

eMobil 2050

Szenarien zum möglichen Beitrag des elektrischen Verkehrs zum langfristigen Klimaschutz

Berlin, September 2014

Gemeinsamer Endbericht zu den Vorhaben
„Wissenschaftliche Unterstützung bei der Erarbeitung von
Szenarien zum möglichen Beitrag der Elektromobilität zum
langfristigen Klimaschutz“ (FKZ: UM 11 96 106) und
„Szenarien zum möglichen Beitrag der Elektromobilität im
Güter- und öffentlichen Personenverkehr zum langfristigen
Klimaschutz“ (FKZ: 16 EM 1001).

Autorinnen und Autoren

Florian Hacker (Projektleitung)

Ruth Blanck

Friederike Hülsmann

Peter Kasten

Charlotte Loreck

Dr. Sylvie Ludig

Moritz Mottschall

Dr. Wiebke Zimmer

Geschäftsstelle Freiburg

Postfach 17 71

79017 Freiburg

Hausadresse

Merzhauser Straße 173

79100 Freiburg

Telefon +49 761 45295-0

Büro Berlin

Schicklerstraße 5-7

10179 Berlin

Telefon +49 30 405085-0

Büro Darmstadt

Rheinstraße 95

64295 Darmstadt

Telefon +49 6151 8191-0

info@oeko.de

www.oeko.de

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	7
Tabellenverzeichnis	10
Glossar	12
Zusammenfassung	14
Summary	18
1. Hintergrund und Zielstellung	22
1.1. Einleitung	22
1.2. Projektziele und Vorgehen	22
1.3. Eingesetzte Modelle	24
1.3.1. TEMPS	24
1.3.2. PowerFlex	26
2. Technologien: Fahrzeuge und Kraftstoffe	32
2.1. Hintergrund	32
2.2. Personenkraftwagen	32
2.2.1. Fachworkshop „Langfristige Entwicklung konventioneller und alternativer Pkw-Technologien“	33
2.2.2. Aufbau der Fahrzeugtechnologiedatenbank	33
2.3. Schwere Nutzfahrzeuge	36
2.3.1. Fachworkshop „Langfristige Entwicklung konventioneller und alternativer Technologien bei schweren Nutzfahrzeugen“	37
2.3.2. Aufbau der Fahrzeugtechnologiedatenbank	38
2.4. Strombasierte Kraftstoffe	41
2.4.1. Fachworkshop „Entwicklungsmöglichkeiten strombasierter Kraftstoffe im Verkehrssektor bis zum Jahr 2050“	42
2.4.2. Drei Optionen strombasierter Energieträger	43
2.4.3. Prozesskette für die Anwendung im Verkehrssektor	43
2.4.4. Anwendung im Verkehrssektor	47
3. Szenario-Prozess	49
3.1. Hintergrund	49
3.2. Begriff und Methode der Szenariotechnik	49
3.3. Vorgehen	49
3.4. Szenario-Workshop 1: Trends und Einflussfaktoren bis 2050	50
3.5. Szenario-Workshop 2: Konzeption zweier Zukunftsbilder	56
3.6. Szenario-Workshop 3: Diskussion der Szenarioergebnisse	60

4.	Szenarien eMobil 2050	61
4.1.	Vorgehen	61
4.2.	Demographische Entwicklung	61
4.3.	Verkehrsnachfrage im Personenverkehr	61
4.4.	Verkehrsnachfrage im Güterverkehr	64
4.5.	Rahmenbedingungen für die Marktentwicklung von Elektromobilität	67
4.6.	Neuzulassungsstruktur und Bestandsentwicklung	70
4.6.1.	Pkw und leichte Nutzfahrzeuge	70
4.6.2.	Lkw	74
4.6.3.	Busse	76
4.7.	Fahrzeugeffizienz	79
4.7.1.	Pkw	79
4.7.2.	Leichte Nutzfahrzeuge	82
4.7.3.	Schwere Nutzfahrzeuge	84
4.7.4.	Übrige Verkehrsträger (Schiene, Binnenschiff und Zweiräder)	88
4.8.	Kraftstoffe	89
4.8.1.	Strombasierte Kraftstoffe	90
4.8.2.	Biokraftstoffe	92
4.8.3.	Fossile Kraftstoffe	93
4.9.	Energieverbrauch	93
4.10.	Einordnung der Szenarien <i>Grenzenlos eMobil</i> und <i>Regional eMobil</i>	97
5.	Wechselwirkung mit Stromsektor	102
5.1.	Ziel und Vorgehen	102
5.2.	Einsatzprofile Elektromobilität	103
5.2.1.	Ladeinfrastruktur	103
5.2.2.	Ladeverhalten	104
5.2.3.	Fahrzeugnutzungsprofile Pkw (private Nutzung)	104
5.2.4.	Fahrzeugnutzungsprofile Pkw in geteilter Nutzung	107
5.2.5.	Fahrzeugnutzungsprofile Nutzfahrzeuge	108
5.2.6.	Lastkurve Schienenverkehr	111
5.3.	Annahmen und Rahmenbedingungen im Stromsektor	112
5.4.	Auswirkungen des elektrischen Verkehrs auf die Stromerzeugung	116
5.4.1.	Einleitung und Methodik	116
5.4.2.	Stromerzeugung für den Verkehr im Jahr 2030	117
5.4.3.	Variation der Netzkopplung und des Lademanagements	121
5.4.4.	Stromerzeugung für den Verkehr im Jahr 2050	123
5.4.5.	Variation des Ausbaus der erneuerbaren Energien	124

5.5.	Einfluss strombasierter Kraftstoffe auf die Stromerzeugung	130
5.5.1.	Methanisierung des überschüssigen EE-Dargebots	131
5.5.2.	Gas-Lkw mit strombasiertem Methan	135
5.5.3.	Strombasierte Erzeugung des gesamten Kraftstoffverbrauchs	138
5.6.	Überblick wichtiger Kenngrößen zur Wechselwirkungen mit dem Stromsektor	142
6.	CO₂-Emissionen im Jahr 2050	145
6.1.	Einleitung und Vorgehen	145
6.2.	CO ₂ -Emissionen von Verkehrssektor und Stromsektor	146
6.3.	CO ₂ -Emissionen von Verkehr und Differenzstrom	148
6.4.	Grenzenlos eMobil und Regional eMobil im Vergleich	149
6.5.	Oberleitungs-Lkw und Gas-Lkw im Vergleich	150
6.6.	CO ₂ -Emissionen bei Vollversorgung mit strombasierten Kraftstoffen	150
6.7.	CO ₂ -Emissionen beim Einsatz von Biokraftstoffen	151
7.	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	152
8.	Literatur	160
9.	Anhang A: Einflussfaktoren auf den Verkehr	166
9.1.	Übergreifende Trends	166
9.1.1.	Bevölkerungsentwicklung und demographischer Wandel	166
9.1.2.	Siedlungsstrukturen und Reurbanisierung	166
9.1.3.	Digitalisierung	166
9.1.4.	Klimawandel	167
9.2.	Infrastruktur	167
9.2.1.	Verkehrsinfrastruktur	167
9.2.2.	Emissionsfreie Innenstädte	168
9.3.	Zeit und Kosten für Mobilität	168
9.3.1.	Mobilitätszeitbudget	168
9.3.2.	Mobilitätsbudget	169
9.3.3.	Kraftstoffpreise	169
9.3.4.	Internalisierung externer Kosten	170
9.4.	Lebensstil- und Wertewandel	170
9.4.1.	Jugend ohne Auto?	170
9.4.2.	Virtuelle statt physische Mobilität	170
9.4.3.	E-Commerce	171
9.4.4.	3-D-Druck	172
9.5.	Neue Angebote und Optionen	173

9.5.1.	Carsharing	173
9.5.2.	Pedelecs	173
9.5.3.	Lastenräder	174
9.5.4.	Fernbusse	174
9.5.5.	Flexible Bedienformen des ÖPNV und Bürgerbusse	175
9.5.6.	Autonomes Fahren	175
10.	Anhang B: Tabellen	176
10.1.	Tabellen zu Kapitel 2	176
10.2.	Tabellen zu Kapitel 5	177
10.3.	Tabellen zu Kapitel 6	184

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Schematische Darstellung des Modells TEMPS	24
Abbildung 1-2:	Schematische Darstellung von Input- und Output-Größen der Strommarktmodellierung mit PowerFlex	28
Abbildung 1-3:	Schematische Darstellung der Modellierung batterieelektrischer Pkw im Modul Elektromobilität im Strommarktmodell PowerFlex	29
Abbildung 1-4:	Schematische Darstellung der Modellierung von Plug-In-Hybridfahrzeugen im Modul Elektromobilität im Strommarktmodell PowerFlex	29
Abbildung 1-5:	Schematische Darstellung Modellierung von Power-to-Gas/Power-to-Liquid im Strommarktmodell PowerFlex	31
Abbildung 2-1:	Perspektivischer elektrischer Wirkungsgrad und Energieverluste für verschiedene Prozessketten strombasierter Energieträger	47
Abbildung 2-2:	Spezifischer Strom-/Energiebedarf für Pkw (mittel) für verschiedene Prozessketten strombasierter Kraftstoffe	48
Abbildung 3-1:	Einflussfaktoren auf Personenverkehr und Güterverkehr	51
Abbildung 3-2:	Einflussfaktoren auf den Personenverkehr	53
Abbildung 3-3:	Einflussfaktoren auf den Güterverkehr	54
Abbildung 4-1:	Personenverkehr nach Wegezwecken - heute und 2050	62
Abbildung 4-2:	Verkehrsleistung im Personenverkehr 1990 - 2050	63
Abbildung 4-3:	Güterverkehr nach Gütergruppen, heute und 2050	65
Abbildung 4-4:	Verkehrsleistung im Güterverkehr, 1990-2050	66
Abbildung 4-5:	Neuzulassungsstruktur Pkw (ohne Microcars)	71
Abbildung 4-6:	Fahrleistung Pkw nach Antriebstypen und genutzter Energie	72
Abbildung 4-7:	Pkw-Bestand xEV	73
Abbildung 4-8:	Fahrleistung Sattelzüge nach Antriebstypen	75
Abbildung 4-9:	Fahrleistung Lkw und leichte Nutzfahrzeuge nach Antriebstypen	76
Abbildung 4-10:	Fahrleistung Busse nach Antriebstypen	78
Abbildung 4-11:	Energieverbrauch (NEFZ) eines mittleren neu zugelassenen Pkw differenziert nach Antriebskonzept und Betriebsmodus (konventionell / elektrisch) 2010 – 2050	80
Abbildung 4-12:	Energieverbrauch Pkw differenziert nach Fahrzeugsegment und verbrennungsmotorischem Antriebskonzept 2010 und 2050	81
Abbildung 4-13:	Energieverbrauch Pkw differenziert nach Fahrzeugsegment und Antriebskonzept 2010 und 2050	82
Abbildung 4-14:	Energieverbrauch LNF differenziert nach Antriebskonzept und Betriebsmodus (konventionell / elektrisch) 2010 - 2050	83
Abbildung 4-15:	Energieverbrauch in der Kategorie Lkw 3,5 – 7,5 t differenziert nach Antriebskonzept und Betriebsmodus (konventionell / elektrisch) 2010 – 2050	86
Abbildung 4-16:	Energieverbrauch in der Kategorie LZ/SZ < 40 t differenziert nach Antriebskonzept u. Betriebsmodus (konventionell / elektrisch) 2010 – 2050	87

Abbildung 4-17:	Energieverbrauch in der Kategorie Linienbus differenziert nach Antriebskonzept u. Betriebsmodus (konventionell / elektrisch) 2010 – 2050	87
Abbildung 4-18:	Endenergiebedarf nach Verkehrsmitteln	94
Abbildung 4-19:	Endenergiebedarf nach Energieträgern	95
Abbildung 4-20:	Effizienz im Personen- und Güterverkehr	96
Abbildung 4-21:	Strombedarf des Verkehrssektors	97
Abbildung 4-22:	Verkehrsleistung im Personenverkehr 2050 – Szenarienvergleich	98
Abbildung 4-23:	Verkehrsleistung im Güterverkehr 2050 – Szenarienvergleich	99
Abbildung 4-24:	Endenergiebedarf des Verkehrs 2050 – Szenarienvergleich	100
Abbildung 5-1:	Durchschnittliche Verkehrsmenge der LKW > 3,5 t zGG mit Anhänger und Sattelzüge auf Bundesautobahnen	110
Abbildung 5-2:	Durchschnittliche Verkehrsmenge der Busse auf Bundesautobahnen	110
Abbildung 5-3:	Lastprofil des Schienenverkehrs	111
Abbildung 5-4:	Entwicklung der Stromnachfrage ohne Verkehrssektor	112
Abbildung 5-5:	Merit Order des fossilen Kraftwerksparks in 2030	115
Abbildung 5-6:	Merit Order des fossilen Kraftwerksparks in 2050	116
Abbildung 5-7:	Vergleich des Differenzstroms für das Jahr 2030	118
Abbildung 5-8:	Stromerzeugung für eine Maiwoche im Jahr 2030 im Vergleichslauf ohne Stromnachfrage aus dem Verkehr	119
Abbildung 5-9:	Stromerzeugung für eine Maiwoche im Jahr 2030 im Szenario <i>Grenzenlos eMobil</i>	120
Abbildung 5-10:	Differenzstrommenge bei unterschiedlichem Ladeverhalten und Netzkopplungshäufigkeiten im Szenario <i>Grenzenlos eMobil</i> im Jahr 2030	121
Abbildung 5-11:	Vergleich der Differenzstrommengen für das Jahr 2050	123
Abbildung 5-12:	Ausbauszenarien für Wind Onshore, Wind Offshore und Photovoltaik	125
Abbildung 5-13:	Vergleich der Differenzstrommenge für das Szenario <i>Grenzenlos eMobil</i> für unterschiedliche EE-Szenarien für das Jahr 2050	126
Abbildung 5-14:	Einsatz des Backup-Kraftwerks in den Szenarien <i>Grenzenlos eMobil</i> und <i>Grenzenlos eMobil EE+</i>	128
Abbildung 5-15:	Stromerzeugung für eine Maiwoche im Jahr 2050 für das Szenario <i>Grenzenlos eMobil (EE+)</i>	129
Abbildung 5-16:	Darstellung Stromnachfrage Oberleitungs- und Elektrofahrzeuge für eine Maiwoche im Jahr 2050 für das Szenario <i>Grenzenlos eMobil (EE+)</i>	130
Abbildung 5-17:	Vergleich Differenzstrom ohne und mit Sensitivität Methanisierung EE-Überschuss (<i>Grenzenlos eMobil 2050</i>)	131
Abbildung 5-18:	Dauerkurve der EE-Überschüsse für das Szenario <i>Grenzenlos eMobil</i> mit den Kraftwerkskapazitäten <i>EE+</i>	132
Abbildung 5-19:	Vergleich Differenzstrom mit und ohne Sensitivität Methanisierung EE-Überschuss und unterschiedlichem EE-Ausbau (<i>Regional eMobil 2050</i>)	134
Abbildung 5-20:	Vergleich Differenzstrom für die Sensitivität Gas-Lkw und PtG für <i>Grenzenlos eMobil 2050</i>	136

Abbildung 5-21:	Stromerzeugung für eine Maiwoche im Jahr 2050 für das Szenario <i>Grenzenlos eMobil</i> , Sensitivität Gas-Lkw EE ++	138
Abbildung 5-22:	Vergleich Differenzstrom PtX-Sensitivität für das Szenario <i>Grenzenlos eMobil</i> im Jahr 2050	140
Abbildung 5-23:	Stromerzeugung für eine Maiwoche im Jahr 2050 für das Szenario <i>Grenzenlos eMobil</i> , Sensitivität PtX mit EE-Ausbau	141
Abbildung 6-1:	Endenergiebedarf des Verkehrssektors im Jahr 2050	146
Abbildung 6-2:	Direkte CO ₂ -Emissionen des Strom- und Verkehrssektors 2050	147
Abbildung 6-3:	CO ₂ -Emissionen von Verkehr und Differenzstrom 2050	148

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1:	Neuzulassungsstruktur Lkw	74
Tabelle 4-2:	Neuzulassungsstruktur Busse	77
Tabelle 4-3:	Energieverbrauch (NEFZ) eines mittleren neu zugelassenen Pkw differenziert nach Antriebskonzept und Betriebsmodus (konventionell / elektrisch) 2010 – 2050	81
Tabelle 4-4:	Energieverbrauch LNF differenziert nach Antriebskonzept und Betriebsmodus (konventionell / elektrisch) 2010 - 2050	83
Tabelle 4-5:	Energieverbrauch SNF nach Antriebskonzept und Betriebsmodus (konventionell / elektrisch) 2010 – 2050	85
Tabelle 4-6:	Spezifischer Energieverbrauch im Schienenpersonenverkehr, der Krafträder und Pedelects nach Antriebskonzept 2010 – 2050	89
Tabelle 4-7:	Spezifischer Energieverbrauch im Schienengüterverkehr und der Binnenschifffahrt nach Antriebskonzept 2010 – 2050	89
Tabelle 4-8:	Szenarioannahmen für die Modellierung strombasierter Kraftstoffe für das Jahr 2050	91
Tabelle 5-1:	Szenarioannahmen für Ladeinfrastruktur	104
Tabelle 5-2:	Fahrzeugnutzungsprofile für Pkw (mittel, Umland) in Privatbesitz	106
Tabelle 5-3:	Kumulierte elektrische Nettoleistung von Kraftwerken, die sich in Planung bzw. Bau befinden	113
Tabelle 5-4:	Installierte Leistungen fossiler Kraftwerke in 2030 und 2050	114
Tabelle 5-5:	Installierte Nettoleistung erneuerbarer Energien	114
Tabelle 5-6:	Entwicklung der Brennstoffpreise und des Preises für CO ₂	114
Tabelle 5-7:	Vergleich von Brennstoffmix, Emissionen und EE-Überschüssen für die Differenzstromerzeugung im Jahr 2030	118
Tabelle 5-8:	Vergleich von Brennstoffmix, Emissionen und EE-Überschüssen für die Differenzstromerzeugung mit unterschiedlichen Netzkopplungen im Szenario <i>Grenzenlos eMobil</i> im Jahr 2030	122
Tabelle 5-9:	Vergleich von Brennstoffmix, Emissionen und EE-Überschüssen für die Differenzstromerzeugung im Jahr 2050	124
Tabelle 5-10:	Vergleich von Brennstoffmix, Emissionen und EE-Überschüssen für die Differenzstromerzeugung in unterschiedlichen EE-Szenarien im Jahr 2050	127
Tabelle 5-11:	Vergleich von Brennstoffmix, Emissionen und EE-Überschüssen für die Differenzstromerzeugung in der Sensitivität Methanisierung EE-Überschuss (<i>Grenzenlos eMobil 2050</i>)	133
Tabelle 5-12:	Vergleich von Brennstoffmix, Emissionen und EE-Überschüssen für die Differenzstromerzeugung in der Sensitivität Methanisierung EE-Überschuss (<i>Regional eMobil 2050</i>)	135
Tabelle 5-13:	Vergleich von Brennstoffmix, Emissionen und EE-Überschüssen für die Differenzstromerzeugung in der Sensitivität Gas-Lkw und PtG für <i>Grenzenlos eMobil</i> im Jahr 2050	137

Tabelle 5-14:	Vergleich von Brennstoffmix, Emissionen und EE-Überschüssen für die Differenzstromerzeugung in der Sensitivität PtX für <i>Grenzenlos eMobil</i> im Jahr 2050	140
Tabelle 5-15:	Kenngroßen der Szenarien im Vergleich (2050)	142
Tabelle 10-1:	Annahmen zu Schritten der Prozessketten in Abbildung 2-1	176
Tabelle 10-2:	Tabelle zu Abbildung 2-1: Elektrischer Wirkungsgrad und Energieverluste für verschiedene Prozessketten strombasierter Energieträger	176
Tabelle 10-3:	Tabelle zu Abbildung 2-2: Spezifischer Strom-/Energiebedarf für Pkw (mittel) für verschiedene Prozessketten strombasierter Kraftstoffe	176
Tabelle 10-4:	Tabelle zu Abbildung 4-1: Personenverkehr nach Wegezwecken - heute und 2050	177
Tabelle 10-5:	Tabelle zu Abbildung 4-2: Verkehrsleistung im Personenverkehr 1990 - 2050	177
Tabelle 10-6:	Tabelle zu Abbildung 4-3: Güterverkehr nach Gütergruppen, heute und 2050	178
Tabelle 10-7:	Tabelle zu Abbildung 4-4: Verkehrsleistung im Güterverkehr, 1990-2050	178
Tabelle 10-8:	Tabelle zu Abbildung 4-5: Neuzulassungsstruktur Pkw (ohne Microcars)	179
Tabelle 10-9:	Tabelle zu Abbildung 4-6: Fahrleistung Pkw nach Antriebstypen	179
Tabelle 10-10:	Tabelle zu Abbildung 4-7: Pkw-Bestand elektrischer Fahrzeuge	180
Tabelle 10-11:	Tabelle zu Abbildung 4-8: Fahrleistung Sattelzüge nach Antriebstypen	180
Tabelle 10-12:	Tabelle zu Abbildung 4-9: Fahrleistung Lkw und leichte Nutzfahrzeuge nach Antriebstypen	181
Tabelle 10-13:	Tabelle zu Abbildung 4-10: Fahrleistung Busse nach Antriebstypen	181
Tabelle 10-14:	Tabelle zu Abbildung 4-18: Endenergiebedarf nach Verkehrsmitteln	182
Tabelle 10-15:	Tabelle zu Abbildung 4-19: Endenergiebedarf nach Energieträgern	182
Tabelle 10-16:	Tabelle zu Abbildung 4-22: Verkehrsleistung im Personenverkehr 2050 – Szenarienvergleich	183
Tabelle 10-17:	Tabelle zu Abbildung 4-23: Verkehrsleistung im Güterverkehr 2050 – Szenarienvergleich	183
Tabelle 10-18:	Ausbauszenarien für Wind Onshore, Wind Offshore und Photovoltaik, Vergleich zwischen Leitstudie und Ausbau <i>EE+</i>	184
Tabelle 10-19:	Kenngroßen der Szenarien im Vergleich (2030)	185
Tabelle 10-20:	Tabelle zu Abbildung 6-1: Endenergiebedarf des Verkehrssektors im Jahr 2050	186
Tabelle 10-21:	Tabelle zu Abbildung 6-2: Direkte CO ₂ -Emissionen des Strom- und Verkehrssektors 2050	186
Tabelle 10-22:	Tabelle zu Abbildung 6-3: CO ₂ -Emissionen von Verkehr und Differenzstrom 2050	187

Glossar

BAB	Bundesautobahnen
BAU	Business as Usual
BEV	batterieelektrisches Fahrzeug (battery electric vehicle)
BIP	Bruttoinlandsprodukt
CNG	komprimiertes Erdgas (compressed natural gas)
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CO ₂ e	Kohlenstoffdioxid-Äquivalent
DSM	Lastmanagement (demand side management)
EE	Erneuerbare Energien
FCEV	Brennstoffzellenfahrzeug (fuel cell electric vehicle)
FT	Fischer-Tropsch
g	Gramm
ggü.	gegenüber
GUD	Gas-und-Dampfkraftwerk
GV	Güterverkehr
HEV	Hybridfahrzeug (hybrid electric vehicle)
ICEV	verbrennungsmotorisches Fahrzeug (internal combustion engine vehicle)
iLUC	indirekte Landnutzungsänderungen (indirect land use change)
kg	Kilogramm
km	Kilometer
kWh	Kilowattstunde
Lkw	Lastkraftwagen
LNF	Leichtes Nutzfahrzeug
LNG	Flüssigerdgas (liquified natural gas)
LZ	Lastzug
Mio.	Million
MIV	motorisierter Individualverkehr
MJ	Mega Joule
Mrd.	Milliarde
MWh	Megawattstunde

NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NMIV	nicht-motorisierter Individualverkehr
OC-GIV	Oberleitungsfahrzeug (overhead catenary grid-integrated vehicle)
Ö(P)V	Öffentlicher (Personen-)Verkehr
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PHEV	Plug-In-Hybridfahrzeug (plug-in hybrid electric vehicle)
PJ	Peta Joule
pkm	Personenkilometer
Pkw	Personenkraftwagen
PSW	Pumpspeicherkraftwerk
PtG	strombasierte gasförmige Kraftstoffe (power to gas)
PtL	strombasierte kohlenstoffhaltige Flüssigkraftstoffe (power to liquid)
PtX	strombasierte Kraftstoffe (power to x)
PV	Personenverkehr
REEV	Elektrofahrzeug mit Range Extender (range extended electric vehicle)
SNF	Schweres Nutzfahrzeug
SSU	Straßen-, S- und U-Bahnen
SZ	Sattelzug
THG	Treibhausgas
tkm	Tonnenkilometer
TWh	Terawattstunde
Tsd.	Tausend
W	Watt
xEV	Fahrzeuge mit Möglichkeit zur externen Batterieladung (x-electric vehicle); umfasst BEV, PHEV, REEV
zGG	zulässiges Gesamtgewicht

Zusammenfassung

Die Erreichung der nationalen Klimaschutzziele erfordert eine substantielle Minderung der Treibhausgasemissionen aller energienachfragenden Sektoren, insbesondere auch des Verkehrssektors. Die zunehmende Elektrifizierung von Verkehr stellt in Verbindung mit dem Einsatz von erneuerbaren Energien eine wichtige Option zur Zielerreichung dar. Um eine entsprechend vorteilhafte Entwicklung sicherzustellen, ist es insbesondere notwendig, die Wechselwirkungen von elektrischem Verkehr und Energiesektor frühzeitig zu berücksichtigen und mögliche Auswirkungen auf die Stromerzeugung bzw. notwendige Veränderungen im Kraftwerkspark aufzuzeigen.

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* geht von einem weiteren Wachstum der Verkehrsnachfrage aus und erzielt die Treibhausgasreduzierung vor allem durch einen Technologiewandel. Im Szenario *Regional eMobil* sind stärkere Änderungen im Verkehrsverhalten hinterlegt, so dass sich auch die Verkehrsleistung 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. Ist im Folgenden hingegen von *Elektromobilität* bzw. *Elektrofahrzeugen* die Rede, so ist jeweils nur der elektrische Straßenverkehr gemeint. Ergänzend wird in einer Sensitivität die Nutzung von strombasierten Kraftstoffen im bodengebundenen Verkehr betrachtet, der Begriff *elektrischer Verkehr* umfasst strombasierte Kraftstoffe nicht.

Die Auswirkungen einer zunehmenden Elektrifizierung des Verkehrssektors auf die Stromerzeugung werden im Rahmen des Vorhabens unter anderem anhand einer Differenzstrombetrachtung¹ diskutiert. Das gewählte Vorgehen ermöglicht es, die langfristigen Auswirkungen einer zusätzlichen Stromnachfrage auf den Kraftwerkeinsatz und die damit verbundenen Emissionen bis zum Jahr 2050 zu quantifizieren und den zusätzlichen Handlungsbedarf im Energiesektor aufzuzeigen. Da die Stromnachfrage des elektrischen Verkehrs im Strommarktmodell jeweils gesamthaft abgebildet wird, ist keine direkte Zuordnung der Emissionen zu einzelnen elektrischen Verkehrsmitteln möglich.

Das Vorhaben wurde mit der Unterstützung des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit im Zeitraum 2011 bis 2013 durchgeführt.

Während elektrischer Verkehr bis 2030 mengenmäßig noch moderate Auswirkungen auf den Strommarkt hat, wird der Verkehr bis zum Jahr 2050 zu einem zentralen Stromnachfrager.

Die Ergebnisse der Szenarien zeigen, dass bei einer zunehmenden Bedeutung von elektrisch betriebenen Fahrzeugen im Personen- und Güterverkehr die Stromnachfrage des Verkehrssektors bis zum Jahr 2030 mit etwa 6 % der gesamten Stromnachfrage noch relativ moderat ausfällt. Bis

¹ Die Effekte der Stromnachfrage des Verkehrs auf die Stromerzeugung werden im Vergleich eines Modelllaufs ohne die Stromnachfrage aus dem Verkehr und eines Laufs inklusive der zunehmenden Stromnachfrage des Verkehrs für unterschiedliche EE-Ausbaupfade bis zum Jahr 2050 simuliert.

zum Jahr 2050 steigt der Anteil von elektrischem Verkehr an der Stromnachfrage in den Szenarien auf 15 % bis 25 % und der Verkehrssektor entwickelt sich zu einem zentralen Nachfrager im Gesamtsystem. Bei einem zusätzlichen Einsatz von strombasierten Kraftstoffen fällt dieser Anteil noch höher aus. Im Szenario *Grenzenlos eMobil*, welches (ähnlich wie viele gängige Szenarien) von einem weiteren Wachstum der Verkehrsnachfrage ausgeht, würde allein der Strombedarf des Verkehrs von 17 TWh im Jahr 2010 auf über 150 TWh bis zum Jahr 2050 steigen. Im Alternativszenario *Regional eMobil*, welches eine moderatere Entwicklung der Verkehrsnachfrage und eine Verlagerung auf weniger energieintensive Verkehrsmittel annimmt, beschränkt sich der Strombedarf des Verkehrs auf 75 TWh.

Die direkten Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors können bei einem hohen Anteil elektrischer Fahrzeuge bis zum Jahr 2050 um über 80 % reduziert werden. Ohne den zusätzlichen Ausbau erneuerbarer Energien entstehen jedoch zusätzliche Emissionen bei der Stromerzeugung.

Insbesondere durch den verstärkten Einsatz von elektrischen Antriebstechnologien können die direkten Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors (ohne Berücksichtigung der Emissionen aus der Fahrzeugherstellung und -entsorgung sowie der Vorkettenemissionen der Kraftstoffe sowie ohne Luft- und Seeverkehr) im Szenario *Grenzenlos eMobil* gegenüber dem Basisjahr 1990 um 85 % (136 Mio. Tonnen) und im Szenario *Regional eMobil* um 87 % (139 Mio. Tonnen) bis zum Jahr 2050 reduziert werden. Wird die Stromnachfrage des Verkehrs nicht durch den zusätzlichen Ausbau erneuerbarer Energien gedeckt, so sind mit der Strombereitstellung jedoch zusätzliche Treibhausgasemissionen im Stromsektor von 50 bzw. 16 Millionen Tonnen verbunden. Wenn man diese Emissionen dem Verkehrssektor zurechnet, reduziert sich die Treibhausgasminderung auf 56 % im Szenario *Grenzenlos eMobil* und 78 % im Szenario *Regional eMobil*. Um diese Emissionen im Stromsektor zu vermeiden, ist ein zusätzlicher Ausbau der erneuerbaren Energien notwendig.

Der zusätzliche Bedarf an EE-Kapazitäten für die Stromnachfrage des Verkehrs geht über gängige EE-Ausbauszenarien deutlich hinaus. Nicht genutzte EE-Überschüsse können die zusätzliche Nachfrage nur sehr begrenzt befriedigen.

Um den Strombedarf des Verkehrssektors zu decken, ist somit im Falle einer ambitionierten Entwicklung der Elektromobilität eine deutlich höhere Stromerzeugung notwendig als in gängigen EE-Ausbauszenarien für den deutschen Kraftwerkspark bisher angenommen wird, da diese die Elektrifizierung des Verkehrs üblicherweise weniger stark berücksichtigen. Die zusätzliche Stromnachfrage kann selbst bei maximaler Flexibilität der Elektrofahrzeuge – schon allein auf Grund der erforderlichen Menge – nur zu einem kleinen Teil durch zuvor inländisch nicht genutzte Überschüsse an erneuerbaren Energien gedeckt werden. Gleichzeitig geht mit der erhöhten Stromnachfrage, selbst bei äußerst flexibel ladenden Elektrofahrzeugen, auch ein erhöhter Bedarf an Spitzenlastkapazitäten einher. Damit die Nachfrage nicht nur in Summe sondern auch jederzeit gedeckt werden kann sind perspektivisch zusätzliche EE-Kapazitäten notwendig, um eine Erhöhung der Emissionen im Energiesektor durch die zusätzliche Stromerzeugung zu vermeiden.

Die gesamten Treibhausgasemissionen von Verkehrs- und Stromsektor können bei einer Bereitstellung zusätzlicher EE-Kapazitäten gegenüber 1990 um über 90 % bis 2050 gesenkt werden. Ohne zusätzlichen EE-Ausbau sinkt die Minderungsleistung beider Sektoren auf etwa 85%.

Für die Einordnung des Klimaschutzbeitrags einer zunehmenden Elektrifizierung des Verkehrs ist die gesamthafte Betrachtung der Treibhausgasemissionen von Verkehrs- und Stromsektor angesichts der bestehenden Wechselwirkungen besonders geeignet. Unter der Rahmenbedingung einer nahezu vollständigen Deckung des Strombedarfs aus dem Verkehrssektor durch

erneuerbaren Strom sinken die Treibhausgasemissionen von Verkehrs- und Stromsektor bis 2050 gegenüber dem Vergleichsjahr 1990 um 92 % im Szenario *Grenzenlos eMobil* und um 94 % im Szenario *Regional eMobil*. Ohne eine zusätzliche Ausweitung der EE-Kapazitäten entsprechend der Stromnachfrage des Verkehrs lägen die Treibhausgasemissionen im Jahr 2050 deutlich höher und die Treibhausgasminderung würde sich auf 83,5 % bzw. 89,5 % reduzieren.

Verbleibende, durch elektrische Fahrzeuge nicht integrierbare, erneuerbare Energien könnten durch die flexible Produktion von strombasierten Kraftstoffen genutzt werden.

Bei einem Ausbau der EE-Kapazitäten, der eine vollständige Bedarfsdeckung des elektrischen Verkehrs ermöglicht, können in den Szenarien die erneuerbaren Energien nicht vollständig integriert werden. Zwar lässt sich durch die flexible Batterieladung der E-Fahrzeuge ein höherer Anteil erneuerbarer Energien integrieren als dies bei einer starren Nachfrage der Fall wäre. Dennoch gibt es Zeitpunkte, in denen entweder die Batterien der ans Netz gekoppelten Fahrzeuge vollständig geladen sind oder die Leistung der Ladestellen für die vollständige EE-Integration nicht ausreicht, so dass in den betrachteten Szenarien im Jahr 2050 EE-Überschüsse von etwa 9 bis 10 % bezogen auf das Dargebot verbleiben.

Eine Möglichkeit der Nutzung des durch elektrische Fahrzeuge nicht integrierbaren EE-Angebots stellt – neben möglichen anderen Flexibilitätsoptionen in der Stromnachfrage – die Erzeugung von strombasierten Kraftstoffen dar. Zwar wären einzelne EE-Angebotsspitzen aufgrund einer beschränkten installierten Leistung der Kraftstofferzeugungsanlagen, die sich aus den notwendigen Betriebsstunden der Anlagen ergibt, ebenfalls nicht integrierbar. Der überwiegende Anteil des überschüssigen EE-Angebots könnte jedoch für die Produktion strombasierter Kraftstoffe genutzt werden. Die Mengen strombasierter Kraftstoffe, die sich bei einer ausschließlichen Nutzung von EE-Überschüssen produzieren lassen, reichen jedoch bei weitem nicht aus, um die im Jahr 2050 verbleibende Nachfrage nach gasförmigen und flüssigen Kraftstoffen des Verkehrssektors zu decken. Die vollständige Deckung dieser Nachfrage wäre mit einem erheblichen zusätzlichen Ausbau von EE-Kapazitäten verbunden. Die Stromnachfrage des Verkehrs würde in diesem Extremszenario im Jahr 2050 bereits ohne Berücksichtigung von See- und Luftverkehr nahezu der Gesamtstromnachfrage aller anderen Sektoren entsprechen.

Grundsätzlich weist die direkte Stromnutzung jedoch einen deutlich höheren Gesamtwirkungsgrad als der Einsatz von strombasierten Kraftstoffen im Verkehr auf und ist daher, wo technisch und systemisch möglich, zu bevorzugen.

Eine starke Elektrifizierung kann den Endenergiebedarf des Verkehrs bis zum Jahr 2050 deutlich über die bestehende Zielsetzung der Bundesregierung von 40 % hinaus reduzieren.

Durch die starke Elektrifizierung des Verkehrs wird die Endenergienachfrage in beiden Szenarien aufgrund der hohen Effizienz des elektrischen Antriebs erheblich reduziert. Im Szenario *Grenzenlos eMobil* verringert sich der Endenergiebedarf gegenüber 2010 um 66 %. Im Szenario *Regional eMobil* kann durch die gleichzeitige erhebliche Verringerung der Verkehrsleistung gar eine Minderung um 77 % bis 2050 erzielt werden. Damit wird in beiden Szenarien das Ziel der Bundesregierung zur Minderung des Endenergiebedarfs im Verkehr von 40 % bis 2050 deutlich übertroffen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass das ursprüngliche Ziel der Bundesregierung unter der Annahme eines relevanten Beitrags von Biokraftstoffen zur Erreichung der nationalen Klimaschutzziele im Jahr 2050 formuliert wurde, der aus heutiger Perspektive als unwahrscheinlich betrachtet wird. Eine Übererfüllung des Energieziels garantiert daher nicht automatisch die Erreichung der nationalen Klimaschutzziele.

Die verstärkte Fokussierung auf Verkehrsvermeidung und -verlagerung ermöglicht eine stärkere Minderung des Endenergiebedarfs und würde somit den Ausbaubedarf für erneuerbare Energien reduzieren.

Die Treibhausgasminderung wird in den Szenarien auf teilweise unterschiedliche Weise erreicht. Während in ersterem die Verkehrsleistung im Personen- und Güterverkehr weiter ansteigt und der Fahrzeugbestand weiter hoch bleibt, zeichnet sich letzteres durch eine rückläufige Verkehrsleistung und eine abnehmende Motorisierung aus.

Der Vergleich der beiden Szenarien zeigt, dass auch die Entwicklung der Verkehrsnachfrage von relevanter Bedeutung für die zukünftige Stromnachfrage des Verkehrs ist. Im Szenario *Grenzenlos eMobil* führt der starke Anstieg der Verkehrsleistung trotz der Annahme einer besonders ambitionierten technischen Entwicklung (u.a. Oberleitungs-Lkw) im Vergleich zum Szenario *Regional eMobil* zu einem wesentlich höheren Ausbaubedarf von erneuerbaren Energien. Angesichts des hohen Gesamtbedarfs an Erzeugungskapazitäten für erneuerbare Energien aus allen energienachfragenden Sektoren stellt die Veränderung der Verkehrsnachfrage eine zentrale Einflussgröße für die Verringerung der verkehrsbedingten Endenergienachfrage dar. Deren Rückgang entsprechend der Entwicklung im Szenario *Regional eMobil* würde die Realisierbarkeit einer nahezu vollständigen regenerativen Deckung der dadurch entsprechend geringeren verkehrsbedingten Stromnachfrage bis zum Jahr 2050 deutlich erhöhen.

Summary

For Germany to meet its national climate protection targets, a substantial reduction in the greenhouse gas (GHG) emissions of all sectors— in particular the transport sector – is necessary. The electrification of transport in combination with an increasing use of renewable energies is an important option for fulfilling these targets. In order to ensure this development, it is particularly important for the interactions between electrical transport and the energy sector to be considered at an early stage and for possible effects on electricity production and necessary changes in the power plant fleet to be examined.

Within the scope of the *eMobil 2050* project, the possible long-term interactions between the transport sector and the power sector are analysed on the basis of two scenarios, both of which assume a very ambitious development for electric mobility. The *Grenzenlos eMobil* scenario assumes further growth in transport demand and reduces GHG emissions above all by means of technological change. In the *Regional eMobil* scenario, greater changes in transport behaviour are assumed so that the number of kilometres travelled is also reduced.

In the *eMobil 2050* project, *electrical transport* is understood broadly. The analysis considers road and rail transport, but not air or maritime transport since it cannot be assumed with high probability that these forms of transport will undergo electrification in future. When the analysis refers to *electric mobility* and *electric vehicles*, therefore, only electrical road transport is meant. Complementing this, the use of power-based fuels in ground transport is also included in the analysis. The effects of the increasing electrification of the transport sector on electricity production in Germany are discussed in the study based on an analysis of marginal power generation². This approach enables the long-term effects of an additional electricity demand on which power plant is used to supply the electricity and on the related emissions up to 2050 to be quantified and the need for additional action in the energy sector to be shown. Since the electricity market model shows the electricity demand of electrical transport as a whole, it is not possible to classify the emissions of different means of electrical transport specifically.

The *eMobil 2050* project was carried out from 2011-2013 with funding from the German Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety.

While electrical transport still has moderate effects on the electricity market in terms of volume up to 2030, the transport sector becomes a key source of electricity demand by 2050.

The scenario results show that as the share of electrically operated means of transport in the passenger and freight transport sectors increases, the electricity demand of the transport sector increases only moderately – by approx. 6 % – up to 2030. On the contrary, by 2050 the share of electrical transport in electricity demand increases to 15-25 % and the transport sector develops into an important source of electricity demand in the power system overall. If an increased use of electricity-based fuels is assumed, this share is even higher. In the *Grenzenlos eMobil* scenario, which assumes (in line with many other scenarios in this area) a further growth in transport demand, the electricity demand of the transport sector alone increases from 17 TWh in 2010 to more than 150 TWh by 2050. In the *Regional eMobil* scenario, in which a more moderate development of transport demand and a shift towards less energy-intensive means of transport are assumed, the electricity demand of the transport sector recedes to 75 TWh.

² The effects of electricity demand of the transport sector on electricity production are simulated in comparison to a model run without the electricity demand of the transport sector and a model run which includes the increasing electricity demand of the transport sector for different RE expansion paths up to 2050.

The direct GHG emissions of the transport sector can be reduced by more than 80 % by 2050 when a high share of electrical transport is assumed. Without an additional expansion of renewable energies, there are additional emissions in electricity production.

Particularly as a result of the increased use of electrical propulsion systems, the direct GHG emissions of the transport sector – without taking into account either the emissions caused by vehicle manufacture and disposal or the upstream emissions of the fuels or air and maritime transport – are reduced by 85 % (136 bn tonnes) in the *Grenzenlos eMobil* scenario and by 87 % (139 bn tonnes) in the *Regional eMobil* scenario up to 2050 compared to 1990. If the transport sector's electricity demand is not met by an additional expansion of renewable energies, the electricity production needed gives rise to additional GHG emissions in the electricity sector, amounting to 50 and 16 million tonnes respectively. If these additional emissions are ascribed to the transport sector, the GHG emissions of the transport sector fall to 56 % in the *Grenzenlos eMobil* scenario and to 78 % in the *Regional eMobil* scenario. In order to avoid these emissions in the electricity generation sector, an additional expansion of renewable energies is necessary.

The additional need for renewable capacities to meet the transport sector's electricity demand significantly exceeds commonly used expansion scenarios for renewable energies. Unused renewable surpluses can only fulfil a very small share of the additional demand.

In order to meet the transport sector's electricity demand when an ambitious development of electric mobility is assumed, significantly higher electricity generation is needed than has been assumed up to now in common scenarios of renewable expansion for the German power plant fleet. This is because these scenarios usually take into account the electrification of the transport sector to a lesser extent. Even when maximum flexibility of electric vehicles is assumed, only a small share of the additional electricity demand can – not least of all because of the volume involved – be met using renewable surpluses that have not been exploited domestically. At the same time, the increased electricity demand also involves an increased need for peak load capacities, even in the case of extremely flexibly chargeable electric vehicles. In order to ensure that the electricity demand can be met not only overall but also at all hours, additional renewable capacities may be necessary in future to avoid an increase in the emissions of the energy sector as a result of the additional electricity production.

The total GHG emissions of the transport and electricity generation sectors in Germany can be reduced by approx. 90 % by 2050 compared to 1990 if additional renewable capacities are made available. Without an additional expansion of renewable energies, the emission reduction of both sectors would amount to approx. 85%.

A holistic analysis of the GHG emissions of the transport and electricity generation sectors is – given the existing interactions between the sectors – particularly suitable for classifying the contribution to climate protection of an increasing electrification of the transport sector. If it is assumed as a framework condition that almost all the electricity demand of the transport sector is met using renewable energies, the GHG emissions of the transport and electricity generation sectors decrease by 92 % by 2050 compared to 1990 in the *Grenzenlos eMobil* scenario and by 94 % in the *Regional eMobil* scenario. Without an additional expansion of renewable capacities in line with the electricity demand of the transport sector, the GHG emissions would be significantly higher and the reduction of GHG emissions would amount to 83.5 % and 89.5 % respectively in 2050.

The remaining renewable energies that electric vehicles cannot integrate in the electricity generation system could be used in the flexible production of electricity-based fuels.

Assuming an expansion of renewable capacities that enables the electricity demand of electrical transport to be met in full, the renewable energies cannot be fully integrated in the electricity generation system in the scenarios. The flexible charging of electric vehicles allows a higher share of renewable energies to be integrated than would be the case with a static electricity demand. Nevertheless, there are times when either the batteries of the vehicles connected to the grid are fully charged or the capacity of the charging points is not sufficient to enable full integration of the renewable energies. As a result there are renewable surpluses of approx. 9-10 % in the scenarios in 2050 when compared to availability.

One possibility for using the renewable energies that cannot be integrated in the electricity system on the basis of electric vehicles is – alongside other possible flexibility options on the side of electricity demand – the production of electricity-based fuels. Some peaks in the availability of renewable energies arising from limited installed capacity of the renewable production plants as determined by the plants' necessary hours of operation can also not be integrated. However, the predominant share of the available renewable surpluses could be used in the production of electricity-based fuels. The quantities of electricity-based fuels produced only on the basis of renewable surpluses are by no means enough, however, to meet the remaining demand for gaseous and liquid fuels in the transport sector in 2050. Complete fulfilment of this demand would entail substantial additional expansion of renewable capacities. The transport sector's electricity demand would, in this extreme scenario, equal that of the total electricity demand of all other sectors put together in 2050, without taking into account air and maritime transport.

However, the direct use of electricity has a significantly higher overall efficiency than the use of electricity-based fuels in the transport sector and should therefore be favoured where possible technically and within the scope of the electricity generation system.

Strong electrification of transport can reduce the final energy demand of the transport sector up to 2050 to an extent that goes significantly beyond the German government's current target of 40 %.

Due to the strong electrification of the transport sector, the final energy demand in both scenarios substantially decreases based on the high efficiency of electrical propulsion technologies. In the *Grenzenlos eMobil* scenario, the final energy demand falls by 66 % compared to 2010. In the *Regional eMobil* scenario, the final energy demand can be reduced by 77 % by 2050 when a concurrent substantial reduction in the number of kilometres travelled is assumed. In this way, the German government's target of reducing the transport sector's final energy demand by 40 % by 2050 would be significantly surpassed. However, it should be noted that the German government's original target was based on the assumption of biofuels making a significant contribution to meeting national climate protection targets in 2050, which is considered improbable from today's perspective. Surpassing the energy target does not automatically guarantee that Germany's national climate protection targets are met.

Increased focus on the avoidance of transport and on modal shift enables a greater reduction of the final energy demand and would thereby decrease the need to expand the use of renewable energies.

Emission reduction in the transport sector is achieved in partly different ways in the scenarios. While in the *Grenzenlos eMobil* scenario the number of kilometres travelled in passenger and freight transport continues to increase and the quantity of vehicle stock remains high, the number

of kilometres travelled in passenger and freight transport and the quantity of vehicle stock both decrease in the *Regional eMobil* scenario.

Comparison of the two scenarios shows that the development of transport demand also plays a significant role in the future electricity demand of the transport sector. In the *Grenzenlos eMobil* scenario, the strong increase in kilometres travelled leads – despite the assumption of a particularly ambitious technical development (including trolleytrucks) – to a substantially higher need to expand the use of renewable energies compared to the *Regional eMobil* scenario. In view of the high overall need for renewable production capacities arising from all sectors with energy demand, the change in transport demand is a key factor of influence in the reduction of transport-related final energy demand. The decrease of this demand based on the development assumed in the *Regional eMobil* scenario would make fulfilment of the transport-related electricity demand using almost only renewable energies by 2050 significantly more feasible when a significantly lower demand is assumed.

1. Hintergrund und Zielstellung

1.1. Einleitung

Der Klimaschutz erfordert eine erhebliche Minderung der globalen Treibhausgasemissionen bis 2050. Zur Zielerreichung müssen die THG-Emissionen in Deutschland bis 2050 um 80 bis 95 % gegenüber dem Jahr 1990 gesenkt werden. Dies setzt einen bedeutenden Strukturwandel in allen energienachfragenden Sektoren voraus und erfordert eine frühzeitige Orientierung an den langfristigen Zielen. Insbesondere im Verkehrssektor stellt die notwendige Dekarbonisierung eine besondere Herausforderung dar, da einerseits weiterhin individuelle Mobilitätsbedürfnisse umfassend befriedigt und der notwendige Gütertransport sichergestellt werden sollen, gleichzeitig aber bislang eine sehr starke Bindung an fossile Energieträger beim Fahrzeugantrieb besteht. Hinsichtlich der Erreichung langfristiger Minderungsziele herrscht Einigkeit, dass diese im Verkehrssektor nur bei einem starken Einsatz von alternativen Antriebskonzepten und Kraftstoffen realisierbar sind. Eine besondere Bedeutung kommt dabei dem elektrischen Antrieb zu. Dieser ermöglicht es, unter der Voraussetzung einer zunehmenden Dekarbonisierung der Energiewirtschaft, auch im Verkehrssektor sich einer CO₂-Neutralität zu nähern. Gleichzeitig hat aber die zunehmende Elektrifizierung des Verkehrssektors bedeutende Auswirkungen auf die Stromnachfrage und damit den Energiesektor.

Elektromobilität steht momentan am Beginn des Markteintritts. Bis zum Jahr 2030 ist mit einer hohen Bedeutung der Elektromobilität zu rechnen. Jedoch bleiben voraussichtlich die Effekte auf die Treibhausgasbilanz des Verkehrssektors und die Auswirkungen auf die Stromwirtschaft in diesem Zeitraum verhältnismäßig gering. Wesentlich bedeutendere Effekte werden nach 2030 erwartet – bei einer höheren Anzahl an Elektrofahrzeugen und einem deutlich veränderten Strommarkt. Welche möglichen Wechselwirkungen sich unter diesen Voraussetzungen langfristig zwischen Verkehrs- und Energiesektor ergeben könnten, wurde bisher noch nicht näher untersucht.

1.2. Projektziele und Vorgehen

Wesentliche Forschungsfrage von *eMobil 2050* ist es, die möglichen Auswirkungen einer zunehmenden Elektrifizierung des Verkehrs insbesondere mit Blick auf die langfristigen Klimaschutzziele und unter der Annahme eines fortschreitenden Markterfolgs von elektrischen Antrieben für einen erweiterten Zeithorizont bis zum Jahr 2050 zu untersuchen.

Der Untersuchungsgegenstand im Projekt *eMobil 2050*, welcher jede Form der direkten Stromnutzung im Verkehr umfasst, wird durch den Begriff *Elektromobilität* – zumindest in seiner zur Zeit gängigen Bedeutung – nur unzureichend beschrieben, weshalb im Folgenden im Regelfall die Bezeichnung *elektrischer Verkehr* verwendet wird. Nur im Fall, dass im Folgenden explizit Bezug auf elektrisch betriebene Straßenfahrzeuge genommen wird, werden die Begriffe *Elektromobilität* bzw. *Elektrofahrzeuge* verwendet. *Elektrischer Verkehr* im Vorhaben *eMobil 2050* umfasst die Fahrzeugkategorien Pkw, motorisierte Zweiräder, Pedelecs, leichte und schwere Nutzfahrzeuge, Reise- und Linienbusse sowie den Schienenverkehr. Neben batterieelektrischen Antriebsvarianten werden je nach Fahrzeugkategorie auch teilelektrische Antriebskonzepte sowie die direkte Stromnutzung über einen Fahrdrat berücksichtigt. Die Betrachtung des elektrischen Verkehrs berücksichtigt damit sowohl bisherige als auch mögliche zukünftige Stromnachfrager im Verkehrssektor.

Neben dem elektrischen Verkehr entsprechend der oben gegebenen Definition wird ergänzend auch die Option des Einsatzes strombasierter Kraftstoffe in die Betrachtung mit einbezogen, sie wird im Folgenden jedoch nicht als *elektrischer Verkehr* im engeren Sinne verstanden.

Die Bewertung des möglichen Klimaschutzbeitrages von elektrischem Verkehr und strombasierten Kraftstoffen wird anhand einer integrierten Betrachtung von Fahrzeugtechnologie, Fahrzeugnutzung und dem Energiesektor durchgeführt. Dies wird als besonders wichtig erachtet, um die strategische Entwicklung von elektrischem Verkehr an den Langfristzielen zu orientieren und notwendige Rahmenbedingungen für einen möglichst hohen zukünftigen Klimaschutzbeitrag von elektrischem Verkehr frühzeitig zu identifizieren und den damit verbundenen Handlungsbedarf im Energiesektor aufzuzeigen.

Ziel des Forschungsvorhabens *eMobil 2050* ist es, unter der Prämisse einer zunehmenden Marktdurchdringung von elektrischem Verkehr in den verschiedenen Anwendungsbereichen die möglichen langfristigen Wechselwirkungen mit der Energiewirtschaft anhand von Szenariobetrachtungen aufzuzeigen und darzustellen unter welchen Bedingungen und in welchem Umfang elektrischer Verkehr zur Minderung der verkehrsbedingten Treibhausgasemissionen beitragen kann.

Die Auswirkungen einer zunehmenden Bedeutung elektrischer Antriebe auf die Energienachfrage, und die Treibhausgasemissionen werden in *eMobil 2050* mit dem Verkehrsmodell *TEMPS* (Abschnitt 1.3.1) sowie dem Strommarktmodell *PowerFlex* (Abschnitt 1.3.2), welche im Rahmen des Vorhabens maßgeblich weiterentwickelt wurden, untersucht.

Um möglichst plausible Annahmen bei der Szenarioausgestaltung hinsichtlich der verfügbaren Technologien sicherzustellen fand im Rahmen des Vorhabens eine intensive Diskussion zu möglichen technologischen Entwicklungen bei Fahrzeugen und Kraftstoffen (Kapitel 2) statt, die in den Aufbau einer umfassenden Technologiedatenbasis für Straßenfahrzeuge und differenzierte Annahmen zu möglichen Kraftstoffprozessketten mündeten. Den Schwerpunkt der Technologiediskussion stellten die Bereiche Pkw-Technologien (Abschnitt 2.2), Effizienztechnologien bei Nutzfahrzeugen (Abschnitt 2.3) sowie strombasierte Kraftstoffe (Abschnitt 2.4) dar. Die Erarbeitung der Annahmen im jeweiligen Themenfeld wurde durch Fachworkshops mit Experten aus Industrie und Wissenschaft ergänzt.

Ein weiterer zentraler Bestandteil des Vorhabens war der Szenario-Prozess (Kapitel 3) in dessen Verlauf Vertreter aus Wirtschaft und Wissenschaft im Rahmen von drei Workshops gemeinsam mögliche Entwicklungspfade im Verkehrssektor bis zum Jahr 2050 diskutierten und ausgehend von Zukunftsbildern konkrete Szenarien entwickelten, welche den Hintergrund für die Diskussion der Perspektiven von Elektromobilität darstellten. In einem ersten Schritt wurden durch die Szenario-Gruppe zentrale Einflussfaktoren auf den Verkehrssektor identifiziert und mögliche zukünftige Ausprägungen unter Berücksichtigung übergreifender Trends diskutiert. Die diskutierten Einflussgrößen bildeten die Grundlage für die Definition zweier konkreter *eMobil* Szenarien (Kapitel 4). Der auf dieser Basis ermittelte Strombedarf des Verkehrssektors bildet die Grundlage für die anschließende Betrachtung der Wechselwirkungen mit dem Stromsektor (Kapitel 5) in den beiden *eMobil* Szenarien. Für die differenzierte Abbildung der verkehrsbedingten Stromnachfrage (in stündlicher Auflösung) im Strommarktmodell *PowerFlex* werden detaillierte Annahmen zur Entwicklung von Ladeinfrastruktur, Ladeverhalten und Fahrzeugeinsatz getroffen (Abschnitt 5.2). Ferner wurden Festlegungen zur Entwicklung des Stromsektors bis 2050 im Vorfeld der Modellrechnungen getroffen (Abschnitt 5.3). In den *PowerFlex*-Modellläufen wird schließlich aufgezeigt, welche Effekte eine zunehmende Stromnachfrage von elektrischem Verkehr auf die Stromerzeugung hat und wie durch eine Veränderung des Kraftwerksparks ein Anstieg der Treibhausgasemissionen bei zusätzlicher Stromnachfrage vermieden werden kann (Abschnitt 5.4). Die Effekte einer zusätzlichen Berücksichtigung von strombasierten Kraftstoffen wird im Rahmen ergänzender Sensitivitätsanalysen betrachtet (Abschnitt 5.5).

Unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen von elektrischem Verkehr und dem Stromsektor lässt sich schließlich die Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Verkehrs- und Stromsektors für die *eMobil* Szenarien bis zum Jahr 2050 quantifizieren (Kapitel 6). Der Effekt unterschiedlicher EE-Ausbauszenarien auf die Gesamtemissionen wird im Vergleich der Szenarien deutlich. Ferner wird der mögliche zusätzliche Beitrag von strombasierten Kraftstoffen zur Minderung der Treibhausgasemissionen quantifiziert.

Abschließend werden die zentralen Ergebnisse des Vorhabens *eMobil 2050* zusammengefasst und in den Kontext bestehender energie- und klimapolitischer Ziele gesetzt sowie die Grenzen und Unsicherheiten der durchgeführten Analysen benannt (Kapitel 7).

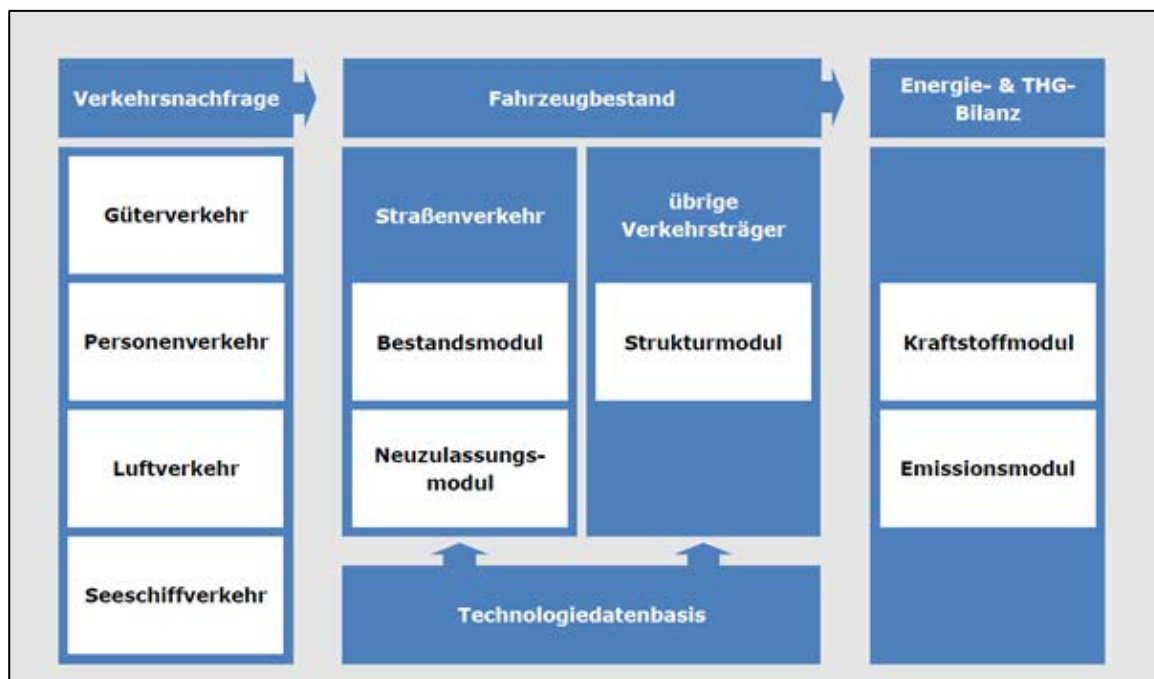
1.3. Eingesetzte Modelle

Im folgenden Abschnitt werden die eingesetzten Modelle *TEMPS* und *PowerFlex* kurz beschrieben. Dabei dient *TEMPS* zur Berechnung der Szenarien im Verkehr, während *PowerFlex* die Effekte im Stromsektor modelliert. Über eine Schnittstelle werden die Ergebnisse aus *TEMPS* an *PowerFlex* übergeben.

1.3.1. TEMPS

Das am Öko-Institut entwickelte Modell *TEMPS*³ ermöglicht es, den Endenergiebedarf und die Treibhausgasemissionen des Verkehrs für unterschiedliche Szenarien zu quantifizieren und dabei Veränderungen der Verkehrsnachfrage, im Fahrzeugbestand und beim Kraftstoffeinsatz abzubilden. Alle Entwicklungen können dabei in jahresfeinen Schritten dargestellt werden. Das Modell besteht aus den drei Komponenten Verkehrsnachfrage, Fahrzeugbestand, Energie- und Treibhausgasbilanz.

Abbildung 1-1: Schematische Darstellung des Modells TEMPS



Quelle: Eigene Darstellung

³ Transport **E**missions and **P**olicy **S**cenarios.

Verkehrsnachfrage

Szenarien zur Verkehrsnachfrage im Personen- und Güterverkehr werden parametergestützt auf Basis der Entwicklung zentraler Mobilitätskenngrößen (Wegeanzahl, Wegelängen, Modal Split im Personenverkehr bzw. Aufkommen, Transportweiten, Modal Split im Güterverkehr) ermittelt (siehe Kapitel 4) und gehen in *TEMPS* als Inputgröße ein.

Technologieentwicklung und Fahrzeugbestand

Die TechnolgieDatenbasis bildet die Grundlage für die Simulation der zukünftigen Entwicklung an Fahrzeugtechnologien. Sie dokumentiert mögliche technische Entwicklungen des jeweiligen Verkehrsträgers bis zum Jahr 2050 differenziert nach Größenklasse und Antriebskonzept und ist zumindest für Straßenfahrzeuge mit Kostenannahmen versehen (siehe Kapitel 2).

Die Simulation der Fahrzeugbestandsentwicklung bis zum Jahr 2050 erfolgt mit dem Bestandsmodul des *TEMPS* -Modells. Den Ausgangspunkt der Modellierung stellen die ermittelte Verkehrsnachfrage sowie die zur Verfügung stehenden Technologieoptionen dar.

Für den Straßenverkehr erfolgt die Darstellung im Modell *TEMPS* detailliert auf Fahrzeugebene. Für die übrigen Verkehrsträger wird die Entwicklung in *TEMPS* auf einer aggregierten Systemebene modelliert. Auf diese beiden Berechnungspfade wird im Folgenden kurz eingegangen.

Die künftige Effizienzentwicklung im Straßenverkehr wird über ein Neuzulassungs- und Bestandsmodell berechnet. Dadurch kann die Wirkung von beispielsweise CO₂-Emissionsstandards oder von Maßnahmen zur Förderung alternativer Technologien auf die Bestandszusammensetzung im Modell abgebildet werden.

Im Neuzulassungsmodul wird in Abhängigkeit von Inputgrößen wie der Verkehrsnachfrage und der Marktdurchdringung verschiedener Antriebstechnologien in Jahresschritten die Zusammensetzung der Neuzulassungen ermittelt. Das Bestandsmodul berechnet mittels spezifischer Überlebensraten der Fahrzeuge und durchschnittlichen Fahrleistungen den Bestand – differenziert nach Größenklasse und Antriebskonzept. Die realisierbaren Effizienzentwicklungen der einzelnen Fahrzeugklassen im Straßenverkehr sind differenziert nach Größenklassen in der TechnolgieDatenbank zusammen mit Kostenannahmen hinterlegt. Die tatsächlich realisierte Effizienzentwicklung wird im Neuzulassungsmodul bestimmt.

Im Gegensatz zum Straßenverkehr setzen z. B. beim Schienenverkehr Effizienzmaßnahmen nicht nur beim einzelnen Fahrzeug, sondern auch auf Systemebene an. Daher wird für die übrigen Verkehrsträger kein Bestand berechnet, sondern die Entwicklung der Verbräuche auf Systemebene ermittelt – d. h. es werden direkt Annahmen zur Technologieentwicklung je Verkehrsträger hinterlegt. Dieser einfachere Ansatz wird auch dann verwendet, wenn die für eine Bestandsmodellierung benötigten Daten nicht vorhanden sind bzw. der hohe Detailgrad der Modellierung nicht angemessen ist.

Endenergiebedarf und Treibhausgasemissionen

Die Entwicklung des Endenergiebedarfs des Verkehrs steht in unmittelbarem Zusammenhang mit der Modellierung von Verkehrsnachfrage und Fahrzeugbestand.

Der spezifische Energieverbrauch aller Fahrzeuge im Bestand ist differenziert nach Neuzulassungsjahr, Antriebskonzept und Größenklasse in der TechnolgieDatenbasis dokumentiert. In Verbindung mit der Fahrleistung, die durch das jeweilige Fahrzeug erbracht wird, lässt sich schließlich für alle Fahrzeuge im Bestand der Endenergiebedarf differenziert nach dem

jeweils eingesetzten Endenergieträger ausweisen und für den gesamten Zeitverlauf darstellen. Eine Besonderheit ergibt sich für den Einsatz von Plug-In-Hybridfahrzeugen, deren elektrischer Fahranteil mit Hilfe des Strommarktmodells *PowerFlex* ermittelt wird und über eine Schnittstelle in *TEMPS* integriert wird.

1.3.2. PowerFlex

Allgemeine Modellbeschreibung

Das am Öko-Institut entwickelte Strommarktmodell *PowerFlex* ist ein Fundamentalmodell, welches thermische Kraftwerke, die Stromeinspeisung aus erneuerbaren Energien, Pumpspeicherkraftwerke und flexible Stromverbraucher kostenminimal einsetzt, um die Stromnachfrage und den Bedarf an Regelleistung zu decken.

Die einzelnen Kraftwerke werden im Modell detailliert mit Hilfe technischer und ökonomischer Parameter abgebildet. Thermische Kraftwerke mit einer installierten elektrischen Leistung größer 100 MW werden blockscharf und mit einem individuellen Wirkungsgrad erfasst.

Kleinere thermische Stromerzeugungsanlagen werden in technologie- und baujahrspezifischen Gruppen zusammengefasst und mit Hilfe von typspezifischen Parametern charakterisiert. Diese Anlagen können ihre Leistung entlang eines festen Lastgradienten über den gesamten Leistungsbereich ändern. Gleiches gilt für Pumpspeicherkraftwerke, die in Gruppen mit einem vergleichbaren Verhältnis von Speicherkapazität zu installierter elektrischer Leistung zugeordnet werden. Insgesamt setzt sich der im Modell *PowerFlex* abgebildete deutsche Kraftwerkspark für 2010 aus rund 250 Einzelblöcken und 150 Technologieaggregaten zusammen. *PowerFlex* berücksichtigt keine Netzrestriktionen, es wird angenommen, dass alle Kraftwerke uneingeschränkt von der regionalen Verteilung die Stromnachfrage erfüllen können. Dies bedeutet, dass die Modellierung tendenziell die Integration von erneuerbaren Energien leicht überschätzt, da mögliche Netzengpässe nicht explizit abgebildet werden. In Abschnitt 5.3 wird detaillierter auf die Annahmen zum fossilen und erneuerbaren Kraftwerkspark und zur Stromnachfrage für dieses Projekt eingegangen.

Biomassekraftwerke, die Biogas, Holz oder Pflanzenöl einsetzen, werden als Technologieaggregate als Teil des thermischen Kraftwerksparks im Modell abgebildet, da ihr Einsatz insbesondere in zukünftigen Szenarienjahren als flexibel angenommen wird. Für die dargebotsabhängigen erneuerbaren Energiequellen Laufwasser, Offshore Wind, Onshore Wind und Photovoltaik wird das maximal zur Verfügung stehende Stromangebot aus skalierten generischen oder historischen stündlich aufgelösten Einspeiseprofile vorgegeben. Die tatsächlich eingespeiste Menge an Wasser-, Wind- und Photovoltaikstrom wird modellendogen bestimmt, d. h. dargebotsabhängiger erneuerbarer Strom kann auch als überschüssig identifiziert werden, z. B. bei negativer Residuallast und unzureichender Speicherkapazität.

Das Erzeugungsprofil für Strom aus Kraft-Wärme-Kopplung setzt sich aus einem typischen Fernwärmeprofil und einer angenommenen Gleichverteilung für industrielle KWK-Anlagen zusammen. Für jeden Hauptenergieträger ergibt sich somit ein individuelles KWK-Profil. Für must-run-Kraftwerke, wie z. B. Gichtgas oder Müllverbrennungsanlagen, wird eine gleichverteilte Stromeinspeisung unterstellt.

Die Stromnachfrage wird analog zur fluktuierenden Stromeinspeisung aus erneuerbaren Energien in stündlicher Auflösung exogen vorgegeben. Das Nachfrageprofil setzt sich aus der Netzlast des betrachteten Jahres und einer angenommenen Gleichverteilung des Industriestromanteils zusammen.

Ein zentraler Bestandteil des Modells ist die Abbildung von Flexibilität auf der Nachfrageseite durch Speicher bzw. Lastmanagement. Diese werden im Modell mit Hilfe der installierten elektrischen Leistung, der Speicherkapazität und der zu deckenden Lastkurve beschrieben. Als flexible Verbraucher werden beispielsweise Prozesse mit einem thermischen Speicher, wie z. B. Geräte zur elektrischen Kälte- und Wärmebereitstellung, oder mit einem zeitvariablen Einsatz, wie z. B. smart charging von Elektrofahrzeugen, betrachtet. Die Darstellung des elektrischen Verkehrs in *PowerFlex* wird im weiteren Verlauf dieser Modellbeschreibung noch detaillierter beschrieben, ebenso wie die Implementierung der strombasierten Kraftstofferzeugung mittels Power-to-Gas/Power-to-Liquid.

Auf Basis einer vollständigen Voraussicht wird dann im Rahmen einer linearen oder gemischt-ganzzahligen Optimierung der kostenminimale Einsatz von thermischen Kraftwerken, Stromeinspeisung aus erneuerbaren Energien und Pumpspeicherkraftwerken unter Berücksichtigung technischer und energiewirtschaftlicher Nebenbedingungen mit dem Modell *PowerFlex* bestimmt.

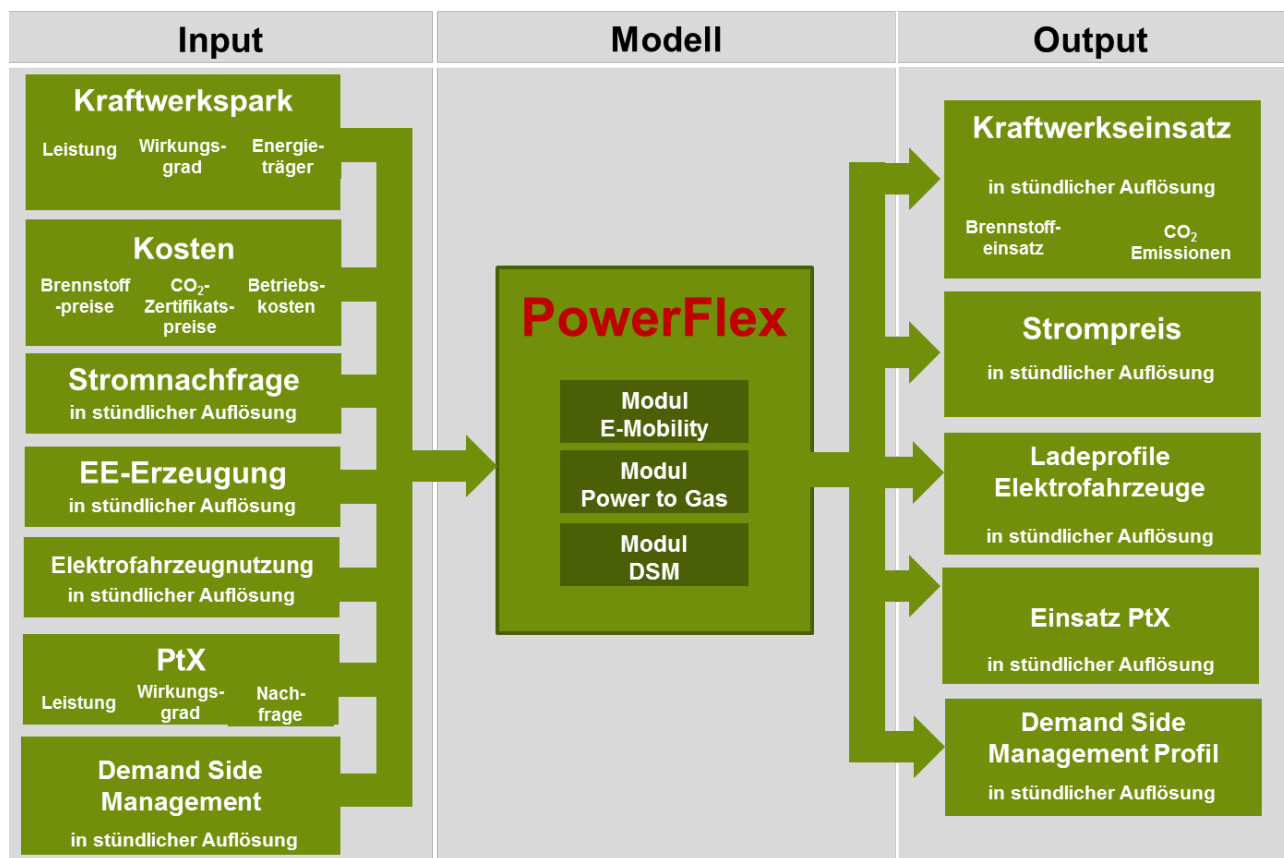
Das Optimierungsproblem ist in der Programmiersprache GAMS implementiert und wird mit Hilfe des Simplex Algorithmus gelöst.

Die wesentlichen Inputdaten sind: Stromnachfrageprofil (stündlich aufgelöst), EE-Einspeisepprofile (stündlich aufgelöst), techno-ökonomische Parameter des thermischen Kraftwerksparks (z. B. Wirkungsgrad, Brennstoffpreise, CO₂-Preise, Emissionsfaktor, variable Kosten), techno-ökonomische Parameter von Speicherkraftwerken (z. B. Speicherkapazität, Wirkungsgrad, variable Kosten), techno-ökonomische Parameter von flexiblen Verbrauchern und Elektromobilität (z. B. Speicherkapazität, Wirkungsgrad, variable Kosten).

PowerFlex liefert die folgenden relevanten Ergebnisse (in stündlicher Auflösung): Einsatzprofile von Kraftwerken (inkl. Benutzungsstunden und Erlösen am Strommarkt) sowie Speichern und flexiblen Verbrauchern, Strompreise, Brennstoffmix und CO₂-Emissionen.

Abbildung 1-2 zeigt eine schematische Darstellung der wichtigsten Input- und Output-Größen für die Strommarktmodellierung in *PowerFlex*.

Abbildung 1-2: Schematische Darstellung von Input- und Output-Größen der Strommarktmodellierung mit PowerFlex



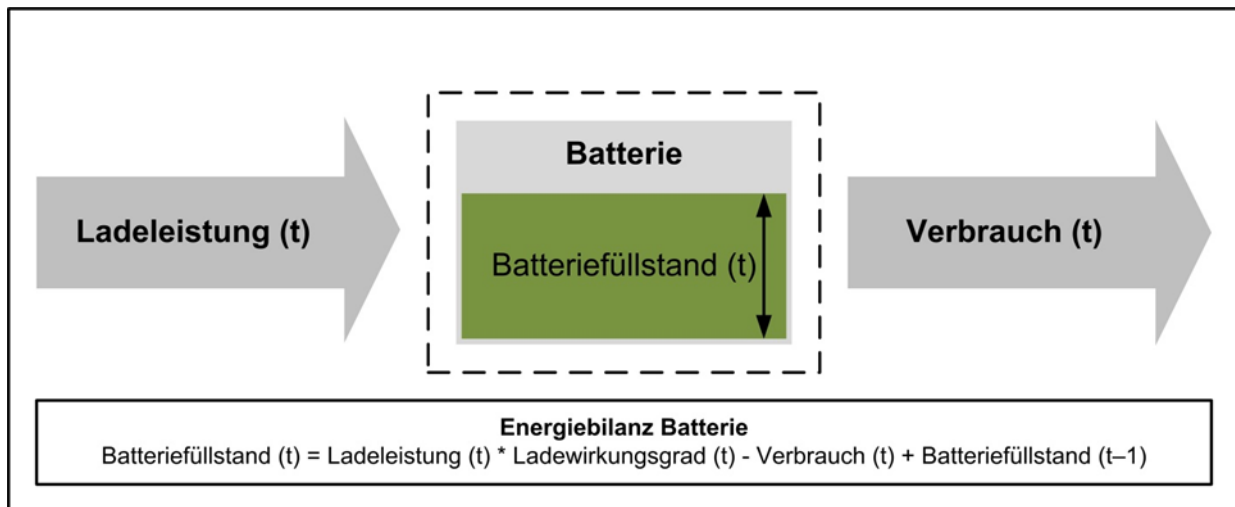
Quelle: Eigene Darstellung

Modul Elektromobilität im Strommarktmodell PowerFlex

Im Rahmen des BMU-Projektes OPTUM (Hacker et al. 2011) wurde ein Modul zur detaillierten Abbildung des Ladeverhaltens von Elektrofahrzeugen und den damit verbundenen Auswirkungen auf die Stromerzeugung für das *PowerFlex*-Modell entwickelt. Damit kann eine große Anzahl verschiedener Fahrzeugnutzungsprofile im Modell stundenscharf verarbeitet werden. Dies erlaubt die Abbildung detaillierter Inputdaten für die Elektromobilität. Im Modul E-Mobilität sind sowohl reine batterieelektrische Fahrzeuge als auch Plug-In-Hybridfahrzeuge, die einen Teil ihres Energiebedarfs durch Kraftstoff decken können, implementiert.

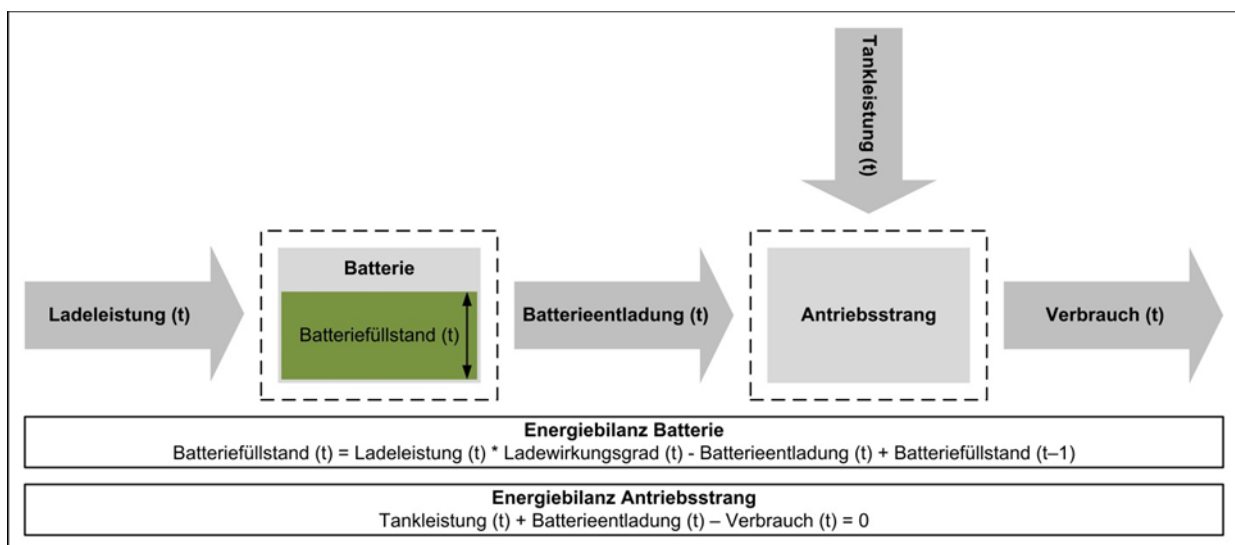
Der Stromverbrauch für die Batterieladung wird mit Lademanagement (preisoptimiert gesteuert) in die Modellierung des Strommarkts integriert. Pro Fahrzeugnutzungsprofil werden zwei Zeitreihen an das Strommarktmodell übergeben: die Fahrleistung jedes Fahrzeugtyps pro Stunde und den Standort des Fahrzeugs für die jeweilige Stunde. Zusammen mit den Informationen über den Verbrauch pro Kilometer und die Ladeleistungen an den jeweiligen Standorten kann so im Modell ermittelt werden, wann im Rahmen des Lademanagements welches Fahrzeug geladen werden sollte. In Abschnitt 5.2 wird beschrieben, wie die Fahrprofile und die Ladeinfrastruktur für die einzelnen betrachteten Szenarien entwickelt wurden. Darüber hinaus wird in den Abschnitten 5.2.1 und 5.2.2 darauf eingegangen, welchen Einfluss verschiedene Annahmen zur Flexibilität der Nutzer und zur Verfügbarkeit der Ladeinfrastruktur auf das realisierbare Lademanagement haben.

Abbildung 1-3: Schematische Darstellung der Modellierung batterieelektrischer Pkw im Modul Elektromobilität im Strommarktmodell PowerFlex



Quelle: Hacker et al. (2011)

Abbildung 1-4: Schematische Darstellung der Modellierung von Plug-In-Hybridfahrzeugen im Modul Elektromobilität im Strommarktmodell PowerFlex



Quelle: Hacker et al. (2011)

Abbildung 1-3 und Abbildung 1-4 zeigen die in der Modellierung der batterieelektrischen Pkw und der Plug-In-Hybridfahrzeuge im Fall des Lademanagements implementierten Nebenbedingungen. Für batterieelektrische Fahrzeuge kann das Modell die in Abbildung 1-3 dargestellten Größen Ladeleistung und Batteriefüllstand zu jedem Zeitpunkt bestimmen. Dabei ist die dargestellte Bilanzgleichung für die Batterie einzuhalten, nach der sich der Batteriefüllstand zu einem Zeitpunkt aus der Differenz des Energieflusses in die Batterie (Ladeleistung*Ladewirkungsgrad) und dem Energiefluss aus der Batterie (Verbrauch des Autos beim Fahren) sowie dem Batteriefüllstand im vorigen Zeitschritt ergibt. Die Ladeleistung ist dabei beschränkt durch die zum jeweiligen Zeitpunkt

zur Verfügung stehende Anschlussleistung und durch die Bedingung, dass während des Fahrens nicht geladen werden kann.

Für die Plug-In-Hybridfahrzeuge gelten zwei Bedingungen: Zum einen gilt eine ähnliche Bilanzgleichung wie für batterieelektrische Fahrzeuge. Der Strom, der die Batterie verlässt (Batterieentladung), entspricht hier jedoch nicht genau dem vorgegebenen Verbrauch zum Antrieb der Räder, sondern dieser kann entweder aus der Batterieentladung oder aus einer ebenfalls vom Modell bestimmbaren Tankleistung gedeckt werden. Da diese Tankleistung im Modell wiederum mit hohen Kosten behaftet ist, wird jedoch das elektrische Laden, wann immer es möglich ist, vorgezogen.

Die Optimierungsaufgabe ist weiterhin die Minimierung der kurzfristigen Stromerzeugungskosten, wobei nun auch Strom für die Ladung der Fahrzeugbatterien produziert werden muss. Gleichzeitig muss das Modell die Restriktionen für die Fahrzeuge einhalten: Für den zeitlich vorgegebenen Energieverbrauch der Fahrzeuge beim Fahren muss der Füllstand der Batterie ausreichen. Das Modell kann über die Höhe des Batteriefüllstands in jeder Stunde entscheiden, indem es über die Ladeleistung in jeder Stunde (im Rahmen der in jeder Stunde verfügbaren Anschlussleistung) entscheidet. Die Ladeleistung ist wiederum ein – zeitlich variabler – Teil der Stromnachfrage, die mit dem Optimierungskalkül zu möglichst niedrigen Kosten gedeckt werden soll. Dies führt dazu, dass das Lademanagement die Ladung der Batterien in Stunden mit möglichst niedrigen Stromerzeugungskosten verschiebt.

Modul Power-to-Gas/Power-to-Liquid⁴

Das Modul Power-to-Gas im Modell *PowerFlex* bildet die unterschiedlichen Möglichkeiten ab, die Nachfrage an strombasierten Kraftstoffen mittels Elektrolyse und nachgelagerter Verfahren zu decken. Hierbei werden Wasserstoff, Methan und Flüssigkraftstoffe unterschieden und mit den jeweiligen Prozesswirkungsgraden berücksichtigt. Abschnitt 2.4 beschreibt die Entwicklung der Szenarien für Anwendung, Erzeugung und Nachfrage an strombasierten Kraftstoffen für *eMobil 2050* und Abschnitt 4.8.1 gibt einen Überblick über die Parametrisierung, welche in *PowerFlex* implementiert wurde. Hier soll kurz das Zusammenspiel von Strommarkt und Power-to-Gas im Modell *PowerFlex* beschrieben werden.

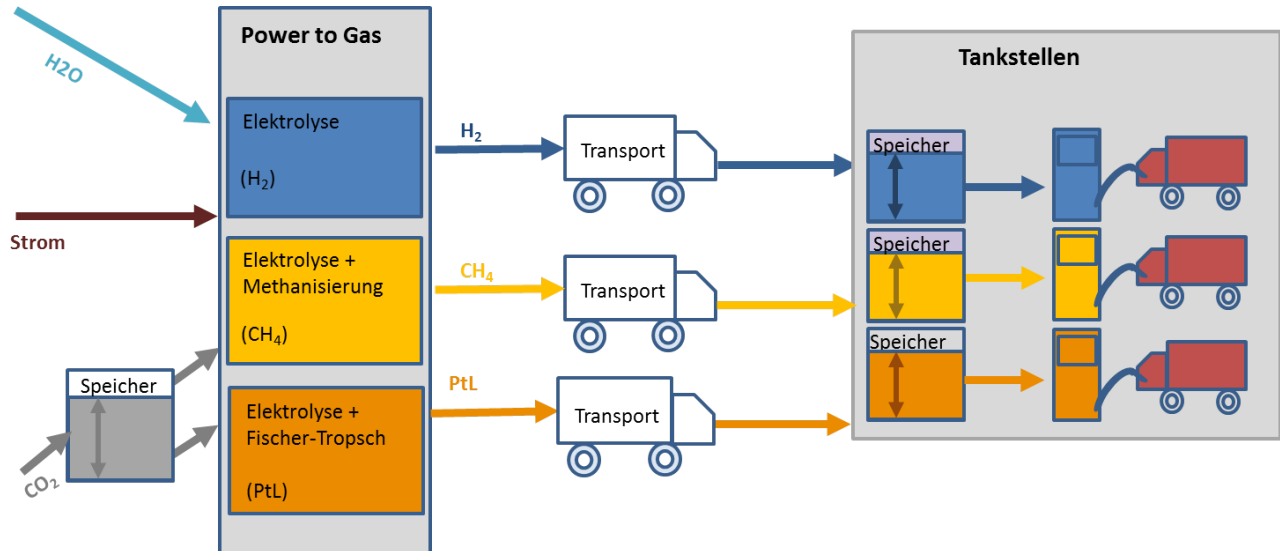
Abbildung 1-5 zeigt eine schematische Darstellung der Modellierung von Power-to-Gas in *PowerFlex*. Für die einzelnen Kraftstoffe kann entweder eine jährliche Gesamtnachfrage oder aber eine stündliche Nachfrage vorgegeben werden. Durch Zwischenspeicherung des jeweiligen Kraftstoffs wird eine flexible Erzeugung ermöglicht, welche soweit wie möglich den Strompreis in den jeweiligen Stunden berücksichtigt, um eine möglichst günstige Erzeugung zu erreichen. Speicherverluste und Transportverluste können je nach angewandeter Technologie implementiert werden. Die verfügbare Menge an CO₂ wird nicht direkt im Modell vorgegeben, sondern durch die Parametrisierung der Elektrolyse-Leistungen und Kraftstoffnachfragen berücksichtigt. Die verfügbare Menge an Wasser ist nicht begrenzt.

