – Ref	21%	70%	9%	
THGND			20%	80%

Quelle: eigene Darstellung

Die Unterschiede in Bezug auf die Zusammensetzung der Energieträger sind im Jahr 2050 daher noch deutlicher erkennbar: Der Anteil der Biokraftstoffe ist mit 75% am höchsten in MD – Inno: Im Innovationsszenario kommen 927 PJ zum Einsatz. Im ERP– Ziel und im KS 90 der ersten Runde werden rund 40% des Endenergiebedarfs mit Biomasse abgedeckt. Dagegen wird im THGND der Einsatz von Biokraftstoffen komplett ausgeschlossen. Andere aktuelle Zielszenarien liegen im Bereich 40 bis 200 PJ.

Der direkte Einsatz von Strom liegt bei den Zielszenarien, die eine vergleichsweise geringe Verfügbarkeit nachhaltig erzeugbarer Biokraftstoffe annehmen, im Bereich 217 PJ (LS 2011) bzw. 250 PJ (eMobil – R) bis 330 PJ (THGND), wenn keine Oberleitungs-Lkw zu Grunde gelegt werden, beim Einsatz von Oberleitungs-Lkw liegt er im Bereich 417 (KS 95) bis 520 PJ (eMobil – G).

Daneben kommt Strom in den Szenarien LS 2011, THGND und KS 95 auch indirekt über strombasierte Kraftstoffe zum Einsatz (Wasserstoff, EE–Methan, PtL). Deren Strombedarf beläuft sich im Jahr 2050 auf 242 (LS 2011), 286 PJ (KS 95) bzw. 1295 PJ (THGND).

Damit ergibt sich in den Klimaschutzszenarien, die aufgrund der begrenzten nachhaltigen Potenziale nur noch geringfügig Biomasse einsetzen, ein massiver Anstieg in der Stromnachfrage des Verkehrssektors. Dieser liegt bei den Zielszenarien, die verstärkt auf Biomasse im Verkehrssektor setzen, bei unter 200 PJ, in den anderen je nach Entwicklung der Verkehrsnachfrage bei 248 bis 1622 PJ.

## 2.2.5. CO<sub>2</sub>-Emissionen

### Relevanz und Besonderheiten des Indikators

Wichtig ist bei der Auswertung und Analyse der Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors zu bedenken, dass eine isolierte Betrachtung der direkten Verkehrsemissionen irreführend sein kann, wenn nicht auch die vorgelagerten bzw. in anderen Sektoren entstehenden Emissionen wie beispielsweise Herstellung der Kraftstoffe und Stromerzeugung, sowie im Fall von Biokraftstoffen die Emissionen aus Landnutzungsänderungen und Landwirtschaft betrachtet werden. Neben den Vorkettenemissionen der Kraftstoffe gibt es noch weitere Emissionen, welche durch den Verkehrssektor verursacht werden, aber in der Abgrenzung der Treibhausgasinventare keine Berücksichtigung finden. Hierzu zählen insbesondere die Treibhausgasemissionen durch den Bau und Unterhalt der Verkehrsinfrastruktur sowie die Emissionen durch die Herstellung von Fahrzeugen.

Neben den CO<sub>2</sub>-Emissionen tragen auch andere Emissionen wie Stickoxide, Wasserdampf, Schwefeloxide, Ruß, Kondensstreifen und Zirren in hohen Luftschichten zur Klimawirkung des Luftverkehrs bei, werden aber in den Studien nicht berücksichtigt.

Ein wesentlicher Vorteil bei der Abgrenzung gemäß dem nationalen Treibhausgasinventar besteht allerdings in der Vergleichbarkeit: In wie weit die Ziele des Energiekonzeptes erreicht werden, kann unmittelbar abgelesen werden.

In der Abbildung 2–9 und in der Abbildung 2–10 sind die direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen der Szenarien gegenübergestellt. Da nicht in allen Studien die CO<sub>2</sub>-Emissionen sektorspezifisch ausgewiesen werden, wurden hierfür die Emissionen auf Basis des Endenergiebedarfs ermittelt. Da in einigen Studien der Energiebedarf des Luftverkehrs nicht auf nationalen und internationalen Luftverkehr gesplittet wird, wurde zwecks Vergleichbarkeit für die Darstellung die Differenzierung nach Verkehrssektor national (ohne Luftverkehr) und den Emissionen aus dem Luftverkehr (national und international) gewählt.<sup>4</sup> Da Biokraftstoffe sowie der Einsatz von Strom im Verkehrssektor mit Null bilanziert werden, sind die dargestellten direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen nur auf fossile Kraftstoffe zurückzuführen.

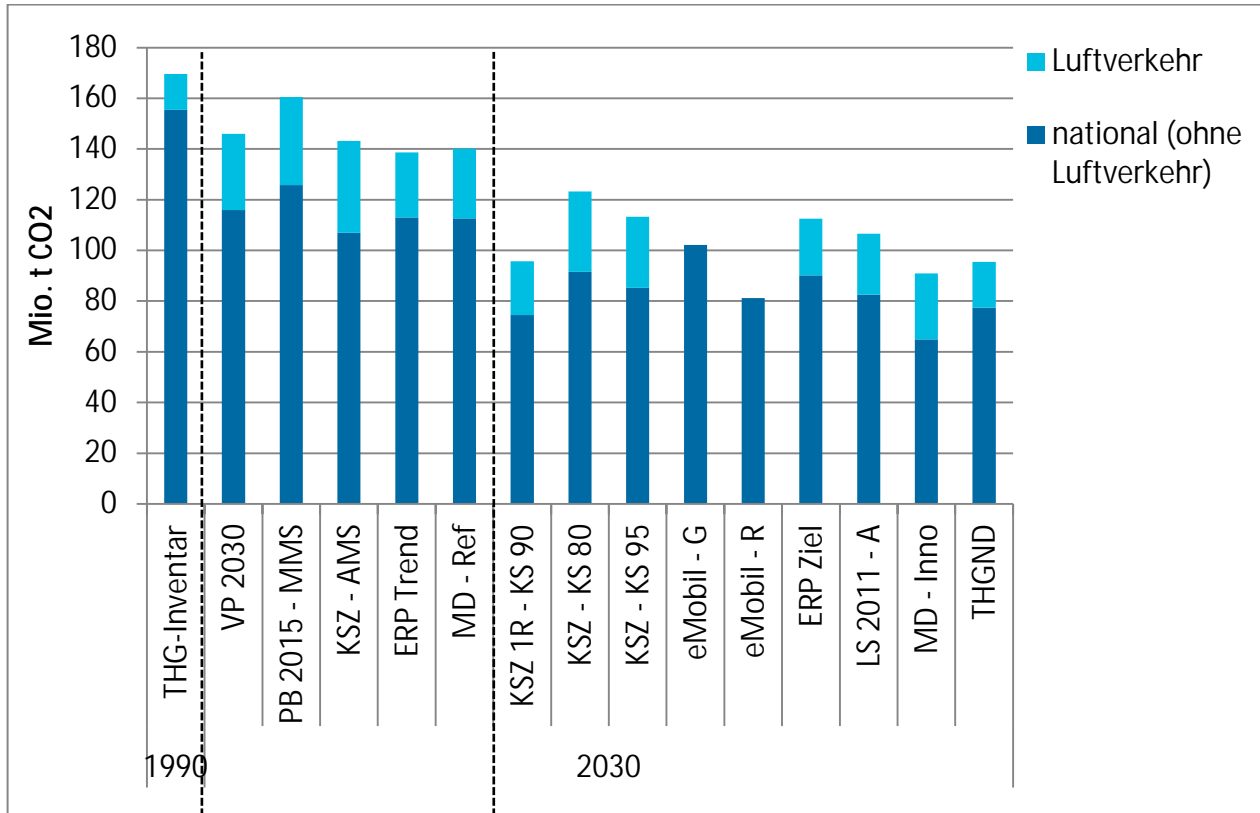
Auf Grund der Tatsache, dass in den Szenarien mit vorgegebenem Klimaschutzziel jeweils ein Gesamtminierungsziel der CO<sub>2</sub>-Emissionen vorgegeben ist und auch Unterziele zum Anteil der erneuerbaren Energien eingehalten werden, ist der Stromsektor bis 2050 überwiegend erneuerbar. So fallen die Emissionen der Stromerzeugung (welche ebenfalls nicht dargestellt sind) entsprechend niedrig aus.

---

<sup>4</sup> Die CO<sub>2</sub>-Emissionen des nationalen Luftverkehrs liegen seit 1990 relativ gleichbleibend bei 2 Mio. t (aktuell leicht sinkend) und damit im Vergleich zu den gesamten nationalen Emissionen verhältnismäßig gering. Somit erlaubt die gewählte Darstellung ausreichenden Aufschluss über die Entwicklung der nationalen und internationalen Verkehrsemissionen.

