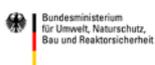


# ENDBERICHT RENEWBILITY III

## OPTIONEN EINER DEKARBONISIERUNG DES VERKEHRSSSEKTORS

21. November 16

Im Auftrag des:



Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt



INSTITUT FÜR ENERGIE-  
UND UMWELTFORSCHUNG  
HEIDELBERG



DENKEN  
ÜBER  
MORGEN



## PROJEKTTEAM

ÖKO-INSTITUT E.V., BERLIN/DARMSTADT/FREIBURG

Ansprechpartner: Dr. Wiebke Zimmer, w.zimmer@oeko.de, Ruth Blanck, r.blanck@oeko.de, Thomas Bergmann, t.bergmann@oeko.de, Moritz Mottschall, m.mottschall@oeko.de, Rut von Waldenfels, Dr. Hannah Förster, h.foerster@oeko.de, Dr. Katja Schumacher, k.schumacher@oeko.de

DAS INSTITUT FÜR VERKEHRSFORSCHUNG IM DLR, BERLIN

Ansprechpartner: Rita Cyganski, rita.cyganski@dlr.de, Axel Wolfermann, axel.wolfermann@dlr.de, Christian Winkler, christian.winkler@dlr.de, Matthias Heinrichs, matthias.heinrichs@dlr.de

IFEU – INSTITUT FÜR ENERGIE- UND UMWELTFORSCHUNG HEIDELBERG GMBH

Ansprechpartner: Frank Dünnebeil, frank.duenebeil@ifeu.de, Horst Fehrenbach, horst.fehrenbach@ifeu.de, Claudia Kämper, claudia.kaemper@ifeu.de, Kirsten Biemann, kirsten.biemann@ifeu.de, Jan Kräck, jan.kraeck@ifeu.de

INFRAS AG, ZÜRICH

Ansprechpartner: Martin Peter, martin.peter@infras.ch, Remo Zandonella, remo.zandonelle@infras.ch, Damaris Bertschmann, damaris.bertschmann@infras.ch

## VORHABENBEZEICHNUNG

Elektromobilität als Baustein der Energiewende u. des Klimaschutzes: Entwicklung eines Energie- und Verkehrsanalyseinstrumentes zur Modellierung des Beitrags der Elektromobilität - „Klimamodell ELMO2050“

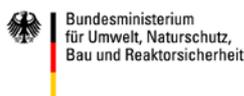
## FÖRDERKENNZEICHEN

2013/S 142-247681

## LAUFZEIT DES VORHABENS

15.10.2013 – 30.11.2016

Im Auftrag des:



# ENDBERICHT

Das Projekt wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit durchgeführt. Die fachliche Begleitung erfolgte über das Referat IG 15 „Umwelt und Verkehr, Elektromobilität“.

Berlin, November 2016

## INHALT

1	Einleitung.....	16
1.1	Das Projekt Renewbility .....	17
1.2	Die Szenario-Gruppe .....	18
2	Die Szenario-Philosophie.....	20
2.1	Basisszenario .....	21
2.2	Szenario Effizienz.....	22
2.3	Das Szenario Effizienz Plus .....	24
2.4	Die Rolle der Kraftstoffe in den Szenarien .....	26
3	Rahmendaten und –Annahmen .....	28
3.1	Demographische und gesamtwirtschaftliche Rahmendaten.....	28
3.2	Potenziale Dekarbonisierter Energieträger.....	30
3.3	Energiepreise.....	36
3.4	Vorkettenemissionen der Kraftstoffe .....	42
4	Modellverbund.....	46
4.1	Übersicht über den Modellverbund.....	46
4.2	Fahrzeuge: Neuzulassungen und Bestand .....	47
4.3	Modellierung von Materialvorleistungen und THG-Emissionen der Fahrzeugherstellung .....	61
4.4	Nachfragemodellierung Personenverkehr.....	68
4.5	Nachfragemodellierung Güterwirtschaftsverkehr.....	80
4.6	Nachfragemodellierung internationaler Luft- und Seeverkehr .....	82
4.7	Modellierung Endenergiebedarf und Treibhausgasemissionen .....	85
4.8	Ökonomische Modellierung.....	86
5	Fahrzeugbestand Pkw .....	96
5.1	Hintergrund und Ausgangslage .....	96