Neben der Vorgabe einer Nachfrage kann das Modul auch so eingesetzt werden, dass nur in Stunden mit überschüssigem Dargebot an erneuerbaren Energien dieses dazu eingesetzt wird, beispielsweise Methan zu erzeugen. Hierzu wird im Modell als Anreiz ein Bonus für Power-to-Gas eingesetzt, welcher marginal höher als die jeweiligen Betriebskosten ist. Da in *PowerFlex* die Gesamtkosten minimiert werden, würden ohne einen solchen Anreiz die EE-Überschüsse nicht genutzt werden. Der eingesetzte Anreiz löst die Power-to-Gas Erzeugung in den entsprechenden Stunden aus. Abhängig von der installierten Leistung der Elektrolyseure kann somit ein Teil der

⁴ In der weiteren Beschreibung des Moduls wird zur besseren Lesbarkeit ausschließlich die Bezeichnung Power-to-Gas verwendet. Das beschriebene Modul ist jedoch in der Lage, sowohl gasförmige als auch flüssige Kraftstoffe zu erzeugen.

ansonsten überschüssigen erneuerbaren Energien eingesetzt werden, um strombasierte Kraftstoffe zu erzeugen.

Abbildung 1-5: Schematische Darstellung Modellierung von Power-to-Gas/Power-to-Liquid im Strommarktmodell PowerFlex



Quelle: Eigene Darstellung

2. Technologien: Fahrzeuge und Kraftstoffe

2.1. Hintergrund

Der zukünftige Einsatz von Fahrzeugtechnologien und alternativen Kraftstoffen im Verkehrssektor hängt maßgeblich von der weiteren technologischen Entwicklung ab. Angesichts des weitreichenden Betrachtungszeitraums im Projekt *eMobil 2050* besteht die Herausforderung, ausgehend vom aktuellen Stand der Technik konsistente Entwicklungspfade aufzuzeigen, die die Grundlage für die Ableitung von plausiblen langfristigen Marktszenarien darstellen können.

Im Rahmen des Vorhabens *eMobil 2050* fand daher eine intensive fachliche Auseinandersetzung mit den Perspektiven konventioneller und alternativer Fahrzeugantriebs- und Effizienztechnologien sowie mit möglichen Prozessketten zur Herstellung alternativer Kraftstoffe statt. Neben einer umfassenden Literaturrecherche und zahlreichen Experteninterviews wurden im Rahmen dieses Prozesses ergänzend drei Fachworkshops mit Vertretern aus Industrie und Wissenschaft zu den Themen Pkw-Technologien, Technologien bei schweren Nutzfahrzeugen und zu strombasierten Kraftstoffen durchgeführt. Ziel der Fachworkshops war es, die in der Datenbank erfassten Technologiedaten zu validieren, das methodische Vorgehen zu diskutieren und möglichst plausible Annahmen zur Entwicklungen von Effizienztechnologien bei Pkw und Nutzfahrzeugen mit einem besonderen Fokus auf alternative Antriebstechnologien sowie von strombasierten Kraftstoffen als weitere Möglichkeit der (indirekten) Stromnutzung im Verkehrssektor abzuleiten. Unter Berücksichtigung der Anregungen aus den Fachworkshops wurden die Technologieannahmen für die betrachteten Fahrzeugkategorien und Kraftstoffe überarbeitet und in zwei Working Paper zu Fahrzeugtechnologien und strombasierten Kraftstoffen (Hülsmann et al. 2014 und Kasten et al. 2013) umfassend dokumentiert.

Hinweis: Es ist zu beachten, dass die getroffenen Annahmen zur Technologieentwicklung, welche in den genannten Working Paper ausführlich dokumentiert sind und die Grundlage für die Berücksichtigung von Fahrzeug- und Kraftstofftechnologien im Projekt *eMobil 2050* darstellen, die Einschätzung der Autoren dieser Studie widerspiegeln und sich nicht zwangsläufig mit der Einschätzung aller beteiligten Fachexperten (siehe Fachworkshops) deckt. Die Annahmen zu möglichen technologischen Entwicklungen im Projekt *eMobil 2050* sind somit nicht als uneingeschränkter fachlicher Konsens der beteiligten externen Experten zu verstehen. Unter Berücksichtigung des langfristigen Betrachtungszeitraums und den damit verbundenen Unsicherheiten stellen die Annahmen jedoch mögliche Entwicklungspfade dar, die als plausibel und konsistent eingeschätzt werden.

Die Ergebnisse dieses Arbeitsschritts bilden die Grundlage für die Definition der Technologieentwicklung in den *eMobil 2050* Szenarien (siehe Kapitel 2.2 - 2.4 sowie Abschnitt 4.7 bzw. 4.8).

2.2. Personenkraftwagen

Die im Rahmen dieses Vorhabens entwickelte Pkw-Technologiedatenbank ermöglicht es, technologische Potenziale zur Minderung der CO₂-Emissionen der Neuzulassungen mit konventionellen und alternativen Antriebskonzepten bis 2050 zu bestimmen. Sie stellt damit die Datengrundlage für die Abbildung der technologischen Entwicklung von Pkw in den betrachteten Szenarien dar. Im Folgenden wird zunächst auf den Fachworkshop zu Pkw-Technologien eingegangen, bevor der Aufbau, die berücksichtigten Technologien und das methodische Konzept der Technologiedatenbank erläutert werden.

2.2.1. Fachworkshop „Langfristige Entwicklung konventioneller und alternativer Pkw-Technologien“

Ziel des Fachworkshops war es, die weiteren Effizienzpotenziale von konventionellen Pkw, wie auch die Entwicklungspotenziale von alternativen Antriebsoptionen sowie die damit verbundenen Zusatzkosten für den Betrachtungszeitraum bis zum Jahr 2050 vor dem Hintergrund plausibler Fahrzeugkonfigurationen zu diskutieren.

Die Diskussionsgrundlage stellte ein im Vorfeld des Workshops erarbeitetes Arbeitspapier dar, welches das methodische Vorgehen erläutert, Basisfahrzeuge für unterschiedliche Antriebsoptionen definiert und die Entwicklungsperspektiven unterschiedlicher Effizienz- und Antriebstechnologien diskutiert. Besonderes Augenmerk wird dabei auf die Effizienzpotenziale, die Wechselwirkung von Technologien, den Zeitpunkt der voraussichtlichen Marktverfügbarkeit und die mögliche Kostenentwicklung gerichtet. Die diskutierten Fahrzeugkonzepte umfassen konventionelle Otto-, Diesel- und Erdgas-Pkw sowie alternative rein batterieelektrische Fahrzeuge, Plug-In-Hybridfahrzeuge, Elektrofahrzeuge mit Range Extender und Brennstoffzellenfahrzeuge.

Folgende Themenblöcke strukturierten den Fachworkshop und wurden jeweils auf Basis eines Fachinputs des Projektteams mit den Experten diskutiert:

- Methodik zur Ermittlung des spezifischen Energieverbrauchs und der assoziierten Technologiekosten (Kostenkurven) für die betrachteten Fahrzeugvarianten bis zum Jahr 2050;
- Definition von Basisfahrzeugen mit konventionellem und alternativem Antrieb, die jeweils aktuelle marktgängige Fahrzeuge repräsentieren;
- Perspektiven von nicht-motorischen Effizienztechnologien;
- Perspektiven von Effizienztechnologien bei verbrennungsmotorischen Antrieben;
- Status quo, Herausforderungen und Perspektiven von alternativen Antriebstechnologien.

Am Fachworkshop zu Pkw-Technologien waren Experten folgender Organisationen beteiligt:

- Robert Bosch GmbH
- TNO
- FEV GmbH
- Volkswagen AG
- BMW Group
- The International Council on Clean Transportation – ICCT
- Daimler AG

Die Anmerkungen der Experten zu den Technologieannahmen für Pkw fanden Eingang in eine überarbeitete Fassung des Working Paper (Hülsmann et al. 2014), welches die Grundlage für die technologiebezogenen Annahmen für Pkw im Projekt *eMobil 2050* darstellt.

2.2.2. Aufbau der Fahrzeugtechnologiedatenbank

Wesentliche Voraussetzung für die Ermittlung bestimmter Technologien zur Minderung des Energieverbrauchs und der Investitionskosten bis 2050 war eine intensive Literaturrecherche. Wichtige Referenzen zur Bestimmung der Effizienztechnologien und Herstellereinstellungen der

konventionellen Pkw sowie der Konfigurationen der alternativen Antriebskonzepte bis 2050 sind die amerikanische NAS Studie (NRC 2013), die europäische Studie im Auftrag der European Climate Foundation (Cambridge econometrics and Ricardo-AEA 2013), die sich u. a. auf den Bericht von Smokers et al. (2011) bezieht. Zur Einordnung der Komponenten der konventionellen und alternativen Basisfahrzeuge wurde die DLR Studie (Mock 2011) sowie für die Bestimmung der technologischen Perspektiven von Batterien und deren Kosten die Studie von Duleep et al. (2011) und die Technologie-Roadmap vom Fraunhofer-ISI (Thielmann et al. 2012) als zentrale Referenzen hinzugezogen. Die getroffenen Annahmen und Ergebnisse der Technologiedatenbank wurden zudem im oben genannten Fachworkshop (siehe Abschnitt 2.2.1) und in mehreren Experteninterviews diskutiert und dementsprechend überarbeitet. Dabei konnten auch zentrale Fragestellungen und Unsicherheiten über zukünftige technologische Entwicklungen ermittelt werden.

2.2.2.1. Antriebskonzepte

In diesem Vorhaben wird bei den Pkw zwischen vier Antriebskonzepten unterschieden:

- verbrennungsmotorisches Fahrzeug mit Diesel, Benzin oder Erdgas (CNG) als Kraftstoff und Hybridfahrzeug (ICEV/HEV)
- batterieelektrisches Fahrzeug (BEV)
- Plug-In-Hybridfahrzeug (PHEV)
- Elektrofahrzeug mit Range Extender (REEV).

Die folgenden Abschnitte geben einen Überblick über die grundsätzlichen Eigenschaften der verbrennungsmotorischen und alternativen Antriebskonzepte.

Verbrennungsmotorische Antriebskonzepte

Zur Kategorie der verbrennungsmotorischen Pkw (Benzin, Diesel, CNG) gehören auch die Hybridfahrzeuge, deren Batterien über regeneratives Bremsen geladen werden. Hybrid elektrisches Fahren wird hier als Effizienztechnologie des verbrennungsmotorischen Fahrzeugs angesehen und daher nicht als zusätzliches Antriebskonzept konfiguriert, da Hybridfahrzeuge ausschließlich auf dem Einsatz konventioneller Kraftstoffe basieren. Bei Erdgasfahrzeugen wird die gleiche Entwicklung wie bei Pkw mit Benzin bis 2050 angenommen. Daher werden diese nicht separat in den weiteren Ausführungen ausgewiesen.

Alternative Antriebskonzepte

Die in diesem Vorhaben berücksichtigten alternativen Antriebskonzepte sind elektrische und (teil-) elektrische Antriebskonzepte. Batterieelektrische Fahrzeuge verfügen über einen rein elektrischen Antrieb mit einem leistungsstarken elektrischen Motor. Im Vergleich zu den anderen Antriebskonzepten weist das BEV durch den effizienten Motor und durch regeneratives Bremsen den höchsten Tank-to-Wheel Wirkungsgrad auf. Die Herausforderung liegt vor allem bei der Batterietechnologie und der damit verbundenen eingeschränkten Reichweite und den hohen Batteriekosten.

Das Plug-in-Hybridfahrzeug hat einen konventionellen und elektrischen Antriebsstrang sowie einen Benzin- oder Dieseltank und eine Batterie zur elektrischen Energiespeicherung. Der PHEV kann mit serielltem Hybridantrieb (siehe REEV) oder als Parallelhybrid konfiguriert werden. Als Parallelhybrid können die beiden Antriebe beim Fahren kombiniert oder getrennt eingesetzt werden. Der Verbrennungsmotor unterstützt den Elektromotor, sobald die Batteriekapazität erschöpft ist oder eine höhere Leistung benötigt wird. Im Vergleich zum BEV ist die elektrische Reichweite des PHEV im Regelfall wesentlich geringer und an durchschnittliche Tagesgänge

angepasst. Die benötigte Batteriekapazität ist entsprechend geringer und die Batteriekonfiguration leistungsorientierter ausgerichtet (IEA 2011). Der Energieverbrauch im rein elektrischen Fahrmodus liegt im Bereich des BEV und der Verbrauch im konventionellen hybriden Fahrmodus im Bereich des HEV (Vollhybrid) (NAS 2013). Aufgrund des höheren Batteriegewichts beim PHEV gegenüber dem HEV kann der konventionelle Energieverbrauch geringfügig über dem des HEV liegen. Insgesamt ist der Tank-to-Wheel Gesamtwirkungsgrad gegenüber dem BEV geringer, da nur ein Teil der Fahrleistung im elektrischen Modus erfolgt, aber wesentlich höher als beim HEV.

Das Elektrofahrzeug mit Range Extender fährt überwiegend im elektrischen Modus, da es typischerweise eine größere Batterie als ein PHEV hat. Der Verbrennungsmotor wird nur dann eingesetzt, wenn die Batteriekapazität erschöpft ist. Der REEV hat einen seriellen Hybridantrieb und wird daher vollständig über den elektrischen Motor angetrieben. In der Regel ist die elektrische Reichweite höher im Vergleich zum PHEV und geringer gegenüber dem BEV. Aufgrund des seriellen Hybridantriebs verbraucht der REEV im konventionellen hybriden Fahrmodus mehr als der PHEV und verbrennungsmotorische Fahrzeuge. Insgesamt ist der durchschnittliche Energieverbrauch auch vom Nutzungsprofil abhängig. Sofern beim Range Extender der Verbrennungsmotor kaum eingesetzt wird und das Fahrzeug vorwiegend im elektrischen Fahrmodus betrieben wird, kann ein dem BEV ähnlich niedriger Energieverbrauch erzielt werden.

2.2.2.2. Methodik

Ziel der Pkw-Technologiedatenbasis ist es, anhand der Energieeinsparpotenziale und der Investitionskosten für Effizienztechnologien zu ermitteln, welche Energieeinsparung (und damit Minderung der direkten CO₂ Emissionen) zu einem bestimmten Zeitpunkt zu welchen Zusatzkosten möglich sind. Somit lässt sich auch beurteilen, wie hoch die maximalen Energieeinsparpotenziale sind und wie sich die unterschiedlichen Effizienzniveaus auf die Kosten der Fahrzeuge auswirken. Die methodische Herangehensweise zur Ermittlung von kumulierten Kostenkurven in Abhängigkeit von Energieeinsparpotenzialen differenziert nach

- Antriebskonzept: ICEV (Benzin, Diesel, Erdgas), BEV, PHEV, REEV
- Jahr: 2020, 2030, 2040, 2050
- Fahrzeugsegment: Microcar, klein, mittel, groß

wird in Hülsmann et al. (2014) näher erläutert.

Die Effizienzentwicklung der Antriebskonzepte basiert auf typischen Fahrzeugen mit - für das jeweilige Antriebskonzept - durchschnittlichen Konfigurationen. Nähere Erläuterungen zu den Eigenschaften erfolgen in Kapitel 4.7.1 im Rahmen der Beschreibung der Szenarien.

Der Energieverbrauch und die Fahrzeugmasse der ICEV im Jahr 2010 basiert auf den KBA Neuzulassungsdaten von 2010 (KBA 2010). Die Pkw wurden in die Fahrzeugsegmente klein, mittel und groß eingeteilt. Kleine Pkw entsprechen den KBA-Segmenten Mini und Kleinwagen, mittelgroße Pkw der Kompaktklasse und Vans sowie große Pkw der Mittelklasse, oberen Mittelklasse und Oberklasse. Zusätzlich zu den gängigen Fahrzeugsegmenten wurde die Kategorie Microcar eingefügt. Im Rahmen des Fachworkshops zu den Pkw-Technologien wurden von Seiten der Industrie Microcars als ein Fahrzeugsegment, welches sowohl in Form eines konventionellen Benzinfahrzeugs als auch als BEV mit großem Potenzial in Städten eingeschätzt wird, vorgeschlagen. In Hülsmann et al. (2014) werden die aggregierten Fahrzeugsegmente und die Konfigurationen der Basisfahrzeuge näher erläutert.

2.2.2.3. Effizienztechnologien

Hinsichtlich der Pkw Effizienztechnologien wird zwischen drei Kategorien unterschieden:

- Effizienztechnologien zur Reduzierung des Fahrwiderstandes
- Effizienztechnologien für konventionelle Antriebskonzepte
- Effizienztechnologien für alternative Antriebskonzepte.

Effizienztechnologien zur Reduzierung des Fahrwiderstandes

Die größte Energieeinsparung kann durch die Reduktion der Fahrzeugmasse erreicht werden. Mit neuen Materialien wie z. B. Karbonfasern lässt sich bis 2050 das Fahrzeuggewicht bis zu 40 % reduzieren und damit eine Minderung des Energieverbrauchs von 27 % erzielen. Weitere Technologien, die den Fahrzeugwiderstand reduzieren, sind aerodynamische Verbesserungen und ein geringerer Rollwiderstand. Maßnahmen an der Fahrzeugplattform führen auch bei batterieelektrischen Pkw zu geringeren Energieverbräuchen. Batterieelektrische Pkw mit großen Batterien profitieren überproportional von diesen Technologien, da aufgrund des geringeren Energieverbrauchs die Batteriekapazität und damit das Batteriegewicht reduziert werden kann (Smokers et al. 2011; Cambridge econometrics and Ricardo-AEA 2013; NRC 2013).

Effizienztechnologien für konventionelle Antriebskonzepte

Technologien, die über ein großes Minderungspotenzial verfügen und bereits kurz- bis mittelfristig als marktfähig angesehen werden, sind bei Pkw mit Benzin als Kraftstoff motorische Verbesserungen, zum Beispiel durch Benzin-Direkteinspritzung, Motor-Downsizing und die variable Nockenwellensteuerung. Für den Dieselantrieb stehen weniger Effizienztechnologien als beim Benzinfahrzeug zur Verfügung. Dennoch lassen sich auch mittelfristig noch Energieeinsparungen durch einen effizienteren Verbrennungsprozess und durch Motor-Downsizing erzielen. Vollhybridisierung reduziert den Energieverbrauch erheblich, ist aber kurz- und mittelfristig noch nicht kosteneffizient. Längerfristig kann durch verbessertes Thermomanagement, Abgasrückführung, effizientere Nebenaggregate und durch Vollhybridisierung der Energieverbrauch beim Benzinfahrzeug wesentlich reduziert werden. Die letzteren beiden Maßnahmen sind auch für Dieselfahrzeuge relevant. Insgesamt nähern sich Benzin- und Dieselfahrzeuge in ihren motorischen Eigenschaften und daher auch im Energieverbrauch an (Smokers et al. 2011; Cambridge econometrics and Ricardo-AEA 2013; NRC 2013).

Effizienztechnologien für alternative Antriebskonzepte

Der Elektromotor hat im Vergleich zum Verbrennungsmotor einen wesentlich höheren Wirkungsgrad und ist weitestgehend optimiert. Im mobilen Einsatz lassen sich noch geringfügige Effizienzsteigerungen bis 2050 erzielen.

Entscheidend für das technologische Potenzial und die Rentabilität der batterieelektrischen Fahrzeuge bis 2050 ist die Entwicklung der Batterietechnologien. Derzeit werden vor allem Lithium-Ionen Batterien zu relativ hohen Kosten und mit elektrischen Reichweiten von rund 150 – 200 km bei Pkw der Kompaktklasse eingesetzt. Um die elektrische Reichweite zu erhöhen und die Batteriekosten zu reduzieren, muss vor allem die Batteriekapazität erhöht werden. Die installierbare Kapazität ist vor allem abhängig von der Energiedichte des Batteriesystems. Post-Lithium-Ionen Batterietechnologien wie Lithium-Schwefel und Lithium-Luft könnten die notwendigen technologischen Eigenschaften für größere Reichweiten mitbringen. Allerdings bestehen hier noch große Unsicherheit, wie sich diese Technologien weiterentwickeln und welche Batteriekosten sich ergeben (Duleep et al. 2011; Thielmann et al. 2012). Eine Übersicht über die Batterietechnologien, deren Eigenschaften und Kosten sind in Hülsmann et al. (2014) beschrieben.

2.3. Schwere Nutzfahrzeuge

Für schwere Nutzfahrzeuge (SNF) wurde ebenso wie für die Pkw eine Technologiedatenbank unter Einbezug von Fachexperten aus dem Nutzfahrzeugbereich entwickelt. Diese umfasst

Informationen zu Energieeinsparpotenzialen und den assoziierten Zusatzkosten (abgebildet über sogenannte Kostenkurven).

2.3.1. Fachworkshop „Langfristige Entwicklung konventioneller und alternativer Technologien bei schweren Nutzfahrzeugen“

Analog zum Pkw-Fachworkshop hatte der Workshop zu schweren Nutzfahrzeugen zum Ziel, die Perspektiven von Effizienztechnologien und alternativen Antriebstechnologien bei Lkw und Bussen näher zu beleuchten und denkbare Entwicklungen bis zum Jahr 2050 aufzuzeigen.

Im Vergleich zu Pkw stellen sich die Voraussetzungen für die Diskussion der technologischen Entwicklungsmöglichkeiten bei schweren Nutzfahrzeugen jedoch deutlich schwieriger dar. Zum einen liegen wesentlich weniger Studien zur technischen Effizienzsteigerung von Nutzfahrzeugen vor. Zum anderen ist das Spektrum an denkbaren alternativen Antriebsoptionen angesichts der Nutzungsanforderungen (u. a. Leistung und Reichweite der Fahrzeuge) deutlich eingeschränkt und befindet sich in einem teilweise noch sehr frühen Entwicklungsstadium. Ziel des Workshops war es daher unter anderem, die besonderen Anforderungen im Nutzfahrzeugbereich, wie auch die spezifischen Rahmenbedingungen der Fahrzeugentwicklung und -produktion in die Überlegungen zu denkbaren Fahrzeugkonfigurationen und möglichen langfristigen Entwicklungspfaden einfließen zu lassen. Hierzu konnten die beteiligten Experten wichtige Beiträge liefern, so dass ein im Vorfeld erstellter Vorschlag zur technologischen Entwicklung auf Grundlage der Anregungen im Nachgang des Workshops angepasst wurde. Im Bereich der schweren Nutzfahrzeuge wurden konventionelle Antriebsoptionen (Diesel, CNG/LNG, Dual Fuel) sowie als alternative Antriebsoptionen batterieelektrische (BEV, PHEV), Brennstoffzellenfahrzeuge und Oberleitungsgebundene Fahrzeugvarianten betrachtet.

Die Diskussion im Fachworkshop erfolgte analog zum Pkw-Workshop entlang folgender Themen:

- Methodisches Vorgehen;
- Definition von Basisfahrzeugen;
- Perspektiven von nicht-motorischen Effizienztechnologien;
- Perspektiven von Effizienztechnologien am Diesel-Motor;
- Status quo, Herausforderungen und Perspektiven von alternativen Antriebstechnologien.

Am Fachworkshop zu Technologien im Bereich der schweren Nutzfahrzeuge waren Experten folgender Organisationen beteiligt:

- CE Delft
- Ricardo
- MAN AG
- DLR – Institut für Fahrzeugkonzepte
- Siemens AG
- Daimler AG
- Schmitz Cargobull AG
- FEV Motorentechnik GmbH.

Die Ergebnisse der Diskussion sind im oben genannten Arbeitspapier gemeinsam mit den Technologien im Bereich der Pkw dokumentiert (Hülsmann et al. 2014) und stellen die Ausgangsbasis für die Berücksichtigung der technologischen Entwicklung von schweren Nutzfahrzeugen, inklusive des Einsatzes alternativer Antriebstechnologien, in den *eMobil 2050* Szenarien dar.

2.3.2. Aufbau der Fahrzeugtechnologiedatenbank

Die Datengrundlage für die Technologiedatenbank stellen u. a. die Studien „*European Union Greenhouse Gas Reduction Potential for Heavy-Duty Vehicles*“ (Law et al. 2011) und „*Reduction and Testing of Greenhouse Gas (GHG) Emissions from Heavy Duty Vehicles – Lot 1: Strategy*“ (Hill et al. 2011) sowie Expertengespräche und ein Fachworkshop (siehe Kapitel 2.3.1) dar.

2.3.2.1. Antriebskonzepte

In diesem Vorhaben wird für schwere Nutzfahrzeuge zwischen vier Antriebskonzepten unterschieden:

- verbrennungsmotorisches Fahrzeug mit Diesel oder Erdgas als Kraftstoff und Hybridfahrzeug (ICEV/HEV)
- batterieelektrisches Fahrzeug (BEV)
- Plug-In-Hybridfahrzeug (PHEV)
- Oberleitungsgebundene Fahrzeuge (OC-GIV)⁵.

Die folgenden Abschnitte geben einen Überblick über die Antriebskonzepte und vor allem die Spannbreite der alternativen Antriebskonzepte.

Verbrennungsmotorische Antriebskonzepte

In der Technologiedatenbasis werden neben den konventionellen verbrennungsmotorischen Fahrzeugen (Diesel, CNG) auch die Hybridfahrzeuge, deren Batterien allein über regeneratives Bremsen geladen werden, diesem Antriebskonzept zugerechnet (ICEV/HEV). Hybrid elektrisches Fahren wird hier als Effizienztechnologie des verbrennungsmotorischen Fahrzeugs angesehen und daher nicht als zusätzliches Antriebskonzept konfiguriert, da Hybridfahrzeuge ausschließlich auf konventionellen Kraftstoffen basieren. Da aktuell insbesondere in den USA ein starker Trend hin zu erdgasbetriebenen Nutzfahrzeugen beobachtet werden kann, werden auch diese in der Technologiedatenbasis abgebildet, jedoch ohne zwischen LNG- und CNG-Fahrzeugen zu unterscheiden.

Alternative Antriebskonzepte

Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) verfügen über einen rein elektrischen Antrieb mit einem leistungsstarken elektrischen Motor. Dieses Antriebskonzept ist durch einen hohen Motorenwirkungsgrad und der Fähigkeit der Rekuperation durch einen hohen Tank-to-Wheel Wirkungsgrad gekennzeichnet. Die Herausforderung liegt vor allem bei der Batterietechnologie und der damit verbundenen eingeschränkten Reichweite und den hohen Batteriekosten. Aufgrund der teilweise hohen Fahrleistungen und hohen Energieverbräuche bei SNF finden der batterieelektrische Antrieb nicht in allen betrachteten Fahrzeugkategorien Anwendung, da dafür sehr groß ausgelegte Energiespeicher mit einem Gewicht von mehreren Tonnen benötigt würden. Details zu den betrachteten Antriebskonzepten für die einzelnen Fahrzeugkategorien werden in Kapitel 4.7.3 beschrieben.

⁵ Oberleitungsfahrzeuge (overhead catenary – grid integrated vehicles; OC-GIV)

Plug-in-Hybridfahrzeuge (PHEV) verfügen neben dem konventionellen Antriebstrang über mit den BEV vergleichbaren Komponenten, die ein rein elektrisches Fahren ermöglichen. Dabei sind die Energiespeicher aber teils deutlich kleiner ausgelegt als bei BEV. Bei einigen Fahrzeugkategorien sollen Großteile der täglichen Fahrleistung bei PHEV elektrisch betrieben werden können, bei anderen Fahrzeugkategorien soll lediglich kürzeres emissionsfreies Fahren ermöglicht werden. Der Energieverbrauch im rein elektrischen Fahrmodus liegt im Bereich der BEV und der Verbrauch im konventionellen hybriden Fahrmodus im Bereich des HEV (Vollhybrid). Das veränderte Fahrzeuggewicht durch den Energiespeichers kann jedoch zu geringen Abweichungen führen.

Die in der Technologiedatenbasis abgebildeten Oberleitungsgebundenen Fahrzeuge (*overhead catenary – grid integrated vehicles*; OC-GIV), auch als *Trolley-Trucks* und *-Busse* bezeichnet, können wie BEV und PHEV rein elektrisch betrieben werden, beziehen die dafür benötigte elektrische Energie jedoch überwiegend nicht aus im Fahrzeug befindlichen Energiespeichern, sondern aus einer über der Straße installierten Oberleitung. Dieses Antriebskonzept wird aktuell im Pilotvorhaben ENUBA getestet (Siemens 2012) und vom Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU 2012) als eine vielversprechende Option bezeichnet. Die Umsetzbarkeit dieses Antriebskonzeptes und der notwendigen Anpassungsbedarfe der Verkehrsinfrastruktur werden in der vorliegenden Studie nicht gesondert untersucht.

Im elektrischen Betrieb stellen oberleitungsgebundene Fahrzeuge das Antriebkonzept mit der höchsten Endenergieeffizienz dar, da im Gegensatz zu BEV keine großen Batterien im Fahrzeug verbaut werden müssen, die zu einem hohen Zusatzgewicht und damit zu einem Mehrverbrauch führen. Zudem ist ein Rückspeisen der durch Rekuperation gewonnenen Energie in die Oberleitung möglich. Neben dem elektrischen Antrieb verfügen die in der Technologiedatenbasis abgebildeten oberleitungsgebundene Fahrzeuge über einen Dieselmotor, der ein oberleitungsfreies Fahren ermöglicht. Oberleitungsgebundene Fahrzeuge können zusätzlich einen kleinen Energiespeicher besitzen, welcher Rekuperation auch im konventionellen Betriebsmodus ermöglicht. Dadurch liegt der Endenergieverbrauch dann im Bereich der Diesel-HEV. Da dieses Antriebskonzept eine Elektrifizierung der Straßen voraussetzt, findet es in der Technologiedatenbasis nur bei Fahrzeugkategorien Anwendung, bei denen regelmäßig große Fahrleistungsanteile auf den Bundesautobahnen erbracht werden. Aufgrund der hohen Infrastrukturkosten, die im Weiteren nicht Gegenstand der Betrachtung sind, kann vorerst nicht davon ausgegangen werden, dass darüber hinaus weitere Straßen mit Oberleitungen für die SNF ausgestattet werden. In SRU (2012) wird eine Elektrifizierung aller einstellig nummerierten deutschen Autobahnen als Hauptmagistralen als mögliches Ausbauszenario genannt.

2.3.2.2. Methodik

Ziel der SNF-Technologiedatenbasis ist es, anhand der Energieeinsparpotenziale und der Investitionskosten für einzelne Effizienztechnologien zu ermitteln, welche Energieeinsparung (und damit Minderung der direkten CO₂ Emissionen) zu einem bestimmten Zeitpunkt zu welchen Zusatzkosten möglich sind, wenn die Effizienztechnologien sukzessive gemäß ihrer Kosteneffizienz in einem Technologiepaket berücksichtigt werden. Somit lässt sich neben den maximalen Energieeinsparpotenzialen bestimmen, wie sich unterschiedliche Effizienzniveaus auf die Fahrzeugkosten auswirken. Die methodische Herangehensweise zur Ermittlung von kumulierten Kostenkurven in Abhängigkeit von Energieeinsparpotenzialen differenziert nach

- Antriebskonzept: ICEV (Diesel, Erdgas), BEV, PHEV, OC-GIV;
- Jahr: 2020, 2030, 2040, 2050;
- Fahrzeugkategorien: Lkw >3,5 – 7,5 t, Lkw > 7,5 t – 12 t, Lkw > 12 t, Lastzug/ Sattelzug ≤ 40 t, Linienbus und Reisebus

entspricht im Wesentlichen der Pkw-Technologiedatenbasis und wird in Hülsmann et al. (2014) näher erläutert.

Für die Effizienzentwicklung der Antriebskonzepte wird für die jeweilige Kategorie von typischen Fahrzeugen mit durchschnittlichen Konfigurationen ausgegangen. Nähere Erläuterungen zu den Eigenschaften erfolgen in Kapitel 4.7.3 für die Szenarien.

Der Kraftstoffverbrauch und auch die Maßnahmenwirkung einzelner Effizienztechnologien hängen innerhalb einer Größenklasse stark vom Einsatzprofil ab. Der innerstädtische Verteilverkehr ist beispielsweise gekennzeichnet von niedrigen Geschwindigkeiten und einer hohen Anzahl von Stopps. Im Güterfernverkehr hingegen überwiegt eine kontinuierliche Fahrt mit hohen Geschwindigkeiten. Der Energieverbrauch kann sich je nach Nutzungsprofil deutlich unterscheiden. In der Technologiedatenbasis wird den oben genannten Fahrzeugkategorien für den Güterverkehr jeweils ein konkretes Nutzungsprofil zugeordnet. So werden Lkw mit einem zulässigen Gesamtgewicht (zGG) bis 12 t dem städtischen Verteilverkehr, Lkw > 12 t dem regionalen Verkehr und die Last- und Sattelzüge dem Fernverkehr zugeordnet. In der Praxis werden hingegen auch Lkw mit einem zGG deutlich über 12 t im städtischem Verteilverkehr eingesetzt bzw. findet auch Fernverkehr mit deutlich kleineren Fahrzeugen statt. Dennoch entspricht die Zuordnung den Haupteinsatzbereichen und orientiert sich an den Basisfahrzeugen in Law et al. (2011).

Für die Kraftstoffverbräuche der Diesel-ICEV im Jahr 2010 wurde auf die Neuzulassungen aus dem Jahr 2010 im TREMOD-Modell (Version 5.25) zurückgegriffen⁶. Für die erdgasbetriebenen Fahrzeuge wurde den Empfehlungen aus dem Fachworkshop folgend von einem um 10 % höheren Energieverbrauch ausgegangen. Die Gesamtkosten der Basisfahrzeuge (Diesel-ICEV) wurden aus dem Lastauto Omnibus-Katalog 2011 (ETM 2010) abgeleitet.

2.3.2.3. Effizienztechnologien

Hinsichtlich der Effizienztechnologien für SNF wird zwischen drei Kategorien unterschieden:

- Effizienztechnologien zur Reduzierung des Fahrwiderstandes
- Effizienztechnologien für konventionelle Antriebskonzepte
- Effizienztechnologien für alternative Antriebskonzepte.

Durch die unterschiedlichen Nutzungsprofile, die den betrachteten Fahrzeugkategorien zugeordnet werden, unterscheiden sich die Einsparpotentiale einzelner Maßnahmen zwischen den Fahrzeugkategorien, insbesondere bei den Maßnahmen zur Hybridisierung der Fahrzeuge.

Effizienztechnologien zur Reduzierung des Fahrwiderstandes

Bei Fahrzeugen mit hohem Streckenanteil mit großen Geschwindigkeiten wie im Güterfernverkehr besitzen Maßnahmen zur Verbesserung der Aerodynamik mit 6 % die größten Einsparpotentiale. Daneben kann die Verringerung des Rollwiderstands z. B. durch *Single Wide Tyres* zu erheblichen Verbrauchsminderungen (5 %) führen. Bei Fahrprofilen mit niedrigeren Geschwindigkeiten wie in der städtischen Distribution oder den Linienbussen sind der Einfluss des Luftwiderstandes und damit die Einsparpotentiale geringer. Bei allen Fahrzeugkategorien kann zudem eine Verbrauchsminderung durch eine Reduktion des Fahrzeuggewichtes erzielt werden. Bei den Linienbussen besteht dort mit 6 % das größte Minderungspotential hinsichtlich der Reduzierung des Fahrwiderstandes (Law et al. 2011; Hill et al. 2011).

⁶ Bei den Linienbussen entspricht der Verbrauch den in 2009 neu zugelassenen Fahrzeugen.

Maßnahmen an der Fahrzeugplattform führen auch bei alternativen Antriebskonzepten zu geringeren Energieverbräuchen. BEV und PHEV mit großen Batterien profitieren überproportional von diesen Technologien, da aufgrund des geringeren Energieverbrauchs bei gleichbleibender elektrischer Reichweite die Batteriekapazität und damit das Batteriegewicht reduziert werden kann.

Effizienztechnologien für konventionelle Antriebskonzepte

Bei den schweren Nutzfahrzeugen werden Dieselmotoren eingesetzt, die bereits heute einen hohen Wirkungsgrad besitzen. Dieser lässt sich zukünftig durch weitere innermotorische Maßnahmen wie z. B. der Erhöhung des Zylinderdrucks oder Mehrfacheinspritzung leicht erhöhen. Darüber hinaus bestehen aber weitere Potentiale durch verschiedene Formen der Hybridisierung; besonders bei Fahrprofilen mit häufigem Anfahren und Bremsvorgängen wie in der innerstädtischen Distribution oder bei Linienbussen. Bei Bussen werden diese mit 20 % bis 30 % angegeben. Im Güterfernverkehr liegen die Minderungspotentiale mit etwa 7 % durch eine Vollhybridisierung zwar niedriger, durch die hohe Fahrleistung in dieser Fahrzeugkategorie wird dort mittelfristig nach Einschätzung der am Fachworkshop beteiligten Experten dennoch ein wirtschaftlicher Einsatz gesehen. Weitere Effizienzmaßnahmen bestehen u. a. bei der Elektrifizierung von Nebenaggregaten (Law et al. 2011; Hill et al. 2011).

Effizienztechnologien für alternative Antriebskonzepte

Die Entwicklung der Effizienztechnologien für alternative Antriebskonzepte bei den SNF entspricht im Wesentlichen denen der Pkw (vgl. Kapitel 2.2.2.3). Der bereits sehr hohe Wirkungsgrad der Elektromotoren kann bis 2050 nur noch geringfügige Effizienzsteigerungen erzielen. Eine größere Entwicklung kann hinsichtlich der Batterietechnologie erwartet werden. Bei steigender Ladungsdichte kann bei gleichbleibender installierter Kapazität von einer Gewichtsreduktion der Batterie und damit einer Verbrauchsminderung der Fahrzeuge ausgegangen werden. Es bestehen jedoch große Unsicherheiten in Bezug auf die technologische Entwicklung. Aus heutiger Sicht könnten neben den heute verbreiteten Lithium-Ionen Batterien Post-Lithium-Ionen Batterietechnologien wie Lithium-Schwefel und Lithium-Luft geeignet sein, zukünftig in Elektrofahrzeugen eingesetzt zu werden. Details zu Batterietechnologien, deren Eigenschaften und Kosten können Hülsmann et al. (2014) entnommen werden.

2.4. Strombasierte Kraftstoffe

Strombasierte gasförmige und flüssige Energieträger bieten die Möglichkeit, über die 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 spielt als mögliche Klimaschutzmaßnahme dann eine Rolle, 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. Aus Sicht des Stromerzeugungssektors kann dieser Prozess somit als Energiespeicher verstanden werden. Im Verkehrssektor bietet sich zusätzlich noch die Möglichkeit, Anwendungsbereiche zu erschließen, für die eine direkte Stromnutzung technisch nicht oder nur schwer möglich ist (z. B. Flug- und Schiffsverkehr sowie Teile des Straßenschwerlastverkehrs). Eine direkte Nutzung von Strom ist allerdings aufgrund der höheren Energieeffizienz der Kombination aus Energieträgerbereitstellung und Antriebsenergie zu bevorzugen, wenn dies eine ökonomisch und systemisch sinnvolle Option darstellt (Kasten et al. 2013).

Im Folgenden wird zunächst auf den im Rahmen des Projekts durchgeführten Fachworkshop und danach auf die Bestandteile der Prozessketten für strombasierte Kraftstoffe eingegangen sowie die wichtigsten Ergebnisse aufgeführt. Für eine detaillierte Darstellung der Ergebnisse des Fachworkshops wird auf Kasten et al. (2013) verwiesen.

2.4.1. Fachworkshop „Entwicklungsmöglichkeiten strombasierter Kraftstoffe im Verkehrssektor bis zum Jahr 2050“

Ziel des Fachworkshops war es, verschiedene Prozessketten zur Herstellung strombasierter Kraftstoffe zu diskutieren und plausible Entwicklungspfade zu identifizieren, die als Grundlage für die Berücksichtigung von strombasierten Kraftstoffen in den *eMobil 2050* Szenarien dienen können. Dabei war der gesamte Produktionsprozess von der Herstellung - unter Berücksichtigung der wichtigsten Inputströme (Strom, Kohlenstoffdioxid) - bis zur Betankung der Fahrzeuge Gegenstand der Diskussion. Neben den Wirkungsgraden der einzelnen Prozessketten wurde ein Hauptaugenmerk auf die Plausibilität der Verknüpfung einzelner Prozessschritte gerichtet, um auch zeitliche Abhängigkeiten der Prozessschritte in die anschließende Modellierung und Bewertung der Kraftstoffe einfließen lassen zu können. Eine besondere Herausforderung für die Diskussion möglicher Prozessketten stellt die Tatsache dar, dass bisher keiner der möglichen Produktionsprozesse in größerem Umfang für die Kraftstoffherstellung erprobt wurde und bisher vor allem Erfahrungen aus Demonstrationsanlagen vorliegen.

Die Betrachtung der strombasierten Kraftstoffe umfasste neben dem Prozessschritt der Elektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff ferner die daran anschließenden Prozessschritte der Methanisierung sowie der Fischer-Tropsch-Synthese⁷.

Die Diskussion zu strombasierten Kraftstoffen im Fachworkshop wurde entlang der folgenden Themen geführt:

- Herstellungspfade strombasierter Kraftstoffe – verschiedene Prozessketten der Elektrolyse zur Wasserstoffherstellung, Fischer-Tropsch-Synthese, Methanisierung;
- Notwendige energetische und stoffliche Inputströme mit Schwerpunkt auf möglichen Bereitstellungspfaden für Kohlenstoffdioxid sowie einer Diskussion möglicher Mengenrestriktionen;
- Einbindung der Kraftstoffproduktion ins Energiesystem mit Fokus auf die zeitliche Abhängigkeit der Produktionsprozesse sowie notwendige Zwischenspeicher;
- Transport und Verteilung der Produkte für die Nutzung im Verkehrssektor.

Am Fachworkshop zu strombasierten Kraftstoffen waren Experten folgender Organisationen beteiligt:

- sunfire GmbH
- Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH
- DLR – Institut für Technische Thermodynamik
- DVGW – Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut
- Fraunhofer ISI
- Audi AG
- Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW).

Unter Berücksichtigung der Diskussion aus dem Fachworkshop wurde ein Working Paper zu strombasierten Kraftstoffen verfasst (Kasten et al. 2013), welches die möglichen Prozessketten

⁷ Die Produktion von Flüssigkraftstoffen ist mit der Fischer-Tropsch-Synthese diskutiert. Grundsätzlich ist die Produktion von strombasierten Flüssigkraftstoffen auch über die Methanolsynthese möglich.

strombasierter Kraftstoffe entlang der einzelnen Prozessschritte diskutiert und mit dem Einsatz konventioneller Kraftstoffe und der direkten Stromnutzung in Bezug auf Energieeffizienz und Treibhausgasemissionen vergleicht. Entsprechend der dort getroffenen Annahmen zu den verschiedenen Prozessketten wurden diese anschließend im Strommarktmodell *PowerFlex* implementiert und bilden die Grundlage für die Betrachtung strombasierter Kraftstoffe in den *eMobil 2050* Szenarien.

2.4.2. Drei Optionen strombasierter Energieträger

In diesem Abschnitt werden die drei untersuchten, verschiedenen Optionen an strombasierten Energieträgern miteinander verglichen: Wasserstoff, Methan und Flüssigkraftstoffe aus der Fischer-Tropsch-Synthese (FT-Kraftstoff).

Allen drei Optionen ist gemein, dass über die Elektrolyse hergestellter Wasserstoff die Möglichkeit bietet, mit einem Verlust an Energie Strom in einen chemischen Energieträger umzuwandeln. Die Ausgangsbasis der betrachteten Prozesse ist also die Auftrennung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff.



Der Wasserstoff kann nun entweder in einer Anwendung genutzt werden oder bei Zugabe von Kohlenstoff zu Kohlenwasserstoffen weiter verarbeitet werden. Bei der Methanisierung kann mit einer hohen Konversionsrate über folgende Reaktionsgleichung Methan hergestellt werden.



Sollen längerkettige, flüssige Kohlenwasserstoffe hergestellt werden, bietet sich als Syntheseschritt die Fischer-Tropsch-Synthese (FT-Synthese) an. Je nach Ausgangsprodukt, Einstellung der Prozessparameter (Druck und Temperatur) und der verwendeten Katalysatoren ergeben sich unterschiedliche Verteilungen an Kohlenwasserstoffen, die nicht vollständig als Kraftstoff genutzt werden können. Ein nachgeschalteter Aufbereitungsschritt und/oder eine Rückführung unerwünschter Kohlenwasserstoffe sind also notwendig, um die gewünschten Produkte herzustellen. Die energetische Bewertung der Kraftstoffproduktion über die FT-Synthese hängt also davon ab, ob die nicht als Kraftstoff einsetzbaren Kohlenwasserstoffe in anderen Anwendungen ihren Nutzen finden.

2.4.3. Prozesskette für die Anwendung im Verkehrssektor

Für die Nutzung strombasierter Energieträger im Verkehrssektor sind neben der oben beschriebenen Produktion der Kraftstoffe auch die Bereitstellung von Kohlenstoff und die Verteilung der Kraftstoffe notwendig. Im Folgenden wird daher auf alle drei Teilprozesse eingegangen.

Kohlenstoffbereitstellung

Für die Herstellung von Methan und FT-Kraftstoffen wird Kohlenstoff als Input in den Syntheseprozess benötigt. Nach Reaktionsgleichung (2) kann mit einer Million Tonnen Kohlenstoffdioxid bei einer vollständigen Konversion des Kohlenstoffdioxids Methan mit einem Energiegehalt von 18,2 PJ produziert werden. Aufgrund des veränderten C-H-Verhältnisses in langkettigen Kohlenwasserstoffen reduziert sich der mögliche Energiegehalt je Million Tonne Kohlenstoffdioxid auf ca. 13,5 PJ, wenn Dieselkraftstoff hergestellt werden soll und der Kohlenstoff vollständig im Dieselkraftstoff gebunden wird.

Diskutierte Kohlenstoffquellen sind *biogene* Prozesse, *fossile* Industrie- und Kraftwerksprozesse sowie die *Atmosphäre*. Als *biogene* Kohlenstoffquelle besitzt die Biogasproduktion den Vorteil,

einen hohen Anteil an Kohlenstoffdioxid (35 – 55 %) im Ausgangsstrom zu besitzen und somit nur einen geringen energetischen Aufwand für die Abtrennung des Kohlenstoffdioxids zu erfordern. Soll das Biogas nicht vor Ort genutzt, sondern in das Erdgasnetz als Biomethan eingespeist werden, muss diese Kohlenstoffdioxidabtrennung ohnehin vorgenommen werden⁸. Bei einer zeitlich variablen Wasserstoffproduktion – z. B. um einer variablen erneuerbaren Stromproduktion zu folgen – hat die Biogasproduktion als Kohlenstoffquelle allerdings den Nachteil, dass entweder der Wasserstoff oder das Kohlenstoffdioxid zwischengespeichert werden müsste oder nur ein Teil des anfallenden Kohlenstoffdioxids für den Syntheseprozess eingesetzt werden kann.

Durch Pre-Combustion-Prozesse lassen sich *Prozessemissionen* der Industrie mit relativ geringem Energieaufwand abtrennen und der Kohlenwasserstoffproduktion zuführen. Bei fossilen Kraftwerksprozessen ist der Aufwand dagegen höher. Bei Industrieprozessen ergibt sich durch den kontinuierlichen Kohlenstoffdioxidfluss allerdings auch das Problem der benötigten Zwischenspeicherung der Inputströme für die Kraftstoffsynthese. Bei der Verwendung von Kohlenstoff aus *Kraftwerksprozessen* ist die Verfügbarkeit von Kohlenstoff zeitlichen Schwankungen unterworfen, da diese von der Merit Order der Stromerzeugung abhängt. Die Kohlenstoffdioxidemissionen müssten daher zwischengespeichert werden oder es könnte nur ein Anteil des anfallenden Kohlenstoffdioxids genutzt werden.

Die Kohlenstoffdioxidabtrennung aus der *Luft* ist technisch möglich (Specht et al. 2000); wegen der geringen Konzentration werden allerdings ein hoher Volumenstrom und hohe Energieaufwendungen⁹ benötigt. Bei der Nutzung von Strom für den gesamten Abscheideprozess ist die Abtrennung des Kohlenstoffdioxids im Gegensatz zu den übrigen Quellen zeitlich steuerbar, so dass diese mit der Wasserstoffproduktion koordiniert durchgeführt werden kann.

Für alle Quellen außer der Atmosphäre bestehen Mengenbegrenzungen. Diese hängen dabei stark von der Entwicklung der Sektoren ab, die die Kohlenstoffquelle darstellen. Es ist allerdings zu erwarten, dass die Biogasproduktion ansteigen und die Prozess- und Kraftwerksemissionen sinken werden. Durch den zeitlichen Versatz zwischen Kohlenstoffabtrennung und Wasserstoffproduktion werden die Kohlenstoffemissionen zudem nicht vollständig genutzt werden können.

Energieträgerproduktion

Für die Elektrolyse gibt es mit der alkalischen und der PEM-Elektrolyse zwei etablierte Technologien, die aufgrund der hohen Kosten bisher nur in geringem Maße eingesetzt werden. Höhere elektrische Wirkungsgrade werden beim Einsatz der Hochtemperaturelektrolyse erwartet, wobei eine externe Wärmezufuhr für den Prozess benötigt wird und die Technologie bisher nur im Laborstatus demonstriert wurde.

Die alkalische und die PEM-Elektrolyse besitzen den Vorteil, ihre Last flexibel variieren und auch vollständig die Produktion einstellen zu können. Damit ist eine Nutzung der variablen Stromerzeugung von erneuerbaren Energieanlagen gut möglich. Die Hochtemperaturelektrolyse besitzt langsamere Lastgradienten und kann die Last bis zu 50 % der Nennlast reduzieren. Eine vollständige Einstellung der Produktion ist wegen der hohen Temperaturen und daher entstehenden thermischen Belastung bei Lastschwankungen nur in seltenen Fällen vorgesehen. Die Nutzung der variablen erneuerbaren Stromerzeugung ist damit also eingeschränkt.

Der Wasserstoff kann in einer Methanisierungsanlage gemäß der Reaktion (2) in Methan weiterverarbeitet werden. Bei einer diskontinuierlichen Wasserstoffproduktion kann die Last einer

⁸ Die Einspeisung in das Erdgasnetz wird bisher nur von einer geringen Zahl an Biogasanlagen durchgeführt. Im Jahr 2013 wurde das Biogas nur an 2 % der Biogasanlagen für eine Netzeinspeisung aufbereitet (Fachverband Biogas 2013).

⁹ Die Höhe des Stromaufwands variiert mit dem Verfahren, da die Absorptionslösung auch über eine externe Wärmezufuhr regeneriert werden kann. Dabei wäre ein erheblich niedrigerer Stromaufwand nötig.

Methanisierungsanlage mit schnellen Lastgradienten auf bis zu 50 % der Nennlast betrieben werden oder auch vollständig ausgestellt werden. Möglich ist auch ein System mit Zwischenspeicherung von Wasserstoff, in dem der Methanisierungsreaktor möglichst in Nennlast betrieben wird. In einem Betrieb in Kombination mit der Hochtemperaturelektrolyse könnte die Abwärme des Prozesses als energetischer Input für Elektrolyse genutzt werden. Eine Skalierung der Anlagengröße ist möglich.

Die FT-Synthese besitzt im Vergleich zur Methanisierung einen niedrigeren Wirkungsgrad in Bezug auf den Energiegehalt des in den Prozess einfließenden Wasserstoffs. Zudem ist nur ein Teil der produzierten Kohlenwasserstoffe für Kraftstoffe geeignet und muss in einer Raffinierung nachbehandelt werden. Eine Skalierung von FT-Anlagen auf kleine Nennlasten ist daher eher nicht zu erwarten und es ist von Anlagen einer Mindestgröße von ca. 50 MW Nennlast auszugehen. Die komplexere Reaktion und das schwierigere Handling des Gesamtprozesses lassen eine geringere Variabilität in der Last der Anlage zu und ein häufiges An- und Abfahren ist nicht zu erwarten. Somit ließe sich eine Kombination mit Wasserstoff aus erneuerbaren Quellen nur über eine Zwischenspeicherung des Wasserstoffs bewerkstelligen. Die Kombination mit der Hochtemperaturelektrolyse ließe die Nutzung der Abwärme im Elektrolyseprozess zu.

Verteilung der Energieträger

Die Verteilung und Aufbereitung von Energieträgern für den Einsatz im Verkehrssektor kann einen nicht zu vernachlässigenden Energiebedarf haben und einen relevanten Einfluss auf die Nutzung der Kraftstoffe im Verkehrssektor besitzen. Für die Anwendung im Verkehrssektor können Wasserstoff und Methan gasförmig und flüssig eingesetzt werden; Zur Vergleichbarkeit wird im Folgenden aber davon ausgegangen, dass die beiden Stoffe gasförmig betankt werden.

Für Wasserstoff besteht in Deutschland außer zwei regionalen Industrienetzwerken kein großflächiges Rohrleitungssystem für den Transport. Zur Einführung von Wasserstoff im Verkehrssektor ist eine Verteilung über Lkw denkbar, langfristig ist bei einem weitreichenden Einsatz von Wasserstoff eine Verteilung über ein Rohrleitungssystem unabdingbar. Dazu wäre allerdings ein vollständiges Rohrleitungssystem aufzubauen. Ein Rohrleitungssystem besitzt neben der Transporteigenschaft zudem noch die Eigenschaft eines Speichers, der es ermöglicht, den Zeitpunkt der Wasserstoffproduktion von der Nutzung des Wasserstoffs zu entkoppeln. Es ist davon auszugehen, dass bei der Nutzung von gasförmigem Wasserstoff in Fahrzeugen Drucktanks von über 700 bar eingesetzt werden, so dass eine hohe Verdichtung für die Betankung der Fahrzeuge von Nöten ist. Diese ist wiederum mit Verlusten verbunden.

Bei Wasserstoff wäre eine Onsite-Produktion in der Nähe der Anwendung eine Option. Der Vorteil davon wäre das Wegfallen des Aufbaus einer großflächigen Verteilinfrastruktur. Die Wirkungsgrade in der Wasserstoffproduktion und die Möglichkeit der zeitlichen Entkoppelung von Produktion des Energieträgers und der Nutzung wären wegen des nicht vorhandenen oder nur kleinen Leitungsnetzwerks bei einer solchen dezentralen Lösung geringer. Zudem müsste der erneuerbare Strom dezentral für die Wasserstoffproduktion verteilt werden.

Für Methan besteht mit dem Erdgasnetz eine vorhandene Verteilinfrastruktur, die zudem die Möglichkeit der Entkoppelung von Produktion und Nutzung des Methans ermöglicht. Für die Anwendung im Verkehrssektor und für den Anschluss von Methanisierungsanlagen müsste dieses Netzwerk zwar angepasst werden, der finanzielle Aufwand wäre aber erheblich geringer als bei dem Aufbau eines Wasserstoffrohrleitungssystems. In der Nutzung besteht bei Methan der Vorteil der geringeren Transportverluste und der niedrigeren Verluste bei Betankung und der Verflüssigung, wobei Methan bei Leckageverlusten eine höhere Klimawirksamkeit als Wasserstoff besitzt.

Bei der Nutzung flüssiger FT-Kraftstoffe kann das bestehende Kraftstoffverteilsystem per Lkw weiter genutzt werden. Anpassungen wären nur bei neuen Produktionsstandorten notwendig. Um eine zeitliche Entkoppelung der Produktion und der Nutzung der Kraftstoffe zu ermöglichen, wäre eine Vergrößerung der Zwischenlager notwendig.

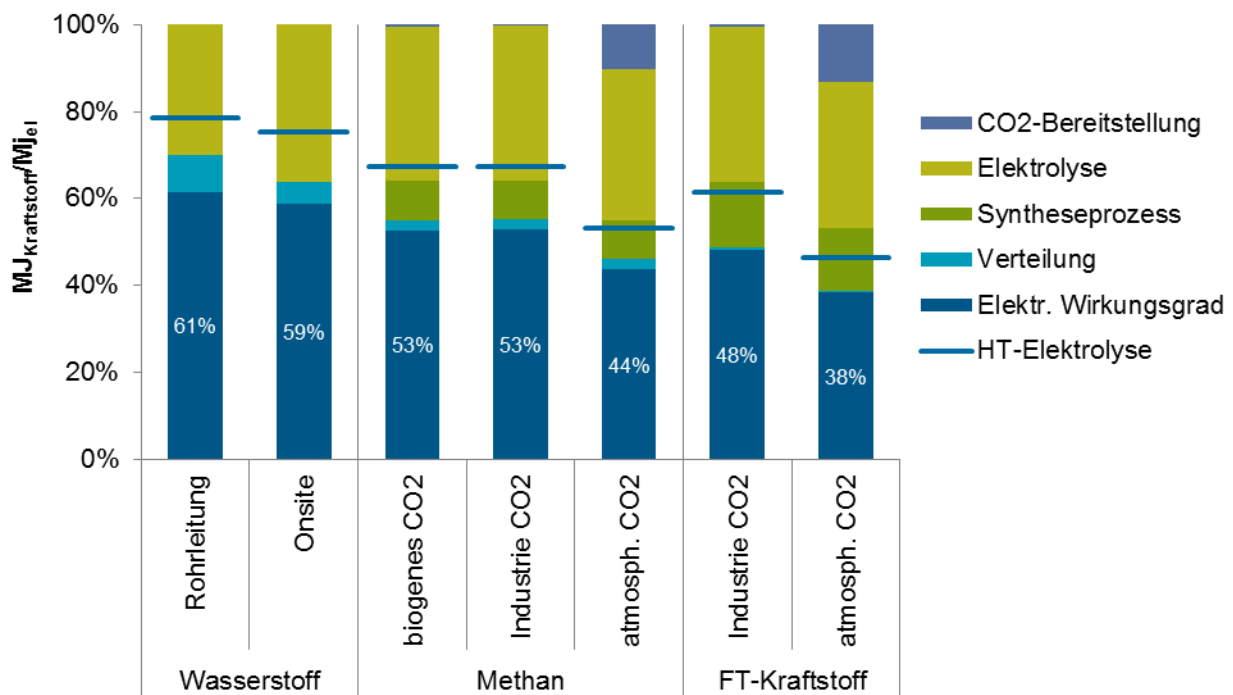
Elektrische Wirkungsgrade der Prozesskette

Für den Vergleich der verschiedenen Optionen an strombasierten Kraftstoffen sind in Abbildung 2-1 die elektrischen Wirkungsgrade¹⁰ verschiedener Prozessketten unter Berücksichtigung des langfristig zu erwartenden technologischen Fortschritts aufgezeigt. Als Basis für die Elektrolyse werden dabei die alkalische und die PEM-Elektrolyse ausgewählt. Als Sensitivität sind aber auch die elektrischen Wirkungsgrade beim Einsatz der Hochtemperatur-Elektrolyse dargestellt. Die Werte für die Verluste entlang der Prozesskette sind der Literatur entnommen und wurden im Rahmen eines Fachworkshops diskutiert (s. Abschnitt 2.4.1). Die wichtigsten Quellen für die Darstellung in Abbildung 2-1 sind dabei Edwards et al. (2011), Müller-Syring et al. (2013) und Nitsch et al. (2012). Eine detaillierte Aufschlüsselung der Quellen und der Daten für Abbildung 2-1 ist in Kasten et al. (2013) und in Anhang B gegeben. Die für *eMobil 2050* ausgewählten Pfade sind im Detail in Abschnitt 4.8.1 dargestellt.

Die Prozessketten für Wasserstoff zeigen trotz der höheren Verluste in der Verteilung der Energieträger die niedrigsten Verluste bezüglich des Stromeinsatzes. Dies ist damit zu erklären, dass nur ein Prozessschritt für die Herstellung benötigt und keine Energie für die Bereitstellung von Kohlenstoffdioxid aufgewendet wird. Aufgrund des geringeren Bedarfs an Kohlenstoff und des höheren Wirkungsgrads beim Syntheseprozess weist die Methanisierung entlang der Prozesskette Vorteile gegenüber FT-Kraftstoffen auf. Bei der Nutzung von atmosphärischem Kohlenstoffdioxid für den Syntheseprozess sinkt die elektrische Effizienz der Prozesskette für die Erzeugung strombasierter Kohlenwasserstoffe dabei jeweils um ca. 10 %-Punkte gegenüber den Varianten mit Kohlenstoffdioxid aus Industrie- und biogenen Prozessen. Dabei ist keine relevante Verbesserung der Energieeffizienz für die Abtrennung des Kohlenstoffs aus der Luft über die Zeit angenommen. Für die Prozesse der Elektrolyse und der FT-Synthese wurden auf Basis der genannten Studien Effizienzverbesserungen gegenüber heute angenommen, so dass heute die elektrischen Wirkungsgrade bis zu 10 % unter den in Abbildung 2-1 gezeigten Wirkungsgraden liegen würden.

¹⁰ Es wird der elektrische Wirkungsgrad betrachtet, da der Schwerpunkt der Studie in der Wechselwirkung zwischen Strommarkt und dem Verkehrssektor liegt. Bei verschiedenen aufgeführten Prozessen kommt auch thermische Energie zum Einsatz oder könnte als Abwärme in weiteren Prozessen genutzt werden. Deren Input ist in der Darstellung der elektrischen Wirkungsgrade nicht berücksichtigt.

Abbildung 2-1: Perspektivischer elektrischer Wirkungsgrad und Energieverluste für verschiedene Prozessketten strombasierter Energieträger



Quelle: Eigene Berechnung (Quellen: siehe Text und Ausführungen in Kasten et al. (2013))

2.4.4. Anwendung im Verkehrssektor

Die Energieträger Wasserstoff, Methan und FT-Kraftstoffe bieten unterschiedliche Möglichkeiten der Anwendung im Verkehrssektor. Eine genaue Analyse von Anwendungsmöglichkeiten im Straßenverkehr ist in den Abschnitten 2.2 und 2.3 gegeben, so dass an dieser Stelle nicht vertieft darauf eingegangen wird.

Wasserstoff kann in Verbrennungsmotoren und in Brennstoffzellen in Antriebsenergie gewandelt werden. Der Schwerpunkt der Forschung liegt wegen der höheren Wirkungsgrade in der Nutzung zurzeit bei Brennstoffzellenfahrzeugen (FCEV), die wegen der hohen Kosten und der geringen Haltbarkeit allerdings noch von der Marktreife entfernt sind. Offen ist wegen der geringen volumetrischen Energiedichte der Einsatz im Schwerlastverkehr. Im Flugverkehr stellt Wasserstoff keine Option dar; in der Schifffahrt ist die Nutzung auf Kurzstrecken und in der Binnenschifffahrt zumindest denkbar.

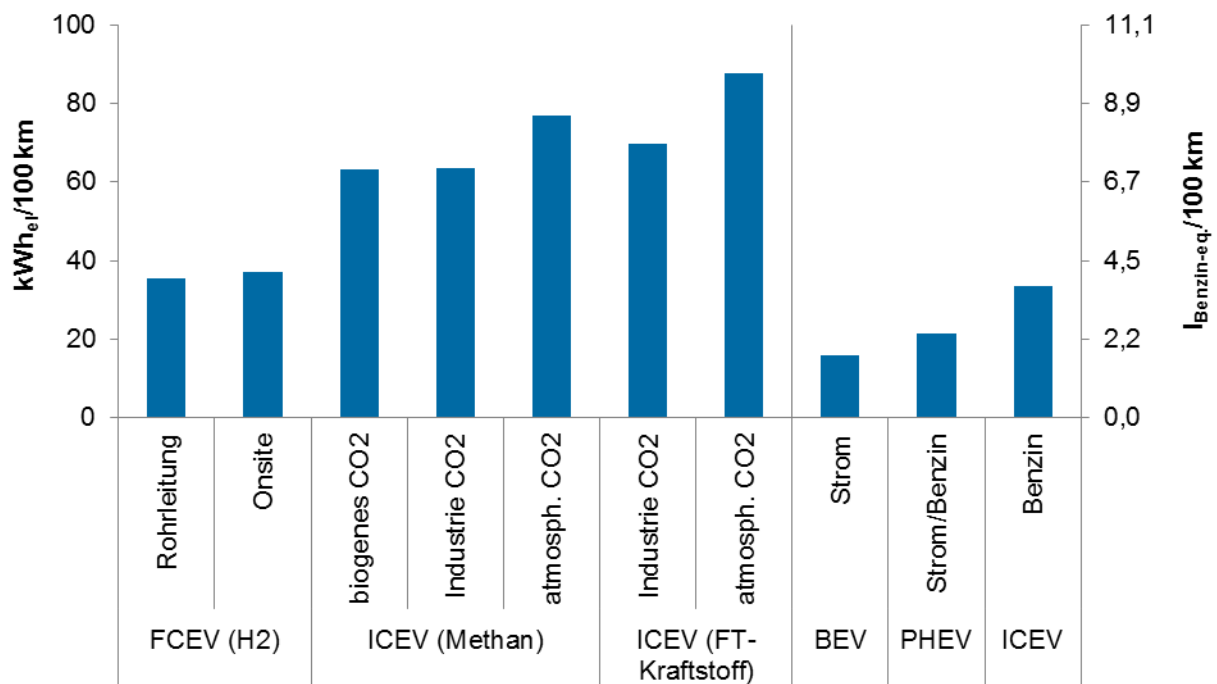
Im Straßenverkehr gibt es bereits serienmäßig Fahrzeuge, die mit Methan betrieben werden können. Für den Einsatz im Schwerlastverkehr und in der Seeschifffahrt wird zurzeit der Einsatz von verflüssigtem Erdgas bzw. Methan diskutiert und als eine ernsthafte Option zur Emissionsminderung in Betracht gezogen.

Bei der Nutzung von FT-Kraftstoffen würde sich keine Änderung in der Anwendung im Verkehrssektor ergeben, da dieser heute zum großen Teil auf mineralölbasierten Flüssigkraftstoffen beruht.

Für einen abschließenden Vergleich der Energieträgeroptionen wird in Abbildung 2-2 der Energieverbrauch beim Fahren mit einbezogen. Der Energieverbrauch im Fahrzeug bezieht sich

dabei auf einen zukünftigen, effizienten Pkw der Größenklasse mittel (genaue Annahmen zum Energieverbrauch in Kasten et al. (2013)). Durch die im Vergleich zu Verbrennungsmotoren effizientere Brennstoffzelle erhöht sich der energetische Vorteil von Wasserstoff im Vergleich zu Methan. Im Vergleich zu rein elektrisch angetriebenen Fahrzeugen erhöht sich der Strombedarf jedoch um mehr als das Doppelte, so dass aus energetischer, Klimaschutz- und Kostensicht (teil-)batterieelektrische Fahrzeuge einen relevanten Vorteil besitzen.

Abbildung 2-2: Spezifischer Strom-/Energiebedarf für Pkw (mittel) für verschiedene Prozessketten strombasierter Kraftstoffe



Quelle: Eigene Berechnung; (Quellen: siehe Text und Ausführungen in Kasten et al. 2013)

Für die Analyse der Wechselwirkungen zwischen Strommarkt und Verkehrssektor müssen aus den aufgezeigten möglichen Prozessketten relevante identifiziert und für die Nutzung in der Strommarktmodellierung mit *PowerFlex* aufbereitet werden. Darauf wird in Abschnitt 4.8.1 eingegangen.

3. Szenario-Prozess

3.1. Hintergrund

Um Aussagen über den Beitrag von elektrischen Antriebskonzepten und strombasierten Kraftstoffen zum langfristigen Klimaschutz treffen zu können, reicht es nicht aus, allein deren technische Potenziale zu betrachten. Es müssen gleichzeitig auch weitere Entwicklungen im Verkehrssektor – wie das Mobilitätsverhalten oder die Nachfrage nach Gütern – abgebildet werden. Das Forschungsvorhaben *eMobil 2050* wurde deshalb von einem visionär ausgerichteten Szenario-Prozess mit insgesamt drei Sitzungen begleitet und mitgestaltet. Ziel war es, in einem partizipativen Prozess mögliche Entwicklungspfade im Verkehrssektor bis zum Jahr 2050 aufzuzeigen, die nicht nur die technische Dimension widerspiegeln, sondern auch die Entwicklung der Verkehrsnachfrage unter Berücksichtigung unterschiedlicher Einflussgrößen betrachtet. Angesichts des weitreichenden Betrachtungszeitraums und der damit verbundenen Unsicherheit wurden in diesem Kontext auch mögliche Entwicklungen diskutiert, die sich deutlich von den bestehenden Rahmenbedingungen unterscheiden. Die entwickelten Szenarien zur Entwicklung der Verkehrsnachfrage bilden im Vorhaben die Grundlage für die Diskussion potenzieller Einsatzbereiche für elektrische Antriebskonzepte und strombasierte Kraftstoffe sowie für die Betrachtung der daraus resultierenden Wechselwirkungen mit der Energiewirtschaft.

3.2. Begriff und Methode der Szenariotechnik

Ein Szenario wird von vielen Autoren definiert als die Darstellung einer möglichen zukünftigen Situation (Zukunftsbild) inklusive der Entwicklungspfade, die zu der zukünftigen Situation führen. Im Unterschied zu einem Zukunftsbild, das lediglich einen hypothetischen zukünftigen Zustand darstellt, beschreibt ein Szenario damit auch Entwicklungen, Dynamiken und treibende Kräfte, aus denen ein bestimmtes Zukunftsbild resultiert (IZT 2008). Mit Szenarien können Ausprägungen hinsichtlich zukünftiger Entwicklungen über die Betrachtung relevanter Einflussfaktoren erarbeitet werden.

Es gibt verschiedene Methoden, um Zukunftsbilder zu entwerfen, z. B. über Trendextrapolationen, Delphi-Befragungen oder Simulationsmodelle. Im Rahmen von *eMobil 2050* wurde als Methode die Szenariotechnik ausgewählt. Zum einen baut sie auf Expertenurteilen auf und kann komplexe Zusammenhänge berücksichtigen. Zum anderen können sowohl quantitativ als auch qualitativ beschreibbare Faktoren in Zukunftsszenarien kombiniert werden. Mit Unterstützung der Szenariotechnik können hypothetische qualitative und quantitative Entwicklungen in Form von einzelnen Teilentwicklungen analysiert und beschrieben und dann zu einem zukünftigen Zustand zusammengesetzt werden. Angewendet wurde die Szenariotechnik beispielsweise vom Institut für Mobilitätsforschung, um das Thema „Zukunft der Mobilität“ in Szenarien bis 2020/25 abzubilden (Wilms 2006, Artikel 10).

Wesentlich ist, dass der Szenario-Prozess im Rahmen von *eMobil 2050* nicht zum Ziel hatte, Prognosen zu entwickeln. Es wurden vielmehr Szenarien erarbeitet, um Zusammenhänge zu verdeutlichen.

3.3. Vorgehen

Im Szenario-Prozess *eMobil 2050* wurde wie folgt vorgegangen:

1. Festlegen der Systemgrenzen
2. Brainstorming zu Einflussfaktoren für den Personen- und den Güterverkehr
3. Reduktion der Einflussfaktoren
4. Herausarbeiten plausibler Entwicklungspfade

5. Verdichtung der Einflussfaktoren zu zusammenhängenden Zukunftsbildern
6. Konsistenzanalyse
7. Diskussion von Maßnahmen, um erwünschte Entwicklungslinien zu unterstützen.

Gemäß der Zielsetzung des Szenario-Prozesses – nämlich Zukunftsbilder für den Verkehrsbereich abzuleiten – wurden Experten aus Wissenschaft und Unternehmen zu den Bereichen Automobil- und Mineralölindustrie, ÖPNV, Bahn, Logistik, sozial-ökologische Forschung, Energiewirtschaft, urbane Mobilität, integrierte Verkehrsplanung und nachhaltige Mobilität an einen Tisch gebracht. So konnte ein breites Spektrum an wesentlichen Einflussfaktoren für das umfassende Themenfeld abgedeckt werden. Die gemeinsame Diskussion erfolgte im Rahmen von insgesamt drei Workshops im Projektverlauf. Am Szenario-Prozess beteiligt waren:

- Dr. Jörg Adolf (Shell Deutschland)
- Prof. Dr. Christine Arendt (TU Berlin)
- Tilman Bracher (Deutsches Institut für Urbanistik)
- Jutta Deffner (Institut für sozial-ökologische Forschung)
- Prof. Dr. Heike Flämig und Sören Trümper (Universität Hamburg Harburg)
- Dr. Frank Geraets und Johannes Bachmann (Deutsche Bahn AG)
- Johannes Oppolzer (Deutsche Post AG)
- Martin Randelhoff (Herausgeber des Blogs „Zukunft Mobilität“)
- Thomas Sauter-Servaes (Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften)
- Katja Striefler (Region Hannover, Fachbereich Verkehr)
- Prof. Dr. Martin Wietschel (Fraunhofer ISI)
- Hans-Christian Winter (Daimler AG)

3.4. Szenario-Workshop 1: Trends und Einflussfaktoren bis 2050

Ziel des ersten Workshops war es, ein möglichst großes Ideenportfolio zur Entwicklung relevanter Einflussgrößen sowohl im Personen- als auch im Güterverkehr bis 2050 zu generieren sowie erste Gewichtungen und Bewertungen vorzunehmen.

In einem ersten Schritt wurden folgende Systemgrenzen für die *eMobil 2050* Szenarien definiert:

- Es sollen Aussagen sowohl über den Personen- als auch den Güterverkehr sowie alle Verkehrsträger getroffen werden können.
- Der betrachtete Raum ist Deutschland, wobei globale Einflüsse mit angesprochen werden.
- Der Zeithorizont ist 2050.

In einem zweiten Schritt wurde die Frage gestellt, welches die wesentlichen Einflussfaktoren der Entwicklung im Personen- und im Güterverkehr sind. Politiken wurden in *eMobil 2050* im ersten Schritt nicht als Einflussfaktoren behandelt, sondern am Ende als Rahmenbedingungen diskutiert, die verschiedene Ausprägungen hervorrufen können.

Der dritte Arbeitsschritt des Workshops war dann, herauszuarbeiten, welche plausiblen Entwicklungen, Ausprägungen oder Bandbreiten der zuvor angesprochenen Einflussfaktoren denkbar sind. Die Ergebnisse des ersten Workshops wurden anschließend vom Öko-Institut aufbereitet und konsolidiert. Vorschläge und Ideen zur Ausgestaltung der Einflussgrößen bzw. der Szenarien wurden anhand einer Literaturrecherche auf Realisierbarkeit, Hemmnisse und Auswirkungen untersucht (Kapitel 4).

Ergebnis des ersten Szenario-Workshops war eine Sammlung der von den Prozessteilnehmern identifizierten wesentlichen Einflussfaktoren für den Verkehrssektor in verschiedenen Ausgestaltungsformen. Diese sind in den drei folgenden Tabellen zunächst differenziert bezüglich ihres Einflusses auf den Personen- und Güterverkehr, nur den Personenverkehr beziehungsweise nur den Güterverkehr aufgelistet (Auflistung in Abbildung 3-1, Abbildung 3-2 und Abbildung 3-3).

Abbildung 3-1: Einflussfaktoren auf Personenverkehr und Güterverkehr

Einflussfaktor	Bemerkung	Mögliche Entwicklung bis/Ausprägung in 2050
Technologische Entwicklung	Fahrzeugantrieb, autonomes Fahren, Ressourcen, Vernetzung der Verkehrsmittel, Fahrzeugnormen zu Volumen/Länge	- Stadt: voll-autonome Elektro-Kleinfahrzeuge (reines Carsharing) mit zentralen Tiefgaragen und Rückbau von Parkständen im öffentlichen Raum - autonomes Fahren nur auf privatem Straßenland möglich (Pkw und Lkw) - autonomes Fahren ermöglicht Bildung noch effizienterer Fahrzeugzüge im Personen- und Güterfernverkehr - Pkw wie Lkw fahren CO₂-neutral und praktisch emissionsfrei - e-MIV als urbane Ergänzung; mehr Bündelung mit ÖV und Fahrrädern im Anschluss - Pluralismus Kraftstoffe und Antriebskonzepte - Elektrifizierung deutscher Bundesautobahnen (BAB) („eHighway“) und Oberleitungs-Lkw
Ölpreis / Treibstoffkosten, Ressourcen-verfügbarkeit		- Öl wird für Individualmobilität keine Rolle mehr spielen - Stromkosten und Treibstoffkosten haben einen noch höheren Einfluss auf die Mobilität - Ressourcenknappheit bedingt immer längere Handelswege → Erschließung von Polarregionen und Meeresgrund/Tiefsee → Schiff/Luftverkehr steigt an 2-Grad-Szenario → niedriger Ölpreis, BAU-Szenario → hoher Ölpreis
Politische Rahmenbedingungen	Mautregulierung, Sanktionen unerwünschter Verkehrsträger, Förderung Technologien	- Sektorziel Verkehr: mindestens -80 % THG und entsprechende Effizienzvorgaben (z. B. CO₂ Pkw) - externe Kosten jedes Verkehrsträgers sind komplett internalisiert: der Nutzer zahlt
Infrastruktur	Kapazität, Finanzierung, Zustand	- komplette Umstellung der Verkehrsinfrastruktur auf Nutzerfinanzierung - reduziertes BAB-Netz für Lkw-Verkehr geeignet (marode Brücken etc.); nur BAB-Kernnetz mit Oberleitung / Stromführung unterirdisch wird instand gehalten

		• gezielte Infrastrukturentwicklung (selektiv – Bahn etc.) • massive Infrastrukturmodernisierung • zu viel Infrastruktur und knappe Kassen → kaum Ausbau sondern nur Erhalt • Finanzierungskreislauf Mobilität
Personalkosten		• sinken für die letzte Meile, weil Hilfskräfte eingestellt werden • Dritter Arbeitsmarkt für Bürgerbusse / Mitfahrangebote / „Paratransit“ entsteht • Personalkosten spielen wegen hohem Automatisierungsgrad eine geringere Rolle
Auswirkungen Klimawandel	Sicherheit / Verfügbarkeit Transportwege	• verstärktes „regional sourcing“ und lokale Wertschöpfung, um Zuverlässigkeit der Produktion sicherzustellen (Sturm, Klimawandel, usw.) • verstärkte Auswirkungen des Klimawandels reduzieren den Personen- und Güterverkehr drastisch
Raumstruktur rural	Erreichbarkeit, Infrastruktur, Abwanderung	• nahezu vollständiges Verschwinden des SPNV in ländlichen Gebieten • Reduktion der Infrastruktur im ländlichen Raum auf Mobilitätszentren • teilweise Bevölkerungsrückgang um 30 % führt zu weniger Versorgungsstrukturen und mehr Selbstversorgern • Rückbau von Dörfern, mehr Naturraum •
Raumstruktur urban		• Trend zur Urbanisierung hält an; ländliche Räume entleeren sich; Infrastruktur ist kaum mehr vorhanden. • Beschränkung der Infrastruktur im ländlichen Raum auf „Mobilitätszentren“ • „shared space“ in allen von Wohnhäusern bestandenen Straßen

Quelle: Auswertung erster Workshop Szenario-Prozess eMobil 2050

Abbildung 3-2: Einflussfaktoren auf den Personenverkehr

Einflussfaktor	Bemerkung	Mögliche Entwicklung bis/Ausprägung in 2050
Demographie	Altersstruktur, Bevölkerungsentwicklung, Haushaltsstruktur, Kohorteneffekte	• 1-2 Personen-Haushalte dominieren bei weitem • kaum noch Altersunterschiede im Mobilitätsverhalten – hohes Bedürfnis auch der Alten an Mobilität (Reisen, Sport, Wissen, sozialer Austausch) • Deutschland ist Einwanderungsland
Arbeitswelt	Teilzeitarbeit, Home-Office, „E-Work“	• Erwerbstätigkeit verändert sich stark – Vollbeschäftigung ist nicht mehr möglich – neue Beschäftigungsmodelle prägen das Arbeitsleben • „always on“ Lebensstil zeigt gesundheitliche Folgen → neue Leitbilder entstehen • viel weniger kurze Wege, viel mehr Langstrecken
Lebensstil / Wertewandel allgemein	Gesundheit, Umweltbewusstsein, Flexibilität	• „grüne Mobilität“ dominiert (mehr LOHAS) • „gesunde Mobilität“ dominiert • „Mobilität muss Spaß machen“ dominiert • digitale Lebensstile breiten sich verstärkt aus – Nutzerinterface wird neuronal angebunden – Informationen werden gedacht • (noch) mehr Freizeitverkehr
Mobilitätsstile		• öffentlicher und privater Verkehr verschmelzen • Individualverkehr wird „öffentlich“; neue Dienstleistungsangebote ersetzen individuell besessene Autos (Carsharing, Ridesharing) • Sharen statt Besitzen • der Besitz von Fahrzeugen ist nur noch im Freizeitbereich die Regel: Motorrad, Sportwagen, Reiselimousine; alle anderen Wege werden mit Kombiticket (Nutzung aller Verkehrsmittel inklusive Carsharing, Bikesharing etc.) zurückgelegt
Mobilitätsangebot	Inter-Intramodal, Just-In-Time-Information; „seamless mobility“, neue Optionen wie Lastenfahrräder und Carsharing	• Mobilitätsangebote werden über portable Dienstleister vermarktet – das führt zu einer Steigerung des Angebots; es kann zu einer Steigerung der Mobilitätskosten führen (aber nicht zwangsweise, z. B. bei einer Verbesserung der Auslastung) • Qualitätssprung bei neuen ÖPNV-Modellen: Multimodalität, Anschlusssicherung per Smartphone • Individualisierter ÖV setzt sich durch – Dynamisierung des liniengebundenen Verkehrs in urbanen Räumen
Individuelle Mobilitätsbudgets	Zeit, Kosten, soziale Unterschiede, Mobilitätsarmut	• Mobilitätszeitbudget steigt, weil Reisezeit nutzbar wird • Mobilität wird für gewisse Bevölkerungsgruppen nicht mehr bezahlbar – wenige Finanzstarke können auf ein exklusives Mobilitätssystem zugreifen • Mobilitätsarmut steigt, weil die ÖV-Finanzierung sinkt und die soziale Schere stärker wirkt • Mobilitätszeitbudget steigt, weil die nächste

	• Generation geringere Wochenarbeitszeit hat bzw. will • finanzielles Budget für Mobilität wird geringer • Zeitaufwand für Mobilität bleibt gleich • Zeitbudget wird irrelevant, da sich die Grenzen zwischen Arbeit und Freizeit auflösen, Radfahren als Bewegungsform zur gesundheitlichen Norm wird
Finanzierung öffentlicher Verkehr	• Kosten für Erstellung sinken (Konzentration, höhere Auslastung) • Kosten für Erstellung steigen (Technik, Energie, Aufwand für Erschließung, Qualitätsanforderungen) • „Bürgerticket“ in allen Städten – Finanzierung analog Rundfunkgebühr durch die Haushalte

Quelle: Auswertung erster Workshop Szenario-Prozess eMobil 2050

Abbildung 3-3: Einflussfaktoren auf den Güterverkehr

Einflussfaktor	Bemerkung	Mögliche Entwicklung bis/Ausprägung in 2050
e-Commerce	Retouren, Auswahlkäufe Hintergrund: e-Commerce wächst zurzeit mit 30 % p.a.	• vor allem regionale Einkäufe, Mitnutzen, Tauschbörsen; Reparaturen • e-Commerce Volumen wächst. Kostenrestriktionen verhindern einen breiten Ausbau der Flexibilisierung (Geschwindigkeit/differenzierte Zustellung nach Zahlungsbereitschaft) • Volumen e-Commerce wächst stark, die Anforderungen an eine Flexibilisierung nehmen zu, starke Konzentration der Betreiber • e-Commerce als Standard. Onlinekaufen und Lieferung/Abholung • mögliche Dämpfer für e-Commerce durch City-Maut (ggf. aber auch Restriktion für Einzelhandelsbelieferung), konsequente Überwachung von Falschparken (KEP)
Veränderungen Güterstruktur		• leichter und werthaltiger; Trend zu größeren Transportgütern • neue Verkehrsträger (Cargolifter / Güterschwebbahn...)
Wirtschaftsentwicklung		• volatile Aufwärtsbewegung vs. Stagnation (Vorschlag: im Szenario möglichst exogen vorgeben) • Finanzierung durch Banken bezieht Innovation ein (Kernkriterium für Kreditvergabe) • qualitatives statt quantitatives Wachstum • Industrialisierung China / Eurasien
Fabben/3D-Druck		• Güterproduktion verlagert sich signifikant hin zu 3D-Druck-Verfahren; der Güterverkehr ist dadurch rückläufig und wird lokaler • in der industriellen Produktion erfolgt eine Umstrukturierung (veränderte Wertschöpfungsketten)

Flexibilisierung Güterverkehr	Fristigkeit der Güter, Supply Chains, Logistikkonzepte	
Konsumkultur/ Präferenzen beim Einkauf		• grünes Wirtschaftswachstum → schnelle Diffusion neuer Technologien und Produkte • Postwachstumsgesellschaft → achtsamer Umgang mit den vorhandenen Produkten • Trend zu regionalen Produkten • wachsende Optionen - Anforderungen an Frische und Exklusivität steigen • „Spaßkäufe“ • große Bereitschaft, für „grünen“ Transport mehr zu bezahlen
City-Logistik		• v.a. elektrische Auslieferungen, Fahrradzustellung • anbieteroffene Konsolidierungspunkte / räumliche Bündelung • CO₂-neutrale Innenstadtversorgung und –entsorgung • 24h Kultur, Wegfall von Ladenöffnungszeiten, Erweiterung der Lieferzeiträume (→ befördert E-Mobilität?) • verbreitete Nutzung / Implementation von City-Logistik-Lösungen (z. B. Konsolidierungszentren) • Luftverkehrsnutzung (ähnlich Zeppelin) für die City-Logistik in Ballungszentren
Produktionsstruktur	Arbeitsteilung, Produktionsstandorte	• Innerstädtische Industriecluster • Verschwinden von Produktion und Industrie aus Metropolen (statt dessen: Wissen, Finanzen) • Welthandel „The World is flat“ vs. mehr Protektionismus und dadurch weniger Arbeitsteilung / Handel • Differenziertere Arbeitsteilung zwischen Hochleistungshubs; Diversifizierung von Entwicklung, Produktion, Endfertigung (Shanghai/Bangalore/München), Marginalisierung von Randlagen
Kreislaufwirtschaft und Recycling	„Reverse Logistics“, Lebensdauer Produkte	• Rohstoffe aus Urban Mining wichtiger als originärer Abbau • Low-Tech-Produkte werden regional produziert und vertrieben • 100 % Kreislaufwirtschaft

Quelle: Auswertung erster Workshop Szenario-Prozess eMobil 2050

Die oben aufgeführten Einflussfaktoren wurden ausgehend von der aktuellen Situation bezüglich möglicher Trends und denkbarer Weiterentwicklungen und unter Berücksichtigung ergänzender Informationen aus der Literatur analysiert (siehe Anhang). Darauf aufbauend wurden Zukunftsbilder für den Personen- und Güterverkehr im Jahr 2050 abgeleitet, die wiederum die Grundlage für die Definition konkreter Szenarien darstellen.