Vergleich für 2030

Abbildung 2–9: CO<sub>2</sub>-Emissionen des Verkehrssektors im Vergleich – 2030



Quelle: eigene Darstellung

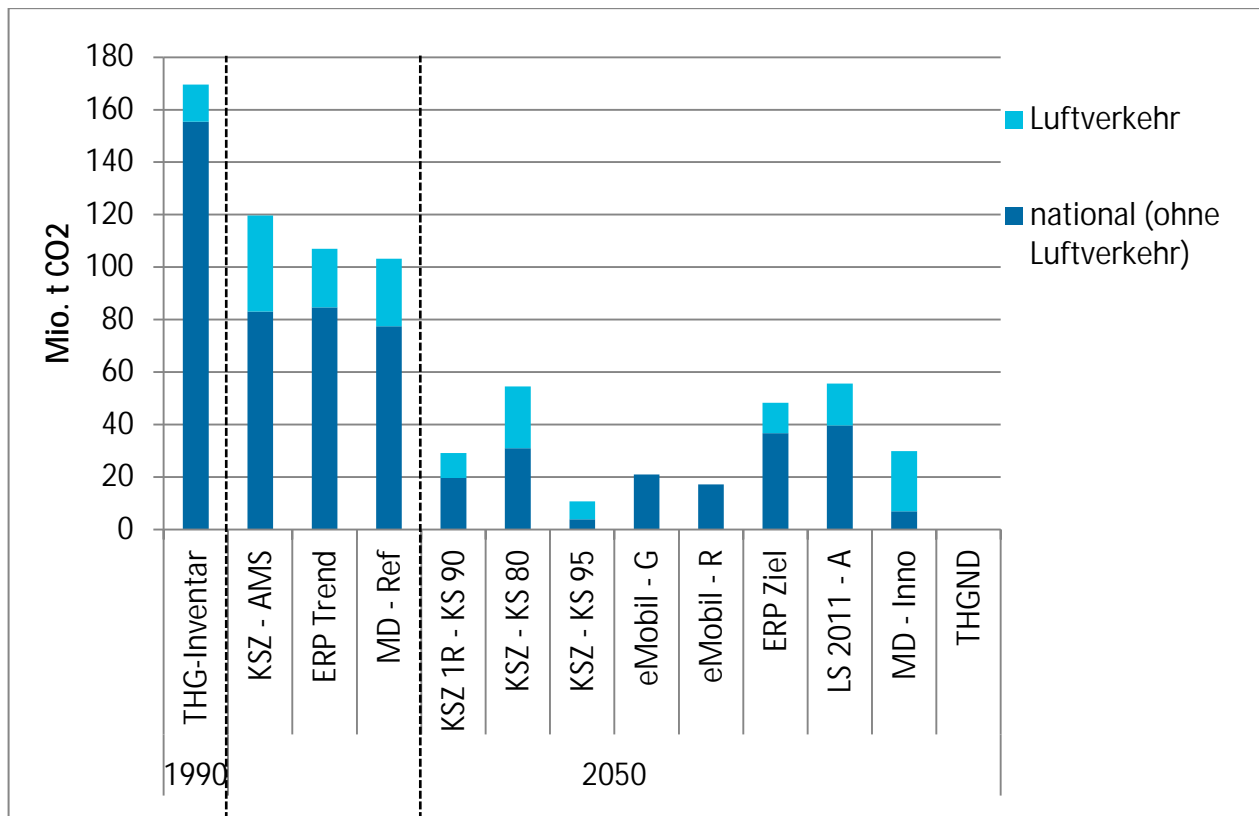
Hohe Minderungen werden mit 48% in eMobil – R (hier allerdings ohne Berücksichtigung Luftverkehr), 46% in MD – Inno und mit 44% im THND und im KS 90 erzielt. KS 95, ERP – Ziel, LS 2011 und eMobil – G erreichen eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Bereich von rund 35%. Die Szenarien, die nicht als Klimaschutzszenarien konzipiert sind, also denen keine entsprechenden Maßnahmen hinterlegt wurden, bewegen sich im Bereich von 14 bis 18% Minderung der Treibhausgasemissionen bis 2030 gegenüber dem Basisjahr 1990. Die Minderungen der CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2030 fallen im PB 2015-MMS mit 5% gegenüber 1990 am niedrigsten aus.

Vergleich für 2050

In den untersuchten Zielszenarien mit Zeithorizont 2050 werden CO<sub>2</sub>-Emissionen gegenüber 1990 in der Größenordnung von 68 bis 100% im Verkehrssektor erreicht.

Im KS 80 und im ERP – Ziel wird ein Gesamtziel über alle Sektoren von 80% erreicht, das sich im Verkehrssektor mit einer Minderung von 68% bzw. 72% niederschlägt. Deutlich wird, dass der Luftverkehr mit seinen hohen Wachstumsraten in den meisten Szenarien weiter steigende CO<sub>2</sub>-Emissionen hat. In den Trend- bzw. Referenzszenarien werden die Treibhausgasemissionen nur um 30 bis 40% reduziert.

Abbildung 2–10: CO<sub>2</sub>-Emissionen des Verkehrssektors im Vergleich – 2050



Quelle: eigene Darstellung

### 2.3. Vergleichende Auswertung und Identifizierung robuster Strategien

In Tabelle 2–5 und Tabelle 2–6 sind die wesentlichen Kenngrößen der Szenarien in einer Übersicht dargestellt. Alle Szenarien basieren auf ähnlichen sozioökonomischen Rahmendaten (leichter Bevölkerungsrückgang, Wirtschaftswachstum). Sie leiten daraus für den Personenverkehr meist einen etwa konstanten bis leichten, weiteren Anstieg des Verkehrsaufwands ab und für den Güterverkehr einen überwiegend starken Zuwachs je nach hinterlegtem BIP-Wachstum (Ausnahme e-Mobil – R).

Dass der Endenergiebedarf bis 2030 und 2050 dennoch deutlich sinkt, ist auf die starken technologischen Effizienzsteigerungen zurückzuführen. Alle Szenarien (mit Ausnahme THGND) erreichen die Reduktionsziele des Energiekonzeptes bzw. überschreiten diese deutlich.

Neben den Effizienzsteigerungen der Fahrzeuge als Strategien zur Treibhausgasminderung werden in gewissem Umfang auch Verkehrsverlagerungen berücksichtigt. Das in den Studien angenommene Potenzial von Verkehrsverlagerungen fällt jedoch meist vergleichsweise niedrig aus. Deutliche Minderungen im MIV werden nur in eMobil – R und KS 95 berücksichtigt, nur in eMobil – R wird auch von einem deutlichen Rückgang in der gesamten Personenverkehrsnachfrage ausgegangen. Ähnliches ist für die Güterverkehrsnachfrage zu beobachten, die nur in den Szenarien eMobil 2050 und in den KSZ deutlich gedämpft wird. Eine Verlagerung auf den Schienengüterverkehr ist jedoch in den meisten Szenarien als Klimaschutzmaßnahme hinterlegt.

Deutliche Unterschiede zwischen den Szenarien sind bei der Zusammensetzung der Energieträger im Jahr 2050 zu beobachten. Setzen einige Klimaschutzszenarien noch stark auf den Einsatz biogener Kraftstoffe, so wird in anderen entweder noch eine stärkere direkte Elektrifizierung durch Oberleitungs-Lkw unterstellt oder aber der Einsatz strombasierter Kraftstoffe angenommen. Als Konsequenz steigt die Stromnachfrage des Verkehrssektors in allen Klimaschutzszenarien bis 2050 massiv an.

In den Trend- bzw. Referenzszenarien werden die CO<sub>2</sub>-Emissionen inklusive der internationalen Verkehre bis 2050 nur um rund 30 bis 40% reduziert, was deutlich macht, dass starke Anstrengungen zur Erreichung der Klimaschutzziele notwendig sind. In den betrachteten Szenarien zum Klimaschutz mit Zeithorizont 2050 werden dagegen CO<sub>2</sub>-Minderungen gegenüber 1990 in der Größenordnung von 68 bis 100% im Verkehrssektor erreicht.

Im KS 80 und im ERP – Ziel wird ein Gesamtziel über alle Sektoren von 80% erreicht, das sich im Verkehrssektor mit einer Minderung von 68% bzw. 72% (inkl. internationale Verkehre) bzw. 75% bis 80% bezogen auf den nationalen Verkehr niederschlägt.



**Tabelle 2-7: Vergleichende Übersicht der Veränderung der relevanten Indikatoren – 2030**

Studie	Verkehrsleistung PV 2010 bis 2030	Verkehrsleistung GV2010 bis 2030	Endenergiebedarf 2005 bis 2030	Anteil Strom direkt	Anteil stromba-sierte KS	Anteil biogene KS	CO <sub>2</sub> -Emissionen inkl. int. Luftverkehr 1990 bis 2030	CO <sub>2</sub> -Emissionen national 1990 bis 2030
VP 2030	10%	38%	-15%	7%	0%	11%	-14%	-25%
PB 2015 - MMS	10%	40%	-12%	6%	0%	8%	-5%	-19%
KSZ - AMS	1%	25%	-23%	6%	0%	10%	-16%	-31%
ERP Trend	1%	32%	-18%	5%	0%	10%	-18%	-27%
MD - Ref	-3%	43%	-16%	4%	0%	14%	-17%	-28%
KSZ 1R - KS90	-18%	34%	-35%	10%	0%	20%	-44%	-52%
KSZ - KS 80	-3%	35%	-33%	8%	0%	8%	-27%	-41%
KSZ - KS 95	-11%	30%	-38%	10%	0%	7%	-33%	-45%
eMobil - G	4%	16%	-24%	7%	0%	11%	-34%	-34%
eMobil - R	-12%	13%	-38%	7%	0%	12%	-48%	-48%
ERP Ziel	1%	32%	-27%	6%	0%	18%	-34%	-42%
LS 2011 - A	0%	46%	-29%	9%	4%	15%	-37%	-47%
MD - Inno	-4%	44%	-26%	5%	0%	40%	-46%	-58%
THGND	17%	51%	-12%	7%	35%	4%	-44%	-50%

Quelle: eigene Darstellung

**Tabelle 2-8: Vergleichende Übersicht der Veränderung der relevanten Indikatoren – 2050**

Studie	Verkehrslleistung PV 2010 bis 2050	Verkehrslleistung GV 2010 bis 2050	Endenergiebedarf 2005 bis 2050	Anteil Strom direkt	Anteil stromba-sierte KS	Anteil biogene KS	CO <sub>2</sub> -Emissionen inkl. int. Luftverkehr 1990 bis 2050	CO <sub>2</sub> -Emissionen national 1990 bis 2050
KSZ - AMS	2%	35%	-36%	12%	0%	9%	-29%	-47%
ERP Trend	-4%	51%	-31%	8%	0%	13%	-37%	-46%
MD - Ref	-10%	69%	-31%	9%	0%	21%	-39%	-50%
KSZ 1R - KS90	-20%	36%	-57%	28%	0%	41%	-83%	-87%
KSZ - KS 80	-2%	42%	-58%	34%	0%	13%	-68%	-80%
KSZ - KS 95	-9%	39%	-61%	47%	33%	13%	-94%	-98%
eMobil - G	2%	28%	-62%	61%	0%	5%	-87%	-87%
eMobil - R	-29%	-12%	-74%	43%	0%	12%	-89%	-89%
ERP Ziel	-4%	51%	-46%	15%	0%	40%	-72%	-76%
LS 2011 - A	-8%	50%	-47%	18%	20%	15%	-67%	-75%
MD - Inno	-12%	72%	-44%	15%	0%	74%	-82%	-96%
THGND	11%	88%	-28%	20%	80%	0%	-100%	-100%