5.2	Annahmen und Parameter .....	96
5.3	Ergebnisse Basisszenario .....	100
5.4	Ergebnisse 2030 .....	101
5.5	Ergebnisse 2050 .....	105
5.6	Fazit .....	108
6	Fahrzeugbestand Lkw und LNF .....	109
6.1	Hintergrund und Ausgangslage .....	109
6.2	Annahmen und Parameter .....	109
6.3	Ergebnisse Basisszenario .....	110
6.4	Ergebnisse 2030 .....	112
6.5	Ergebnisse 2050 .....	114
6.6	Fazit .....	116
7	Personenverkehr .....	117
7.1	Hintergrund und Ausgangslage .....	117
7.2	Annahmen und Parameter .....	117
7.3	Ergebnisse Basisszenario .....	122
7.4	Ergebnisse 2030 .....	124
7.5	Ergebnisse 2050 .....	130
7.6	Fokus Stadtverkehr .....	135
7.7	Autonomes Fahren .....	140
7.8	Fazit .....	146
8	Güterverkehr .....	148
8.1	Hintergrund und Ausgangslage .....	148
8.2	Annahmen und Parameter .....	148
8.3	Ergebnisse Basisszenario .....	152
8.4	Ergebnisse 2030 .....	154
8.5	Ergebnisse 2050 .....	155

8.6	Fazit .....	162
9	Luft- und Seeverkehr .....	164
9.1	Hintergrund und Ausgangslage .....	164
9.2	Annahmen und Parameter .....	164
9.3	Ergebnisse Seeverkehr .....	167
9.4	Ergebnisse Luftverkehr .....	168
10	Materialvorleistungen .....	171
10.1	Hintergrund und Ausgangslage .....	171
10.2	Annahmen und Parameter .....	171
10.3	Ergebnisse auf Einzelfahrzeugebene für Straßenfahrzeuge .....	179
10.4	Ergebnisse Basisszenario .....	184
10.5	Ergebnisse 2030 .....	192
10.6	Ergebnisse 2050 .....	198
10.7	Fazit .....	206
11	Endenergiebedarf .....	210
11.1	Hintergrund .....	210
11.2	Annahmen und Parameter .....	210
11.3	Ergebnisse Basisszenario .....	211
11.4	Ergebnisse 2030 .....	214
11.5	Ergebnisse 2050 .....	215
11.6	Ergebnisse Strombedarf des Verkehrssektors .....	217
11.7	Fazit .....	219
12	Treibhausgasemissionen .....	220
12.1	Annahmen und Parameter .....	220
12.2	Ergebnisse Basisszenario .....	221
12.3	Ergebnisse 2030 .....	223
12.4	Ergebnisse 2050 .....	226

12.5	Fazit .....	228
13	Ökonomische Effekte .....	230
13.1	Hintergrund und Ausgangslage .....	230
13.2	Annahmen und Parameter .....	233
13.3	Ergebnisse Basisszenario .....	236
13.4	Kernergebnisse der Klimaschutzszenarien im Überblick .....	238
13.5	Szenario Effizienz .....	241
13.6	Szenario Effizienz plus .....	246
13.7	Einbezug der externer Kosten .....	252
13.8	Ökonomische Gesamtergebnisse und Fazit .....	254
14	Schlussfolgerungen .....	260
15	Literatur .....	265
16	Anhang: Modellierung von Materialvorleistungen .....	279
16.1	Basistabellen Pkw und Leichte Nutzfahrzeuge .....	279
16.2	Basistabellen Lastkraftwagen .....	282
16.3	Modellierung Karbonfaserverstärkte Kunststoffe (CFK) .....	283
16.4	Modellierung Energiespeichertechnologien für Elektrofahrzeuge .....	284
16.5	Basistabellen Schienenfahrzeuge .....	292
16.6	Modellierung der Flugzeug-Herstellung .....	293



ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 3-1: Entwicklung der Rahmendaten ..... 28

Abbildung 3-2: Entwicklung der Beimischungsanteile ..... 31

Abbildung 3-3: Entwicklung der Anteile von Biodiesel (oben) und Bioethanol (unten)..... 33

Abbildung 3-4: Emissionsfaktoren Benzin..... 43

Abbildung 4-1: Modellverbund Renewbility III im Überblick..... 47

Abbildung 4-2: Schema der Neuzulassungsstruktur – Modellierung ..... 49

Abbildung 4-3: Übersicht Modellcluster zur Ermittlung der Materialvorleistungen..... 63