Um das Vorgehen im Rahmen des knapp angesetzten Szenario-Prozesses (insgesamt drei Sitzungen) so effizient wie möglich zu gestalten, hat das Öko-Institut bereits vor der zweiten Sitzungen auf Basis der von den Teilnehmern des Szenario-Prozesses identifizierten Einflussfaktoren zwei möglichst plausible und in sich stimmige Szenario-Vorschläge ausgearbeitet, um diese dann als Grundlage zur Szenariendiskussion im zweiten Workshop zu nutzen.

3.5. Szenario-Workshop 2: Konzeption zweier Zukunftsbilder

Ziel des zweiten Workshops war - auf Grundlage der Szenario-Vorschläge des Öko-Instituts - die konkrete Ausgestaltung zweier Szenarien bis 2050. Die Szenarien sollten unterschiedliche Entwicklungspfade für den Verkehrssektor bis zum Jahr 2050 aufzeigen, so dass anhand verschiedener „Welten“ im Jahr 2050 die Potenziale von elektrischen Antriebskonzepten und strombasierten Kraftstoffen veranschaulicht werden können.

Ergänzend zu den Zukunftsbildern 2050 bezüglich der Verkehrsnachfrage wurden im zweiten Workshop zusätzlich plausible Technologieoptionen für die Szenarien diskutiert. Grundlage für die Diskussion war unter anderem eine Zusammenfassung der Ergebnisse der *eMobil 2050*-Fachworkshops zu Pkw- und Nutzfahrzeug-Technologien.

Ergebnis des zweiten Workshops war schlussendlich die Finalisierung der Zukunftsbilder 2050 für die Szenarien *Grenzenlos eMobil* und *Regional eMobil*, die im Folgenden beschrieben sind. Für die Nachvollziehbarkeit und Transparenz sind die im ersten Stakeholder-Workshop diskutierten Einflussfaktoren in der folgenden Beschreibung der „Zukunftsbilder 2050“ kursiv dargestellt.

Das Jahr 2050

Die *Bevölkerung* verzeichnet einen *Rückgang* auf rund 74 Mio. Menschen, obwohl *Deutschland Einwanderungsland* ist und jährlich durchschnittlich 200.000 Menschen einwandern. Gleichzeitig ändert sich auch die Bevölkerungsstruktur. Diese zeigt eine deutliche *Alterung*, das heißt der Anteil der über 65-Jährigen steigt von heutzutage 21,5 % auf 29 %.

Grundsätzlich ist der Alltag durch eine immer stärkere Durchdringung von *IuK-Technologien* geprägt. Die *Verfügbarkeit von Echtzeitinformation* über das Verkehrsgeschehen ist fast immer gegeben und prägt die Verkehrsmittelwahl im Personenverkehr. Die *Inter- bzw. Intramodalität* wird dadurch deutlich vereinfacht.

Klimaschutz wird weltweit als verbindliches Politikziel anerkannt und alle Staaten verpflichten sich zu sektoralen *Minderungszielen* der Treibhausgasemissionen.

Szenario *Grenzenlos eMobil*

Die Globalisierung schreitet weiter voran und hält Einzug in allen Lebensbereichen. Multinationale Abkommen, kulturelle und wirtschaftliche Verflechtungen nehmen einen immer höheren Stellenwert ein. Die *Arbeitsteilung zwischen Hochleistungshubs* wird weiter differenziert. Im Güterverkehr setzt sich der Trend zu *leichteren und höher veredelte Transportgütern* fort. Die Transportleistungen steigen global durch die *Diversifizierung* und damit die zunehmende räumliche Entkopplung von *Entwicklung, Produktion, Endfertigung* an.

Erreicht wird Klimaschutz im Verkehr vor allem durch eine starke Elektrifizierung sowohl im Personen- als auch im Güterverkehr in Kombination mit dem Ausbau erneuerbarer Energien. Die Marktdurchdringung grüner Technologien wird durch *strenge Regulierungen* im Kontext der Klimaschutzziele gefördert; außerdem ist *Innovation ein Kernkriterium für die Kreditvergabe durch Banken*. So ist die *Entwicklung und schnelle Diffusion neuer Technologien und Produkte* gewährleistet und ein *grünes Wirtschaftswachstum* ist auf dem Vormarsch.

Die Erwerbsquote bleibt weiterhin auf hohem Niveau und es überwiegt die Vollzeitarbeit. Die meisten Berufstätigen pendeln dabei nicht mehr täglich zwischen Wohnort und Arbeitsplatz. Ein bis zwei Tage pro Woche entwickeln sich in den Wirtschaftssektoren mit überwiegender Büroarbeit zum Telearbeitstag. Auch Telemeetings setzen sich zunehmend durch.

Die Alltagswelt ist durch Technik geprägt. *Digitale Lebensstile* breiten sich verstärkt aus und auch die Geschwindigkeit der Informationsübertragung nimmt zu.

Fahrzeuge im Straßenverkehr können und dürfen sich bis zur Mitte des Jahrhunderts *autonom fortbewegen*. Automobilität ist immer weniger an den Besitz eines Führerscheins gebunden. Zudem können die Nutzer das Fahrzeug zu ihrem jeweiligen Standort „rufen“. Durch das *Bilden von Fahrzeugzügen* erhöht sich die Kapazität der Autobahnen, die Anzahl der Staus geht demzufolge trotz höheren Verkehrsaufkommens zurück und die spezifischen Energieverbräuche können dadurch gesenkt werden.

Die Zahl der Supermärkte geht deutlich zurück, denn Einkäufe für den täglichen Bedarf werden zum Großteil *online* getätigt und direkt nach Hause geliefert, wobei alle Haushalte mit Zustellboxen ausgestattet sind. Dabei nimmt der *Anspruch* der Verbraucher *an Frische* und ständige, jahreszeitunabhängige Verfügbarkeit von vielfältigen Produkten zu, so dass sich die Lieferketten für Lebensmittel weiter globalisieren. Neben den Einkäufen für den täglichen Bedarf werden über Internet auch Produkte aus aller Welt bestellt, wobei deren *Exklusivität* eine wichtige Rolle spielt. Das *Volumen an E-Commerce wächst damit stark* an.

Zwar wird durch die Digitalisierung die Informationsbeschaffung zu Produkten immer einfacher – Kleidung kann zum Beispiel virtuell anprobiert werden – dennoch spielt *Shopping als Erlebnis* weiterhin eine Rolle. Einkaufszonen in Innenstädten bleiben bestehen und sind auf Erlebniseinkauf bzw. den Einkauf als soziales Ereignis ausgerichtet. Um dem Bedürfnis nach mehr Flexibilität längerfristig Rechnung zu tragen, wird die *Begrenzung der Ladenöffnungszeiten abgeschafft*. Es entsteht eine *24h-Kultur*, was auch eine *Erweiterung der Lieferzeitfenster* ermöglicht.

Entsprechend dem Konsumverhalten ist auch die individuelle Mobilität durch das Motto „*Mobilität muss Spaß machen*“ geprägt. Automobilität mit dem eigenen Pkw spielt dabei in vielen Bevölkerungsschichten weiter eine dominante Rolle.

Es gibt bis 2050 *kaum noch Altersunterschiede im Mobilitätsverhalten*, denn auch die Älteren leben ihr hohes Bedürfnis an Mobilität für Reise, Sport und sozialen Austausch aus.

Hinzu kommt, dass das *Mobilitätszeitbudget ansteigt*, da *Reisezeiten* nicht nur im öffentlichen Verkehr, sondern auch durch die Möglichkeit des autonomen Fahrens *nutzbar werden*.

Die Wegelängen im Berufs- und Freizeitverkehr nehmen zu, was sich begründet zum einen durch die *immer stärkere, globale Vernetzung* und die dadurch entstehenden weltweiten Kontakte, zum anderen durch die weitere Verkürzung der Reisezeiten (durch autonomes Fahren und die bessere Vernetzung der Verkehrsträger).

Der *Trend zur Urbanisierung* hält an. Um dem Klimaschutz in den Städten gerecht zu werden, werden dort ab dem Jahr 2030 zunehmend *emissionsfreie Innenstadtzonen* eingeführt. Da der Pkw jedoch für viele hochmobile Städter zu ihrem Lebensstil gehört, wird dies vor allem über CO₂-neutrale Antriebstechnologien erreicht. Single-Haushalte entscheiden sich zunehmend für elektrisch betriebene Zweisitzer-Pkw, Familien für größere Plug-in-Hybrid- oder batterieelektrische Pkw mit einer hohen elektrischen Reichweite, um die innerstädtischen Fahrten elektrisch zurücklegen zu können, aber gleichzeitig für Ausflüge und Urlaubsfahrten dasselbe Fahrzeug nutzen zu können. Ergänzend stehen jedoch für Besitzer von batterieelektrischen Fahrzeugen mit geringerer Reichweite zunehmend auch Mietangebote in Form von Plug-in-Hybrid-Pkw zur

Verfügung, um sporadische längere Strecken mit dem Pkw bewältigen zu können. Als ergänzendes Angebot gewinnt zumindest in Städten Carsharing an Bedeutung, wobei vor allem kommerzielle Anbieter den Markt dominieren.

Die CO₂-neutrale Innenstadtversorgung und -entsorgung der Städte wird durch *elektrische Auslieferungen* realisiert. Ausgehend von *anbieteroffenen Konsolidierungspunkten* an Verkehrsknoten (z. B. Randlagen der Innenstädte) erfolgt die gebündelte *Ver- und Entsorgung* der Innenstadt *in den Tagesrandzeiten oder nachts mit elektrischen Lkw*.

Ländliche Räume entleeren sich zunehmend, es kommt zum *Rückbau von Dörfern und mehr Naturraum* wird geschaffen. Der Pkw bleibt in ländlichen Räumen vorherrschendes Transportmittel. Die meisten Menschen in ländlichen Gebieten entscheiden sich dabei für ein Plug-in-Hybrid-Fahrzeug oder einen batterieelektrischen Pkw mit hoher elektrischer Reichweite, um damit sowohl in die nächste Stadt fahren als auch längere Distanzen zurücklegen zu können. Batterieelektrische Microcars spielen in ländlichen Räumen im Vergleich zu Städten eine untergeordnete Rolle. In ländlichen Räumen wird klassischer öffentlicher Verkehr (abgesehen von Schüler- und Ausbildungsverkehr) auf Grund der sinkenden Nachfrage auf die Anbindung von „Mobilitätszentren“ konzentriert. Für die letzte(n) Meile(n) werden dann vor allem autonom fahrende Pkw genutzt. Menschen ohne Zugang zu einem eigenen Pkw können dabei auf einen Pool an Fahrzeugen zurückgreifen, welche an Mobilitätszentren bereitgestellt werden. Echtzeitinformationen erleichtern diese Kombination aus öffentlichem und halb-öffentlichem Verkehr.

Das Autobahn-Kernnetz ist *mit Oberleitungen* ausgestattet, und ein Großteil des Güterfernverkehrs wird über Oberleitungs-Lkw abgewickelt. Auch Fernbusse nutzen die mit Oberleitungen ausgestatteten Autobahnen. Im Fall von *Extremwetterereignissen* wie z. B. Überschwemmungen, welche zum Ausfall eines Verkehrsträgers führen, können Reisende relativ problemlos auf einen alternativen Verkehrsträger umsteigen (z. B. von der Schiene auf die Straße); ähnliches gilt für den Güterverkehr. Insgesamt ist damit das Fernverkehrssystem von einem hohen Maß an Zuverlässigkeit geprägt.

Die Ausstattung der Autobahnen mit Oberleitungen sowie der Erhalt des Fernverkehrsnetzes sind mit hohen Investitionen verbunden, welche durch die Einführung von *Straßenbenutzungsgebühren* finanziert wurden. Dies führte dazu, dass die Kosten für Mobilität auf hohem Niveau bleiben.

Durch die Konzentration des ÖV auf Mobilitätszentren und die bessere flexible Anpassung an den Beförderungsbedarf konnte jedoch die Auslastung des ÖV deutlich verbessert werden. Da auch die Straßenbenutzungsgebühr beim ÖV weniger stark ins Gewicht fällt, bleibt der öffentliche Verkehr eine verhältnismäßig günstige Alternative, kann aber mit dem Pkw als Statussymbol weiterhin nur bedingt konkurrieren.

Die neuen, grünen Technologien bedingen gleichzeitig einen *weiteren Anstieg des Ressourcenbedarfs*. Auch dadurch steigt die Transportleistung vor allem im Seeschiffs- und Luftverkehr weiter an, denn nun müssen zum einen mehr Rohstoffe transportiert werden, zum anderen müssen aber auch *neue Lagerstätten* erschlossen werden..

Im Szenario *Grenzenlos eMobil* bleibt der Trend zu weiteren Distanzen und Beschleunigung im Personen- und Güterverkehr bestehen. Der eigene Pkw spielt eine wichtige Rolle.

Szenario Regional eMobil

Die Gesellschaft vollzieht einen *Wertewandel*. Dieser ist geprägt durch den Wunsch nach Entschleunigung, Besinnung auf regionale Vorzüge und *achtsamen Umgang mit vorhandenen Produkten*.

Die Bedeutung von materiellem Konsum als Ausdruck des Lebensstiles ist zurückgegangen. Dadurch ändert sich das Konsumverhalten. *Regionale Produkte werden bevorzugt.* Collaborative Consumption - *Mitnutzen, Tauschbörsen* und Wiederverwenden - prägt das Alltagsleben. Klimaschutz ist nicht nur staatlich reguliert, sondern wird durch den Einzelnen gelebt. Nachhaltigkeit hat sich als politisches Ziel fest etabliert und alle Produkte müssen ökologische und soziale Nachhaltigkeitsstandards erfüllen.

Verstärktes „regional sourcing“ und lokale Wertschöpfung gewinnen auch deshalb an Gewicht, um die *Zuverlässigkeit der Produktion* und Warendistribution *sicherzustellen* (häufige Extremwetterereignisse in bestimmten Weltregionen und entlang wichtiger Handelswege).

Der *„always on“ Lebensstil hat gesundheitliche Folgen gezeigt*, so dass neue Leitbilder entstanden sind. Neue Beschäftigungsmodelle prägen das Arbeitsleben und Arbeit wird gleichmäßiger verteilt. *Durch eine geringere Wochenarbeitszeit steigt das Mobilitätszeitbudget.* Bei der Verkehrsmittelwahl rückt damit das Kriterium der Schnelligkeit in den Hintergrund. Auch bei Fernreisen gibt es einen Wandel. Flugreisen werden eher wieder zur Ausnahme als zur Regel.

Durch die neu gewonnene, zusätzliche Freizeit steigt der Bedarf nach Online-Einkäufen für Produkte des täglichen Bedarfs kaum an, da genügend Zeit für ein höheres Maß an Selbstversorgung sowie den Einkauf im Nahraum bleibt. Das *E-Commerce Volumen* wächst vor allem im Bereich des „Consumer-2-Consumer“-Handels.

Das Mobilitätsleitbild wandelt sich. *Nutzen statt Besitzen* ist das dominierende Motto – zumindest in den Städten. Fast alle Wege werden mit dem *Kombiticket* (Nutzung aller Verkehrsmittel inklusive Carsharing, Bikessharing etc.) zurückgelegt. Der *Individualverkehr wird* damit quasi „öffentlich“ und *neue Dienstleistungsangebote ersetzen individuellen Autobesitz.* Öffentlicher und privater Verkehr verschmelzen. Der *Rückbau von Parkständen im öffentlichen Raum* unterstützt dies. Pkw werden verstärkt über Pooling genutzt und sind weniger in Privateigentum. Damit steigt gleichzeitig die Nachfrage nach öffentlichen Verkehrsmitteln an, so dass das Angebot erhalten und teilweise sogar ausgebaut werden kann.

Fahrzeuge des MIV sowie Lkw können und dürfen sich bis zur Mitte des Jahrhunderts auf Autobahnen *autonom fortbewegen.* Innerhalb von Ortschaften ist autonomes Fahren nach wie vor verboten – es gibt einen gesellschaftlichen Konsens, dass die Unfallgefahr zu groß sei.

Der *Qualitätssprung bei neuen ÖPNV-Modellen*, wie die einfache Handhabung von Multimodalität per Smartphone, die *Dynamisierung des liniengebundenen Verkehrs* und die Steigerung des Angebots führen zu einer deutlichen Erhöhung der Nachfrage. Die *Kosten für die Erstellung* sinken durch ein gezieltes Angebot und eine *höhere Auslastung.* *CO₂-freie Innenstadtverkehre* werden damit vor allem durch die Nutzung energiearmer Verkehrsmittel erreicht. In Innenstädten ist Tempo 30 die Regel. Eine zunehmende Anzahl von Straßen in den Städten ist autofrei und wird von den Anwohnern als Aufenthalts- und Lebensraum genutzt. Straßencafés, urbane Gärten und Spielplätze prägen die Städte. Reine Wohngebiete gibt es kaum mehr, die konsequente Umsetzung einer Nutzungsmischung von Wohnen, Einkaufen, Arbeiten und Freizeit ist umgesetzt.

Die verbleibenden Pkw, bei denen es sich in der Regel um Fahrzeuge in geteilter Nutzung handelt, sind auf den Innenstadtverkehr optimiert: klein, leicht, damit besonders energieeffizient und mit einem möglichst kostengünstigen emissionsfreien Antriebskonzept ausgestattet.

Für eine *CO₂-neutrale Innenstadtver- und -entsorgung* gewinnen neben der Auslieferung mit kleinen elektrischen Lkw auch Lastenfahrräder mit elektrischer Unterstützung zunehmende Bedeutung. Im Rahmen eines optimierten City-Logistik-Konzeptes, das u. a. *anbieteroffene*

Konsolidierungspunkte und eine *starke, räumliche Bündelung* umfasst, kann die Fahrleistung für die Güterfeinverteilung auf ein Minimum reduziert werden.

Der Grad an *Selbstversorgung* und regionaler Versorgung mit Lebensmitteln (Urban gardening, Community supported agriculture etc.) nimmt zu. Durch die *Konzentration auf regionale Produkte*, lokale Bestell- und Einkaufsoptionen und die Möglichkeiten des *3-D-Druckens* geht die Wegeanzahl für Einkäufe zurück. Durch mehr *Eigenleistung* - und damit eine Reduktion der industriellen Produktion - und gemeinschaftliche Nutzung von Gütern sowie die Stärkung regionaler Märkte wird eine Trendumkehr auch bei der Güterverkehrsleistung erreicht. *Rohstoffe aus Urban Mining* werden wichtiger als deren originärer Abbau, denn eine *100 % Kreislaufwirtschaft* wird angestrebt; *Low-Tech-Produkte werden regional produziert und vertrieben*. Da sich die *Güterproduktion* hin zu *3-D-Druck-Verfahren* verlagert, wird das *Güterverkehrsaufkommen für entsprechende Produkte rückläufig und lokaler*: In 3-D-Druck-Shops kann eine Vielzahl von Alltagsgegenständen bei Bedarf sofort gedruckt und genutzt werden. Die Wiederverwertung der Materialien erfolgt in regionalen Kreisläufen.

Durch eine komplette Umstellung der *Verkehrsinfrastruktur* auf eine *Nutzerfinanzierung* kann die Straßeninfrastruktur *erhalten* bleiben, wobei es jedoch zu *keinem weiteren Aus- oder Neubau* kommt und auf eine Elektrifizierung des Autobahnnetzes verzichtet wird. Stattdessen werden Kapazitätsengpässe auf der Schiene beseitigt, so dass eine Verlagerung von Güterverkehr auf die Schiene stattfindet und sich der Gütertransport auf der Schiene beinahe verdoppelt.

Das Szenario *Regional eMobil* ist durch einen Werte- und Strukturwandel geprägt. Viele Bedürfnisse können im unmittelbaren Umfeld befriedigt werden und individuelle Mobilität wird lokaler und entschleunigt. Auch die Güterverkehrsleistung geht, vor allem aufgrund der Konzentration auf regionale Märkte, zurück. „Nutzen statt Besitzen“ gewinnt an Bedeutung.

3.6. Szenario-Workshop 3: Diskussion der Szenarioergebnisse

Die Auswirkungen der beiden beschriebenen Szenarien auf den Verkehrs- und Energiesektor wurden durch das Öko-Institut mit dem Verkehrsmodell *TEMPS* und dem Strommarktmodell *PowerFlex* quantifiziert (Kapitel 4).

Im Rahmen des dritten Workshops wurden die Szenarioergebnisse vorgestellt und mit den Teilnehmern diskutiert. Ziel dieser abschließenden Sitzung war es auch, die verschiedenen Entwicklungspfade und deren Auswirkungen auf den Einsatz von elektrischen Antriebskonzepten und strombasierten Kraftstoffen unter Berücksichtigung von Energiebedarf und Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors zu bewerten und konkrete Maßnahmen zu diskutieren, wie erwünschte Entwicklungslinien unterstützt bzw. unerwünschten entgegengewirkt werden kann.

4. Szenarien eMobil 2050

4.1. Vorgehen

Auf Basis der im Szenarioprozess entwickelten Zukunftsbilder (Kapitel) wurden die konkreten Szenarien *Grenzenlos eMobil* und *Regional eMobil* formuliert und anhand der Entwicklung von Verkehrsnachfrage, der Neuzulassungsstruktur, der Effizienzentwicklung auf Fahrzeugebene sowie der Entwicklung der Energienachfrage näher beschrieben. Die aus den Szenarien abgeleitete Veränderung der Energienachfrage bildet wiederum die Grundlage für die darauf folgenden energiewirtschaftlichen Betrachtungen (Kapitel 5) und die Quantifizierung der Treibhausgasemissionen für die beiden Entwicklungen des Verkehrssektors bis zum Jahr 2050 (Kapitel 6).

4.2. Demographische Entwicklung

In den Szenarien wird angenommen, dass die Bevölkerung in Deutschland gemäß der Variante 1-W2 der zwölften Bevölkerungsvorausberechnung des Statistischen Bundesamtes (DESTATIS 2009) bis zum Jahr 2050 auf 73,6 Mio. Einwohner sinkt. Davon wohnen 32% in Städten über 100.000 Einwohner (heute 27%). Durch den demographischen Wandel steigt der Anteil der über 65-jährigen deutlich auf 32% (heute: 21%).

4.3. Verkehrsnachfrage im Personenverkehr

Grenzenlos eMobil: Annahmen

- **Wegeanzahl:** Die Anzahl der Wege pro Person bleibt gegenüber heute nahezu konstant, allerdings kommt es zu Verschiebungen zwischen den Wegezwecken. Einkäufe des täglichen Bedarfs können zunehmend online getätigt und direkt nach Hause geliefert werden, so dass die Anzahl der Einkaufswege um 50 % zurückgeht (wodurch im Gegenzug der Güterverteilverkehr entsprechend zunimmt). Arbeitswege sinken durch den demographischen Wandel und Zunahme von Home-Office um 10 %. Die Anzahl der Dienstreisen bleibt auf hohem Niveau – zwar gibt es mehr Telemeetings, dies wird jedoch durch die weiter zunehmende Arbeitsteilung und internationale Vernetzung mit entsprechendem Reiseaufkommen kompensiert. Freizeit- und Versorgungswege nehmen um 20 % zu.
- **Wegelängen:** Mehrere Faktoren befördern eine weitere Zunahme der Wegelängen. Reisezeiten (auch im eigenen Pkw) werden auf Grund der Möglichkeit des autonomen Fahrens sowie Smartphones immer besser nutzbar, so dass längere Wege (z. B. zwischen Wohnort und Arbeit) vermehrt in Kauf genommen werden. Die durchschnittlichen Wegelängen nehmen gegenüber 2010 um 10 %, bei Arbeitswegen um 20 % zu.
- **Modal Split:** Es gibt gegenüber heute kaum Veränderungen des Modal Split. Pkw-Besitz und Pkw-Nutzung spielt weiter eine dominante Rolle und Carsharing wird vor allem als Ergänzung zum eigenen Pkw genutzt.
- **Pkw-Besetzungsgrad:** Zunehmende Leerfahrten durch autonomes Fahren und ein anhaltender Trend zur Individualisierung führen dazu, dass der Pkw-Besetzungsgrad von durchschnittlich 1,47 Personen / Fahrzeug auf 1,4 Personen / Fahrzeug zurückgeht.

Regional eMobil: Annahmen

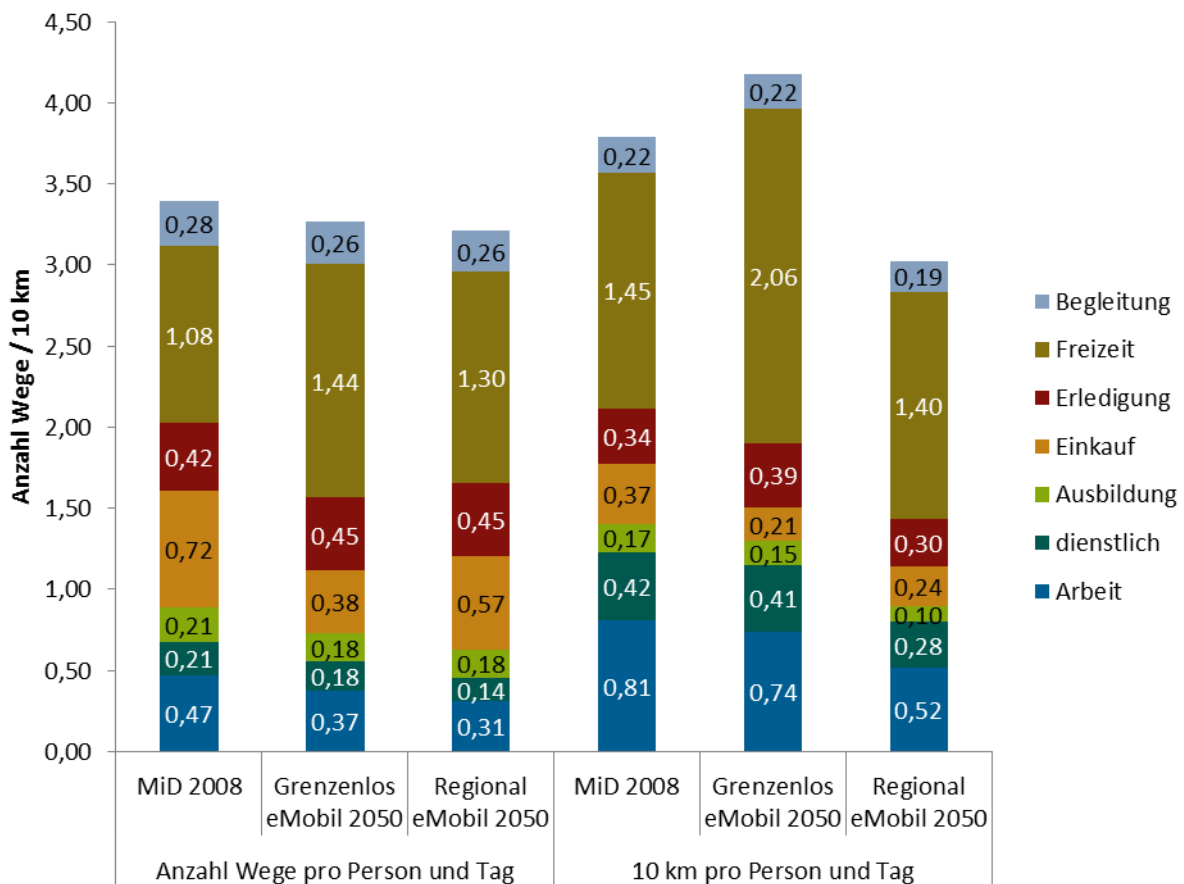
- **Wegeanzahl:** Auch im Szenario *Regional eMobil* kommt es zu Verschiebungen zwischen den Wegezwecken. Eine reduzierte Wochenarbeitszeit führt zu 25 % weniger Arbeitswegen und Dienstreisen. E-Commerce spielt eine weniger wichtige Rolle, dennoch gehen die Einkaufswege zurück (-25 %), da auch die regionale Versorgung wieder an Bedeutung gewinnt. Freizeit- und Versorgungswege nehmen ebenfalls um 20 % zu.

- **Wegelängen:** Versorgungs- und Freizeitstrukturen werden zunehmend lokaler. Dadurch nehmen die durchschnittlichen Wegelängen um 15 % ab.
- **Modal Split:** Der Modal Split verändert sich deutlich gegenüber heute. Der Fahrradanteil steigt in Kernstädten auf rd. 30 % und in verdichteten/ ländlichen Räumen auf rd. 20 %, wobei ein Drittel der Wege mit Pedelecs zurückgelegt wird. Das Angebot im öffentlichen Verkehr verbessert sich deutlich und der öffentliche Verkehr nimmt zu. Aber auch der Umgang mit dem Pkw wird pragmatischer und „Nutzen statt Besitzen“ setzt sich durch. Der Anteil der geteilten Pkw-Nutzung (flexibles und stationäres Carsharing sowie Mietwagen) am motorisierten Individualverkehr steigt auf über 40 % (Kernstädte 80 %, Umland/ländlicher Raum 30 %).
- **Pkw-Besetzungsgrad:** Es gibt einen Trend zum gemeinsamen Nutzen und Mitfahren, denn durch Smartphones und internetfähige Navigationssysteme wird spontanes Mitfahren leichter und komfortabler. Der Pkw-Besetzungsgrad erhöht sich daher auf 1,6 Personen / Fahrzeug.

Ergebnisse

Im Szenario *Grenzenlos eMobil* steigen die durchschnittlich pro Person und Tag zurückgelegten Kilometer um gut 10 % von 38 auf 42 Kilometer an, obwohl die Anzahl der Wege sogar minimal zurückgeht (Abbildung 4-1). Ursache dafür ist die Zunahme der Wegelängen. Im Szenario *Regional eMobil* sinken dagegen die Wegelängen und damit auch die zurückgelegten Kilometer deutlich auf 30 km pro Person und Tag.

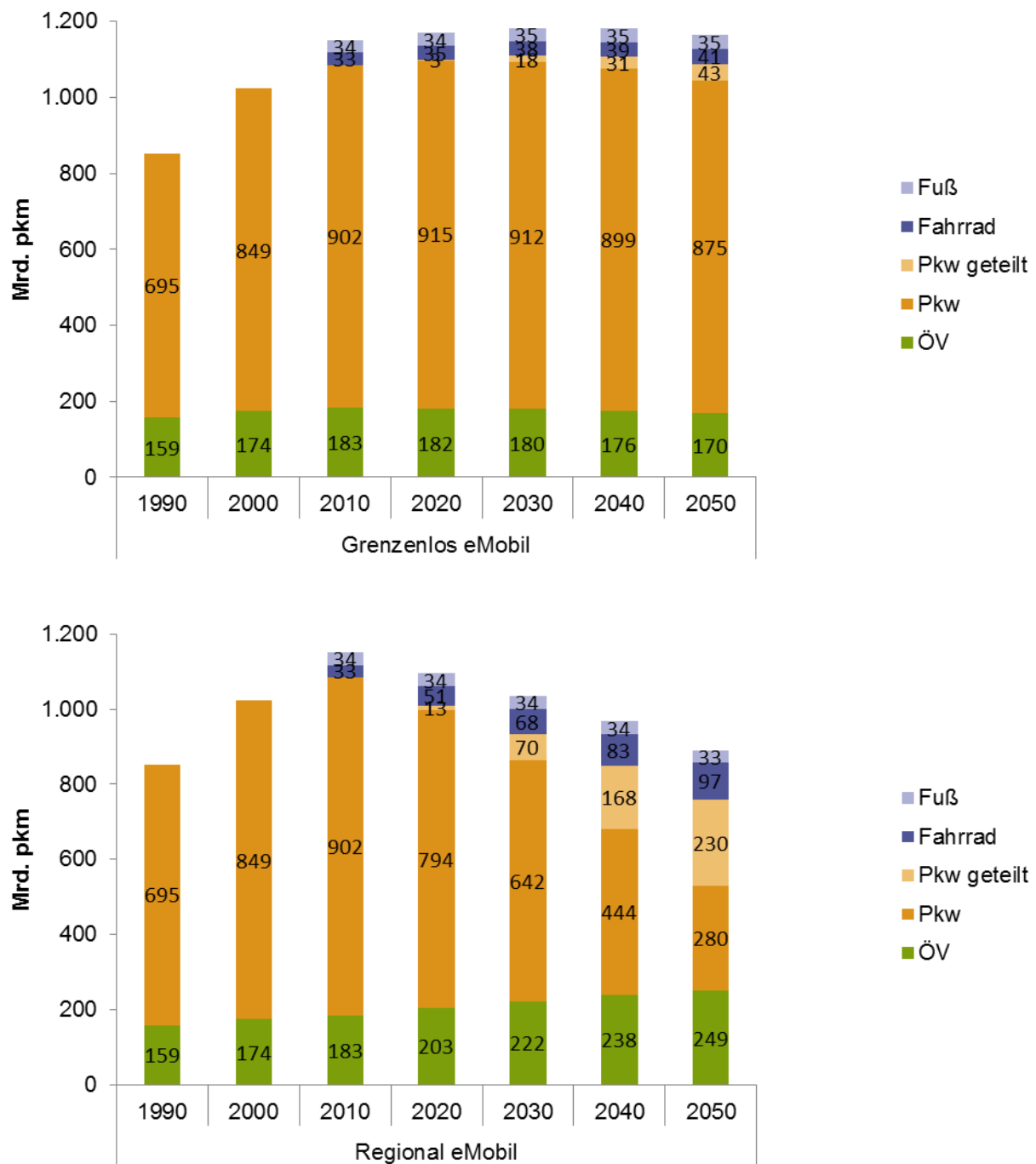
Abbildung 4-1: Personenverkehr nach Wegezwecken - heute und 2050



Quelle: MiD 2008, eigene Berechnungen.

Die inländische Personenverkehrsleistung ergibt sich unter Berücksichtigung der Bevölkerungsentwicklung (Abbildung 4-2). Es zeigt sich, dass die zunehmenden Wegelängen im Szenario *Grenzenlos eMobil* durch den Bevölkerungsrückgang nahezu kompensiert werden und die Personenverkehrsleistung dadurch fast konstant bleibt. Im Szenario *Regional eMobil* kommt es dagegen zu einer deutlichen Trendwende und die Personenverkehrsleistung geht um 23 % zurück.

Abbildung 4-2: Verkehrsleistung im Personenverkehr 1990 - 2050



Quelle: Eigene Berechnungen

Im Szenario *Grenzenlos eMobil* bleibt dabei der Pkw mit einem Anteil von 80 % an der Verkehrsleistung dominant und steigt trotz Bevölkerungsrückgang noch leicht auf 918 Mrd. pkm an. Dagegen sinkt im Szenario *Regional eMobil* der Pkw-Anteil an der Verkehrsleistung auf 57 %.

4.4. Verkehrsnachfrage im Güterverkehr

Grenzenlos eMobil: Annahmen

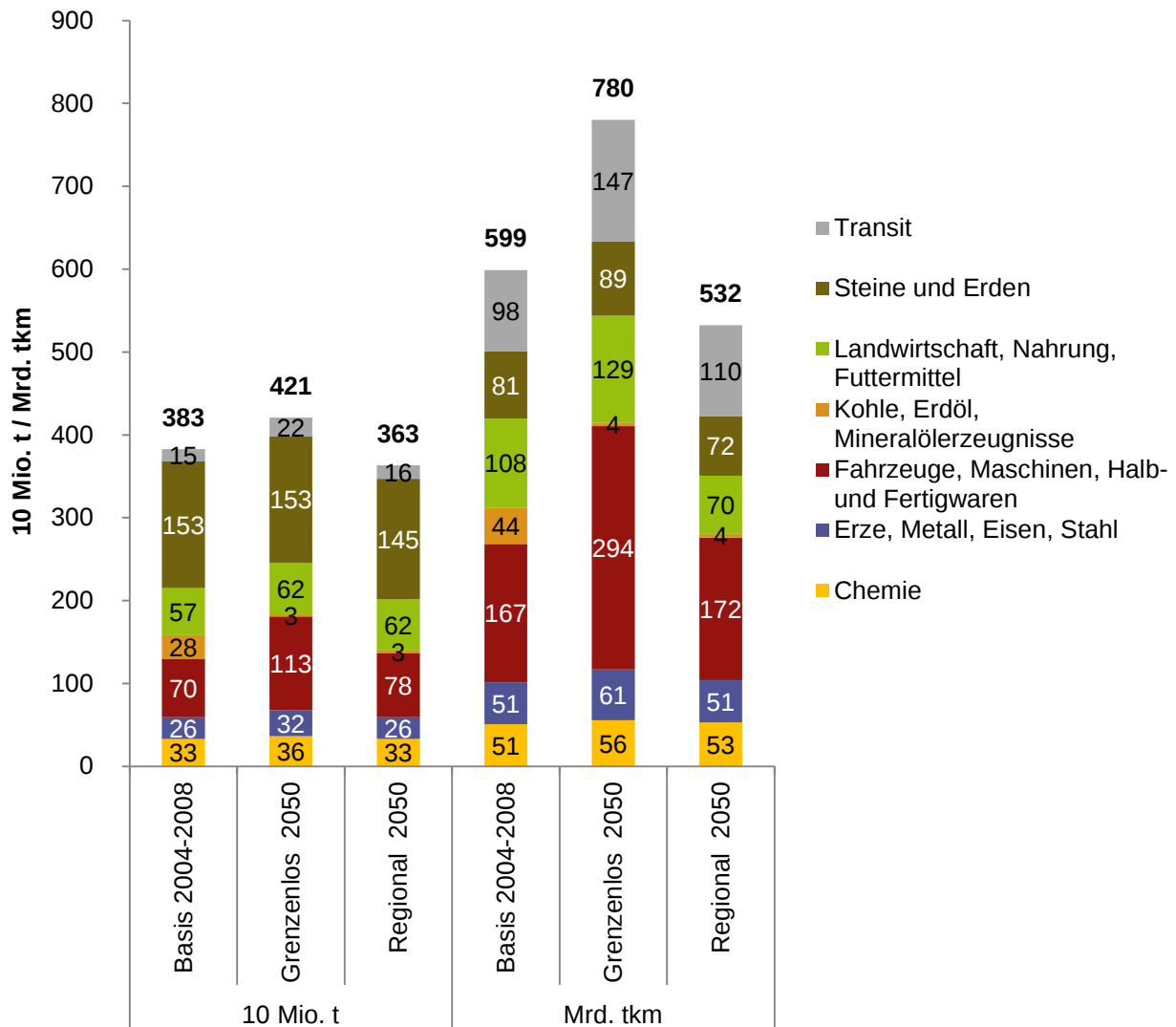
- **Aufkommen:** Der Trend zu höher veredelten Transportgütern hält an. Insbesondere bei „Fahrzeugen, Maschinen, Halb- und Fertigwaren“ und im Transitverkehr steigt das Aufkommen gemäß des historischen Trends deutlich (+50 %). Aufgrund der Klimaschutzziele geht das Aufkommen der fossilen Energieträger um 90 % zurück.
- **Transportweiten:** Die Transportweiten steigen bei Konsumgütern aufgrund höherer Anforderungen an Exklusivität weiter an (+10 %). Fortschreitender Außenhandel sowie der anhaltende Güterstruktureffekt führen ebenfalls zu steigenden Transportweiten.
- **Infrastruktur / Verlagerung:** Es gibt keine Anstrengungen und Investitionen zur deutlichen Steigerung der Leistungsfähigkeit der Verkehrsträger Schiene und Binnenschiff. Stattdessen wird in die Infrastruktur für Oberleitungs-Lkw auf Autobahnen investiert und die Straße bleibt im Güterverkehr dominant.
- **Auslastung:** Durch Optimierung der City-Logistik kann die Auslastung innerstädtisch erhöht werden (+20 %); im Fernverkehr steigt die Auslastung nur noch geringfügig (+5 %)

Regional eMobil: Annahmen

- **Aufkommen:** Der sparsame Umgang mit Ressourcen gewinnt - nicht nur in Deutschland - an Bedeutung. „Nutzen statt Besitzen“, reduzierter Pkw-Besitz sowie Fabbing dämpfen den Anstieg des Güterverkehrsaufkommens. So nimmt das Aufkommen von Fahrzeugen, Maschinen, Halb- und Fertigwaren und auch der Transitverkehr nur noch leicht zu (beide jeweils +10 %).
- **Transportweiten:** Regionale Wirtschaftskreisläufe gewinnen an Bedeutung. Bei landwirtschaftlichen Produkten und Lebensmitteln gehen aufgrund steigender Nachfrage nach regionalen Produkten und lokalen Kreisläufen die Transportweiten um 40 % zurück. Auch der Trend zu lokalen Recycling-Kreisläufen und zum Fabbing trägt zur Reduktion der Transportweiten bei.
- **Infrastruktur / Verlagerung:** Behebung von Kapazitätsengpässen beim Schienennetz und Verbesserungen beim kombinierten Verkehr führen zu einer Verlagerung von Verkehr auf Schiene und Binnenschiff. In den Güterbereichen „Fahrzeuge, Maschinen, Halb- und Fertigwaren“, „Chemie“ und „Steine und Erden“ können Binnenschiff und Bahn ihren Anteil am Modal Split verdoppeln.
- **Auslastung:** Durch Optimierung der City-Logistik kann die Auslastung innerstädtisch erhöht werden (+20 %); im Fernverkehr steigt die Auslastung nur noch geringfügig (+5 %)

Ergebnisse

Während das Güterverkehrsaufkommen im Szenario *Grenzenlos eMobil* bis 2050 auf 421 Mio. Tonnen ansteigt, geht es im Szenario *Regional eMobil* auf 363 Mio. Tonnen zurück (Abbildung 4-3). Der deutliche Unterschied zwischen den Szenarien zeigt sich jedoch erst bei der Güterverkehrsleistung. Während diese im Szenario *Grenzenlos eMobil* aufgrund der zunehmenden Transportweiten auf 780 Mrd. Tonnenkilometer ansteigt, geht sie im Szenario *Regional eMobil* auf 532 Mrd. Tonnenkilometer zurück, was in etwa dem Niveau von 2003 entspricht.

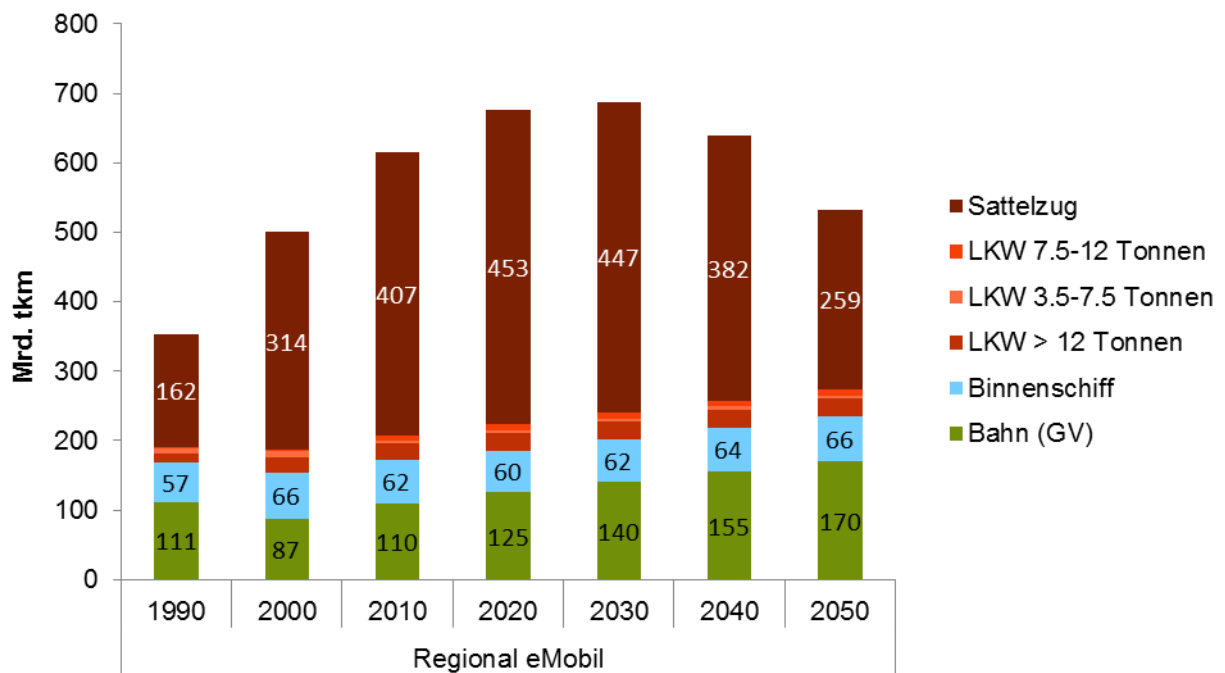
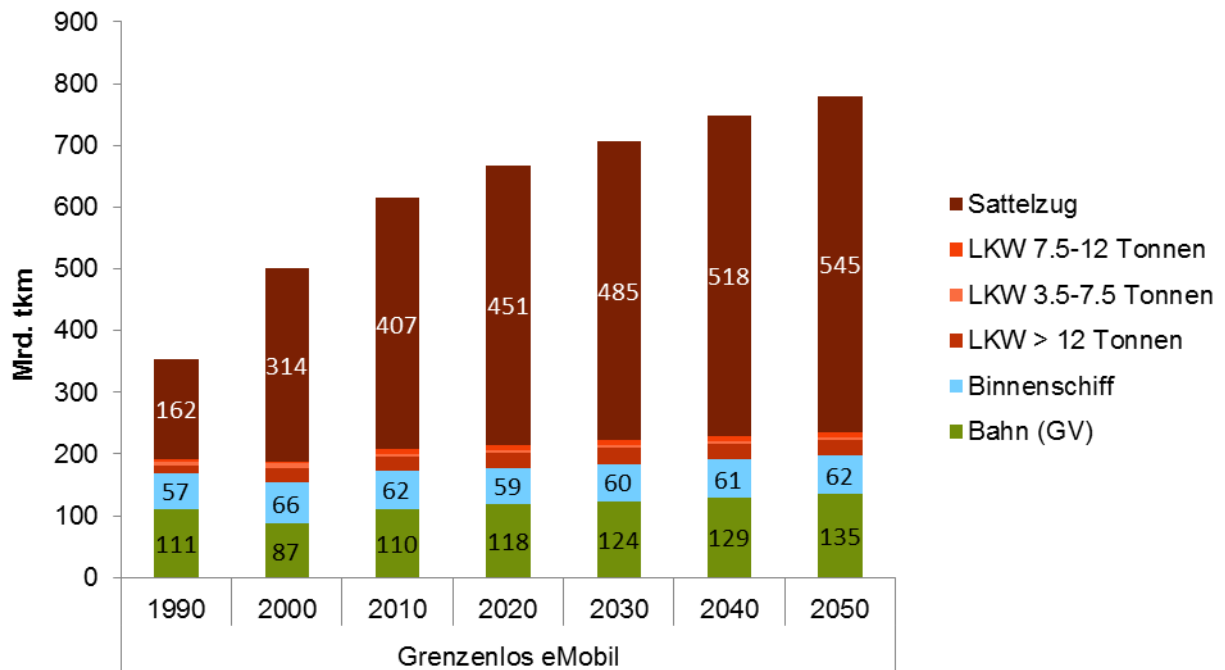
Abbildung 4-3: Güterverkehr nach Gütergruppen, heute und 2050

Quelle: Destatis 2009, Verkehr in Zahlen, eigene Berechnungen.

Unterschiede zwischen den Szenarien zeigen sich auch im Modal Split (Abbildung 4-4). Im Szenario *Grenzenlos eMobil* steigt durch die Güterstrukturverschiebung der Anteil der Straße am Modal Split leicht (um 3 %). Schiene und Binnenschiff nehmen wegen der höheren Verkehrsleistung in absoluten Werten leicht zu. Der Straßenverkehr steigt dagegen deutlich auf 545 Mrd. Tonnenkilometer im Jahr 2050.

Im Szenario *Regional eMobil* steigt die Güterverkehrsleistung zunächst bis zum Jahr 2030 weiter auf gut 700 Mrd. Tonnenkilometer an. Langfristig ergibt sich jedoch durch die sparsamere Ressourcennutzung sowie kürzere Transportweiten ein Strukturwandel, welcher in einem Rückgang der Güterverkehrsleistung resultiert. Dabei findet außerdem bis zum Jahr 2050 eine deutliche Verlagerung auf Schiene und Binnenschiff statt. Der Straßenverkehr sinkt um 30 % und hat im Jahr 2050 noch einen Anteil von 55 % an der Verkehrsleistung.

Abbildung 4-4: Verkehrsleistung im Güterverkehr, 1990-2050



Quelle: DESTATIS 2009, eigene Berechnungen

4.5. Rahmenbedingungen für die Marktentwicklung von Elektromobilität

Elektrofahrzeuge stellen mit etwa 6.000 Pkw-Neuzulassungen in 2013 und etwas mehr als 12.000 Bestandsfahrzeugen zu Beginn des Jahres 2014 (KBA 2014a, KBA 2014) einen Anteil an den Gesamtneuzulassungen bzw. dem Gesamtbestand der Pkw von weit unter 1 % dar. Im Bereich der straßengebundenen Nutzfahrzeuge beschränkt sich der Einsatz elektrischer Antriebe bisher vorwiegend auf Vor- oder Kleinserienfahrzeuge. Dem gegenüber steht die Zielsetzung der Bundesregierung, bis zum Jahr 2020 eine Million Elektrofahrzeuge im deutschen Fahrzeugbestand zu etablieren und die Anzahl bis zum Jahr 2030 auf sechs Millionen Fahrzeuge mit elektrischem Antrieb zu erhöhen (Deutsche Bundesregierung 2011).

Im Rahmen der beiden *eMobil 2050* Szenarien werden zwei mögliche Langfristpfade von Elektromobilität im motorisierten Individualverkehr, im Straßengüterverkehr und im öffentlichen Personenverkehr aufgezeigt, die sich jedoch beide an einer besonders ambitionierten Marktentwicklung von Elektromobilität orientieren. In beiden Szenarien wird davon ausgegangen, dass sich die Rahmenbedingungen für Elektromobilität besonders positiv entwickeln. Zwar sind auch weniger günstige Rahmenbedingungen grundsätzlich denkbar - da im Fokus des Projektes jedoch die Betrachtung der Wechselwirkung von Elektromobilität und Strommarkt steht, war die grundsätzlich positive Marktentwicklung der Elektromobilität eine Prämisse in beiden Szenarien. Der angenommene Markthochlauf lässt folglich keine Schlussfolgerungen hinsichtlich der Wahrscheinlichkeit einer entsprechenden Entwicklung zu, erhebt jedoch den Anspruch, eine mögliche und in sich konsistente Entwicklung des Fahrzeugbestands abzubilden. Die Entwicklung der Marktszenarien war von der grundsätzlichen Annahme getragen, dass Elektromobilität sich im Bereich Pkw langfristig zur dominierenden Technologie entwickelt und bei Nutzfahrzeugen deutlich an Bedeutung gewinnt. Entsprechend der übergeordneten Projektfragestellung fokussieren die *eMobil 2050* Szenarien auf elektrische Antriebstechnologien, die auf einer direkten Stromnutzung (batterieelektrisch, oberleitungsgebunden) basieren. In Ergänzung wird in den Szenarien teilweise der Einsatz strombasierter Kraftstoffe auf Basis konventioneller verbrennungsmotorischer Antriebe in unterschiedlicher Ausprägung berücksichtigt.

Der Einsatz von Brennstoffzellenfahrzeugen in den Szenarien wird angesichts der Fokussierung des Vorhabens auf die Betrachtung der Wechselwirkungen von Elektromobilität und direkter Stromerzeugung nicht explizit betrachtet, auch wenn diese Technologieoption perspektivisch in einigen Anwendungsbereichen eine Alternative oder Ergänzung zu voll- oder teilelektrischen Antriebskonzepten darstellt. Eine grundsätzliche Einschätzung zum möglichen zukünftigen Markterfolg von Brennstoffzellenfahrzeugen lässt sich aus der fehlenden Berücksichtigung dieser Antriebstechnologie in *eMobil 2050* nicht ableiten. Die Wechselwirkung von Brennstoffzellenfahrzeugen mit der Stromerzeugung kann in ihrer Grundstruktur anhand der Analysen zu strombasierten Kraftstoffen nachvollzogen werden.

Eine Entwicklung von Elektromobilität, die es ermöglicht, dass die Ziele der Bundesregierung im Jahr 2020 und 2030 erreicht werden und nach 2030 eine zunehmende Marktdominanz erzielt wird, ist angesichts der vorherrschenden Dominanz des verbrennungsmotorischen Antriebs voraussichtlich nur bei einer besonders günstigen Entwicklung der Rahmenbedingungen möglich. Für die nachstehend dargestellte Entwicklung von Elektromobilität in den beiden Szenarien *Grenzenlos eMobil* und *Regional eMobil* werden daher folgende Annahmen zur Entwicklung der Rahmenbedingungen getroffen:

Fahrzeugtechnologie: Die Automobil- und Zulieferindustrie misst der Energieeffizienz bei der Entwicklung von Fahrzeugen, u. a. auf Grund entsprechender regulatorischer Rahmenbedingungen, eine weiter zunehmende Bedeutung bei. Die Effizienzsteigerung konventioneller Pkw orientiert sich auch nach 2020 an den Zielwerten auf europäischer Ebene und nähert sich durch die Hybridisierung technisch und kostenseitig zunehmend elektrischen

Alternativen an. Elektrofahrzeuge gewinnen in der Fahrzeugproduktion in unterschiedlichen Antriebskonfigurationen (BEV, PHEV, REEV) zunehmend an Bedeutung und es wird eine konkurrenzfähige Modellvielfalt angeboten. Entscheidend für den ansteigenden Markterfolg sind jedoch vor allem bedeutende Fortschritte in der Batterieentwicklung und -fertigung. Durch die Serienreife von Lithium-Batterien der nächsten Generation können deutliche Fortschritte in Bezug auf Energiedichte und Kosten erzielt werden. Daher können nach 2020 auch batterieelektrische Fahrzeuge mit mehreren hundert Kilometer Reichweite zu konkurrenzfähigen Marktpreisen angeboten werden.

Im Zuge der Entwicklungsfortschritte bei der Elektrifizierung des Pkw-Antriebs sowie vergleichbaren regulatorischen Rahmenbedingungen gewinnen auch im Bereich der Lkw bis 12 Tonnen sowie bei Bussen elektrische Antriebe an Attraktivität und werden durch Hersteller als Serienfahrzeuge angeboten.

- **Ladeinfrastruktur:** Die Ladeinfrastruktur wird mit dem zunehmenden Markterfolg von Elektrofahrzeugen sukzessive ausgeweitet. Während sich die Lademöglichkeiten in der frühen Marktphase vor allem auf das Privatgelände der Fahrzeughalter beschränken, gewinnen in der Folge insbesondere Ladestationen im halb-öffentlichen Raum an Bedeutung. Schnellladesäulen ergänzen das Spektrum der Lademöglichkeiten, werden im Alltag aber meist nur sporadisch genutzt. Standardladesäulen im öffentlichen Raum werden insbesondere für das an Bedeutung gewinnenden Segment der geteilten Pkw-Nutzung sowie für Fahrzeugbesitzer in Städten ohne eigenen Stellplatz weiter ausgebaut.

Elektrisch betriebene leichte und schwere Nutzfahrzeuge nutzen vor allem Lademöglichkeiten auf dem eigenen Betriebsgelände oder am Zielort. Im Linienbusverkehr werden die Fahrzeuge zum einen nachts auf dem Betriebsgelände sowie tagsüber – vorwiegend induktiv – an Endhaltestellen mit Aufenthaltszeiten von mindestens 15 Minuten nachgeladen.

Im Szenario *Grenzenlos eMobil* wird durch den Einsatz von oberleitungsgebundenen Fern-Lkw eine Elektrifizierung des Kernautobahnnetzes erforderlich. Eine umfassende Analyse der Realisierbarkeit eines entsprechenden Infrastrukturausbaus hinsichtlich technischer, rechtlicher und ökonomischer Aspekte wurde im Rahmen des Projekts *eMobil 2050* nicht durchgeführt, so dass die Berücksichtigung oberleitungsgebundener Fern-Lkw an dieser Stelle keine Rückschlüsse auf die tatsächliche Realisierbarkeit erlaubt.

Im Szenario *Regional eMobil* kommen im Straßengüterfernverkehr verstärkt gasbetriebene Fahrzeuge zum Einsatz. Hierfür wird insbesondere entlang der Hauptverkehrsachsen das Netz an Gas-Tankstellen ausgeweitet.

- **IuK-Technologien:** Die zunehmende Nutzung von IuK-Technologien unterstützt den Markterfolg von Elektrofahrzeugen. Insbesondere die Planung des Fahrzeugeinsatzes unter Berücksichtigung von Batterieladestand und elektrischer Reichweite, die Steuerung der Batterieladung und Lokalisierung von Ladestationen sowie die mögliche Vernetzung mit anderen Verkehrsmitteln bzw. Mobilitätsdienstleistungen erhöht den Komfort sowie die Einsatzmöglichkeiten und damit die Akzeptanz von Elektrofahrzeugen.
- **Nutzerakzeptanz:** Die zunehmende Akzeptanz von Elektrofahrzeugen bei privaten und gewerblichen Fahrzeughaltern ermöglicht den Markterfolg von Elektrofahrzeugen. Begünstigt wird diese durch die sinkenden Zusatzkosten im Vergleich zu einer vergleichbaren konventionellen Fahrzeugvariante und die deutlich ausgeweitete Modellvielfalt. Insbesondere in der frühen Marktphase stellen Hybridfahrzeuge eine Technologie dar, die angesichts der geringeren Reichweitenrestriktion auf rege Nachfrage stößt. Das verstärkte Angebot von Elektrofahrzeugen mit größerer Reichweite und die zunehmende Vernetzung mit alternativen

Mobilitätsangeboten erhöhen jedoch in der Folge die Attraktivität batterieelektrischer Fahrzeuge und verdrängen zunehmend Hybridfahrzeuge. Ferner tragen niederschwellige Angebote für die Erprobung von Elektrofahrzeugen (z. B. im Carsharing) sowie die zunehmende öffentliche Präsenz von Fahrzeugen mit elektrischem Antrieb zu einem verstärkten Vertrauen bei Pkw-Haltern in die Zuverlässigkeit der Technik bei.

Sowohl in der privaten wie auch der gewerblichen Anwendung spielen zunehmend auch Umweltgesichtspunkte bei der Fahrzeugbeschaffung eine Rolle. Der Klimavorteil und insbesondere der lokal emissionsfreie Betrieb von Elektrofahrzeugen stellt angesichts einer verschärften Regulierung der Emissionen – insbesondere in Städten – einen deutlichen Anreiz für die Beschaffung elektrischer Fahrzeuge dar.

Insbesondere im gewerblichen Einsatz stellen die zunehmend günstigeren Gesamtnutzungskosten der elektrischen gegenüber der konventionellen Fahrzeugvariante einen weiteren wichtigen Faktor für die gesteigerte Attraktivität elektrischer Antriebe dar.

- **Politische / regulatorische Rahmenbedingungen:** Zentral für den Markterfolg energieeffizienter Elektrofahrzeuge sind begünstigende regulatorische Rahmenbedingungen. Die langfristige Fortschreibung der Regulierung zur Effizienzentwicklung von Pkw und Nutzfahrzeugen auf internationaler Ebene führt zu verstärkten Entwicklungsanstrengungen und einer gezielten Vermarktung von Elektrofahrzeugen seitens der Automobilindustrie. In einer Übergangszeit stellt die steuerliche Besserstellung von elektrisch betriebenen Fahrzeugen einen weiteren Anreiz für den Betrieb von Elektrofahrzeugen dar. Besonders wirkmächtig stellt sich die zunehmende Einführung von emissionsfreien Innenstädten ab 2030 dar. Sowohl hinsichtlich der Anzahl der Städte als auch des jeweiligen Geltungsbereichs kommt es in den Folgejahren zu einer deutlichen Ausweitung dieser Zonen. Motorisierte Mobilität ist im Innenstadtbereich dann nur noch mit Elektrofahrzeugen möglich. Dies hat entsprechende Folgen sowohl für den privaten als auch den gewerblichen Fahrzeugeinsatz und führt u. a. zu einer zunehmenden Popularität von elektrisch betriebenen Microcars.

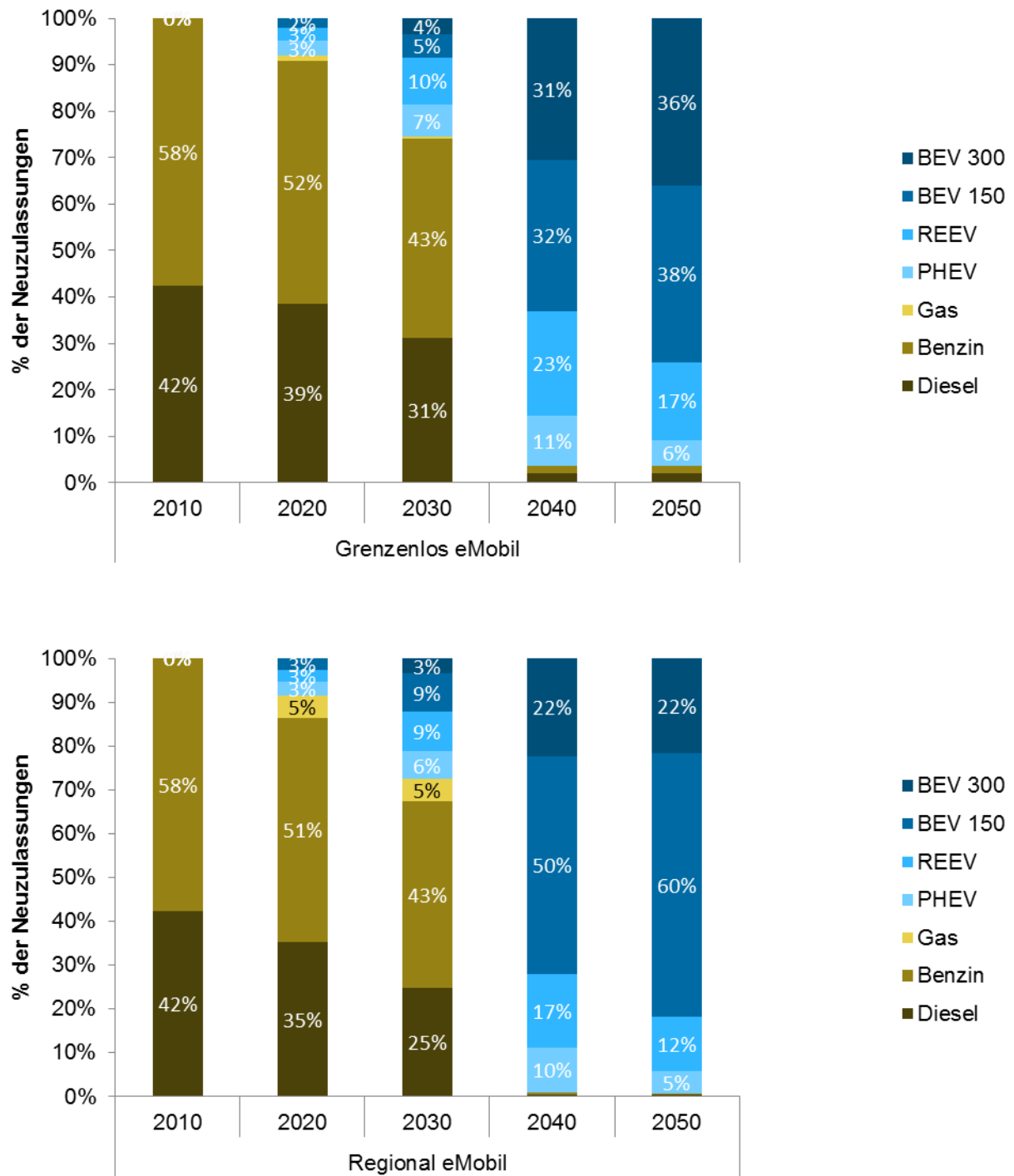
4.6. Neuzulassungsstruktur und Bestandsentwicklung

4.6.1. Pkw und leichte Nutzfahrzeuge

In beiden *eMobil 2050* Szenarien steigt der Marktanteil von (teil-)elektrischen Pkw je nach Größenklasse und Einsatzprofil (Privat-Pkw / geteilte Nutzung, Raumtyp) deutlich an und entwickelt sich im Zeitverlauf zur dominierenden Antriebstechnologie (Abbildung 4-5). Dabei dominieren zunächst PHEV/REEV, bis 2050 nimmt der Anteil von BEV deutlich zu. Ab dem Jahr 2040 werden fast ausschließlich elektrische Fahrzeuge zugelassen und der Anteil verbrennungsmotorischer Pkw reduziert sich auf Nischenanwendungen und sinkt auf 1 % (*Grenzenlos eMobil*) bzw. 4 % (*Regional eMobil*). Ein wesentlicher Treiber für die deutliche Zunahme des Anteils elektrischer Fahrzeuge zwischen 2030 und 2040 ist die zunehmende Einführung emissionsfreier Innenstädte, so dass rein verbrennungsmotorische Pkw deutlich an Attraktivität verlieren.

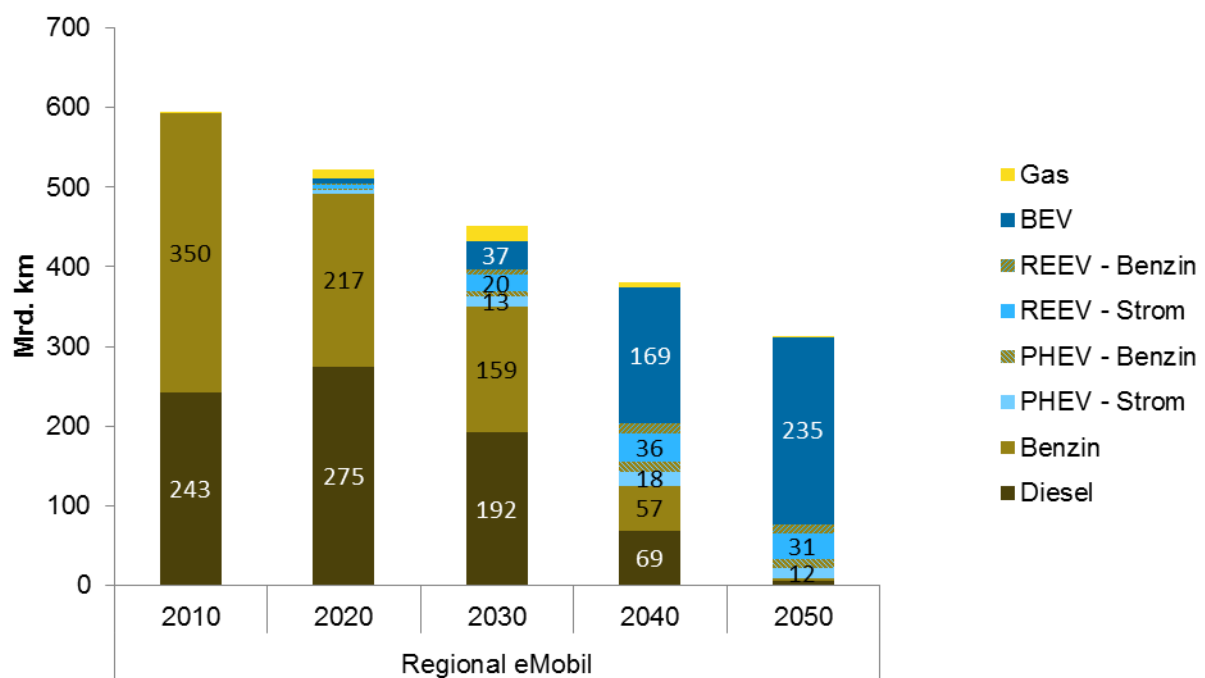
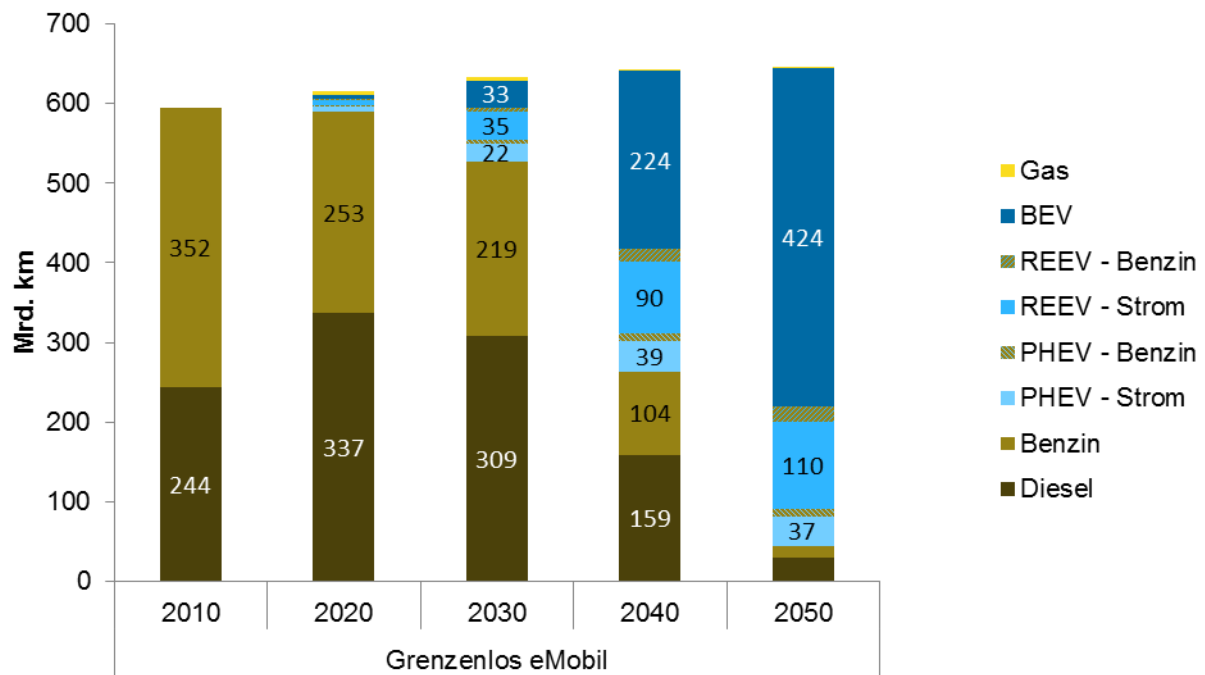
Die Unterschiede in der Neuzulassungsstruktur der Pkw zwischen den Szenarien sind relativ gering, da von ähnlichen Rahmenbedingungen für die Elektromobilität ausgegangen wird. Die Unterschiede beschränken sich im Wesentlichen auf drei Aspekte: Erstens ist durch den Trend zu kleineren Fahrzeugen, mehr Multimodalität und geteilter Nutzung die Marktdurchdringung elektrischer Fahrzeuge in *Regional eMobil* schneller als in *Grenzenlos eMobil* und es werden weniger Fahrzeuge mit hoher Reichweite eingesetzt. Zweitens gibt es im Szenario *Regional eMobil* vorübergehend einen leicht steigenden Anteil Gas-Pkw, welche von der Ausweitung der Gasinfrastruktur für die Lkw profitieren, und drittens ist der Anteil kleinerer Fahrzeuge und batterieelektrischer Microcars in diesem Szenario deutlich höher.

Auch im Pkw-Bestand zeigt sich mit entsprechender Verzögerung der wachsende Anteil elektrischer Fahrzeuge (Abbildung 4-6). Während im Jahr 2030 der Anteil von elektrischen Fahrzeugen (xEV) an der Pkw-Fahrleistung bei 16 % bzw. 18 % liegt, steigt er auf 93 % bzw. 97 % im Jahr 2050. Da PHEV und REEV teils im konventionellen Betrieb fahren, liegt der elektrische Fahrleistungsanteil mit 88,4% bzw. 88,9% etwas niedriger. Im Szenario *Grenzenlos eMobil* steigt trotz des Bevölkerungsrückgangs die Pkw-Fahrleistung noch leicht an. Dagegen geht die Fahrleistung im Szenario *Regional eMobil* um fast 50 % zurück. In beiden Szenarien werden mit etwa eine Million Elektrofahrzeugen im Jahr 2020 und 6 Millionen im Jahr 2030 die Ziele der Bundesregierung erreicht (Abbildung 4-7). Bis zum Jahr 2040 entwickeln sich Elektrofahrzeuge zur marktbeherrschenden Technologie. Während bis 2030 in beiden Szenarien teil-elektrische Antriebe dominieren, steigt u. a. auf Grund der zunehmenden elektrischen Reichweite von BEV in den Folgejahren der Anteil batterieelektrischer Fahrzeuge gegenüber PHEV und REEV deutlich an. Die deutlich geringere Gesamtzahl an Elektrofahrzeugen im Szenario *Regional eMobil* begründet sich ausschließlich mit dem im Vergleich zum Szenario *Grenzenlos eMobil* deutlich geringeren Gesamtbestand an Pkw, welcher ein Resultat der rückläufigen Pkw-Fahrleistung im Szenario *Regional eMobil* (siehe Abbildung 4-2) darstellt.

Abbildung 4-5: Neuzulassungsstruktur Pkw (ohne Microcars)

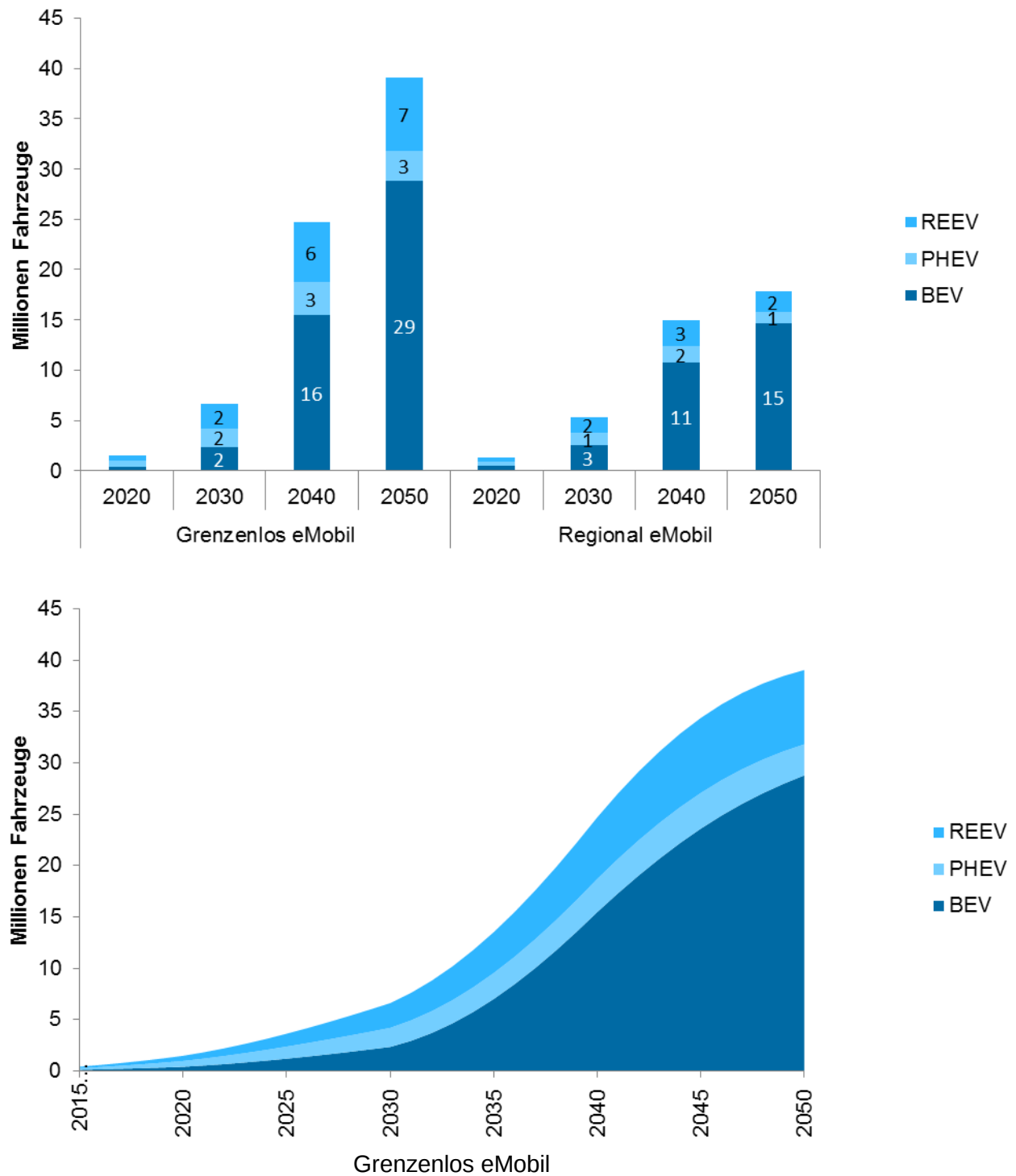
Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 4-6: Fahrleistung Pkw nach Antriebstypen und genutzter Energie



Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 4-7: Pkw-Bestand xEV



Quelle: Eigene Berechnungen

4.6.2. Lkw

Im Szenario *Grenzenlos eMobil* wird 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 verbrennungsmotorisch mit Flüssigkraftstoffen (Abbildung 4-8).

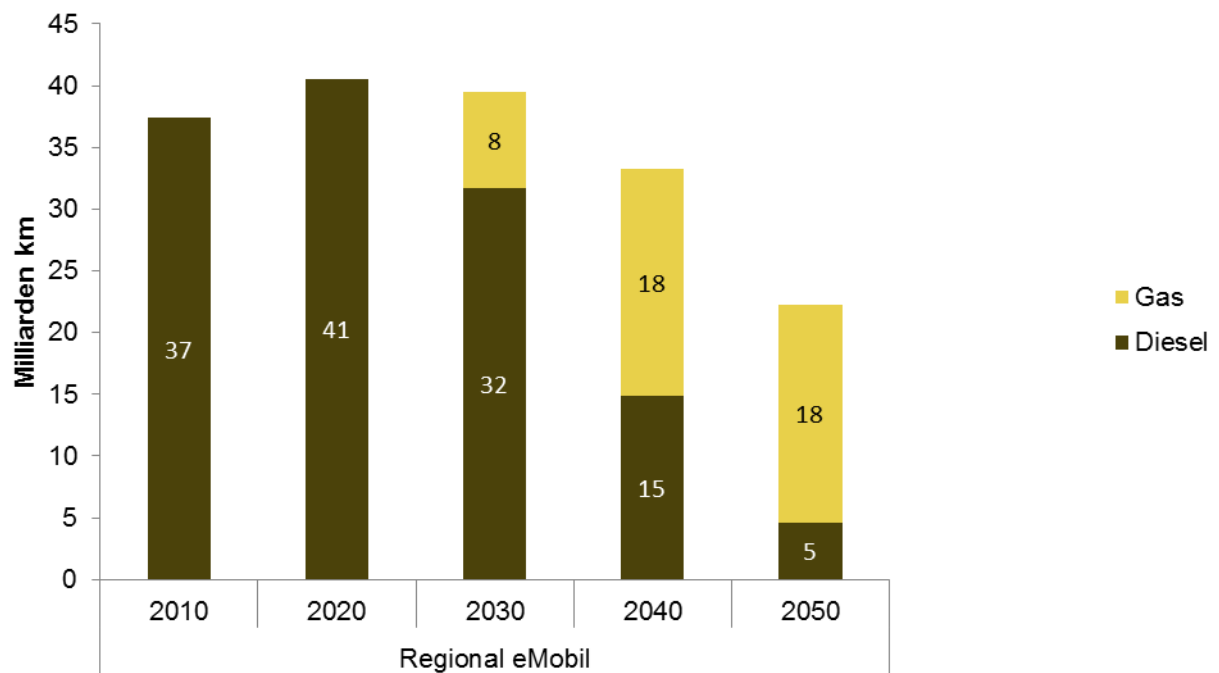
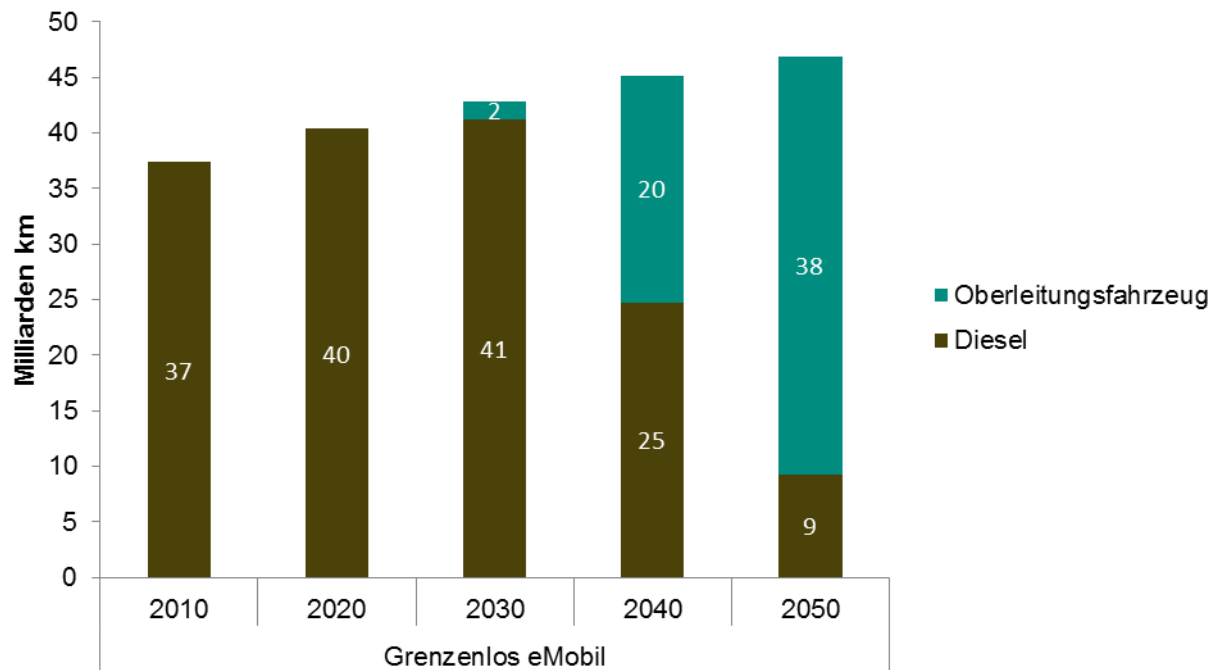
Im Szenario *Regional eMobil* liegt dagegen der Fokus auf der Regionalisierung von Wirtschaftskreisläufen und der Verlagerung von Lkw-Verkehren auf die Schiene und es wird nicht in die Ausstattung der Autobahnen mit Oberleitungen investiert. Allerdings gewinnen Gas-Lkw an Bedeutung, welche perspektivisch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

In beiden Szenarien erfolgt der innerstädtische Verteilverkehr zunehmend und in 2050 ausschließlich batterieelektrisch. Gefördert wird diese Entwicklung vor allem durch die zunehmende Einführung emissionsfreier Innenstädte. Für den Verteilverkehr werden vorwiegend batterieelektrische (bis 12 t) bzw. Plug-in-Hybrid-Fahrzeuge (> 12 t) mit moderater elektrischer Reichweite (100 km) eingesetzt.

Tabelle 4-1: Neuzulassungsstruktur Lkw

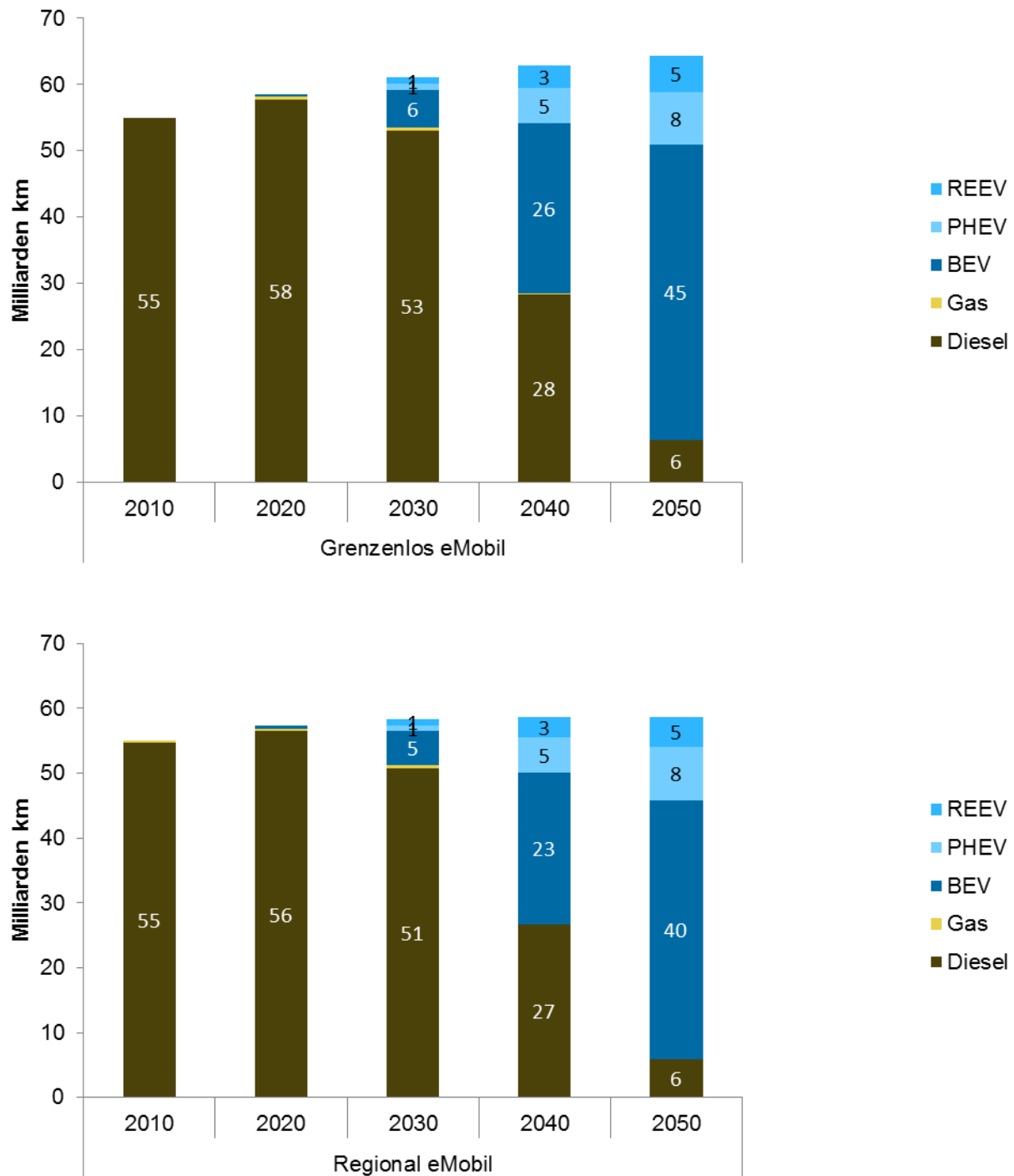
		Grenzenlos eMobil				Regional eMobil			
		2020	2030	2040	2050	2020	2030	2040	2050
2010		% der Neuzulassungen							
Lkw 3,5 - 7,5 t									
Diesel	100%	95%	70%	0%	0%	95%	70%	0%	0%
BEV-150		5%	25%	90%	90%	5%	25%	90%	90%
PHEV-100			5%	10%	10%		5%	10%	10%
Lkw > 7,5 - 12 t									
Diesel	100%	98%	75%			98%	75%		
BEV-150		2%	20%	90%	90%	2%	20%	90%	90%
PHEV-100			5%	10%	10%		5%	10%	10%
Lkw > 12t									
Diesel	100%	100%	75%			100%	75%		
PHEV-100			25%	100%	100%		25%	100%	100%
LZ/SZ < 40 t									
Diesel	100%	100%	90%	20%	10%	100%	60%	20%	10%
CNG							40%	80%	90%
OC-GIV			10%	80%	90%				

Quelle: Eigene Annahmen

Abbildung 4-8: Fahrleistung Sattelzüge nach Antriebstypen

Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 4-9: Fahrleistung Lkw und leichte Nutzfahrzeuge nach Antriebstypen



Quelle: Eigene Berechnungen

4.6.3. Busse

Im Szenario *Grenzenlos eMobil* nutzen viele Fernbusse die Oberleitungen auf Autobahnen. An Knotenpunkten in der Nähe der Autobahnen gibt es Umsteigemöglichkeiten, u. a. auf Carsharing-Pkw, die eine bequeme Anschlussmobilität gewährleisten und autonom zurückfahren können.