Quelle: eigene Darstellung

Personenmobilität und Güterströme wachsen in der Philosophie der meisten Szenarien weiter an. Eine mögliche Begründung dafür ist, dass Veränderungen von Mobilitätsverhalten und Güterströmen modellseitig deutlich schwieriger abzubilden sind als der Austausch von Technologien und Kraftstoffen. Zudem scheint die Verkehrsnachfrage im Vergleich zur Effizienzsteigerungen von Fahrzeugen eine politisch wesentlich schwieriger zu beeinflussende Größe zu sein. Der freie Fluss von Personen und Gütern wird nach wie vor als Grundlage für Wirtschaftswachstum gesehen und soll deshalb nicht eingeschränkt werden. Letztlich sind dadurch alle Szenarien sehr stark abhängig von der Verfügbarkeit von alternativen Technologien sowie Kraftstoffen aus Biomasse oder erneuerbarem Strom. Mögliche Rebound-Effekte z.B. durch effizientere Fahrzeugtechnologien werden nicht in allen Studien umfassend berücksichtigt, denn die Verkehrsnachfrage wird teilweise als externe Rahmengröße behandelt.

Bei keinem der Szenarien werden die Wechselwirkungen zwischen Siedlungsstrukturen, Infrastruktur und Verkehrswachstum detailliert betrachtet und modelliert. Auch verkehrsrelevante Veränderungen von Raumstrukturen werden nicht unterstellt. Tatsächlich könnten Veränderungen von Siedlungsstrukturen wie die "Stadt der kurzen Wege" oder regionalere Wirtschaftskreisläufe bei gleicher Befriedigung der Mobilitätsbedürfnisse zu kürzeren Wegen und Transportweiten beitragen. Entsprechendes ist in den Szenarien eMobil – R und KS 95 in einem vereinfachten Ansatz

hinterlegt, was sich in einer vergleichsweise geringeren Verkehrsnachfrage widerspiegelt. Andererseits kann Straßenausbau zusätzlichen Verkehr erzeugen. Doch stellt die hohe Komplexität dieser Zusammenhänge für wissenschaftlich fundierte Aussagen eine sehr hohe Hürde dar, so dass eine Nichtbeachtung bzw. stark vereinfachte Betrachtung in den zitierten Studien nicht weiter verwunderlich ist. Das impliziert jedoch nicht zwangsläufig, dass es sich dabei nicht um robuste Strategien für den Klimaschutz handeln könnte.

Szenarien liefern Wenn-Dann-Aussagen. Allein von der Häufigkeit des Auftretens einer bestimmten Entwicklung bzw. Technologie in verschiedenen Szenarien kann a priori nicht darauf geschlossen werden, dass diese Entwicklung bzw. Technologie unbedingt notwendig oder sinnvoll ist zur Erreichung der Klimaschutzziele. Ein anschauliches Beispiel im Verkehrssektor ist der Einsatz von Biokraftstoffen. Dieser wurde bis vor einigen Jahren in vielen Szenarien übereinstimmend als wesentlicher Beitrag zur Reduktion der Treibhausgasemissionen des Verkehrs gehandelt. In aktuelleren Szenarien ist der Beitrag deutlich zurückgegangen.

Wenn „Robustheit“ von Strategien auch verstanden werden soll als Robustheit gegenüber unsicheren zukünftigen Entwicklungen (z.B. von Preisen oder Technologien), so ist eine Aussage über die Robustheit einer Strategie durch den Vergleich verschiedener Szenarien nur in begrenztem Maße möglich – nämlich genau in dem Maße, in dem die Szenarien tatsächlich die Bandbreite möglicher Unsicherheiten abbilden. Üblicherweise wird jedoch nur eine begrenzte Anzahl von Szenarien gerechnet und es werden eher selten Sensitivitätsanalysen gegenüber möglichen Unsicherheiten durchgeführt. Ein weiterer relevanter Faktor ist, dass die Szenarien natürlich nicht völlig unabhängig voneinander erstellt werden, sondern auf ähnliche Methodiken und Datenquellen zurückgreifen. Sie bilden somit den Stand des aktuellen Wissens ab. In älteren Szenarien wurde beispielsweise häufig davon ausgegangen, dass es keine Alternative zum klassischen Diesel-Lkw gibt. Aktuellere Szenarien untersuchen den Einsatz von Oberleitungs-Lkw oder (im Nah- und Regionalverkehr) batterieelektrischen Lkw.

Die Ableitung robuster Strategien auf der Basis vorliegender Szenarien gibt damit nur eine Momentaufnahme der derzeit denkbaren, möglichen technologischen und verhaltensbedingten Entwicklung wieder. Wesentlich ist es, die ganze Bandbreite von einzelnen Strategiebausteinen zu berücksichtigen, um damit mögliche Unsicherheiten bei den hinterlegten Entwicklungen abfedern zu können.

Gemeinsam ist allen Szenarien nur eine deutliche Effizienzsteigerung bei den Fahrzeugen, ein gewisser Anteil an Elektromobilität und mindestens eine leichte Verlagerung auf den Schienengüterverkehr.

Deutliche Unterschiede zeigen sich zum einen bei der Entwicklung der Verkehrsnachfrage für Personen und Güter und dem Modal Split im Personenverkehr. Zum anderen setzen die Szenarien auf unterschiedliche Technologien zur Erreichung der Klimaschutzziele: Biokraftstoffe, strombasierte Kraftstoffe und Oberleitungs-Lkw haben eine sehr unterschiedliche Bedeutung in den ausgewerteten Szenarien. Das zeigt die Unsicherheit, mit der heute bereits der Einsatz von möglicherweise zukünftig marktreifen Technologien vorausgesagt werden kann.

Werden auf Basis der vorliegenden Szenarien robuste Strategien im Sinne von Entwicklungen, die in den verschiedenen vorliegenden Klimaschuttszenarien mittel- bis langfristig übereinstimmend als notwendig angesehen werden, um die nationalen Klimaschutzziele zu erreichen, definiert, so ergeben sich folgende wesentliche Aspekte:

- Effizienzsteigerung bei Fahrzeugen, wofür sowohl angebots- als auch nachfrageseitige Instrumente benötigt werden,

- ein möglichst hoher Grad der direkten Stromnutzung aus erneuerbaren Energien bei allen dafür in Frage kommenden Verkehrsträgern,
- Stärkung des Schienengüterverkehrs.

Es zeigt sich aber auch in allen Szenarien übereinstimmend, dass diese Strategien alleine nicht ausreichen, um die Klimaschutzziele zu erreichen. Es müssen daher noch weitere Maßnahmenstränge verfolgt werden. Hier gibt es keine eindeutige Übereinstimmung zwischen den Szenarien, da diese zum Teil mit technologischen bzw. verhaltensbedingten Unsicherheiten behaftet sind, zum Teil aber auch als unattraktive Maßnahmen im politischen Raum eingeschätzt werden. Auch wenn einige Strategien nicht in allen Klimaschutzszenarien mit gleicher Intensität adressiert werden, sollten diese aber in gleichem Maße und stringent für einen angemessenen Beitrag des Verkehrssektors zum Klimaschutz verfolgt werden. Hierbei handelt es sich zum einen um verhaltensorientierte Strategien:

- Stärkung von Verkehrsmitteln mit geringem Energieverbrauch (öffentlicher Verkehr, Radverkehr, Schiene),
- zukunftsfähige Gestaltung der Verkehrsinfrastruktur, d.h. Fokus auf Erhalt statt verkehrsinduzierenden Neubau.

Durch solche Strategien kann sich ein zusätzlicher Beitrag zu Klimaschutz und Ressourcenschonung ergeben (z.B. bei Materialvorleistungen und Verkehrsinfrastruktur), welcher in der „klassischen“ Bilanzierungslogik jedoch nicht sichtbar wird.

Neben den genannten Strategien werden CO<sub>2</sub>-neutrale Kraftstoffe für die Verkehrsträger benötigt, bei denen technisch keine Alternativen zur Verfügung stehen. Für die Dekarbonisierung der Kraftstoffe werden derzeit zwei Pfade in den Szenarien verfolgt:

- Einsatz von biogenen Kraftstoffen, bei denen sich jedoch die Annahmen zu deren nachhaltiger und auch in der Vorkette CO<sub>2</sub>-freier Verfügbarkeit in den letzten Jahren deutlich reduziert haben und bei denen es Nutzungskonkurrenzen zu anderen Sektoren aufgrund des beschränkten Potenzials gibt.
- Einsatz strombasierter Kraftstoffe, bei denen zu berücksichtigen ist, dass entsprechende Nachhaltigkeitsstandards noch nicht definiert wurden und relevante Kostendegressionen für die Erzeugung auch von bisher noch nicht marktreifen Technologien abhängen.

### 3. Ableitung struktureller Entwicklungsschritte (transformative Pfade)

Für die zuvor identifizierten „robusten“ Strategien sind verschiedene strukturelle Entwicklungsschritte notwendig, die im Folgenden näher beschrieben werden.

#### 3.1. Effizienz Fahrzeuge

Wie die Szenarien übereinstimmend zeigen, ist die Effizienzsteigerung der Fahrzeuge eine wesentliche Strategie, die verfolgt werden muss. Diese kann man in die strukturellen Entwicklungsschritte Effizienzsteigerung der konventionellen Fahrzeuge und Einsatz effizienterer, alternativer Antriebe (v.a. Elektromobilität) unterteilen.