Abbildung 4-4: Modellierung der Fahrzeugherstellung bei Pkw ..... 66

Abbildung 4-5: Modellierung der Fahrzeugherstellung bei Lkw..... 67

Abbildung 4-6: Überblick über die Modellierungen des Personenverkehrs und Güterverkehrs ..... 69

Abbildung 4-7: Deutschland mit räumlicher Differenzierung nach zusammengefassten Kreistypen..... 72

Abbildung 4-8: Überblick über das Deutschlandmodell ..... 73

Abbildung 4-9: Schematische Darstellung des Modells TEMPS..... 85

Abbildung 4-10: Input-Output-Tabelle in vereinfachtem Schema..... 92

Abbildung 5-1: Abweichung zwischen Testzyklus- und Realverbrauch ..... 99

Abbildung 5-2: Entwicklung des Pkw-Bestands in der Basis, 2010-2050..... 101

Abbildung 5-3: Pkw-Bestand im Jahr 2030 ..... 102

Abbildung 5-4: Pkw-Neuzulassungen im Jahr 2030 ..... 103

Abbildung 5-5: Anschaffungspreise im Jahr 2030 am Beispiel eines Elektro- und Benzin-Pkw (Größenklasse mittel)..... 104

Abbildung 5-6: Herstellungskosten und Anschaffungspreise im Jahr 2030 am Beispiel eines Elektro- und Benzin-Pkw (Größenklasse mittel) ..... 104

Abbildung 5-7: Pkw-Bestand im Jahr 2050 ..... 105

Abbildung 5-8: Bestand Carsharing-Fahrzeuge..... 106

Abbildung 5-9: Pkw-Neuzulassungen im Jahr 2050 ..... 107

Abbildung 5-10: Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen neu zugelassener Pkw in Deutschland gemäß NEFZ in 2030 und 2050 ..... 108

Abbildung 6-1: Entwicklung des Lkw-Bestands in der Basis, 2010-2050..... 111

Abbildung 6-2: Entwicklung des Bestands leichter Nutzfahrzeuge in der Basis, 2010-2050. 111

Abbildung 6-3: Anteile der Größenklassen am Energieverbrauch des Straßengüterverkehrs im Jahr 2010 ..... 112

Abbildung 6-4: Anteil der Fahrleistung Lkw im Jahr 2030 differenziert nach Antriebstypen und Größenklassen.....	113
Abbildung 6-5: Bestand leichte Nutzfahrzeuge im Jahr 2030.....	114
Abbildung 6-6: Lkw-Fahrleistung differenziert nach Antriebstyp und Größenklasse im Jahr 2050.....	115
Abbildung 6-7: Bestand leichte Nutzfahrzeuge im Jahr 2050.....	115
Abbildung 7-1: Übersicht der in 2030 (hellgrün) und 2050 (dunkelgrün) im Szenario Effizienz Plus sowie der Szenarette Maut über ein Carsharingangebot verfügbaren Städte .....	120
Abbildung 7-2: Entwicklung der Personenverkehrsleistung in der Basis.....	123
Abbildung 7-3: Entwicklung des Personenverkehrsaufkommens in den Szenarien 2030.....	126
Abbildung 7-4: Entwicklung der Personenverkehrsleistung in den Szenarien 2030 .....	127
Abbildung 7-5: Entwicklung der Pkw-Fahrtenkosten pro Kilometer und Antriebsart am Beispiel des Szenarios Effizienz .....	128
Abbildung 7-7: Entwicklung der Pkw-Fahrleistung je Antriebsart in den Szenarien 2030 ....	129
Abbildung 7-8: Entwicklung des Personenverkehrsaufkommens in den Szenarien 2050.....	131
Abbildung 7-9: Entwicklung der Personenverkehrsleistung in den Szenarien 2050 .....	132
Abbildung 7-10: Entwicklung der Pkw-Fahrleistung je Antriebsart in den Szenarien 2050 ..	133
Abbildung 7-11: Elektrischer Fahranteil der Pkw im Jahr 2050 .....	134
Abbildung 7-12: Entwicklung der Verkehrsleistung in Kernstädten in den Szenarien .....	136
Abbildung 7-13: Entwicklung der Verkehrsleistung in Kernstädten in den Szenarien (ohne motorisierte Zweiräder und Personenwirtschaftsverkehr) .....	137
Abbildung 7-14: Entwicklung der Flottengröße in Berlin in den Szenarien.....	138
Abbildung 7-15: Entwicklung der Verkehrsleistung in Berlin in den Szenarien (ohne Pendlerverkehr).....	139
Abbildung 7-16: Modal Split in Berlin in den Szenarien (ohne Pendlerverkehr).....	140
Abbildung 7-17: Automatisierungsgrade des Autonomen Fahrens gemäß VDA-Klassifikation .....	141
Abbildung 7-18: Einführungshorizonte automatisierter Fahr- und Parkfunktionen gemäß VDA.....	142
Abbildung 8-1: Güterverkehrsaufkommen in Mrd. Tonnen im Basisszenario bis 2050.....	152
Abbildung 8-2: Verkehrsleistung im Güterverkehr nach Verkehrsträgern im Basisszenario	153
Abbildung 8-3: Verkehrsleistungs-Modal Split im Güterverkehr 2010, 2030 und 2050 im Basisszenario .....	153
Abbildung 8-4: Güterverkehrsaufkommen nach Ladungskategorie (t) von 2010 bis 2050...	154
Abbildung 8-5: Güterverkehrsleistung der Klimaschutzszenarien im Jahr 2030 .....	155