Ergänzend kommen im Regional- und Fernverkehr abseits der elektrifizierten Strecken Plug-in-Hybrid-Busse mit 20 km elektrischer Reichweite zum Einsatz. Dagegen nutzen Fern- bzw. Reisebusse im Szenario *Regional eMobil* zunehmend den Plug-in-Hybrid-Antrieb und im Langstreckenverkehr den Gasantrieb. Der teilelektrische Betrieb von Reisebussen ist insbesondere erforderlich, um weiterhin die Einfahrt in emissionsfreie Innenstadtgebiete gewährleisten zu können.

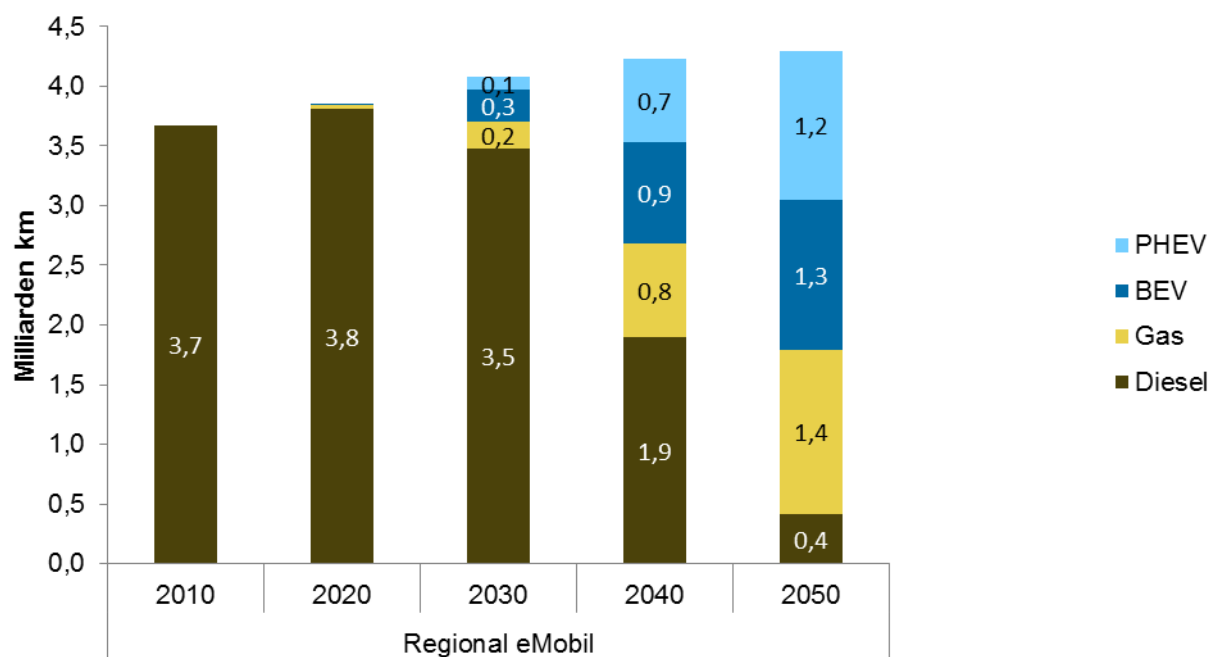
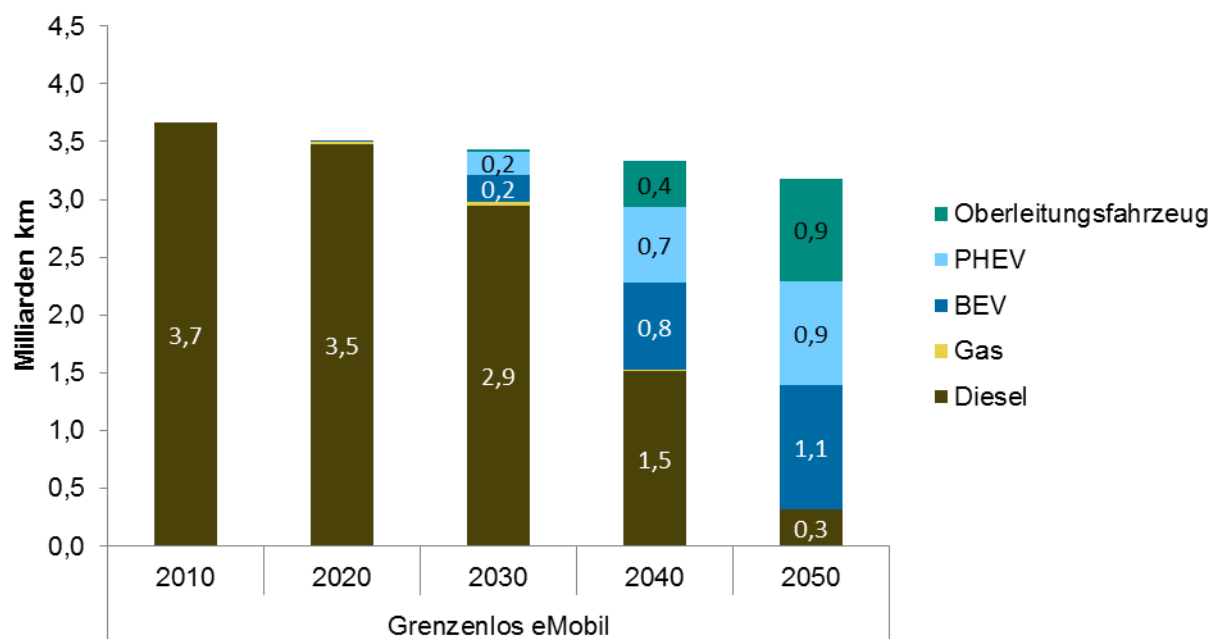
In beiden Szenarien erfolgt der Buslinienverkehr in Städten zunehmend batterieelektrisch mit Aufladung der Batterie auf dem Betriebsgelände über Nacht und während der Betriebszeiten an den Endhaltestellen. Die Massenmarkteinführung batterieelektrischer Busse findet bis 2017 statt; der Marktanteil steigt auf 30 % bis 2030 und 100 % ab 2040.

Tabelle 4-2: Neuzulassungsstruktur Busse

		Grenzenlos eMobil				Regional eMobil			
		2020	2030	2040	2050	2020	2030	2040	2050
2010		% der Neuzulassungen							
Linienbus									
Diesel	98%	93%	70%			93%	70%		
CNG	2%	5%				5%			
BEV		2%	30%	100%	100%	2%	30%	100%	100%
Reisebus									
Diesel	100%	100%	70%			100%	70%		
CNG							20%	50%	60%
PHEV-20			25%	50%	40%		10%	50%	40%
OC-GIV			5%	50%	60%				

Quelle: Eigene Annahmen

Abbildung 4-10: Fahrleistung Busse nach Antriebstypen



Quelle: Eigene Berechnungen

4.7. Fahrzeugeffizienz

4.7.1. Pkw

In den *eMobil 2050* Szenarien wird zwischen zwei Konfigurationen von BEV unterschieden: Pkw mit einer elektrischen Reichweite von 150 km und 300 km (siehe Hülsmann et al. (2014) zum Zusammenhang zwischen Reichweiten, Energieverbrauch und Batteriekosten). Für das Elektrofahrzeug mit Range Extender wird eine elektrische Reichweite von 100 km und für das Plug-in-Hybridfahrzeug als Parallelhybrid von 50 km festgelegt. Die elektrischen Reichweiten wurden auch im Rahmen des Fachworkshops für Pkw-Technologien diskutiert und insbesondere für den REEV wurde eine im Vergleich zum PHEV wesentlich höhere elektrische Reichweite von 100 km für sinnvoll erachtet. Aufgrund der aus Studien abgeleiteten Effizienz- und Kostenentwicklung der Batterietechnologien wird bis zum Jahr 2030 der Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien und darüber hinaus Post-Lithium-Ionen-Batterien bei allen elektrischen Fahrzeugen angenommen. Die zukünftige Entwicklung der Batterietechnologien basiert vor allem auf der Entwicklung von Energiedichte, Entladungstiefe und Kosten.

Im folgenden Abschnitt wird der Energieverbrauch nach NEFZ von Neufahrzeugen für jedes Antriebskonzept und Fahrzeugsegment für die Jahre 2010 – 2050 dargestellt (siehe Tabelle 4-3, Abbildung 4-12 und Abbildung 4-13). Zur Berechnung des realen Energieverbrauchs wird ein Aufschlag von 20 % angenommen. Für die Entwicklung der alternativen Antriebskonzepte wird angenommen, dass die Technologien, die für die verbrennungsmotorischen Pkw entwickelt werden, auch bei den alternativen Antriebskonzepten eingesetzt werden, sofern diese Technologien kompatibel mit dem jeweiligen Antriebskonzept sind.¹¹ Die Entwicklung des konventionellen Energieverbrauchs bei PHEV und REEV¹² verläuft nicht immer proportional zum Energieverbrauch der verbrennungsmotorischen Pkw, da aufgrund des unterschiedlichen Antriebskonzepts einige antriebsspezifische Effizienztechnologien nicht die gleichen Energieeinsparungen bewirken.

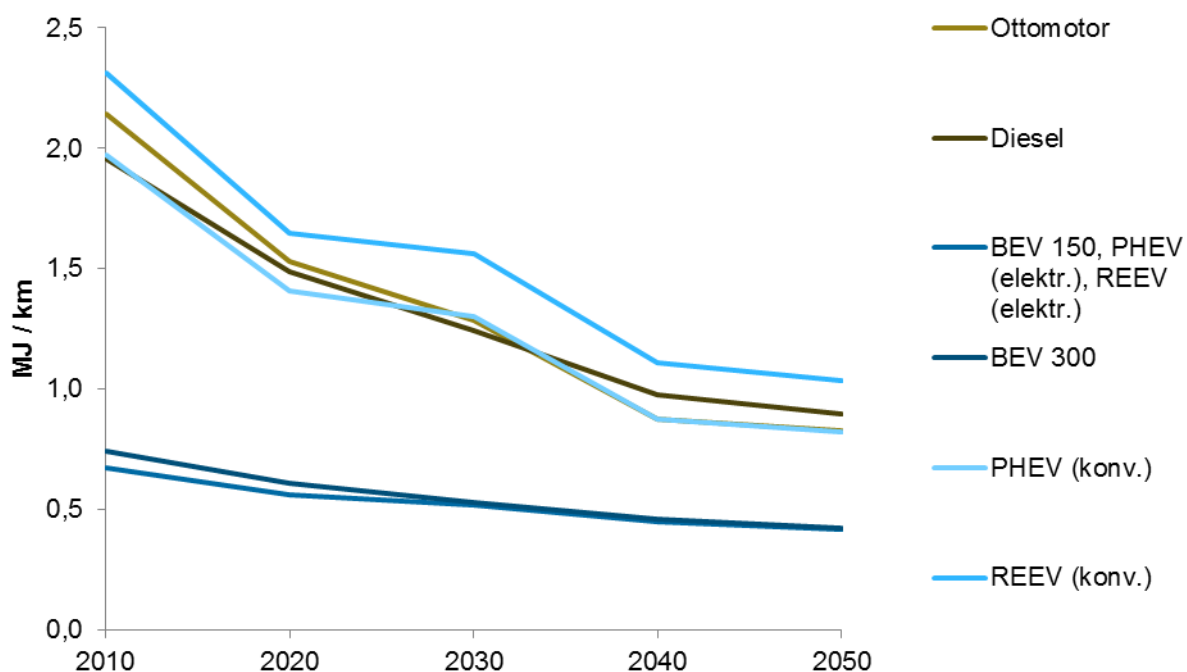
Die Effizienzentwicklung der Fahrzeuge orientiert sich in den Szenarien bis zum Jahr 2020 an den gesetzlichen Rahmenbedingungen. In diesem Zusammenhang ist vor allem die Begrenzung der CO₂-Emission der neuzugelassenen Pkw durch die Europäische Union zu nennen, welche bis 2021 einen Grenzwert von 95 g CO₂/km vorschreibt. Unter Berücksichtigung dieser Vorgabe und der angenommenen Neuzulassungen batterieelektrischer Pkw müssen die verbrennungsmotorischen Neuwagen im Jahr 2020 um 27 % effizienter im Vergleich zum Basisjahr 2010 werden. Bis zum Jahr 2030 wird eine Verschärfung der CO₂-Grenzwerte auf 65 g CO₂/km angenommen und daher die CO₂-Grenzwerte mit abnehmender CO₂-Reduktion pro Jahr fortgeschrieben. Daraus ergibt sich eine Effizienzsteigerung von 39 % der verbrennungsmotorischen Neuwagen gegenüber 2010. Bis zum Jahr 2040 lassen sich weitere Energieeinsparungen für verbrennungsmotorische Pkw realisieren, die sich u. a. mit einem höheren Anteil batterieelektrischer Fahrzeuge, die in den Markt kommen, begründen lassen: Der Energieverbrauch batterieelektrischer Fahrzeuge hängt stark vom Fahrzeuggewicht ab und beeinflusst damit die elektrische Reichweite. Daher werden vor allem Effizienztechnologien berücksichtigt, die den Fahrwiderstand, vor allem das Fahrzeuggewicht, betreffen. Diese Technologien tragen auch bei den verbrennungsmotorischen Pkw zu einer deutlichen Reduktion des Energieverbrauchs bei. Zudem werden u. a. Effizienzsteigerungen am Motor und durch hybrid elektrische Komponenten sowie durch verbesserte Nebenaggregate angenommen. In den Szenarien sinkt der Energieverbrauch der mittleren Benzinfahrzeuge bis 2040 um rund 59 % und

¹¹ Das kumulierte Minderungspotenzial wird in Abhängigkeit von der Anzahl der Technologien korrigiert (siehe Hülsmann et al. (2014) zur Erläuterung der Korrekturfaktoren). In dieser Studie wurde für Benzinfahrzeuge ein maximaler Korrekturfaktor von 0,85 und für Dieselfahrzeuge von 0,95 angenommen.

¹² Das konventionelle Antriebskonzept des PHEV und REEV basiert in dieser Studie auf dem des Benzinfahrzeugs.

der Verbrauch der Dieselfahrzeuge um rund 50 % im Vergleich zu 2010. Batterieelektrische Pkw derselben Größenklasse sind im Jahr 2050 38,8 % effizienter verglichen mit dem Energieverbrauch im Jahr 2010. Bis zum Jahr 2050 werden geringe zusätzliche Energieeinsparungen angenommen, da weitere Technologien im Verhältnis zur Einsparung überwiegend mit sehr hohen Zusatzkosten einhergehen. Die Energieeinsparung beträgt im Jahr 2050 für mittelgroße Benzinfahrzeuge 62 % und für Dieselfahrzeuge 54 % im Vergleich zum Jahr 2010. Die höheren Effizienzpotenziale bei Benzinfahrzeugen resultieren nach 2030 in einem geringeren Energieverbrauch der Benzinfahrzeuge im Vergleich zur Diesel-Variante (siehe Tabelle 4-3, Abbildung 4-11).¹³

Abbildung 4-11: Energieverbrauch (NEFZ) eines mittleren neu zugelassenen Pkw differenziert nach Antriebskonzept und Betriebsmodus (konventionell / elektrisch) 2010 – 2050



Quelle: Eigene Berechnung

¹³ Diese Umkehrung der Verhältnisse beim Energieverbrauch zwischen Benzin- und Dieselfahrzeugen lässt sich mit der Zuordnung der KBA (Kraftfahrtbundesamt) Segmente zu den Größenklassen klein, mittel, groß erklären (siehe Hülsmann et al. 2014). Mini- und Großraum-Vans sowie Utilities sind der mittleren Größenklasse zugeordnet und der Unterschied zwischen Benzin- und Dieselfahrzeugen in diesen Segmenten ist geringer verglichen mit den anderen Segmenten. Daher unterscheidet sich der Energieverbrauch zwischen den mittleren Benzin- und Dieselfahrzeugen bereits im Jahr 2010 weniger stark als bei den kleinen und großen Pkw, deren Energieverbrauch sich aber auch bis zum Jahr 2050 annähert.

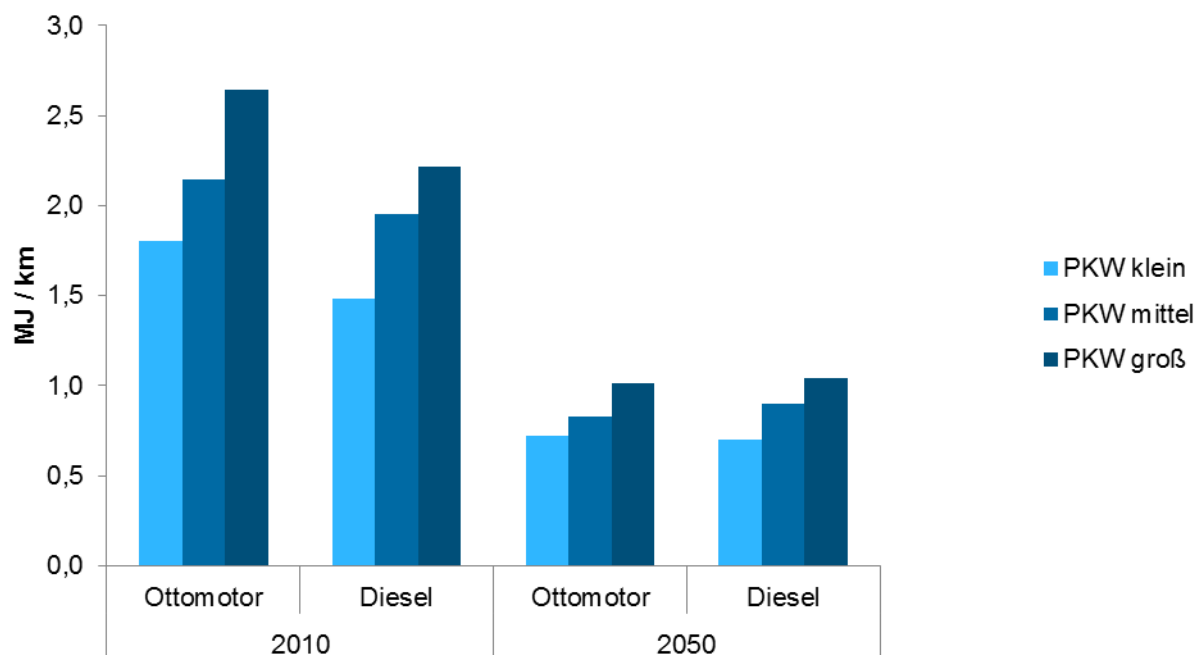
Tabelle 4-3: Energieverbrauch (NEFZ) eines mittleren neu zugelassenen Pkw differenziert nach Antriebskonzept und Betriebsmodus (konventionell / elektrisch) 2010 – 2050

	2010	2020	2030	2040	2050
	MJ / km				
Ottomotor	2,14	1,53	1,29	0,87	0,82
Diesel	1,95	1,49	1,24	0,97	0,90
BEV 150	0,67	0,56	0,52	0,45	0,41
BEV 300	0,74	0,61	0,53	0,46	0,42
PHEV (konv.)	1,97	1,41	1,30	0,88	0,82
REEV (konv.)	2,31	1,65	1,56	1,11	1,03
PHEV (elektr.)	0,67	0,56	0,54	0,47	0,43
REEV (elektr.)	0,67	0,56	0,53	0,46	0,42

Quelle: Eigene Berechnungen

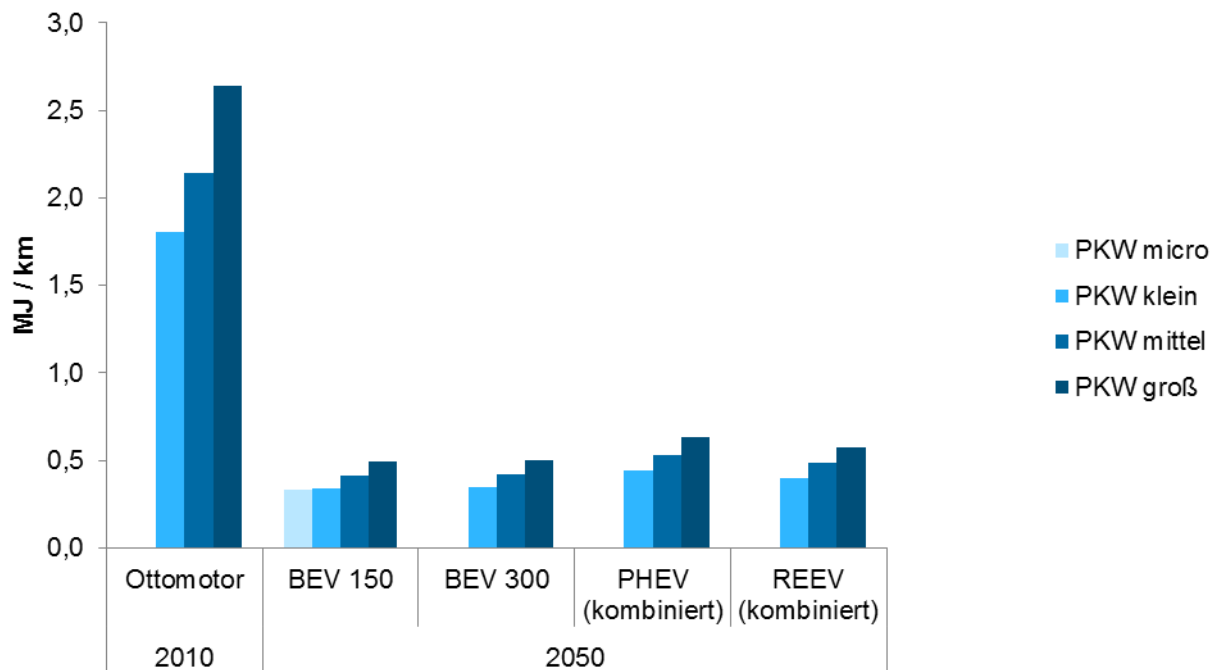
Für Pkw der Fahrzeugsegmente klein und groß werden ähnliche Energieeinsparungen wie für mittelgroße Pkw bis 2050 hergeleitet (siehe Abbildung 4-12, Abbildung 4-13). Zur Darstellung des kombinierten Energieverbrauchs (elektrisch und konventionell) in Abbildung 4-13 wurde beim PHEV ein elektrischer Fahranteil von 75 % und beim REEV ein elektrischer Fahranteil von 90 % angenommen. Im Rahmen der Szenarioanalysen werden die elektrischen Fahranteile anhand der zugrunde gelegten Einsatzprofile modelliert und können daher von den hier gewählten elektrischen Fahranteilen teilweise deutlich abweichen.

Abbildung 4-12: Energieverbrauch Pkw differenziert nach Fahrzeugsegment und verbrennungsmotorischem Antriebskonzept 2010 und 2050



Quelle: Eigene Berechnung

Abbildung 4-13: Energieverbrauch Pkw differenziert nach Fahrzeugsegment und Antriebskonzept 2010 und 2050¹⁴



Quelle: Eigene Berechnung

4.7.2. Leichte Nutzfahrzeuge

In der Kategorie der leichten Nutzfahrzeuge (LNF) werden drei Antriebskonzepte in den *eMobil 2050* Szenarien unterschieden:

- verbrennungsmotorisches Fahrzeug mit Diesel und Hybridfahrzeug (ICEV/HEV)
- batterieelektrisches Fahrzeug (BEV)
- Elektrofahrzeug mit Range Extender (REEV).

Die einzelnen Antriebskonzepte werden in Kapitel 2.2.2.1 näher beschrieben.

Für batterieelektrische Fahrzeuge wird eine elektrische Reichweite von 120 km und für REEV von 80 km angenommen. Die im Vergleich zum Pkw geringere elektrische Reichweite von REEV basiert auf der Annahme eines Einsatzes dieser Fahrzeuge mit größtenteils festgelegten Nutzungsprofilen. Die durchschnittliche Tagesfahrleistung liegt zwischen 50 und 60 km (KiD 2010) (Wermuth et al. 2012). Bei batterieelektrischen Fahrzeugen wird davon ausgegangen, dass diese für die kürzeren Strecken eingesetzt werden, die Fahrt mit leichten Nutzfahrzeugen häufig am Betriebshof beginnt und endet und damit die Batterieladung regelmäßig möglich ist (siehe Kapitel 5.2.5).

In Tabelle 4-4 wird die Entwicklung des Energieverbrauchs für die Neufahrzeuge nach NEFZ mit verschiedenen Antriebskonzepten bis 2050 dargestellt. Für den realen Energieverbrauch wurde

¹⁴ PHEV (kombiniert) und REEV (kombiniert) entsprechen dem kombinierten Energieverbrauch - elektrisch und konventionell.

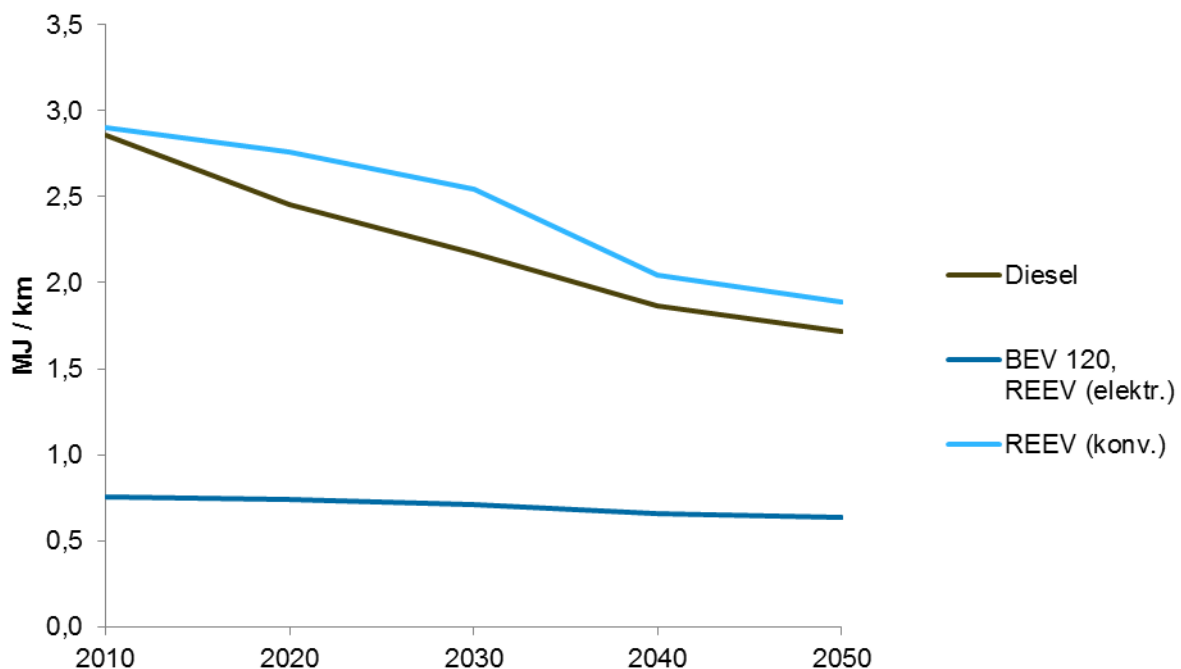
ein Aufschlag von 20 % angenommen. Die Effizienzentwicklung basiert auf der Herangehensweise, die bei Pkw gewählt wurde, und daher auf den CO₂-Grenzwerten für LNF. Für das Jahr 2020 wird eine Begrenzung der CO₂-Emissionen der neuzugelassenen LNF von 147 g CO₂/km vorgeschrieben. Die CO₂-Grenzwerte, die im Jahr 2030 von den LNF einzuhalten sind, orientieren sich an den angenommenen Veränderungen der Pkw Grenzwerte zwischen 2021 bis 2030. Daher werden im Jahr 2020 die Dieselfahrzeuge um 14 %, 2030 um 24 %, 2040 um 35 % und 2050 um 40 % effizienter. Die Entwicklung des konventionellen Energieverbrauchs von REEV weist einen ähnlichen Verlauf im Vergleich zum Dieselfahrzeug auf, jedoch haben nicht alle konventionellen Effizienztechnologien bei REEV die gleiche Energieeinsparung wie bei Dieselfahrzeugen zur Folge. Aufgrund der Effizienztechnologien, die den Fahrzeugwiderstand reduzieren, sinkt der elektrische Energieverbrauch von BEV 120 um 16 % und von REEV um 14 % von 2010 bis 2050. (siehe Tabelle 4-4 und Abbildung 4-14).

Tabelle 4-4: Energieverbrauch LNF differenziert nach Antriebskonzept und Betriebsmodus (konventionell / elektrisch) 2010 - 2050

	2010	2020	2030	2040	2050
	MJ / km				
Diesel	2,86	2,45	2,17	1,86	1,72
BEV 120	0,75	0,74	0,71	0,65	0,63
REEV (konv.)	2,90	2,76	2,55	2,05	1,89
REEV (elektr.)	0,76	0,75	0,72	0,67	0,65

Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 4-14: Energieverbrauch LNF differenziert nach Antriebskonzept und Betriebsmodus (konventionell / elektrisch) 2010 - 2050



Quelle: Eigene Berechnungen

4.7.3. Schwere Nutzfahrzeuge

In den *eMobil 2050* Szenarien wird für Lkw von einer elektrischen Reichweite von 150 km (BEV) bzw. 100 km (PHEV) ausgegangen. Bei PHEV wird im Gegensatz zu Pkw keine konkrete Konfiguration (paralleler Hybrid / serieller Hybrid) hinterlegt, bezogen auf die Reichweite sind sie jedoch vergleichbar mit den als serielle Hybridfahrzeug konfigurierte REEV. Last- und Sattelzüge sind in den Szenarien weder als BEV noch als PHEV konfiguriert, da aufgrund der hohen Fahrleistung und des hohen spezifischen Energieverbrauches sehr große Batterien benötigt würden. Ein als BEV konfiguriertes Lastzug/Sattelzug (LZ/SZ < 40 t) mit einer Reichweite von 500 km würde bspw. eine Batterie mit einem Gewicht von über 12 t benötigen. Bei Reisebussen ergibt sich ein ähnliches Bild, wobei die in den Szenarien angenommenen emissionsfreien Innenstädte es notwendig machen, dass die Fahrzeuge in der Lage sind, eine kurze Distanz rein elektrisch zurückzulegen. In den Szenarien wird von einer elektrischen Reichweite von 20 km ausgegangen. Da für batterieelektrische Linienbusse davon ausgegangen wird, dass diese während des Betriebs z. B. an den Endhaltestellen geladen werden, ist die Batterie lediglich für eine Reichweite von 100 km ausgelegt. Die als PHEV konfigurierten Linienbusse besitzen analog zu Reisebussen lediglich eine kleine Batterie (Reichweite 20 km), die den Einsatz in emissionsfreien Innenstädten ermöglicht.

Für die in den Fahrzeugkonzepten BEV, PHEV und OC-GIV installierten Batterien wird von der gleichen Entwicklung hinsichtlich maximaler Entladungstiefe und Energiedichte wie bei den Pkw ausgegangen. Dabei wird angenommen, dass bis zum Jahr 2020 Lithium-Ionen-Batterien und darüber hinaus Post-Lithium-Ionen-Batterien zur Anwendung kommen. Lediglich bei den Annahmen zu den Batteriepreisen wurde aufgrund der Diskussion im Fachworkshop für schwere Nutzfahrzeuge von höheren Batteriekosten aufgrund geringerer produzierter Stückzahlen ausgegangen als bei Pkw. Details sind in Hülsmann et al. (2014) dokumentiert.

Die in den Szenarioanalysen veranschlagten Endenergieverbräuche für die in Kapitel 2.3.2 beschriebenen Fahrzeugkategorien und Antriebskonzepte pro Fahrzeugkilometer sind in Tabelle 4-5 dokumentiert. Die in der Tabelle aufgeführten Energieverbrauchswerte wurden auf Basis der in Hülsmann et al. (2014) beschriebenen Technologiedatenbasis hergeleitet. Im Gegensatz zu Pkw konnte für die Ableitung der zukünftigen Verbrauchsminderung bei schweren Nutzfahrzeugen nicht auf eine bestehende Regulierung zur Entwicklung der CO₂-Emissionen aufgebaut werden. Deshalb wurden für Diesel-ICEV plausible Punkte auf den in der Technologiedatenbasis enthaltenen Kostenkurven (Technologiepakete) ausgewählt, die einerseits in Bezug auf die zusätzlichen Investitionskosten für die Fahrzeuge in einem akzeptablen Rahmen blieben und andererseits große Kostensprünge vermieden. Dadurch werden wenig kosteneffiziente Minderungstechnologien wie beispielsweise Systeme zum automatischen Anpassen des Reifendrucks nicht berücksichtigt. Es handelt sich demnach nicht um die maximal erreichbaren Potentiale. Andererseits wurde berücksichtigt, dass bestimmte Komponenten einzelner Effizienztechnologien Bestandteil der betrachteten weiteren Antriebskonzepte sind, wodurch ein Einsatz als wahrscheinlich angesehen werden kann. Ein Beispiel stellt die Hybridisierung der Diesel- und CNG-Fahrzeuge dar, die vom Einsatz von Batterien und Leistungselektronik in batterieelektrischen Fahrzeugen profitieren. Zudem wurde bei der Auswahl der Technologiepakete berücksichtigt, dass der Einsatz einzelner Effizienztechnologien auch bei geringeren Einsparpotentialen dann wahrscheinlicher ist, wenn sie in anderen Fahrzeugkategorien aufgrund einer hohen Wirtschaftlichkeit Verwendung findet. Grundsätzlich sind die für ICEV ausgewählten Technologien auch in den alternativen Fahrzeugkonzepten enthalten, sofern dies möglich ist. Dies betrifft z. B. die Verbesserung der aerodynamischen Eigenschaften oder Technologien zur Reduktion der Fahrwiderstände, nicht aber innermotorische Maßnahmen.

Tabelle 4-5: Energieverbrauch SNF nach Antriebskonzept und Betriebsmodus (konventionell / elektrisch) 2010 – 2050

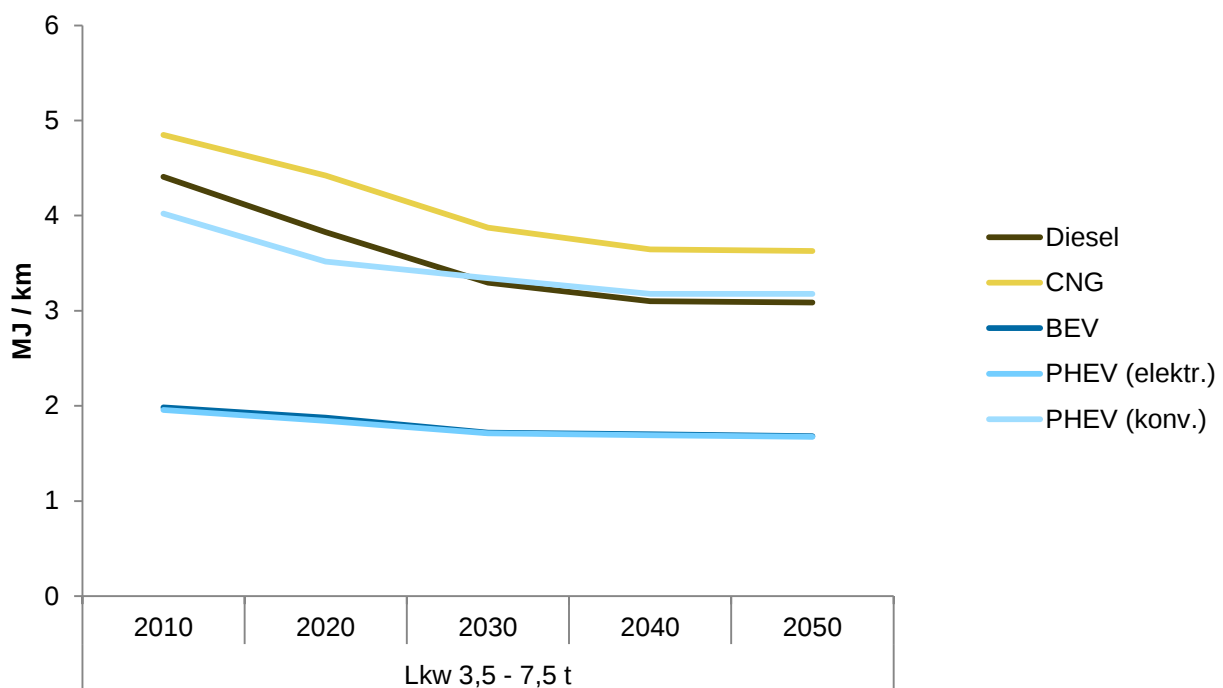
		2010	2020	2030	2040	2050
MJ / km						
Lkw 3,5 - 7,5 t						
Diesel		4,4	3,8	3,3	3,1	3,1
CNG		4,8	4,4	3,9	3,6	3,6
BEV		2,0	1,9	1,7	1,7	1,7
PHEV	(elektr.)	2,0	1,8	1,7	1,7	1,7
PHEV	(konv.)	4,0	3,5	3,3	3,2	3,2
Lkw > 7,5 - 12 t						
Diesel		6,2	5,4	4,7	4,4	4,4
CNG		6,9	6,3	5,5	5,2	5,1
BEV		2,9	2,7	2,5	2,4	2,4
PHEV	(elektr.)	2,9	2,7	2,4	2,4	2,4
PHEV	(konv.)	5,7	5,0	4,7	4,5	4,5
Lkw > 12t						
Diesel		9,2	7,7	6,0	6,0	5,9
CNG		10,1	8,7	7,3	7,2	7,1
BEV		4,1	3,6	3,2	3,2	3,1
PHEV	(elektr.)	4,0	3,6	3,2	3,1	3,1
PHEV	(konv.)	8,4	7,3	6,4	6,3	6,3
LZ/SZ < 40 t						
Diesel		10,8	9,0	7,6	7,6	7,5
CNG		11,9	10,1	9,0	9,0	8,9
OC-GIV	(elektr.)	4,5	4,0	3,9	3,8	3,8
OC-GIV	(konv.)	10,1	8,5	7,7	7,6	7,5
Linienbus						
Diesel		14,7	12,6	10,0	9,3	8,7
CNG		16,2	14,2	11,2	10,5	10,5
BEV		5,8	5,3	5,0	4,9	4,9
PHEV	(elektr.)	5,4	5,0	4,9	4,8	4,8
PHEV	(konv.)	11,8	10,0	10,0	9,5	8,8
Reisebus						
Diesel		10,7	9,2	8,0	7,8	7,8
CNG		11,7	10,4	9,3	9,2	9,2
PHEV	(elektr.)	4,3	4,0	4,0	3,9	3,9
PHEV	(konv.)	9,6	8,3	8,0	7,8	7,8
OC-GIV	(elektr.)	4,3	4,0	4,0	3,9	3,9
OC-GIV	(konv.)	9,6	8,3	8,0	7,8	7,7

Quelle: Eigene Berechnungen

Bezogen auf das Ausgangsjahr 2010 kann bei Diesel-ICEV in allen Fahrzeugkategorien bis 2050 eine deutliche Verbrauchsminderung erzielt werden. Diese liegt bei Lkw <12 t und LZ/SZ < 40 t bei rund 30 %, bei Lkw >12 t bei 35 % und bei Reisebussen bei rund 27 %. Die größte Verbrauchsreduktion kann mit 41 % bei Linienbussen erreicht werden, wobei die Diesel-ICEV in 2050 grundsätzlich als HEV konfiguriert sind. Die relative Verbrauchsreduktion bei den alternativen

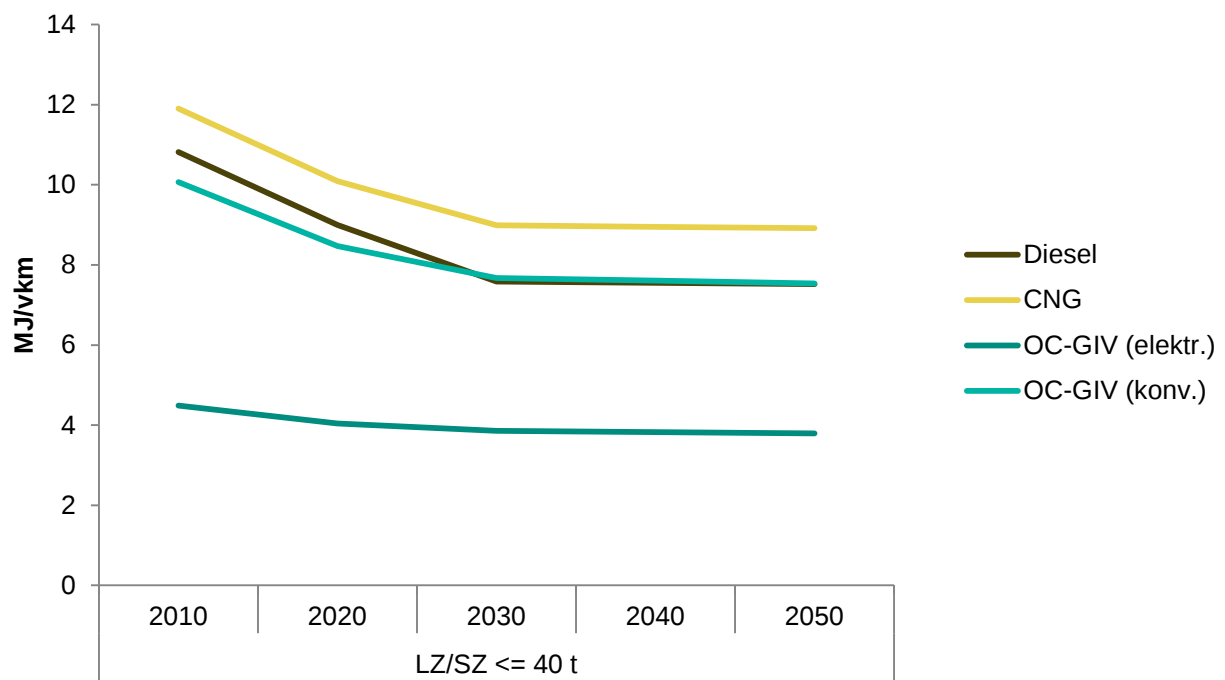
Antriebskonzepten fällt über den Betrachtungszeitraum stets niedriger aus als bei Diesel-ICEV. Die nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 4-15, Abbildung 4-16 und Abbildung 4-17) stellen die Entwicklung der Energieverbräuche der Neuzulassungen in den Fahrzeugkategorien *Lkw > 3,5 t – 7,5 t* als Beispiel für den Verteilverkehr, *Lastzug/ Sattelzug < 40 t* für den Güterfernverkehr und *Linienbus* für den Personenverkehr dar. Dabei ist gut ersichtlich, dass die Energieverbräuche der alternativen Antriebskonzepte auch bei geringerer Reduktion im Vergleich zu dem Jahr 2010 teilweise deutlich unter dem Energieverbrauch von Diesel-ICEV liegen. Lediglich CNG-ICEV liegen aufgrund des geringeren Motorwirkungsgrades stets über Diesel-ICEV. Im Jahr 2010 beträgt der Mehrverbrauch 10 %. Der Energieverbrauch von PHEV und OC-GIV liegt beim Betrieb mit Diesel in den Jahresscheiben 2010 und 2020 deutlich unter Diesel-ICEV, da diese Antriebskonzepte eine Rekuperation erlauben. Bis 2030 nähern sich die Verbrauchswerte jedoch an, da dann auch für ICEV von einer Hybridisierung ausgegangen wird, welche eine Rückgewinnung der Bremsenergie ermöglicht. Den niedrigsten Endenergieverbrauch besitzen die Antriebskonzepte, die einen vollelektrischen Betrieb ermöglichen (BEV, PHEV und OC-GIV). Dieser liegt im elektrischen Betrieb etwa bei der Hälfte des Verbrauches von Diesel-ICEV. Dabei liegen PHEV im elektrischen Betrieb aufgrund des geringeren Batteriegewichts stets leicht unter BEV.

Abbildung 4-15: Energieverbrauch in der Kategorie Lkw 3,5 – 7,5 t differenziert nach Antriebskonzept und Betriebsmodus (konventionell / elektrisch) 2010 – 2050



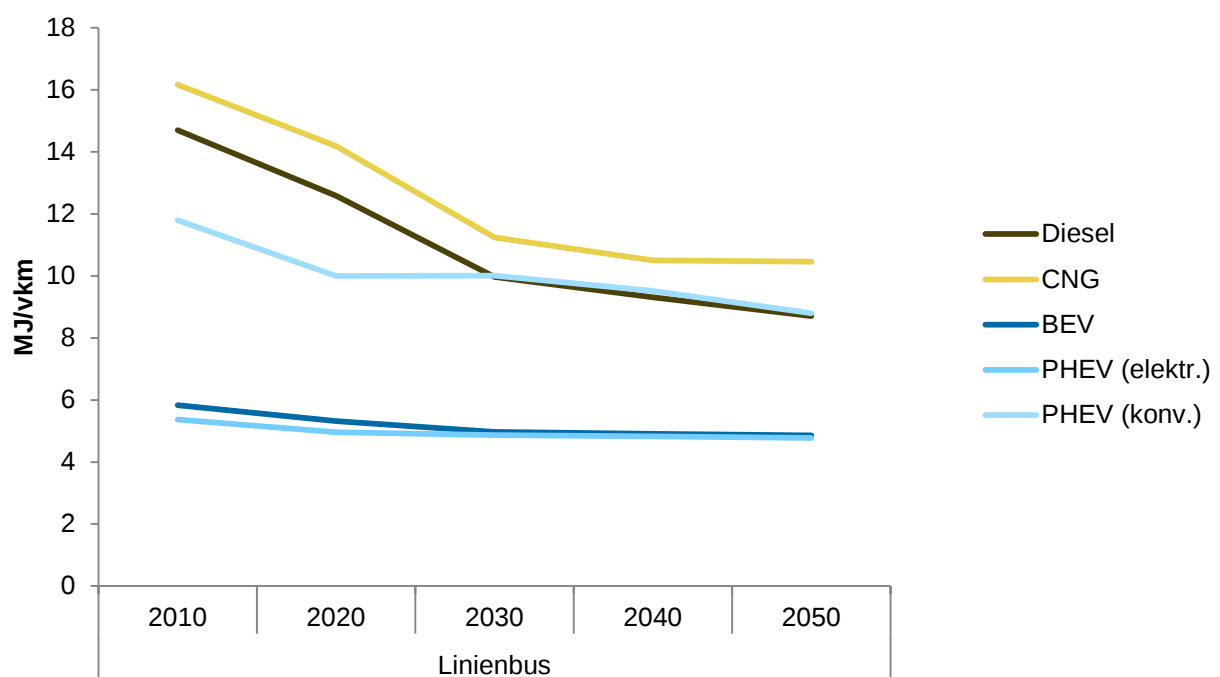
Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 4-16: Energieverbrauch in der Kategorie LZ/SZ < 40 t differenziert nach Antriebskonzept u. Betriebsmodus (konventionell / elektrisch) 2010 – 2050



Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 4-17: Energieverbrauch in der Kategorie Linienbus differenziert nach Antriebskonzept u. Betriebsmodus (konventionell / elektrisch) 2010 – 2050



Quelle: Eigene Berechnungen

4.7.4. Übrige Verkehrsträger (Schiene, Binnenschiff und Zweiräder)

Schienenverkehr

Der Schienenverkehr weist die Besonderheit auf, dass neben Maßnahmen zur Steigerung der Fahrzeugeffizienz technische Optionen auf Seiten der Infrastruktur und Betriebsführung einen wesentlichen Anteil an zukünftigen Effizienzsteigerungen haben können. So kann im ÖPNV bspw. durch infrastrukturseitige Energiespeicher, enger vermaschte Netze oder rückspeisefähige Unterwerke der Anteil an zurückgespeicherter Energie erhöht und damit der spezifische Energieverbrauch reduziert werden. Im Gegensatz zu den Pkw, LNF und SNF handelt es sich eher um die Steigerung der Effizienz des *Gesamtsystems Schiene* als der der Fahrzeugeffizienz.

In den *eMobil 2050* Szenarien wird die langfristige Entwicklung des spezifischen Energieverbrauchs im Schienenverkehr aus Blanck et al. (2012) unterstellt. Ausgangsgrundlage sind die Verbrauchswerte aus dem TREMOD-Modell Version 5.25, wobei eine Fortschreibung der Minderung für den Zeitraum von 2030 bis 2050 auf Basis der jährlichen Änderungsrate zwischen 2010 und 2030 durchgeführt wird.

Die langfristige Entwicklung des spezifischen Energieverbrauchs der Fahrzeugflotte im ÖPNV bis zum Jahr 2050 bei den Straßen- und Stadtbahnen sowie den U-Bahnen, welche gemeinsam als SSU bezeichnet werden, wurde der Studie *Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energie und Steigerung der Energieeffizienz im öffentlichen Personennahverkehr* (Kappus et al. 2013) entnommen. Das vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung geförderte Forschungsvorhaben wurde von der Hamburg-Consult GmbH und dem Öko-Institut e.V. durchgeführt und untersucht in verschiedenen Szenarien mögliche Pfade der Effizienzsteigerung bis 2030.

Dabei wird in den *eMobil 2050* Szenarien auf die Ergebnisse des Szenarios *Effizienz Hoch* zurückgegriffen, welches eine besonders ambitionierte Effizienzentwicklung unterstellt und somit die größte Nähe zu den Annahmen für die anderen Verkehrsträger im Projekt *eMobil 2050* aufweist und im Gegensatz zum Szenario *Effizienz Mittel* auch eine mögliche Entwicklung für den Zeitraum 2030 bis 2050 abdeckt. In diesem Szenario wird für die Straßen- und Stadtbahnen bis 2015 von einem annähernd flächendeckenden Einsatz von u. a. energieeffizienten Weichenheizungen, Energiemanagement für Fahrzeuge in der Abstellung und Verbesserung der Rückspeisefähigkeit ausgegangen. Fahrzeugseitig führt der Einsatz effizienter Heizungs- und Klimatisierungstechnik zu steigenden Effizienzgewinnen. Daneben führt die Optimierung der Fahr- bzw. Umlaufpläne nach Stabilität und Energieeffizienz zu weiteren Effizienzsteigerungen im Gesamtsystem (Kappus et al. 2013).

Binnenschifffahrt

Für die in den *eMobil 2050* Szenarien unterstellten spezifischen Energieverbräuche für die Binnenschifffahrt für das Jahr 2010 wird auf Knörr et al. (2011) zurückgegriffen. Die langfristige Entwicklung erfolgt analog zum Schienenverkehr und ist Blanck et al. (2012) entnommen.

Krafträder

Die Krafträder werden in den *eMobil 2050* Szenarien auf Basis der Verbrauchswerte aus TREMOD Version 5.25 abgebildet. Bis 2050 wird eine Effizienzsteigerung von 7 % bei den Fahrzeugen mit Benzin und 4 % bei den elektrisch betriebenen Fahrzeugen angenommen, wobei für die elektrisch erbrachte Fahrleistung in 2050 ein Anteil von 95 % unterstellt wird.

Pedelecs

Für Pedelecs wird gemäß Produkttests von ExtraEnergy ein durchschnittlicher spezifischer Energieverbrauch von 1 kWh / 100 km oder 0,036 MJ/km angenommen.

Tabelle 4-6 zeigt den spezifischen Energieverbrauch für den Personenverkehr in MJ pro Personenkilometer. Im Unterschied zu den Fahrzeugen des Straßenverkehrs (Kapitel 4.7.1 bis 4.7.3) beziehen sich die hier aufgeführten spezifischen Verbrauchswerte auf die bestehende Fahrzeugflotte und nicht auf Neuzulassungen in den entsprechenden Jahren. Die spezifischen Energieverbrauchswerte des Güterverkehrs sind in Tabelle 4-7 in MJ pro Tonnenkilometer aufgeführt.

Tabelle 4-6: Spezifischer Energieverbrauch im Schienenpersonenverkehr, der Krafträder und Pedelecs nach Antriebskonzept 2010 – 2050

		2010	2020	2030	2040	2050
		MJ / pkm				
Schienenpersonenverkehr						
Fernverkehr	Diesel	0,90	0,83	0,77	0,71	0,66
Fernverkehr	Strom	0,26	0,23	0,20	0,17	0,15
Nahverkehr	Diesel	1,06	1,00	0,95	0,90	0,86
Nahverkehr	Strom	0,43	0,38	0,34	0,31	0,28
SSU ¹⁾	Strom	0,43	0,37	0,33	0,32	0,27
Kraftrad	Benzin	0,86	0,85	0,84	0,83	0,83
	Strom	0,25	0,24	0,24	0,23	0,23
Pedelec	Strom	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04

¹⁾ SSU = Straßen-, Stadt- und U-Bahnen

Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis von TREMOD Version 5.25; (Kappus et al. 2013)

Tabelle 4-7: Spezifischer Energieverbrauch im Schienengüterverkehr und der Binnenschifffahrt nach Antriebskonzept 2010 – 2050

		2010	2020	2030	2040	2050
		MJ / tkm				
Schienengüterverkehr						
Güterverkehr	Diesel	0,66	0,61	0,57	0,52	0,49
Güterverkehr	Strom	0,12	0,11	0,09	0,08	0,07
Binnenschifffahrt	Diesel	0,37	0,37	0,37	0,36	0,35

Quelle: Blanck, et al. (2012)

4.8. Kraftstoffe

In diesem Abschnitt werden die grundlegenden Annahmen für die Szenarien im Bereich der Kraftstoffe dargestellt. Im Fokus des Projektes stehen insbesondere strombasierte Kraftstoffe, da hier die relevanten Wechselwirkungen mit dem Stromsektor auftreten. Ergänzend werden im Folgenden ferner die getroffenen Annahmen zu Biokraftstoffen und fossilen Kraftstoffen in den Szenarien vorgestellt.

4.8.1. Strombasierte Kraftstoffe

Grundlegende Eigenschaften der Erzeugung und der Verteilung von strombasierten Kraftstoffen sind in Abschnitt 2.4 beschrieben. An dieser Stelle wird auf die ausgewählten Prozessketten und die dafür getroffenen Annahmen eingegangen. Neben der Auswahl der Prozessketten wurde im Rahmen von *eMobil 2050* eine Schnittstelle mit dem Strommarktmodell *PowerFlex* geschaffen, die die Abbildung von strombasierten Kraftstoffen in der Strommarktmodellierung ermöglicht. Unterschiede im Wirkungsgrad bei der Herstellung verschiedener strombasierter Kraftstoffe führen dazu, dass für die gleiche Endenergiemenge strombasierter Kraftstoffe eine unterschiedliche Strommenge benötigt wird.

In *eMobil 2050* wurden Untersuchungen für strombasiertes Methan und Flüssigkraftstoffe durchgeführt. In den Szenarien kommt kein Wasserstoff im Verkehr zum Einsatz. Beim Einsatz von Wasserstoff – zumindest wenn durch den Aufbau eines Rohrleitungssystems die zeitliche Entkopplung von Stromverfügbarkeit und Wasserstoffnutzung gegeben ist – würde weniger Strom für die Erzeugung benötigt werden als beim Einsatz von Methan oder Flüssigkraftstoffen. Bei der Nutzung strombasierter Flüssigkraftstoffe ist die zeitliche Flexibilität der Kraftstoffherstellung durch das trägere System geringer als bei Wasserstoff und Methan und die energetischen Verluste sind höher. Die generellen Aussagen über die Wechselwirkungen zwischen Strommarkt und Verkehrssektor bei der Nutzung von strombasierten Kraftstoffen, die in dieser Studie anhand von Methan und Flüssigkraftstoffen aufgezeigt werden, würden sich beim Einsatz von strombasiertem Wasserstoff nicht wesentlich ändern. Die nachgefragte Strommenge würde sich allerdings ändern und somit eine andere Kapazität an Stromerzeugungsanlagen verlangen.

Es wird in den Szenarien davon ausgegangen, dass nur erneuerbare Kohlenstoffquellen, d. h. biogener Kohlenstoff oder Kohlenstoff aus der Luft, für die Produktion strombasierter Kraftstoffe genutzt werden. Emissionen aus Industrieprozessen stehen grundsätzlich auch als kostengünstige Kohlenstoffquelle zur Verfügung, werden in *eMobil 2050* aber nicht berücksichtigt. Bei der Nutzung von Industrieemissionen bestünde die Gefahr, CO₂-Emissionsminderungsoptionen in der Industrie wegen des Anreizes der Weiterverwendung des CO₂ nicht vollständig auszuschöpfen. Zudem steht – unter der Voraussetzung des technischen Durchführbarkeit – mit der Einlagerung fossilen Kohlenstoffs (CCS) eine effizientere Methode der Treibhausgasreduzierung zur Verfügung und die Nutzung von erneuerbarem CO₂ müsste für ein solches Szenario aus Kostengründen wahrscheinlich regulatorisch vorgegeben sein.

Bei der Methanherzeugung wird für die Bereitstellung von Kohlenstoffdioxid davon ausgegangen, dass - wenn möglich - aufgrund des geringeren Energieaufwands zunächst Biogasprozesse genutzt werden. Wird das dadurch zur Verfügung gestellte Potenzial an Kohlenstoffdioxid überschritten, wird der benötigte Kohlenstoff aus der Atmosphärenluft abgetrennt. Für die Entwicklung der Biogasproduktion ist dabei eine aus heutiger Sicht ambitionierte Entwicklung aus Nitsch et al. (2012) entnommen, so dass bei steigender Marktentwicklung bis zu ca. 11 Mio. t Kohlenstoffdioxid in der Biogasproduktion frei werden. Da nicht davon auszugehen ist, dass alle Biogasanlagen mit einer Kohlenstoffdioxidabtrennung ausgestattet und mit einer Methanisierungsanlage kombiniert werden, ist nicht zu erwarten, dass das Kohlenstoffdioxid vollständig für die Methanisierung genutzt werden kann. Aufgrund der nicht kontinuierlichen Produktion von Wasserstoff ist auch keine vollständige Nutzung des Kohlenstoffdioxids bei einer Kombination eines Biogasprozesses mit der Methanisierung zu erwarten, so dass die Annahme getroffen wird, dass im Jahr 2050 ca. 50 % der Kohlenstoffdioxids aus Biogasanlagen für die Methanisierung zur Verfügung stehen. Damit lassen sich rund 27 TWh strombasiertes Methan herstellen. Für eine darüber hinausgehende Nachfrage wird Kohlenstoff aus der Atmosphärenluft genutzt, was zu einem schlechteren Gesamtwirkungsgrad führt.

Für die Herstellung von FT-Kraftstoffen wird davon ausgegangen, dass ausschließlich CO₂ aus der Atmosphäre abgetrennt wird. Grund dafür ist, dass im durchgeführten Fachworkshop die Einschätzung geteilt wurde, dass FT-Anlagen im Gegensatz zu Methanisierungsanlagen deutlich größer sind und dadurch der CO₂-Bedarf deutlich höher ist als die CO₂-Menge, die von einer typischen Biogasanlage produziert wird. Eine Kopplung der Erzeugung von FT-Kraftstoffen mit bestehenden Biogasanlagen ist daher kaum praktikabel.

Für die Herleitung der elektrischen Wirkungsgrade für die Produktion der Kraftstoffe und den Transport der Kraftstoffe wird auf Abschnitt 2.4 verwiesen (siehe auch Tabelle 4-8). Da die Wasserstoffproduktion eine zeitliche Flexibilität besitzen soll, um den variabel produzierten erneuerbaren Strom für die Wasserstoffherstellung zu verwenden, kommen alkalische und PEM-Elektrolyseure zum Einsatz. In den *eMobil* Szenarien wird Methan zumeist im Straßengüterverkehr eingesetzt, so dass von verflüssigtem Methan als Energieträger ausgegangen wird, wodurch sich der energetische Aufwand der Methanverteilung und –betankung erhöht und 9 % energetische Verluste anstatt 5 % in der Kraftstoffverteilung auftreten.

Weitere Rahmenbedingungen für die Abbildung der Produktion an strombasierten Energieträgern sind die Speicherkapazität und die Nachfrage anderer Anwendungssektoren. Für Methan wird von einem Jahresspeicher ausgegangen und bei der Modellierung von Flüssigkraftstoffen ist die Annahme von erweiterten Speicherkapazitäten hinterlegt, so dass die Speicherkapazität auf ein halbes Jahr angesetzt wird. Diese hohen Speicherkapazitäten führen dazu, dass die Produktion der strombasierten Kraftstoffe prinzipiell flexibel auf das Stromdargebot reagieren kann. Randbedingung ist, dass zu Beginn des Jahres genauso viel Energie vorhanden ist wie zu Ende des Jahres, so dass der Jahresverbrauch der beiden Energieträger im Laufe eines Jahres produziert werden muss. Eine Nachfrage nach strombasierten Energieträgern durch andere Anwendungssektoren ist nicht angenommen, so dass die produzierten strombasierten Energieträger vollständig im Verkehrssektor zum Einsatz kommen.

Tabelle 4-8: Szenarioannahmen für die Modellierung strombasierter Kraftstoffe für das Jahr 2050

		Methan		FT-Kraftstoff
		biogenes CO ₂	atmosph. CO ₂	atmosph. CO ₂
Wasserstoffproduktion	-	alkalisch/PEM	alkalisch/PEM	alkalisch/PEM
elektrischer Wirkungsgrad	%	51	42	38
Herstellung	%	56	46	39
Verteilung	%	91	91	99
Maximale Produktion	PJ	97	-	-
Speicherkapazität	-	Jahresspeicher	Jahresspeicher	Halbjahresspeicher
Nachfrage anderer Sektoren	PJ	0	0	0

Quelle: Eigene Annahmen

Für die Abbildung der Produktion strombasierter Energieträger im Strommarktmodell *PowerFlex* wurden zwei Arten an Schnittstellen definiert. Einerseits lässt sich die Nachfrage nach den Kraftstoffen aus dem Verkehrssektor exogen in der Strommarktmodellierung vorgeben. Durch die Angabe der Kapazität der Produktionsanlagen ist somit auch die Volllaststundenzahl der Energieträgerproduktion vorgegeben. Die zweite Art der Modellierung in *PowerFlex* lässt die Kraftstoffherstellung zu, wenn das Dargebot an erneuerbaren Energien die in den jeweiligen Stunden vorhandene Stromnachfrage übersteigt. Hierzu wird im Modell als Anreiz für den Betrieb

der Power-to-Gas Erzeugungsanlagen ein Bonus in Höhe der Betriebskosten gesetzt, um die Erzeugung auszulösen.¹⁵ In dieser Art der Modellierung werden Annahmen für die Produktionskapazität der Anlagen je nach Aufkommen und Höhe des überschüssigen Stromdargebots festgelegt, so dass sich die Volllaststundenzahl aus der Kombination der Kapazität der Produktionsanlagen und den variablen Betriebskosten der Kraftstoffherstellung in der Strommarktmodellierung ergeben.

Relevante Überschüsse an erneuerbarem Strom, die eine wirtschaftliche und treibhausgasneutrale Produktion strombasierter Energieträger ermöglichen, sind mittelfristig zu erwarten. Daher wird in den Szenarien angenommen, dass ab dem Jahr 2030 strombasierte Kraftstoffe mit den in Tabelle 4-8 aufgeführten Eigenschaften im Verkehrssektor eingesetzt werden. In den Szenarien wird für strombasiertes Methan von 3.000 Volllaststunden und für strombasierten Fischer-Tropsch-Kraftstoff von 4.000 Volllaststunden ausgegangen. Bis zum Auftreten relevanter Überschüsse kann bei speziellen Kombinationen aus erneuerbaren Erzeugungskapazitäten und Netzkapazitäten regional die Integration einer Produktionsanlage strombasierter Kraftstoffe eine mögliche Option der Netzentlastung darstellen.

4.8.2. 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 (Jering et al. 2012; Searchinger 2013). Berücksichtigt man indirekte Landnutzungsänderungen (iLUC), so kann die Treibhausgasemissionsbilanz einzelner Kraftstoffe sogar schlechter ausfallen als die der fossilen Referenz. Es besteht weitestgehend wissenschaftlicher Konsens über die Existenz des iLUC-Effektes und über dessen Relevanz für die Gesamtklimabilanz von Biokraftstoffen, auch wenn die genaue Höhe durchaus umstritten ist (Laborde 2011; Laborde et al. 2014; Darlington et al. 2013). Darüber hinaus gibt es weitere Bedenken gegenüber Biokraftstoffen der 1. Generation auf Grund ungünstiger Ökobilanzen (Emmenegger et al. 2012) sowie der Verletzung sozialer Nachhaltigkeitskriterien. Der EU-Energieministerrat einigte sich im Juni 2014 darauf, den Anteil der auf das 10 %-Ziel anrechenbaren landbasierten Biokraftstoffe 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 in etablierten Verwertungswegen genutzt.

Die im Kraftstoffsektor eingesetzten Mengen an Biokraftstoffen sind abhängig von Marktpreisen und Förderinstrumenten. Zukünftige Biomassepotenziale sowie die Entwicklung ökonomischer und politischer Rahmenbedingungen sind mit hoher Unsicherheit verbunden, so dass es schwierig ist, belastbare Annahmen für den langfristigen Einsatz von Biokraftstoffen im Verkehrssektor zu treffen.

Für die Szenarien wird nicht davon ausgegangen, dass bis 2050 Biokraftstoffe in deutlich größerem Umfang als heute im Verkehr eingesetzt werden (auch wenn mittelfristig zur Erreichung des Zieles von 10 % erneuerbaren Energien im Verkehrssektor im Jahr 2020 die eingesetzten

¹⁵ Für eine weitergehende Erläuterung der Modellierung der Erzeugung von strombasierten Kraftstoffen in Stunden mit EE-Überschuss, siehe Abschnitt 1.3.2.

Mengen zunehmen könnten). Zwar kann die energetische Biomassenutzung in anderen Sektoren, wie z. B. im Stromsektor oder bei den Haushalten, perspektivisch reduziert werden und dadurch Biomasse verstärkt im Verkehrssektor genutzt werden. Allerdings wird davon ausgegangen, dass aufgrund begrenzter Flächenverfügbarkeit langfristig praktisch keine landbasierte Biomasse mehr für die direkte energetische Nutzung verwendet wird und nur noch Abfall- und Reststoffe genutzt werden. Insgesamt wird davon ausgegangen, dass im Jahr 2050 150 PJ Biokraftstoffe in Form von Flüssigkraftstoffen und Biogas für die hier untersuchten Verkehrsträger (d. h. ohne Luft- und Seeverkehr) eingesetzt werden. Bei Biogas wird für das Jahr 2050 eine Einspeisung von 20 % ins Gasnetz angenommen.

4.8.3. Fossile Kraftstoffe

Die Menge der eingesetzten fossilen Kraftstoffe in den Szenarien ergibt sich als Residuum aus der Endenergienachfrage des Verkehrs nach Gas- und Flüssigkraftstoffen abzüglich der zur Verfügung stehenden Biokraftstoffe und strombasierten Kraftstoffe.

Hinsichtlich der Klimabilanz fossiler Kraftstoffe ist derzeit vor allem die Auswirkung unkonventioneller Fördermethoden (Ölschiefer, Ölsande) in der Diskussion. Die Well-to-Wheel-Treibhausgasemissionen von Kraftstoffen auf Basis von unkonventionellem Erdöl können bis zu 60 - 70 % über den Treibhausgasemissionen der derzeit in Deutschland eingesetzten Kraftstoffe liegen (Naumann et al. 2014). In den Szenarien wurde jedoch angenommen, dass nur konventionelles Erdöl zum Einsatz kommt.

4.9. Energieverbrauch

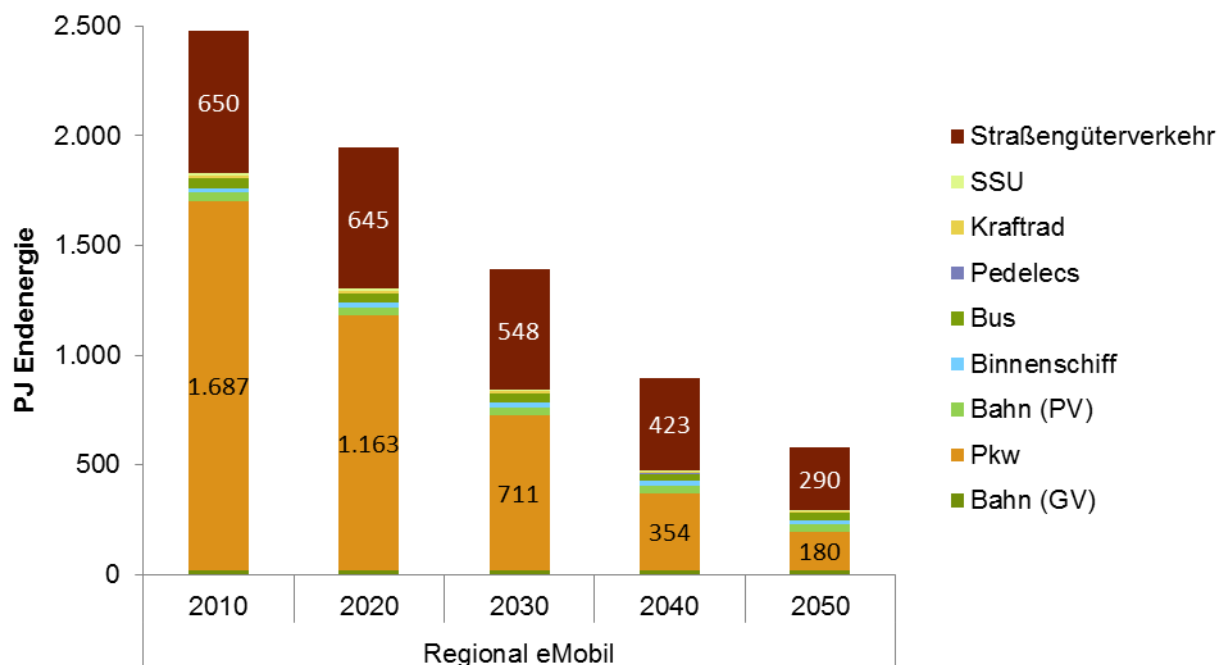
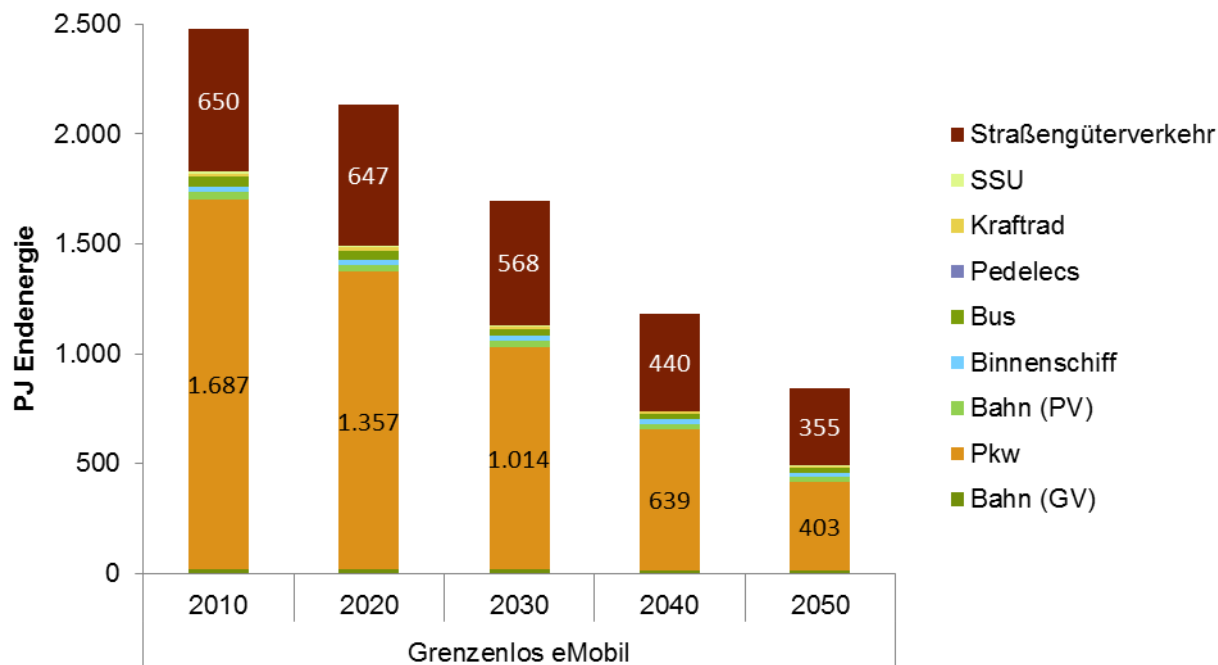
In beiden Szenarien geht der Energieverbrauch des Verkehrs deutlich zurück (Abbildung 4-18). In *Grenzenlos eMobil* sinkt er gegenüber 2010 um 66 % auf 844 PJ und in *Regional eMobil* um 77 % auf 581 PJ. Das Ziel der Bundesregierung zur Minderung des Endenergiebedarfs im Verkehrssektor um 40 % bis 2050 (gegenüber dem Basisjahr 2005) wird demnach deutlich übererfüllt. Diese Übererfüllung ist damit zu erklären, dass sich dieses Ziel auf die Prämissen der Verfügbarkeit von nachhaltigen Biokraftstoffen in relevantem Umfang gründet und von einer deutlich geringeren Elektrifizierung als in den *eMobil Szenarien* ausgeht. Der Luft- und Seeverkehr ist dabei nicht berücksichtigt.

Den deutlichsten Beitrag zur Minderung des Energiebedarfs leistet der Pkw-Verkehr. Dessen Endenergiebedarf sinkt im Szenario *Grenzenlos eMobil* auf 403 PJ. Im Szenario *Regional eMobil* ist durch die nur etwa halb so hohe Fahrleistung und noch etwas stärkere Elektrifizierung der Endenergiebedarf der Pkw mit 180 PJ nochmals niedriger. Auch der Güterverkehr leistet einen Beitrag zur Minderung des Endenergiebedarfs. Im Szenario *Grenzenlos eMobil* geschieht dies vor allem durch den Effizienzsprung der Oberleitungs-Lkw, welcher nach 2030 eine deutliche Minderung bewirkt. Im Szenario *Regional eMobil* ist die Minderung des Energiebedarfs dagegen auf die Reduktion der Straßengüterverkehrsleistung zurückzuführen. Wesentlicher Treiber für die Minderung des Endenergiebedarfs ist also neben einer Reduktion der Verkehrsleistung der hohe Grad der Elektrifizierung. Mittelfristig sind aber auch die unterstellten Effizienzsteigerungen konventionell betriebener Fahrzeuge von hoher Bedeutung.

Betrachtet man die Entwicklung des Endenergiebedarfs nach Energieträgern (Abbildung 4-19), so zeigt sich in beiden Szenarien die deutliche Veränderung im Energieträgermix. Dargestellt ist der Energieträgermix *ohne* den Einsatz strombasierter Kraftstoffe – die Substitution fossiler Kraftstoffe durch strombasierte Kraftstoffe in unterschiedlichem Ausmaß wird in Kapitel 5 untersucht. Im Szenario *Grenzenlos eMobil* hat Strom im Jahr 2050 einen Anteil von über 60 % am Endenergiebedarf des Verkehrssektors. Im Szenario *Regional eMobil* ist der Stromanteil mit 43 %

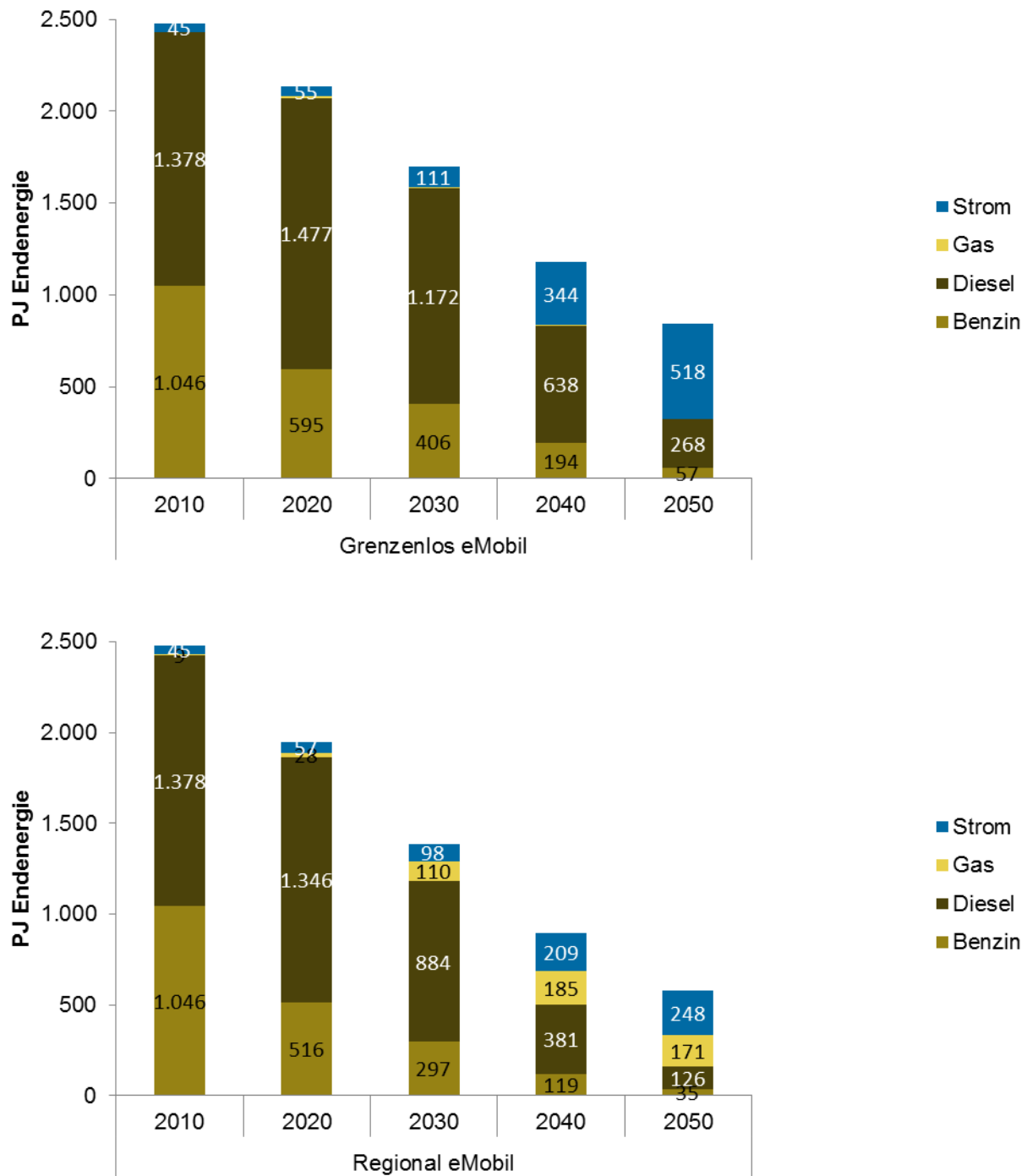
etwas niedriger, da hier keine Oberleitungs-Lkw zum Einsatz kommen. Dafür zeigt sich jedoch die zunehmende Gasnachfrage der Gas-Lkw.

Abbildung 4-18: Endenergiebedarf nach Verkehrsmitteln



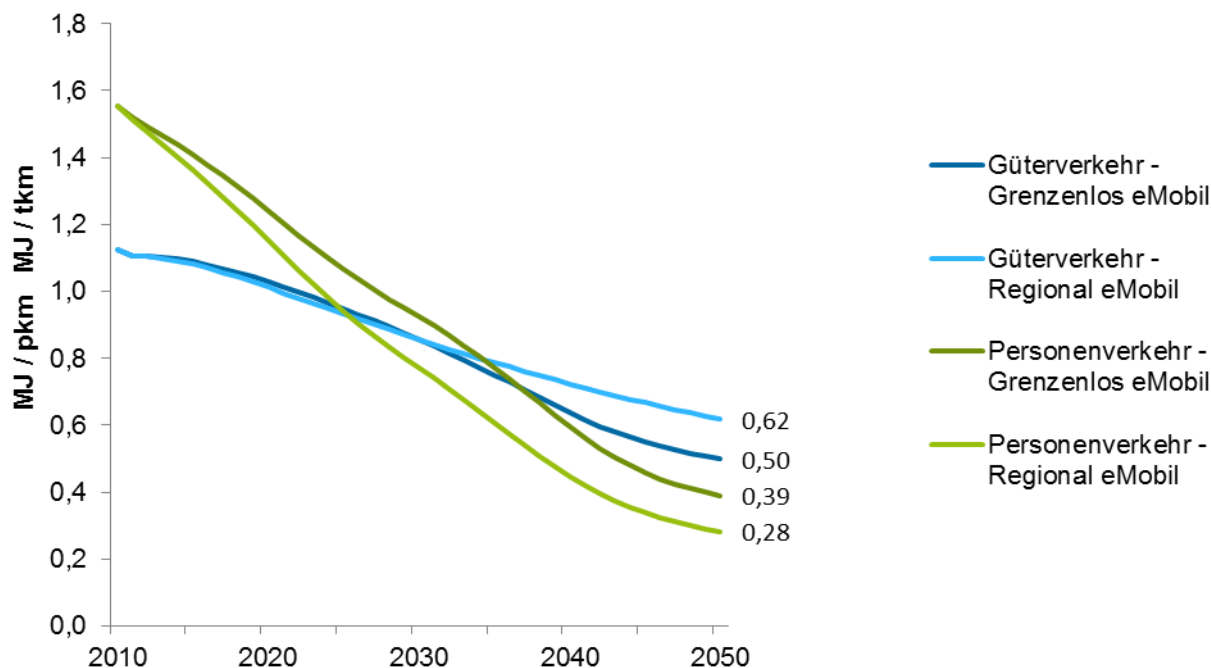
Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 4-19: Endenergiebedarf nach Energieträgern



Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 4-20: Effizienz im Personen- und Güterverkehr



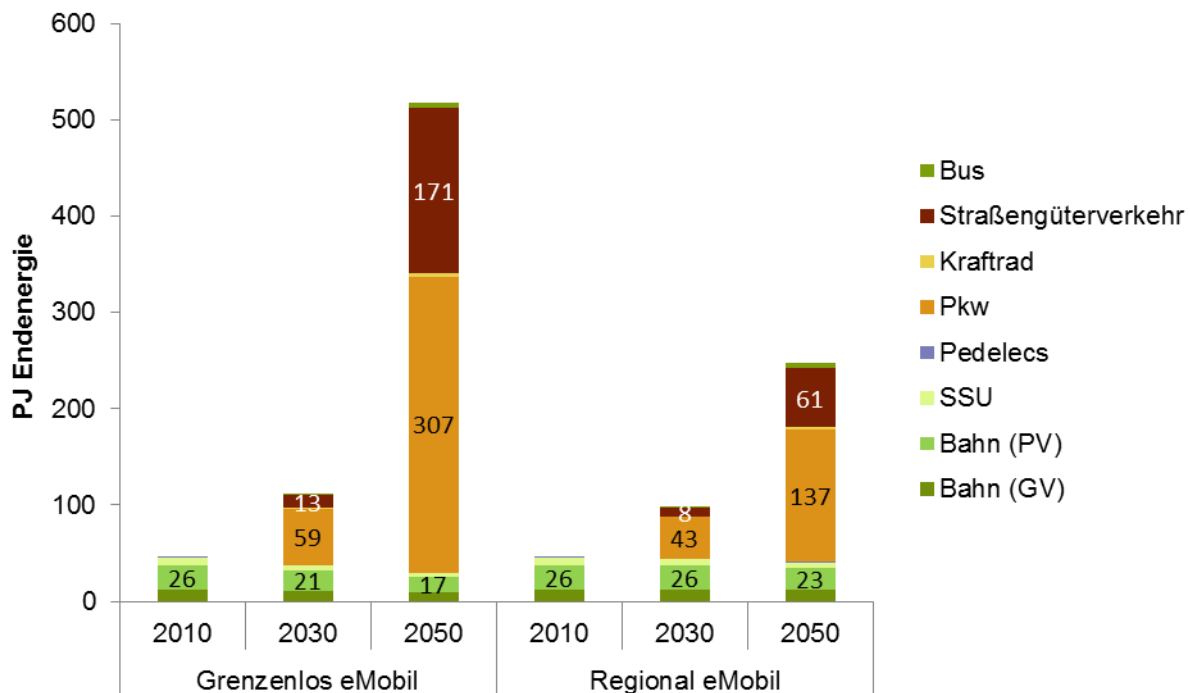
Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 4-19 zeigt die Effizienzentwicklung im Personen- und Güterverkehr, dargestellt anhand des Verhältnisses von Endenergieverbrauch und Verkehrsleistung. Sowohl Verlagerung auf effizientere Verkehrsträger und eine Erhöhung der Auslastung als auch die Erhöhung der Fahrzeugeffizienz und die Elektrifizierung tragen zur Steigerung der dargestellten Effizienz im Personen- und Güterverkehr bei.