##### 3.1.1. Effizienzsteigerung

Die Effizienzsteigerung bei den konventionellen Antrieben entfaltet aufgrund deren bis 2030 absehbar hohen Anteilen an den Neuzulassungen kurz- und mittelfristig die größte Wirkung. Bei den verbrennungsmotorisch betriebenen Pkw werden in allen Klimaschutzszenarien Potenziale zur Minderung des Kraftstoffverbrauches von rund 50% bis 2050 gegenüber 2010 gesehen, solange sie nicht mit einem weiteren Ansteigen sondern tendenziell eher mit einer Abnahme der Leistung einhergehen. Bei den Lkw belaufen sich die Effizienzsteigerungspotenziale auf bis zu 40%.

Mit den Verordnungen zur Festsetzung für Emissionsnormen neu zugelassener Pkw und leichter Nutzfahrzeuge besteht bereits ein Instrument, um entsprechende Potenziale zu heben. Diese müssen ambitioniert weiterverfolgt werden.

CO<sub>2</sub>-Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen werden dagegen bisher nicht standardisiert erfasst und unterliegen keiner Regulierung. Es muss daher zunächst ein Verfahren zur Bestimmung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen entwickelt werden, welches die spezifischen Verbrauchsangaben aus der derzeitigen Motoren-Prüfstandsmessung mit einer praxisbezogenen CO<sub>2</sub>-Angabe in g/km verknüpft, die dann entsprechend über Emissionsstandards sukzessive reduziert werden kann. Für schwere Nutzfahrzeuge ist entsprechendes auf EU-Ebene in Arbeit.

Gleichzeitig muss aber auch sichergestellt werden, dass die im Typprüfzyklus ermittelten und über Regulierungen limitierten Emissionen den tatsächlichen Emissionen im realen Betrieb entsprechen. Dies kann für Pkw zum einen durch die Umstellung auf WLTP (World Light Duty Test Procedure) als Standardverfahren zur Emissionsermittlung erreicht werden. Bei der Umstellung der bestehenden Regulierung von NEDC (New European Driving Cycle) auf den WLTP muss bei Umrechnung der Zielwerte allerdings sichergestellt sein, dass bestehende Abweichungen zwischen Real- und Testzyklusemissionen nicht mit in den Umrechnungsfaktor eingebunden werden.

Die Vergangenheit hat aber auch gezeigt, dass zusätzliche Nachprüfungen unter Realbedingungen während der Nutzungsphase (Real Driving Emission (RDE)-Tests) verbunden mit entsprechenden Sanktionen bei Abweichungen notwendig sind, um die von der EU angestrebten Emissionsminderungen bei den Fahrzeugen tatsächlich zu erreichen.

Bei den übrigen Verkehrsträgern machen die betrachteten Szenarien keine konkreten Angaben zu weiteren Effizienzsteigerungspotenzialen, jedoch ist auch hier eine weitere Verbesserung möglich und nötig.

Zur Vermeidung von Rebound-Effekten sollte die Effizienzstrategie immer mit einer Anpassung der Nutzerkosten kombiniert werden, die dann wiederum auch eine Erhöhung der Auslastung der Fahrzeuge unterstützen.

### 3.1.2. Elektromobilität

Einig sind sich auch alle Szenarien, dass der energieeffizienteste Antrieb der Elektromotor ist, der damit eine Schlüsseltechnologie darstellt. Entsprechend wird eine hohe Marktdurchdringung von batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugen in den Klimaschutzszenarien hinterlegt. Der Markterfolg von elektrisch angetriebenen Straßenfahrzeugen bleibt jedoch in Deutschland – und auch in anderen wichtigen Automobilmärkten – gegenüber den ursprünglich formulierten Zielvorgaben bisher deutlich zurück.

Elektromobilität stellt im Verkehrssektor eine Innovation dar, die deutliche Veränderungen sowohl in der Herstellung (Angebot), bei den Fahrzeugkunden (Nachfrage) als auch bei der Gestaltung von politischen und infrastrukturellen Rahmenbedingungen erforderlich macht. Diese Veränderungen fallen bei rein batterieelektrischen Antrieben stärker ins Gewicht, als bei den Plug-In-Fahrzeugen.

Derzeit ist der CO<sub>2</sub>-Emissionsstandard auf Herstellerseite das wesentliche Instrument, welches die Einführung von elektrisch betriebenen Pkw befördern könnte. Unterstützt wird dies auf Nutzerseite durch die niedrigen Energiekosten pro Kilometer im Vergleich zu den konventionellen Kraftstoffen und die Kfz-Steuer-Befreiung. Hinzu kommt das Elektromobilitätsgesetz, was Kommunen ermächtigt, weitere Privilegien auf der lokalen Ebene zu gewähren (kostenfreies Parken, Aufhebung von Zufahrtsverboten, Nutzung von Busspuren). Es ist jedoch noch nicht absehbar, was dieses für eine Wirkung haben wird.

Angesichts der derzeitigen Nachfrageentwicklung nach Elektrofahrzeugen bedarf es zusätzlicher Instrumente, um rechtzeitig den Markthochlauf anzustoßen und die für ambitionierte Klimaschutzziele notwendigen elektrischen Fahrleistungsanteil (80-90% in 2050) zu erreichen. Bei der Diskussion und Ausgestaltung möglicher weiterer Instrumente ist zu unterscheiden zwischen regulatorischen Instrumenten (z.B. Quoten, Pkw-Emissionsstandards), ökonomischen Instrumenten (z.B. Steuern, Anschaffungsprämien bzw. Bonus-Malus-Regelungen, Dienstwagenbesteuerung) und infrastrukturellen Rahmenbedingungen (z.B. Ladeinfrastruktur, Einfahrverbote).

Der Preis von Elektrofahrzeugen liegt derzeit noch deutlich höher als bei ihrem verbrennungsmotorischen Pendant. Durch einen staatlichen Zuschuss könnte diese Hürde gemindert werden, wobei die Gegenfinanzierung jedoch Sektor-intern erfolgen sollte. Aus der Kategorie ökonomischer Instrumente wäre beispielsweise ein aufkommensneutrales Bonus-Malus-System entsprechend der CO<sub>2</sub>-Emissionen der Fahrzeuge möglich. Eine CO<sub>2</sub>-abhängige Umgestaltung der Dienstwagenbesteuerung könnte darüber hinaus noch einen weiteren Impuls für einen verstärkten Einsatz von Elektrofahrzeugen in diesem Bereich geben.<sup>5</sup>

Wesentlich ist, dass die Elektromobilität bereits vor 2020 in einen dynamischen Markthochlauf gebracht wird, um die notwendigen Anteile bis 2050 im Fahrzeugbestand zu erreichen. Entsprechend zügig sollten die notwendigen politischen Instrumente dafür umgesetzt werden.

Als Option für die Nutzung von Strom werden in einigen neueren Studien Oberleitungs-Lkw in Betracht gezogen. Neben einem Dieselaggregat können diese mit elektrischer Energie betrieben werden, die sie während der Fahrt über ein Oberleitungssystem beziehen. Bei diesen Fahrzeugen handelt es sich im Prinzip um Hybridfahrzeuge, sie können auch auf nicht elektrifizierten Strecken mit Flüssigkraftstoff betrieben werden. Zusätzlich könnten sie perspektivisch eine kleine Batterie für den emissionsfreien elektrischen Betrieb in Stadtgebieten oder auf kurzen Autobahnabschnitten

---

<sup>5</sup> Die Besteuerung von Dienstwagen ist derzeit pauschal abhängig vom Listenpreis, so dass bei der derzeit gültigen Dienstwagensteuerregelung ein Bonus-/Malus-System auf den Kaufpreis keinen Effekt auf die zu entrichtende Steuer hätte.

ohne Oberleitung besitzen. Für den Straßengüterfernverkehr ergibt sich aufgrund der benötigten Batteriekapazität, die mit hohen Kosten, einem hohen Zusatzgewicht und Platzbedarf einhergeht, aus heutiger Perspektive auch längerfristig keine praktikable, rein batterieelektrische Fahrzeugkonfiguration mit hohen Reichweiten. Rein batterieelektrische Lkw kommen daher in den Szenarien im Straßengüterfernverkehr nicht vor.

Um einen signifikanten Beitrag zum Klimaschutz bis 2050 gewährleisten zu können, müsste bereits deutlich vor 2030 entschieden werden, ob ein Technologiepfad Richtung Oberleitungs-Lkw tatsächlich verfolgt werden soll. Denn es muss frühzeitig diskutiert werden, wie ein nationaler und internationaler Infrastrukturausbaupfad (z.B. im Rahmen der TEN-Korridore) und eine internationale Standardisierung sinnvoll gestaltet werden können. Auch ist die Frage zu klären, wie ein Zusammenspiel zwischen Schienengüterverkehr und Oberleitungs-Lkw in einem multimodalen Verkehrssystem gestaltet werden kann. Die Rahmenbedingungen müssen so ausgestaltet werden, dass sich der weiterhin bestehende Effizienzvorteil der Bahn auch im Preis widerspiegelt.

## 3.2. Verkehrsnachfrage

Ein weiterer wesentlicher Schritt zur Minderung der Endenergienachfrage und damit der Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors ist eine Reduktion der motorisierten Verkehrsleistung und eine Verlagerung auf energieeffiziente Verkehrsmittel. Diese beiden Strategien haben starke Wechselwirkungen miteinander und werden daher im Folgenden hinsichtlich der notwendigen strukturellen Entwicklungsschritte gemeinsam, aber separat für den Personen- und Güterverkehr betrachtet.

### 3.2.1. Personenverkehr

Eine Reduktion der Endenergienachfrage durch eine Veränderung bei der Verkehrsnachfrage kann im Personenverkehr durch kürzere Wege (Stadt und Region der kurzen Wege) und einer Verlagerung auf den nichtmotorisierten Verkehr bzw. den ÖV erreicht werden. So ergeben verschiedene Klimaschutzszenarien einen Anteil des ÖV an der Verkehrsleistung von mindestens 20% im Jahr 2050 im Vergleich zu 15% heute. Entsprechende Reduktionen im MIV werden jedoch nur in Szenarien erreicht, bei denen mit einer Angebotsverbesserung gleichzeitig eine deutliche Erhöhung der Nutzerkosten des MIV einhergeht. Dies bietet sich vor allem in den Räumen an, in denen die Angebote des Umweltverbundes entsprechend zur Verfügung stehen (werden) und Nutzerkosten des MIV über Maßnahmen wie City-Maut oder Parkraumbewirtschaftung reguliert werden können.