Abbildung 8-6: Güterstruktureffekt durch eine dekarbonisierte Wirtschaft 2050 (Prozent am Aufkommen in den Klimaschutzszenarien vs. Basisentwicklung).....	156
Abbildung 8-7: Güterverkehrsleistung der Klimaschutzszenarien im Jahr 2050.....	157
Abbildung 8-8: Entwicklung der mittleren Transportkosten bis 2050 in Euro (2010).....	157
Abbildung 8-9: Modal Split des Güterverkehrs im Jahr 2050 .....	159
Abbildung 8-10: Fahrleistungen im Straßengüterverkehr .....	160
Abbildung 9-1: Entwicklung der Hinterlandverkehre in Mio. t bis 2050 für Basis- und die Dekarbonisierungsszenarien .....	167
Abbildung 9-2: Entwicklung der Transportleistung im Seeverkehr .....	168
Abbildung 9-3: Entwicklung der Verkehrsleistung des Luftverkehrs in der Basis, 2010-2050 .....	169
Abbildung 9-4: Verkehrsleistung im Luftverkehr im Jahr 2030 und 2050 .....	170
Abbildung 10-1: Materialzusammensetzung auf Einzelfahrzeugebene für verschiedene Pkw-Konzepte und Leichtbauvarianten (Herstellungsjahr 2030) .....	180
Abbildung 10-2: THG-Emissionen auf Einzelfahrzeugebene für verschiedene Pkw-Konzepte und Leichtbauvarianten (Herstellungsjahr 2030) .....	182
Abbildung 10-3: Beiträge von Fahrzeugherstellung und –Nutzungsphase zu den gesamten THG-Emissionen der Pkw-Lebensdauer für verschiedene Pkw-Konzepte.....	183
Abbildung 10-4: THG-Emissionen auf Einzelfahrzeugebene für Diesel- und PHEV-Solo-Lkw 3,5-7,5 t (Herstellungsjahr 2050) .....	184
Abbildung 10-5: THG-Emissionen in der Pkw-Herstellung im Basisszenario .....	185
Abbildung 10-6: Materialeinsatz in der Pkw-Herstellung im Basisszenario .....	186
Abbildung 10-7: Ausgewählte Materialien in der Pkw-Herstellung im Basisszenario .....	187
Abbildung 10-8: THG-Emissionen in der Lkw- und LNF-Herstellung im Basisszenario .....	188
Abbildung 10-9: Materialeinsatz in der Lkw- und LNF-Herstellung im Basisszenario .....	189
Abbildung 10-10: Ausgewählte Materialien in der Lkw- und LNF-Herstellung im Basisszenario .....	190
Abbildung 10-11: THG-Emissionen der Fahrzeugherstellung im Basisszenario .....	191
Abbildung 10-12: Materialien in der Herstellung von Pkw, Lkw und LNF im Basisszenario..	192
Abbildung 10-13: THG-Emissionen in der Pkw-Herstellung im Jahr 2030 .....	193
Abbildung 10-14: Ausgewählte Materialien in der Pkw-Herstellung im Jahr 2030.....	194
Abbildung 10-15: THG-Emissionen in der Lkw- und LNF-Herstellung im Jahr 2030 .....	195
Abbildung 10-16: Ausgewählte Materialien in der Lkw- und LNF-Herstellung im Jahr 2030	196
Abbildung 10-17: THG-Emissionen der Fahrzeugherstellung im Jahr 2030 .....	197
Abbildung 10-18: Materialien in der Herstellung (Pkw, Lkw und LNF) im Jahr 2030 .....	198
Abbildung 10-19: THG-Emissionen in der Pkw-Herstellung im Jahr 2050 .....	199