In beiden Szenarien zeigt sich im Personenverkehr eine deutlich stärkere Effizienzentwicklung als im Güterverkehr. Der Endenergiebedarf je Personenkilometer reduziert sich im Szenario *Grenzenlos eMobil* um 75 % und im Szenario *Regional eMobil* sogar um 82 %. Die höhere Effizienz im Szenario *Regional eMobil* gegenüber dem Szenario *Grenzenlos eMobil* ist dabei beinahe vollständig auf die stärkere Verlagerung auf den Umweltverbund inkl. Rad- und Fußverkehr sowie den höheren Pkw-Besetzungsgrad zurückzuführen. Unterschiede im Technologiemarkt spielen dagegen nur eine untergeordnete Rolle.

Anders stellt sich die Situation im Güterverkehr dar: Hier reduziert sich der Endenergiebedarf je Tonnenkilometer im Szenario *Grenzenlos eMobil* um 56 % und damit stärker als im Szenario *Regional eMobil* (45 %). Wesentliche Ursache dafür ist der wesentlich höhere Wirkungsgrad des Elektromotors bei Oberleitungs-Lkw im Vergleich zu gasbetriebenen, konventionellen Lkw.

Die Stromnachfrage steigt in beiden Szenarien deutlich auf 248 PJ im Szenario *Regional eMobil* und auf 518 PJ im Szenario *Grenzenlos eMobil* an (Abbildung 4-21). Während der Wert für den klassischen Stromnachfrager Schiene konstant bleibt oder sogar zurückgeht, nimmt die Stromnachfrage der Pkw und Lkw deutlich zu. Dargestellt ist dabei die Stromnachfrage für den Fahrbetrieb, d. h. noch ohne Berücksichtigung von Ladeverlusten. Die Stromnachfrage durch den möglichen Einsatz strombasierter Kraftstoffe ist in dieser Darstellung noch nicht berücksichtigt.

Abbildung 4-21: Strombedarf des Verkehrssektors

Quelle: Eigene Berechnungen

Der stärkste Anstieg der Stromnachfrage entfällt auf den Zeitraum 2030 bis 2040, da in diesem Zeitraum sich die Elektrifizierung zunehmend im Pkw- und Lkw-Bestand durchsetzt. Nach 2040 zeigt sich dagegen zumindest bei den Pkw ein eintretender Sättigungseffekt.

Der überwiegende Teil der Stromnachfrage des Verkehrssektors im Jahr 2050 ist in beiden Szenarien auf batterieelektrische Fahrzeuge zurückzuführen und stellt damit – bei einem entsprechenden Lademanagement – zumindest in begrenztem Maße eine flexible Stromnachfrage dar.

Im Szenario *Grenzenlos eMobil* sind im Jahr 2050 401 PJ auf „flexible Nachfrager“ zurückzuführen. Bei den flexiblen Nachfragern sind dabei bereits die Ladeverluste berücksichtigt.

Unflexible Stromnachfrager sind neben dem Schienenverkehr auch die Oberleitungs-Lkw, welche im Szenario *Grenzenlos eMobil* mit 107 PJ im Jahr 2050 einen wesentlichen Stromnachfrager darstellen. Eine mögliche Flexibilisierung durch einen teilweise verbrennungsmotorischen Betrieb von Oberleitungs-Lkw wurde trotz der grundsätzlichen technischen Machbarkeit im Rahmen dieser Analysen nicht betrachtet. Insgesamt sind im Szenario *Grenzenlos eMobil* im Jahr 2050 147 PJ auf „unflexible“ Stromnachfrager, d. h. oberleitungsgebundene Fahrzeuge und den Schienenverkehr zurückzuführen.

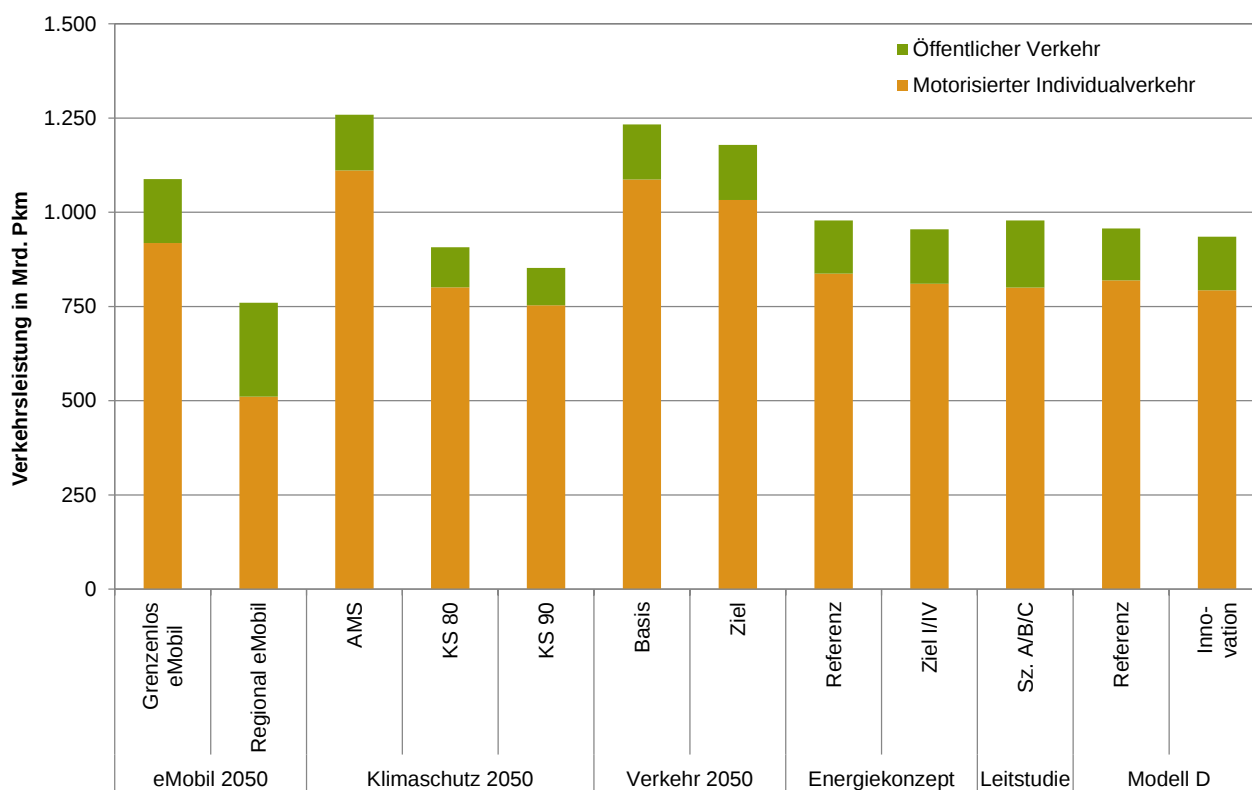
4.10. Einordnung der Szenarien *Grenzenlos eMobil* und *Regional eMobil*

Während die Entwicklung der Verkehrsnachfrage im Szenario *Grenzenlos eMobil* in ähnlichen Größenordnungen wie in anderen Szenarien liegen, weicht das Szenario *Regional eMobil* durch eine deutliche Veränderung in der Verkehrsnachfrage von den „klassischen“ Klimaschuttszenarien wie *Klimaschutzszenario 2050* (Repenning et al. 2014), *Treibhausgasneutraler Verkehr 2050* (Blanck et al. 2012), den *Szenarien zum Energiekonzept der Bundesregierung* (Schlesinger et al.

2010), der *BMU-Leitstudie* (Nitsch et al. 2010) oder *Modell Deutschland* (Kirchner et al. 2009) ab (siehe Abbildung 4-22 und Abbildung 4-23).

Im Szenario *Grenzenlos eMobil* steigen die durchschnittlich pro Person und Tag zurückgelegten Kilometer um gut 10 % von 38 auf 42 Kilometer an, obwohl die Anzahl der Wege sogar minimal zurückgeht. Ursache dafür ist die Zunahme der Wegelängen. Im Szenario *Regional eMobil* dagegen sinken die Wegelängen und damit auch die zurückgelegten Kilometer auf 30 km pro Person und Tag. Die zunehmenden Wegelängen im Szenario *Grenzenlos eMobil* werden durch den Bevölkerungsrückgang nahezu kompensiert; die Personenverkehrsleistung bleibt dadurch fast konstant. Im Szenario *Regional eMobil* kommt es zu einer deutlichen Trendwende und die Personenverkehrsleistung geht bis zum Jahr 2050 um 23 % gegenüber 2010 zurück. Im Vergleich zu anderen Szenarien ist die Bedeutung des Öffentlichen Verkehrs zudem wesentlich stärker ausgeprägt. Im Szenario *Grenzenlos eMobil* bleibt dabei der Pkw mit einem Anteil von 80 % an der Verkehrsleistung, ähnlich wie in den Vergleichsszenarien, dominant und, wohingegen im Szenario *Regional eMobil* der Pkw-Anteil an der Verkehrsleistung auf 57 % sinkt.

Abbildung 4-22: Verkehrsleistung im Personenverkehr 2050 – Szenarienvergleich

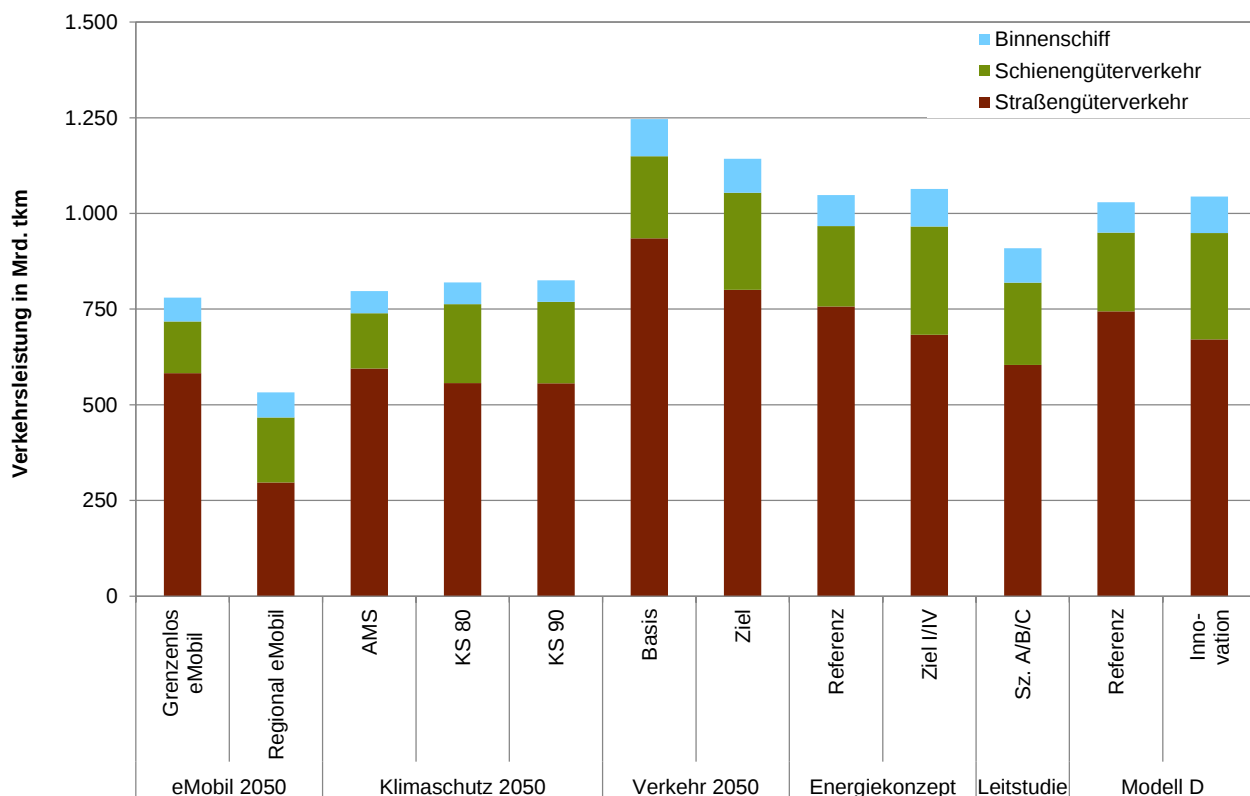


Quelle: Eigene Darstellung

Der deutliche Unterschied zwischen den Szenarien zeigt sich ebenfalls beim Güterverkehr: Im Szenario *Grenzenlos eMobil* steigt aufgrund der zunehmenden Transportweiten die Transportleistung bis 2050 auf 780 Mrd. Tonnenkilometer und damit um 30 % an. Gleichzeitig nimmt durch die Güterstrukturverschiebung der Anteil der Straße am Modal Split im Szenario *Grenzenlos eMobil* leicht zu (um 3 %). Das Szenario liegt damit in der Größenordnung aktueller Szenarien für den Güterverkehr, die bereits die Auswirkungen der europäischen Finanz- und Wirtschaftskrise berücksichtigen (vgl. Klimaschutzszenario 2050). Die höhere Verkehrsleistung anderer Szenarien geht auf die zugrunde gelegte Verkehrsprognose zurück, die vor Beginn der

Wirtschaftskrise erstellt wurde und auf der Annahme höhere Wachstumsraten aufbaut. Im Szenario *Regional eMobil* steigt die Güterverkehrsleistung zunächst bis zum Jahr 2030 weiter auf gut 700 Mrd. Tonnenkilometer. Langfristig ergibt sich jedoch durch den Rückgang fossiler Energieträger, die sparsamere Ressourcennutzung sowie kürzere Transportweiten ein Rückgang der Güterverkehrsleistung auf 532 Mrd. Tonnenkilometer, was in etwa dem Niveau von 2003 entspricht. Dabei findet außerdem bis zum Jahr 2050 eine deutliche Verlagerung auf Schiene und Binnenschiff statt. Der Straßenverkehr sinkt um 30 % und hat im Jahr 2050 noch einen Anteil von 55 % an der Verkehrsleistung. Auch gegenüber anderen Szenarien bedeutet dies eine erheblich geringere Güterverkehrsleistung im Jahr 2050.

Abbildung 4-23: Verkehrsleistung im Güterverkehr 2050 – Szenarienvergleich



Quelle: Eigene Darstellung

Sowohl das Szenario *Grenzenlos eMobil* als auch das Szenario *Regional eMobil* unterscheiden sich von bestehenden Szenarien durch den hohen Grad der Elektrifizierung.

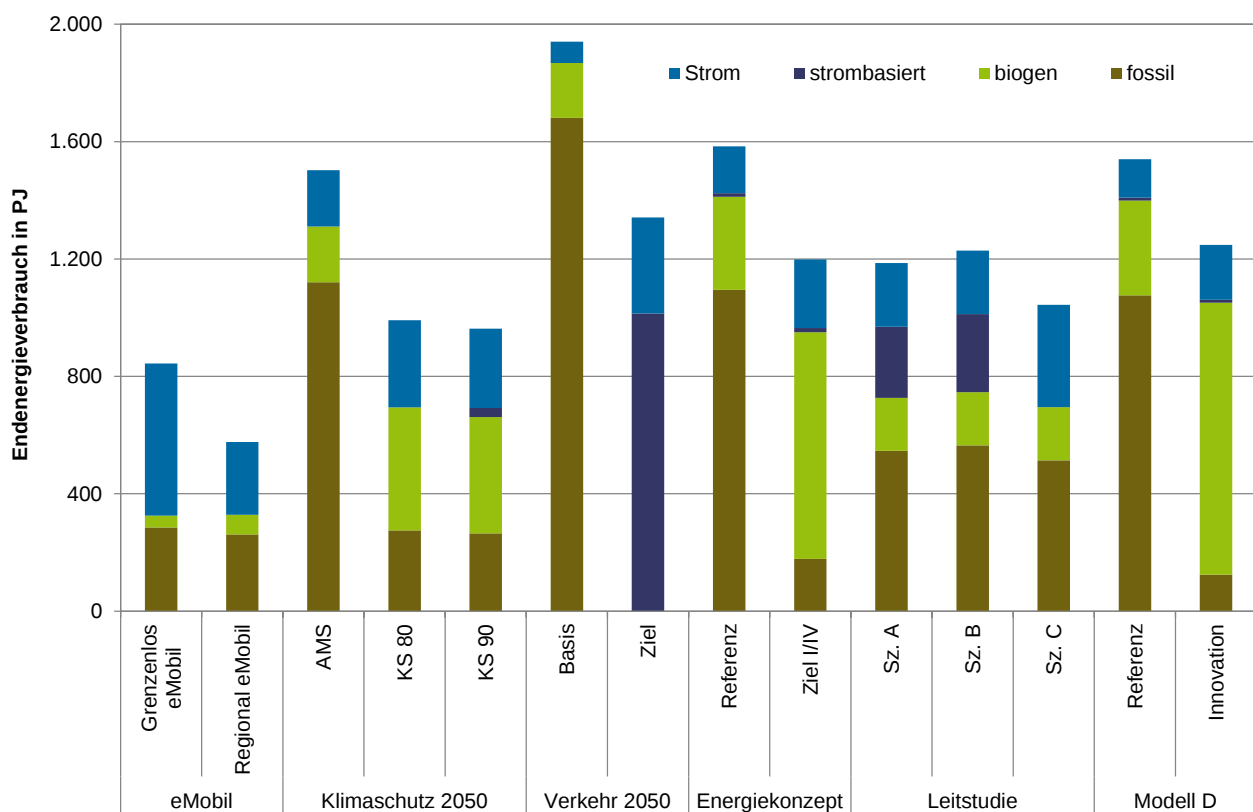
Bei den eingesetzten Pkw-Technologien liegen in beiden Szenarien eine ähnlich ambitionierte Effizienzsteigerung und eine vergleichbare Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen zu Grunde. Im Szenario *Grenzenlos eMobil* wird aber davon ausgegangen, dass im Güterfernverkehr massiv Oberleitungsfahrzeuge eingesetzt werden, wohingegen im Szenario *Regional eMobil* der Fokus auf der Regionalisierung von Wirtschaftskreisläufen und der Verlagerung von Lkw-Verkehren auf die Schiene liegt und Gas-Lkw an Bedeutung gewinnen, welche perspektivisch auch mit Biogas oder strombasierten Methan betrieben werden können.

Ergebnis ist, dass in beiden Szenarien der Energieverbrauch des Verkehrs deutlich zurückgeht. In *Grenzenlos eMobil* sinkt er gegenüber 2010 um 66 % auf 844 PJ und in *Regional eMobil* um 77 % auf 581 PJ. Der Endenergiebedarf je Personenkilometer reduziert sich im Szenario

Grenzenlos eMobil um 75 % und im Szenario *Regional eMobil* sogar um 82 %. Die höhere Effizienz im Szenario *Regional eMobil* gegenüber dem Szenario *Grenzenlos eMobil* ist dabei beinahe vollständig auf die stärkere Verlagerung auf den Umweltverbund inkl. Rad- und Fußverkehr sowie den höheren Pkw-Besetzungsgrad zurückzuführen. Anders stellt sich die Situation im Güterverkehr dar: Hier reduziert sich der Endenergiebedarf je Tonnenkilometer im Szenario *Grenzenlos eMobil* um 56 % und damit stärker als im Szenario *Regional eMobil* (45 %). Wesentliche Ursache dafür sind die effizienten Oberleitungs-Lkw.

Im Vergleich mit anderen Szenarien machen sich die besonders ambitionierten Annahmen bezüglich der Elektrifizierung der Fahrzeugantriebe bei der Betrachtung des Endenergiebedarfs im Jahr 2050 deutlich bemerkbar. Der vergleichsweise geringe Endenergiebedarf im Szenario *Grenzenlos eMobil* lässt sich insbesondere durch die Berücksichtigung von Oberleitungs-Lkw im Güterverkehr erklären, die sonst in keinem anderen Szenario Anwendung findet. Durch den starken Rückgang der Verkehrsleistung sowie die Verlagerung von Verkehrsmitteln auf weniger energieintensive Verkehrsmittel kann im Szenario *Regional eMobil* eine noch deutlichere Minderung des Endenergiebedarfs erzielt werden, obwohl in diesem Szenario oberleitungsgebundene Lkw nicht berücksichtigt werden.

Abbildung 4-24: Endenergiebedarf des Verkehrs 2050 – Szenarienvergleich



Quelle: Eigene Darstellung

Im Rahmen des dritten Szenario-Workshops wurden die Szenarioergebnisse vorgestellt und diskutiert (Kapitel 3.6). Die Diskussion konzentrierte sich hierbei vor allem auf das Szenario *Regional eMobil*, da dieses tendenziell von einem Wertewandel ausgeht und sich die Frage nach dessen Plausibilität bzw. der Möglichkeit einer Unterstützung seitens der Politik stellte. Grundtenor bezüglich dieses Szenarios war, dass auf jeden Fall ein konsistentes Maßnahmenpaket auf Basis

eines parteiübergreifenden, gesellschaftlichen Konsenses für eine entsprechende "Mobilitätswende" notwendig ist.

Nach Meinung der Szenario-Gruppe ist eine direkte Beeinflussung von Werten schwierig. Ein Wertewandel im Mobilitätsverhalten ist vor allem auch ein diskursiver Prozess, wobei nicht Steuerung, sondern nur eine Gestaltung dieses gesellschaftlichen Prozesses möglich ist. Allerdings können beispielsweise über Verkehrsplanung Lebensumfelder verändert und damit indirekt auch Werte beeinflusst werden. Hierbei kann auf kommunaler Ebene nachhaltige Mobilität besser gestaltet und kommuniziert werden, da eine größere Nähe zur Lebenswirklichkeit der Bürger besteht. Oft bedarf es aber eines Rahmens auf Bundesebene für die Umsetzung auf kommunaler Ebene, wie bei den Carsharing-Stellplätzen oder bezüglich finanzieller Mittel im ÖV- und Fahrradverkehr. Im Bereich der Technik gibt es starke Akteure, welche Entwicklungen beeinflussen (z. B. Automobilindustrie). Im Bereich einer Veränderung der Verkehrsnachfrage gibt es diese starken Akteure bisher nicht.

Quintessenz zum Szenario-Prozess *eMobil 2050* war nach Meinung der Teilnehmer, dass erfreulicherweise in den Szenarien nicht so konservativ wie üblich gedacht würde. Die Ergebnisse zeigten nach der überwiegenden Meinung der Teilnehmer, dass eine Änderung gegenüber einem Business-As-Usual-Szenario möglich sein könnte. Die Politik müsste hierfür aber notwendige Schritte offensiv angehen und dafür eintreten.

5. Wechselwirkung mit Stromsektor

5.1. Ziel und Vorgehen

Im Folgenden werden die möglichen Wechselwirkungen von Verkehrs- und Stromsektor diskutiert und die Auswirkungen einer zunehmenden Elektrifizierung der Fahrzeugantriebe bzw. eines verstärkten Einsatzes strombasierter Kraftstoffe auf die Stromerzeugung am Beispiel der Szenarien *Grenzenlos eMobil* und *Regional eMobil* veranschaulicht.

Ziel der Analysen ist es, für den Fall eines zunehmenden Markterfolgs von Elektromobilität die Struktur der zusätzlichen Stromerzeugung für unterschiedliche Rahmenbedingungen und den Beitrag von Elektromobilität als flexiblen Nachfrager zur Integration von EE-Strom zu veranschaulichen sowie den notwendigen EE-Ausbaubedarf zu quantifizieren, der eine treibhausgasneutrale Deckung der zusätzlichen Stromnachfrage ermöglicht. Eine Diskussion der Instrumente, die für die Erreichung der dargestellten Entwicklungen im Energiesektor notwendig wären (z. B. zusätzlicher Ausbau erneuerbarer Energien oder geeignete Adressierung im Rahmen des EU-weiten Emissionshandels), ist nicht Bestandteil dieses Vorhabens. Die Ergebnisse der Analysen bilden im Folgenden die Grundlage für die Quantifizierung des Beitrags von einer zunehmenden Elektrifizierung des Verkehrs zur Minderung der Treibhausgasemissionen in den Szenarien *Grenzenlos eMobil* und *Regional eMobil* bis zum Jahr 2050 (Kapitel 6).

Die notwendige zusätzliche Stromerzeugung ergibt sich aus den getroffenen Annahmen zur Entwicklung von Elektromobilität in den beiden Szenarien *Grenzenlos eMobil* und *Regional eMobil*. Die zeitliche Verteilung der Stromnachfrage des Verkehrs resultiert aus den getroffenen Annahmen zur Entwicklung der Ladeinfrastruktur, dem Ladeverhalten und den Einsatzprofilen differenziert nach den betrachteten Verkehrsmitteln. Die Entwicklung der Stromnachfrage der sonstigen Sektoren und die Struktur des Kraftwerkspark werden für den Zeitraum bis zum Jahr 2050 auf Basis aktueller Studien definiert. Mit dem Strommarktmodell *PowerFlex* werden anschließend für die beiden oben genannten Elektromobilitätsszenarien die Effekte der zusätzlichen Stromnachfrage des Verkehrs auf den Kraftwerkseinsatz bis zum Jahr 2050 für unterschiedliche Rahmenbedingungen und unter Bezugnahme auf einen Vergleichslauf ohne die Stromnachfrage des Verkehrs abgebildet. Dabei wird auch die bereits bestehende verkehrsbedingte Stromnachfrage – insbesondere des Schienenverkehrs – berücksichtigt. Auf Basis der definierten Entwicklung der Energieerzeugung bis 2050 wird zunächst der Effekt der Stromnachfrage des elektrischen Verkehrs (Differenzstrommenge) auf den Kraftwerkseinsatz im Vergleich zum Lauf ohne den Stromnachfrager Verkehr in stündlicher Auflösung modelliert, mögliche Deckungslücken aufgezeigt und die mit der zusätzlichen Stromerzeugung verbundenen Treibhausgasemissionen quantifiziert.

In Bezug auf die Analyse der Differenzstrommenge im Kontext von Elektromobilität ist grundsätzlich zu beachten, dass hieraus keine automatischen Schlüsse über die CO₂-Intensität der Stromversorgung für den Verkehr abgeleitet werden können. Es handelt sich vielmehr um ein analytisches Vorgehen, welches Rückschlüsse auf den veränderten Kraftwerkseinsatz und den notwendigen zusätzlichen Ausbaubedarf ermöglicht. Alternativ zur direkten Zuordnung der Emissionen der Differenzstromerzeugung zum elektrischen Verkehr (Marginalbetrachtung) ist auch eine Durchschnittsbetrachtung, die die veränderte Stromerzeugung in Form eines veränderten Durchschnittswerts auf alle Stromverbraucher anwendet, zulässig. Die Betrachtung der Differenzstrommenge ermöglicht es jedoch, für einen neuen Stromnachfrager – in diesem Fall Elektromobilität – der unter den getroffenen Annahmen in den *eMobil* Szenarien deutlich an Bedeutung gewinnt, in bisherigen Ausbauszenarien für den Kraftwerkspark jedoch nur wenig oder gar nicht berücksichtigt wird, den notwendigen Handlungsbedarf für eine vollständige Deckung der zusätzlichen Stromnachfrage durch erneuerbare Energien aufzuzeigen. Grundsätzlich ist jedoch nicht auszuschließen, dass auch andere zusätzliche Stromnachfrager bis zum Jahr 2050

entstehen. Im Projekt *eMobil 2050* wird die Annahme getroffen, dass diese im Vergleich zur Entwicklung von Elektromobilität jedoch von untergeordneter Bedeutung sind. Zusammenfassend ist festzustellen, dass die kurzfristige Betrachtung von Elektromobilität je nach Fragestellung auf Basis einer Durchschnitts- oder Differenzstrombetrachtung erfolgen kann. Insbesondere für die Identifikation des zusätzlichen langfristigen Handlungsbedarfs im Stromsektor eignen sich Differenzstrombetrachtungen, welche daher auch die Grundlage für die Analyse der Wechselwirkung von elektrischem Verkehr und Stromerzeugung in *eMobil 2050* darstellen.

In der Folge wird anhand unterschiedlicher EE-Ausbauszenarien veranschaulicht, wie für die formulierten Rahmenbedingungen eine treibhausgasneutrale Deckung der zusätzlichen Stromnachfrage erreicht werden kann. In diesem Kontext wird ferner die Auswirkung einer unterschiedlich starken Flexibilität des Stromnachfragers Elektromobilität auf die Integration von EE-Strom und die Wechselwirkungen mit anderen Flexibilitätsoptionen im Energiesystem untersucht. Als Flexibilitätsoption mit möglicher Relevanz für den Verkehrssektor wird ferner die Energieträgerproduktion auf Strombasis im Rahmen von Sensitivitätsbetrachtungen hinsichtlich des Potenzials zur - über das Potenzial von Elektromobilität hinausgehenden - Integration von EE-Strom näher untersucht. Im Rahmen eines Extremszenarios werden abschließend auf Grundlage des Szenarios *Grenzenlos eMobil* die Auswirkungen einer vollständigen strombasierten Energieversorgung des bodengebundenen Verkehrs (über Elektromobilität und strombasierte Kraftstoffe) auf die Stromnachfrage und den dafür zusätzlich notwendigen EE-Ausbau bis zum Jahr 2050 veranschaulicht.

5.2. Einsatzprofile Elektromobilität

5.2.1. Ladeinfrastruktur

Für die Abbildung der (teil-)batterieelektrischen Mobilität in *PowerFlex* ist es notwendig, die Ladeinfrastruktur in Bezug auf die Ladeleistung und die Ladeverfügbarkeit modellmäßig darzustellen. Neben der Infrastruktur ist zudem das Ladeverhalten der Batterie (Lastverhalten und Ladeverluste) mit in die Betrachtung aufzunehmen.

Für die Berücksichtigung der batterieelektrischen Mobilität wurden Fahrzeugnutzungsprofile erstellt (siehe Abschnitt 5.2.3 - 5.2.5), in denen zeitlich aufgelöst die Fahrleistung und Standorte der Fahrzeuge hinterlegt sind. Für die somit festgelegten Standorte muss für die Strommarktmodellierung eine Annahme getroffen werden, inwieweit Lademöglichkeiten vorhanden sind und mit welcher Leistung geladen werden kann (Tabelle 5-1). Für die Modellierung in *PowerFlex* wird dabei angenommen, dass die Fahrzeuge von den Nutzern mit dem Stromnetz gekoppelt werden, wenn sie an einem Ort mit freier Ladeverfügbarkeit parken¹⁶. Als Sensitivität *Netzkopplung+ (NK+)* wird der Einfluss der Verfügbarkeit der Ladeinfrastruktur untersucht, in dem in dieser Sensitivität die Netzkopplung an allen Standorten zu allen Zeiten gegeben ist und somit eine maximal ausgebaute Infrastruktur hinterlegt ist.

Batterien können nicht über ihren vollständigen Ladezustand mit höchster Leistung geladen werden, so dass für die Darstellung in der Strommarktmodellierung mit einer reduzierten, durchschnittlichen effektiven Ladeleistung (95 % der Anschlussleistung) gerechnet wird. Zudem treten Ladeverluste durch die Spannungsumwandlung und Erhaltungsladungen auf. Die Annahmen dafür sind ebenfalls in Tabelle 5-1 aufgeführt.

¹⁶ Der angegebene Wert bei *Netzkopplung (Häufigkeit)* (Tabelle 5-1) gibt an, dass in x % der Fälle, an dem die Fahrzeuge an dem jeweiligen Standort geparkt werden, eine freie Lademöglichkeit gegeben ist und der Nutzer des Fahrzeugs eine Netzkopplung herstellt. Die Zeitpunkte der Netzkopplung wurden für das jeweilige Fahrprofil zufällig über das Jahr verteilt. Es ist jedoch berücksichtigt, dass die Fahrprofile fahrbar bleiben, d. h. dass eine Netzkopplung hergestellt wird, wenn eine Fahrt mit einem rein elektrischen Fahrzeug ohne vorherige Ladung nicht möglich wäre.

Tabelle 5-1: Szenarioannahmen für Ladeinfrastruktur

	Pkw - private Nutzung				Pkw - geteilte Nutzung	LNF	Busse		SNF
	eigenes Grundstück	Straßenraum	Einkauf, Freizeit	Arbeitsplatz	Straßenraum	Betriebshof	Betriebshof	Haltestellen	Betriebshof
2030									
Anschlussleistung (kW)	3,7	11,0	22,0	11,0	11,0	11,0	50,0	200,0	11,0
Effektive Ladeleistung (kW)	3,5	10,5	20,9	10,5	10,5	10,5	47,5	190,0	10,5
Netzkopplung (Häufigkeit) (%)	100	30	30	30	25	100	100	100	100
Ladewirkungsgrad (%)	90	90	90	90	90	90	90	90	90
2050									
Anschlussleistung (kW)	3,7	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	50,0	200,0	22,0
Effektive Ladeleistung (kW)	3,5	20,9	20,9	20,9	20,9	20,9	47,5	190,0	20,9
Netzkopplung (Häufigkeit) (%)	100	60	60	60	45	100	100	100	100
Ladewirkungsgrad (%)	90	90	90	90	90	90	90	90	90

Quelle: Eigene Annahmen

5.2.2. Ladeverhalten

Über die Strommarktmodellierung mit *PowerFlex* wird die Aufladung der Fahrzeugbatterien anhand der abgeleiteten Fahrzeugnutzungsprofile modelliert. Die inflexiblen Stromnachfrager bilden dabei eine vorgegebene Last, die durch den gegebenen Kraftwerkeinsatz gedeckt werden muss. Die Ladung der flexiblen Stromnachfrager, d. h. vor allem der (teil-)batterieelektrischen Fahrzeuge, kann vom Modell allerdings unter Voraussetzung, dass die Fahrzeuge alle angedachten Fahrten zurücklegen können, zeitlich verschoben werden.

Dafür verwendet das Strommarktmodell *PowerFlex* zunächst eine perfekte Voraussicht über die anstehenden Fahrten und die Verfügbarkeit erneuerbaren Stroms, so dass alle Modellierungsläufe mit *PowerFlex* die ökonomisch günstigste Lösung der Strombereitstellung darstellen und somit eine optimierte Ladung durchgeführt wird. In der Realität wäre die Flexibilität durch die nicht perfekt vorhandene Voraussicht über die anstehenden Fahrten und die Stromproduktion geringer. Zudem ist im Modell im Standardfall hinterlegt, dass nicht zu jeder Zeit an jedem Standort eine Netzkopplung hergestellt wird (siehe Abschnitt 5.2.1). Dies spiegelt neben der fehlenden Verfügbarkeit einer freien Lademöglichkeit die Möglichkeit einer nicht durchgeführten Netzkopplung durch den Fahrzeugnutzer wider.

Im Standardfall wird für die Modellierung in *PowerFlex* ein Mindestladestand der Batterie eingeführt. Es wird also davon ausgegangen, dass eine Ladung durch das System stattfinden muss, wenn eine Netzkopplung gegeben ist und die elektrische Reichweite rein batterieelektrischer Fahrzeuge unter 50 km liegt. Es findet also sofort nach Netzkopplung eine Aufladung bis zu einem 50 km Reichweite entsprechenden Ladestand statt. Danach besteht für das Strommarktmodell die Möglichkeit, die Ladung der Batterie unter der perfekten Voraussicht optimiert zu verschieben.

In der Sensitivität *Lademanagement+* (*LM+*) wird diese Einschränkung der Flexibilität durch den Fahrzeugnutzer nicht berücksichtigt und *PowerFlex* kann die Optimierung der Fahrzeugladung ohne Berücksichtigung des Mindestladestandes durchführen. In der Betrachtung *Netzkopplung+* (*NK+*) wird die Restriktion in Bezug auf die nicht immer vorhandene Netzkopplung aufgegeben und somit eine Netzkopplung für jede Standzeit angenommen. Der Vergleich dieser Sensitivitäten mit dem Standardfall wird in Abschnitt 5.4.3 betrachtet.

5.2.3. Fahrzeugnutzungsprofile Pkw (private Nutzung)

Das Strommarktmodell *PowerFlex* benötigt für die Modellierung der Stromnachfrage (teil-)batterieelektrischer Fahrzeuge Informationen über den Energieverbrauch und die Standorte bzw.

Netzkopplung der eingesetzten Fahrzeuge. Da die Strommarktmodellierung in stündlicher Auflösung arbeitet, müssen diese Parameter ebenfalls in stündlicher Auflösung an *PowerFlex* übergeben werden. Aus Gründen des Speicherbedarfs kann auch nicht jedes elektrische Fahrzeug des Pkw-Bestands einzeln in der Strommarktmodellierung dargestellt werden, so dass alle elektrischen Pkw in Privatbesitz in insgesamt 60 Fahrzeugprofilen zusammengefasst werden.

Die Grundlage für die Ableitung dieser 60 Fahrzeugprofile bildet das heutige Mobilitätsverhalten, so dass Daten der für Deutschland repräsentativen Erhebung *Mobilität in Deutschland 2008 (MiD 2008)* (Follmer et al. 2010), in der das Mobilitätsverhalten von ca. 26.000 Haushalten für einen Tag erfasst ist, die Quelle für die Ableitung der Fahrzeugnutzung ist. Da in der Erhebung neben dem Mobilitätsverhalten auch weitere mobilitätsrelevante und sozio-demografische Daten erfasst sind, war eine Unterteilung in Nutzungsprofile für die verschiedenen Größenklassen (klein, mittel und groß) möglich. Zudem wurde eine Differenzierung in Fahrzeugprofile, deren Besitzer im Stadtbereich und im Umland von Städten bzw. in ländlichen Regionen¹⁷ wohnen, eingeführt, da vor allem in Bezug auf die Tagesfahrleistungen der Fahrzeuge relevante Unterschiede erkennbar sind.

Um aus der personenbezogenen Befragung Fahrzeugnutzungsprofile ableiten zu können, wurde zunächst eine umfangreiche Aufbereitung der Daten des Wegedatensatzes und des Autodatensatzes durchgeführt. Dazu wurde aus dem Mobilitätsverhalten der befragten Personen die Fahrzeugnutzung der jeweiligen Fahrzeuge herausgearbeitet und ein Fahrzeugnutzungsdatensatz zusammengestellt. In diesem Schritt wurden auch fehlerhafte Datensätze, bei denen eindeutig falsche Angaben hinterlegt sind (z. B. Nutzung eines Fahrzeugs von mehreren Personen zur gleichen Zeit, unplausible Durchschnittsgeschwindigkeiten etc.), aus dem Fahrzeugnutzungsdatensatz entfernt. In einem weiteren Aufbereitungsschritt wurden zudem Fahrten mit einer Standzeit von weniger als 15 Minuten zwischen zwei Fahrten zu einer Fahrt zusammengefasst, um die Komplexität der Daten zu reduzieren.

Im Folgenden wurde für die weitere Verwendung die angesprochene Auftrennung der Daten in verschiedene Wochentage (Werktag, Samstag und Sonntag), in verschiedene Größenklassen (klein, mittel, groß) und in die regionale Differenzierung (Kernstadt, Umland) durchgeführt und eine Aggregation der Fahrzeugnutzungsdaten vorgenommen. Die Unterscheidungskriterien für die Aggregation der Fahrzeugnutzung waren dabei wie folgt:

- Profil 1: keine Fahrt
- Profil 2: Start der ersten Fahrt vor 12 Uhr, Tagesfahrleistung länger als 40 km
- Profil 3: Start der ersten Fahrt vor 12 Uhr, Tagesfahrleistung kürzer als 40 km, mindestens eine Fahrt zum Arbeitsplatz
- Profil 4: Start der ersten Fahrt vor 12 Uhr, Tagesfahrleistung kürzer als 40 km, keine Fahrt zum Arbeitsplatz
- Profil 5: Start der ersten Fahrt nach 12 Uhr

Um die Darstellung in der Strommarktmodellierung nicht zu komplex zu gestalten und eine Zusammenfassung der Nutzung der unterschiedlichen Fahrzeuge zu ermöglichen, wurden weitere Vereinfachungen für die Abbildung der (teil-)batterieelektrischen Fahrzeuge in *PowerFlex* vorgenommen. In der Strommarktmodellierung wird daher der Zeitpunkt des Starts der ersten Fahrt und der Ankunft der letzten Fahrt des Tages hinterlegt. Zusätzlich wird der Zeitraum der

¹⁷ Die Unterscheidung wurde wie folgt durchgeführt: Stadtbereich: Kernstadt; Umland: Verdichtete Kreise, Ländliche Kreise.

längsten Standzeit zwischen den Fahrten des Tages mit abgebildet. Dies stellt keine allzu große Verzerrung dar, weil ein Großteil der Fahrzeuge ohnehin nur für zwei Fahrten an einem Tag genutzt wird und bei den übrigen Fahrzeugen zumeist nur kurze Parkzeiten neben einer langen Parkzeit zu finden sind. Die Tagesfahrleistung ist dabei gemäß des Verhältnisses der Fahrzeiten der beiden Fahrten eines Tages aufgeteilt.

Für die zu den Profilen 1 bis 5 zusammengefassten Fahrzeuge wurden für die Übergabe der Fahrzeugnutzung in der Strommarktmodellierung die Durchschnittswerte der genannten Kategorien ermittelt. Diese Werte repräsentieren die Fahrzeugnutzung in der Strommarktmodellierung. Eine vollständige Auflistung der somit ermittelten Nutzungsprofile würde an dieser Stelle zu viel Platz einnehmen, so dass exemplarisch in Tabelle 5-2 Fahrzeugnutzungsprofile für Pkw (mittel, Umland) aus dem Umland dargestellt sind.

Tabelle 5-2: Fahrzeugnutzungsprofile für Pkw (mittel, Umland) in Privatbesitz

Profil	Startzeit der ersten Fahrt	Längste Standzeit			Ankunft der letzten Fahrt	Tagesfahrleistung (km)	Anteil (%)
		Start	Dauer	Ort			
Werktag							
1	-	-	-	-	-	-	39
2	07:42	09:05	06:49	Straßenraum	18:31	84	20
3	07:16	08:08	07:47	Arbeitsplatz	17:40	21	16
4	09:25	10:26	03:11	Einkauf	14:49	17	16
5	15:24	16:02	02:23	Freizeit	19:02	28	10
Samstag							
1	-	-	-	-	-	-	49
2	09:01	11:36	05:03	Straßenraum	18:56	115	13
3	07:32	08:20	06:13	Arbeitsplatz	17:21	21	3
4	09:32	10:23	03:04	Einkauf	14:13	15	22
5	14:38	15:25	02:32	Freizeit	18:44	30	13
Sonntag							
1	-	-	-	-	-	-	65
2	09:27	11:18	04:54	Straßenraum	18:33	137	7
3	09:14	09:56	06:47	Arbeitsplatz	17:35	16	1
4	09:29	10:38	03:27	Freizeit	15:15	17	13
5	14:45	15:29	02:45	Freizeit	18:46	31	14

Quelle: Eigene Berechnungen, abgeleitet aus Follmers et al. (2010)

Für die Strommarktmodellierung genügt es allerdings nicht, Tagesfahrprofile der elektrischen Fahrzeuge abzuleiten. Um die Nutzung der Fahrzeuge für ein gesamtes Jahr in der Strommarktmodellierung zu berücksichtigen, wurden Wochenprofile zusammengestellt, die für die Jahresbetrachtung in *PowerFlex* immer wieder repliziert werden. Für die Ableitung der Wochennutzungsprofile wurden Nutzungsprofile für Werktage, Samstage und Sonntage zufällig miteinander kombiniert. Neben den genannten Differenzierungsmerkmalen (Größenklasse, Regionstyp des Haushalts) wurden die Fahrzeuge gemäß der angegebenen Jahresfahrleistung in drei Kategorien¹⁸ eingeteilt, um nur Fahrzeugnutzungsprofile mit einer ähnlichen Jahresfahrleistung miteinander zu kombinieren.

Im letzten Aufbereitungsschritt der Fahrzeugnutzung für die Darstellung der elektrischen Pkw in Privatbesitz in *PowerFlex* wurde eine Justierung der Fahrleistung durchgeführt. Ein Problem der

¹⁸ Die Kategorien der Jahresfahrleistung sind: < 10.000 km, 10.000 – 20.000 km, > 20.000 km

Erhebungsmethodik der *MiD 2008* ist die Unterschätzung langer Fahrten. Zudem entstanden durch das erläuterte Vorgehen Fahrzeugnutzungsprofile, die an allen Werktagen keine Fahrt und somit eine äußerst geringe und unrealistisch niedrige Jahresfahrleistung aufweisen. Weiterhin wurde ein Teil der Pkw-Nutzungsdaten aufgrund von fehlerhaften Daten überhaupt nicht verwendet, so dass die mit den abgeleiteten Nutzungsprofilen dargestellten Jahresfahrleistungen nicht der Realität entsprechen.

Als Kalibrierungsgröße für die Fahrleistung der Nutzungsprofile wurde daher der Durchschnittswert, der von den Besitzern angegebenen Jahresfahrleistung der in der *MiD 2008* aufgeführten Pkw verwendet. Reichte für die jeweilige Kategorie (Differenzierung nach Größenklasse und Regionstyp des Haushalts), ein Justierungsfaktor von weniger als 5 % aus, wurde eine Justierung mit diesem Faktor durchgeführt. Bei größeren Differenzen zwischen der Kalibrierungsgröße und der hergeleiteten Jahresfahrleistung, d. h. vor allem bei den Nutzungsprofilen ohne Fahrten an Werktagen, wurden über eine zufällige Zuordnung Fahrten unterschiedlicher Länge, die sich aus der *MiD 2008* ableiten, hinzugefügt, um so die durchschnittliche Jahresfahrleistung des Pkw-Bestands in der Modellierung mit *PowerFlex* zu repräsentieren.

Für die Darstellung der privat genutzten Pkw in *PowerFlex* gibt es die Möglichkeit, 60 Profile zu hinterlegen. Für jede Größenklasse konnten somit 20 Fahrzeugnutzungsprofile in die Modellierung übernommen werden. Dafür wurde abschließend eine Auswahl der erstellten Nutzungsprofile getroffen, um einerseits die Fahrleistung der Fahrzeuge, aber auch die Aspekte der unterschiedlichen Regionstypen und deren Unterschiede in der Abbildung der Fahrzeuge in der Strommarktmodellierung zu berücksichtigen.

5.2.4. Fahrzeugnutzungsprofile Pkw in geteilter Nutzung

Bei der Herleitung der Fahrzeugnutzungsprofile, die den Einsatz von Pkw in geteilter Nutzung beschreiben, gelten die gleichen Bedingungen hinsichtlich der Übergabe an das Strommarktmodell *PowerFlex* wie für die Fahrzeugnutzungsprofile der privaten Pkw (siehe Kapitel 5.2.3).

Die Fahrprofile der Pkw in geteilter Nutzung unterscheiden sich in den Wochentagen (Werktag, Samstag und Sonntag), in den Größenklassen (Microcar, klein, mittel, groß), in den Antriebstechnologien (konventionell, BEV, PHEV, REEV) und regional (Stadt, Umland) gekoppelt mit dem typischen Einsatzzweck (Innerstädtische Fahrten (Einkaufen, Arbeiten, Freizeit etc.), Pendler-/Ausflugsfahrten, Dienst- und Urlaubsreisen). Insgesamt wurden dabei 28 typische Fahrzeugnutzungsprofile für Pkw in geteilter Nutzung erstellt.

Die Herleitung der durchschnittlichen Fahr- und Standzeiten basiert auf Kenntnissen zum Einsatz von flexiblen Carsharing-Fahrzeugen aus dem laufenden Forschungsprojekt *share* von Öko-Institut und ISOE¹⁹ sowie für stationsgebundenes Carsharing auf Informationen des Bundesverbandes Carsharing und von Carsharing-Anbietern. Diese Informationen dienen als Ausgangsbasis zur Bestimmung durchschnittlicher Wegelängen, Häufigkeiten der Nutzung und Jahresfahrleistungen. Darüber hinaus wird in den Szenarien, vor allem im Szenario *Regional eMobil*, eine zunehmende Nachfrage nach Pkw in geteilter Nutzung angenommen. Daher wird von einer intensiveren Nutzung dieser Pkw in Zukunft ausgegangen.

Da die einzelnen typischen Fahrzeugnutzungsprofile, die für die Pkw in geteilter Nutzung entwickelt wurden, aufgrund der Vielzahl nicht im Einzelnen erläutert werden können, werden im Folgenden einige Fahrprofile exemplarisch näher beschrieben, um die Bandbreite der Fahrprofile

¹⁹ Öko-Institut und ISOE: *share* – Wissenschaftliche Begleitforschung von car2go mit batterieelektrischen und konventionellen Fahrzeugen, laufendes Forschungsvorhaben, gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit.

darzustellen. Die Fahrprofile von kleinen und mittleren BEV 150 sind hauptsächlich für die Nutzung in der Stadt konzipiert und werden durch kurze Fahrten von durchschnittlich 7 km beschrieben. Aufgrund der angenommenen Nachfragesteigerung nach Pkw in geteilter Nutzung bis 2050 werden die Fahrzeuge über den Werktag verteilt und am Samstag im Durchschnitt etwas mehr als alle zwei Stunden einmal zwischen 07:00 und 22:00 Uhr und am Sonntag in etwa alle vier Stunden einmal genutzt. Die Jahresfahrleistungen betragen dabei für diese Pkw und Einsatzprofile ca. 20.000 km. Demgegenüber werden kleine und mittlere BEV 300 und REEV vorwiegend von Pendlern, für Ausflüge am Wochenende sowie für längere Fahrten im Bereich von 100 bis 300 km eingesetzt. An den jeweiligen Start- und Zielorten sind darüber hinaus kurze Fahrten möglich. Für diese Fahrzeuge und Einsatzprofile ergibt sich eine durchschnittliche Jahresfahrleistung von rund 33.000 km. Mittlere und große PHEVs werden überwiegend für Dienst- und Urlaubsfahrten (> 300 km) und darüber hinaus an den Start- und Zielorten für kurze Fahrten und Ausflüge eingesetzt. Aufgrund der intensiven Nutzung werden Jahresfahrleistungen von rund 60.000 km erzielt.

Als möglicher Ort der Batterieladung wird der öffentliche Straßenraum angenommen, da Pkw in geteilter Nutzung zumeist im Straßenraum abgestellt werden.

5.2.5. Fahrzeugnutzungsprofile Nutzfahrzeuge

Für die Modellierung ist der Zeitpunkt der Stromnachfrage entscheidend, weshalb bei den Fahrprofilen für schwere Nutzfahrzeuge (SNF) unterschieden werden muss zwischen den batteriebetriebenen Fahrzeugen (BEV, PHEV), welche während der Standzeiten geladen werden und den netzintegrierten Fahrzeugen, bei denen der Strom unmittelbar während der Nutzungsphasen über eine Oberleitung bezogen wird (OC-GIV). Einen Sonderfall stellen batterieelektrische Busse dar, die sowohl in der Abstellung auf den Betriebsgeländen als auch zwischenzeitlich an den Endhaltestellen nachgeladen werden können. Bei den leichten Nutzfahrzeugen (LNF) werden in den *eMobil 2050* Szenarien BEV und REEV abgebildet.

Für die als *BEV*, *PHEV* und *REEV* konfigurierten Nutzfahrzeuge werden für jede Stunde neben Standortinformationen (z. B. unterwegs, eigenes Grundstück) Informationen zu der in den Stunden des Fahrzeugbetriebs zurückgelegten Fahrleistung benötigt.

Hinsichtlich der Fahrzeugabstellung zeigen die Ergebnisse der Erhebung „Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010“ (Wermuth et al. 2012), dass Lkw bis einschließlich 3,5 t Nutzlast gewerblicher Halter, Lkw über 3,5 t Nutzlast sowie Busse fast ausschließlich auf dem Betriebsgelände geparkt werden. Lkw bis 3,5 t Nutzlast privater Halter werden zu rund 40 % auf dem Betriebsgelände und zu über 30 % auf einem Privatgrundstück abgestellt. Für den Standort der Abstellung wird in den Fahrprofilen für die Nutzfahrzeuge deshalb davon ausgegangen, dass dieser stets auf dem eigenen Betriebsgelände oder dem eigenen Privatgrundstück erfolgt und eine Ladung der Batterien dort grundsätzlich möglich ist.

Die für LNF und Lkw im städtischen Verteil- sowie Regionalverkehr und für Busse entwickelten Einsatzprofile wurden auf Basis von Annahmen zu den üblichen Geschäftszeiten und Einsatzmustern hergeleitet und durch Telefoninterviews mit Experten aus verschiedenen Unternehmen validiert (Lohmeier; Hinz; Roch; Sievers 2013). Bei Lkw wird davon ausgegangen, dass die Fahrzeuge zwischen 6:00 und 8:00 Uhr den Betrieb beginnen und zwischen 18:00 und 20:00 Uhr wieder auf dem Betriebshof abgestellt werden. Die in diesen Zeitraum zurückgelegten Fahrzeugkilometer sind auf Basis der durchschnittlichen Fahrleistung aus dem *TREMOD*-Modell hergeleitet, wobei verschiedene Profile erstellt wurden, um eine Streuung über den Tag zu berücksichtigen. Bei den Bussen zeigt sich, dass es sehr unterschiedliche Einsatzprofile geben kann. Während in einigen Unternehmen die Busse den gesamten Tag über bis zu 20 Stunden im Einsatz sind und höchstens zu Wartungszwecken in den Schwachlastzeiten aus dem Verkehr

genommen werden, kehren in anderen Unternehmen nach der Morgenspitze bis zu 50 % der Fahrzeuge zurück auf die Betriebshöfe und könnten dort teilweise geladen werden. Die hergeleiteten Fahrprofile versuchen dies zu berücksichtigen, wobei sich gerade in diesem Bereich der Vorteil ergibt, dass die Ausgestaltung der Linien zukünftig auch an den Fahrzeugeigenschaften ausgerichtet werden könnte. In der vorliegenden Studie wird zudem davon ausgegangen, dass Linienbusse bspw. an Endhaltestellen zwischengeladen werden können. Sie stellen somit einen Sonderfall dar, da sie einerseits in den Stunden der Abstellung auf dem Betriebshof wie die übrigen BEV geladen werden können, andererseits aber auch über den Tag verteilt während der Nutzungsstunden. Aufgrund der in der vorliegenden Studie veranschlagten hohen Ladeleistungen von 200 kW bei der Zwischenladung können Linienbusse bis 2050 vollständig durch die Zwischenladungen betrieben werden.

Als weiteres Antriebskonzept werden oberleitungsgebundene Fahrzeuge (OC-GIV) für den Fernverkehr in den *eMobil 2050* Szenarien betrachtet, wie sie im Rahmen des abgeschlossenen Forschungsvorhaben ENUBA (Siemens 2012) und in laufenden Folgevorhaben ENUBA II testweise eingesetzt werden. Im Szenario *grenzenlos Mobil* findet dieses Antriebskonzept bei LZ/SZ < 40 t zGG und Reisebussen Anwendung.²⁰

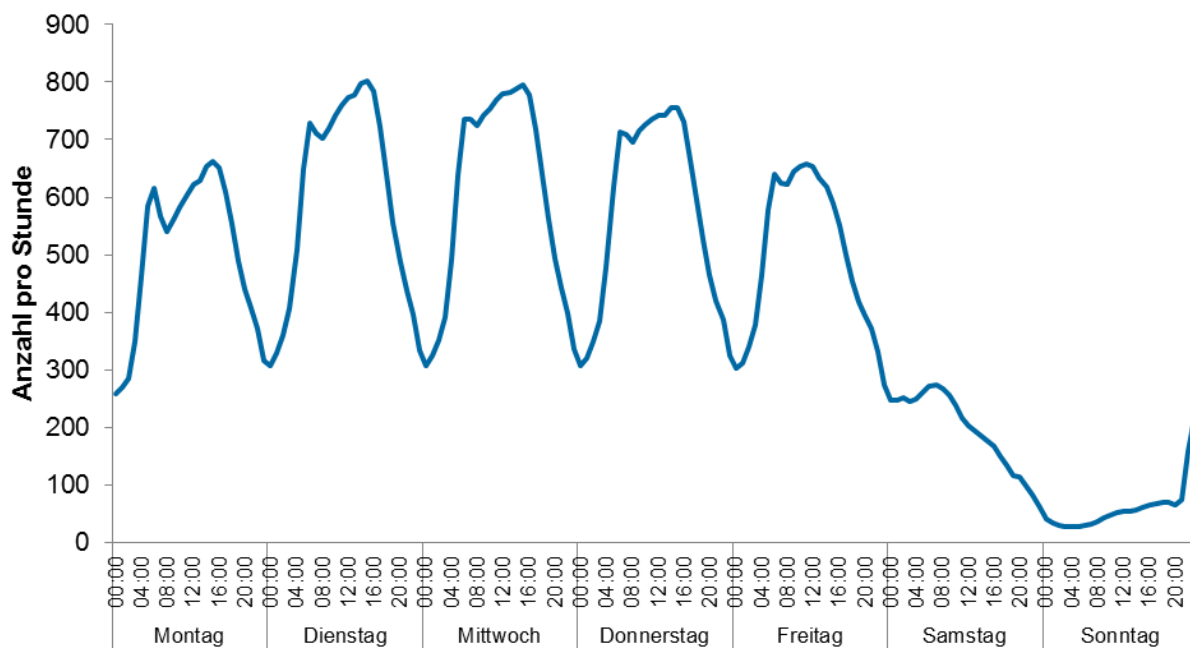
Zur Herleitung der zeitlich aufgelösten Verteilung der Stromnachfrage von oberleitungsgebundenen Fahrzeugen (OC-GIV) konnte auf Verkehrsmengendaten der automatischen Dauerzählstellen an den Bundesautobahnen (BAB) zurückgegriffen werden. Für eine Auswahl von 12 Zählstellen an den einstelligen BAB wurden von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) die Ergebnisse für das Jahr 2012 in stundenscharfer Auflösung differenziert nach den Fahrzeugarten zur Verfügung gestellt (Fitschen 2013). Anhand dieser Daten wurde das in Abbildung 5-1 dargestellte durchschnittliche Wochenprofil für LKW > 3,5 t zGG mit Anhänger und Sattelzüge für die durchschnittliche Verkehrsmenge hergeleitet und oberleitungsgebundenen Lkw der Fahrzeugkategorie LZ/SZ < 40 t zugeordnet. Es zeigen sich deutliche Schwankungen bei den Verkehrsmengen an den einzelnen Wochentagen. Besonders auffällig ist der Einfluss des Sonntagsfahrverbotes. Auf Basis der abgeleiteten Durchschnittswoche wurde die Aktivität von oberleitungsgebundenen Lkw über das gesamte Jahr bestimmt, eine gesonderte Berücksichtigung von Feiertagen oder Ferienreisefahrverboten wurde vernachlässigt. In der vorliegenden Studie wird angenommen, dass die Stromnachfrage proportional zu der dargestellten Verkehrsmenge ist.

Ausgehend von der Annahme, dass zukünftig 75 % der Fahrleistung in der Kategorie LZ/SZ < 40 t elektrisch durch oberleitungsgebundene Lkw erbracht wird, errechnet das *TEMPS*-Modell den Gesamtstromverbrauch. Die Abschätzung des Anteils der Fahrleistung liegt über der heute im *TREMOT*-Modell Version 5.4 durch die LZ/SZ erbrachte Fahrleistung auf den BAB (in 2010 68 % der Fahrleistung auf BAB), da von einem höheren Transitanteil und zukünftigen politischen Lenkungsmöglichkeiten zur Entlastung der Bundes- und Landesstraßen ausgegangen wird. Der sich aus dem *TEMPS*-Modell ergebene Gesamtstromverbrauch wurde anhand der dargestellten Kurve stundenscharf auf das Jahr verteilt und in das Strommarktmodell *PowerFlex* eingespeist.

Das Vorgehen bei oberleitungsgebundenen Reisebussen erfolgt analog zu dem Vorgehen bei Lkw. Auch in dieser Kategorie wird ein Großteil der Fahrleistung elektrisch erbracht. Die Verkehrsmengenzählung erlaubt keine Unterscheidung zwischen den Linien- und Reisebussen, weshalb das durchschnittliche Wochenprofil für Busse auf den BAB für die Reisebusse herangezogen wurde (siehe Abbildung 5-2).

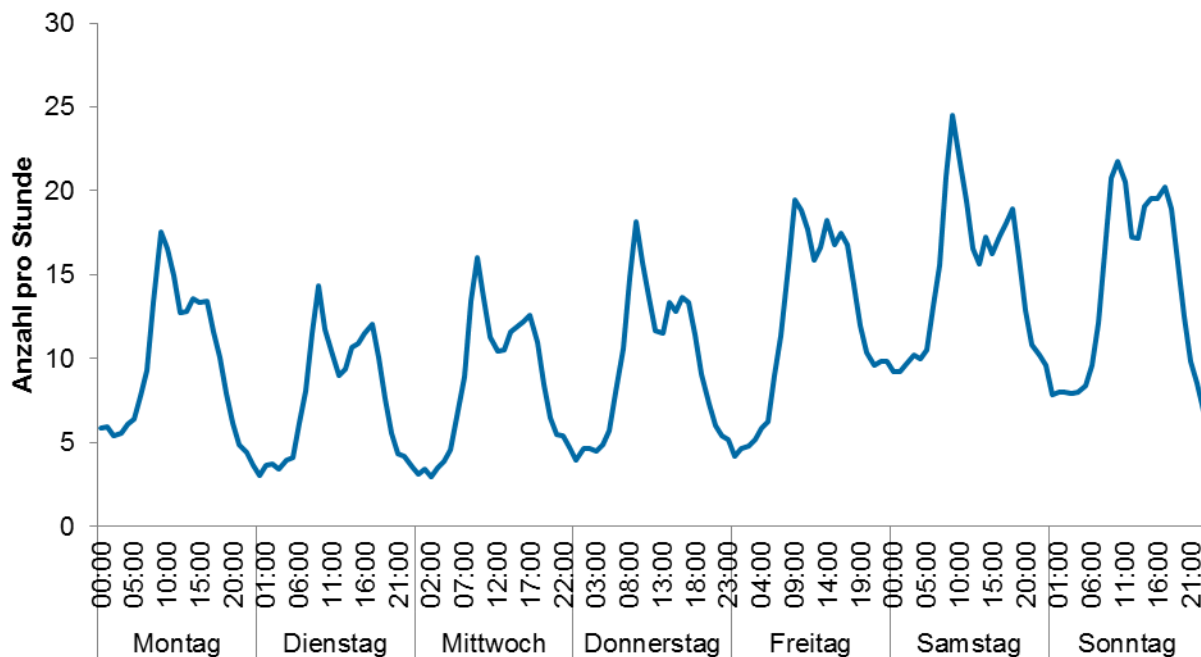
²⁰ Eine Prüfung und Bewertung der Umsetzbarkeit des Antriebskonzeptes und der Anpassungsbedarfe der Verkehrsinfrastruktur wird in der vorliegenden Studie nicht durchgeführt.

Abbildung 5-1: Durchschnittliche Verkehrsmenge der LKW > 3,5 t zGG mit Anhänger und Sattelzüge auf Bundesautobahnen



Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis von Fitschen (2013)

Abbildung 5-2: Durchschnittliche Verkehrsmenge der Busse auf Bundesautobahnen



Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis von Fitschen (2013)

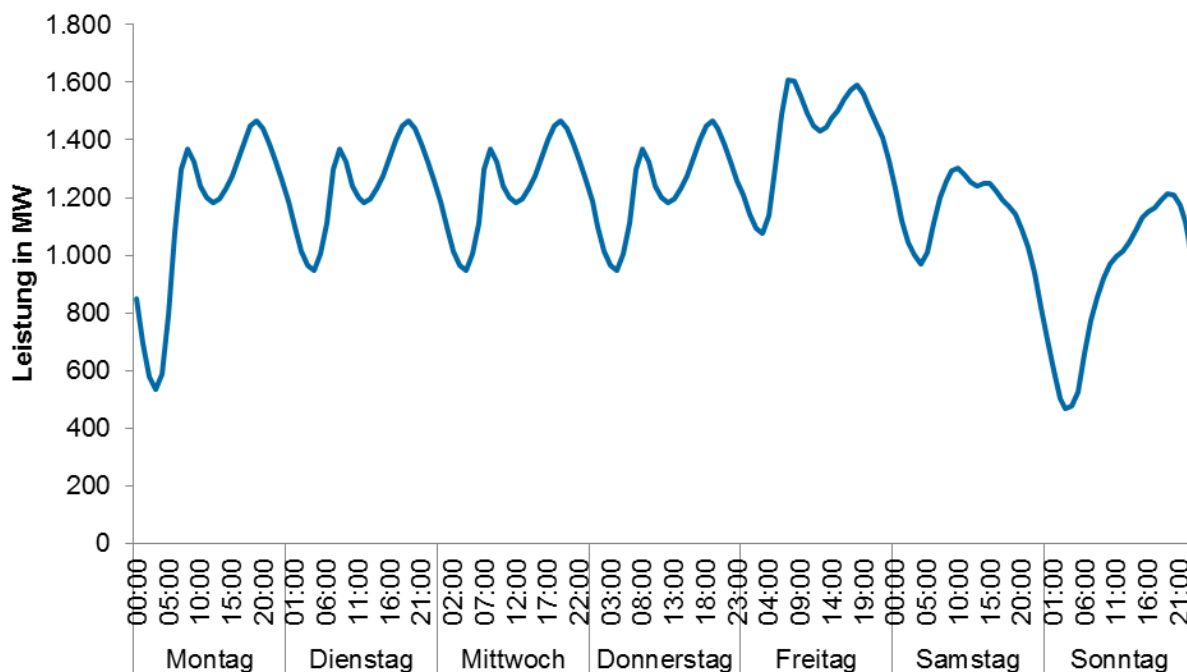
5.2.6. Lastkurve Schienenverkehr

Die Stromnachfrage des Schienenverkehrs wird im Rahmen des Vorhabens *eMobil 2050* erstmalig explizit im Strommarktmodell *PowerFlex* abgebildet. Dies ermöglicht es auch Veränderungen in der Verkehrsleistung und der Energieeffizienz des elektrischen Schienenverkehrs über den Zeitraum bis 2050 modellseitig darzustellen. Da das Modell stundenscharf aufgelöst ist, ist es notwendig, die Veränderung der Strombedarfe durch den elektrisch betriebenen Schienenverkehr in den Szenarien bis 2050 ebenfalls stundenscharf darzustellen. Dafür wird in der vorliegenden Studie auf ein Beispiel für eine Leistungsprognose der DB Energie GmbH aus Gerhardt et al. (2011) zurückgegriffen.

Die Leistungsprognose stellt die Stromnachfrage für den Zeitraum von Freitag bis Montag dar. Ausgehend von der Annahme, dass die Stromnachfrage an Werktagen durch die Stromnachfrage am Montag näherungsweise beschrieben werden kann, wurde das in Abbildung 5-3 dargestellte Nachfrageprofil für eine Durchschnittswoche hergeleitet und für die Nutzung in *PowerFlex* für alle Wochen des Jahres repliziert. Jahreszeitliche Unterschiede werden somit nicht berücksichtigt.

Der gesamte, auf Basis dieser Kurve bestimmte elektrische Energieverbrauch im Jahr 2010 liegt mit 10,56 TWh lediglich 1,3 % über dem aus dem *TREMOT*-Modell hervorgehenden Gesamtverbrauch von 10,43 TWh. Die stündlichen Verbrauchswerte wurden deshalb skaliert, so dass der Gesamtverbrauch mit *TREMOT* übereinstimmt. Die durch das *TEMPS*-Modell ermittelten Strombedarfe des elektrischen Schienenverkehrs wurden auf Basis der ermittelten Verteilung der Stromnachfrage für die verschiedenen Modellierungsjahre stundenscharf aufgelöst und in das *PowerFlex*-Modell eingespeist.

Abbildung 5-3: Lastprofil des Schienenverkehrs



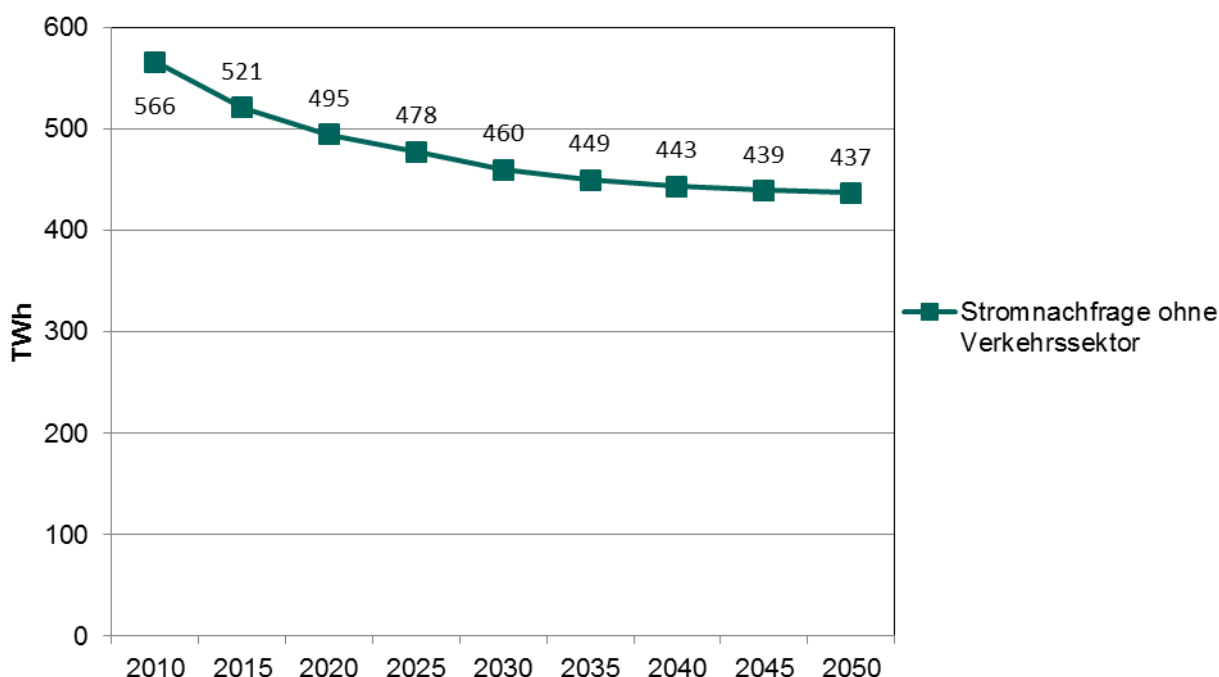
Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis von Gerhardt et al. (2011)

5.3. Annahmen und Rahmenbedingungen im Stromsektor

Die Modellierung des Stromsektors für *eMobil 2050* ist angelehnt an die Randbedingungen und Annahmen, welche im Rahmen des Projekts *Klimaschutzszenario 2050* für das BMUB (Repenning et al. 2014) erstellt wurden. Im Rahmen des letztgenannten Projekts wurden umfangreiche Rechnungen mit verschiedenen Modellen durchgeführt, um die Entwicklung der Energienachfrage und der Emissionen in verschiedenen Sektoren bis zum Jahr 2050 zu projizieren. Für den Stromsektor wurden mit den Modellen *Elias*²¹ und *PowerFlex* des Öko-Instituts der Kraftwerkspark und der resultierende Energieträgermix der Stromerzeugung für unterschiedliche Szenarien entwickelt.

Das Szenario zur Entwicklung des Kraftwerkspark bis zum Jahr 2050, welches die Basis für die energiewirtschaftlichen Betrachtungen in *eMobil 2050* darstellt, setzt für den fossilen Kraftwerkspark auf dem Szenario KS80 aus dem Projekt *Klimaschutzszenario 2050* auf, welches sektorübergreifend eine Treibhausgasemissionsreduktion um 80 % gegenüber 1990 als Ziel setzt. Der Ausbau der Kapazitäten erneuerbarer Energien bis 2050 orientiert sich an der BMU Leiststudie.

Abbildung 5-4: Entwicklung der Stromnachfrage ohne Verkehrssektor



Quelle: Repenning et al. (2014), eigene Darstellung

Abbildung 5-4 zeigt die Entwicklung der Stromnachfrage aller Sektoren ohne die Nachfrage aus dem Verkehrssektor für die Periode 2010 bis 2050. Die Entwicklung der Stromnachfrage des Verkehrssektors wird anhand der Szenarien *Grenzenlos eMobil* und *Regional eMobil* bestimmt. Die Entwicklung der Gesamtstromnachfrage ergibt sich aus der Kombination der szenariospezifischen Nachfrage aus dem Verkehr und der Nachfrage der sonstigen Sektoren. Die

²¹ ELIAS ist das Kraftwerksinvestitionsmodell des Öko-Instituts

Auswirkungen der zunehmenden Stromnachfrage auf die Stromerzeugung werden in den nachfolgenden Abschnitten anhand der oben genannten Szenarien für den Verkehr diskutiert.

Der konventionelle Kraftwerkspark, welcher den Berechnungen in diesem Projekt zugrunde liegt, basiert auf Repenning et al. (2014). Ausgehend von der tatsächlich installierten Leistung an konventioneller Kraftwerkskapazität in Deutschland im Jahr 2012 wurde die Entwicklung dieser Leistung unter Berücksichtigung der Nachfrage und der verfügbaren Leistung aus erneuerbaren Energiequellen modelliert. Es wird davon ausgegangen, dass diejenigen Kraftwerke, die sich bereits in einem fortgeschrittenen Planungs- oder Baustadium befinden, auch tatsächlich gebaut werden, unabhängig davon, welche Politiken und Maßnahmen umgesetzt werden. Insgesamt werden so bis 2016 13 GW an neuer konventioneller Kraftwerkskapazität zugebaut (Tabelle 5-3). Darüber hinaus kommen bis 2050 nur etwa 200 MW an weiterer konventioneller Kapazität hinzu, vornehmlich im Bereich KWK. Tabelle 5-4 zeigt die installierten Leistungen des konventionellen Kraftwerksparks in den Jahren 2030 und 2050 aus Repenning et al. (2014), welcher auch den folgenden Modellrechnungen zugrunde liegt. Die installierte Leistung konventioneller Kraftwerke sinkt demnach bis zum Jahr 2050 auf 15,7 GW.

Die installierte Leistung aus erneuerbaren Energien wurde aus der BMU Leitstudie 2011 (Szenario A) übernommen (Tabelle 5-5)²² (Nitsch et al. 2012). Dieser EE-Ausbau stellt die Basisvariante für die folgenden Betrachtungen dar. Um die höhere Stromnachfrage aus dem Verkehrssektor in eMobil 2050 ohne zusätzliche CO₂-Emissionen zu decken, wird in Abschnitt 5.4.5 untersucht, welche zusätzlichen Installationen von erneuerbaren Erzeugungskapazitäten dafür benötigt werden.

Stromimporte (sowohl aus konventionellen als auch aus erneuerbaren Quellen) werden wie in Repenning et al. (2014) aus Ergebnissen des PowerACE-Modells²³ übernommen. Aufgrund der physikalischen Eigenschaften des Stroms ist eine Aufteilung in konventionellen und erneuerbaren Strom nicht möglich. Es wird davon ausgegangen, dass 2030 5 %, 2040 10 % und 2050 15 % des deutschen Strombedarfs aus Importen bestehen dürfen. Die absolute Höhe der Importe ist demnach abhängig von der Höhe des Strombedarfs in den Szenarien.

Tabelle 5-3: Kumulierte elektrische Nettoleistung von Kraftwerken, die sich in Planung bzw. Bau befinden

	2012	2013	2014	2015	2016
	GW				
Summe	3,2	9,3	10,9	11,9	13,2
Braunkohle	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7
Steinkohle	0,0	4,4	6,0	6,9	6,9
Erdgas	0,3	1,5	1,5	1,7	1,7
Erdgas - KWK klein (30 MW)	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1
Erdgas - KWK mittel (100 MW)	0,1	0,4	0,4	0,4	0,4
Erdgas - KWK groß (400 MW)	0,0	0,0	0,0	0,0	1,3
Erdgas - Gasturbine	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1

Quelle: Zusammenstellung und Annahmen des Öko-Instituts, Repenning et al. (2014)

²² Die einzige Ausnahme bildet die installierte Leistung von Photovoltaik im Jahr 2015, die auf Basis jüngster Hochrechnungen nach oben korrigiert wurde.

²³ PowerAce ist ein agentenbasiertes Modell zur Simulation des europaweiten Strommarkts, das am Fraunhofer ISI eingesetzt wird

Tabelle 5-4: Installierte Leistungen fossiler Kraftwerke in 2030 und 2050

	2030	2050
	GW	
Summe	40,79	15,70
Braunkohle	12,07	6,89
Steinkohle	11,98	7,07
Erdgas - keine KWK	1,77	1,69
Erdgas - KWK	14,98	0,05

Quelle: Eigene Darstellung, basierend auf Repenning et al. (2014)

Tabelle 5-5: Installierte Nettoleistung erneuerbarer Energien

	2010	2020	2030	2040	2050
	GW				
Wasserkraft	4,3	4,6	4,9	5,0	5,1
Windenergie	27,0	48,7	66,8	77,0	82,3
Onshore	26,9	38,8	43,5	47,7	50,5
Offshore	0,1	9,9	23,4	29,3	31,8
Fotovoltaik	17,3	53,5	61,0	63,3	67,2
Biomasse	5,8	8,2	9,2	9,5	9,5
Biogas, Klärgas u.ä.	2,8	3,5	3,9	4,1	4,1
Feste Biomasse	1,9	3,3	3,9	3,9	3,9
Biogener Abfall	1,1	1,4	1,4	1,4	1,4
Erdwärme	0,0	0,2	0,6	1,2	1,9
EU-Stromverbund	0,0	0,3	3,6	8,1	10,4
Solarthermische KW	0,0	0,0	1,2	5,2	6,6
Wind, andere EE	0,0	0,3	2,4	3,0	3,9

Quelle: Nitsch et al. (2012), Öko-Institut

Tabelle 5-6: Entwicklung der Brennstoffpreise und des Preises für CO₂

		2020	2030	2040	2050
Braunkohle	€/GJ	1,7	1,9	2,8	2,8
Steinkohle	€/GJ	3,6	3,8	4,0	4,3
Erdgas	€/GJ	10,1	11,4	12,3	13,2
CO ₂	€(2010)/EUA	30	50	90	130

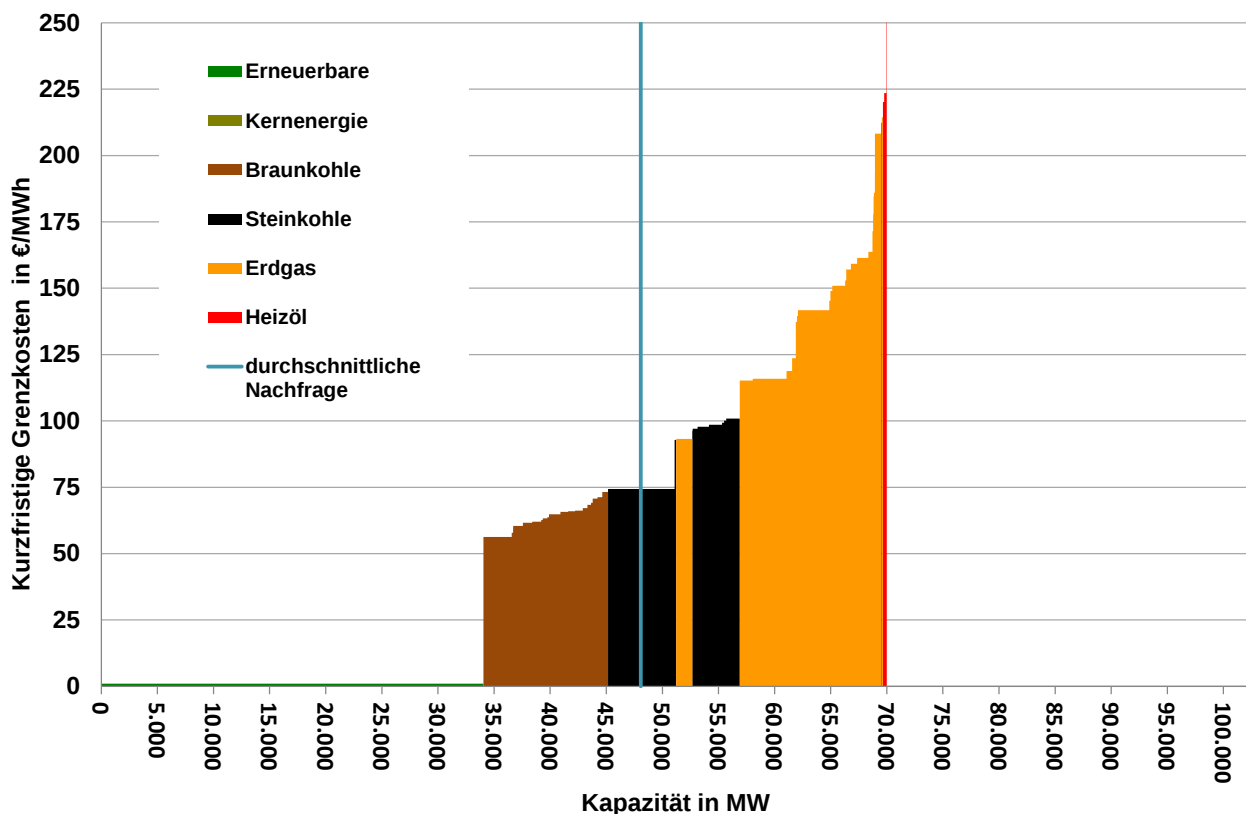
Quelle: Repenning et al. (2014)

Für die Emissionen des fossilen Kraftwerksparks ist von Bedeutung, welche der verfügbaren Kraftwerke zum Einsatz kommen. Dies ist abhängig von der Merit Order (siehe Modellbeschreibung in Abschnitt 1.3.2). Die signifikanten Änderungen des Kraftwerksparks bis 2050 (siehe Tabelle 5-4) führen zusammen mit der Entwicklung der Brennstoffpreise und des CO₂-Preises (Tabelle 5-6) dazu, dass sich die Relation der kurzfristigen Grenzkosten der fossilen Kraftwerke zueinander bis zum Jahr 2050 signifikant verändert. Ein Vergleich von Abbildung 5-5 und Abbildung 5-6 zeigt, dass sich dadurch die Reihenfolge der Kraftwerke in der Merit Order in diesem Zeitraum verändert. Im Jahr 2030 zeigen Braunkohlekraftwerke entsprechend der heutigen

Situation die geringsten Grenzkosten auf, gefolgt von Steinkohlekraftwerken und Gaskraftwerken. In Abbildung 5-5 ist jedoch bereits zu erkennen, dass steigende Preise für Brennstoffe und CO₂ dazu führen, dass bereits im Jahr 2030 mehrere Gaskraftwerke zu niedrigeren Grenzkosten anbieten können als Steinkohlekraftwerke.

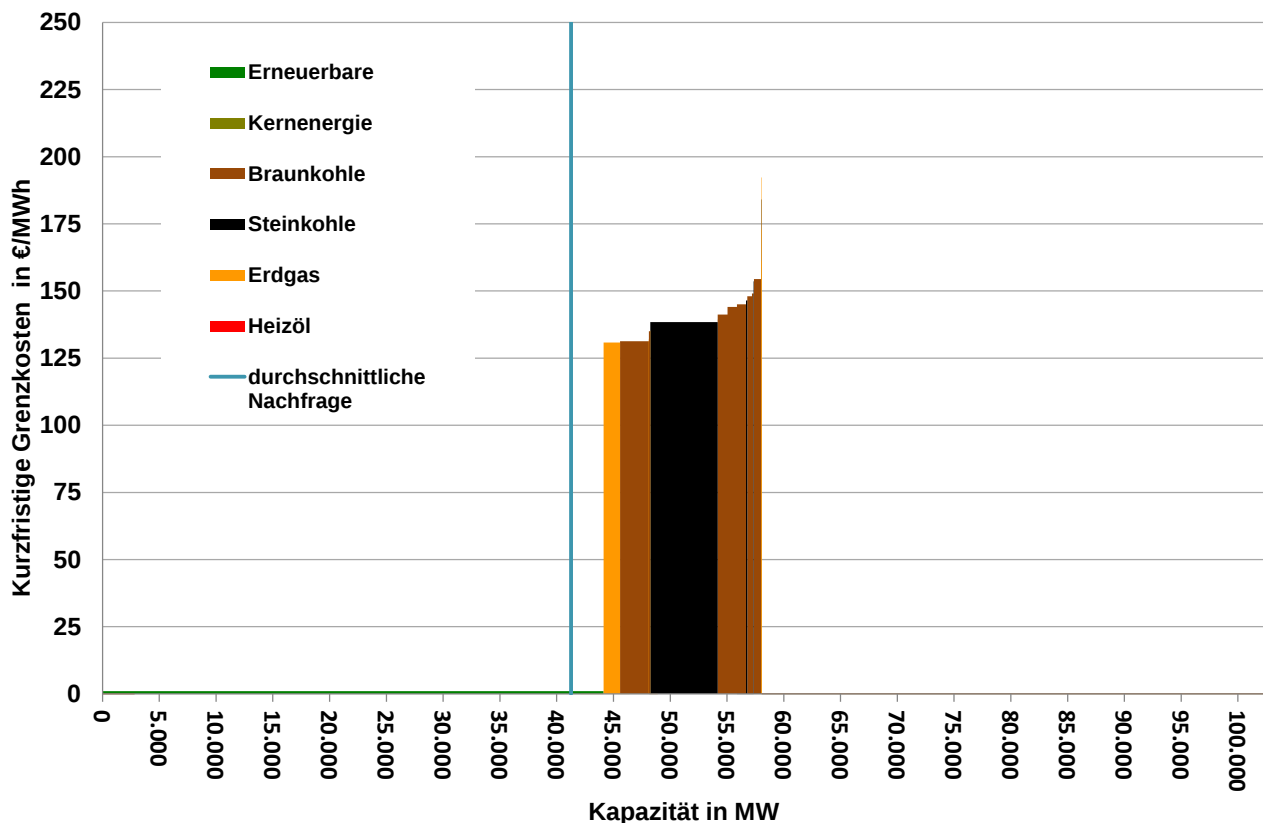
Im Jahr 2050 zeigt sich dann eine deutliche Verschiebung der kurzfristigen Grenzkosten der einzelnen Kraftwerke untereinander. Während bei einer durchschnittlichen Stromnachfrage im Jahr 2030 sämtliche Braunkohlekraftwerke laufen und eine erhöhte Stromnachfrage meist zum Einsatz zusätzlicher Gaskraftwerke führt, stellt sich die Situation im Jahr 2050 etwas anders dar. Im Jahr 2050 kann die durchschnittliche Nachfrage durch erneuerbare Energien gedeckt werden. Ist die Nachfrage im Jahr 2050 jedoch höher, so kommen zunächst Gaskraftwerke zum Einsatz. Diese befinden sich nun mehrheitlich am Beginn der Merit Order, während Steinkohle- und Braunkohleanlagen je nach Alter, Wirkungsgrad und Emissionsfaktor in unterschiedlicher Reihung dahinter vertreten sind und bei entsprechender Stromnachfrage ebenfalls zum Einsatz kommen. Diese Verschiebung im Einsatz der Kraftwerke zur Deckung der Stromnachfrage führt dazu, dass die resultierenden Emissionen in den einzelnen Modellläufen in Abschnitt 5.4 stark davon beeinflusst werden, wie groß das Dargebot an erneuerbaren Energien in den jeweiligen Stunden des Jahres ist und wieviel der Stromnachfrage jeweils durch fossile Kraftwerke gedeckt werden muss. Anders als in früheren Modelljahren ist im Jahr 2050 die Einsatzreihenfolge der fossilen Kraftwerke stark durch die sich ändernden Brennstoffpreise und den CO₂-Preis beeinflusst.