Damit haben die Kommunen eine Schlüsselstellung für klimafreundliche Mobilität. Sie gestalten die Bedingungen für das Fahrradfahren, die ÖV-Nutzung, die Straßenraumgestaltung, die Nutzungsmischung und können damit vor Ort Alternativen zum eigenen Auto attraktiver machen. Entscheidende Maßnahmen können dabei auch die Einführung von Parkraummanagement bzw. die Reduzierung des öffentlichen Parkraums und das Konzept der emissionsfreien Innenstädte sein, um die anderen Verkehrsmittel gegenüber dem MIV besser zu stellen. Gleichzeitig profitieren die Kommunen durch entsprechende Maßnahmen von der Steigerung der Lebensqualität – weniger Schadstoffe und Lärm, mehr Lebens- statt Parkraum. Hinzu kommt, dass die Reurbanisierung auf Seiten der Kommunen einen zukünftig steigenden Handlungsdruck erzeugt. Es besteht ein Bedarf an immer mehr Fläche, die durch weniger MIV frei und anderweitig genutzt werden könnte, denn der Flächenbedarf beispielsweise des ÖPNV ist deutlich geringer. Gleichzeitig profitiert der Klimaschutz davon.

Der Fahrrad- und Fußverkehr muss durch einen deutlichen Ausbau der Radverkehrsinfrastruktur auf kommunaler, Landes- und Bundesebene weiter gefördert werden. Der zunehmende Radverkehr und auch die neuen Optionen durch Elektrofahrrad und Lastenräder spiegeln sich noch nicht in der Aufteilung des Straßenraums wider. Nicht nur aus Gründen des Klimaschutzes, sondern auch um Unfälle und Konflikte im Straßenverkehr zu vermeiden, ist eine Umverteilung des Straßenraums zugunsten des Fahrrads (Radfahrstreifen, Schutzstreifen) notwendig. Unterstützend wirkt hier eine weitere Überarbeitung der StVO, um die Rechte der Fußgänger und Fahrradfahrer zu stärken. Anpassungen sind beispielsweise hinsichtlich Vorfahrtsregelungen oder Gehwegnutzung notwendig.

Im Bereich des ÖPNV kann der Bund über eine Steigerung der zur Verfügung gestellten Regionalisierungsmittel unterstützen. Die Förderung über das Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz sollte mit Bindung für verkehrliche Zwecke fortgesetzt und eine Neuausrichtung mit klaren Umweltzielen wie bspw. der Umstellung auf Projekte mit ÖPNV-Vorrang vorgenommen werden.

Die Förderung von Carsharing ermöglicht es, dass langfristig mehr Menschen in Städten ihren eigenen Pkw abschaffen. Damit kann nicht nur Parkraum reduziert werden, sondern es ist davon auszugehen, dass sich damit das Verkehrsverhalten zu Gunsten von ÖV und nicht-motorisiertem Verkehr verschiebt. Auch wird in einigen Forschungsvorhaben diskutiert, inwieweit Carsharing die Funktionen der Daseinsvorsorge effizienter übernehmen kann als gering ausgelastete Verkehrsmittel des etablierten ÖPNV.

Gleichzeitig müssen die Rahmenbedingungen und Handlungsspielräume für Kommunen auf Bundesebene deutlich verbessert werden, zum einen auf der Ebene Finanzierung und personelle Ausstattung, zum anderen aber auch, was deren Entscheidungskompetenz bei z.B. bei Tempo 30, City-Maut, Förderung von Carsharing (z.B. Carsharing-Gesetz) oder der Parkraumbewirtschaftung angeht. Bußgelder für Falschparken sollten auf europäisches Niveau angehoben werden.

Entsprechende Maßnahmen müssen zügig umgesetzt werden, um langfristig die notwendige Wirkung zu erzielen. Denn es handelt sich zu einem großen Teil um infrastrukturelle und städtebauliche Konzepte, die ausreichend Zeit zur Umsetzung benötigen.

### **3.2.2. Güterverkehr**

Bis zum Jahr 2050 wird in fast allen Szenarien ein weiteres Wachstum des Güterverkehrsaufkommens angenommen. Durch eine Stärkung regionaler Wirtschaftskreisläufe kann die Transportleistung reduziert werden. Hierfür sind jedoch neben einer „ideellen“ Förderung (Zertifizierung der Umweltauswirkungen der Transporte bzw. der produktspezifischen Logistikprozesse) ein deutlicher Anstieg der Transportkosten bzw. finanzielle Anreize für regionale Produktions- und Versorgungsprozesse notwendig.

Einfacher und daher in allen Szenarien übereinstimmend als wesentliche Maßnahme im Güterverkehr hinterlegt, scheint eine Verlagerung des Transports von der Straße auf die Schiene. Der Anteil der Schiene beträgt in den „Klimaschutzszenarien 2050“ im Jahr 2050 sogar rund 40%. Um entsprechende Anteile zu erreichen, muss jedoch umgehend hinsichtlich der Ausschöpfung bestehender Kapazitätspotenziale, der Optimierung der Netzbewirtschaftung, dem gezielten Aus-/Neubau von Strecken zur Beseitigung von Engpässen und der Schaffung von Überholmöglichkeiten deutlich in die Schieneninfrastruktur investiert werden. Zusätzlich sollten Umschlagsanlagen, innovative Umschlagssysteme und der kombinierte Verkehr gefördert werden. Schlussendlich entscheidend ist jedoch auch das Verhältnis der Transportkosten Schiene zu Straßengüterverkehr.



### 3.2.3. Verkehrsinfrastruktur

Eine funktionierende Verkehrsinfrastruktur wird häufig als Grundpfeiler wirtschaftlicher Entwicklung verstanden. Andererseits geht der Neu- und Ausbau von Verkehrsinfrastruktur mit Flächenversiegelung, hohem Ressourcenbedarf und entsprechenden Treibhausgasemissionen einher und ist darüber hinaus mit hohen Kosten verbunden. Neben der direkten Umweltwirkung kann der Ausbau und Neubau von Verkehrsinfrastruktur auch zu mehr Verkehr führen (induzierter Verkehr), so dass nicht nur durch den Bau der Infrastruktur, sondern auch durch die Nutzung derselben zusätzliche Emissionen entstehen. Zwar gab es eine politische Fokusverschiebung vom Neu- und Ausbau zum Erhalt. Dennoch wird trotz der bestehenden Ziele zum Klimaschutz, zum Ressourcenschutz und zur Begrenzung der Flächeninanspruchnahme die Straßeninfrastruktur weiter ausgebaut.

Eine zukunftsfähige Verkehrsinfrastrukturgestaltung sollte im Sinne der Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen beitragen und nachhaltige, ressourcenschonende und bedürfnisgerechte Mobilität von Personen und Gütern ermöglichen. Dies bedarf einer Neustrukturierung der Verkehrsinfrastrukturplanung in der Bundesverkehrswegeplanung (BVWP) mit dem übergeordneten Ziel der Verkehrsvermeidung.

## 3.3. Dekarbonisierung Kraftstoffe

CO<sub>2</sub>-freie Kraftstoffe werden für die Verkehrsträger benötigt, bei denen technisch keine Alternativen zur Verfügung stehen. Hierzu zählen vor allem der Luft- und Seeverkehr, und in manchen Klimaschutzszenarien der Güterverkehr. Für die Strategie „Dekarbonisierung der Kraftstoffe“ wird derzeit in den Szenarien der Einsatz von biogenen und von strombasierten Kraftstoffen verfolgt.

### 3.3.1. Biokraftstoffe

In Deutschland kamen im Jahr 2012 121 PJ Biokraftstoffe zum Einsatz (5,2% des Kraftstoffverbrauchs). Die derzeit überwiegend verwendeten Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse („1. Generation“) stehen in den letzten Jahren verstärkt in der Kritik. Wesentlicher Kritikpunkt an Biokraftstoffen ist die Konkurrenz mit dem Anbau von Nahrungs- und Futtermitteln um begrenzt verfügbare Flächen und die aus diesem Zusammenhang resultierenden indirekte Landnutzungsänderungen. Berücksichtigt man indirekte Landnutzungsänderungen (iLUC), so kann die Treibhausgasemissionsbilanz einzelner Kraftstoffe schlechter ausfallen als die der fossilen Referenz. Es besteht weitestgehend wissenschaftlicher und politischer Konsens über die Existenz des iLUC-Effektes und über dessen Relevanz für die Gesamtklimabilanz von Biokraftstoffen, auch wenn die genaue Höhe durchaus umstritten ist. Darüber hinaus gibt es weitere Bedenken gegenüber Biokraftstoffen der 1. Generation auf Grund ungünstiger Ökobilanzen sowie der Verletzung sozialer Nachhaltigkeitskriterien. Der EU-Energieministerrat einigte sich im Juni 2014 darauf, den Anteil der auf das 10%-Ziel anrechenbaren Kraftstoffe auf Basis landbasierter Biomasse auf 7% zu begrenzen.

Als Alternative zu Biokraftstoffen der 1. Generation werden zunehmend Biokraftstoffe aus Abfall- und Reststoffen genannt, welche auch derzeit bereits in begrenztem Maße genutzt werden (vor allem Diesel aus Altspeiseöl). Ihr Potenzial ist jedoch begrenzt bzw. sie werden bereits häufig auf etablierten Verwertungswegen genutzt.

Die Annahmen zur Verfügbarkeit von nachhaltigen biogenen Kraftstoffen in den Szenarien haben sich dementsprechend in den letzten Jahren deutlich reduziert. Zusätzlich bestehen Nutzungskonkurrenzen zu anderen Sektoren aufgrund des beschränkten Potenzials.

Insgesamt sollte ein langsames, kontrolliertes Phase-Out aus der Nutzung landbasierter Biokraftstoffe im Verkehr angestrebt werden. Es ist ferner zu vermeiden, dass landbasierte Biokraftstoffe

mit ungünstiger CO<sub>2</sub>-Bilanz in den Luftverkehr „umgelenkt“ werden, wo es keine Regulierung der Vorkettenemissionen gibt.<sup>6</sup>

### 3.3.2. Strombasierte Kraftstoffe

Strombasierte gasförmige und flüssige Energieträger bieten die Möglichkeit, über Elektrolyse Strom indirekt als Wasserstoff oder in Form von Kohlenwasserstoffen für den Verkehrssektor nutzbar zu machen. Diese Form der Bereitstellung von Energie für den Verkehrssektor kommt als mögliche Klimaschutzmaßnahme nur dann in Frage, wenn der genutzte Strom erneuerbar produziert wurde und der Energieträger somit eine geringe Treibhausgasintensität besitzt.

Zudem lässt sich mit der Produktion dieser strombasierten Energieträger die zeitliche Verfügbarkeit von (erneuerbarem) Strom von dem Zeitpunkt der Nutzung der Energie entkoppeln, wenn die Elektrolyseure flexibel einsetzbar sind (geringe Flexibilität der Hochtemperaturelektrolyse). Aus Sicht des Stromerzeugungssektors kann dieser Prozess dann als Energiespeicher verstanden werden.

Durch die Umwandlungsschritte von Strom über H<sub>2</sub> in strombasierte Kraftstoffe und die Bereitstellung von CO<sub>2</sub> stehen je nach Prozesspfad noch 40% bis 60% der ursprünglichen Strommenge als Flüssigkraftstoff (PtL) zur Verfügung. Da der Elektromotor je nach Anwendungsfall etwa um den Faktor 2,5 effizienter ist als der Verbrennungsmotor, wird daher für die Kombination „Verbrennungsmotor + PtL“ ca. vier bis fünf Mal so viel Strom benötigt wie für die direkte Stromnutzung im Elektromotor. Zu berücksichtigen ist auch, dass für die Produktion strombasierter Kraftstoffe CO<sub>2</sub> gebraucht wird, das aus erneuerbaren Kohlenstoffquellen bereitgestellt werden muss, wenn der Kraftstoff CO<sub>2</sub>-neutral sein soll. Hierfür in Frage kommen (begrenzt verfügbarer) biogener Kohlenstoff oder energieaufwendig zu gewinnender Kohlenstoff aus der Luft.

Der zusätzliche Strombedarf durch den Einsatz strombasierter Kraftstoffe ist erheblich und liegt in den betrachteten Klimaschutzenszenarien zwischen 240 und 1.300 PJ (67 und 361 TWh). Hinzu kommt der Strombedarf durch die direkte Nutzung von Elektrofahrzeugen. Hier besteht eine systemische Querverbindungen zum Stromsektor. Wesentlich ist nämlich, dass entsprechende Strommengen bei den Ausbaupfaden der Erneuerbaren Energien im Stromsektor frühzeitig mitgedacht werden. Auch wenn zukünftig strombasierte Kraftstoffe im Ausland hergestellt und dann importiert werden, so muss allein durch die Elektromobilität je nach verfolgtem Technologiepfad (mit oder ohne Oberleitungs-Lkw) eine (inländisch produzierte) Strommenge von 200 bis über 400 PJ (56 bis über 111 TWh) im Jahr 2050 für den Verkehrssektor bereitgestellt werden.

Durch die hohen Wirkungsgradverluste und die notwendigen Anlagen werden die Kosten der stromgenerierten Kraftstoffe deutlich über denen des fossilen Pendanten liegen. Ein breiter Markteintritt allein unter ökonomischen Gesichtspunkten ist sehr unwahrscheinlich, solange externe Kosten wie beispielsweise der CO<sub>2</sub>-Ausstoß nicht ausreichend im Preis berücksichtigt sind.

Auch müssen Fehlallokationen der zunächst begrenzten Mengen an EE-Strom vermieden werden. Ein Beispiel: Bisher werden die meisten Flüssigkraftstoffe in klassischen Mineralölraffinerien hergestellt, in denen ein Bedarf für Wasserstoff bei der Entschwefelung und in Hydrocrackern besteht. Wenn Wasserstoff aus erneuerbarem Strom hergestellt wird, ist es effizienter ihn direkt stofflich in der Raffinerie zu nutzen als ihn in einen Flüssigkraftstoff umzuwandeln, was zu den genannten, hohen Umwandlungsverlusten führt. Es ist also zunächst nicht sinnvoll, mit elektrischem Strom und

---

<sup>6</sup> Für Biokraftstoffe müssen im EU-ETS keine Zertifikate abgegeben werden, so dass dadurch bei steigenden Zertifikatspreisen und funktionierendem Emissionshandel ein ökonomischer Anreiz für den Einsatz von Biokraftstoffen geschaffen werden könnte.

CO<sub>2</sub> mit hohem Energieaufwand „reine“ synthetische Kraftstoffe herzustellen. Vielmehr sollte der erneuerbare Wasserstoff zunächst „beigemischt“ werden, indem man den in der Raffinerie benötigten Wasserstoff durch Elektrolyse deckt, um so die höchstmögliche Effizienz für den Klimaschutz zu erzielen. Aus sektoraler Perspektive fällt diese Minderung dann jedoch nicht im Verkehrssektor, sondern im Umwandlungssektor an.

Der breite Einsatz stromgenerierter Kraftstoffe ist wegen der sehr hohen Kosten und der Verfügbarkeit bzw. effizienten Allokation von EE-Strom damit erst nach 2030 sinnvoll. Auch müssen - gerade auch mit der Perspektive des Imports entsprechender Kraftstoffe - frühzeitig Nachhaltigkeitskriterien für strombasierte Kraftstoffe entwickelt werden, denn alleine dass diese auf der Basis von EE-Strom erzeugt werden, garantiert noch nicht ihre Nachhaltigkeit z.B. hinsichtlich des Bezugs von Wasser für die Elektrolyse.

### 3.4. Internationale Verkehre

Die Einbeziehung des internationalen Luftverkehrs in den Klimaschutzplan gestaltet sich schwierig, da dessen Entwicklung und die relevanten Maßnahmen sehr stark von internationalen Verhandlungen abhängen. Grundsätzlich werden die Emissionen des internationalen Luftverkehrs nicht dem nationalen Treibhausgasinventar zugerechnet, sondern nur (basierend auf dem Kerosinabsatz in Deutschland) nachrichtlich mitgeteilt. Es ist aber zu berücksichtigen, dass die besonders starke Klimarelevanz pro Kopf und Reise kombiniert mit starken Wachstumsraten den Luftverkehr zu einem wesentlichen Handlungsfeld für den Klimaschutz im Verkehrssektor machen.

Hinzu kommt, dass neben CO<sub>2</sub> auch andere Emissionen wie Stickoxide, Wasserdampf, Schwefeloxide, Ruß, Kondensstreifen und Zirren in hohen Luftschichten zur Klimawirkung des Luftverkehrs beitragen und entsprechend berücksichtigt werden müssten. Diese können mit dem Emission Weighting Factor (EWF) beschrieben werden, bei dem die entstehenden CO<sub>2</sub>- und nicht CO<sub>2</sub>-Effekte aus der Verbrennung der Kraftstoffe in großer Höhe mit dem CO<sub>2</sub>-Effekt am Boden verglichen werden. Der EWF wird in der Literatur mit dem Faktor 1,2 bis 2,7 angegeben. Das bedeutet, dass die tatsächliche Klimawirkung des Luftverkehrs deutlich höher ist, als wenn nur die Klimawirkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen betrachtet werden würde. Auch wenn CO<sub>2</sub>-freie Kraftstoffe eingesetzt werden, bleibt dieser Klimateffekt bestehen, so dass das wichtigste Ziel im Luftverkehr sein sollte, den Endenergiebedarf durch Effizienzsteigerung und einem Dämpfen des Verkehrswachstums möglichst gering zu halten.

Wesentlichste Instrumente hierfür sind der Subventionsabbau und die Einführung eines internationalen marktbasierenden Mechanismus zur Reduktion der Treibhausgaswirkungen des Luftverkehrs. Dieser muss die gesamte Klimawirksamkeit des Luftverkehrs berücksichtigen, um effektiv zu sein, d.h. auch beim Einsatz von Biokraftstoffen oder stromgenerierten Kraftstoffen müssen dann Zertifikate bzw. Offsets für die Klimawirkung geleistet werden. Bestehende preispolitische Instrumente im Luftverkehr sind derzeit der Emissionshandel (ETS) und die Luftverkehrsteuer. Das ETS wird bis Ende 2016 nur die Flüge berücksichtigen, die zwischen Flughäfen innerhalb der EU stattfinden, interkontinentale Flüge werden damit komplett ausgenommen, zudem ist die Relevanz des ETS derzeit gering. Auch führt die Deckelung der Belastung der deutschen Luftverkehrswirtschaft aus Emissionshandel und Luftverkehrsteuer zusätzlich dazu, dass die reale Steuerbelastung pro Ticket im Laufe der Zeit zurückgeht. Hierzu trägt einerseits der Anstieg des Verkehrsaufkommens bei, was dazu führt, dass die Belastung pro Passagier zurückgeht. Andererseits handelt es sich bei der Luftverkehrsteuer um absolute Steuersätze, so dass allein durch Inflation die reale Belastung je gekauftem Ticket zurückgeht, wenn keine entsprechenden Anpassungen vorgenommen werden.

Es sind sowohl nationale Maßnahmen als auch internationale Maßnahmen notwendig. Wichtige kurzfristige nationale Maßnahmen sind der Abbau der Flughafensubventionen (z.B. Beschränkung der bundesweiten Investitionen auf wirtschaftlich tragfähige Flughäfen), die Weiterentwicklung der Luftverkehrsteuer mit langfristig steigenden Steuertarifen und die Abschaffung der politischen Deckelung der Einnahmen aus Luftverkehrsteuer und EU-Emissionshandel auf eine Mrd. Euro pro Jahr. Mittelfristige internationale Maßnahmen sind die Einbindung des Luftverkehrs inklusive der internationalen Flüge in den EU-Emissionshandel mit Verschärfung der Reduktionsziele und Berücksichtigung der vollständigen Klimawirksamkeit sowie eine - daran anknüpfende - Einführung eines internationalen marktbasierten Mechanismus zur Reduktion der Treibhausgaswirkungen des Luftverkehrs auf ICAO-Ebene.