Abbildung 5-5: Merit Order des fossilen Kraftwerksparks in 2030



Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 5-6: Merit Order des fossilen Kraftwerksparks in 2050



Quelle: Eigene Berechnungen

5.4. Auswirkungen des elektrischen Verkehrs auf die Stromerzeugung

5.4.1. Einleitung und Methodik

Dieser Abschnitt beschreibt die Auswirkungen der für die Szenarien *Grenzenlos eMobil* und *Regional eMobil* angenommenen Stromnachfrage aus dem Verkehrssektor auf die Stromerzeugung und den dafür erforderlichen Kraftwerkspark. Dabei wird untersucht, inwiefern der zugrunde gelegte Kraftwerkspark den steigenden Strommengen des Verkehrs gerecht werden kann, und notwendige Ausbaumaßnahmen, vor allem im Bereich der erneuerbaren Energien, werden quantifiziert.

Hierzu werden für die Jahre 2030 und 2050 exemplarisch der Erzeugungsmix für die Stromerzeugung für den Verkehr sowie die Stromerzeugung insgesamt für ausgewählte Wochen dargestellt und untersucht. Dabei werden folgende Analysen durchgeführt: In Abschnitt 5.4.2 wird die Stromnachfrage im Jahr 2030 für die Szenarien *Grenzenlos eMobil* und *Regional eMobil* dargestellt, Abschnitt 5.4.3 zeigt die Auswirkungen unterschiedlicher Netzkopplungen und Lademanagement-Optionen für das Jahr 2030. In Abschnitt 5.4.4 wird für beide Szenarien das Jahr 2050 untersucht und Abschnitt 5.4.5 zeigt schließlich den nötigen Ausbaubedarf der erneuerbaren Energien. Darüber hinaus zeigen Sensitivitätsanalysen in Abschnitt 5.5 die Auswirkungen von zusätzlichem Strombedarf durch die Erzeugung strombasierter Kraftstoffe auf den Kraftwerkeinsatz.

Wie bereits in Abschnitt 5.1 diskutiert, wird in diesem Kapitel zur Darstellung der Veränderungen auf Seiten des Stromsektors auf eine Differenzstrombetrachtung zurückgegriffen. Der Begriff Differenzstrom ist dabei folgendermaßen definiert:

Die Begriffe Differenzstrom bzw. Differenzstrommenge bezeichnen im Folgenden die Differenz zwischen der Stromerzeugung eines Modelllaufs ohne jegliche Stromnachfrage aus dem Verkehr, (Vergleichslauf) und eines Laufs unter der Berücksichtigung aller stromnachfragender Sektoren inklusive des Verkehrs. Die Stromnachfrage des Verkehrssektors beinhaltet dabei sowohl die im Modell inflexible und teilweise heute bereits bestehende Stromnachfrage von oberleitungsgebundenen Schienen- und Straßenfahrzeugen als auch die flexible und in den Szenarien zunehmen an Bedeutung gewinnende Stromnachfrage der Elektrofahrzeuge (mit elektrochemischer Stromspeicherung) im Rahmen des Lastmanagements.

In den Analysen in Abschnitt 5.5 umfasst die Differenzstrommenge zusätzlich zu elektrischem Verkehr auch den weiteren Strombedarf für die Herstellung von strombasierten Kraftstoffen.

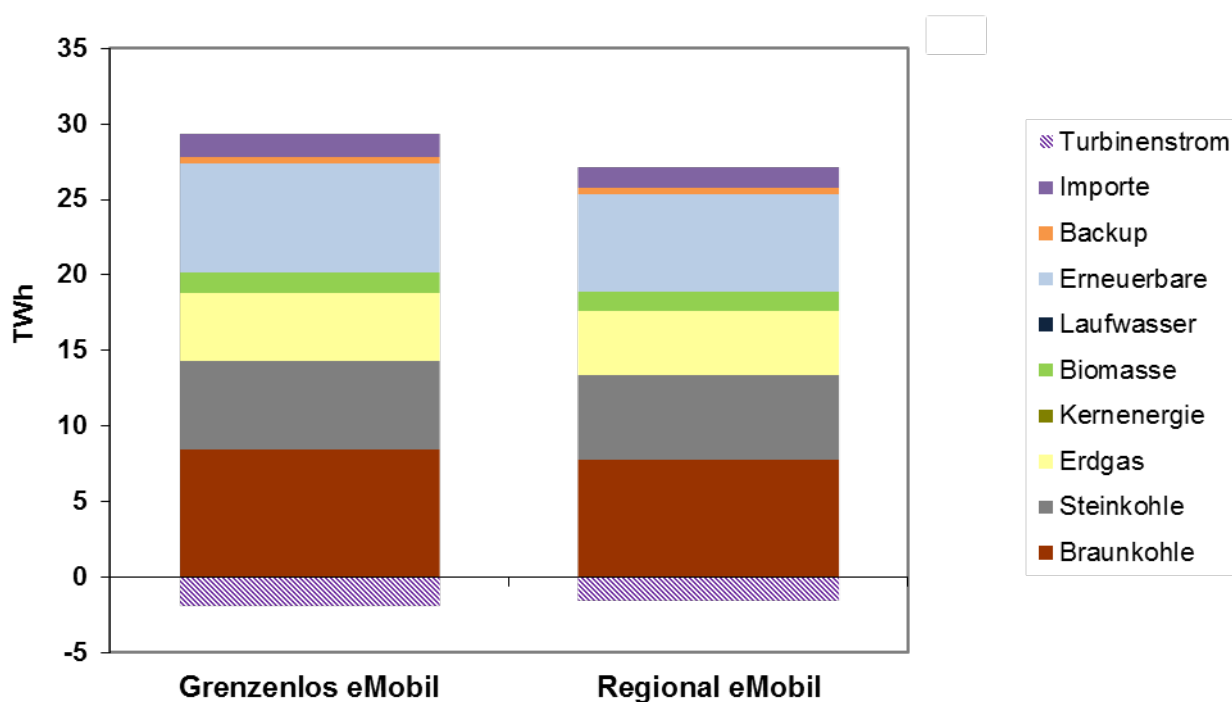
Ferner werden die CO₂-Emissionen der verschiedenen Szenarien berechnet. Dabei werden zunächst die Emissionen, die mit der zusätzlichen Strombereitstellung für den Verkehrssektor – gegenüber dem Vergleichslauf der sonstigen stromnachfragenden Sektoren – verbunden sind ausgewiesen. Im anschließenden Kapitel 6 erfolgt schließlich eine umfassende Diskussion der Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Vergleich der Szenarien. Dabei wird der zunehmenden Wechselwirkungen zwischen der Energienachfrage des Verkehrs und der Stromerzeugung durch eine gesamthafte Betrachtung der Emissionen des Energie- und Verkehrssektors Rechnung getragen.

5.4.2. Stromerzeugung für den Verkehr im Jahr 2030

Abbildung 5-7 zeigt den Brennstoffmix der Differenzstrommenge für 2030 für die beiden Szenarien *Grenzenlos eMobil* und *Regional eMobil* für den gegebenen Kraftwerkspark (siehe Abschnitt 5.3). Wie bereits in Abbildung 4-19 ersichtlich, unterscheidet sich die Stromnachfrage im Jahr 2030 zwischen beiden Szenarien nur wenig. Die Stromnachfrage des Verkehrs inklusive der Ladeverluste der E-Fahrzeuge liegt bei 30 TWh im Szenario *Grenzenlos eMobil* und bei 28 TWh im Szenario *Regional eMobil*.

Im Szenario *Grenzenlos eMobil* tragen bestehende konventionelle Kraftwerke zur Differenzstrommenge mit 8,4 TWh Strom aus Braunkohle und ca. 6 TWh aus Steinkohle bei. Erneuerbare Energien (inkl. Biomasse) erzeugen ca. 8,5 TWh des Differenzstroms. Die zusätzliche Flexibilität, welche durch das Lademanagement der Elektrofahrzeuge dem Stromsystem zur Verfügung gestellt wird, führt zu einer Verringerung des Speicherbedarfs in Pumpspeicherkraftwerken. Die Stromerzeugung aus Backup kennzeichnet diejenigen Stunden, in welchen mit dem bestehenden Kraftwerkspark (konventionell und erneuerbar) die jeweilige Stromnachfrage nicht gedeckt werden kann. Es kommen verschiedene Optionen in Frage, um diese Lücke zu füllen: (i) höhere Speicherkapazitäten, welche helfen, Phasen mit hoher Nachfrage aber geringer EE-Verfügbarkeit zu überbrücken, (ii) zusätzliche Stromimporte aus den Nachbarländern oder (iii) die Installation neuer Erzeugungskapazitäten wie beispielsweise Gasturbinen. Dieser Bericht verzichtet bewusst darauf, eine der Alternativen als die bevorzugte auszuwählen, da es hier zunächst um die generische Eigenschaft einer Backup-Technologie geht, in wenigen Stunden eine vergleichsweise hohe Leistung zur Verfügung stellen zu können. Im Szenario *Grenzenlos eMobil* tritt in 96 Stunden des Jahres eine Deckungslücke auf mit einer Spitzenleistung von 13 GW, wobei die Spitzenleistung nur in ca. 10 Stunden davon erreicht wird. Welches die günstigste Alternative für diese Funktion ist, hängt von den jeweiligen politischen Rahmenbedingungen ebenso wie von technischen Weiterentwicklungen ab.

Abbildung 5-7: Vergleich des Differenzstroms für das Jahr 2030



Quelle: Eigene Darstellung

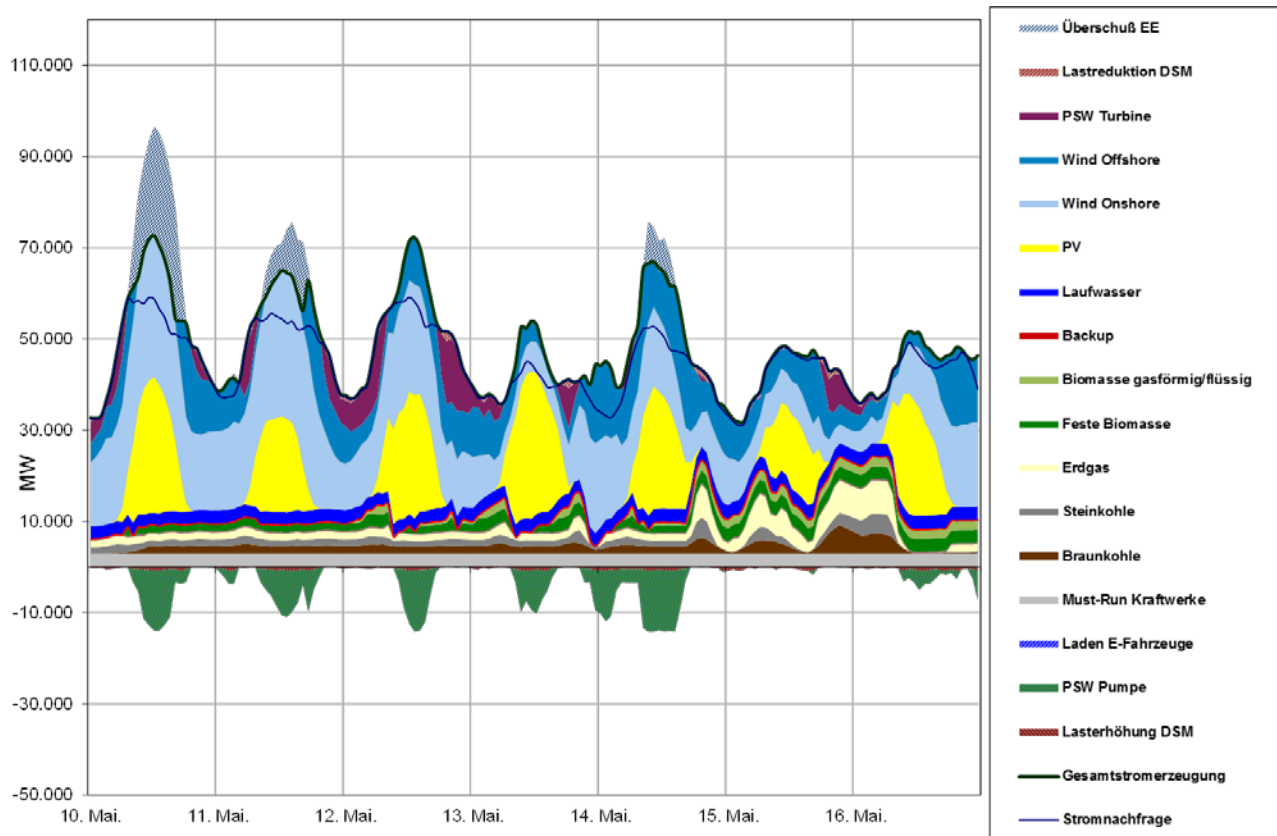
Tabelle 5-7: Vergleich von Brennstoffmix, Emissionen und EE-Überschüssen für die Differenzstromerzeugung im Jahr 2030

	Grenzenlos eMobil	Regional eMobil
	TWh	
Stromerzeugung national	27	25
Braunkohle	8,41	7,77
Steinkohle	5,89	5,58
Erdgas	4,51	4,23
Kernenergie	0,00	0,00
Biomasse	1,36	1,24
Laufwasser	0,00	0,00
Erneuerbare	7,21	6,53
Backup	0,38	0,37
Importe	1,51	1,38
Pumpverluste	0,76	0,62
Turbinenstrom	-1,96	-1,58
Pumpstromverbrauch	2,73	2,20
Differenzstrom	30	28
Emissionen [Mio. t CO ₂]	16,2	16,0
Überschuss EE bez. auf Dargebot	4,2%	4,5%

Quelle: Eigene Berechnungen

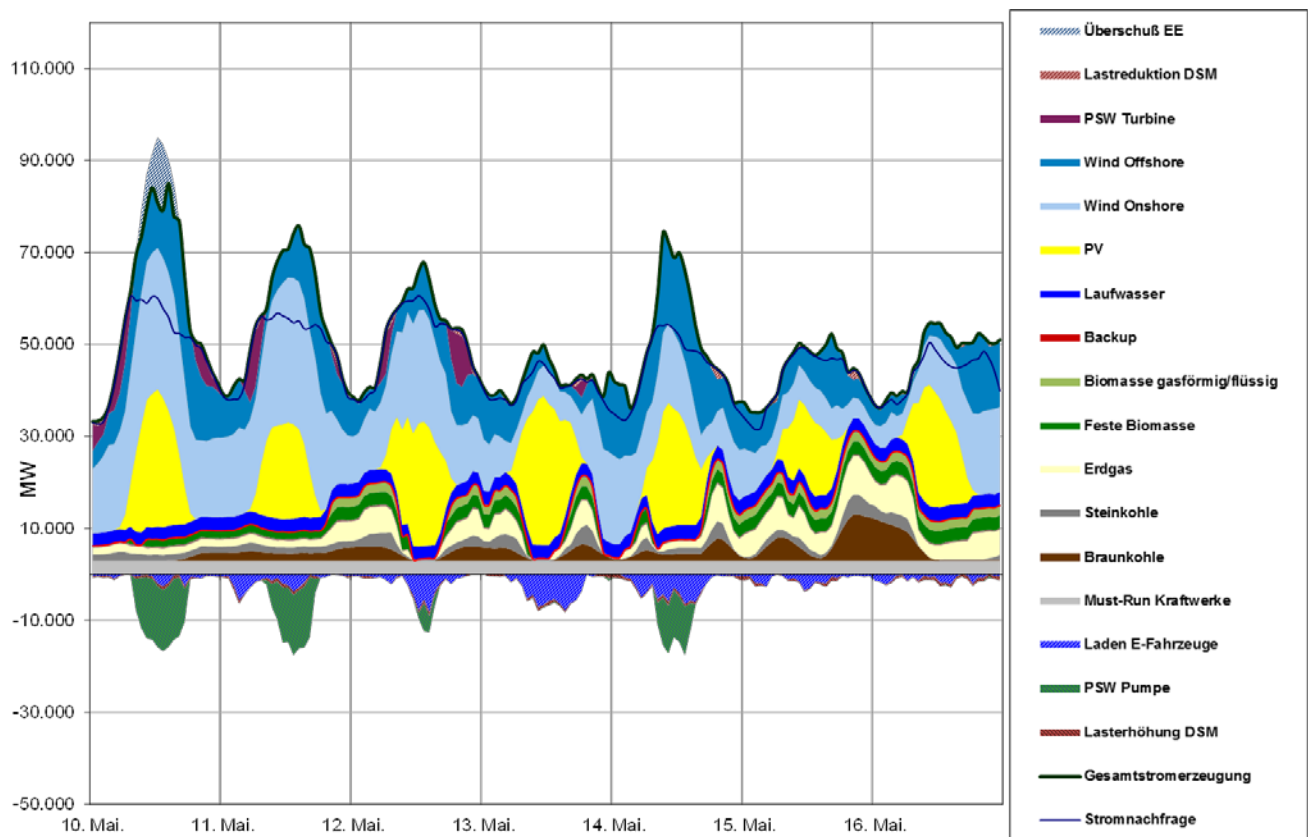
Zur Veranschaulichung des Einflusses der Stromnachfrage aus dem Verkehr gegenüber einem Vergleichslauf ohne elektrischen Verkehr zeigen Abbildung 5-8 und Abbildung 5-9 exemplarisch die Stromerzeugung für eine Maiwoche im Jahr 2030, einmal im Vergleichslauf ohne Stromnachfrage aus dem Verkehr und einmal für das Szenario *Grenzenlos eMobil*. Das Laden der flexiblen E-Fahrzeuge ist auf der negativen Achse in Blau dargestellt. Die inflexible Nachfrage aus dem Verkehr ist dagegen nicht separat dargestellt, sondern in der Stromnachfragekurve enthalten.

Abbildung 5-8: Stromerzeugung für eine Maiwoche im Jahr 2030 im Vergleichslauf ohne Stromnachfrage aus dem Verkehr



Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 5-9: Stromerzeugung für eine Maiwoche im Jahr 2030 im Szenario Grenzenlos eMobil



Quelle: Eigene Berechnungen

Die Berücksichtigung von elektrischem Verkehr führt zu einer leichten Erhöhung der Stromnachfrage. Dies führt dazu, dass in verschiedenen Stunden die thermischen Kraftwerke stärker eingesetzt werden müssen, wenn kein günstigerer erneuerbarer Strom zur Verfügung steht und wegen der Nutzung der E-Fahrzeuge auch keine Möglichkeit besteht, die Ladung zeitlich zu verschieben. Die Nutzung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien steigt ebenfalls an, da sie gemäß der Merit Order in Bezug auf die kurzfristigen Grenzkosten die günstigste Art der Stromerzeugung ist.

Es wird außerdem deutlich, dass die Stromnachfrage der Elektrofahrzeuge es ermöglicht, einen höheren Anteil des Dargebots an erneuerbaren Energien zu integrieren als ohne Elektrofahrzeuge²⁴. Gleichzeitig reduziert sich der Einsatz der Pumpspeicherkraftwerke gegenüber dem Vergleichslauf, wie zum Beispiel in einem Vergleich der Stromerzeugung des 13. und 14. Mai deutlich wird. Die Flexibilität des Stromsystems wird also durch die Elektromobilität erhöht, da das Lademanagement es erlaubt, die Ladezeiten der Fahrzeuge in einem gewissen Rahmen systemdienlich zu steuern. Allerdings, wie zum Beispiel für den 10. Mai in Abbildung 5-9 ersichtlich, reicht die verfügbare Batteriekapazität nicht aus, um in allen Stunden das komplette Dargebot an erneuerbaren Energien zu integrieren, da beispielsweise alle verfügbaren Fahrzeuge entweder bereits vollständig geladen sind oder zum entsprechenden Zeitpunkt fahren. Abschnitt

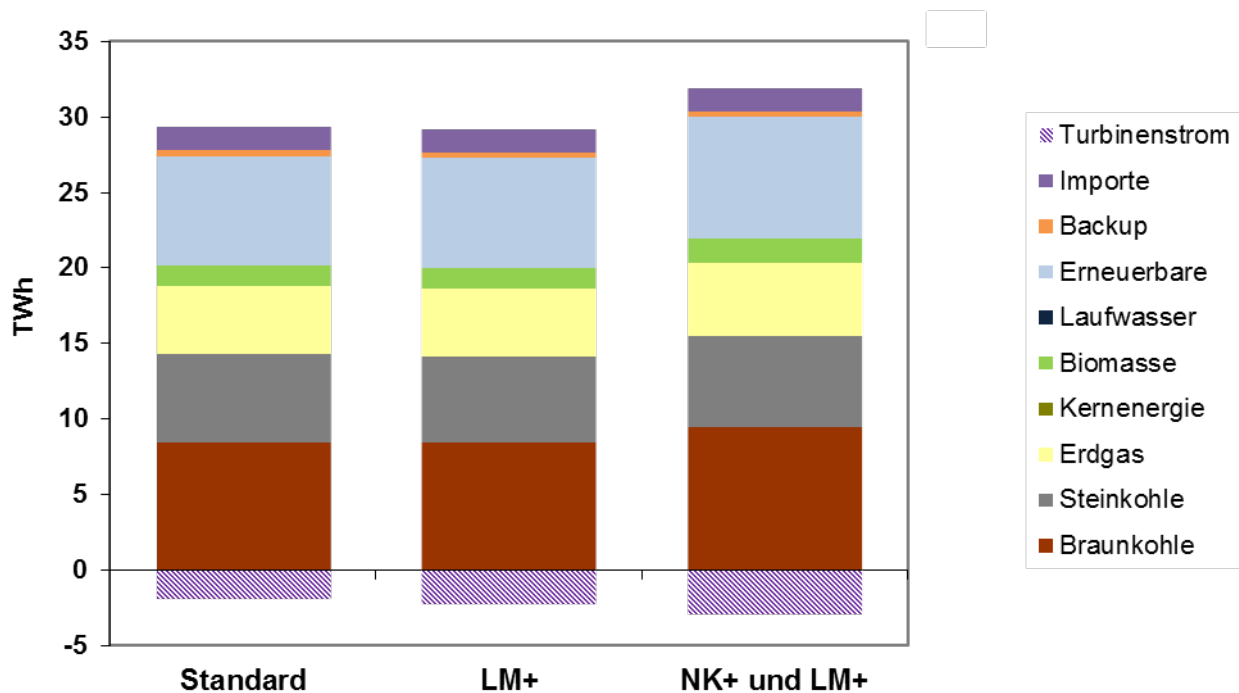
²⁴ Dies kann nur teilweise mit der insgesamt durch die Elektromobilität erhöhten Stromnachfrage erklärt werden, da die Stromnachfrage und die Lademöglichkeiten der Elektrofahrzeuge nicht deckungsgleich mit den Stunden überschüssigen EE-Dargebots sind.

5.2.2 diskutiert das in *PowerFlex* implementierte Lademanagement und mögliche Variationen in der Flexibilität des Nutzerverhaltens. Diese Variationen werden im Folgenden näher beleuchtet.

5.4.3. Variation der Netzkopplung und des Lademanagements

Um abzuschätzen, welchen Einfluss unterschiedliches Ladeverhalten durch die Fahrzeughalter auf die Stromnachfrage des Verkehrs hat, wurden für das Szenario *Grenzenlos eMobil* zwei Sensitivitäten betrachtet, die die Flexibilität des Lademanagements steigern (siehe Abschnitt 5.2.2). Im Standardfall wird vorausgesetzt, dass die Nutzer ihre Fahrzeuge nach Ankunft mindestens so weit aufladen, dass eine Mindestreichweite von 50 km für die nächste Fahrt gegeben ist, und die Netzkopplung, also die Verfügbarkeit von Lademöglichkeiten, gemäß Tabelle 5-1 gegeben ist. Abweichend hiervon wurden zwei Sensitivitäten betrachtet: In der ersten Sensitivität *LM+* („Lademanagement+“) sind die Nutzer flexibler, und haben deshalb keine Mindestladeanforderung, so dass Lastmanagement in stärkerem Ausmaß möglich ist. In der zweiten Sensitivität (*NK+ und LM+*) wird zusätzlich zur höheren Nutzerflexibilität angenommen, dass an allen Standorten zu allen Zeiten eine Netzkopplung besteht²⁵.

Abbildung 5-10: Differenzstrommenge bei unterschiedlichem Ladeverhalten und Netzkopplungshäufigkeiten im Szenario *Grenzenlos eMobil* im Jahr 2030



Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 5-10 zeigt die Ergebnisse für den Brennstoffmix der Differenzstromerzeugung für die unterschiedlichen Sensitivitäten. Es zeigt sich interessanterweise für den Fall *LM+*, dass die Mindestladebedingung kaum Einfluss auf den Kraftwerkseinsatz hat. Zwar wird der Start der Batterieladung von einigen Fahrzeugen durch die Einführung der Mindestladebestimmung vorgezogen und beginnt bereits direkt nach erfolgter Netzkopplung. Die Verschiebung bewegt sich jedoch im Regelfall im Stundenbereich und führt somit nur zu einer sehr geringen Veränderung bei der Art der Strombereitstellung. Die Betrachtung der Turbinenstrommengen (Tabelle 5-8) in der

²⁵ Die Fälle ohne Mindestladebedingung sind in Abbildung 5-10 mit dem Kürzel *LM+* gekennzeichnet.

Differenzbetrachtung mit dem Vergleichslauf zeigt: Je flexibler das Lademanagement wird, desto weniger werden die Pumpspeicherkraftwerke eingesetzt bzw. die verringerte Flexibilität durch die Mindestladebedingung im Standardfall führt zu einer leichten Erhöhung des Pumpspeichereinsatzes. Im Vergleichslauf ohne elektrischen Verkehr, welcher die Grundlage für die Ermittlung der Differenzstrommengen bildet, werden die Pumpspeicher stärker eingesetzt als in den Elektromobilitätsszenarien, in welchen die Fahrzeuge dem System als zusätzliche Flexibilitätsoption zur Verfügung stehen. Im Fall mit erhöhter Flexibilität der Fahrzeuge erfolgt ein noch geringerer Einsatz der Pumpspeicherkraftwerke, entsprechend also eine noch höhere Differenz zum Vergleichslauf.

Für die Sensitivität *NK+* und *LM+* wird deutlich, dass die verbesserte Verfügbarkeit der Ladeinfrastruktur auch insgesamt zu einer höheren Stromnachfrage durch den Verkehrssektor führt. Dies liegt daran, dass PHEV und REEV in diesem Fall häufiger ihre Batterien laden und damit einen höheren elektrischen Fahranteil erzielen können (Anstieg von ca. 9,6 TWh auf ca. 12,6 TWh) und entsprechend weniger konventionellen Kraftstoff verbrauchen. Der Überschuss an erneuerbaren Energien bezogen auf das Dargebot sinkt leicht von 4,2 % im Standardfall auf 3,9 % für den Fall *NK+* und *LM+*, es kann also durch die flexibleren Lademöglichkeiten mehr Strom aus erneuerbaren Energiequellen integriert werden (Tabelle 5-8).

Die zusätzliche Flexibilität durch zusätzliches Lastmanagement und zusätzliche Netzkopplung führt dazu, dass der Emissionsfaktor des Differenzstroms leicht von 539 auf 531 g_{CO2}/kWh sinkt. Dabei führt die höhere Flexibilität der Beladung der Elektrofahrzeuge dazu, dass Spitzen in der Erzeugung aus erneuerbaren Energiequellen besser integriert werden können und führt somit insgesamt zu geringeren EE-Überschüssen.

Tabelle 5-8: Vergleich von Brennstoffmix, Emissionen und EE-Überschüssen für die Differenzstromerzeugung mit unterschiedlichen Netzkopplungen im Szenario *Grenzenlos eMobil* im Jahr 2030

	Standard	LM+ TWh	NK+ und LM+
Stromerzeugung national	27	27	30
<i>Braunkohle</i>	8,41	8,43	9,42
<i>Steinkohle</i>	5,89	5,66	6,06
<i>Erdgas</i>	4,51	4,49	4,84
<i>Kernenergie</i>	0,00	0,00	0,00
<i>Biomasse</i>	1,36	1,39	1,62
<i>Laufwasser</i>	0,00	0,00	0,00
<i>Erneuerbare</i>	7,21	7,32	8,01
Backup	0,38	0,36	0,38
Importe	1,51	1,51	1,51
Pumpverluste	0,76	0,88	1,13
<i>Turbinenstrom</i>	-1,96	-2,28	-3,00
<i>Pumpstromverbrauch</i>	2,73	3,15	4,13
Differenzstrom	30	30	33
Emissionen [Mio. t CO ₂]	16,2	16,0	17,5
Überschuss EE bez. auf Dargebot	4,2%	4,2%	3,9%

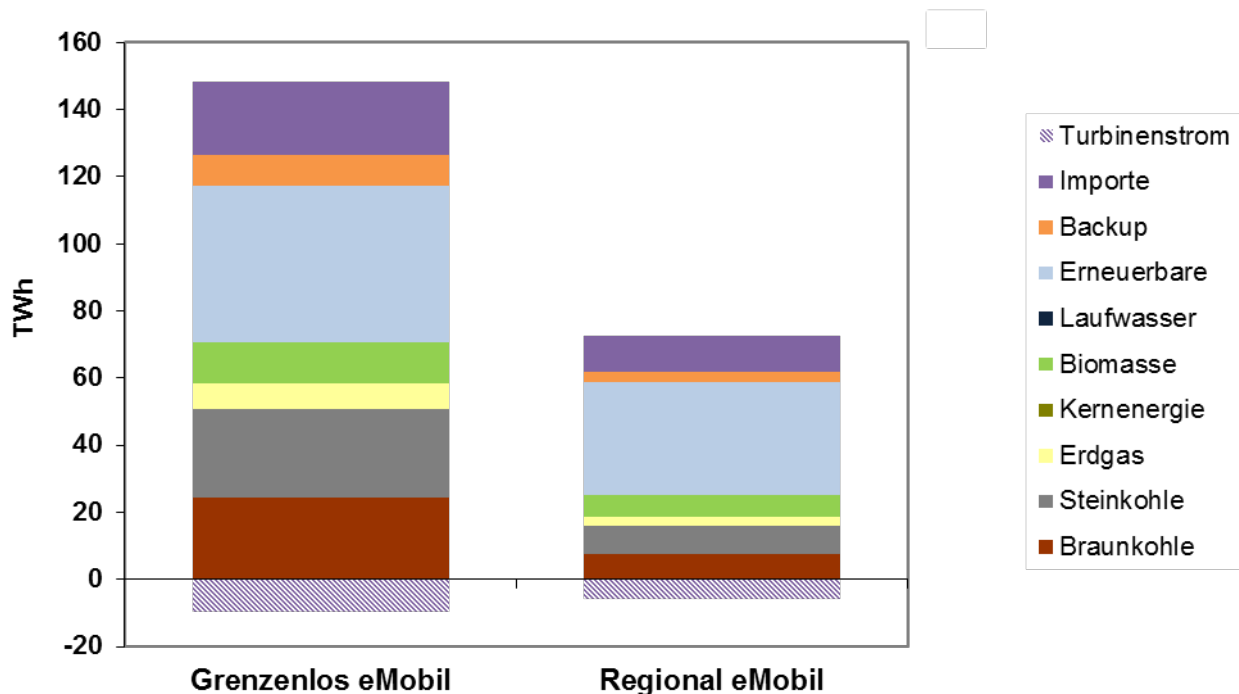
Quelle: Eigene Berechnungen

5.4.4. Stromerzeugung für den Verkehr im Jahr 2050

Zwischen den Jahren 2030 und 2050 wächst die Stromnachfrage des Verkehrs signifikant an, vor allem im Szenario *Grenzenlos eMobil* von ca. 30 TWh auf 152 TWh (s. auch Abbildung 4-19). Da die Stromnachfrage der anderen Sektoren im Jahr 2050 437 TWh beträgt, beläuft sich die Nachfrage aus dem Verkehrssektor also auf über ein Viertel der Gesamtstromnachfrage. Dies führt dazu, dass die im Jahr 2050 noch bestehenden fossilen Kraftwerke in diesem Szenario einen signifikanten Beitrag zur Differenzstromerzeugung leisten müssen, damit die Nachfrage des Verkehrssektors gedeckt werden kann, da das Dargebot an erneuerbaren Energien nicht ausreicht, um die Differenzstrommenge vollständig aus erneuerbaren Quellen zu erzeugen (Abbildung 5-11). Tabelle 5-9 zeigt, dass die verfügbare Erzeugung aus erneuerbaren Energiequellen nahezu vollständig integriert wird und deutet darauf hin, dass ein stärkerer Ausbau vor allem von Windkraft und Solarenergie auch zu einem höheren Anteil dieser Energiequellen am Differenzstrommix führen würde. Die Anzahl der Stunden, in welchen der vorhandene Kraftwerkspark nicht ausreichend Strom produziert, steigt gegenüber 2030 deutlich an und damit auch die Stromerzeugung durch das generische Backup-Kraftwerk²⁶.

Im Szenario *Regional eMobil* ist aufgrund der geringeren Verkehrsnachfrage (Rückgang des MIV, Regionalisierung der Wirtschaftskreisläufe) sowie des Verzichts auf Oberleitungs-Lkw die Stromnachfrage mit 75 TWh deutlich geringer als im Szenario *Grenzenlos eMobil*. Entsprechend niedriger sind auch der Einsatz fossiler Kraftwerke und der Emissionsfaktor des Differenzstroms. Auch der Einsatz des Backup-Kraftwerks unterscheidet sich zwischen beiden Szenarien deutlich (9 TWh versus 3 TWh).

Abbildung 5-11: Vergleich der Differenzstrommengen für das Jahr 2050



Quelle: Eigene Darstellung

²⁶ Für Erklärungen zum generischen Backup-Kraftwerk, siehe Abschnitt 5.4.2.

Tabelle 5-9: Vergleich von Brennstoffmix, Emissionen und EE-Überschüssen für die Differenzstromerzeugung im Jahr 2050

	Grenzenlos eMobil	Regional eMobil
	TWh	
Stromerzeugung national	117	59
<i>Braunkohle</i>	24,34	7,30
<i>Steinkohle</i>	26,32	8,60
<i>Erdgas</i>	7,77	2,48
<i>Kernenergie</i>	0,00	0,00
<i>Biomasse</i>	12,06	6,55
<i>Laufwasser</i>	0,00	0,00
<i>Erneuerbare</i>	46,87	33,82
Backup	8,97	2,94
Importe	21,81	10,60
Pumpverluste	4,14	2,45
<i>Turbinenstrom</i>	-9,65	-5,77
<i>Pumpstromverbrauch</i>	13,79	8,22
Differenzstrom	152	75
Emissionen [Mio. t CO ₂]	52,0	16,6
Überschuss EE bez. auf Dargebot	0,5%	4,6%

Quelle: Eigene Berechnungen

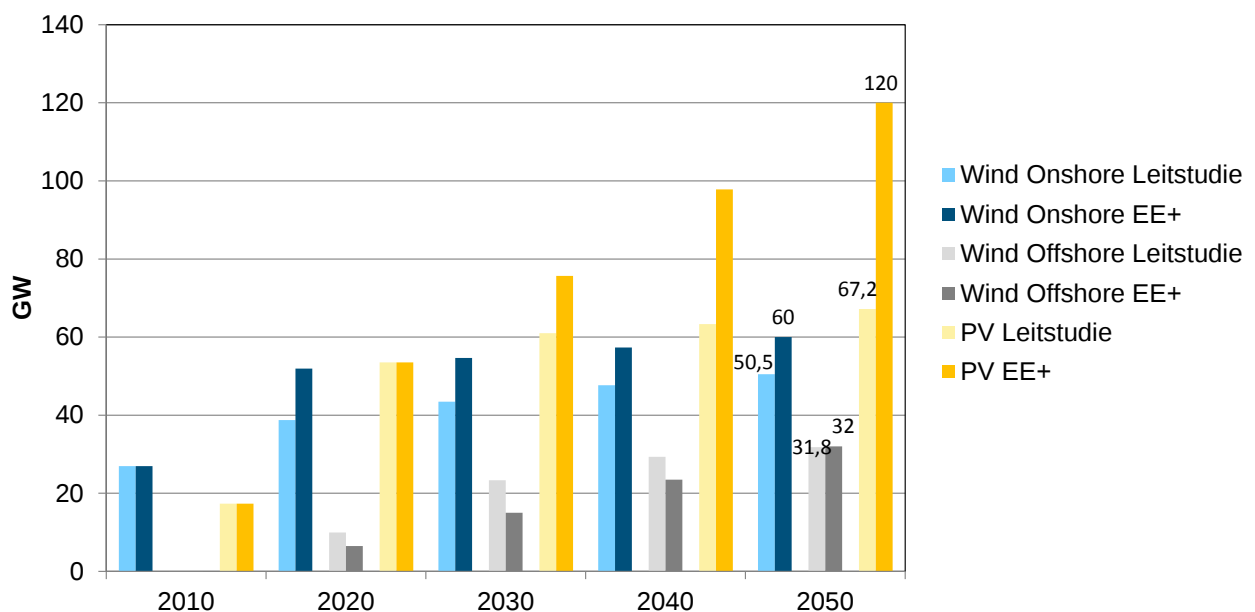
5.4.5. Variation des Ausbaus der erneuerbaren Energien

In beiden Szenarien kommt das generische Backup-Kraftwerk zum Einsatz, im Szenario *Grenzenlos eMobil* sogar mit knapp 9 TWh. Die Aufgabe der Backup-Technologie ist es, Leistung in wenigen Stunden zur Verfügung zu stellen. Die hier auftretende Backup-Stromerzeugung in der Größenordnung von mehreren Terawattstunden zeigt jedoch, dass die zugrunde gelegten fossilen und erneuerbaren Kraftwerke nicht nur in einigen Stunden zu wenig Leistung bereitstellen, sondern auch zu wenig Strom (im Sinne von physikalischer Arbeit) produzieren, um die Stromnachfrage zu decken. Dieser Effekt würde auch bei (noch) stärkerer zeitlicher Flexibilisierung der Nachfrage bestehen bleiben, da solche Maßnahmen die Nachfrage nur verschieben, aber nicht reduzieren. Es sind also zusätzliche Erzeugungskapazitäten notwendig, die einen Großteil der hier zunächst von den Backup-Kraftwerken bereitgestellten Stromproduktion übernehmen. Dies gilt insbesondere für das Szenario *Grenzenlos eMobil*, welches durch eine Kombination von weiter wachsendem Verkehr und starker Marktdurchdringung der Elektromobilität gekennzeichnet ist. Um die Bereitstellung der zusätzlichen Strommengen ohne zusätzliche CO₂-Emissionen zu gewährleisten, ist eine Ausweitung der EE-Kapazitäten notwendig. Im Folgenden wird daher für das Szenario *Grenzenlos eMobil* eine Variation des Ausbaus der erneuerbaren Energien betrachtet.

Die Stromnachfrage aus dem Verkehrssektor führt neben dem Einsatz des Backup-Kraftwerks auch zu einer höheren Auslastung der fossilen Kraftwerke als im Vergleichsfall ohne elektrischen Verkehr. Um einerseits die Lücke in der Stromerzeugung zu schließen, welche durch die ca. 9 TWh des Backup-Kraftwerkes symbolisiert werden, als auch andererseits den nach wie vor hohen Anteil an fossilen Brennstoffen im Erzeugungsmix des Differenzstroms zu reduzieren, wurde die installierte Leistung erneuerbarer Energien für das Jahr 2050 angepasst. Während in den bisherigen Rechnungen die angenommenen Leistungen der erneuerbaren Energiequellen auf der Leitstudie (Nitsch et al. 2012) beruhen, wurde für die weiteren Modellläufe auf Basis verschiedener Studien (Klaus et al. 2010; Lütkehus et al. 2013; 50Hertz Transmission et al. 2013)

und unter Berücksichtigung von politischen Entwicklungen (Deutsche Bundesregierung 2014) ein Szenario *EE+* für den zukünftigen Ausbau von Windenergie und Photovoltaik in Deutschland erstellt (Abbildung 5-12). Gegenüber der Leitstudie wurde hierbei zum Beispiel berücksichtigt, dass im Bereich der Offshore Windenergie die Entwicklung der installierten Leistungen mittlerweile pessimistischer eingeschätzt wird als in den vergangenen Jahren. Auch die Ausbaupfade für Onshore Windenergie und Photovoltaik wurden entsprechend aktueller Kapazitätsentwicklungen angepasst und die vorgeschlagenen Korridore aus Deutsche Bundesregierung (2014) wurden für die Entwicklung bis 2030 berücksichtigt. Darüber hinaus wurden auf Basis der Entwicklungsprognosen der unterschiedlichen Technologien Annahmen für den Ausbau bis zum Jahr 2050 getroffen: die installierten Leistungen für Offshore Windenergie steigen bis auf 32 GW in 2050, die Onshore Windenergie wird bis auf 60 GW ausgebaut. Für die Photovoltaik wird aufgrund der vielfältigen Installationsmöglichkeiten und der im direkten Vergleich nach wie vor hohen Rentabilität eine optimistische Entwicklung bis auf 120 GW installierte Leistung in 2050 angenommen.

Abbildung 5-12: Ausbauszenarien für Wind Onshore, Wind Offshore und Photovoltaik



Quelle: Nitsch et al. (2012); Deutsche Bundesregierung (2014), Eigene Abschätzungen

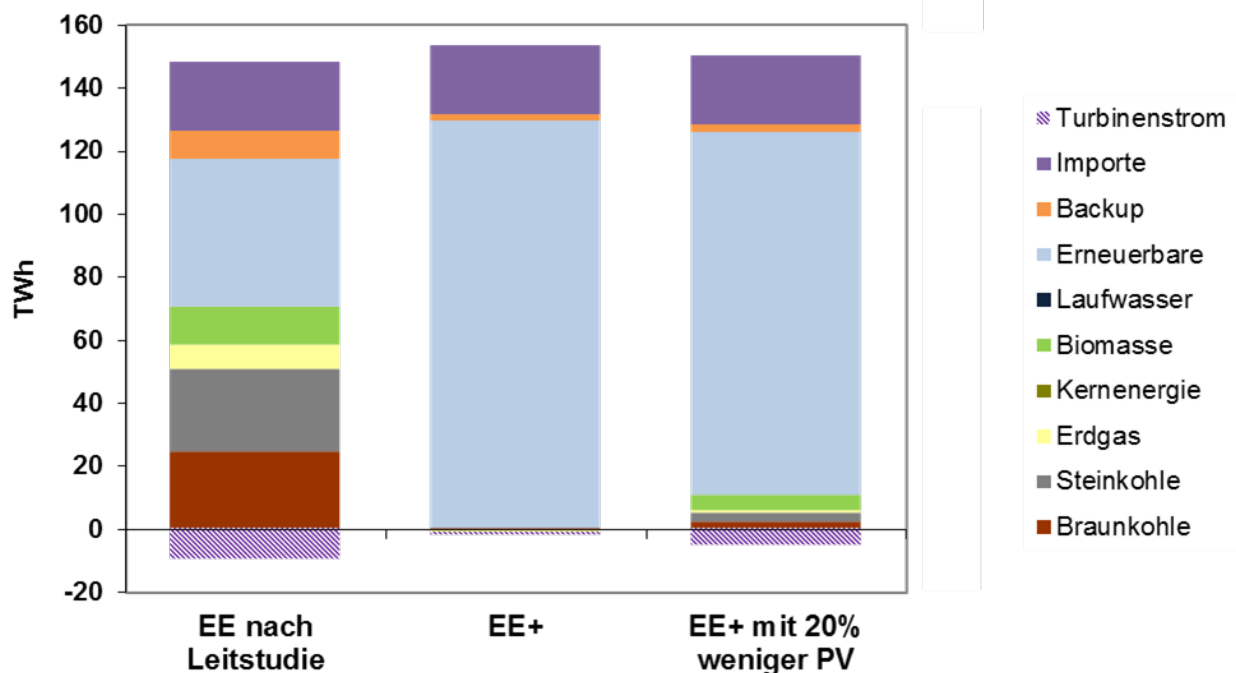
Das Szenario *Grenzenlos eMobil* wurde unter Berücksichtigung der deutlich erweiterten Leistungen für erneuerbare Energien erneut berechnet. Abbildung 5-13 zeigt den Vergleich des Differenzstroms für die beiden EE-Szenarien für das Jahr 2050.

Mit den erweiterten Kapazitäten kann erreicht werden, dass quasi die komplette Differenzstrommenge aus erneuerbaren Energiequellen erzeugt werden kann. Da es weiterhin einige Stunden gibt, in welchen weder die fluktuierenden Energiequellen noch die konventionellen Erzeugungskapazitäten ausreichen, die komplette Stromnachfrage zu decken, besteht weiterhin ein Bedarf für ca. 1,8 TWh Strom aus Importen, aus zu bauenden Gaskraftwerken oder aus Speichern, die im Modell durch das Backup-Kraftwerk repräsentiert werden. Nichtsdestotrotz gibt es ebenso Stunden, in welchen mehr EE-Dargebot zur Verfügung steht als durch sämtliche Verbraucher inklusive Speichern nachgefragt werden kann. Somit entsteht ein EE-Überschuss von

10,3 % bezogen auf das Dargebot (Tabelle 5-10), der beispielsweise für den Export oder zusätzliche Anwendungen zur Verfügung steht.

Aufgrund der Höhe der Überschüsse stellt sich die Frage, ob auch ein geringerer EE-Ausbau als im Szenario *EE+* ausreichen würde, um sicherzustellen, dass die Differenzstrommenge rein erneuerbar bereitgestellt wird. Um zu untersuchen, inwiefern ein verringerter Ausbau der erneuerbaren Energien die Überschussmengen beeinflusst, wurden verschiedene Variationen des EE-Ausbaus untersucht. In Abbildung 5-13 ist beispielhaft dargestellt, wie sich die Differenzstrommenge für einen um 20 % geringeren Ausbau der Photovoltaik darstellen würde. Es wird deutlich, dass in diesem Falle das Ziel, die Differenzstrommenge erneuerbar zu erzeugen, nicht erreicht werden könnte. Tabelle 5-10 zeigt jedoch, dass auch in diesem Falle bereits EE-Überschüsse von 8,8 % bezogen auf das Dargebot entstehen. Da alle weiteren Variationen des EE-Ausbaus einen ähnlichen Effekt zeigten, wurde der Ausbau laut Szenario *EE+* ausgewählt. In Abschnitt 5.4 wird untersucht, inwiefern der verbleibende Überschuss dazu eingesetzt werden kann, um mit Hilfe von Methanisierung strombasierte Kraftstoffe zu erzeugen.

Abbildung 5-13: Vergleich der Differenzstrommenge für das Szenario *Grenzenlos eMobil* für unterschiedliche EE-Szenarien für das Jahr 2050



Quelle: Eigene Darstellung

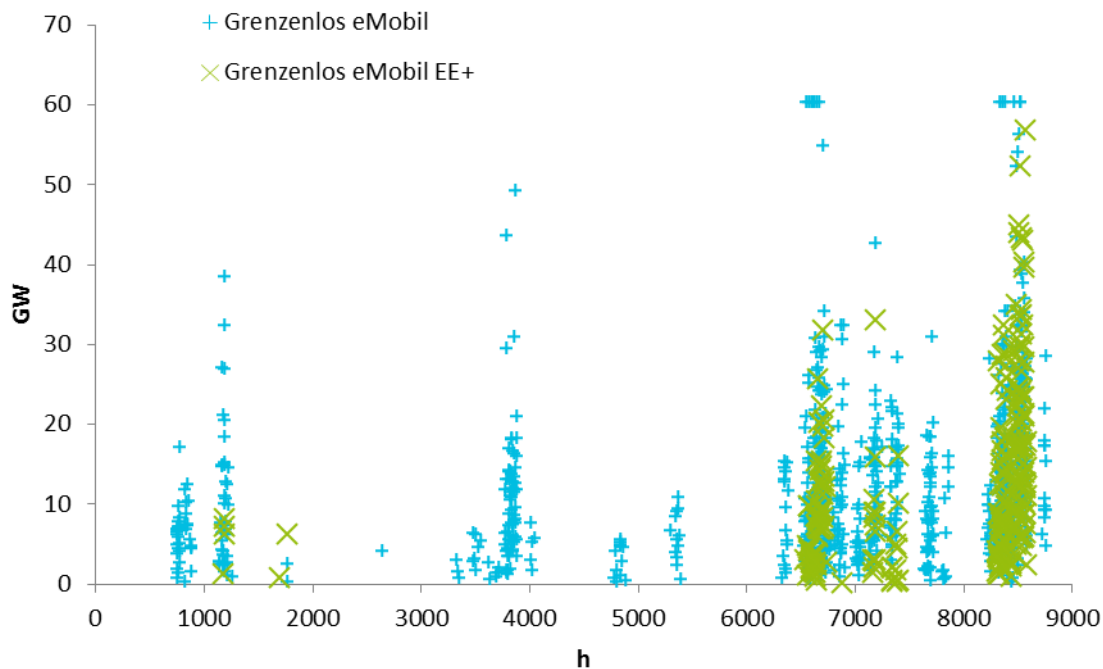
Tabelle 5-10: Vergleich von Brennstoffmix, Emissionen und EE-Überschüssen für die Differenzstromerzeugung in unterschiedlichen EE-Szenarien im Jahr 2050

	EE nach Leitstudie	EE+ TWh	EE+ mit 20% weniger PV
Stromerzeugung national	117	129	126
<i>Braunkohle</i>	24,34	-0,22	2,18
<i>Steinkohle</i>	26,32	-0,20	2,73
<i>Erdgas</i>	7,77	-0,65	0,64
<i>Kernenergie</i>	0,00	0,00	0,00
<i>Biomasse</i>	12,06	-0,14	5,12
<i>Laufwasser</i>	0,00	0,00	0,00
<i>Erneuerbare</i>	46,87	129,71	115,15
Backup	8,97	1,83	2,58
Importe	21,81	21,81	21,81
Pumpverluste	4,14	0,21	2,15
<i>Turbinenstrom</i>	-9,65	-0,68	-5,10
<i>Pumpstromverbrauch</i>	13,79	0,89	7,24
Differenzstrom	152	152	152
Emissionen [Mio. t CO ₂]	52,0	1,9	7,2
Überschuss EE bez. auf Dargebot	0,5%	10,3%	8,8%

Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 5-14 zeigt den Einsatz des Backup-Kraftwerks in den beiden Ausbauszenarien (*Leitstudie* und *EE+*) im Vergleich. Interessanterweise zeigt sich, dass sich durch den zusätzlichen Ausbau der erneuerbaren Energien (Ausbauszenario *EE+*) zwar die Laufzeit des Backup-Kraftwerks deutlich von 828 Stunden auf 245 Stunden reduziert, die maximale Leistung der Backup-Kraftwerke jedoch nahezu gleich bleibt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sowohl beim Ausbau gemäß der *Leitstudie* als auch beim Ausbau gemäß dem Szenario *EE+* aufgrund einer längeren EE-Flaute im Dezember die Stromnachfrage in einzelnen Stunden nicht gedeckt werden kann. Somit hilft ein noch stärkerer EE-Ausbau nur unwesentlich, die Stromerzeugung in diesen Stunden zu decken. Hier stellen zusätzliche Speicher oder Lastmanagement (DSM) bei anderen Stromnachfragern eine bessere Möglichkeit dar, den Bedarf an Backup-Kraftwerksleistung zu reduzieren, wobei auch hier die verfügbaren Potenziale begrenzt sind.

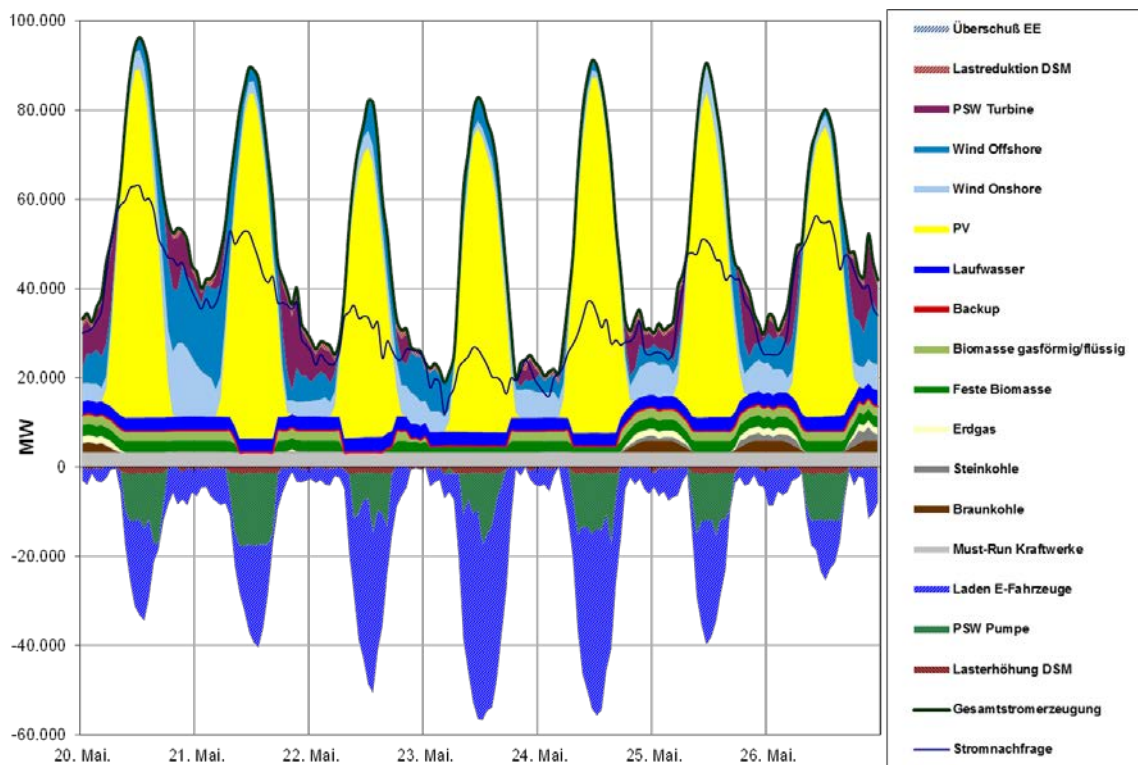
Abbildung 5-14: Einsatz des Backup-Kraftwerks in den Szenarien *Grenzenlos eMobil* und *Grenzenlos eMobil EE+*



Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 5-15 zeigt die gesamte Stromerzeugung für das Szenario *Grenzenlos eMobil (EE+)* aus *PowerFlex* exemplarisch für die Woche vom 20.-26. Mai im Jahr 2050. In der dargestellten Woche ist das Dargebot an Windenergie relativ gering, dasjenige von Photovoltaik jedoch hoch. Dies führt dazu, dass das Laden der Elektrofahrzeuge, soweit es die Grenzen der Netzkopplung und des Lastmanagements erlauben, vermehrt in Stunden mit hohem Solarstromangebot stattfindet. Darüber hinaus sorgen Pumpspeicherkraftwerke und nachfrageseitige Lastverschiebungen (DSM) zusammen mit dem Winddargebot dafür, dass auch in den Nachtstunden ausreichend Strom für die übrige Nachfrage zur Verfügung steht. Jedoch gibt es auch hier Grenzen in den Möglichkeiten der Verschiebung von Stromerzeugung und -nachfrage, so dass zu verschiedenen Zeiten thermische Kraftwerke auf Basis von Biomasse oder fossilen Brennstoffen herangezogen werden müssen.

Abbildung 5-15: Stromerzeugung für eine Maiwoche im Jahr 2050 für das Szenario Grenzenlos eMobil (EE+)

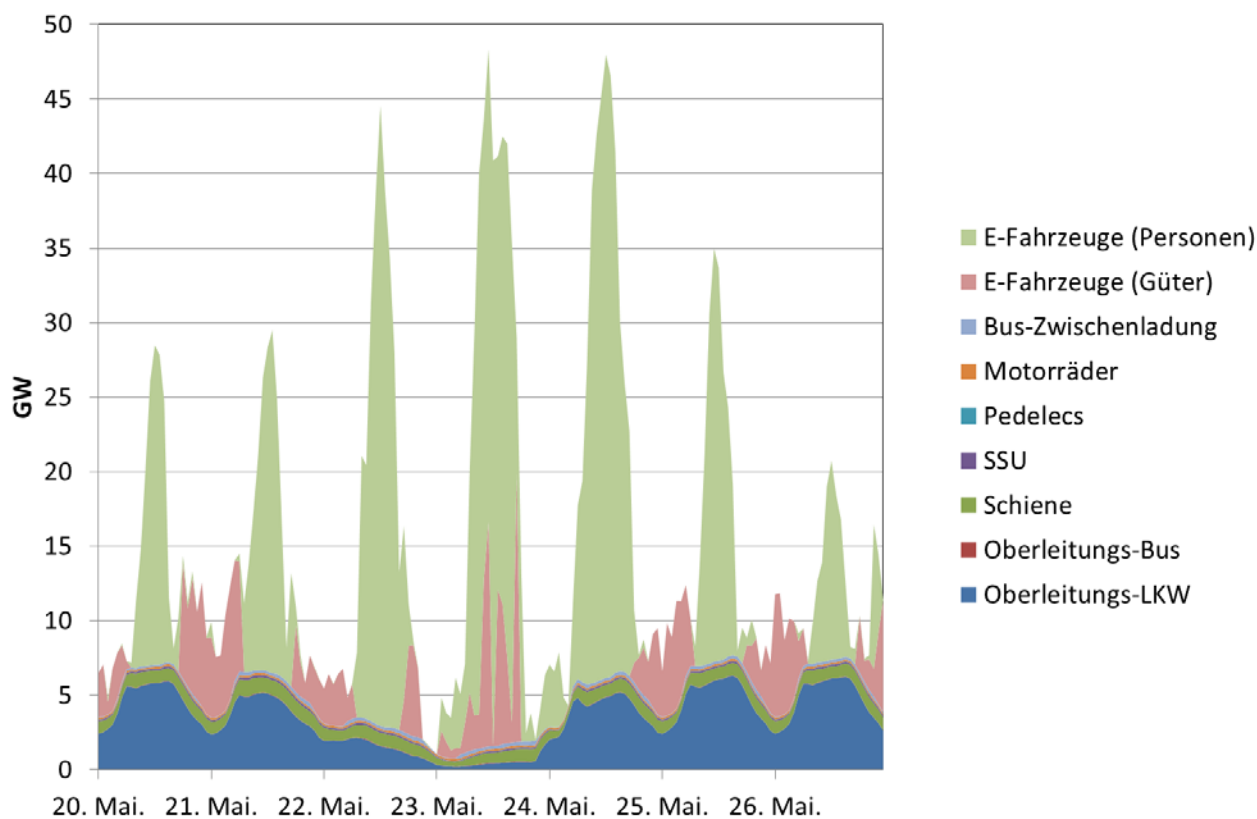


Quelle: Eigene Berechnungen

Die folgende Abbildung 5-16 zeigt die Stromnachfrage der Elektrofahrzeuge für die gleiche Woche. Die Stromnachfrage von Schienenfahrzeugen, oberleitungsgebundenen Lkw und Bussen erfolgt unmittelbar während des Fahrzeugbetriebs über Stromabnehmer. Eine Verschiebung der Stromnachfrage ist daher – anders als bei batterieelektrischen Antriebskonzepten – im Regelfall nicht möglich und im Modell *PowerFlex* daher als unflexible stündliche Nachfrage auf Basis der hinterlegten Einsatzprofile implementiert. Das Laden von batterieelektrischen Fahrzeugen im Güter- und Personenverkehr erfolgt im Rahmen der vorgegebenen Einsatzprofile und der jeweils verfügbaren Ladeinfrastruktur im Modell flexibel. Die Ladezeiträume werden durch das Modell unter Berücksichtigung der Stromerzeugung ermittelt. Es zeigt sich, dass bedingt durch die zu erledigenden Fahrten, gewerbliche Elektrofahrzeuge vornehmlich nachts und damit außerhalb der Geschäftszeiten geladen werden, während die privaten Elektrofahrzeuge zu einem größeren Anteil auch tagsüber über eine Netzkopplung verfügen (z. B. Ladestation am Arbeitsplatz) und damit häufig auch tagsüber geladen werden können. Dies erlaubt eine Ausnutzung des tagsüber hohen verfügbaren Angebots an Stromerzeugung vor allem aus Photovoltaikanlagen.

Die Stromnachfrage von Pedelecs und elektrischen Motorrädern wird im Modell vereinfachend als unflexibel angenommen, obwohl auch für diese Nachfrager theoretisch eine Laststeuerung denkbar wäre. Angesichts der vergleichsweise geringen Bedeutung dieser Nachfrager für die Gesamtstromerzeugung wurde in den *eMobil 2050* Szenarien auf eine differenziertere Betrachtung dieser Anwendungen verzichtet.

Abbildung 5-16: Darstellung Stromnachfrage Oberleitungs- und Elektrofahrzeuge für eine Maiwoche im Jahr 2050 für das Szenario *Grenzenlos eMobil (EE+)*



Quelle: Eigene Berechnungen

5.5. Einfluss strombasierter Kraftstoffe auf die Stromerzeugung

In einem Stromerzeugungssystem mit hohen Anteilen an schwankenden erneuerbaren Erzeugungskapazitäten kann es sinnvoll sein, überschüssigen Strom, der ansonsten nicht genutzt werden würde, zwischen zu speichern. Eine Option dafür stellen chemische Energiespeicher in Form von strombasierten Energieträgern dar, die unter anderem im Verkehrssektor als Kraftstoff dienen könnten. In diesem Abschnitt werden daher verschiedene Sensitivitätsanalysen für das Jahr 2050 dargestellt, in welchen unterschiedlich große Teile der konventionellen Kraftstofferzeugung durch strombasierte Energieträger ersetzt werden. Wie in Abschnitt 4.8.1 dargestellt, werden hier sowohl die Methanisierung als auch die strombasierte Erzeugung von Flüssigkraftstoffen betrachtet.

Zuerst werden zwei Sensitivitäten untersucht, in welchen möglichst überschüssige Strommengen aus erneuerbaren Energien, welche ansonsten nicht integriert werden können, zur Herstellung strombasierter Kraftstoffe eingesetzt werden. In diesen Szenarien gibt es also keine exogene Nachfrage nach strombasierten Kraftstoffen aus dem Verkehr, sondern strombasierte Kraftstoffe werden nur zur *Stromspeicherung* von ansonsten ungenutztem Strom genutzt.

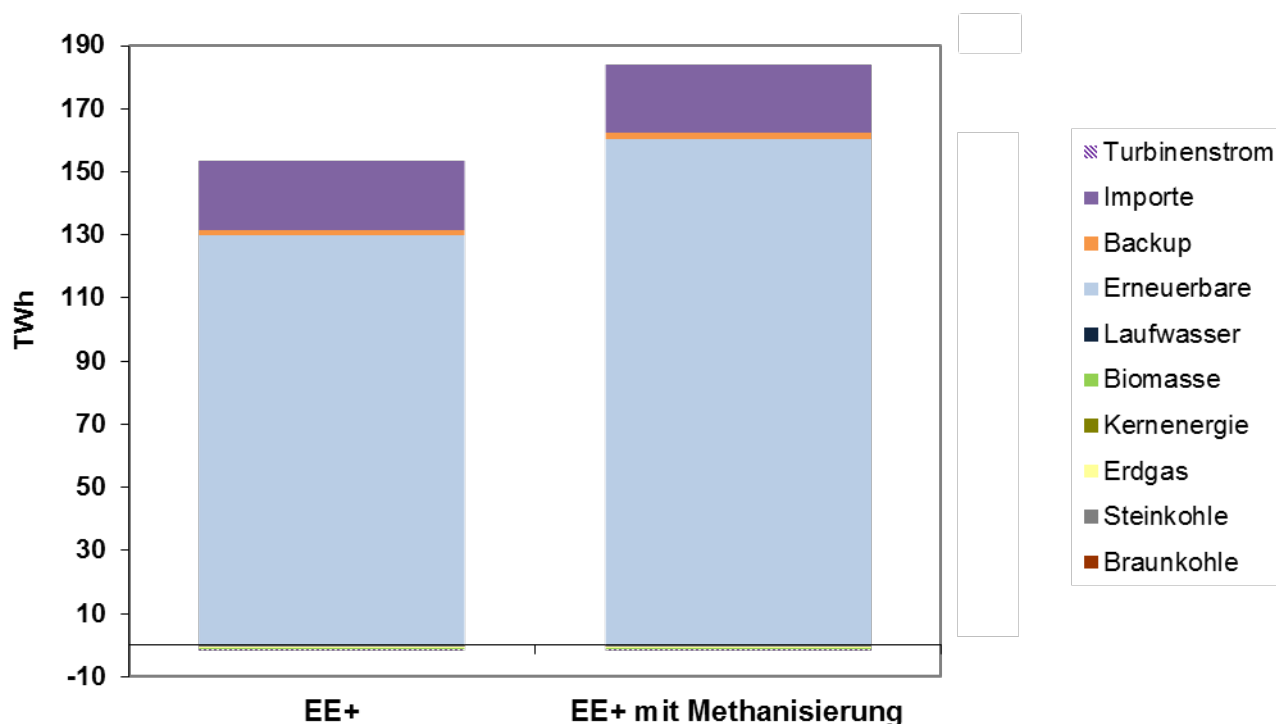
Anschließend werden zwei Sensitivitäten betrachtet, in denen aus dem Verkehrssektor eine exogene Nachfrage nach strombasierten Kraftstoffen vorgegeben wird, welche auch mit einem zusätzlichen EE-Ausbaubedarf einhergeht. Zunächst wird eine Sensitivität betrachtet, in welcher die oberleitungsgebundenen Lkw des Szenarios *Grenzenlos eMobil* durch Gas-Lkw ersetzt werden, wobei das von diesen Lkws nachgefragte Methan strombasiert erzeugt wird. Am Ende des

Abschnitts wird untersucht, welchen Einfluss auf das Stromsystem ein Szenario hat, in welchem die gesamte verbleibende Kraftstoffnachfrage in 2050 strombasiert erzeugt wird. Die beiden Sensitivitäten mit exogen vorgegebener Nachfrage entsprechen dann allerdings nicht mehr der Idee der *Stromspeicherung*, sondern stellen eine *Kraftstofferzeugung* mit Strom dar.

5.5.1. Methanisierung des überschüssigen EE-Dargebots

Als erste Betrachtung zeigt Abbildung 5-17 die Differenzstrommenge²⁷, sowohl für das bisher beschriebene Szenario *EE+* ohne Methanisierung, als auch für eine mögliche Erzeugung von strombasierten Kraftstoffen (Methan bzw. strombasierte Flüssigkraftstoffe) mit dem zuvor überschüssigen EE-Strom für das Szenario *Grenzenlos eMobil*. Der EE-Ausbau entspricht weiterhin dem Szenario *EE+*. Hierbei wird angenommen, dass für die Methanisierung eine installierte elektrische Leistung von 10 GW zur Verfügung steht. Diese Leistung wurde unter Betrachtung der Überschüsse der erneuerbaren Energien ermittelt, welche im Szenario *Grenzenlos eMobil* für *EE+* anfallen. Um ein wirtschaftliches Betreiben der Methanisierungsanlagen zu garantieren, wurde ein Minimum von etwa 2.000 Volllaststunden vorausgesetzt. Abbildung 5-18 zeigt die Dauerkurve der Überschüsse an erneuerbaren Energien im Szenario *Grenzenlos eMobil EE+* in 2050. Zur Ermittlung dieser Dauerkurve wurden die 8760 Stunden des Jahres absteigend nach den Überschüssen in den jeweiligen Stunden sortiert. Dabei wurde festgestellt, dass in gut 1.700 Stunden die Überschüsse etwa 10 GW betragen.

Abbildung 5-17: Vergleich Differenzstrom ohne und mit Sensitivität Methanisierung EE-Überschuss (*Grenzenlos eMobil* 2050)



Quelle: Eigene Darstellung

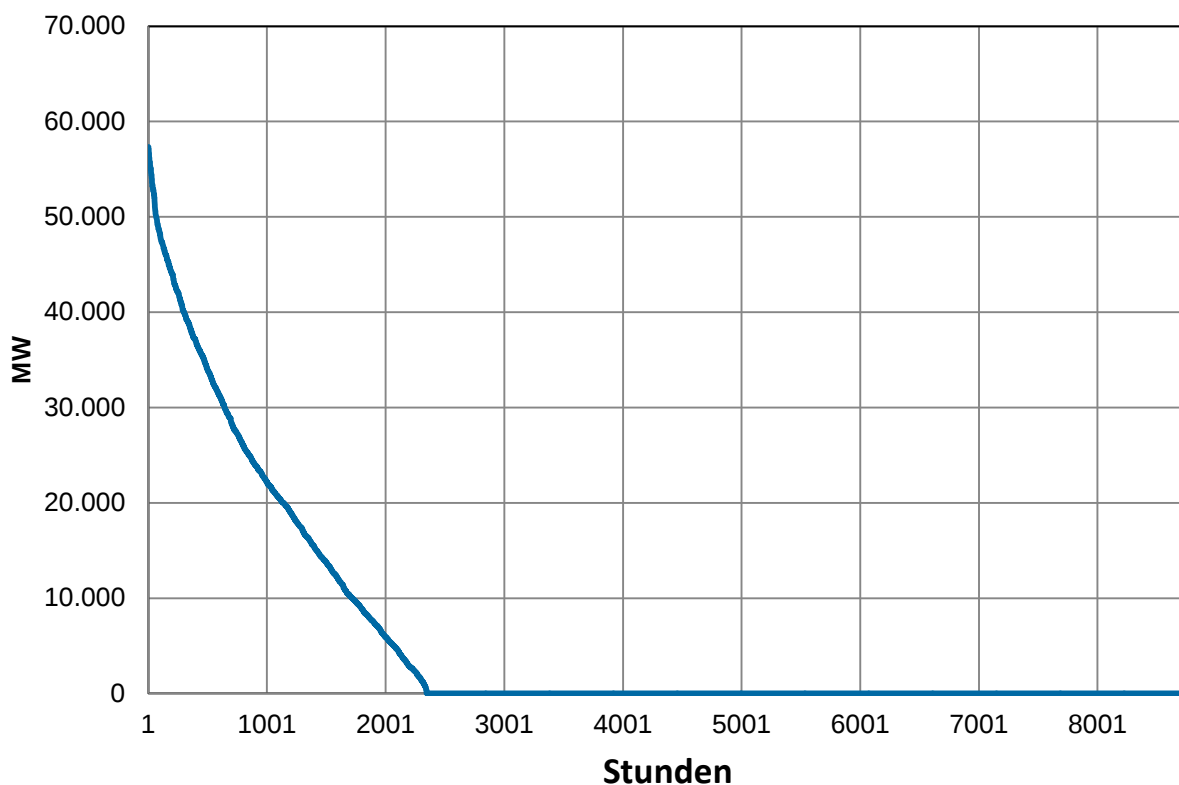
²⁷ Der Begriff Differenzstrom bezeichnet hier die gesamte Stromnachfrage des Verkehrs inklusive der Stromerzeugung, welche für die Herstellung strombasierter Kraftstoffe benötigt wird (siehe auch Definition in Abschnitt 5.4.1).

Entsprechend wurde unter Berücksichtigung der Stunden des nicht genutzten Dargebots erneuerbaren Stroms, welche in Abbildung 5-18 dargestellt sind, eine Kapazität von 10 GW_{el} für die Methanisierungsanlagen gewählt, um die folgenden Berechnungen durchzuführen.

Eine Nachfrage nach Methan wird dabei nicht exogen vorgegeben, sondern die mit der gegebenen Leistung und den EE-Überschüssen produzierbare Methanmenge ergibt sich als Modellergebnis. Die Methanisierung führt zu einer zusätzlichen Integration von ca. 30 TWh erneuerbarer Stromerzeugung (Tabelle 5-11) und reduziert den Überschuss der EE bezogen auf deren Dargebot von 10,3 % auf 3,5 %. Die Treibhausgasemissionen der Stromerzeugung steigen dabei nicht an und das Methan kann als emissionsfreier *Stromspeicher* bezeichnet werden, der mit Emissionen einhergehende Energieträger im Energiesystem substituieren kann. Unter Berücksichtigung des Wirkungsgrades lassen sich daraus 11,7 TWh (42 PJ) Flüssigkraftstoffe herstellen, was etwa 13% des Bedarfs an Diesel und Benzin im Szenario *Grenzenlos eMobil* entspricht.

Eine weitere Integration erneuerbaren Stroms wäre bei einer höheren Kapazität an installierten Methanisierungsanlagen möglich. Dies würde allerdings eine geringere Auslastung und somit eine geringere Wirtschaftlichkeit der Herstellung strombasierter Kraftstoffe bedeuten.

Abbildung 5-18: Dauerkurve der EE-Überschüsse für das Szenario *Grenzenlos eMobil* mit den Kraftwerkskapazitäten EE+



Quelle: Eigene Berechnungen

Tabelle 5-11: Vergleich von Brennstoffmix, Emissionen und EE-Überschüssen für die Differenzstromerzeugung in der Sensitivität Methanisierung EE-Überschuss (Grenzenlos eMobil 2050)

	EE+	EE+ mit Methanisierung
	TWh	
Stromerzeugung national	129	159
Braunkohle	-0,22	-0,22
Steinkohle	-0,20	-0,20
Erdgas	-0,65	-0,65
Kernenergie	0,00	0,00
Biomasse	-0,14	-0,14
Laufwasser	0,00	0,00
Erneuerbare	129,71	160,46
Backup	1,83	1,83
Importe	21,81	21,81
Pumpverluste	0,21	0,20
Turbinenstrom	-0,68	-0,67
Pumpstromverbrauch	0,89	0,87
Differenzstrom	152	183
Emissionen [Mio. t CO ₂]	1,9	1,9
Überschuss EE bez. auf Dargebot	10,3%	3,5%

Quelle: Eigene Berechnungen

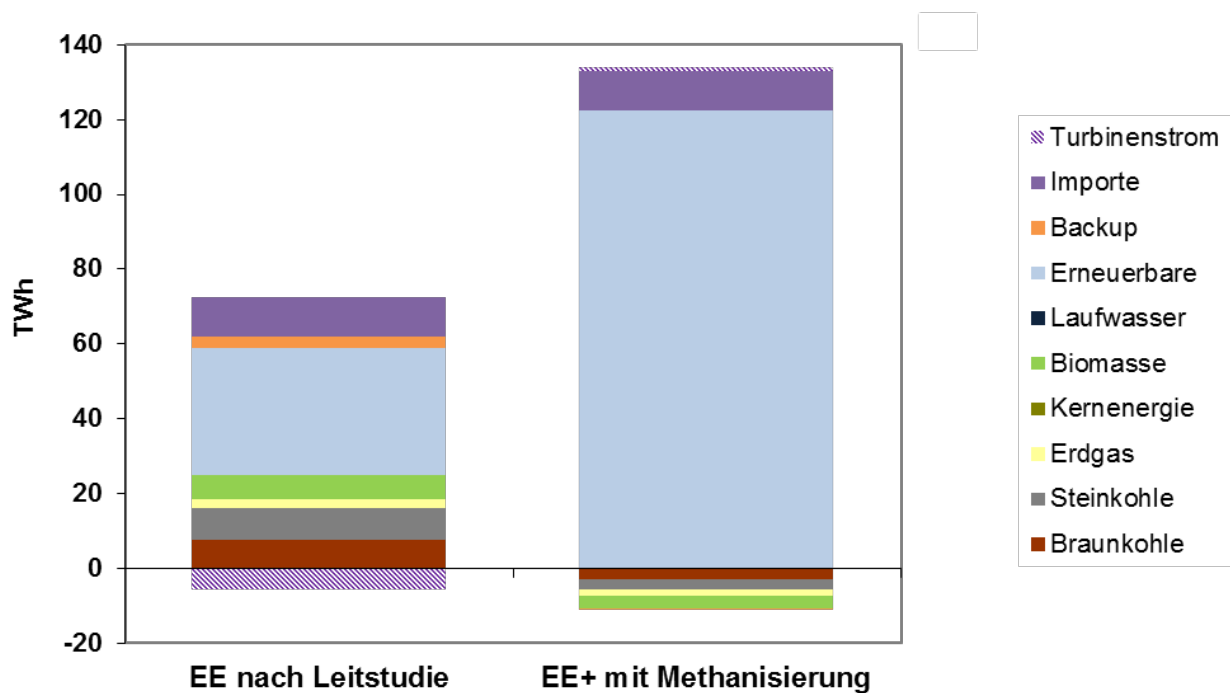
Eine ähnliche Betrachtung wurde auch für das Szenario *Regional eMobil* durchgeführt. Hierbei wurde angenommen, dass der Ausbau der erneuerbaren Energien wie in der Betrachtung *EE+* für das Szenario *Grenzenlos eMobil* erfolgt und ebenfalls Methanisierungsanlagen mit einer installierten Gesamtleistung von 10 GW_{el} zur Verfügung stehen. Abbildung 5-19 zeigt die Stromerzeugung zur Deckung der Nachfrage aus dem Verkehrssektor für die Varianten *EE nach Leitstudie* und *EE+ mit Methanisierungsoption*. Während bei einem Ausbau der erneuerbaren Energien nach Nitsch et al. (2012) geringe Mengen an fossilen Kraftstoffen benötigt werden, können nach dem deutlichen Ausbau der EE im Fall *EE+* nicht nur die komplette Stromerzeugung des Verkehrs aus erneuerbaren Energiequellen generiert werden, sondern zusätzlich noch etwa 46 TWh Strom zur Herstellung strombasierter Kraftstoffe genutzt werden. Nach Umwandlungsverlusten entspricht dies rund 23 TWh Methan, welches z.B. in Gas-Lkw eingesetzt werden kann.

Bei dem Szenario ist allerdings zu beachten, dass der EE-Ausbau und die installierte Kapazität an Methanisierungsanlagen an das Szenario *Grenzenlos eMobil* angepasst wurden. Die Verwendung desselben EE-Ausbaus und Methanisierungsanlagen wurde vor allem zwecks besserer Vergleichbarkeit gewählt. Für das Szenario *Regional eMobil* mit der geringeren Stromnachfrage aus dem Verkehrssektor verbleiben daher EE-Überschüsse in Höhe von 12% des Dargebots. Zur Reduktion der EE-Überschüsse wäre es daher sinnvoll, den EE-Ausbau zu reduzieren.

Wie oben bereits angesprochen, wurde für die Sensitivität *Regional eMobil 2050 EE+ mit Methanisierung* der gleiche EE-Ausbau angenommen wie für die Berechnungen für das Szenario

Grenzenlos eMobil. Die Stromnachfrage ist jedoch trotz der zusätzlichen Methanisierung deutlich geringer und führt entsprechend auch zu einem geringeren Einsatz fossiler Kraftwerke wie in Tabelle 5-12 ersichtlich. Insgesamt führt dann auch die sehr hohe Ausnutzung der erneuerbaren Energien zu Emissionen, welche noch unter denen des Vergleichs ohne die Stromnachfrage des Verkehrssektors liegen und damit zu einem Rückgang der Emissionen bei der Stromerzeugung führen.

Abbildung 5-19: Vergleich Differenzstrom mit und ohne Sensitivität Methanisierung EE-Überschuss und unterschiedlichem EE-Ausbau (Regional eMobil 2050)



Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 5-12: Vergleich von Brennstoffmix, Emissionen und EE-Überschüssen für die Differenzstromerzeugung in der Sensitivität Methanisierung EE-Überschuss (Regional eMobil 2050)

	EE nach Leitstudie	EE+ mit Methanisierung
	TWh	
Stromerzeugung national	59	111
<i>Braunkohle</i>	7,30	-3,02
<i>Steinkohle</i>	8,60	-2,78
<i>Erdgas</i>	2,48	-1,61
<i>Kernenergie</i>	0,00	0,00
<i>Biomasse</i>	6,55	-3,48
<i>Laufwasser</i>	0,00	0,00
<i>Erneuerbare</i>	33,82	122,28
Backup	2,94	-0,06
Importe	10,60	10,60
Pumpverluste	2,45	-0,71
<i>Turbinenstrom</i>	-5,77	0,99
<i>Pumpstromverbrauch</i>	8,22	-1,70
Differenzstrom	75	121
Emissionen [Mio. t CO ₂]	17	-5
Überschuss EE bez. auf Dargebot	4,6%	12,0%

Quelle: Eigene Berechnungen

5.5.2. Gas-Lkw mit strombasiertem Methan

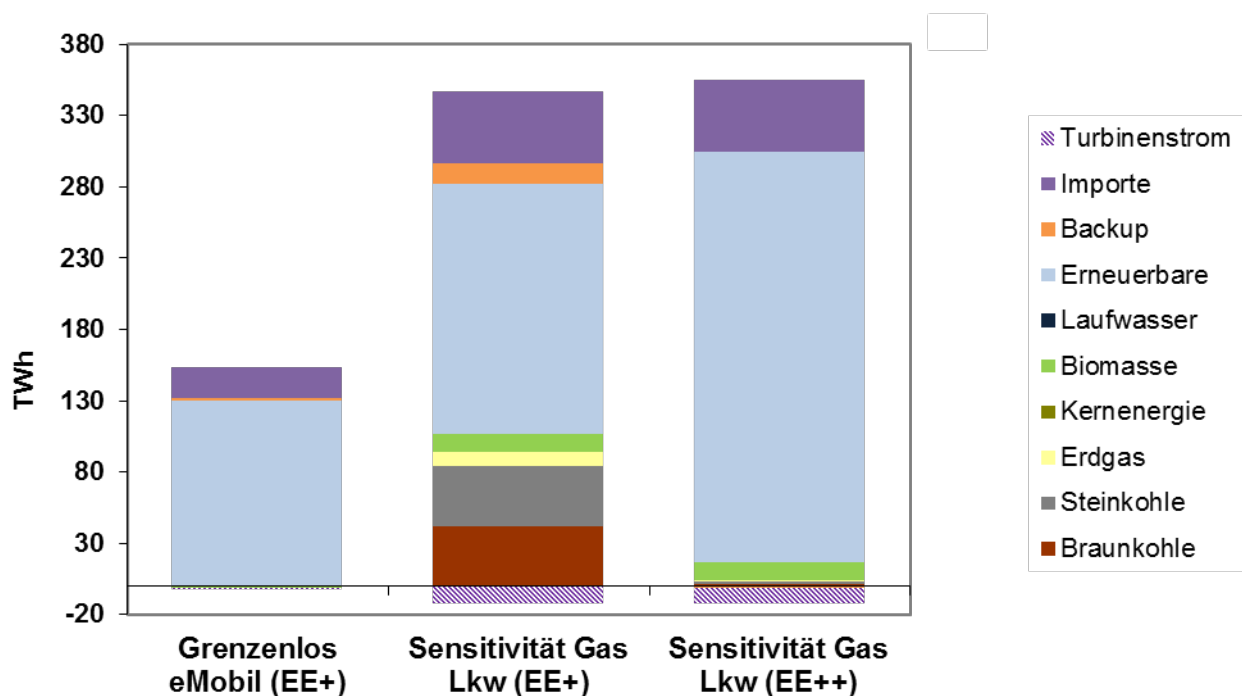
Im Rahmen der beiden Szenarien wurden für den Schwerlastverkehr die beiden technologischen Optionen Gas-Lkw (*Regional eMobil*) und Oberleitungs-Lkw (*Grenzenlos eMobil*) betrachtet. Durch den Unterschied zwischen den beiden Szenarien in Bezug auf die Verkehrsleistung ist ein Vergleich der beiden Optionen anhand dieser beiden Szenarien nicht unmittelbar möglich. Daher wurde eine Sensitivität betrachtet, in welcher alle Parameter dem Szenario *Grenzenlos eMobil* entsprechen, jedoch Gas-Lkw anstelle der Oberleitungs-Lkw zum Einsatz kommen. Durch die niedrigere Effizienz der Gas-Lkw ist der Endenergiebedarf des Verkehrs dadurch höher. In dieser Sensitivität wird darüber hinaus das benötigte Gas für die Gas-Lkw durch Elektrolyse und anschließende Methanisierung erzeugt.

Im Gegensatz zur obigen Betrachtung, in der die Menge des strombasierten Methans sich erst im Modelllauf in Abhängigkeit der Überschüsse und der verfügbaren Erzeugungskapazitäten ergibt, wird in dieser Sensitivität die Menge an strombasiertem Methan exogen vorgegeben und kann als *Kraftstoffproduktion* angesehen werden. Der Gesamtwirkungsgrad der Methanisierung (für Erzeugung, Verteilung, Verdichtung) liegt niedriger als in der Betrachtung in Abschnitt 5.5.1. Grund dafür ist das hohe Produktionsvolumen, welches dazu führt, dass für die CO₂-neutrale Herstellung vermehrt atmosphärisches Kohlenstoffdioxid genutzt wird und sich der Energieaufwand für die Bereitstellung des benötigten Kohlenstoffs erhöht. Für die Sensitivität wird für die Bestimmung der installierten Kapazität an Produktionsanlagen angenommen, dass die durchschnittlichen Volllaststunden der Methanisierungsanlagen aus Gründen der Wirtschaftlichkeit 3.000 h/Jahr betragen. Unter diesen Annahmen wird eine installierte Leistung an Methanisierungsanlagen von 79 GW_{el} für die Deckung der Nachfrage benötigt.

Wie Abbildung 5-20 zeigt, steigt durch die zusätzliche Stromnachfrage der Methanisierung die Gesamtstrommenge für den Verkehrssektor signifikant von 152 TWh auf gut 350 TWh an und macht damit etwa 45 % der gesamten Stromnachfrage aus. Dies führt dazu, dass der Ausbau der erneuerbaren Energien, welcher für das Szenario *Grenzenlos eMobil* bestimmt wurde (*EE+*), in dieser Sensitivität nicht ausreicht, um die komplette Stromnachfrage des Verkehrssektors zu decken. Unter diesen Rahmenbedingungen werden signifikante Strommengen aus fossilen Kraftwerken erzeugt (ca. 80 TWh insgesamt) und auch die durch das generische Backup zu deckende Lücke steigt auf 14 TWh (Tabelle 5-13). Daher wurde die Sensitivität Gas-Lkw erneut gerechnet unter Berücksichtigung einer Steigerung des Ausbaus von Windenergie an Land von 60 GW auf 103 GW (*EE++*). Laut (Lütkehus et al. 2013) und unter der Annahme, dass das dort ausgewiesene Flächenpotenzial dem Energiepotenzial entspricht, kann dieser zusätzliche Ausbau erfolgen, wenn der Mindestabstand von zwischen Windkraftanlagen und Wohnhäusern zwischen 1,2 km und 2 km beträgt. Unter diesen Annahmen kann die komplette Stromnachfrage des Verkehrssektors für die Sensitivätsbetrachtung Gas-Lkw durch erneuerbare Energiequellen erzeugt werden (siehe Abbildung 5-20).

Auch wenn laut Lütkehus et al. (2013) ein Abstand von 1,2 km zu Wohnhäusern eingehalten werden kann, sollte dennoch bedacht werden, dass ein solch deutlicher Anstieg der Windenergie in Deutschland sehr starke Ausbauanstrengungen voraussetzt. Vor allem muss berücksichtigt werden, dass Beschränkungen im Bereich der Herstellungs- und Installationskapazitäten erfordern, dass dieser Ausbau kontinuierlich erfolgt und entsprechend frühzeitig beginnt. Dies bedeutet, dass entsprechende Pläne und politische Rahmenbedingungen dies einbeziehen und entsprechend unterstützen müssen, um ein erfolgreiches Erreichen von entsprechenden Windkraftanlagen-Ausbaenzielen zu gewährleisten.