## 4. Handlungsbedarf bis zum Jahr 2030

### 4.1. Sektorziele

Wie alle Klimaschutzszenarien übereinstimmend gezeigt haben, ist das Energieziel der Bundesregierung mit einer Minderung von 10% in 2020 und 40% in 2050 gegenüber 2005 im Verkehrssektor nicht ausreichend, um das Klimaschutzziel einer 95%igen Minderung zu erreichen. Die Auswertung der Szenarien macht ebenfalls deutlich, dass eine deutliche Minderung des Endenergiebedarfs des Verkehrssektors durch Effizienzsteigerung bei den Fahrzeugen und durch die Vermeidung von Verkehren bzw. die Verlagerung auf effiziente Verkehrsträger notwendig ist.

Bis 2030 ist die Reduktion des Endenergiebedarfs des Verkehrssektors die zentrale Strategie zur CO<sub>2</sub>-Minderung in diesem Sektor. Denn zum einen ist das Potenzial nachhaltiger Biomasse begrenzt. Zum anderen können aufgrund möglicher Fehlallokationen hinsichtlich des auch bis über 2030 hinaus begrenzt zur Verfügung stehenden EE-Stroms und des hohen Bedarfes an erneuerbaren Energieträgern erst mittelfristig nach 2030 strombasierte Kraftstoffe in relevanten Mengen nachhaltig produziert werden. Wesentlicher Schritt sollte damit zunächst die Festlegung ambitionierter Endenergiereduktionsziele im Verkehrssektor sein, die über die im Energiekonzept aufgezeigten Ziele hinausgehen.

Auf EU-Ebene wird voraussichtlich für die Non-ETS-Sektoren in Deutschland ein Minderungsziel von 38-40% bis 2030 gegenüber 2005 (entspricht im Verkehrssektor in etwa 1990) gesetzt. Damit dieses Minderungsziel ohne Fehlallokationen des zunächst begrenzt zur Verfügung stehenden EE-Stroms und einer den Nachhaltigkeitszielen entsprechenden Menge an Biokraftstoffen erreicht werden kann, ist im Jahr 2030 ein besonders anspruchsvolles Minderungsziel für den Endenergieverbrauch des Verkehrssektors notwendig.

Die Auswertung der verschiedenen Klimaschutzszenarien hat gezeigt, dass, um auch den Pfad einer 95%igen Minderung nicht auszuschließen und bereits in 2030 40% Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen ohne Fehlallokationen zu erreichen, die Endenergieziele für den nationalen Verkehr für 2030 bei -35%, für 2040 bei -50% liegen und in 2050 von -40% auf -60% abgesenkt werden sollten.

Diese Endenergieziele können dann in einem zweiten Schritt mit einem Sektorziel zur CO<sub>2</sub>-Minderung kombiniert werden. Auch auf Basis der betrachteten Szenarien lassen sich Minderungen von rund 40% bis 2030 - hier gegenüber 1990, was aber nur einen geringen Unterschied zu 2005 macht - ableiten.

Wichtig ist zu beachten: Die CO<sub>2</sub>-Minderung bezieht sich auf die direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen ohne Vorketten der Kraftstoffe und des eingesetzten Stroms. Das bedeutet, dass die über die Reduktion des Endenergiebedarfs hinausgehende CO<sub>2</sub>-Minderung bis 2030 in hohem Maße vom Anteil der eingesetzten Biokraftstoffe determiniert wird und daher in Szenarien mit vergleichsweise hohem Biokraftstoffanteil auch hohe Minderungen erzielt werden. Wenn der Einsatz von Biokraftstoffen aber aus guten Gründen begrenzt wird, dann bedeutet das, dass die prozentualen Vorgaben für CO<sub>2</sub>-Ziel und Endenergieziel nah beieinander liegen müssen. Unter der Voraussetzung einer begrenzten Verfügbarkeit alternativer Kraftstoffe sollten (als Faustregel) das Endenergieziel und das CO<sub>2</sub>-Ziel im Verkehrssektor im Jahr 2030 maximal 5%-Punkte auseinander liegen. Der Stromanteil im Verkehr (Schiene) liegt heute bei etwa 2%. Bei einem erfolgreichen Markthochlauf der Elektromobilität (6 Mio. Fahrzeuge) und einer weiteren Verlagerung auf den Schienenverkehr könnte der Anteil des Stroms im Verkehrssektor im Jahr 2030 bei etwa 6-7% liegen. Bei einer Reduktion des

Endenergiebedarfs von 35% wären dann jedoch immer noch ca. 6-7% - im Sinne der Inventarlogik - CO<sub>2</sub>-freie Kraftstoffe notwendig, um eine CO<sub>2</sub>-Minderung von 40% zu erreichen.

Im Jahr 2040 sollte das CO<sub>2</sub>-Minderungsziel dann stärker als das Endenergieziel reduziert und auf 75% für den nationalen Verkehr festgelegt werden. Für 2050 ist im Verkehrssektor eine Reduktion um 97% gegenüber 1990 für ein Gesamtziel von 95% notwendig.

Die kombinierte Festlegung von Energieverbrauchszielwerten und darauf aufbauenden Treibhausgasminderungszielen verspricht folgende Roadmap: Die Treibhausgasminderung wird in den nächsten 20 Jahren vorrangig über anspruchsvolle Energieziele, im darauf folgenden Zeitraum bis 2050 durch anspruchsvolle Treibhausgasminderungsziele verfolgt. So können die - begrenzt - verfügbaren nachhaltigen und CO<sub>2</sub>-freien Energieträger zunächst in den Sektoren zum Einsatz kommen, wo sie in den nächsten Jahren am effizientesten eingesetzt werden bzw. höhere Treibhausgasminderungen erzielen können, so dass Fehlallokationen vermieden werden.

Die Einbeziehung des internationalen Luftverkehrs in die Sektorziele gestaltet sich schwierig, da viele relevante Maßnahmen sehr stark von internationalen Verhandlungen abhängen. Grundsätzlich sollte aber die gleiche Strategie wie für den nationalen Verkehr verfolgt werden: Zunächst Fokus auf der Minderung (oder zumindest deutlichen Dämpfung des Anstiegs) des Endenergiebedarfs, dann nach 2030 als zusätzliche Zielstellung die Minderung der Treibhausgasemissionen. Die Minderung des Endenergiebedarfs im Luftverkehr ist noch bedeutungsvoller, da die nicht CO<sub>2</sub>-Effekte nicht bzw. nur minimal mit CO<sub>2</sub>-freien Kraftstoffen reduziert werden können (siehe auch Kapitel 3.4). Mit einbezogen werden muss bei einem Treibhausgasminderungsziel daher auch die Klimawirksamkeit des Luftverkehrs und damit der EWF.

Weiterhin wäre es eine Möglichkeit, auf Bundesebene zusätzliche (Sub-)Ziele für die Verlagerung auf umweltfreundliche Verkehrsträger zu etablieren. Jedoch ist zu bedenken, dass gerade im Personenverkehr entsprechende Ziele zum Teil zielführender auf kommunaler Ebene anzusiedeln sind. Diese müssen dann jedoch flexibel gestaltet werden, da die Kommunen unterschiedliche Möglichkeiten und Ausgangspositionen mitbringen. Die Kommunen könnten und sollten jedoch durch entsprechende Rahmenbedingungen (s.u.) unterstützt werden, sich Ziele und Strategien zur Verlagerung auf umweltfreundliche Verkehrsträger zu setzen und diese konsequent zu verfolgen.

Für den Radverkehr ist im nationalen Radverkehrsplan das Ziel verankert, den Radverkehrsanteil an den Wegen bis 2020 auf 15% zu erhöhen. Dieses Ziel könnte mit entsprechenden Maßnahmen hinterlegt für 2030 auf 20% fortgeschrieben werden.

Ein Anteil des ÖV von 18% an der Verkehrsleistung scheint auf Basis der Auswertungen der Klimaschutzszenarien bis 2030 als eine mögliche Zielgröße und entspricht einer Steigerung des ÖV-Anteils um rund 10%.

Im Güterverkehr lag der Anteil der Schiene 2010 bei knapp 18%. Dieser steigt in den Klimaschutzszenarien auf 20 bis 35%. In der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie existiert bereits das Ziel 25% im Jahr 2015, was als verfehlt gewertet werden kann. Um den Reduktionspfad von 95% (und auch 80%) zu ermöglichen, sollte die Verlagerungsstrategie jedoch weiterverfolgt und bis 2030 ein Anteil der Schiene an der Güterverkehrsleistung von 30% angestrebt werden.

Das Beispiel der Ziele in der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie zeigt jedoch auch, dass eine koordinierte Strategie sowie konkrete Instrumente zur Verlagerung auf umweltfreundliche Verkehrsträger essentiell sind, da sonst Modal-Split-Ziele nicht erreicht werden können.

## 4.2. Maßnahmen zur Umsetzung struktureller Entwicklungsschritte

Es ergeben sich damit die in der folgenden Tabelle dargestellten Ziele für den Verkehrssektor. Wesentlich sind die Ziele 2030 bis 2050 für den Endenergiebedarf und darauf aufbauend die CO<sub>2</sub>-Minderungsziele. Es ist zwingend darauf zu achten, dass entsprechend anspruchsvolle CO<sub>2</sub>-Minderungsziele immer mit ebenfalls sehr ambitionierten Endenergieverbrauchszielen zu kombinieren sind, da es sonst zu Fehlallokationen bezüglich des bis auch über 2030 hinaus begrenzt zur Verfügung stehenden EE-Stroms und nicht nachhaltigen Anreizen zum Einsatz von Biomasse kommen kann.