Abbildung 5-20: Vergleich Differenzstrom für die Sensitivität Gas-Lkw und PtG für *Grenzenlos eMobil 2050*



Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 5-13: Vergleich von Brennstoffmix, Emissionen und EE-Überschüssen für die Differenzstromerzeugung in der Sensitivität Gas-Lkw und PtG für Grenzenlos eMobil im Jahr 2050

	Grenzenlos eMobil (EE+)	Sensitivität Gas Lkw (EE+)	Sensitivität Gas Lkw (EE++)
	TWh		
Stromerzeugung national	129	282	305
<i>Braunkohle</i>	-0,22	41,18	1,51
<i>Steinkohle</i>	-0,20	42,77	1,78
<i>Erdgas</i>	-0,65	9,41	0,48
<i>Kernenergie</i>	0,00	0,00	0,00
<i>Biomasse</i>	-0,14	12,60	12,60
<i>Laufwasser</i>	0,00	0,00	0,00
<i>Erneuerbare</i>	129,71	176,22	288,24
Backup	1,83	14,53	-1,24
Importe	21,81	49,79	49,79
Pumpverluste	0,21	5,07	4,83
<i>Turbinenstrom</i>	-0,68	-12,20	-11,57
<i>Pumpstromverbrauch</i>	0,89	17,26	16,39
Differenzstrom	152	352	358
Emissionen [Mio. t CO ₂]	2	87	6
Überschuss EE bez. auf Dargebot	10,3%	0,0%	0,0%

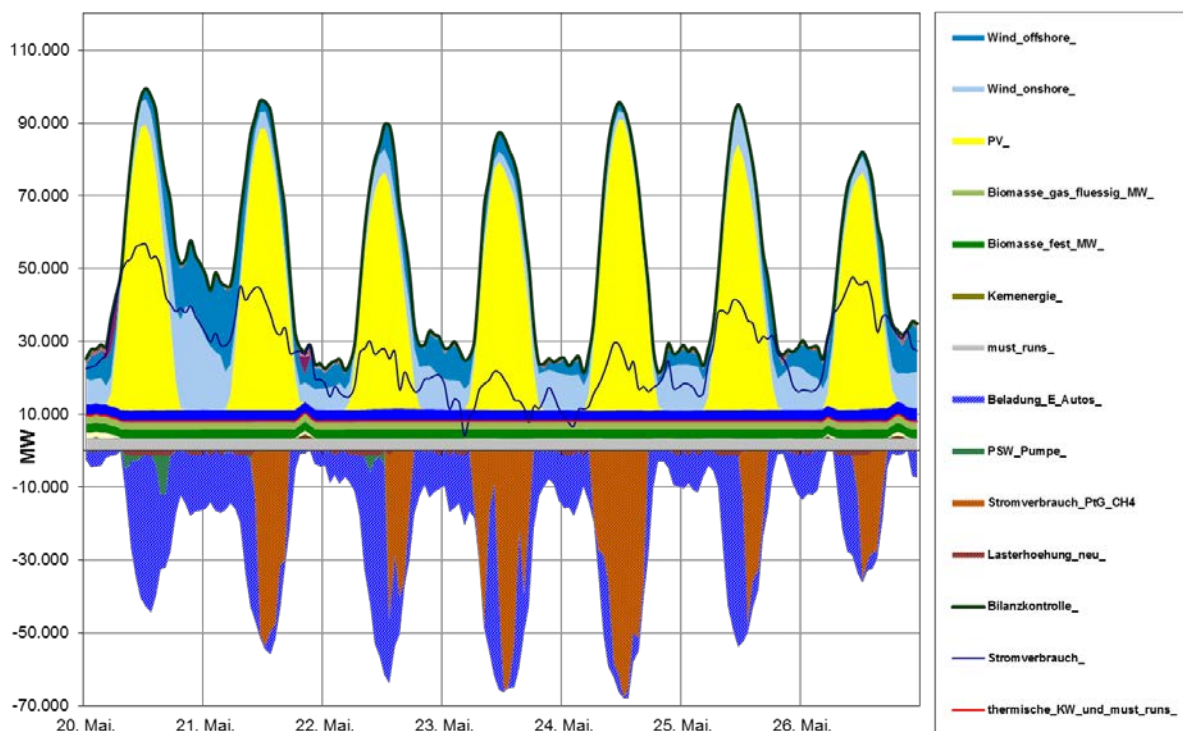
Quelle: Eigene Berechnung

In der Sensitivität *Gas-Lkw EE++* wird nahezu die gesamte zusätzliche Stromnachfrage aus erneuerbaren Energien bereit gestellt, der Einsatz fossiler Kraftwerke ist nur leicht höher als im Vergleichslauf und die Emissionen erhöhen sich daher nur um 6 Mio. Tonnen (davon 2,3 Mio. Tonnen in Deutschland und der Rest durch Importe²⁸). Gleichzeitig können die erneuerbaren Energien vollständig integriert werden. Hier zeigt sich also aufgrund der höheren Flexibilität der Nachfrage ein wesentlicher Unterschied zum Szenario *Grenzenlos eMobil*: Soll in letzterem Szenario die zusätzliche Stromnachfrage erneuerbar bereit gestellt werden, so entstehen auch in gewissen Maß Überschüsse, da die Flexibilität des Systems nicht ausreicht, um das EE-Dargebot vollständig zu integrieren.

Der Flexibilitätsbeitrag der Methanisierungsanlagen lässt sich beispielhaft auch anhand der Abbildung 5-21 nachvollziehen: Das EE-Dargebot wird durch die flexiblen Nachfrager Elektromobilität und strombasierte Kraftstoffe vollständig genutzt. Die zusätzliche Flexibilität von Gas-Lkw mit erneuerbarem Methan gegenüber Oberleitungs-Lkw erfordert jedoch ein um 23% höheres EE-Dargebot als im Szenario *Grenzenlos eMobil*.

²⁸ Die Importe werden mit dem Emissionsfaktor des Vergleichslauf ohne Elektromobilität in die CO₂-Bilanz mit einbezogen (siehe Kapitel 6.1)

Abbildung 5-21: Stromerzeugung für eine Maiwoche im Jahr 2050 für das Szenario *Grenzenlos eMobil*, Sensitivität Gas-Lkw EE ++



Quelle: Eigene Berechnungen

Zusammenfassend gilt: Im Vergleich zur Option des oberleitungsgebundenen Straßengüterverkehrs ist die Versorgung von Lkw mit strombasierten Kraftstoffen aus regenerativer Erzeugung angesichts des geringeren Gesamtwirkungsgrads mit einem deutlich höheren Ausbaubedarf an erneuerbaren Energien verbunden. Allerdings bietet die größere Flexibilität in der PtG-Erzeugung und -Speicherung perspektivisch die Option, zusätzliche, zuvor überschüssige erneuerbare Energien zu integrieren. Im Falle eines oberleitungsgebundenen Straßengüterverkehrs wären entsprechende Investitionen für den Aufbau der Versorgungsinfrastruktur (Oberleitungsnetz) und die Umrüstung der Fahrzeugflotte erforderlich. Die Versorgung des Straßengüterverkehrs mit strombasierten Kraftstoffen hätte zwar auf der Ebene der Fahrzeuge und der Versorgungsinfrastruktur geringere Anpassungen zur Folge, die Erzeugung der Kraftstoffe wäre aber mit zusätzlichen Kosten für den erheblichen Ausbau der EE-Kapazitäten und der notwendigen Erzeugungsanlagen verbunden. Im Rahmen des Vorhabens *eMobil 2050* wurde die technische Realisierbarkeit und die Kosten der beiden Technologieoptionen jedoch nicht näher betrachtet, sondern auf die nachgefragten Strommengen und Kapazitätsbedarfe fokussiert. In dieser Hinsicht stellt sich die direkte Stromnutzung über Oberleitungen als deutlich günstiger dar.

5.5.3. Strombasierte Erzeugung des gesamten Kraftstoffverbrauchs

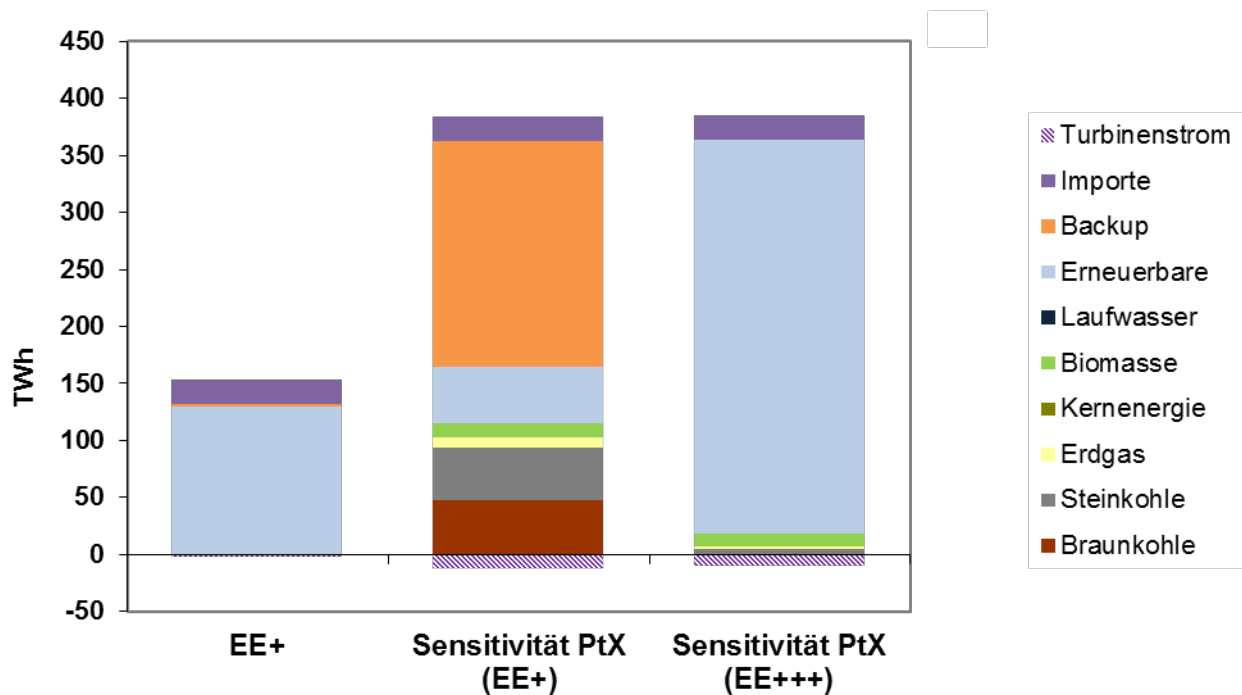
Zuletzt wurde untersucht, welchen Einfluss neben elektrischem Verkehr eine komplett strombasierte Erzeugung des Kraftstoffbedarfs des nicht elektrifizierten Verkehrs auf die Stromerzeugung hat. Hierbei wurde wieder das Szenario *Grenzenlos eMobil* (mit Oberleitungs-Lkw) zu Grunde gelegt. Somit ist in diesem Szenario eine vollständige Umstellung der Energieversorgung des Verkehrssektors hinterlegt und es gibt die Möglichkeit einer vollständig treibhausgasneutralen Energieversorgung des Verkehrssektors. Hierzu wurde eine PtX-Sensitivität

gerechnet, in welcher Flüssigkraftstoffe in den entsprechenden Anlagen erzeugt werden. Die Herstellung strombasierter Kraftstoffe geht damit deutlich über jene Menge hinaus, welche sich bei einer Nutzung von nicht anderweitig genutzten EE-Überschüssen ergibt. Daher wurde davon ausgegangen, dass die Anlagen zur Herstellung von Flüssigkraftstoffen höhere Laufzeiten aufweisen und durchschnittlich jährlich 4.000 Volllaststunden erreichen. Abbildung 5-22 zeigt für das Szenario *Grenzenlos eMobil* den Basisfall mit zusätzlichem EE-Ausbau nach *EE+*, die Sensitivität PtX für den gleichen Kraftwerkspark und dieselbe Sensitivität mit einem deutlich erhöhten Ausbau vor allem von onshore Windenergie von ca. 60 GW auf ungefähr 142 GW (*EE+++*). Es wurde jedoch darauf geachtet, dass auch in diesem Fall ein Mindestabstand von Windkraftanlagen zu Wohnhäusern von 1,2 km laut Lütkehus et al. (2013) eingehalten werden kann. Noch mehr als in Abschnitt 5.5.2 bereits angesprochen gilt jedoch, dass dieses Szenario erhebliche Ausbauanstrengungen voraussetzen würde.

Der Gesamtstrombedarf des Verkehrs steigt von 152 TWh für das Szenario *Grenzenlos eMobil* auf ca. 390 TWh für die Sensitivität. Es wird deutlich, dass hier die Annahmen für den Ausbau der erneuerbaren Energien, welche für das Szenario *Grenzenlos eMobil* mit dem Ausbau *EE+* ermittelt wurden, nicht ausreichen und ca. 200 TWh an zusätzlicher Stromerzeugung abgedeckt werden müssen (Tabelle 5-14).

Hierzu wurde, wie im vorherigen Abschnitt bereits angegeben, die onshore Windenergie im eingesetzten Kraftwerkspark deutlich ausgebaut (Szenario *EE+++*). In diesem Szenario wurde darauf verzichtet, die Importe so zu skalieren, dass sie 15% der Gesamtstromnachfrage ergeben, sondern die Werte wurden auf diejenigen des Szenarios *Grenzenlos eMobil* fixiert (87 TWh insgesamt). Eine Skalierung der Importe hätte bedeutet, dass insgesamt 120TWh Strom aus dem Ausland hätte importiert werden müssen, um die wegen der strombasierten Erzeugung der Kraftstoffe stark gestiegene Nachfrage zu decken. Es erscheint nicht sinnvoll, den Strom hierfür aus dem Ausland zu importieren, eher sollte in Erwägung gezogen werden, die Kraftstoffe im Ausland an ertragreicheren EE-Standorten zu erzeugen und diese zu importieren.

Abbildung 5-22: Vergleich Differenzstrom PtX-Sensitivität für das Szenario Grenzenlos eMobil im Jahr 2050



Quelle: Eigene Darstellung

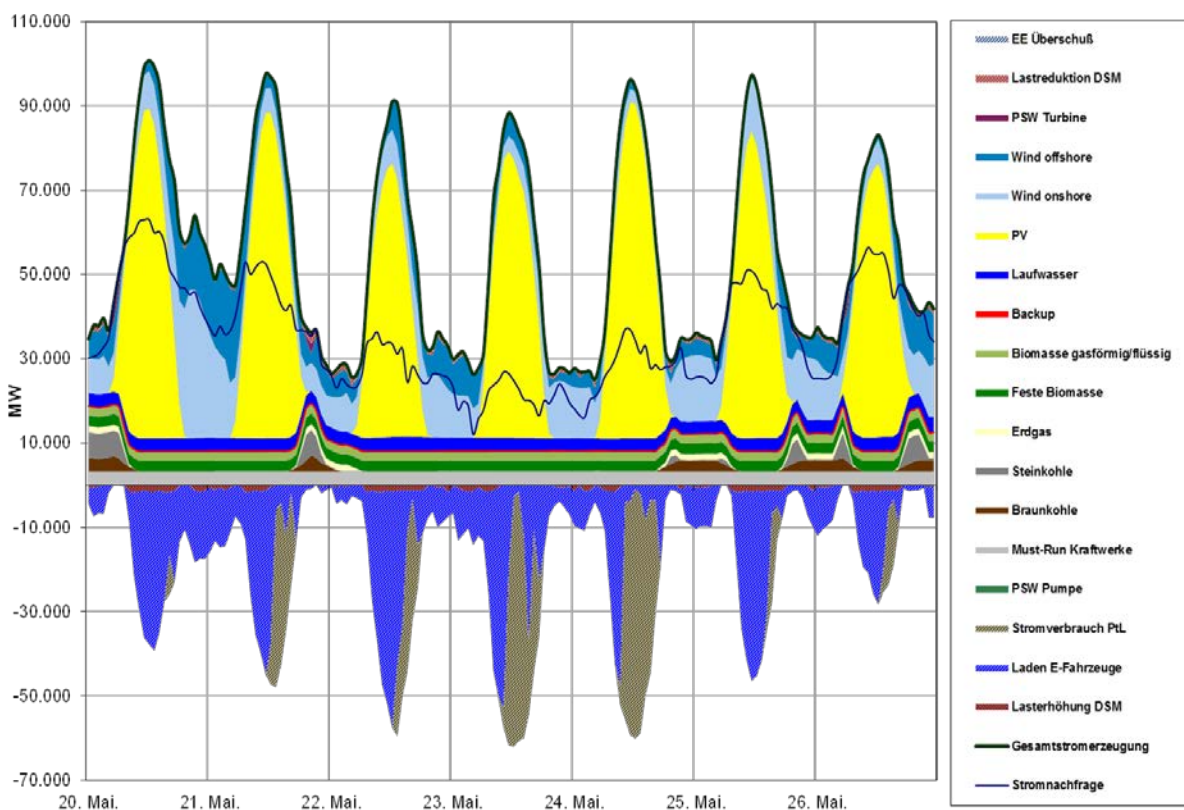
Tabelle 5-14: Vergleich von Brennstoffmix, Emissionen und EE-Überschüssen für die Differenzstromerzeugung in der Sensitivität PtX für Grenzenlos eMobil im Jahr 2050

	EE+	Sensitivität PtX (EE+)	Sensitivität PtX (EE+++)
	TWh		
Stromerzeugung national	129	164	363
Braunkohle	-0,22	47,61	0,00
Steinkohle	-0,20	45,60	5,02
Erdgas	-0,65	9,48	2,10
Kernenergie	0,00	0,00	0,00
Biomasse	-0,14	12,60	10,78
Laufwasser	0,00	0,00	0,00
Erneuerbare	129,71	48,60	345,29
Backup	1,83	198,13	-0,08
Importe	21,81	56,64	56,64
Pumpverluste	0,21	5,11	4,07
Turbinenstrom	-0,68	-12,32	-9,83
Pumpstromverbrauch	0,89	17,43	13,90
Differenzstrom	152	424	424
Emissionen [Mio. t CO ₂]	2	176	11
Überschuss EE bez. auf Dargebot	10,3%	0,0%	1,3%

Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 5-23 zeigt die gesamte Stromerzeugung für das Szenario *Grenzenlos eMobil* (Sensitivität PtX mit zusätzlichem EE-Ausbau) aus PowerFlex für die Woche vom 20. 26. Mai im Jahr 2050. Es wird deutlich, dass das Laden der Elektrofahrzeuge sowie die Erzeugung der strombasierten Kraftstoffe möglichst so erfolgen, dass das Dargebot an erneuerbaren Energien möglichst gut eingesetzt werden kann. Durch die hohe Flexibilität der Kraftstofferzeugung in Kombination mit dem Lastmanagement der Elektrofahrzeuge kann in der Beispielwoche das komplette Dargebot an erneuerbaren Energien integriert werden. Da die Pumpspeicherkraftwerke hier nicht eingesetzt werden, wird deutlich, dass dem System sogar noch zusätzliche Flexibilität zur Verfügung stünde, welche hier nicht abgerufen wird. In einigen Stunden reicht jedoch die Verfügbarkeit der erneuerbaren Energiequellen trotz des Einsatzes von nachfrageseitigem Lastmanagement, flexiblem Laden der Elektrofahrzeuge und von Speichermöglichkeiten (PSW, PtX-Erzeugung) nicht aus, so dass fossile thermische Kraftwerke eingesetzt werden müssen.

Abbildung 5-23: Stromerzeugung für eine Maiwoche im Jahr 2050 für das Szenario *Grenzenlos eMobil*, Sensitivität PtX mit EE-Ausbau



Quelle: Eigene Berechnungen

Die Sensitivität zeigt, dass es technisch möglich ist, in Deutschland nicht nur die Stromnachfrage des Verkehrs abzudecken, sondern darüber hinaus auch signifikante Mengen an strombasierten Kraftstoffen zu erzeugen. Dies führt allerdings dazu, dass die installierten Leistungen der erneuerbaren Energien signifikant ausgebaut werden müssen, um eine Gesamtstromnachfrage von fast 750 TWh zu decken. Auch wenn die angegebenen Kapazitäten an Windkraftanlagen und Fotovoltaik durchaus im Rahmen vorhandener technischer Potenziale in Deutschland möglich sind, wäre ein entsprechender Ausbau nur im Rahmen verstärkter Anstrengungen und entsprechender politischer Rahmenbedingungen möglich. Es könnten daher auch andere Optionen in Betracht gezogen werden, wie zum Beispiel eine Erzeugung von Methan- und Flüssigkraftstoffen im Ausland mit einem anschließenden Kraftstofftransport nach Deutschland.

5.6. Überblick wichtiger Kenngrößen zur Wechselwirkungen mit dem Stromsektor

Tabelle 5-15 zeigt die betrachteten Szenarien und Sensitivitäten für das Jahr 2050 in der Übersicht, d.h. die untersuchten Kombinationen von Endenergienachfrage des Verkehrs und Ausbau der erneuerbaren Energien. (Eine entsprechende Tabelle für das Jahr 2030 findet sich im Anhang).

Tabelle 5-15: Kenngrößen der Szenarien im Vergleich (2050)

Szenarioname		Vergleichslauf	Grenzenlos eMobil	Regional eMobil	Grenzenlos eMobil EE +	Grenzenlos eMobil + 10 GW PtX	Regional eMobil+ 10 GW PtX	Grenzenlos eMobil Gas-Lkw EE+	Grenzenlos eMobil Gas-Lkw EE ++	Grenzenlos eMobil + PtX total
EE Szenario		LS	LS	LS	+	+	+	+	++	+++
installierte Leistung Elektrolyseure	GW	0	0	0	0	10	10	79	79	59
EE-Dargebot (inkl. Überschüsse)	TWh	347	347	347	475	475	475	475	587	651
davon Überschüsse	TWh	49	2	15	47	16	54	0	0	8
Überschüsse in % des Dargebots	%	14%	0%	4%	10%	3%	11%	0%	0%	1%
Importe	TWh	66	87	76	87	87	76	115	115	87
Stromerzeugung national	TWh	375	492	434	504	534	486	657	680	744
flukt. EE	TWh	298	345	332	428	459	421	475	587	644
thermisch	TWh	48	118	73	47	47	37	154	64	71
must-run-Kraftwerke	TWh	29	29	29	29	29	29	29	29	29
Backup	TWh	1	10	4	3	3	1	16	0,1	1
Pumpverluste	TWh	-5	-1	-3	-5	-5	-6	0	0	-1
Stromerz.+ Imp.+Backup+Pumpverl.	TWh	437	589	512	589	620	558	788	795	831
Backup-Einsatz										
max. Leistung	GW	21	60	34	57	57	27	60	14	42
Laufzeit	h	203	828	423	245	249	146	871	16	114
Strom für Verkehr	TWh	0	152	75	152	183	121	352	358	394
Strom Fahrzeuge (inkl. Ladeverluste)	TWh	0	111	61	111	111	61	111	111	111
Strom Schiene / Oberleitung	TWh	0	41	14	41	41	14	11	11	41
stromgenerierte Kraftstoffe	TWh	0	0	0	0	31	46	229	236	242
Strom für andere Sektoren	TWh	437	437	437	437	437	437	437	437	437
Stromverbrauch gesamt	TWh	437	589	512	589	620	558	788	795	831
Anteil verkehr		0%	26%	15%	26%	30%	22%	45%	45%	47%
Emissionen Stromsektor										
thermisch	Mio. t CO2	15	61	29	14	14	9	91	18	24
must-runs	Mio. t CO2	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Backup	Mio. t CO2	0,6	4,6	1,9	1,4	1,4	0,6	7,1	0,0	0,6
Importe	Mio. t CO2	4,8	6,4	5,6	6,4	6,4	5,6	8,5	8,5	6,4
Stromsektor ohne Import	Mio. t CO2	27	78	43	28	28	22	110	30	37
Stromsektor inkl. Import	Mio. t CO2	32	84	49	34	34	27	119	38	43
Emissionsfaktoren										
Gesamtstrom exkl. Import	g CO2 / kWh	73	155	99	55	52	45	164	44	49
Differenzstrom exkl. Import	g CO2 / kWh		386	246	2	2	-50	275	8	25
Differenzstrom inkl. Import	g CO2 / kWh		341	222	13	10	-40	246	17	28

* LS = Leitstudie

Quelle: Eigene Berechnungen

Auf Seiten des Verkehrssektors werden die beiden Szenarien *Grenzenlos eMobil* und *Regional eMobil* betrachtet; zudem die Sensitivität zum Einsatz von Gas-Lkw und die Sensitivitäten zum Einsatz strombasierter Kraftstoffe. Auf Seiten des Stromsektors wird die daraus resultierende Stromnachfrage mit vier verschiedenen Ausbauszenarien der erneuerbaren Energien (*EE Leitstudie* bis *EE+++*) kombiniert.

Im oberen Teil der Tabelle 5-15 sind die Kenndaten zur Strombereitstellung zusammengestellt. Einen wesentlichen Unterschied zwischen den vier EE-Szenarien stellt das Dargebot fluktuierender erneuerbarer Energien dar. Während das EE-Dargebot in dem an der Leitstudie orientierten Szenario bei 347 TWh liegt, ist es im Szenario *EE+* mit 475 TWh um 37 % höher als in der Leitstudie. Noch höher liegt das EE-Dargebot in den Szenarien *EE++* (70 % höher als Leitstudie) und *EE+++* (87 % höher als Leitstudie). Die Unterschiede sind zurückzuführen auf den unterschiedlichen EE-Ausbaubedarf in Abhängigkeit der Stromnachfrage des Verkehrs: Diese liegt zwischen 75 TWh im Szenario *Regional eMobil* und bei nahezu 400 TWh im Szenario *Grenzenlos eMobil + PtX total*, da die vollständige Versorgung des Verkehrs mit strombasierten Kraftstoffen einen deutlichen EE-Ausbaubedarf nach sich zieht. Neben dem EE-Dargebot unterscheiden sich auch die Importe zwischen den Szenarien, da sich die Stromnachfrage zwischen den Szenarien unterscheidet und die Importe 15 % der Stromnachfrage betragen. Die Importe stellen ebenso wie das EE-Dargebot in der Modellierung in *PowerFlex* einen Eingangsparameter dar.

Die must-run-Kraftwerke sind in allen Szenarien identisch und stellen 29 TWh Strom bereit. Auch die installierte Kapazität thermischer Kraftwerke ist in allen Szenarien identisch, nur ihr Einsatz unterscheidet sich in Abhängigkeit des jeweiligen Szenarios. Die Stromerzeugung fossiler Kraftwerke variiert in den Szenarien zwischen 37 TWh im Szenario *Regional eMobil + 10 GW PtX* und 152 TWh im Szenario *Grenzenlos eMobil EE+*. Der Einsatz fossiler Kraftwerke in hohem Umfang in den Szenarien *Grenzenlos eMobil* und *Grenzenlos eMobil Gas-Lkw EE+* begründet sich dabei schon allein dadurch, dass das Dargebot erneuerbarer Energien nicht zur Deckung der Stromnachfrage ausreicht, d.h. die Summe aus EE-Dargebot, Importen und must-run-Kraftwerken ist niedriger als die Stromnachfrage. In den Szenarien *Grenzenlos eMobil* und *Grenzenlos eMobil + 10 GW PtX* ist der Einsatz thermischer Kraftwerke identisch. Es lassen sich denn durch die Herstellung strombasierter Kraftstoffe zwar zusätzliche erneuerbare Energien nutzen, aber nicht der Einsatz thermischer Kraftwerke reduzieren.

In welchem Umfang fluktuierende erneuerbare Energien tatsächlich genutzt werden, ist in der Zeile *flukt. EE* dargestellt. Fluktuierende EE, must-run-Kraftwerke und thermische Kraftwerke ergeben zusammen die nationale Stromerzeugung. Einen Indikator für die Intensität der Speichernutzung für EE-Überschüsse stellen die Pumpverluste dar, welche sich zwischen 0 und 5 TWh bewegen.

Der Einsatz des Backup-Kraftwerks zeigt dagegen, in wie vielen Stunden des Jahres die Stromerzeugung und Importe zur Deckung des Strombedarfs nicht ausreichen und eine Lücke besteht. Am höchsten ist die nötige Backup-Leistung mit 57 bis 60 GW in den Szenarien mit Oberleitungs-Lkw. Wie bereits in Abschnitt 5.4.4 dargestellt, kann durch den zusätzlichen Ausbau erneuerbarer Energien zwar die Laufzeit des Backup-Kraftwerks deutlich reduziert werden, nicht aber die nötige Kapazität. Wesentlich geringer als im Szenario *Grenzenlos eMobil* fällt der Backup-Einsatz und die nötige installierte Leistung im Szenario *Regional eMobil* und im Szenario *Grenzenlos eMobil Gas-Lkw EE++* aus. Ein Grund dafür könnte sein, dass hier im Gegensatz zum Szenario *Grenzenlos eMobil* keine Oberleitungs-Lkw mit ihrer inflexiblen Stromnachfrage zum Einsatz kommen.

Im mittleren Teil von Tabelle 5-15 ist der Stromverbrauch nach Nachfragern differenziert dargestellt. Der gesamte Stromverbrauch entspricht dabei der Summe aus Stromerzeugung, Importen, Backup und Pumpverlusten. Die Stromnachfrage der übrigen Sektoren bis auf den

Verkehr liegt in den Szenarien bei 437 TWh. Die Nachfrage des Verkehrs variiert zwischen 75 TWh im Szenario *Regional eMobil* und 394 TWh im Szenario *Grenzenlos eMobil PtX total*. Letzteres stellt in gewisser Weise ein Extremszenario dar, da im Verkehr nur Strom bzw. strombasierte Kraftstoffe eingesetzt werden. Kämen Gas-Lkw mit strombasiertem Methan statt Oberleitungs-Lkw zum Einsatz oder würde man auch den Luft- und Seeverkehr mit strombasierten Kraftstoffen versorgen, so würde sich die Stromnachfrage jedoch nochmals erhöhen.

Der untere Teil von Tabelle 5-15 zeigt die CO₂-Emissionen der Stromerzeugung in den Szenarien. Diese werden im folgenden Abschnitt näher diskutiert.

6. CO₂-Emissionen im Jahr 2050

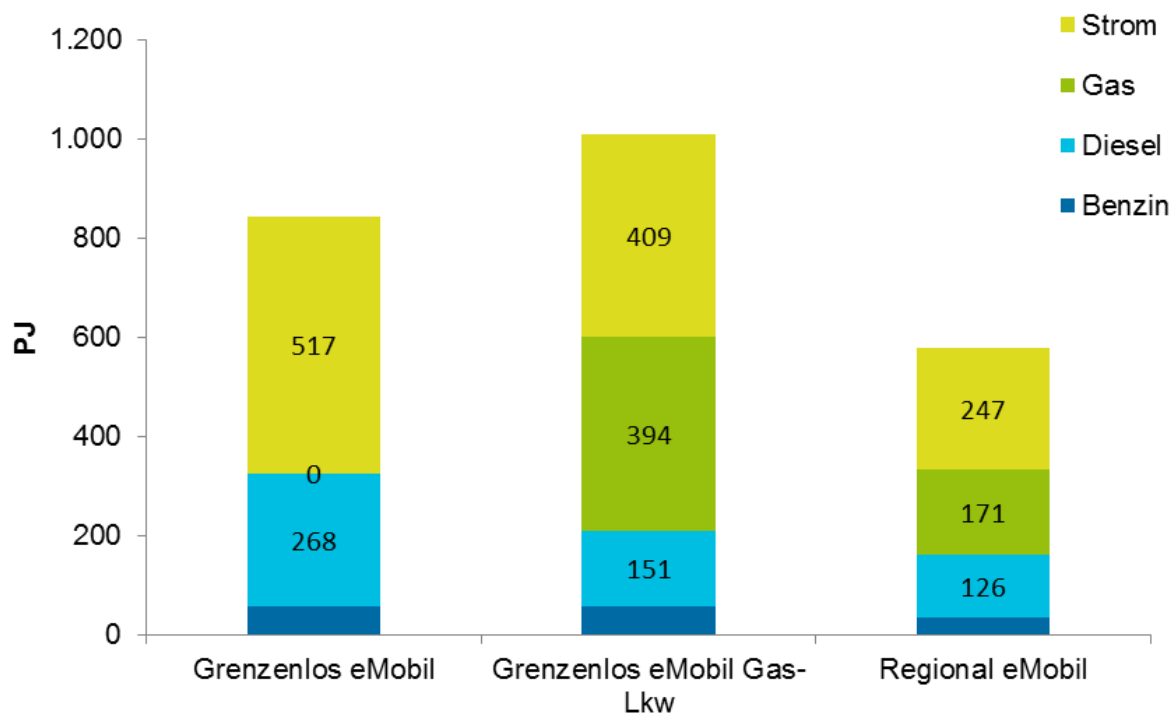
6.1. Einleitung und Vorgehen

Im Folgenden werden die CO₂-Emissionen im Jahr 2050 unter Berücksichtigung der Analysen zu den Wechselwirkungen von elektrischem Verkehr und Stromerzeugung (Kapitel 5) für die betrachteten *eMobil* Szenarien dargestellt. Es werden nur die direkten CO₂-Emissionen ohne die Vorketten der Primärenergieträger ausgewiesen, d. h. bei den fossilen Kraftstoffen lediglich die Emissionen der Verbrennung im Fahrzeug und beim Strom die Emissionen des Kraftwerksparks. Indirekte Emissionen aus der Fahrzeugherstellung, der Energieträgerbereitstellung, dem Bau von Kraftwerken, EE-Anlagen und der notwendigen Infrastruktur sowie aus Entsorgung und Recycling wurden in dem Vorhaben nicht betrachtet. Wie in Kapitel 4.8 beschrieben, bestehen bei Biokraftstoffen, aber auch bei fossilen Kraftstoffen große Unsicherheiten hinsichtlich der zukünftigen Vorkettenemissionen. Diese sind von einer Vielzahl von – häufig globalen – Rahmenbedingungen und Parametern abhängig, welche im Rahmen des Szenarioprozesses in dem Vorhaben *eMobil 2050* nicht eingehend beleuchtet wurden. In *PowerFlex* können aufgrund der Modelllogik der Brennstoffeinsatz und die CO₂-Emissionen für Backup-Kraftwerk und Importe nicht ermittelt werden. Um auch Unterschiede zwischen den Szenarien durch den zusätzlichen Einsatz des Backup-Kraftwerks und durch zusätzliche Importe und deren Auswirkung auf die CO₂-Emissionen zu berücksichtigen, mussten daher Annahmen zu deren spezifischen Emissionsfaktoren getroffen werden. Für die Importe wurde der durchschnittliche Emissionsfaktor des Vergleichslaufs unterstellt. Um für das Backup-Kraftwerk Emissionen ermitteln zu können, wurde angenommen, dass der Strom von einer Gasturbine bereitgestellt wird (450 g_{CO₂} / TWh). Dies soll jedoch keine Vorfestlegung auf diese Technologie als alleinige Möglichkeit darstellen, die Stromerzeugung in Stunden mit Backup-Kraftwerkseinsatz zu gewährleisten²⁹.

Zunächst werden die CO₂-Emissionen für den Fall dargestellt, dass keine Biokraftstoffe zum Einsatz kommen. Diese Betrachtungsweise ermöglicht den Vergleich zwischen den Ausgangsszenarien und den Sensitivitäten mit einem ausschließlichen Einsatz von Strom und strombasierten Kraftstoffen. Der Effekt des Einsatzes von Biokraftstoffen wird im Anschluss diskutiert. Zur besseren Einordnung der folgenden Berechnungen und Ergebnisse ist in Abbildung 6-1 der Endenergiebedarf des Verkehrssektors in den beiden Szenarien und in der Sensitivität mit Gas-Lkw nach Energieträgern im Jahr 2050 dargestellt.

²⁹ Für eine Diskussion der technischen Möglichkeiten der Stromerzeugung in Stunden mit Backupeinsatz, siehe Abschnitt 5.4.2.

Abbildung 6-1: Endenergiebedarf des Verkehrssektors im Jahr 2050



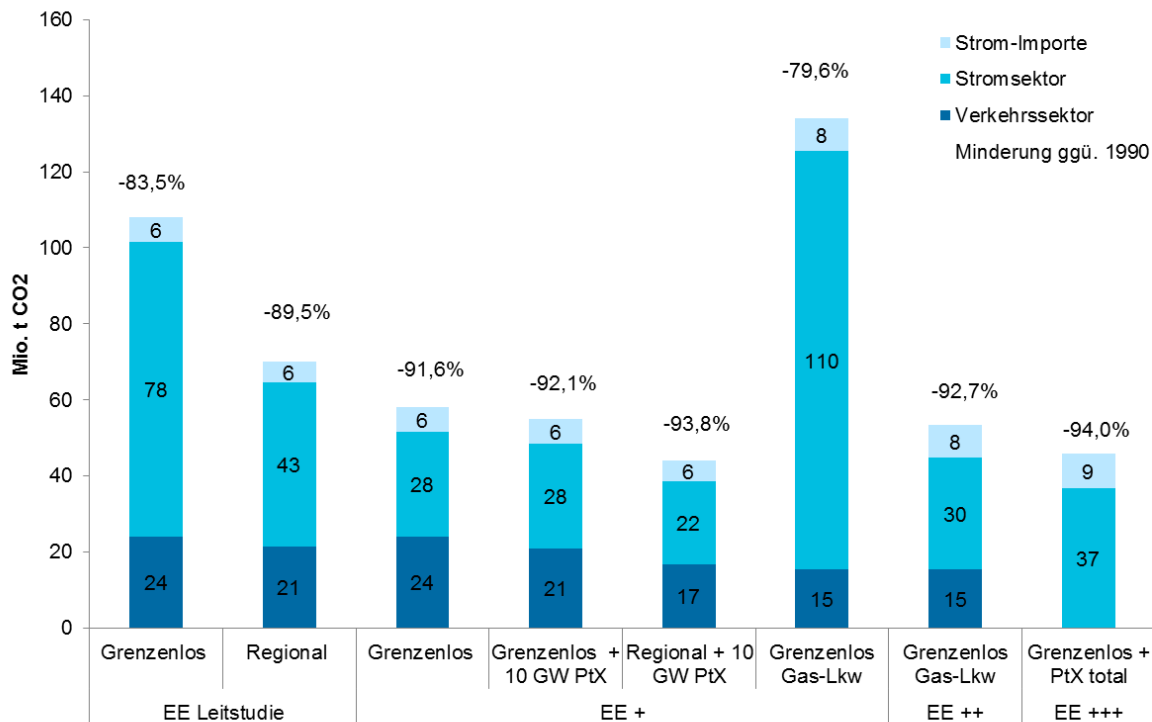
Quelle: Eigene Berechnungen

6.2. CO₂-Emissionen von Verkehrssektor und Stromsektor

Strom- und Verkehrssektor waren im Jahr 1990 zusammen für rund 50 % der Treibhausgasemissionen verantwortlich. Die direkten Emissionen des Verkehrssektors in Deutschland (Straßen-, Schienenverkehr und Binnenschifffahrt) betrugen im Jahr 1990 160 Mio. Tonnen CO₂; diejenigen des Stromsektors 456 Mio. Tonnen. Um die Emissionen in diesen beiden Sektoren bis zum Jahr 2050 um 80-95 % gegenüber 1990 zu reduzieren, dürften die beiden Sektoren zusammen demnach noch 31-123 Mio. Tonnen CO₂ emittieren.

Abbildung 6-2 zeigt die direkten Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor (Straßen-, Schienenverkehr und Binnenschifffahrt) und im gesamten Stromsektor für unterschiedliche Kombinationen von Endenergienachfrage des Verkehrs und Ausbau der erneuerbaren Energien. Mit dem gewählten Bilanzrahmen sind neben den direkten Emissionen im Verkehrssektor auch alle Emissionen berücksichtigt, die durch den starken Anstieg des elektrischen Verkehrs im Stromsektor mit auftreten. Auf Seiten des Verkehrssektors werden die beiden Szenarien *Grenzenlos eMobil* und *Regional eMobil* sowie verschiedenen Sensitivitäten zum Einsatz von Gas-Lkw und zum Einsatz strombasierter Kraftstoffe betrachtet. Diese werden auf Seiten des Stromsektors mit vier verschiedenen Ausbauszenarien der erneuerbaren Energien (*EE Leitstudie* bis *EE+++*) kombiniert, welche im Diagramm von links nach rechts aufsteigend angeordnet sind. Neben den in Deutschland auftretenden Emissionen sind auch die Emissionen der Strom-Importe ausgewiesen (siehe Abschnitt 6.1).

Zusätzlich ist für alle Szenarien die CO₂-Minderung gegenüber dem Jahr 1990 angegeben, welche von beiden Sektoren gemeinsam erzielt wird, wobei die Emissionen der Importe nicht berücksichtigt sind (um Konsistenz zur nationalen Treibhausgasberichterstattung sicherzustellen).

Abbildung 6-2: Direkte CO₂-Emissionen des Strom- und Verkehrssektors 2050

Quelle: Eigene Berechnungen

Bei den dargestellten Emissionen des Stromsektors handelt es sich um die *gesamten Emissionen* des Stromsektors, d. h. nicht nur die durch die Stromnachfrage des Verkehrssektors entstehenden Emissionen, sondern die Gesamtemissionen inklusive der Nachfrage der übrigen Sektoren. Die Stromnachfrage der übrigen Sektoren sowie der Ausbau des fossilen Kraftwerksparks sind jedoch in allen Szenarien identisch, so dass Unterschiede in den Emissionen des Stromsektors auf die beiden Faktoren *Stromnachfrage des Verkehrs* und *Ausbau erneuerbarer Energien (EE)* zurückzuführen sind. Unterschiede in den Emissionen des Verkehrssektors ergeben sich zum einen durch die unterschiedliche Endenergienachfrage zwischen den Szenarien *Regional eMobil*, *Grenzenlos eMobil* und der Sensitivität *Grenzenlos eMobil mit Gas-Lkw*, zum anderen aber auch dann, wenn fossile Kraftstoffe durch strombasierte Kraftstoffe ersetzt werden.

Die Gegenüberstellung macht deutlich, wie hoch der Einfluss der Stromnachfrage des Verkehrssektors auf die Emissionen im Stromsektor sein kann, wenn sich Elektromobilität in relevantem Umfang durchsetzt. Dies zeigt sich insbesondere beim Szenario *Grenzenlos eMobil*: Bei der Kombination eines an der Leitstudie orientierten Ausbaus der erneuerbaren Energien (*EE Leitstudie*) mit einer hohen Stromnachfrage aus dem Verkehr gemäß des Szenarios *Grenzenlos eMobil* sind die Emissionen des Stromsektors mit 84 Mio. Tonnen CO₂ (davon 6 Mio. Tonnen Importe) sehr hoch. Wie bereits in Abschnitt 5.4 dargestellt, entstehen im Vergleich zum Lauf ohne Stromnachfrage des Verkehrs zusätzliche Emissionen in Höhe von 52 Mio. Tonnen. Durch einen verstärkten Ausbau der erneuerbaren Energien (*EE +*) lassen sich die Emissionen im Stromsektor, die durch die zusätzliche Stromnachfrage des Verkehrssektors entstehen, wieder deutlich reduzieren. Im Szenario *Grenzenlos eMobil* sinken die Emissionen des deutschen Stromsektors von 78 auf 28 Mio. Tonnen und liegen damit nur 0,3 Mio. Tonnen höher als im Vergleichslauf ohne Stromnachfrage des Verkehrs.

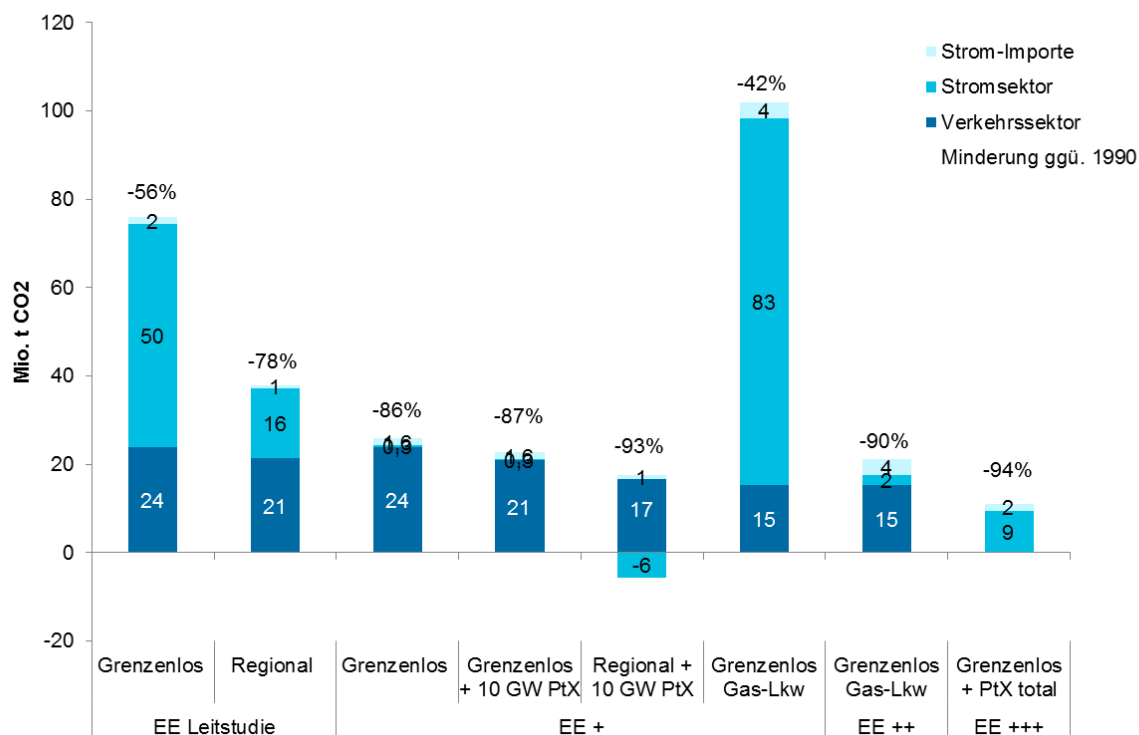
In allen Szenarien wird eine relevante CO₂-Emissionsminderung der beiden Sektoren erreicht. Den deutlicheren Minderungsbeitrag leistet der Stromsektor, aber auch der Verkehrssektor trägt deutlich zur Minderung der Emissionen bei. Zu beachten ist aber, dass hier der internationale Luft- und Seeverkehr nicht mit dargestellt sind, in welchen die CO₂-Minderung aus technischen Gründen, insbesondere aber auch angesichts eines prognostizierten starken Anstiegs der Verkehrsleistung, eine besondere Herausforderung darstellt.

6.3. CO₂-Emissionen von Verkehr und Differenzstrom

Betrachtet man nur die direkten Emissionen des Verkehrssektors (ohne Einsatz von Biokraftstoffen oder strombasierten Kraftstoffen), so liegen diese im Szenario *Grenzenlos eMobil* bei 24 Mio. Tonnen CO₂ und im Szenario *Regional eMobil* bei 21 Mio. Tonnen CO₂ und damit bei einer Minderung von 85 % bzw. 87% gegenüber dem Basisjahr 1990 (160 Mio. Tonnen). Anders stellt sich dies dar, wenn man auch die Wechselwirkung mit dem Stromsektor berücksichtigt.

Um dies zu verdeutlichen, ist in Abbildung 6-3 die Differenz der CO₂-Emissionen zum Vergleichslauf ohne die Berücksichtigung des elektrischen Verkehrs dargestellt. Dies entspricht der Betrachtungsweise in Kapitel 5.

Abbildung 6-3: CO₂-Emissionen von Verkehr und Differenzstrom 2050



Quelle: Eigene Berechnungen.

Die dargestellten Emissionen des Stromsektors lassen sich im Prinzip als diejenigen Emissionen interpretieren, welche bei Berücksichtigung der Stromnachfrage des Verkehrssektors in Relation zum Vergleichslauf entstehen. Diese Interpretation setzt allerdings die Annahmen voraus, dass (i) die Stromnachfrage des Verkehrssektors eine marginale zusätzliche Nachfrage zusätzlich zu einer bestehenden Stromnachfrage der anderen Sektoren darstellt und (ii) der zusätzliche Ausbau der erneuerbaren Energien über das im Vergleichslauf verwendete Ausbauszenario *EE Leitstudie* als

Resultat aus der wachsenden Stromnachfrage des Verkehrs geschieht. Zusätzlich ist die Minderung der CO₂-Emissionen gegenüber dem Jahr 1990 angegeben. Vergleichswert für 1990 ist dabei die Summe aus den Emissionen des Verkehrssektors (160 Mio. Tonnen) sowie den Emissionen der Stromnachfrage aus dem Verkehr (8 Mio. Tonnen).

Insgesamt zeigt sich: Ohne einen zusätzlichen Ausbau der erneuerbaren Energien über die Ziele der Leitstudie hinaus können die CO₂-Emissionen von Verkehr und Differenzstrom im Szenario *Grenzenlos eMobil* um 56 % und im Szenario *Regional eMobil* um 78 % reduziert werden. In beiden Szenarien, insbesondere aber im Szenario *Grenzenlos eMobil*, liegt diese Minderung damit unter dem sektorübergreifenden Ziel von 80-95 %. Jede Untererfüllung des sektorübergreifenden Ziels durch den Verkehrssektor muss durch eine Übererfüllung in einem anderen Sektor kompensiert werden. Orientiert man sich an der unteren Grenze der Zielspanne (80 %), so ist eine Kompensation durch andere Sektoren noch eher möglich. Bei einem sektorübergreifenden Ziel von 90-95 % muss jedoch auch der Verkehrssektor eine Minderung in dieser Größenordnung erzielen.

Dies kann durch einen Ausbau der erneuerbaren Energien gemäß dem Szenario *EE+* gewährleistet werden. Die Emissionen des Differenzstroms sinken in diesem Fall auf Null bzw. liegen im Szenario *Regional eMobil* sogar etwas niedriger als im Vergleichsfall. Bei diesem EE-Ausbau treten in begrenztem Umfang nicht integrierbare EE-Überschüsse auf. Diese könnten z.B. entweder exportiert werden oder aber für die Herstellung strombasierter Kraftstoffe genutzt werden. Die dadurch mögliche Substitution fossiler Kraftstoffe bringt nochmal eine zusätzliche Emissionsminderung, ohne dass dafür ein höherer EE-Ausbau notwendig ist – sie liegt allerdings nur in einer Größenordnung von 3-4 Tonnen (entspricht etwa einem Prozent). Allerdings müssen Erzeugungskapazitäten (Methanisierungsanlagen) im Umfang von 10 GW gebaut werden. Insgesamt ließen sich damit die Emissionen von Verkehr und Differenzstrom um 87 % bzw. 93 % reduzieren.

Optionen für eine noch weitergehende Minderung der CO₂-Emissionen sind ein stärkerer Einsatz strombasierter Kraftstoffe oder von Biokraftstoffen. Diese Optionen werden in den Abschnitten 6.6 und 6.7 diskutiert. Zunächst werden jedoch im Folgenden nochmal die Effekte der nachfrageseitigen Veränderungen diskutiert, d.h. der Unterschied zwischen den Szenarien *Grenzenlos eMobil* und *Regional eMobil* sowie die Sensitivität mit Gas-Lkw.

6.4. Grenzenlos eMobil und Regional eMobil im Vergleich

Auf Seiten des Verkehrssektors sind die Emissionen in den Szenarien *Regional eMobil* und *Grenzenlos eMobil* in einer ähnlichen Größenordnung, wenngleich die Emissionen des Szenarios *Grenzenlos eMobil* etwas höher liegen. Grund dafür sind zwei gegenläufige Effekte: Einerseits entstehen im Szenario *Grenzenlos eMobil* im Vergleich zum Szenario *Regional eMobil* auf Grund des Einsatzes von Oberleitungs-Lkw statt Gas-Lkw weniger direkte Emissionen im Güterverkehr; d. h. Emissionen werden aus dem Verkehrssektor in den Stromsektor *verschoben*. Dieses wird jedoch durch den Effekt überkompensiert, dass die gesamte Endenergienachfrage im Szenario *Grenzenlos eMobil* deutlich höher ist.

Auf Seiten des Stromsektors lässt sich im Szenariovergleich feststellen, dass im Szenario *Regional eMobil* die Stromnachfrage und damit auch die Emissionen im Stromsektor geringer sind als im Szenario *Grenzenlos eMobil*. Beim EE-Ausbau nach der Leitstudie ist der Unterschied zwischen den beiden Szenarien mit 37 Mio. Tonnen dabei deutlich höher als beim Ausbauszenario *EE+*, da hier deutlich mehr fossile Kraftwerke zum Einsatz kommen müssen, um die Stromnachfrage zu decken.

Werden zusätzlich EE-Überschüsse zur Herstellung strombasierter Kraftstoffe genutzt, so können durch die Substitution fossiler Kraftstoffe die Emissionen im Szenario *Grenzenlos eMobil* nochmals

um 3,1 Mio. Tonnen gesenkt werden. Im Szenario *Regional eMobil* können bei gleicher installierter Leistung von Elektrolyseuren und gleichem EE-Ausbau mehr strombasierter Kraftstoffe hergestellt werden und der Minderungsbeitrag der strombasierten Kraftstoffe liegt bei 4,7 Mio. Tonnen. Grund dafür ist, dass im Szenario *Regional eMobil* die Stromnachfrage der Elektrofahrzeuge geringer ist als im Szenario *Grenzenlos eMobil* und dadurch bei gleichem EE-Ausbau mehr Überschüsse für die Produktion strombasierter Kraftstoffe zur Verfügung stehen. Alternativ zur stärkeren Nutzung von EE-Überschüssen in Form strombasierter Kraftstoffe würde jedoch in dem Szenario *Regional eMobil* auch ein geringerer EE-Ausbau als im Szenario *EE+* ausreichen, um eine weitgehende Dekarbonisierung von Strom- und Verkehrssektor sicherzustellen.

6.5. Oberleitungs-Lkw und Gas-Lkw im Vergleich

Einen Vergleich zwischen den beiden Technologie-Optionen *Oberleitungs-Lkw* und *Gas-Lkw mit strombasiertem Methan* zur Minderung der Treibhausgasemissionen des Schwerlastverkehrs bietet die Sensitivität mit Gas-Lkw. Bei einem EE-Ausbau gemäß des Szenarios *EE+* sind die Oberleitungs-Lkw klar im Vorteil gegenüber den Gas-Lkw: Der Wirkungsgrad Strom → Oberleitungs-Lkw ist um ein Vielfaches besser als der Wirkungsgrad Strom → strombasiertes Methan → Gas-Lkw.

Wenn man allerdings die erneuerbaren Energien gemäß dem Szenario *EE++* ausbaut, so liegen die Emissionen in einer ähnlichen Größenordnung. Dies bedeutet aber, dass das EE-Dargebot über das Szenario *EE+* hinaus nochmals um fast 25 % erhöht werden muss. Für eine umfassende Bewertung der beiden Optionen *Oberleitungs-Lkw* und *Gas-Lkw* wäre es nötig, die Betrachtung um die jeweils nötige Infrastruktur und Fahrzeuge zu erweitern. Beide Technologieoptionen sind mit erheblichen infrastrukturellen Veränderungen verbunden. Auf der einen Seite sind dies die Ausstattung des Autobahnnetzes mit Oberleitungen und die Entwicklung entsprechender Serienfahrzeuge; auf der anderen Seite stehen die Gas-Lkw, Methanisierungsanlagen und Verteilinfrastruktur für Methan, sowie der zusätzlich notwendige EE-Ausbau. Im Rahmen von *eMobil 2050* wurde die Realisierbarkeit der beiden Optionen hinsichtlich technischer und ökonomischer Aspekte jedoch nicht näher untersucht. Ebenfalls nicht berücksichtigt wurden mögliche Rückspeisemöglichkeiten von Oberleitungs-Lkw, was deren Flexibilität vergrößern würde. Der Vergleich der beiden Technologieoptionen beschränkt sich im Rahmen dieses Vorhabens auf die möglichen Auswirkungen auf die Stromerzeugung. Grundsätzliche Handlungsempfehlungen lassen sich daraus mit Blick auf die beiden Optionen angesichts der eingeschränkten Betrachtung nicht ableiten.

6.6. CO₂-Emissionen bei Vollversorgung mit strombasierten Kraftstoffen

Würde theoretisch die gesamte Endenergienachfrage des Verkehrssektors über die direkte Nutzung von Strom und strombasierte Kraftstoffe gedeckt werden, so wäre nochmals ein deutlich über das Szenario *EE+* hinausgehender Ausbau der erneuerbaren Energien notwendig, wenn die Treibhausgasemissionen begrenzt bleiben sollen, wie das Szenario *Grenzenlos eMobil+PtX total* zeigt. Selbst im Ausbauszenario *EE+++*, in welchem das EE-Dargebot nochmals um 40 % höher ist als im Szenario *EE+* und beinahe doppelt so hoch wie im Szenario *EE Leitstudie*, liegen die CO₂-Emissionen von Verkehrs- und Stromsektor aber noch bei zusammen 37 Mio. t. Damit sind sie zwar 12 Mio. t niedriger als im Szenario *Grenzenlos eMobil + 10 GW PtX*, bei dem nur die Überschüsse für die Herstellung strombasierter Kraftstoffe genutzt werden. Es ist jedoch fraglich, ob dieses Szenario angesichts der benötigten zusätzlichen EE-Kapazitäten eine effiziente und realisierbare Strategie zur Minderung der Treibhausgasemissionen im Verkehr darstellt.

Als weitere Strategie zur Vollversorgung des Verkehrssektors mit strombasierten Kraftstoffen wird auch diskutiert, strombasierte Kraftstoffe im Ausland an besonders geeigneten Orten für EE-Anlagen zu produzieren und zu importieren. Diese Option wurde in dem Vorhaben *eMobil 2050*

nicht näher betrachtet, da der Fokus auf den Wechselwirkungen mit der Stromerzeugung in Deutschland lag.

6.7. CO₂-Emissionen beim Einsatz von Biokraftstoffen

Bilanziert man gemäß der Methodik der Treibhausgasinventare die direkten Emissionen von Biokraftstoffen mit Null, so lassen sich in allen Szenarien die direkten Emissionen im Jahr 2050 durch den Einsatz von Biokraftstoffen um zusätzlich rund 11 Mio. Tonnen reduzieren.

Die Bilanzierung von Biokraftstoffen mit Nullemissionen stellt jedoch eine Vereinfachung dar und kann zu falschen Schlussfolgerungen verleiten, da wesentliche Effekte wie z. B. die Emissionen aus Anbau, Verarbeitung, und Landnutzungsänderungen) ignoriert werden. Dies gilt insbesondere, wenn es sich um landbasierte Biokraftstoffe handelt, da direkte und indirekte Landnutzungsänderungen dazu führen können, dass die Gesamtbilanz von Biokraftstoffen sogar schlechter ausfällt als diejenige der fossilen Referenz. Für die Szenarien wurde daher angenommen, dass ausschließlich Biokraftstoffen aus Abfall- und Reststoffen eingesetzt werden, die in ihren Mengenpotenzialen jedoch stark begrenzt sind. Auch die Nutzung von Abfall- und Reststoffen ist jedoch zumeist mit Emissionen verbunden: So kann beispielsweise die Nutzung von Waldrestholz zu einer Reduktion des Bodenkohlenstoffs und damit zu CO₂-Emissionen führen (Baral & Malins, 2014b). Auch der logistische Aufwand und damit die Transportemissionen bis zur Herstellung der Kraftstoffe können höher ausfallen als bei den derzeit vorwiegend eingesetzten Biokraftstoffen aus Anbaubiomasse (Edwards et al., 2013).

7. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Hintergrund und Ziele des Vorhabens

Der Klimaschutz erfordert sektorübergreifend bis zum Jahr 2050 eine erhebliche Minderung der nationalen Treibhausgasemissionen. Insbesondere im Verkehrssektor stellt die Dekarbonisierung eine große Herausforderung dar, welche unter anderem den zunehmenden Einsatz alternativer Antriebskonzepte und Kraftstoffe erfordert. Die verstärkte Elektrifizierung des Verkehrs, insbesondere im Kontext batteriebetriebener Fahrzeuge, bietet perspektivisch die Möglichkeit große Teile des Verkehrs, unter der Voraussetzung einer zunehmend auf erneuerbaren Energien basierenden Stromerzeugung, ohne den Einsatz fossiler Energieträger zu versorgen.

Ziel des Forschungsvorhabens *eMobil 2050* ist es, mögliche Entwicklungspfade einer zunehmenden Elektrifizierung des Verkehrs vor dem Hintergrund weiterer Veränderungen im Verkehrssektor bis zum Jahr 2050 aufzuzeigen sowie die Wechselwirkungen mit dem Stromsektor zu beleuchten und die mögliche Treibhausgasmindern zu quantifizieren. Die energiewirtschaftlichen Analysen zeigen auf, welche Anpassungen im Stromsektor notwendig sind, um eine möglichst treibhausgasneutrale Energieversorgung sicherzustellen. Im Vergleich zu bisherigen Studien, werden in *eMobil 2050* erstmalig alle aktuell und perspektivisch elektrisch betriebenen Verkehrsmittel und die daraus resultierende Stromnachfrage in den Analysen berücksichtigt sowie deren Einfluss auf die Stromwirtschaft vor dem Hintergrund unterschiedlicher Entwicklungen im Verkehrssektor quantifiziert.

Methodisches Vorgehen

Die Wechselwirkung von Verkehrs- und Energiesektor wird mit zwei Modellen des Öko-Instituts abgebildet, welche im Rahmen des Projekts *eMobil 2050* maßgeblich weiterentwickelt wurden. Die Entwicklung des Fahrzeugbestands und die Auswirkungen einer zunehmenden Elektrifizierung des Verkehrs auf die Endenergienachfrage sowie die verkehrsbedingten Treibhausgasemissionen, werden im Projekt *eMobil 2050* mit dem Verkehrsmodell *TEMPS* quantifiziert. Das Strommarktmodell *PowerFlex* simuliert die Auswirkungen der zusätzlichen Stromnachfrage des Verkehrs auf den Kraftwerkseinsatz für unterschiedliche Ausbauszenarien und ermöglicht somit Rückschlüsse auf die Struktur der zukünftigen Stromerzeugung.

Die Entwicklung von Antriebstechnologien und Kraftstoffen stellen zentrale Bestandteile einer konsistenten Szenarioausgestaltung dar. Unter Einbindung von Fachexperten wurden daher umfassende Technologiedatenbanken entwickelt, welche Rückschlüsse auf mögliche Entwicklungen konventioneller und alternativer Straßenfahrzeuge erlauben und plausible Prozessketten für alternative Kraftstoffe darstellen.

Die eigentlichen Szenarien wurden im Rahmen eines Szenario-Prozesses von Vertreter aus Wissenschaft und Wirtschaft konzipiert. Ausgehend von der Identifikation wichtiger Einflussgrößen und Trends wurden mögliche Zukunftsbilder definiert, die schließlich in zwei konkrete Szenarien mündeten, die sowohl Veränderungen in der Verkehrsnachfrage als auch im Technologieeinsatz abbilden. Beide Szenarien sind dabei durch eine sehr starke Elektrifizierung des Verkehrs bis zum Jahr 2050 gekennzeichnet.

Die Auswirkungen der verkehrsbedingten Stromnachfrage auf die Gesamtstromerzeugung wurden schließlich im Strommarktmodell *PowerFlex* unter Berücksichtigung von Ladeinfrastruktur, Ladeverhalten und Fahrzeugeinsatz für unterschiedliche Entwicklungen des Ausbaus erneuerbarer Energien abgebildet. Neben der direkten Stromnutzung im Verkehr wird ergänzend auch die Nutzung von strombasierten Kraftstoffen berücksichtigt.

Die Ergebnisse der Strommarktmodellierung ermöglichen es schließlich, die Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Verkehrs- und Energiesektors unter Berücksichtigung einer zunehmenden Elektrifizierung des Verkehrs zu quantifizieren und Umsetzungsmöglichkeiten aufzuzeigen, die einen hohen Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050 sicherstellen können.

Ergebnisse

Ergebnis des Szenarioprozesses war die Definition von zwei konkreten Szenarien, die die mögliche langfristige Entwicklung des Verkehrssektors unter Berücksichtigung übergeordneter Trends und mit einem besonderen Schwerpunkt auf der Rolle des elektrischen Verkehrs abbilden und somit die Grundlage für die anschließende Betrachtung der Wechselwirkungen zwischen Verkehrs- und Stromsektor bilden.

Das Szenario *Grenzenlos eMobil* beschreibt eine Entwicklung, in der sich die Verkehrsleistung im Personenverkehr auf dem heutigen Niveau stabilisiert und nur geringfügige Veränderungen im Modal Split bis zum Jahr 2050 auftreten. Das Güterverkehrsaufkommen steigt weiter deutlich an und die Güterverkehrsleistung erreicht 780 Mrd. Tonnenkilometer im Jahr 2050. Dabei erreicht der Straßengüterverkehr auch im Modal Split weitere Zugewinne. Im Szenario *Regional eMobil* kommt es dagegen zu einer Trendwende und die Verkehrsleistung reduziert sich gegenüber 2010 um 23 % bis zum Jahr 2050. Der Modal Split verschiebt sich in diesem Zeitraum zunehmend vom eigenen Pkw zu geteilter Nutzung, dem öffentlichen, Rad- und Fußverkehr. Der Güterverkehr steigt in diesem Szenario zwar zunächst noch weiter an, der zunehmende Strukturwandel führt jedoch langfristig zu einem Rückgang auf 532 Mrd. Tonnenkilometer. Gleichzeitig findet eine deutliche Verlagerung von Verkehren von der Straße auf Schiene und Binnenschiff statt.

In beiden Szenarien steigt der Anteil elektrischer Pkw im Betrachtungszeitraum an. In den Jahren 2020 und 2030 werden mit 1 Million bzw. 6 Millionen Elektrofahrzeugen die Ziele der Bundesregierung erreicht. Ab dem Jahr 2040 werden fast ausschließlich elektrische Pkw zugelassen und im Jahr 2050 werden mehr als 90 % der Fahrleistung durch Elektrofahrzeuge erbracht. In beiden Szenarien dominieren batterieelektrische Fahrzeuge. Im Szenario *Grenzenlos eMobil* liegt der Anteil von Plug-In-Hybridfahrzeugen und Fahrzeugen mit Range Extender angesichts eines höheren Anteils von langen Strecken grundsätzlich höher als im Szenario *Regional eMobil*. Während sich bei leichten Nutzfahrzeugen ebenfalls batterieelektrische Antriebskonzepte in beiden Szenarien durchsetzen und ab 2040 zur dominierenden Technologie entwickeln, spielen batterieelektrische Antriebe bei schweren Nutzfahrzeugen auch langfristige nur eine untergeordnete Rolle. Im Szenario *Grenzenlos eMobil* kommen jedoch ab 2030 zunehmend oberleitungsgebundene Fahrzeuge im Fernverkehr zum Einsatz. Eine zunehmende Bedeutung von gasbetriebenen Nutzfahrzeugen wird hingegen im Szenario *Regional eMobil* angenommen.

Neben dem verstärkten Einsatz elektrischer Fahrzeugvarianten, können auch die konventionellen verbrennungsmotorischen Fahrzeuge bis zum Jahr 2050 ihren spezifischen Energieverbrauch in beiden Szenarien noch deutlich reduzieren. Der Kraftstoffverbrauch von verbrennungsmotorischen Pkw verringert sich gegenüber 2010 um mehr als 50 % bis zum Jahr 2050. Im selben Zeitraum kann auch bei verbrennungsmotorischen Nutzfahrzeugen der Energiebedarf um 30 bis 40 % reduziert werden.

Als Konsequenz der veränderten Verkehrsleistung, der deutlichen Effizienzsteigerung von konventionellen Fahrzeugen und insbesondere des zunehmenden Anteils von elektrisch betriebenen Fahrzeugen geht die Endenergienachfrage des Verkehrs in beiden Szenarien bis zum Jahr 2050 deutlich zurück. In *Grenzenlos eMobil* sinkt sie gegenüber 2010 um 66 % auf 844 PJ und in *Regional eMobil* um 77 % auf 581 PJ. In beiden Szenarien zeigt sich zudem eine deutliche Veränderung im Energieträgermix. Im Szenario *Grenzenlos eMobil* hat Strom im Jahr 2050 einen Anteil von über 60 % am Endenergiebedarf des Verkehrssektors. Im Szenario *Regional eMobil* ist

der Stromanteil mit 43 % etwas niedriger, da hier keine Oberleitungs-Lkw zum Einsatz kommen. (Zum Vergleich: im Jahr 2010 betrug der Stromanteil am Endenergiebedarf des Verkehrs weniger als 2 %). Unter der Berücksichtigung von Ladeverlusten resultiert aus der zunehmenden Bedeutung von elektrischen Fahrzeugen eine Gesamtstromnachfrage im Szenario *Grenzenlos eMobil* von 152 TWh im Jahr 2050. Im Szenario *Regional eMobil* kann der Anstieg der Stromnachfrage des Verkehrs angesichts der deutlich geringeren Verkehrsleistung auf 75 TWh bis zum Jahr 2050 begrenzt werden. Im Jahr 2030 fällt die Stromnachfrage des Verkehrs angesichts einer deutlich geringeren Anzahl elektrischer Fahrzeuge mit etwa 30 TWh in beiden Szenarien hingegen noch relativ moderat aus. Der Hauptteil der Stromnachfrage geht zu diesem Zeitpunkt noch vom elektrischen Schienenverkehr aus.

Die Strommarktmodellierung berücksichtigt den zunehmenden Ausbau der erneuerbaren Energien gemäß der BMU-Leitstudie bis 2050. Die Ergebnisse zeigen, dass die (zusätzliche) Stromnachfrage des Verkehrs im Jahr 2030 zwar dank der Flexibilität von Elektrofahrzeugen teilweise durch die Integration von ansonsten nicht genutzten erneuerbaren Energien gedeckt werden kann und andere Stromspeicher entlastet werden können, dass der Großteil der Stromnachfrage aber durch zusätzliche Betriebsstunden konventioneller Kraftwerke gedeckt wird und somit im Energiesystem zusätzliche Treibhausgasemissionen in der Größenordnung von 16 Mio. Tonnen verursacht.

Der weitere Anstieg des Strombedarfs des Verkehrs nach 2030 unterscheidet sich zwischen den beiden Szenarien deutlich. Im Szenario *Grenzenlos eMobil* beläuft sich die Nachfrage aus dem Verkehrssektor im Jahr 2050 auf über ein Viertel der Gesamtstromnachfrage. Gängige Ausbauszenarien der erneuerbaren Energien, wie beispielsweise in der BMU-Leitstudie, decken diesen zusätzlichen Bedarf nicht ab. Dies wird schon allein bei einem reinen Mengenvergleich ohne Berücksichtigung der Schwankungen von Stromangebot und -nachfrage sichtbar. Die gesamte Stromnachfrage im Jahr 2050 im Szenario *Grenzenlos eMobil* abzüglich der Importe und must-run Kraftwerke³⁰ liegt bei 473 TWh und damit deutlich höher als das EE-Dargebot im Ausbauszenario der BMU-Leitstudie (347 TWh). Dies führt dazu, dass im Szenario *Grenzenlos eMobil* die erneuerbaren Energien fast vollständig integriert werden, sich die Auslastung konventioneller Kraftwerke³¹ erhöht, und in ca. 800 Stunden des Jahres die Stromnachfrage durch das inländische Angebot nicht gedeckt werden kann. Die zusätzliche Stromnachfrage ist im Falle eines unveränderten Kraftwerkspark mit zusätzlichen Treibhausgasemissionen im Energiesektor von 52 Mio. Tonnen verbunden. Anders als im Szenario *Grenzenlos eMobil* stellt sich die Situation im Szenario *Regional eMobil* dar. Angesichts der geringeren Stromnachfrage des Verkehrs kann in diesem Szenario der zusätzliche Einsatz fossiler Kraftwerke beschränkt werden und der Großteil der zusätzlichen Stromnachfrage kann – auch ohne einen über die BMU-Leitstudie hinausgehenden Ausbau der Kapazitäten – durch zuvor nicht genutzte erneuerbare Energien gedeckt werden. Entsprechend steigen die mit der zusätzlichen Stromerzeugung verbundenen Treibhausgasemissionen in diesem Falle lediglich um etwa 17 Mio. Tonnen an. Allerdings kann die Stromnachfrage auch in diesem Szenario nicht zu allen Zeitpunkten ohne Importe oder zusätzliche Stromerzeugungskapazitäten gedeckt werden.

Um die Stromnachfrage aus dem Verkehrssektor zu decken und die CO₂-Emissionen im Stromsektor durch die zusätzliche Stromnachfrage nicht weiter zu erhöhen, sind insbesondere im Szenario *Grenzenlos eMobil* erhebliche zusätzliche EE-Kapazitäten notwendig. Dass die Kombination von elektrischem Verkehr und erneuerbaren Energien möglich ist, zeigt das

³⁰ must-run Kraftwerke, wie z. B. Gichtgas oder Müllverbrennungsanlagen, zeichnen sich durch eine vorgegebene Stromeinspeisung aus, die sich aus dem jeweils vorgelagerten Prozess ableitet.

³¹ Bei den konventionellen Kraftwerken handelt es sich dabei ausschließlich um solche Kraftwerke, die bereits heute existieren oder im Bau sind.

Ausbauszenario *EE+*. Bei einem Ausbau der erneuerbaren Energien gemäß dem Szenario *EE+* steht ein EE-Dargebot in Höhe von 475 TWh zur Verfügung. Das EE-Dargebot entspricht damit ziemlich genau der Stromnachfrage, welche nach Abzug von Importen und must-run Kraftwerken zu decken ist. Wäre die Stromnachfrage beliebig flexibel, so kämen bei diesem Szenario demnach keine fossilen Kraftwerke mehr zum Einsatz. Da Stromnachfrage und -angebot trotz Flexibilisierung der Stromnachfrage zeitlich nicht vollständig in Übereinstimmung gebracht werden können, und Speicherkapazität nur in begrenzter Menge zur Verfügung stehen, lassen sich die erneuerbaren Energien nicht vollständig integrieren, und fossile Kraftwerke kommen weiterhin zum Einsatz. Sowohl EE-Überschüsse als auch der Einsatz fossiler Kraftwerke sind jedoch stark begrenzt. Die Überschüsse liegen im Jahr 2050 bei 10 % des EE-Dargebots und die Treibhausgasemissionen für die zusätzliche Stromerzeugung im Szenario *Grenzenlos eMobil* können von 52 Mio. Tonnen (ohne zusätzliche EE-Kapazitäten) auf 1,9 Mio. Tonnen reduziert werden. Noch weiter reduzieren ließen sich die Emissionen im Jahr 2050 durch einen weiteren EE-Ausbau (welcher aber wiederum zu zusätzlichen EE-Überschüssen führt), durch zusätzliche Speicher oder durch eine weitere Flexibilisierung der Stromnachfrage. Verbleibende EE-Überschüsse können z. B. exportiert werden oder zur Herstellung strombasierter Energieträger dienen.

Eine Voraussetzung für die Nutzung der erneuerbaren Energien in den Anwendungssektoren ist die Flexibilität der Stromnachfrage. Die Flexibilität der batteriebetriebenen Elektrofahrzeuge im Jahr 2050 ist in den Szenarien hoch: Die Fahrzeuge sind während der Standzeiten meist netzgekoppelt und alle Nutzer von batterieelektrischen Fahrzeugen akzeptieren Lastmanagement bei der Batterieladung, sobald die Batterie bis zu einem Mindestladestand von 50 km Reichweite aufgeladen ist. Eine weitere Flexibilisierung auf Seiten der Nutzer durch den Verzicht auf den Mindestladestand liefert nur einen geringen Beitrag zur Integration zusätzlicher erneuerbarer Energien. Die in *eMobil 2050* modellierte Flexibilität durch ein optimiertes Lademanagement kann daher eher als Obergrenze des nutzbaren Flexibilitätsbeitrags der Fahrzeuge interpretiert werden. Die Elektrofahrzeuge sind dabei nicht die einzigen flexiblen Verbraucher, die ihre Stromnachfrage an das Angebot anpassen können: In beiden Szenarien wird auch Lastmanagement für große Stromverbraucher in der Industrie abgebildet. Weitere – sowohl verbrauchsseitige wie angebotsseitige – Flexibilität wird dem System von Pumpspeicherkraftwerken bzw. Speicherwasserkraftwerken in Deutschland und Skandinavien zur Verfügung gestellt.

In beiden Szenarien wird jedoch auch deutlich, dass neben der Elektrifizierung auch bei niedriger Verkehrsnachfrage im bodengebundenen Verkehr technisch bedingt weiterhin gasförmige oder flüssige Kraftstoffe zum Einsatz kommen. Eine Minderung der verkehrsbedingten Treibhausgasemissionen, die über das Potenzial der Elektrifizierung von Fahrzeugen hinausgeht, erfordert den zusätzlichen Einsatz von gasförmigen oder flüssigen, treibhausgasarmen Energieträgern im Verkehrssektor. Stehen nachhaltige Biokraftstoffe nur begrenzt zur Verfügung, ist die Nutzung strombasierter Energieträger eine Möglichkeit, um fossile Kraftstoffe zu substituieren. Durch die Nutzung von EE-Überschüssen zu deren Herstellung können Treibhausgasemissionen reduziert werden. Die Voraussetzung dafür ist allerdings, dass der Energieaufwand für Produktion, Kohlenstoffbereitstellung und Verteilung der Energieträger möglichst treibhausgasneutral ist und die Funktion der Anlagen zur Herstellung strombasierter Kraftstoffe so flexibel ausgelegt ist, dass sie die EE-Überschüsse tatsächlich nutzen können und in anderen Betriebsstunden nicht die Stromproduktion fossiler Kraftwerke erhöhen.

Da Überschüsse diskontinuierlich und in wenigen Stunden des Jahres in großem Umfang anfallen, würde eine vollständige Nutzung der Überschüsse eine entsprechend hohe installierte Leistung an Elektrolyseuren mit teils sehr geringen Volllaststunden voraussetzen. Mit 10 GW_{el} installierter Leistung an Elektrolyseuren, welche im Szenario *Grenzenlos eMobil* unter der Bedingung von durchschnittlich mindestens 2.000 Volllaststunden als plausible Größenordnung ermittelt wurde,

lassen sich im Szenario *Grenzenlos eMobil* rund zwei Drittel der EE-Überschüsse (31 TWh) zur Herstellung strombasierter Kraftstoffe nutzen, was 11,8 TWh (42,4 PJ) Flüssigkraftstoffen entspricht. Damit lassen sich 13 % der in diesem Szenario verbleibenden Nachfrage nach Kohlenwasserstoffen für den Straßenverkehr und die Binnenschifffahrt decken. Es zeigt sich also, dass sich durch die Herstellung der strombasierten Energieträger die Flexibilität des Energiesektors erhöht und ansonsten (zumindest inländisch) ungenutzte erneuerbare Energien in das Energiesystem integriert werden können. Es ist allerdings davon auszugehen, dass relevante Überschüsse an erneuerbarem Strom, die eine wirtschaftliche Produktion strombasierter Energieträger ohne Erhöhung der Laststunden fossiler Kraftwerke zulassen, erst mittelfristig zu erwarten sind. Daher ist die Produktion dieser Kraftstoffe in dem Szenario erst nach 2030 angedacht. Kurzfristig kann es allerdings durchaus regional zu einer Kombination aus Erzeugungskapazitäten und Netzengpässen kommen, die den Einsatz entsprechender Produktionsanlage sinnvoll erscheinen lassen.

Für eine darüber hinaus gehende Versorgung des Verkehrs mit strombasierten Kraftstoffen wäre ein zusätzlicher EE-Ausbau – in Deutschland oder im Ausland – notwendig, um zu verhindern, dass durch die Nachfrage aus dem Verkehrssektor eine höhere Auslastung fossiler Kraftwerke und damit höhere Treibhausgasemissionen resultieren. Würde man die im Szenario *Grenzenlos eMobil* verbleibende Nachfrage nach gasförmigen und flüssigen Kraftstoffen vollständig mit strombasierten Kraftstoffen decken, so entstünde ein Strombedarf in Höhe von fast 400 TWh für den Verkehr und die Gesamtstromnachfrage würde sich im Jahr 2050 nahezu verdoppeln. Die Nachfrage aus Luft- und Seeverkehr ist dabei noch nicht berücksichtigt.

Insbesondere durch den zunehmenden Einsatz elektrischer Fahrzeuge, aber auch durch die Effizienzsteigerung konventioneller können die direkten Treibhausgasemissionen des Verkehrs (ohne Berücksichtigung der Emissionen aus der Fahrzeugherstellung und -entsorgung sowie der Vorkettenemissionen der Kraftstoffe sowie ohne Luft- und Seeverkehr) in beiden Szenarien bis zum Jahr 2050 deutlich reduziert werden. Im Szenario *Grenzenlos eMobil* sinken sie gegenüber dem Basisjahr 1990 um 85 % (136 Mio. Tonnen). Im Szenario *Regional eMobil* kann trotz geringerer Elektrifizierung im Straßengüterverkehr aufgrund eines deutlichen Rückgangs der Verkehrsleistung und der Verlagerung von Verkehren ein noch deutlicherer Rückgang um 87 % (139 Mio. Tonnen) erzielt werden. Durch die zunehmende Elektrifizierung des Verkehrs können jedoch zusätzliche Emissionen bei der Stromerzeugung entstehen, was eine Betrachtung der gesamten Treibhausgasemissionen von Verkehrs- und Stromsektor nahelegt. Unter der Rahmenbedingung einer nahezu vollständigen Deckung des Strombedarfs von elektrischem Verkehr durch erneuerbaren Strom sinken die Treibhausgasemissionen von Verkehrs- und Stromsektor bis 2050 gegenüber dem Vergleichsjahr 1990 um 92 % im Szenario *Grenzenlos eMobil* und um 94 % im Szenario *Regional eMobil*. Die Gesamtemissionen des Stromsektors würden sich in diesem Fall von 456 Mio. Tonnen im Jahr 1990 – trotz der zusätzlichen Stromnachfrage des Verkehrs – auf etwa 28 Mio. Tonnen im Jahr 2050 reduzieren. Ohne eine zusätzliche Ausweitung der EE-Kapazitäten entsprechend der Stromnachfrage des Verkehrs lägen die Treibhausgasemissionen im Jahr 2050 deutlich höher und die Treibhausgasminderung würde sich auf 83,5 % im Szenario *Grenzenlos eMobil* bzw. 89,5 % im Szenario *Regional eMobil* reduzieren.

Schlussfolgerungen

Die beiden Szenarien zeigen zwei mögliche Entwicklungen des Verkehrssektors bis zum Jahr 2050 unter der Prämisse einer äußerst erfolgreichen Entwicklung elektrischer Antriebe auf. Während die Entwicklung der Verkehrsnachfrage im Szenario *Grenzenlos eMobil* in ähnlichen Größenordnungen wie in anderen Szenarien liegen, weicht das Szenario *Regional eMobil* durch eine deutliche Veränderung in der Verkehrsnachfrage von gängigen Szenarien ab und geht von

einem deutlichen Rückgang der Verkehrsleistung und einer Verlagerung auf energieeffizientere Verkehrsmittel aus.

Im Vergleich mit anderen Szenarien machen sich die besonders ambitionierten Annahmen bezüglich der Elektrifizierung der Fahrzeugantriebe bei der Entwicklung des Endenergiebedarfs bemerkbar, welche in beiden Szenarien teilweise deutlich unter den Werten aus Vergleichsstudien liegt und einen wesentlich höheren Stromanteil beinhaltet.

In Bezug auf die Ziele der Bundesregierung bedeutet dies, dass das Ziel einer Minderung des Endenergiebedarf im nationalen Verkehr um 10 % bis 2020 und 40 % bis 2050 gegenüber dem Basisjahr 2005 in beiden Szenarien deutlich übererfüllt wird. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die ursprüngliche Zielsetzung der Bundesregierung auf der Annahme basiert, dass der Einsatz von Biokraftstoffen einen wesentlichen Beitrag zum Klimaschutz leisten kann, und daher eine Minderung des Endenergiebedarfs von 40 % zur Erreichung der Klimaschutzziele ausreicht. Aus heutiger Perspektive ist ein entsprechendes Potenzial an nachhaltig erzeugter Biomasse für den Einsatz als Energieträger in 2050 unwahrscheinlich. Im Falle, dass die Minderung der verkehrsbedingten Treibhausgasemissionen alternativ verstärkt durch elektrische Antriebe in Kopplung mit einer kohlenstoffarmen Stromversorgung gemindert werden sollen, müssten die Energieeffizienzziele für den Verkehr entsprechend erhöht werden.

Grundsätzlich gilt mit Blick auf die Szenarioergebnisse: Die zunehmende Elektrifizierung von Fahrzeugantrieben in Kombination mit erneuerbaren Energien kann die Nachfrage nach fossilen Kraftstoffen und die Treibhausgasemissionen des Verkehrs erheblich reduzieren. Hinsichtlich der Entwicklung des Stromsektors ist jedoch zu berücksichtigen, dass der Verkehrssektor damit zu einem relevanten Stromnachfrager wird. Der notwendige zusätzliche EE-Bedarf zur treibhausgasneutralen Deckung der Stromnachfrage des Verkehrs geht im Falle einer Verkehrsentwicklung, die sich an gängigen Szenarien orientiert und bestehende Trends fortschreibt (*Grenzenlos eMobil*) deutlich über bestehende EE-Ausbaupfade bis zum Jahr 2050 hinaus. Ungenutzte EE-Überschüsse können durch die flexible Stromnachfrage batterieelektrischer Fahrzeuge zwar teilweise integriert werden, sie reichen jedoch bei weitem nicht aus, um die Stromnachfrage des Verkehrs vollständig zu decken.

Die Szenarien machen zudem deutlich, dass auch bei einem hohen Elektrifizierungsgrad weiterhin konventionelle Kraftstoffe, auch im bodengebundenen Verkehr, zum Einsatz kommen. Insbesondere bei einem deutlichen Ausbau der EE-Kapazitäten könnten langfristig strombasierte Kraftstoffe genutzt werden, um verbleibende EE-Überschüsse zu integrieren und verbleibende fossile Kraftstoffe im Verkehrssektor zumindest teilweise zu substituieren. Eine vollständige Substitution fossiler Kraftstoffe durch strombasierte Kraftstoffe würde bei einer inländischen Produktion bereits ohne den Luft- und Seeverkehr jedoch nahezu zu einer Verdopplung der Gesamtstromnachfrage im Jahr 2050 führen.

Welche Bedeutung die Entwicklung der Verkehrsnachfrage sowohl im Personen- als auch im Güterverkehr auf den Endenergiebedarf hat und wie der zusätzliche EE-Ausbaubedarf durch eine Minderung der verkehrsbedingten Energienachfrage stark reduziert werden kann, veranschaulicht das Szenario *Regional eMobil*, welches deutliche Strukturveränderungen unterstellt. Eine entsprechende Entwicklung setzt jedoch voraus, dass neben der starken Fokussierung auf den Markterfolg CO₂-armer Technologien und der Überwindung bestehender Hemmnisse in Bezug auf die Funktions- und Marktfähigkeit der notwendigen Effizienztechnologien auch ein Wandel im Mobilitätsverhalten und eine Änderung im Güterverkehrssystem als zentrale Handlungsoptionen verfolgt werden.