**Tabelle 4-1: Endenergiebedarfs- und Treibhausgasminderungsziele für den Verkehrssektor**

	2030	2040	2050
Sektorziel Endenergiebedarf (nationale Verkehre) ggü. 2005	-35%	-50%	-60%
Sektorziel CO <sub>2</sub> -Minderung (nationale Verkehre) ggü. 1990	-40%	-75%	-97%

Die zuvor definierten Ziele müssen dann in eine Gesamtstrategie eingebettet werden und mit konkreten Maßnahmen und Instrumenten hinterlegt werden. Wesentlich ist es, hier zielgerichtet, möglichst konkret und systematisch vorzugehen. In der Tabelle 4-2 ist aufgeführt, welche Instrumente zur Umsetzung der identifizierten Entwicklungsschritte bis spätestens 2030 umgesetzt werden sollten und welche Synergien zu anderen Instrumenten und Akteuren bestehen.

**Tabelle 4-2: Maßnahmen zur Umsetzung der strukturellen Entwicklungsschritte im Verkehrssektor**

Struktureller Entwicklungsschritt	Bis 2030 notwendige Maßnahmen	Synergien
Effizienz Pkw	Fortschreibung Pkw-Grenzwerte auf 60 g/km in 2030	Förderung Elektromobilität
	Einführung WLTP (World Light Duty Test Procedure), mit einer Anpassung des Grenzwertes von 95 auf maximal 100 g CO <sub>2</sub> /km	
	Einführung eines Real Driving Emission (RDE)-Testverfahrens und wirksamen Sanktionen bei Abweichungen	Verbraucherschutz
	Kombination von Emissionsstandards mit Kraftstoffpreiserhöhung entsprechend VP 2030: Anhebung des Mineralölsteuersatzes um (real) 2,3% p.a. Alternativ Einführung einer fahrleistungs-basierten Pkw-Maut	Kompensation der Steuermindereinnahmen durch die Effizienzsteigerung und Vermeidung Rebound-Effekt
	Aufkommensneutrales Bonus-Malus-System, d.h. Kaufprämie für besonders effiziente Pkw und gleichzeitig Malus für Pkw mit hohen CO <sub>2</sub> -Emissionen, Übertragung auf Dienstwagenbesteuerung	Unterstützung Einhaltung Pkw-CO <sub>2</sub> -Emissionsstandards

Effizienz Lkw	Einführung eines Testverfahrens und Setzung von Emissionsstandards 2030 mit Minderungen von 25% ggü. 2010	
	Pilotvorhaben Oberleitungs-Lkw bis 2020 Abstimmungen bezügl. internationalem Infrastrukturausbau und Standardisierung	
Klimafreundlicher Verkehr in Städten und Kommunen	<ul style="list-style-type: none"> <li>Erhöhung der Entscheidungskompetenz von Kommunen zu Tempo 30, City-Maut, Förderung von Carsharing, Parkraumbewirtschaftung, Überarbeitung Bußgeldkatalog</li> <li>Überarbeitung der StVO; Umverteilung Straßenraum zugunsten von Rad- und Fußverkehr</li> <li>Leitkonzept „Stadt der kurzen Wege“: stärkere Integration der Verkehrs- und Siedlungsplanung, durch Änderung der Baunutzungsverordnung stärkere Nutzungsmischung von Wohnen, Arbeiten und Einkaufen</li> <li>Zusätzliche finanzielle Mittel zur Förderung des ÖV mit verkehrlicher Zweckbindung sowie die Umstellung auf erfolgswirksame Projekte mit ÖPNV-Vorrang</li> <li>Zusätzliche finanzielle Mittel für die Kommunen zur Förderung Radverkehr: pro Kopf 2020 25 Euro p.a. für den Fahrradverkehr (Infrastrukturausbau, Anpassung für Elektrofahrräder etc.)</li> </ul>	Kommunen: Verbesserung der Lebensqualität, Einhaltung Immissionsgrenzwerte, Zusammenarbeit mit Stadt- und Siedlungsplanung
	Erarbeitung Umsetzungsplan „Emissionsfreie Innenstadtbereiche“, sukzessive Umsetzung ab 2030	
Reduktion Transportaufkommen Güterverkehr	<ul style="list-style-type: none"> <li>Einführung einer verpflichtenden Kennzeichnung von Produkten entsprechend der CO<sub>2</sub>-Emissionen des Transportes zur Bewusstseinsbildung</li> <li>Finanzielle Anreize für regionale Produktions- und Versorgungsprozesse: Wirtschaftsförderung mit Verkehrsauswirkungsprüfung</li> </ul>	
Bundesmobilitätsplan	Neustrukturierung der Verkehrsinfrastrukturplanung in der Bundesverkehrswegeplanung, statt Fokussierung auf Beschleunigung Umgestaltung zu einem „Bundesmobilitätsplan“ mit sozialen und ökologischen Zielen (Klimaschutz, Mobilität ermöglichen ohne Verkehrswachstum)	
Verlagerung Güterverkehr auf die Schiene	<ul style="list-style-type: none"> <li>Investitionsprogramm für die Schieneninfrastruktur bis 2030 in Höhe von zusätzlich 11 Mrd. Euro: Ausschöpfung bestehender Kapazitätspotenziale, Optimierung Netzbewirtschaftung, gezielter Aus-/Neubau von Strecken zur Beseitigung von Engpässen und Schaffung von Überholmöglichkeiten</li> <li>Förderung von Umschlagsanlagen, innovativen Umschlagssystemen und des kombinierten Verkehrs (Verdopplung der Fördermittel bis 2020)</li> </ul>	
	Schrittweise Anhebung der Lkw-Maut bis zur vollen Internalisierung der externen Kosten	
Biokraftstoffe	Langsames Phase-Out aus landbasierten Biokraftstoffen	
Strombasierte Kraftstoffe	Festlegung von international abgestimmten Nachhaltigkeitskriterien für strombasierte Kraftstoffe	



<p><b>Internationaler Luft- und Seeverkehr</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Beschränkung der bundesweiten Investitionen auf wirtschaftlich tragfähige Flughäfen</li> <li>• Weiterentwicklung der Luftverkehrsteuer mit steigenden Steuertarifen (z.B. Dynamisierung mit 2% p.a. zum Inflationsausgleich)</li> <li>• Abschaffung der Deckelung der Einnahmen aus Luftverkehrsteuer und EU-Emissionshandel</li> <li>• Einbindung des Luftverkehrs ab 2017 wieder inklusive der internationalen Flüge in den EU-Emissionshandel mit Verschärfung der Reduktionsziele und Berücksichtigung der vollständigen Klimawirksamkeit sowie einer daran anknüpfenden Einführung eines internationalen marktbasiereten Mechanismus zur Reduktion der Treibhausgaswirkungen des Luftverkehrs auf ICAO-Ebene</li> <li>• Monitoring der Emissionen des Seeverkehrs ab 2020</li> <li>• Einführung marktbasierter Mechanismen für den Seeverkehr entsprechend denen des Luftverkehrs</li> </ul>	
--	--	--

## Literaturverzeichnis

- BMVI 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, Studie im Auftrag des BMVI, Berlin, März 2015
- BMW i 2015 Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr, Fraunhofer IWES, Fraunhofer IBP, ifeu, Stiftung Umweltenergierecht, im Auftrag des BMW i, Abschlussworkshop, [http://www.energiesystemtechnik.iwes.fraunhofer.de/de/presse-infothek/Presse-Medien/Pressemitteilungen/2015/strom\\_verkehr.html](http://www.energiesystemtechnik.iwes.fraunhofer.de/de/presse-infothek/Presse-Medien/Pressemitteilungen/2015/strom_verkehr.html) (zuletzt abgerufen: 17.09.2015)
- eMobil eMobil 2050. Szenarien zum möglichen Beitrag des elektrischen Verkehrs zum langfristigen Klimaschutz, Öko-Institut, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Berlin 2014.
- ERP Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose, Projekt Nr. 57/12, ewi, gws, prognos, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, Basel/Köln/Osnabrück 2014
- Holzhey, M., 2010. Schienennetz 2025/2030. Online verfügbar unter: <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4005.pdf> (zuletzt aufgerufen am 20.08.2015).
- Holzhey, M., Naumann, R., Berschin, F., Kühl, I., & Petersen, T., 2012. Schienengüterverkehr 2050 – Szenarien für einen nachhaltigen Güterverkehr. Online verfügbar unter: [http://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/03\\_Materialien/2012\\_2016/2013\\_MzU\\_45\\_Schienengueterverkehr2050.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/03_Materialien/2012_2016/2013_MzU_45_Schienengueterverkehr2050.pdf?__blob=publicationFile) (zuletzt aufgerufen am 26.05.2014)
- KSZ Klimaschutzszenario 2050 – 2. Modellierungsrunde, Öko-Institut, Fraunhofer ISI, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Berlin, August 2015
- LS 2011 Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global, „Leitstudie 2011“, DLR, IWES, IFNE im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, März 2012
- MD Modell Deutschland – Klimaschutz bis 2050: Vom Ziel her denken. Prognos, Öko-Institut im Auftrag des WWF, Oktober 2009
- PB 2015 Projektionsbericht 2015, in Bearbeitung
- THGND Teil Verkehr: Treibhausgasneutraler Verkehr 2050: Ein Szenario zur zunehmenden Elektrifizierung und dem Einsatz stromerzeugter Kraftstoffe im Verkehr, Öko-Institut, Abschlussbericht im Auftrag des Umweltbundesamtes zum Forschungsvorhaben „Verkehr 2050 – Entwicklung von Parametern und Skizzierung eines vereinfachten Energie- und Emissionsszenarios“.
- UBA 2015 Postfossile Energieversorgungsoptionen für einen treibhausgasneutralen Verkehr im Jahr 2050: Eine verkehrsträgerübergreifende Bewertung, INDRAS, Quantis, im Auftrag des Umweltbundesamtes, April 2015

VP 2030 Verkehrsverflechtungsprognose 2030, Intraplan, BVU, IVV, Planco im Auftrag des BMVI, Schlussbericht Juni 2014.