Die Analysen in *eMobil 2050* zeigen, dass die Elektrifizierung des Verkehrs einen zentralen Baustein für eine Minderung der Treibhausgasemissionen darstellt, dass dieser jedoch in eine

nachhaltigen Mobilitätskultur eingebettet sein sollte. Dass mit einer solchen nachhaltigen Mobilitätskultur deutliche Energieeinsparungen erzielt werden können, zeigt das Szenario *Regional eMobil*. Neben einer Verringerung des Energiebedarfs und der Treibhausgasemissionen ist ferner davon auszugehen, dass sich durch eine nachhaltige Mobilitätskultur auch Ressourcenverbrauch, Flächenverbrauch und Lärm reduzieren lassen. Es ist also notwendig, alle Ebenen der Mobilität gemeinsam zu betrachten, um deutliche Veränderungen im Personen- und Güterverkehr zu erzielen, und auch weitere relevante Umweltwirkungen des Verkehrs deutlich zu reduzieren. Hierfür sind zukünftig jedoch deutlich veränderte ökonomische, politische und infrastrukturelle Rahmenbedingungen notwendig.

Grenzen der Betrachtung und weiterer Forschungsbedarf

Die betrachteten Szenarien bedeuten eine umfassende Transformation des Verkehrs- und Energiesektors, die insbesondere auf Ebene der Fahrzeuge sowie der Energieerzeugung und -verteilung starke Veränderungen erfordert. Im Fokus des Vorhabens *eMobil 2050* stand die Untersuchung der möglichen Wechselwirkungen zwischen Verkehrs- und Stromsektor sowie den notwendigen zusätzlichen EE-Bedarf und die Auswirkungen auf die Treibhausgasemissionen der beiden Sektoren. Die Betrachtung der Kosten eines entsprechenden Umbaus als auch die technische Realisierbarkeit, insbesondere der Versorgungsinfrastruktur (siehe beispielsweise Oberleitungsfahrzeuge), sowie die tatsächlich möglichen, wirtschaftlichen EE-Ausbaupotenziale waren nicht Bestandteil dieser Studie. Die Berücksichtigung in den Szenarien erlaubt daher keine unmittelbaren Rückschlüsse auf die Wirtschaftlichkeit und technische Realisierbarkeit der dargestellten Entwicklung.

Die Betrachtung der Produktion strombasierter Kraftstoffe erfolgte auf Basis des aktuellen Wissens über mögliche Prozessketten und plausible Gesamtwirkungsgrade. Im Rahmen dieser Studie war es nicht möglich, die Kosten einer entsprechenden Entwicklung zu betrachten und im Vergleich zu technischen Alternativen umfassend zu bewerten. Für die weitere Bewertung der verschiedenen technischen Handlungsoptionen ist es daher zentral, zukünftig auch Kostenaspekte zu berücksichtigen und mögliche Unsicherheiten aufzuzeigen.

Die Szenarien konnten die grundsätzlichen Eigenschaften der unterschiedlichen Stromnachfrager aus dem Verkehr und deren Potenzial zur Integration von erneuerbaren Energien aufzeigen. In diesem Zusammenhang sind jedoch weitere Detailanalysen erforderlich, um ein möglichst optimales Zusammenspiel der unterschiedlichen Flexibilitätsoptionen vor dem Hintergrund einer zunehmend regenerativen Stromerzeugung aufzuzeigen.

Ferner ist zu beachten, dass die Strommarktmodellierung mögliche Effekte auf der Verteilnetzebene nicht abbildet. Dies bedeutet, dass die Modellierung tendenziell die Integration von erneuerbaren Energien eher überschätzt, da mögliche Netzengpässe nicht explizit abgebildet werden. Der mögliche, netzentlastende Effekt der Produktion strombasierter Kraftstoffe ist ebenfalls bisher nicht in die Modellierung integriert und könnte Bestandteil zukünftiger vertiefender Analysen darstellen.

Sowohl die Betrachtung des Verkehrssektors als auch der Stromerzeugung fokussiert im Projekt *eMobil 2050* sehr stark auf Deutschland. Mit Blick auf neue Versorgungsinfrastrukturen und Antriebskonzepte (siehe oberleitungsgebundener Fernverkehr), wie auch in Bezug auf die zunehmenden Wechselwirkungen im europäischen Energiemarkt, sollte in Zukunft auch der internationale Kontext in die Analysen verstärkt mit einbezogen werden.

Bezüglich der Treibhausgasemissionen ist anzumerken, dass die Bilanzierung in *eMobil 2050* die Emissionen aus Fahrzeugproduktion und -entsorgung nicht umfasst. Voraussichtlich werden sich diese mit der Elektrifizierung des Fahrzeugantriebs gegenüber konventionellen Fahrzeugen jedoch

signifikant erhöhen. Weitere Emissionen, die mit dem Umbau der Energieerzeugung sowie der notwendigen Verteilinfrastruktur verbunden sind, sowie die Vorkettenemissionen der eingesetzten fossilen und biogenen Kraftstoffe waren ebenfalls nicht Bestandteil der durchgeführten Analysen. Es ist ferner damit zu rechnen, dass die aufgezeigten Entwicklungspfade sowohl im Verkehrs- als auch im Energiesektor zu deutlich veränderten Ressourcenbedarfen führen, die im Rahmen des Projekts nicht untersucht wurden, jedoch für eine umfassende Bewertung entsprechender Entwicklungen zukünftig – insbesondere mit Blick auf deren Verfügbarkeit und Umweltwirkungen – berücksichtigt werden sollten.

Im Rahmen des Vorhabens *eMobil 2050* wurden erstmalig die Potenziale einer Elektrifizierung für den gesamten bodengebundenen Verkehr bis zum Jahr 2050 betrachtet und deren Einfluss auf den Stromsektor veranschaulicht. Damit geht das Vorhaben über bisherige Ansätze hinaus, die im Kontext von Elektromobilität insbesondere auf den motorisierten Individualverkehr fokussieren. In Hinblick auf eine umfassende Klimaschutzstrategie und vor dem Hintergrund der Energiewende ist jedoch zu beachten, dass auch der Luft- und Seeverkehr bedeutende Energienachfrager im Verkehrssektor darstellen, deren Energieversorgung vor dem Hintergrund der Klimaschutzziele perspektivisch ebenfalls auf möglichst kohlenstofffreie Energieträger umgestellt werden muss. Im Rahmen zukünftiger Forschungsvorhaben sollte daher auch der internationale Luft- und Seeverkehr in die Betrachtung verstärkt mit einbezogen werden.

8. Literatur

- 50Hertz Transmission, Amprion, TenneT, und TransnetBW. 2013. Netzentwicklungsplan Strom 2013 - Zweiter Entwurf der Übertragungsnetzbetreiber
- Ahrens, G.-A.; Kabitzke, U. 2011. Zukunft von Mobilität und Verkehr. Auswertung wissenschaftlicher Grunddaten, Erwartungen und abgeleiteter Perspektiven des Verkehrswesens in Deutschland
- AT Kearney 2013. Online-Food-Retailing: Ein Markt im Aufschwung
- Autonomes Fahren 2014. Autonomes Fahren: Magazin für autonomes Autos und autonome Systeme: Weltweit – autonomes Fahren akzeptiert. <http://www.autonomes-fahren.de/weltweit-autonomes-fahren-akzeptiert/>, Zugriff am 31.03.14
- Baral, A. & Malins, C., 2014. Comprehensive Carbon Accountig for Identification of Sustainable Biomass Feedstocks.
- Bcs - Bundesverband Carsharing 2014. Data Sheet CarSharing in Germany, http://www.carsharing.de/sites/default/files/uploads/presse/pdf/data_sheet_carsharing_01.01.2014.pdf Zugriff am 01.01.2014
- Beckmann, K. et al. 2011. Leitkonzept–Stadt und Region der kurzen Wege, Verfügbar unter: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Leitkonzept+-+Stadt+und+Region+der+kurzen+Wege#0>, Accessed March 25, 2014
- Blanck, R. 2012. Treibhausgasneutraler Verkehr 2050 : Ein Szenario zur zunehmenden Elektrifizierung und dem Einsatz stromerzeugter Kraftstoffe im Verkehr Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben „ Verkehr 2050 - Entwicklung von Parametern und Skizzierung eines vereinfachte, Berlin
- BMUB 2013. Projektionsbericht 2013
- BMVBS fahrradmonitor 2011. Fahrrad-Monitor Deutschland 2011 - Ergebnisse einer repräsentativen Online-Befragung, SINUS, gefördert durch das BMVBS 2011
- Bodewig, K. 2013. Konzeptkodument der Kommission “Nachhaltige Verkehrsinfrastrukturfinanzierung.” Verfügbar unter: [http://www.dstgb.de/dstgb/Home/Schwerpunkte/Verkehrspolitik/Stra%C3%9Fe%20und%20Stra%C3%9Fenverkehrsrecht/Verkehrsminister zur Finanzierung der Verkehrsinfrastruktur/130930_Konzeptdokument_final ver 1 0.pdf](http://www.dstgb.de/dstgb/Home/Schwerpunkte/Verkehrspolitik/Stra%C3%9Fe%20und%20Stra%C3%9Fenverkehrsrecht/Verkehrsminister%20zur%20Finanzierung%20der%20Verkehrsinfrastruktur/130930_Konzeptdokument_final%20ver%201%200.pdf)
- Brenzel, H. et al. 2013. IAB-Kurzbericht 19/2013 - Neueinstellungen in Teilzeit. Herausgeber: Institut für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung, Nürnberg
- Bürgerbusse 2012. <http://www.buergerbusse-in-deutschland.de>, Zugriff am 31.03.2014
- Destatis 2009. https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesellschaftStaat/EinkommenKonsumLebensbedingungen/Konsumausgaben/Tabellen/PrivateKonsumausgaben_D.html#tab335028No2
- Deutsche Bundesregierung 2008. Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel
- Deutsche Bundesregierung 2011. Regierungsprogramm Elektromobilität. Berlin

- Deutsche Bundesregierung 2014. Entwurf eines Gesetzes zur grundlegenden Reform des Erneuerbare-Energien-Gesetzes und zur Änderung weiterer Bestimmungen des Energiewirtschaftsrechts
- Cambridge econometrics and Ricardo-AEA 2013. An economic assessment of low carbon vehicles. Im Auftrag der European Climate Foundation
- Cyclelogistics 2013. Cyclelogistics: Potential to shift goods transport from cars to bicycles in European cities.
http://www.cyclelogistics.eu/docs/111/CycleLogistics_Baseline_Study_external.pdf
- Daehre, K.-H. 2012. Bericht der Kommission "Zukunft der Verkehrsinfrastrukturfinanzierung"
- Deffner, J. et al. 2014. Multioptionalität auf dem Vormarsch? Veränderte Mobilitätswünsche und technische Innovationen als neue Potenziale für einen multimodalen Öffentlichen Verkehr. In: Öffentliche Mobilität (2014), S. 201-227, Springer Fachmedien, Wiesbaden
- DHL 2012. Delivering Tomorrow, Bonn
- Die Welt 2014. Die Welt online: Von wegen Heimarbeit - das Büro ist wieder angesagt, <http://www.welt.de/wirtschaft/article123797200/Von-wegen-Heimarbeit-das-Buero-ist-wieder-angesagt.html>, Zugriff 31.03.14
- Duleep, G. et al. 2011. Impacts of Electric Vehicles – Deliverable 2. Assessment of electric vehicle and battery technology. Delft
- EBS (EBS Universität für Wirtschaft und Recht) 2013. AIM (Automotive Institute for Management) Carsharing Barometer: Moderne Free-Floating-Angebote verhelfen zum Durchbruch. Oestrich-Winkel/Wiesbaden
- Economist 2012. A third industrial revolution, The Economist, 21.04.2012, <http://www.economist.com/node/21552901>
- Eckey, H.-F., Stock, W. 2000. Verkehrsökonomie, Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler GmbH, Wiesbaden
- Edwards, R. et al. 2011. Well-to-wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context - WTT APPENDIX 1 - Description of individual processes and detailed input data. JRC Scientific and technical Reports 2011
- Edwards et al. 2013 Edwards, R. et al., 2013. Well-to-tank Report Version 4.0.
- Emmenegger, M.F. et al. 2012. Harmonisation and extension of the bioenergy inventories and assessment, Dübendorf
- Ernst & Young 2014. Cross Channel: Revolution im Lebensmittelhandel, Verfügbar unter: [http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/EY_Studie_Cross_Channel_-_Die_Revolution_im_Lebensmittelhandel/\\$FILE/EY-Cross-Channel-Die-Revolution-im-Lebensmittelhandel.pdf](http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/EY_Studie_Cross_Channel_-_Die_Revolution_im_Lebensmittelhandel/$FILE/EY-Cross-Channel-Die-Revolution-im-Lebensmittelhandel.pdf)
- ETM (EuroTransportMedia Verlags- und Veranstaltungs-GmbH) 2010. Lastauto Omnibus-Katalog 2011; August 2010; Kaiserslautern
- Europäische Kommission 2011. Weissbuch. Fahrplan zu einem einheitlichen europäischen Verkehrsraum - Hin zu einem wettbewerbsorientierten und ressourcenschonenden Verkehrssystem, Verfügbar unter: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0144:FIN:DE:PDF>

- Firnkorn, J.; Müller, M. 2012. Selling mobility instead of cars: new business strategies of automakers and the impact on private vehicle holding. *Business Strategy and the environment* 21(4), S. 264-280
- Fitschen, A. 2013. Regierungsrat Referat V2 - Verkehrsstatistik, BISStra; Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt); persönliche Mitteilung vom 18.11.2013
- Focus 2012. Focus Online: Autonome Autos – Mehrheit ist kritisch. http://www.focus.de/auto/news/autonome-autos-mehrheit-ist-kritisch_aid_835090.html, Zugriff am 31.03.14
- Follmer, R. et al. 2010. Mobilität in Deutschland (MiD) 2008 – Datensätze. Bonn
- Fronde, M., Vance, C. 2011. Re-Identifying the Rebound–What About Asymmetry? Verfügbar unter: http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=1919476 [Accessed November 7, 2013]
- Fuß, P. 2013. Autonomes Fahren – Die Zukunft des Pkw-Marktes? Präsentationsfolien, [http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/Autonomes_Fahren_-_die_Zukunft_des_Pkw-Marktes/\\$FILE/EY-Autopilot-2013-Praesentation.pdf](http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/Autonomes_Fahren_-_die_Zukunft_des_Pkw-Marktes/$FILE/EY-Autopilot-2013-Praesentation.pdf), Zugriff am 31.03.14
- Gerhardt, N. et al. 2011. Bahnstrom Regenerativ - Analyse und Konzepte zur Erhöhung des Anteils der Regenerativen Energie des Bahnstroms – Endbericht“; September 2011 Kassel und Berlin
- Hacker, F. et al. 2011. “Marktpotenziale und CO2-Bilanz von Elektromobilität - Arbeitspakete 2 bis 5 des Forschungsvorhabens OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen”. Vol. 49
- Haefeli, U. et al. 2006. Evaluation Car-Sharing, Schlussbericht. Im Auftrag des Bundesamtes für Energie, Bern
- Handelsblatt 2013. Die Revolution wird abgeblasen, <http://www.handelsblatt.com/technologie/it-tk/it-internet/3d-druck-die-revolution-wird-abgeblasen/7817508.html>, 28.02.2013
- Hermann, H. et al. 2014. “Prüfung der klimapolitischen Konsistenz und der Kosten von Methanisierungsstrategien.” <http://www.oeko.de/oekodoc/2005/2014-021-de.pdf>
- Hill, N. et al. 2011. Reduction and Testing of Greenhouse Gas (GHG) Emissions from Heavy Duty Vehicles – Lot 1: Strategy; ED46904 Final Report - Issue Number 4; Februar 2011 Didcot
- Hinz, S. 2013. Hermes Logistik Gruppe Deutschland GmbH; fernmündliche Mitteilung zum Fahrzeugeinsatz bei Hermes, November 2013
- Holz-Rau, C., Sicks, K. 2013. Stadt der kurzen Wege und der weiten Reisen. *Raumforschung und Raumordnung*, 71(1), pp.15–31. Verfügbar unter: <http://link.springer.com/10.1007/s13147-012-0205-8>, Accessed March 25, 2014
- Hülsmann, F. et al. 2014. Konventionelle und alternative Fahrzeugtechnologien bei Pkw und schweren Nutzfahrzeugen. Potenziale zur Minderung des Energieverbrauchs bis 2050. Öko-Institut Working Paper. Berlin
- IEA (International Energy Agency) 2011. Technology Roadmap. Electric and plug-in hybrid electric vehicles. Paris Cedex
- IPCC 2013. WORKING GROUP I CONTRIBUTION TO THE IPCC FIFTH ASSESSMENT REPORT CLIMATE CHANGE 2013 : THE PHYSICAL SCIENCE BASIS Final Draft

Underlying Scientific-Technical Assessment A report accepted by Working Group I of the IPCC but not approved in detail. (January 2014)

IZT 2008. Hannah Kosow, Robert Gaßner, Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung: Methoden der Zukunfts- und Szenarioanalyse, Überblick, Bewertung und Auswahlkriterien, Werkstattbericht Nr. 103, Berlin September 2008

Kasten, P. et al. 2013. Strombasierte Kraftstoffe im Vergleich - Stand heute und die Langfristsperspektive. Öko- Institut Working Paper 1/2013. Berlin

Kirchner et al. 2009. Modell Deutschland: Klimaschutz bis 2050: Vom Ziel her denken. Studie von Prognos und Öko-Institut im Auftrag von WWF Deutschland. Basel/Berlin 2009

Klaus, T. et al. 2010. "Energieziel 2050: 100 % Strom aus erneuerbaren Quellen."

Kraftfahrbundesamt (KBA) 2014. Bestandsbarometer – Personenkraftwagen am 1. Januar 2014 nach ausgewählten Merkmalen, http://www.kba.de/cln_031/nn_124582/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/2014__b__bestandsbarometer__teil1__absolut.html, Zugriff am 9.04.2014

Kraftfahrbundesamt (KBA) 2014a. Jahresbilanz der Neuzulassungen 2013, http://www.kba.de/cln_031/nn_125396/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/2013__n__jahresbilanz.html#rechts, Zugriff am 9.04.2014

Kuhnimhof, T. et al. 2012. Travel trends among young adults in Germany: increasing multimodality and declining car use for men. *Journal of Transport Geography*, 24, pp.443–450. Verfügbar unter: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0966692312001317>, Accessed October 23, 2013

Küpper, P. 2011. Auf dem Weg zu einem Grundangebot von Mobilität in ländlichen Räumen: Probleme, Ursachen und Handlungsoptionen. Schneller, öfter, weiter? Perspektiven der Raumentwicklung in der Mobilitätsgesellschaft. Verfügbar unter: <http://www.econstor.eu/handle/10419/60213>, Accessed March 25, 2014

Law, K. et al. 2011. European Union Greenhouse Gas Reduction Potential for Heavy-Duty Vehicles; TIAx LLC; Reference No. D5625; Dezember 2011 Cupertino

Lohmeier, M. 2013. (Deutsche Post): fernmündliche Mitteilung zum Fahrzeugeinsatz bei der Post sowie zum Einsatz batterieelektrischer Fahrzeuge Dezember 2013

Lütkehus, I. et al. 2013. Potenzial der Windenergie an Land

Lutz L., et al. 2007. Analyse der rechtlichen Situation von teleoperierten (und autonomen) Fahrzeugen. Technische Universität München

Mock, P. 2011. Entwicklung eines Szenariomodells zur Simulation der zukünftigen Marktanteile und CO₂ Emissionen von Kraftfahrzeugen (VECTOR21). Köln

Müller-Syring, G. et al 2013. Entwicklung von modularen Konzepten zur Erzeugung, Speicherung und Einspeisung von Wasserstoff und Methan ins Erdgasnetz

Naumann, K. et al. 2014. DBFZ Report Nr.11 Monitoring Biokraftstoffsektor (2.Auflage), Leipzig

Navigant Research 2013. Navigant Research: Autonomous Vehicles, Self-Driving Vehicles, Autonomous Parking, and Other Advanced Driver Assistance Systems: Global Market Analysis and Forecasts, <http://www.navigantresearch.com/%20research/autonomous-vehicles>, Zugriff am 31.03.14

- Nitsch, J. et al. 2012. Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. 2012
- NRC (National Research Council) 2013. Transitions to Alternative Vehicles and Fuels. National Academies Press, Washington, D.C.
- Öko-Institut 2009. RENEWABILITY: Stoffstromanalyse nachhaltige Mobilität im Kontext erneuerbarer Energien bis 2030. Teil 1: Methodik und Datenbasis
- Renner, W. 1998. Telearbeit als Retter der Umwelt. Teleinstitut, Eichstätt
- Repenning, J. et al. 2014. "Klimaschutzszenario 2050." <http://www.oeko.de/oekodoc/2019/2014-604-de.pdf>
- Roch, R. 2013. DVB (Dresdener Verkehrsbetriebe), fernmündliche Mitteilung zum Fahrzeugeinsatz der Busse bei den DVB sowie zum Einsatz batterieelektrischer Fahrzeuge, Dezember 2013
- Rotem-Mindali, O. und Weltevreden, J.W.J. 2013. Transport effects of e-commerce: what can be learned after years of research? *Transportation*, 40(5), pp.867–885. Verfügbar unter: <http://link.springer.com/10.1007/s11116-013-9457-6> [Accessed October 23, 2013]
- Schlesinger et al. 2010: Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung. 2010
- Schönduwe, R., Bock, B., Deibel, I. 2012. Alles wie immer, nur irgendwie anders ? Trends und Thesen zu veränderten Mobilitätsmustern junger Menschen
- Siemens 2012. ENUBA - Elektromobilität bei schweren Nutzfahrzeugen zur Umweltentlastung von Ballungsräumen; Schlussbericht der Siemens AG; Version vom 31.08.2012; FKZ: 16EM0077; August 2012
- Siikavirta, H. et al. 2002. Effects of E-Commerce on Greenhouse Gas Emissions: A Case Study of Grocery Home Delivery in Finland. *Journal of Industrial Ecology*, 6(2), pp.83–97. Verfügbar unter: [10.1162/108819802763471807\http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=9319969&lang=pt-br&site=ehost-live](http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=9319969&lang=pt-br&site=ehost-live)
- Smokers, R. et al. 2011. Support for the revision of Regulation (EC) No 443/2009 on CO₂ emissions from cars. Service request #1 for Framework Contract on Vehicle Emissions. Final Report. Framework Contract No ENV.C.3./FRA/2009/0043. Delft
- Solnit, R. 2013. Diary, in: *London Review of Books*, <http://www.lrb.co.uk/v35/n03/rebecca-solnit/diary>
- Specht, M. et al. 2000: CO₂-Recycling zur Herstellung von Methanol - Endbericht. Stuttgart.
- Stahl, H. 2013. 3D Printing – Risks and Opportunities, Darmstadt
- Thielmann, A. et al. 2012. Technologie-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030. Karlsruhe
- TNS infratest 2011. Einkaufen 4.0. Der Einfluss von E-Commerce auf Lebensqualität und Einkaufsverhalten
- VCD 2014. Verkehrsclub Deutschland e.V.: Lastenräder im Einsatz. <http://www.vcd.org/lastenrad-einsatz.html>, Zugriff am 31.03.14

- Wappelhorst, S. 2013. Einstellungsorientierte Akzeptanzanalyse zur Elektromobilität im Fahrradverkehr
- Wermuth, J. et al. 2012. Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010 (KID 2010) – Schlussbericht
- Wilms, F. 2006. Falko E.P. Wilms: Szenariotechnik, Vom Umgang mit der Zukunft, HauptVerlag Berlin, Stuttgart, Wien 2006
- Zimmer, R. 2012. Bedeutung von Mobilität für Jugendliche in Stadt und Land. Vortrag auf dem Forschungsforum „Mobilität für Alle“ 2012 – jung und mobil, Wien, 17.10.2012

9. Anhang A: Einflussfaktoren auf den Verkehr

Die im Szenarioprozess identifizierten Einflussfaktoren (Kapitel 3.4) wurden ausgehend von der aktuellen Situation bezüglich möglicher Trends und denkbarer Weiterentwicklungen und unter Berücksichtigung ergänzender Informationen aus der Literatur analysiert. Im Folgenden sind mögliche Entwicklungen bei übergreifenden Trends, Infrastruktur, Zeit und Kosten für Mobilität, Lebensstil- und Wertewandel und neuen Angeboten und Optionen dargestellt.

9.1. Übergreifende Trends

9.1.1. Bevölkerungsentwicklung und demographischer Wandel

Die Prognosen des statistischen Bundesamtes gehen von einer zukünftigen Schrumpfung und Alterung der deutschen Bevölkerung aus. Die vermutlich größte Unsicherheit besteht bezüglich des Ausmaßes der Migration. So kann man hinterfragen, ob Deutschland wirklich zukünftig eine „schrumpfende Insel in einer wachsenden Welt“ sein wird.

Sowohl der Personen- als auch der Güterverkehr hängen eng mit der Bevölkerungsentwicklung und dem demographischen Wandel zusammen:

- Die Anzahl der Personen ist wesentlich für die Höhe des Verkehrsaufkommens sowie der Menge an nachgefragten Konsumgütern.
- Alter, Erwerbstätigkeit, Haushaltsgröße und Familiensituation beeinflussen das Verkehrsverhalten. Zwar sind ältere Menschen im Durchschnitt weniger mobil; es wird jedoch häufig zukünftig ein Trend hin zu einem hohen Bedürfnis auch der älteren Bevölkerung an Mobilität (Reisen, Sport, Wissen, sozialer Austausch) erwartet.
- Bei einer alternden Bevölkerung ist es denkbar, dass „Versorgungswege“ zunehmen.

9.1.2. Siedlungsstrukturen und Reurbanisierung

Nach dem zweiten Weltkrieg war die Siedlungsentwicklung in der Bundesrepublik Deutschland durch eine starke Flächeninanspruchnahme und zunehmende Zersiedlung charakterisiert, begleitet durch eine zunehmende Suburbanisierung. Erst in jüngster Zeit sind wieder Trends in Richtung einer Reurbanisierung zu verzeichnen (Ahrens & Kabitzke 2011).

Wenn sich ländliche Räume zunehmend entleeren, stellt dies eine Herausforderung für die Versorgung mit Verkehrsinfrastruktur und öffentlichem Verkehr dar. Sehr schwach ausgelasteter öffentlicher Verkehr ist weder ökologisch noch ökonomisch nachhaltig. Eine ähnliche Herausforderung ergibt sich durch einen Rückgang der Schüler- und Ausbildungsverkehre für den Linienbusverkehr.

Entgegen der Zersiedlung steht das Leitkonzept der „Stadt und Region der kurzen Wege“ (Beckmann et al. 2011). Kennzeichen der Stadt und Region der kurzen Wege sind eine kompakte Siedlungsstruktur, Nutzungsmischung sowie die attraktive Gestaltung der öffentlichen Räume. Generell sind kompakte Siedlungsstrukturen im Alltag vergleichsweise verkehrssparsam. Es gibt jedoch auch Anhaltspunkte, dass gerade Bewohner von Städten ihre Alltagsmobilität über weitere Reisen teilweise kompensieren: Die Distanzen im Fernverkehr sind umso größer, je höher die Einwohnerzahl ist; d. h. insbesondere Stadtbewohner führen tendenziell längere Fernreisen durch (Holz-Rau & Sicks 2013).

9.1.3. Digitalisierung

Die zunehmende Digitalisierung ist ein „Querschnittstrend“, welcher an vielen unterschiedlichen Stellen Einfluss auf den Verkehrssektor ausübt. Einige Beispiele sind:

- Die bessere Vernetzung von Verkehrsmitteln und verbesserte Nutzerinformation steigern die Attraktivität von ÖV und Sharing-Konzepten und fördern Intermodalität (=Nutzung mehrerer Verkehrsmittel auf einem Weg) und Multimodalität (=Nutzung des jeweils passenden Verkehrsmittels anstatt eines „Standardverkehrsmittels“ wie z. B. des Pkw).
- Erst die Digitalisierung ermöglicht bzw. erleichtert Peer-to-Peer-Carsharing (wie z. B. autonetzer.de) und spontanes Ridesharing (z. B. flinc).
- Eine bessere Verkehrslenkung kann zur Vermeidung von Staus und Verbesserung des Verkehrsflusses beitragen und die Kapazität der bestehenden Infrastruktur erhöhen.
- Automatische Fahrzeugsteuerung: Bildung von Fahrzügen und autonomes Fahren sind zukünftig denkbar (s. u.).

9.1.4. Klimawandel

Bereits heute ist in Deutschland gegenüber dem Beginn des letzten Jahrhunderts eine Erhöhung der Durchschnittstemperatur um 0,9°C sowie eine Zunahme des Niederschlags um 9 % zu verzeichnen (Deutsche Bundesregierung 2008). Es ist davon auszugehen, dass Extremwetterereignisse in Zukunft weiter zunehmen werden und dies auch einen Einfluss auf den Verkehr und die Verkehrsinfrastruktur haben wird.

Betroffen bei Straße und Schiene ist vor allem die Infrastruktur: Verkürzte Lebensdauern, erhöhte Instandhaltungskosten und erhöhte Ersatzinvestitionen in die Infrastruktur sowie höhere Investitionen in neue Materialien führen dazu, dass die Kosten für Infrastruktur steigen könnten. Hinzu kommen ggf. Verzögerungen/Verspätungen durch Extremwetterereignisse. Insbesondere für die Binnenschifffahrt stellen gehäufte Hoch/Niedrigwasserereignisse eine Herausforderung dar und können zur Verlagerung von Schiff auf Straße und Schiene führen. Stürme können Schäden an hochragenden Anlagen wie Oberleitungen verursachen. Denkbar ist auch, dass der Klimawandel und zunehmende Extremwetterereignisse ein Treiber für verstärktes „regional sourcing“ und lokale Wertschöpfung ist, um die Zuverlässigkeit der Produktion sicherzustellen.

9.2. Infrastruktur

9.2.1. Verkehrsinfrastruktur

Die zukünftige Gestaltung der Verkehrsinfrastruktur steht vor zahlreichen Herausforderungen. Dazu zählen unter anderem

- ein hoher Instandhaltungs- bzw. Materialaufwand und damit verbundene hohe Kosten sowie negative Klimaeffekte durch die hohe Ressourcenintensität der bestehenden Infrastruktur,
- die zunehmende Belastung von Straßen durch Schwerlastverkehr,
- die komplexen Zuständigkeiten (Bund / Land / kommunal); dadurch kommt es zu Ineffizienzen wie z. B. dem Bau mehrerer Regionalflughäfen in unmittelbarer Nachbarschaft,
- die Verkehrsplanung, die häufig immer noch an der Realisierung minimaler Zeitgewinne orientiert ist. In der Realität führen neue Straßen und die Beschleunigung des Verkehrs jedoch häufig zu mehr induziertem Verkehr anstatt zur Realisierung von Zeitgewinnen (siehe auch „Mobilitätszeitbudget“),
- die steigenden Anforderungen an die zukünftige Infrastruktur (z. B. Resilienz gegenüber Klimaereignissen, Anpassung an demographischen Wandel).

Der Bericht der Kommission „Zukunft der Verkehrsinfrastrukturfinanzierung“ geht von der grundsätzlichen Feststellung der Verkehrsministerkonferenz aus, dass der Wirtschaftsstandort

Deutschland sowie die Mobilität der Bürger durch einen fortschreitenden Substanzverzehr der Verkehrsinfrastruktur ernsthaft gefährdet sind. Dies wird für alle Verkehrsträger in der Baulast des Bundes, der Länder, der Landkreise und der Gemeinden festgestellt (Daehre 2012).

Kapazitäten der Infrastruktur können grundsätzlich eine Restriktion für das Verkehrsleistungswachstum darstellen. Insbesondere der Schienengüterverkehr stößt bereits teilweise an Kapazitätsgrenzen. Allerdings könnten die Kapazitäten der Verkehrsinfrastruktur durch die Digitalisierung zukünftig auch ohne Ausbau erhöht werden. So wird in einigen Kreisen eine effizientere Nutzung der Infrastruktur durch autonomes Fahren diskutiert.

Die Frage nach der Infrastrukturfinanzierung kann wesentlich für die Kosten der Mobilität sein. So scheint eine zukünftige Nutzerfinanzierung der Verkehrsinfrastruktur relativ wahrscheinlich. Damit würden sich die Kosten für Mobilität insgesamt erhöhen. Je nach Ausgestaltung könnte sich die Attraktivität unterschiedlicher Verkehrsträger verschieben. Die Kommission „Nachhaltige Verkehrsinfrastrukturfinanzierung“ plädiert z. B. für eine deutliche Ausweitung der Autobahnmaut für Lkw auf weitere Straßen und kleinere Lastwagen. Auch eine Pkw-Maut wird für die weiter fehlenden Mittel nicht ausgeschlossen (Bodewig 2013).

9.2.2. Emissionsfreie Innenstädte

Das „Weißbuch Verkehr“ der europäischen Kommission strebt als strategisches Ziel eine annähernd emissionsfreie Stadtlogistik bis 2030 an (Europäische Kommission 2011). Eine verstärkte Einführung emissionsfreier Innenstädte könnte die Attraktivität von Elektrofahrzeugen deutlich steigern. Möglicherweise könnten emissionsfreie Innenstädte auch ein Treiber für die Bündelung des Wirtschaftsverkehrs sein (City-Logistik-Konzepte). Denn dann könnten im Gegensatz zu heute große Diesel-Lkw nicht mehr bis in die Stadtzentren fahren, sondern nur noch (kleinere) batterieelektrische Lkw oder auch Lastenräder. So könnten sich Logistikzentren am Stadtrand etablieren, in denen auf die elektrischen Fahrzeuge umgeladen wird.

9.3. Zeit und Kosten für Mobilität

9.3.1. Mobilitätszeitbudget

Dass Menschen im Durchschnitt pro Tag in etwa eine Stunde unterwegs sind, wird häufig als eine „historische und interkulturelle Konstante“ angesehen (Eckey/Stock 2000). Es gibt jedoch soziodemographisch bedingte Unterschiede, insbesondere was die individuelle Bewertung der Zeit („Zeitkosten“) im Verhältnis zu den realen Kosten angeht. So nutzen Geschäftsreisende eher das Flugzeug und Studenten eher den Fernbus. Unter der Prämisse eines konstanten Reisezeitbudgets ist eine Zunahme der Kilometerleistung pro Person nur möglich durch Geschwindigkeitssteigerungen des Verkehrssystems. Beitragen zur Beschleunigung des Verkehrssystems können

- Geschwindigkeitssteigerungen innerhalb eines Verkehrsmittels,
- die zunehmende Wahl schnellerer Verkehrsmittel wie z. B. von Flugzeugen,
- eine verbesserte Anschlusssicherung bzw. eine optimierte Verknüpfung verschiedener Verkehrsmittel (Intermodalität).

Umgekehrt kann demnach theoretisch auch eine Entschleunigung des Verkehrs (z. B. durch Geschwindigkeitsbeschränkungen, Begrenzung des Flugverkehrs etc.) zu einer Reduktion des Verkehrs führen – jedenfalls dann, wenn die Annahme eines konstanten Mobilitätszeitbudgets auch in Zukunft noch gilt.

Es stellt sich jedoch die Frage, ob es sich tatsächlich um eine universale Konstante handelt – oder ob nicht eine zunehmende Nutzbarkeit von Reisezeit auch dazu führen könnte, dass sich das

Mobilitätszeitbudget zukünftig erhöht. Beispielsweise gibt es zahlreiche Google-Mitarbeiter, die im Silicon Valley arbeiten und in San Francisco wohnen und jeden Tag mit einem speziellen „Google-Bus“ über drei Stunden zwischen Wohnort und Arbeitsplatz pendeln³². In dem mit Internet ausgestatteten Bus können sie bereits arbeiten. Ein vom Prinzip her ähnlicher Effekt ergibt sich durch Smartphone-Nutzung im ÖV. Wenn autonomes Fahren zukünftig zum Standard werden sollte, wird auch die Pkw-Reisezeit zunehmend nutzbar.

9.3.2. Mobilitätsbudget

Der Anteil der Mobilitätsausgaben am verfügbaren Einkommen hat zwischen 1998 und 2008 von 13,5 auf 14,6 % zugenommen. Mobilitätskosten sind im Vergleich zu den übrigen Konsumausgaben überproportional angestiegen.

Bei steigenden Mobilitätskosten in Kombination mit einer zunehmenden Einkommensschere besteht die Gefahr von Mobilitätsarmut.

- Das verfügbare Einkommen und – daraus abgeleitet – der für Mobilität verfügbare Teil des Einkommens kann einen spürbaren Einfluss auf das Verkehrsverhalten haben. Ein mögliches Beispiel ist die Zunahme des Radverkehrs in den europäischen Ländern, die von der Wirtschaftskrise betroffen sind.
- Die Wahl des Verkehrsmittels hängt im Personenverkehr vor allem von den jeweils wahrgenommenen Kosten ab. Bei den Mobilitätsausgaben ist es wichtig, zu unterscheiden zwischen den einmalig bzw. selten anfallenden Mobilitätskosten (Pkw-Kauf, Wartungskosten, Kfz-Steuer, Fahrradkauf, ÖV-Zeitkarte, Bahncard) und den sogenannten „Out-of-pocket-Kosten“ (Kraftstoffe, Einzeltickets für öffentlichen Verkehr). Die meisten Nutzer ziehen bei ihrer Verkehrsmittelwahl häufig nur die „Out-of-pocket“-Kosten zu Rate; Investitions- und Wartungskosten für Pkw sind „sunk costs“ und werden häufig unterschätzt. Transparenter werden die tatsächlichen Kilometerkosten des MIV durch Carsharing oder wenn statt pauschaler Steuern fahrleistungsabhängige Steuern erhoben werden (z. B. statt Kfz-Steuer eine fahrleistungsabhängige Maut oder Kraftstoffsteuern).
- Effizienzgewinne z. B. bei Pkw senken die Mobilitätsausgaben je Kilometer und können zu direkten (=z. B. höhere Pkw-Fahrleistung) oder indirekten (z. B. mehr Flugreisen) Rebound-Effekten führen.

9.3.3. Kraftstoffpreise

Kraftstoffkosten beeinflussen die Pkw-Fahrleistung wesentlich. So wird derzeit von direkten Rebound-Effekten in einer Größenordnung von 40 bis 60 % gesprochen (Fronzel & Vance 2011; Öko-Institut 2009). Solange also Pkw noch mit fossilen Kraftstoffen betrieben werden, übt der Rohölpreis einen wesentlichen Einfluss aus. Langfristig wird bei zunehmender Elektrifizierung sowie Effizienzsteigerung konventioneller Antriebe die Relevanz des Rohölpreises als Einflussfaktor zurückgehen. Dagegen kann der Strompreis an Bedeutung gewinnen.

Projektionen zur zukünftigen Entwicklung von Energiepreisen z. B. für Rohöl sind sehr unsicher und weisen hohe Spannbreiten auf (BMUB 2013). Um die globale Erwärmung auf 2 Grad zu begrenzen, müssen nach dem neuesten IPCC-Bericht (IPCC 2013) über 80 % der derzeit bekannten Erdölreserven im Boden bleiben. In einer Welt, in der Klimaschutz ernst genommen wird, sinkt entsprechend der Wert der verfügbaren Ölreserven im Verhältnis zu einer Welt, welche keinen ambitionierten Klimaschutz betreibt.

³² <http://www.lrb.co.uk/v35/n03/rebecca-solnit/diary>

Zusätzlich können die Energiepreise für den Verkehr durch entsprechende Steuern beeinflusst werden. Zwar ist „Fahrstrom“ – bezogen auf den Energiegehalt – heute deutlich höher besteuert als konventionelle Kraftstoffe, durch den wesentlich geringeren Energiebedarf beim Betrieb von elektrischen im Vergleich zu verbrennungsmotorischen Fahrzeugen fallen jedoch auf Grundlage der aktuellen Preisstruktur für Elektrofahrzeuge wesentlich geringere Steuern und Abgaben pro Fahrzeugkilometer an. Mit zunehmender Marktdurchdringung von Elektromobilität ist daher wahrscheinlich, dass Steuern und Abgaben für Kraftstoffe an die neuen Gegebenheiten angepasst und somit unter anderem erhebliche Steuerausfälle vermieden werden.

9.3.4. Internalisierung externer Kosten

Mit der Lkw-Maut wurde ein erster Schritt in Richtung der Internalisierung externer Kosten des Verkehrs umgesetzt. Die EU strebt eine weitere Internalisierung externer Kosten des Verkehrs an (Europäische Kommission 2011). Dann wäre mit steigenden Kosten für den Straßen- und Flugverkehr zu rechnen.

9.4. Lebensstil- und Wertewandel

9.4.1. Jugend ohne Auto?

In den letzten Jahren sind der Pkw-Besitz und die Pkw-Nutzung junger Erwachsener, insbesondere junger Männer, zurückgegangen (Kuhnimhof et al. 2012; Schönduwe et al. 2012). Vor allem in urbanen Regionen ist ein Rückgang der Pkw-Fahrleistungen zu beobachten. Zu den Ursachen des Rückgangs besteht allerdings noch erheblicher Forschungsbedarf (Schönduwe et al. 2012).

Der Rückgang der Pkw-Nutzung wird von einigen Autoren auf einen „Wertewandel“ zurückgeführt: Das Auto verliere zunehmend seine Bedeutung als Statussymbol und die Pkw-Nutzung werde zunehmend pragmatischer. (Zimmer 2012) kommt allerdings bei einer leitfragengestützten Befragung von 36 Jugendlichen zu dem Ergebnis, dass ein Trend „Weg vom Auto“ bei den Befragten nicht festzustellen sei und schlussfolgert, dass sich Entscheidungsträger deshalb nicht darauf verlassen sollten, dass sich das Mobilitätsverhalten der nachwachsenden Generation quasi von selbst wandelt. Für den empirisch zu beobachtenden Rückgang der Pkw-Nutzung können neben einem „Wertewandel“ weitere Effekte einen Erklärungsbeitrag liefern (Kuhnimhof et al. 2012). Zu nennen sind sozioökonomische Effekte wie die wachsende Anzahl Studierender (häufig mit Semesterticket), die spätere Familiengründung (Durchschnittsalter beim ersten Kind ist zwischen 1998 und 2008 von 28 auf 30 gestiegen) sowie ein späterer Start in den Beruf. Dazu kommen Veränderungen in den Rahmenbedingungen (z. B. höhere Kosten für den Pkw, Parken und Fahren in Städten wird schwieriger).

Es ist unklar, ob die Generation der jungen Erwachsenen auch zukünftig einen niedrigeren Pkw-Besitz aufweisen wird oder ob die oben beschriebenen Trends nicht vielmehr rein auf sozioökonomische Effekte und ein Verlängern der „Jugendphase“ zurückzuführen sind. Allerdings ergibt sich hier ein „Möglichkeitsfenster“, d. h. bei der Schaffung geeigneter Alternativen (breites Carsharing- und ÖV-Angebot, fahrradfreundliche Umgebung) ist es denkbar, dass der Verzicht auf den Pkw-Besitz und damit die Festlegung auf ein „Standardverkehrsmittel“ auch beibehalten wird.

9.4.2. Virtuelle statt physische Mobilität

Kommunikationstechnologien ermöglichen uns heute mehr denn je, Aufgaben zu erledigen ohne dabei physisch mobil zu sein. Dies kann Behördengänge betreffen oder, bezogen auf die Arbeitswelt, die Möglichkeit von zuhause aus zu arbeiten (Telearbeit bzw. Homeoffice) oder dienstliche Besprechungen digital durchzuführen (Telemeetings). In den USA wurde ermittelt, dass an Heimarbeitsdagen im Schnitt nur 20 - 50 % der üblichen Verkehrsleistung erbracht werden

(Renner 1998). Besonders zu Stoßzeiten kann somit das Verkehrsaufkommen vermindert werden, was zu weniger Stau und Schadstoffemissionen führt.

Der vorausgesagte Trend zu mehr Telearbeit hat sich in letzter Zeit jedoch abgeschwächt. Im Jahr 2012 lag der Anteil an Erwerbstätigen die „manchmal“ oder „hauptsächlich“ im Homeoffice arbeiten bei 7,7 % während es im Jahr 2008 noch 9,7 % waren (Die Welt 2014). Gründe hierfür sind die immer noch in der Arbeitswelt verankerte „Präsenzkultur“ sowie die bei Heimarbeit auftretende Vermischung von Arbeit und Privatleben, die zu einer Zunahme von Stress führen kann. Es ist jedoch ein starker Zuwachs an Teilzeitstellen zu verzeichnen, was ebenfalls zu einer reduzierten arbeitsbezogenen Verkehrsleistung führt. Vom Jahr 2006 bis 2011 nahmen sozialversicherungspflichtige Teilzeitstellen um etwa 25 % zu (Brenzel et al. 2013).

9.4.3. E-Commerce

E-Commerce hat in den letzten Jahren vor allem den klassischen Katalogversand verdrängt und führt mittlerweile den Versandhandel mit 70 % des Umsatzes an. Die Substitution des klassischen Katalogversands durch E-Commerce hat demnach auch keinen merklichen Effekt auf Logistikstrukturen und Einkaufswege ausgeübt. Erst jüngst verzeichnen Versandunternehmen einen deutlichen Zuwachs der Nachfrage und reagieren dementsprechend mit einer Ausbreitung ihres Angebotes. Für die Zukunft werden hohe Wachstumsraten bei E-Commerce prognostiziert. Verschiedene Marktanalysten³³ gehen davon aus, dass der Versandhandel im Jahr 2020 18 - 20 % vom Gesamtumsatz des Einzelhandels eingenommen haben wird.

Güter des täglichen Bedarfs spielen derzeit im Onlinehandel noch eine untergeordnete Rolle: Zwar werden nach der MiD (2008) rund 2/3 der Einkaufswege zur Besorgung täglicher Güter getätigt, jedoch machen Güter des täglichen Bedarfs nur 2 - 5 % vom Umsatz des Online-Handels aus; nur 0,3 % des Umsatzes von Lebensmitteln und Getränken wird im Onlinehandel erzielt (AT Kearney 2013). Es scheint aber plausibel, dass der Online-Markt für Lebensmittel und generell täglich benötigte Güter zukünftig auch in Deutschland stark an Bedeutung gewinnen könnte (Ernst & Young 2014). Dafür spricht, dass es sich bei Produkten des täglichen Bedarfs häufig um Routinekäufe handelt, die kein Aus- oder Anprobieren erfordern. Auch aus ökologischer Sicht kann dies ein Vorteil sein, da von einer geringeren Anzahl Retouren auszugehen ist als z. B. bei Schuhen. Denkbar ist zum Beispiel die Lieferung in eine am Haus installierte Kühlbox, so dass eine flexible Direktzustellung möglich wäre. Prinzipiell können sich heute bei Frischeprodukten rund 35 % den Online-Kauf in Kombination mit der Lieferung nach Hause vorstellen und bei sonstigen haltbaren Produkten etwa 70 % (AT Kearney 2013). Neben den Business-to-Consumer-Märkten wächst auch der Consumer-to-Consumer-Markt (z. B. ebay, dawanda).

Effekte des E-Commerce sind vielfältig und betreffen nicht nur den Personen- und Güterverkehr, sondern darüber hinaus möglicherweise auch Lagerung und Lieferkettenlogistik sowie das Konsumverhalten. Wie (Rotem-Mindali & Weltevreden 2013) in einem extensiven Review bestehender Studien feststellen, ist eine generelle Aussage zu den Auswirkungen des E-Commerce auf den Verkehr kaum machbar. So reicht zum Beispiel die Reduktion der eigenen Shopping Trips bei E-Shoppern in den unterschiedlichen Studien von 12 bis 78 %.

Mit Blick auf den *Einkaufsverkehr* ist zu beachten, dass Onlinehandel nicht notwendigerweise vorher physisch durchgeführte Einkäufe substituiert. Es kann auch zu zusätzlichen Einkäufen kommen, insbesondere wenn statt eines gebündelten Einkaufs viele Einzelbestellungen vorgenommen werden. Ebenfalls denkbar ist ein deutlicher Anstieg der Retouren. Denkbar ist

³³ <http://www.finanzen.net/nachricht/aktien/fair-news-de-Wachstum-in-Handel-und-Vertrieb-durch-E-Commerce-Internet-Co-2470690>

<http://www.insideecommerce.de/2013/03/25/2020-zwanzig-prozent-e-commerce-umsatz-am-non-food-einzelhandel-interview-mit-dr-kai-hudetz/>

auch, dass zunehmend exklusive Produkte aus der ganzen Welt nachgefragt werden. Wenn Einkäufe als Teil einer Wegeketten durchgeführt werden (z. B. auf dem Rückweg der Arbeit), so bleiben diese Wege trotz E-Commerce bestehen.

Beim Güterverkehr sind Auswirkungen vor allem auf die letzte(n) Meile(n) der Logistikketten zu erwarten. Dagegen dürfte sich die Logistik im Fernverkehr nicht wesentlich ändern: Sowohl beim Vertrieb über den Einzelhandel als auch beim Onlineversand werden Produkte, die über längere Strecken transportiert werden, gebündelt und über Logistikzentren verteilt. Bei einer Zunahme des E-Commerce ändert sich also im Wesentlichen die Feinverteilung der Güter: An die Stelle der Belieferung des Einzelhandels tritt die Direktbelieferung des Endkunden.

Wie viel (Güter-)verkehr dabei entsteht, hängt wesentlich von der durch den Kunden geforderten Schnelligkeit und der Flexibilität der Zustellung ab. Derzeit gibt es von vielen Kunden hohe Anforderungen an die Schnelligkeit der Lieferung. Je schneller jedoch die Lieferung, desto weniger ist eine Bündelung und damit die Erhöhung der Auslastung möglich.

Es ist aber denkbar, dass zukünftig die Schnelligkeit und Flexibilität der Lieferung bepreist wird und es Rabatte bei längeren Lieferzeiträumen gibt. Es zeigt sich aber auch, dass gerade eine schnelle und terminlich zuverlässige Lieferung das wichtigste Anforderungsmerkmal an die Logistikdienstleister ist (TNS infratest 2011).

Eine Konzeptstudie aus Finnland (Siikavirta et al. 2002) zeigt anhand der Metropolregion Helsinki, dass sich theoretisch bei einer Substitution des Supermarkteinkaufes durch Online-Lebensmitteleinkauf und Hausbelieferung eine durchschnittliche Wegelänge von 0,9 km (mit dem Liefer-Lkw) anstatt vorher 6,9 km (für den Einkaufsweg) ergeben könnte. Bei weniger flexibler Zustellung reduziert sich dagegen die Anzahl der Zustellungen pro Route und damit erhöht sich die Lkw-Fahrleistung pro Lieferung.

9.4.4. 3-D-Druck

3-D-Drucker (auch: Fabber) sind Geräte, die verschiedene Materialschichten übereinander auftragen, um ein Endprodukt anzufertigen. In den letzten Jahren hat 3-D-Druck in der Öffentlichkeit deutlich an Aufmerksamkeit gewonnen.

Die Zukunftsperspektiven von 3-D-Druckern werden unterschiedlich gewertet. The Economist berichtete 2012, Fabbing stelle die dritte industrielle Revolution dar, da Konzipierung und Anfertigung problemlos an unterschiedlichen Orten stattfinden können, ohne Transportaufwand und mit geringem Arbeitsinput (Economist 2012). Eine vorsichtiger Einschätzung wird vom Leiter des Collaborative Research Center der TU Berlin Forschungsgruppe, Prof. Schwandt, ausgedrückt, die sich mit 3-D-Druck befasst: „Wir sind meilenweit davon entfernt, mit beliebigen Materialien beliebige Dinge zu drucken“ (Handelsblatt 2013). Eins der fünf Zukunftsszenarien für den Logistiksektor, die in der Studie Delivering Tomorrow (DHL 2012) vorgestellt wurden, basiert auf der Annahme einer Welt, in der 2050 Produkte überwiegend durch Fabbing hergestellt werden.

Zunehmender 3-D-Druck ist einer der wenigen Trends, welche theoretisch den historisch zu beobachtenden Trend der Veränderung der Güterstruktur in Richtung „immer leichter und werthaltiger“ umkehren könnten: Für bestimmte Konsumgüter müsste dann nur noch das Rohmaterial für die Drucker transportiert werden, nicht aber das fertige Produkt. 3-D-Druck kommt jedoch längst nicht für alle Gütergruppen bzw. Sektoren in Frage (Stahl 2013). In vielen Güterbereichen, wie beispielsweise Nahrungs- und Futtermittel sowie Massengüter, dürfte sein Einfluss auf den Güterverkehr daher begrenzt bleiben.

9.5. Neue Angebote und Optionen

9.5.1. Carsharing

Carsharing stellt eine Form des gemeinschaftlichen Nutzens dar, das gerade in den letzten Jahren eine enorme Nachfragesteigerung erfahren hat. Aktuell liegt die Carsharing Teilnehmerzahl bei 757.000. Davon sind rund 58 % Nutzer One-Way-Carsharing-Angebote und 42 % Nutzer stationsgebundener Carsharing-Angebote. Insgesamt befinden sich 13.950 Fahrzeuge im stationsgebundenen und One-Way-Carsharing, d. h. dass je nach Carsharing-System ungefähr 42 – 70 Kunden ein Auto benutzen (bcs 2014).

Neben dem klassischen stationsgebundenen Carsharing sind seit ein paar Jahren One-Way-Carsharing-Systeme und privates Carsharing auf dem Markt, die hohe Zuwachsraten zu verzeichnen haben. Beim stationsgebundenem Carsharing werden die Fahrzeuge im Voraus gebucht, an einer festen Station abgeholt und zu dieser nach der Nutzung wieder zurückgebracht. Privates oder auch Peer-to-Peer Carsharing erweitert dieses Angebot, indem Privatpersonen ihre Fahrzeuge über Internetplattformen zur Verfügung stellen und damit Fahrzeuge in Privatbesitz intensiver genutzt werden können. Diese beiden Formen des Carsharing sind von der Art der Nutzung dem Autofahren mit dem eigenen Pkw sehr ähnlich, da das Fahrzeug zu seinem Ausgangspunkt wieder zurückgebracht werden muss. Demgegenüber stellt One-Way-Carsharing, das auch als free-floating oder flexibles Carsharing bezeichnet wird, eine neue Form der Mobilität dar. Die Besonderheit ist, dass die Fahrzeuge spontan genutzt werden können, indem sie z. B. mit einer App per Smartphone geortet und an einem beliebigen Ort innerhalb des Geschäftsgebietes wieder abgestellt werden können (Deffner et al. 2014). One-Way-Carsharing ist vor allem in Städten mit hohem Parkdruck besonders attraktiv. Anbieter solcher flexibler Systeme in Deutschland sind beispielsweise car2go, DriveNow und Multicity.

Carsharing kann unter den Rahmenbedingungen eines multimodalen Verkehrsangebots zu einer intensiveren Nutzung des Fahrzeugbestandes führen und somit zur Ressourcenschonung, besseren Luftqualität, geringeren Lärmbelastung und Treibhausgasminderung sowie mehr Lebensraum statt Parkraum beitragen. Voraussetzung dafür ist, dass der eigene Pkw weniger genutzt wird und zumindest teilweise abgeschafft wird. Hinsichtlich der Mobilitätsausstattung gibt es bisher eine überschaubare Anzahl an Studien, die mittel- bis langfristige Effekte von Carsharing analysiert haben. Laut dem AIM Carsharing-Barometer der EBS Business School reduzierte sich der Pkw-Besitz in der Vergangenheit um rund 23,5 % durch One-Way- und stationsgebundenes Carsharing, wobei sich dieses Ergebnis vorwiegend auf stationsgebundenes Carsharing bezieht (EBS 2013). Untersuchungen zum stationsgebundenen Mobility Carsharing in der Schweiz zeigen, dass sich der Pkw-Besitz der Carsharing Nutzer um rund 15 – 20 % reduziert hat, wobei diese Beobachtung nicht ausschließlich auf Carsharing zurückzuführen ist (Haefeli et al. 2006). Einer Studie der Universität Ulm zufolge, die unter anderem die Wirkungen des One-Way-Carsharing Anbieters car2go auf den Pkw-Besitz in Ulm analysiert hat, reduzierte sich nach anderthalb Jahren car2go Betrieb der Pkw-Besitz um rund 4,7 %. Das langfristige Potenzial wird der Studie nach auf 19,2 % geschätzt (Firnkorn und Müller 2012).

Der Erfolg von Carsharing wird stark von flankierenden Maßnahmen abhängen, die multimodales Verkehrsverhalten hin zu einer umweltfreundlichen Mobilität fördern. Dazu gehört unter anderem, dass parallel zum Ausbau der Carsharing-Systeme die zu ergänzenden Verkehrsmittel, der Öffentliche Verkehr, Rad- und Fußverkehr und deren Vernetzung sowie die Bereitstellung von Parkraum für Carsharing-Fahrzeuge gefördert werden.

9.5.2. Pedelecs

Die Absatzzahlen von E-Bikes haben sich in den letzten Jahren stark entwickelt. Dies trifft insbesondere auf Pedelecs zu, die lediglich eine elektrische Unterstützung bieten, wenn der Fahrer

selbst in die Pedale tritt und daher zulassungsfrei nutzbar sind. Sie machen etwa 95 % der Absatzzahlen aus. Im Jahr 2012 betrug der Bestand an Pedelecs in Deutschland etwa 1,1 Mio.

In den ersten Jahren nach ihrer Markteinführung wurden Pedelecs bevorzugt von älteren Menschen genutzt. Es ist jedoch eine Art Imagewandel zu verzeichnen, der ein zunehmendes Interesse an Pedelecs in allen Altersgruppen bedeutet. In Umfragen des BMVBS bezeichneten 2009 lediglich 24 % aller Personen E-Bikes und Pedelecs als „generell interessant“, 2011 waren dies bereits 47 %. Die Unterschiede in der Attraktivität für verschiedene Altersklassen sind rückläufig, jedoch sind Pedelecs nach wie vor für ältere Menschen attraktiver. Ebenso liegt der Anteil der männlichen Nutzer etwas höher (BMVBS fahrradmonitor 2011).

Etwa 75 % der Besitzer nutzen ihr Pedelec im Freizeitverkehr, etwa die Hälfte bereits im Alltagsverkehr (Alrutz 2012 bzw Nutzerbefragung Kuratorium für Verkehrssicherheit Österreich). Es werden häufiger Strecken als früher mit dem Rad zurückgelegt, zudem steigt die Länge der Strecken an. Diese Vergrößerung des Aktionsradius führt zu einer vermehrten Substitution von Pkw-Wegen. Etwa ein Drittel der mit dem Pedelec zurückgelegten Wege ersetzen Pkw-Strecken als Selbstfahrer. Ebenfalls wird der Einzugsbereich des ÖPNV vergrößert (Alrutz 2012, Kairos 2010).

Laut Nutzerumfragen gibt es verschiedene Barrieren, die einer Anschaffung im Wege stehen. Diese sind vor allem das hohe Gewicht, die hohen Anschaffungskosten, die begrenzte Reichweite, das Diebstahlrisiko sowie das bislang nicht etablierte Parken und Laden im öffentlichen Raum. Die Diskussion um öffentliche Ladeinfrastruktur verliert jedoch an Bedeutung, da sich einerseits die Reichweite der Pedelecs mit neuen Entwicklungsschüben erhöht und andererseits abnehmbare Akkus die Möglichkeit bieten, am Arbeitsplatz oder zuhause über die Steckdose zu laden (Wappelhorst 2013).

Als generell wichtig wird eine angemessene Infrastruktur für vermehrten Einsatz von Pedelecs angesehen. Dies bedeutet vor allem Radschnellwege mit Überholmöglichkeiten, um die unterschiedlichen Geschwindigkeitsniveaus von Fahrrädern mit und ohne elektrischen Antrieb gefahrlos zu ermöglichen. Zudem sollten sichere Abstellmöglichkeiten bereitgestellt werden, um besseren Schutz vor Diebstählen zu bieten (Wappelhorst 2013).

9.5.3. Lastenräder

Dem Transport von leichten Gütern auf kurzen Wegen durch Lastenfahrräder wird ein großes Potenzial zur Reduzierung des Verkehrsaufkommens und der Schadstoffbelastung zugeschrieben.

Laut einer kürzlich erstellten EU-Studie könnten 51 % von Lasten bis 200 kg auf Strecken bis 7 km von Fahrrädern statt von Autos oder Lkw befördert werden (Cyclelogistics 2013). Einige limitierende Faktoren wie Wetterbedingungen und Radweginfrastruktur wurden dabei nicht berücksichtigt, weshalb der Wert als obere Abschätzung gesehen wird. Derzeit laufen verschiedene Pilotprojekte zur Erprobung und einige Firmen betreiben bereits Flotten von Lastenrädern im Alltagsbetrieb, wie beispielweise Pizzalieferanten oder Paketzusteller (VCD 2014).

9.5.4. Fernbusse

Seit Anfang 2013 ist in Deutschland die Einrichtung von Fernbuslinien möglich. Die Zahl der angebotenen Fahrten hat sich daraufhin von Januar bis Dezember von 1.540 auf 5.100 Fahrten erhöht (IGES 2013). Insbesondere mittelgroße Städte und strukturschwache Regionen profitierten demnach von dem zusätzlichen Angebot. Fernbusse sind ein attraktives Verkehrsmittel für Personengruppen mit einem niedrigen Mobilitätsbudget und/oder einem hohen

Mobilitätszeitbudget. In Zukunft könnten sie in Ergänzung zum Schienenverkehr weiter an Bedeutung gewinnen.

9.5.5. Flexible Bedienformen des ÖPNV und Bürgerbusse

Der ÖPNV in Großstädten und Ballungsräumen ist für die Bewältigung großer Verkehrsmengen konzipiert und kann oft ein multimodales Angebot gewährleisten. Insbesondere im ländlichen Raum machen jedoch die geringen Fahrgastpotenziale und die für ländliche Räume charakteristischen weiten Wege einen wirtschaftlichen, gut ausgelasteten und damit auch ökologischen öffentlichen Verkehr schwer realisierbar (Küpper 2011). Zur Sicherung der Mobilität im ländlichen Raum ist jedoch der öffentliche Verkehr im Sinne der Daseinsvorsorge von Bedeutung.

Alternativen zum klassischen, liniengebundenen öffentlichen Verkehr sind flexible Bedienformen des öffentlichen Verkehrs. Eine mögliche Alternative stellen Bürgerbusse dar. Bürgerbusvereine verbreiteten sich zuerst in NRW, dann bundesweit. 2012 gab es in Deutschland über 110 Bürgerbusvereine in 8 Bundesländern, Tendenz steigend (Bürgerbusse 2012).

9.5.6. Autonomes Fahren

Autonomes Fahren bedeutet die vollständig elektronische und selbstständige Steuerung eines Fahrzeuges ohne ein Eingreifen des Fahrers. Die entsprechende technologische Entwicklung macht derzeit große Fortschritte. In den Bundesstaaten Nevada und Kalifornien wurden bereits autonome Fahrzeuge zugelassen, in Deutschland sowie in weiteren EU-Ländern bestehen jedoch erhebliche gesetzliche Hemmnisse für die Zulassung autonomer oder ferngesteuerter Fahrzeuge im Straßenverkehr (Lutz et al. 2007).

Die Akzeptanz von autonomen Fahrzeugen in Deutschland wurde in letzter Zeit durch verschiedene Studien und Umfragen erhoben. Je nach Auftraggeber unterscheiden sich die Ergebnisse jedoch deutlich. Ob ein autonom gesteuertes Fahrzeug als Fortbewegungsmittel akzeptabel ist, wird in verschiedenen Studien von 37 bis 50 % der deutschen Befragten mit „Ja“ beziehungsweise „Ja, vielleicht“ beantwortet (Autonomes Fahren 2014). Wenn ein möglicher Eingriff in die Steuerung im Notfall möglich ist, erhöht sich die Zustimmung auf 66 % (Fuß 2013). Andererseits zeigen Studien ebenfalls, dass fast 80 % der Befragten der Technologie skeptisch gegenüberstehen und nur etwa ein Fünftel die Technologie begrüßt (Focus 2012). Die Marktreife wird für das Jahr 2020 erwartet und bis 2035 eine jährliche Wachstumsrate von 85 % angenommen. Die globale Marktdurchdringung soll demnach im Jahr 2025 4 %, im Jahr 2030 41 % und im Jahr 2035 45 % betragen (Navigant Research 2013).

Bei einer Marktreife der Technologie und damit gewährleisteter Sicherheit und Zuverlässigkeit bieten sich mehrere neue Anwendungsmöglichkeiten. So könnten Elektroautos selbstständig zur nächsten Ladestation fahren oder im Carsharing-Betrieb dem Benutzer das Aufsuchen des Pkw ersparen, da es selbstständig seinen Weg zum Nutzer findet. Auch wäre individuell motorisierte Mobilität Menschen mit körperlichen Einschränkungen oder bis ins hohe Alter zugänglich; der Besitz eines Führerscheins wäre nicht mehr notwendig.

Durch autonomes Fahren könnte die bestehende Verkehrsinfrastruktur effizienter genutzt werden und so Stau vermieden und der Durchsatz an Pkw erhöht werden. Auch die Energieeffizienz kann durch optimierte Fahrzeugsteuerung gesteigert werden. Gleichzeitig ist es auch denkbar, dass durch diese Technologie zusätzlicher Verkehr erzeugt wird; z. B. durch Leerfahrten der autonom gesteuerten Pkw oder durch die bessere Verkehrslenkung, welche zu einer Verkürzung der Reisezeiten führt.

10. Anhang B: Tabellen

10.1. Tabellen zu Kapitel 2

Tabelle 10-1: Annahmen zu Schritten der Prozessketten in Abbildung 2-1

		Wasserstoff		Methan			FT-Kraftstoff	
		Rohrleitung	onsite	biogenes CO ₂	Industrie CO ₂	atmosph. CO ₂	Industrie CO ₂	atmosph. CO ₂
Elektrolyse (alkalisch/PEM)	kWh _{H₂} /kWh _{el}	1,37	1,51	1,37	1,37	1,37	1,37	1,37
Syntheseprozess	kWh _{Kraftstoff} /kWh _{H₂}	-	-	0,80	0,80	0,80	0,70	0,70
CO ₂ -Bereitstellung	kWh _{el} /kWh _{Kraftstoff}	-	-	0,02	0,01	0,41	0,02	0,55
Verteilung/Verdichtung	kWh _{out} /kWh _{in}	0,88	0,92	0,95	0,95	0,95	0,99	0,99
Elektrolyse (Hochtemperatur)	kWh _{H₂} /kWh _{el}	1,07	-	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07

Quelle: siehe Text in Kapitel 2.4.3

Tabelle 10-2: Tabelle zu Abbildung 2-1: Elektrischer Wirkungsgrad und Energieverluste für verschiedene Prozessketten strombasierter Energieträger

		Elektr. Wirkungsgrad	Verteilung	Syntheseprozess	Elektrolyse	CO ₂ -Bereitstellung	HT-Elektrolyse
Wasserstoff	Rohrleitung	61%	9%	0%	30%	0%	79%
	Onsite	59%	5%	0%	36%	0%	75%
Methan	biogenes CO ₂	53%	2%	9%	36%	1%	67%
	Industrie CO ₂	53%	2%	9%	36%	0%	67%
	atmosph. CO ₂	44%	2%	9%	35%	10%	53%
FT-Kraftstoff	Industrie CO ₂	48%	1%	15%	36%	0%	61%
	atmosph. CO ₂	38%	0%	14%	34%	13%	46%

Quelle: Eigene Berechnung (Quellen: siehe Text in Kapitel 2.4.3 und Ausführungen in Kasten et al. 2013)

Tabelle 10-3: Tabelle zu Abbildung 2-2: Spezifischer Strom-/Energiebedarf für Pkw (mittel) für verschiedene Prozessketten strombasierter Kraftstoffe

		Energieverbrauch (KWh _{el} /100 km)
FCEV (H2)	Rohrleitung	35,59
	Onsite	37,12
ICEV (Methan)	biogenes CO ₂	63,22
	Industrie CO ₂	63,72
	atmosph. CO ₂	77,04
ICEV (FT-Kraftstoff)	Industrie CO ₂	69,83
	atmosph. CO ₂	87,80
BEV	Strom	15,96
PHEV	Strom/Benzin	21,64
ICEV	Benzin	33,60

Quelle: Eigene Berechnung; (Quellen: siehe Text in Kapitel 2.4.3 und Ausführungen in Kasten et al. 2013)

10.2. Tabellen zu Kapitel 5

Tabelle 10-4: **Tabelle zu Abbildung 4-1: Personenverkehr nach Wegezwecken - heute und 2050**

	Anzahl Wege pro Person und Tag			10 km pro Person und Tag		
	MiD 2008	Grenzenlos eMobil 2050	Regional eMobil 2050	MiD 2008	Grenzenlos eMobil 2050	Regional eMobil 2050
gesamt	3,39	3,27	3,21	3,79	4,18	3,03
Arbeit	0,47	0,37	0,31	0,81	0,74	0,52
dienstlich	0,21	0,18	0,14	0,42	0,41	0,28
Ausbildung	0,21	0,18	0,18	0,17	0,15	0,10
Einkauf	0,72	0,38	0,57	0,37	0,21	0,24
Erledigung	0,42	0,45	0,45	0,34	0,39	0,30
Freizeit	1,08	1,44	1,30	1,45	2,06	1,40
Begleitung	0,28	0,26	0,26	0,22	0,22	0,19

Quelle: : MiD 2008, eigene Berechnungen

Tabelle 10-5: **Tabelle zu Abbildung 4-2: Verkehrsleistung im Personenverkehr 1990 - 2050**

		1990	2000	2010	2020	2030	2040	2050
		Mrd. pkm						
Grenzenlos eMobil	Gesamt	853	1.023	1.151	1.170	1.182	1.181	1.163
	ÖV	159	174	183	182	180	176	170
	Pkw	695	849	902	915	912	899	875
	Pkw geteilt				3	18	31	43
	Fahrrad			33	35	38	39	41
	Fuß			34	34	35	35	35
Regional eMobil	Gesamt	853	1.023	1.151	1.095	1.036	967	890
	ÖV	159	174	183	203	222	238	249
	Pkw	695	849	902	794	642	444	280
	Pkw geteilt				13	70	168	230
	Fahrrad			33	51	68	83	97
	Fuß			34	34	34	34	33

Quelle: Eigene Berechnungen

Tabelle 10-6: Tabelle zu Abbildung 4-3: Güterverkehr nach Gütergruppen, heute und 2050

		Chemie	Erze, Metall, Eisen, Stahl	Fahrzeuge, Maschinen, Halb- und Fertigwaren	Kohle, Erdöl, Mineralöl- erzeugnisse	Landwirtschaft, Nahrung, Futtermittel	Steine und Erden	Transit	gesamt
10 Mio. t	Basis 2004-2008	33	26	70	28	57	153	15	383
	Grenzenlos eMobil	36	32	113	3	62	153	22	421
	Regional eMobil	33	26	78	3	62	145	16	363
Mrd. tkm	Basis 2004-2008	51	51	167	44	108	81	98	599
	Grenzenlos eMobil	56	61	294	4	129	89	147	780
	Regional eMobil	53	51	172	4	70	72	110	532

Quelle: Destatis 2009, Verkehr in Zahlen, eigene Berechnungen

Tabelle 10-7: Tabelle zu Abbildung 4-4: Verkehrsleistung im Güterverkehr, 1990-2050

		1990	2000	2010	2020	2030	2040	2050
		Mrd. tkm						
Grenzenlos eMobil	Gesamt	353	500	614	666	707	748	780
	Bahn (GV)	111	87	110	118	124	129	135
	Binnenschiff	57	66	62	59	60	61	62
	LKW > 12 t	14	23	23	26	26	26	25
	LKW 3.5-7.5 t	6	8	4	4	4	4	4
	LKW 7.5-12 t	3	2	8	8	8	8	8
	Sattelzug	162	314	407	451	485	518	545
Regional eMobil	Gesamt	353	500	614	677	687	639	532
	Bahn (GV)	111	87	110	125	140	155	170
	Binnenschiff	57	66	62	60	62	64	66
	LKW > 12 t	14	23	23	26	26	26	26
	LKW 3.5-7.5 t	6	8	4	4	4	4	4
	LKW 7.5-12 t	3	2	8	8	8	8	8
	Sattelzug	162	314	407	453	447	382	259

Quelle: DESTATIS 2009, eigene Berechnungen

Tabelle 10-8: Tabelle zu Abbildung 4-5: Neuzulassungsstruktur Pkw (ohne Microcars)

		2010	2020	2030	2040	2050
Grenzenlos eMobil	Gesamt	100%	100%	100%	100%	100%
	Diesel	42%	39%	31%	2%	2%
	Benzin	58%	52%	43%	2%	2%
	Gas	0%	1%	1%	0%	0%
	PHEV (Benzin)	0%	3%	7%	11%	6%
	REEV (Benzin)	0%	3%	10%	23%	17%
	BEV 150	0%	2%	5%	32%	38%
	BEV 300	0%	0%	4%	31%	36%
Regional eMobil	Gesamt	100%	100%	100%	100%	100%
	Diesel	42%	35%	25%	0%	0%
	Benzin	58%	51%	43%	0%	0%
	Gas	0%	5%	5%	0%	0%
	PHEV (Benzin)	0%	3%	6%	10%	5%
	REEV (Benzin)	0%	3%	9%	17%	12%
	BEV 150	0%	3%	9%	50%	60%
	BEV 300	0%	0%	3%	22%	22%

Quelle: Eigene Berechnungen

Tabelle 10-9: Tabelle zu Abbildung 4-6: Fahrleistung Pkw nach Antriebstypen

		2010	2020	2030	2040	2050
				Mrd. km		
Grenzenlos eMobil	Gesamt	596	616	633	643	645
	Benzin	352	253	219	104	15
	Diesel	244	337	309	159	30
	Gas		4	4	2	0
	BEV		5	33	224	424
	PHEV		8	27	48	46
	REEV		9	42	106	129
Regional eMobil	Gesamt	596	523	452	382	313
	Benzin	350	217	159	57	4
	Diesel	243	275	192	69	6
	Gas	2	12	19	8	0
	BEV		6	37	169	235
	PHEV		7	20	30	24
	REEV		7	26	49	44

Quelle: Eigene Berechnungen

Tabelle 10-10: Tabelle zu Abbildung 4-7: Pkw-Bestand elektrischer Fahrzeuge

	BEV	PHEV in Tsd.	REEV	Gesamt
Grenzenlos eMobil				
2020	431	568	501	1.500
2030	2.367	1.854	2.410	6.632
2040	15.501	3.224	5.997	24.723
2050	28.801	3.022	7.232	39.055
Regional eMobil				
2020	462	451	398	1.311
2030	2.548	1.233	1.518	5.299
2040	10.742	1.651	2.565	14.957
2050	14.696	1.070	2.084	17.850

Quelle: Eigene Berechnungen

Tabelle 10-11: Tabelle zu Abbildung 4-8: Fahrleistung Sattelzüge nach Antriebstypen

	Mrd. km		
	Diesel	Oberleitungsfahrzeug	Gesamt
Grenzenlos eMobil			
2010	37,4		37,4
2020	40,4		40,4
2030	41,2	1,6	42,8
2040	24,8	20,4	45,2
2050	9,2	37,7	47,0
	Diesel	Gas	Gesamt
Regional eMobil			
2010	37,4		37,4
2020	40,6		40,6
2030	31,7	7,8	39,5
2040	14,8	18,4	33,3
2050	4,6	17,6	22,3

Quelle: Eigene Berechnungen

Tabelle 10-12: Tabelle zu Abbildung 4-9: Fahrleistung Lkw und leichte Nutzfahrzeuge nach Antriebstypen

	Diesel	Gas	BEV Mrd. km	PHEV	REEV	Gesamt
Grenzenlos eMobil						
2010	55,0					55,0
2020	57,8	0,4	0,4			58,6
2030	53,1	0,4	5,7	0,9	1,0	61,1
2040	28,3	0,1	25,6	5,4	3,5	63,0
2050	6,3	0,02	44,5	8,0	5,4	64,3
Regional eMobil						
2010	54,7	0,3				54,9
2020	56,4	0,5	0,4			57,3
2030	50,8	0,4	5,3	0,9	0,9	58,3
2040	26,6	0,1	23,4	5,4	3,1	58,6
2050	5,8	0,02	40,0	8,2	4,7	58,7

Quelle: Eigene Berechnungen

Tabelle 10-13: Tabelle zu Abbildung 4-10: Fahrleistung Busse nach Antriebstypen

	Diesel	Gas	BEV Mrd. km	PHEV	Ober- leitungs- fahrzeug	Gesamt
Grenzenlos eMobil						
2010	3,6					3,7
2020	3,5	0,03	0,008			3,5
2030	2,9	0,03	0,2	0,2	0,02	3,4
2040	1,5	0,009	0,8	0,7	0,4	3,3
2050	0,3	0,0007	1,0	0,9	0,9	3,2
Regional eMobil						
2010	3,7					3,7
2020	3,8	0,03	0,008			3,8
2030	3,5	0,2	0,2	0,1		4,1
2040	1,9	0,8	0,8	0,6		4,2
2050	0,4	1,3	1,2	12		4,3

Quelle: Eigene Berechnungen

Tabelle 10-14: Tabelle zu Abbildung 4-18: Endenergiebedarf nach Verkehrsmitteln

	2010	2020	2030	2040	2050
PJ Endenergie					
Grenzenlos eMobil					
Gesamtergebnis	2.478	2.136	1.698	1.179	844
Bahn (GV)	17	16	15	14	13
Pkw	1.687	1.357	1.014	639	403
Bahn (PV)	36	32	28	25	21
Binnenschiff	23	22	22	22	22
Bus	43	41	33	26	21
Pedelecs	0	0	0	1	1
Kraftrad	15	15	12	8	5
SSU	7	6	5	4	4
Straßengüterverkehr	650	647	568	440	355
Regional eMobil					
Gesamtergebnis	2.478	1.947	1.389	895	581
Bahn (GV)	17	17	17	17	16
Pkw	1.687	1.163	711	354	180
Bahn (PV)	36	35	34	32	30
Binnenschiff	23	22	23	23	23
Bus	43	44	40	34	32
Pedelecs	0	0	1	1	2
Kraftrad	15	13	9	6	3
SSU	7	6	6	6	5
Straßengüterverkehr	650	645	548	423	290

Quelle: Eigene Berechnungen

Tabelle 10-15: Tabelle zu Abbildung 4-19: Endenergiebedarf nach Energieträgern

	2010	2020	2030	2040	2050
PJ Endenergie					
Grenzenlos eMobil					
gesamt	2.478	2.136	1.698	1.179	844
Benzin	1.046	595	406	194	57
Diesel	1.378	1.477	1.172	638	268
Gas	9	9	9	3	0
Strom	45	55	111	344	518
Regional eMobil					
gesamt	2.478	1.947	1.389	895	581
Benzin	1.046	516	297	119	35
Diesel	1.378	1.346	884	381	126
Gas	9	28	110	185	171
Strom	45	57	98	209	248

Quelle: Eigene Berechnungen

Tabelle 10-16: Tabelle zu Abbildung 4-22: Verkehrsleistung im Personenverkehr 2050 – Szenarienvergleich

	eMobil 2050		Klimaschutz 2050		Verkehr 2050		Energiekonzept		Leitstudie		Modell D	
	Grenzenlos eMobil	Regional eMobil	AMS	KS 80	KS 90	Basis	Ziel	Referenz	Ziel I/IV	Sz. A/B/C	Referenz	Innovation
Mrd. Pkm												
Motorisierter Individualverkehr	918,3	510,8	1.111	801	753	1.087	1.033	837	810	800,1	819	793
Öffentlicher Verkehr	169,9	249,2	148	106	99	146	146	141	145	178	138	142
Luftverkehr (Territorialprinzip)								67	64	75	66	63
Luftverkehr (Standortprinzip)			353	349	345	3246	303					
Summe	1.088	760	1.612	1.256	1.197	1.557	1.482	1.045	1.019	1.053	1.023	998
Summe (ohne Luftverkehr)	1.088	760	1.259	923	852	1.233	1.179	978	955	978	957	935

Quelle: Eigene Berechnungen

Tabelle 10-17: Tabelle zu Abbildung 4-23: Verkehrsleistung im Güterverkehr 2050 – Szenarienvergleich

	eMobil 2050		Klimaschutz 2050		Verkehr 2050		Energiekonzept		Leitstudie		Modell D	
	Grenzenlos eMobil	Regional eMobil	AMS	KS 80	KS 90	Basis	Ziel	Referenz	Ziel I/IV	Sz. A/B/C	Referenz	Innovation
Mrd. Pkm												
Straßengüterverkehr	583	297	595	557	556	935	801	757	683	604	744	671
Schienengüterverkehr	135	170	144	206	213	214	253	210	283	215	206	278
Binnenschiff	62	66	58	57	56	97	89	81	98	90	79	95
Luftverkehr			25	25	25	24	24	4	3	3	4	3
Summe	780	533	822	845	850	1.271	1.167	1.052	1.067	912	1.033	1.047

Quelle: Eigene Berechnungen

10.3. Tabellen zu Kapitel 6

Tabelle 10-18: Ausbauszenarien für Wind Onshore, Wind Offshore und Photovoltaik, Vergleich zwischen Leitstudie und Ausbau EE+

	2010	2020	2030 GW	2040	2050
Wind Onshore Leitstudie	27	39	43	48	50
Wind Onshore EE+	27	52	55	57	60
Wind Offshore Leitstudie	0	10	23	29	32
Wind Offshore EE+	0	7	15	24	32
PV Leitstudie	17	54	61	63	67
PV EE+	17	54	76	98	120

Quelle: Eigene Berechnungen

Tabelle 10-19: Kenngrößen der Szenarien im Vergleich (2030)

Szenarioname		Vergleichs- lauf	Grenzenlos eMobil	Grenzenlos eMobil LM+	Grenzenlos eMobil LM+ und NK+	Regional eMobil
EE Szenario		LS	LS	LS	LS	LS
installierte Leistung Elektrolyseure	GW	0	0	0	0	0
EE-Dargebot (inkl. Überschüsse)	TWh	266	266	266	266	266
davon Überschüsse	TWh	17	10	10	9	11
Überschüsse in % des Dargebots	%	7%	4%	4%	4%	4%
Importe	TWh	23	25	25	25	24
Stromerzeugung national	TWh	441	468	468	471	466
flukt. EE	TWh	249	256	256	257	255
thermisch	TWh	166	186	185	187	184
must-run-Kraftwerke	TWh	27	27	27	27	27
Backup	TWh	0	1	0	1	1
Pumpverluste	TWh	-4	-3	-3	-3	-3
Stromerz.+ Imp.+Backup+Pumpverl.	TWh	460	490	490	493	488
Backup-Einsatz						
max. Leistung	GW	21	57	34	60	57
Laufzeit	h	203	245	423	828	249
Strom für Verkehr	TWh	0	31	31	34	28
Strom Fahrzeuge (inkl. Ladeverluste)	TWh	0	18	18	21	15
Strom Schiene / Oberleitung	TWh	0	13	13	13	13
stromgenerierte Kraftstoffe	TWh	0	0	0	0	0
Strom für andere Sektoren	TWh	460	460	460	460	460
Stromverbrauch gesamt	TWh	460	491	491	494	488
Anteil verkehr		0%	6%	6%	7%	6%
Emissionen Stromsektor						
thermisch	Mio. t CO ₂	106	121	121	123	120
must-runs	Mio. t CO ₂	12	12	12	12	12
Backup	Mio. t CO ₂	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2
Importe	Mio. t CO ₂	6,2	6,6	6,6	6,6	6,6
Stromsektor ohne Import	Mio. t CO ₂	118	134	133	135	132
Stromsektor inkl. Import	Mio. t CO ₂	124	140	140	141	139
Emissionsfaktoren						
Gesamtstrom exkl. Import	g CO ₂ / kWh	269	287	286	288	286
Differenzstrom exkl. Import	g CO ₂ / kWh		553	547	543	559
Differenzstrom inkl. Import	g CO ₂ / kWh		539	533	531	544

* LS= Leitstudie

Quelle: Eigene Berechnungen

Tabelle 10-20: Tabelle zu Abbildung 6-1: Endenergiebedarf des Verkehrssektors im Jahr 2050

	Benzin	Diesel	Gas	Strom	Gesamt
Grenzenlos eMobil	57	268	0	517	843
Grenzenlos eMobil Gas-Lkw	57	151	394	409	1011
Regional eMobil	35	126	171	247	579

Quelle: Eigene Berechnungen

Tabelle 10-21: Tabelle zu Abbildung 6-2: Direkte CO₂-Emissionen des Strom- und Verkehrssektors 2050

			Verkehrs- sektor	Strom- sektor	Strom- Importe	Minderung ggü. 1990
			Mio. t CO ₂			
Grenzenlos eMobil	EE	Grenzenlos	24	78	6	-83,5%
Regional eMobil	Leitstudie	Regional	21	43	6	-89,5%
Grenzenlos eMobil		Grenzenlos	24	28	6	-91,6%
Grenzenlos eMobil		Grenzenlos + 10	21	28	6	-92,1%
+ 10 GW PtX		GW PtX				
Regional eMobil	EE +	Regional + 10 GW	17	22	6	-93,8%
+ 10 GW PtX		PtX				
Grenzenlos eMobil		Grenzenlos Gas-	15	110	8	-79,6%
Gas-Lkw EE+		Lkw				
Grenzenlos eMobil	EE ++	Grenzenlos Gas-	15	30	8	-92,7%
Gas-Lkw EE ++		Lkw				
Grenzenlos eMobil	EE +++	Grenzenlos + PtX	0	37	6	-94,0%
+ PtX total		total				

Quelle: Eigene Berechnungen

Tabelle 10-22: Tabelle zu Abbildung 6-3: CO₂ -Emissionen von Verkehr und Differenzstrom 2050

			Verkehrs- sektor	Strom- sektor	Strom- Importe	Minderung ggü. 1990
			Mio. t CO ₂			
Grenzenlos eMobil	EE	Grenzenlos	24	50	2	-56%
Regional eMobil	Leitstudie	Regional	21	16	1	-78%
Grenzenlos eMobil		Grenzenlos	24	0,3	1,6	-86%
EE +						
Grenzenlos eMobil		Grenzenlos + 10	21	0,3	1,6	-87%
+ 10 GW PtX		GW PtX				
Regional eMobil	EE +	Regional + 10	17	-6	1	-93%
+ 10 GW PtX		GW PtX				
Grenzenlos eMobil		Grenzenlos	15	83	4	-42%
Gas-Lkw EE+		Gas-Lkw				
Grenzenlos eMobil		Grenzenlos	15	2	4	-90%
Gas-Lkw EE ++	EE ++	Gas-Lkw				
Grenzenlos eMobil		Grenzenlos +	0	9	2	-94%
+ PtX total	EE +++	PtX total				

Quelle: Eigene Berechnungen