Abbildung 10-20: Materialeinsatz in der Pkw-Herstellung im Jahr 2050 .....	200
Abbildung 10-21: Ausgewählte Materialien in der Pkw-Herstellung im Jahr 2050 .....	201
Abbildung 10-22: THG-Emissionen in der Lkw- und LNF-Herstellung im Jahr 2050 .....	202
Abbildung 10-23: Ausgewählte Materialien in der Lkw- und LNF-Herstellung im Jahr 2050	203
Abbildung 10-24: THG-Emissionen der Fahrzeugherstellung im Jahr 2050 .....	204
Abbildung 10-25: Materialien in der Herstellung von Pkw, Lkw und LNF im Jahr 2050.....	205
Abbildung 11-1: Endenergiebedarf in der Basis, 2010-2050 .....	212
Abbildung 11-2: Endenergiebedarf in der Basis nach Kraftstoffen, 2010-2050 .....	213
Abbildung 11-3: Endenergiebedarf des nationalen Verkehrs in 2030.....	214
Abbildung 11-4: Endenergiebedarf des Verkehrs inkl. Internationaler Verkehr in 2030 .....	215
Abbildung 11-5: Endenergiebedarf des nationalen Verkehrs in 2050.....	216
Abbildung 11-6: Endenergiebedarf des Verkehrs inkl. internationaler Verkehr in 2050 .....	217
Abbildung 11-7: Strombedarf des nationalen Verkehrs 2050 .....	218
Abbildung 12-1: Treibhausgasemissionen in der Basis, 2010-2050.....	222
Abbildung 12-2: Verkehrssektor: Entwicklung der CO <sub>2</sub> -Emissionen (Historie, Basisszenario und Ziele).....	223
Abbildung 12-3: CO <sub>2</sub> – Emissionen im Jahr 2030.....	224
Abbildung 12-4: Treibhausgasemissionen inkl. Vorketten im Jahr 2030.....	226
Abbildung 12-5: CO <sub>2</sub> – Emissionen im Jahr 2050.....	227
Abbildung 12-6: Treibhausgasemissionen inkl. Vorketten im Jahr 2050.....	228
Abbildung 13-1: Veränderung der Wertschöpfung gegenüber dem Basisszenario .....	240
Abbildung 13-2: Veränderung der Beschäftigung gegenüber dem Basisszenario.....	241
Abbildung 13-3: Szenario Effizienz – Veränderung der Beschäftigung nach Branchen.....	243
Abbildung 13-4: Szenario Effizienz – Veränderungen bei den Haushalten .....	244
Abbildung 13-5: Veränderung der Wertschöpfung gegenüber dem Basisszenario .....	246
Abbildung 13-6: Szenario Effizienz plus – Veränderung der Beschäftigung nach Branchen .	248
Abbildung 13-7: Szenario Effizienz plus – Veränderungen bei den Haushalten.....	250
Abbildung 13-8: Veränderung der Wertschöpfung gegenüber dem Basisszenario .....	252
Abbildung 13-9: Veränderung der externen Kosten gegenüber dem Basisszenario 2050....	254
Abbildung 13-10: Wohlfahrtseffekte der Szenarien im Jahr 2050.....	255
Abbildung 13-11: Beschäftigungseffekte 2050 nach Branchen gegenüber dem Basisszenario .....	258
Abbildung 16-1: Materialzusammensetzung eines Lithium-Ionen Akkus für 2015.....	286
Abbildung 16-2: Spezifische Energiedichte der Speichertechnologien auf Akkuebene .....	290
Abbildung 16-3: Materialzusammensetzung eines Lithium-Schwefel Akkus für 2050 .....	291

Abbildung 16-4: THG-Emissionen aus der Herstellung eines LiS-Akku (1 kWh) bezogen auf Inputgrößen..... 292

## TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 3-1: Kosten Gestehung, Transport, Verteilung strombasierter Kraftstoffe .....	36
Tabelle 3-2: Nutzerkosten Ladeinfrastruktur .....	37
Tabelle 3-3: Energiepreise VP 2030 .....	37
Tabelle 3-4: Kosten und Preise von Biokraftstoffen .....	38
Tabelle 3-5: Zusammensetzung Haushaltsstrompreis .....	39
Tabelle 3-6: Bahnstrompreis .....	40
Tabelle 3-7: Energiepreise Renewbility-Szenarien.....	41
Tabelle 3-8: Emissionsfaktoren fossile Kraftstoffe (Vorketten).....	42
Tabelle 3-9: Emissionsfaktoren Biokraftstoffe .....	45
Tabelle 3-10: Emissionsfaktoren strombasierter Kraftstoffe (Vorketten).....	45
Tabelle 4-1: Im Neuzulassungsmodell verwendete Pkw-Größenklassen .....	50
Tabelle 4-2: Anteile der Größenklassen an den Neuzulassungen.....	50
Tabelle 4-3: Neuzulassungen nach Marktsegmenten im Jahr 2013 .....	52
Tabelle 4-4: Im Neuzulassungsmodell verwendete Anteile von Haltergruppen .....	53
Tabelle 4-5: Im Neuzulassungsmodell verwendete Raumkategorisierung.....	53
Tabelle 4-6: Im Neuzulassungsmodell verwendete Kosten für Versicherung .....	54
Tabelle 4-7: Im Neuzulassungsmodell verwendete variable Kosten der Pkw-Nutzung (ohne Kraftstoffkosten) .....	54
Tabelle 4-8: Durchschnittliche Anzahl langer Fahrten .....	58
Tabelle 4-9: Betrachtete Materialgruppen für die Materialbilanz .....	65
Tabelle 4-10: Quelle-Ziel-Gruppierung.....	75
Tabelle 4-11: Direkte Emissionen fossiler Kraftstoffe.....	86
Tabelle 4-12: Differenzierung der Wirtschaftsbereiche in den Verkehrsbranchen.....	88
Tabelle 4-13: Modellierung der ökonomischen Auswirkungen .....	94
Tabelle 5-1: Reduktion der Pkw-Besitzquote durch Carsharing .....	98
Tabelle 7-1: Realisierte Pkw-Fahrtenkosten pro Kilometer im Jahr 2030 .....	128
Tabelle 7-2: Realisierte Pkw-Fahrtenkosten pro Kilometer im Jahr 2050 .....	133
Tabelle 8-1: Annahmen zum Güterverkehrsaufkommen in den Klimaschutzszenarien .....	149
Tabelle 8-2: Veränderung des Güteraufkommens im Seeverkehr 2030 und 2050 .....	150
Tabelle 9-1: Verteilung der Kraftstoffe in 2050 für Basis und die dekarbonisierten Szenarien .....	166

Tabelle 10-1: Akkutypen der verschiedenen Bezugsjahre für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge .....	174
Tabelle 10-2: Differenzierung von Zweirädern für das Basisjahr 2010.....	179
Tabelle 11-1: Endenergiebedarf (national und international) in PJ in der Basis nach Kraftstoffen, 2010-2050 .....	213
Tabelle 12-1: Prozentuale Minderung der CO <sub>2</sub> -Emissionen ggü. 2005 .....	224
Tabelle 12-2: Prozentuale Minderung der CO <sub>2</sub> -Emissionen ggü. 1990 .....	225
Tabelle 12-3: Prozentuale Minderung der CO <sub>2</sub> -Emissionen ggü. 1990 .....	227
Tabelle 13-1: Wichtigste Analyseebenen der ökonomischen Modellierung.....	233
Tabelle 13-2: Eckwerte Basisszenario .....	237
Tabelle 13-3: Wertschöpfungsanteile der Branchen 2008 und 2050 (Basisszenario).....	238
Tabelle 13-4: Wohlfahrtseffekte der Szenarien im Jahr 2050 .....	256
Tabelle 16-1: Differenzierung von Personenkraftwagen für das Stützjahr 2030 .....	279
Tabelle 16-2: Differenzierung von leichten Nutzfahrzeugen N1 class III für das Stützjahr 2030.....	280
Tabelle 16-3: Ausprägung der Leichtbauszenarien für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge.....	281
Tabelle 16-4: Bauteilgewichte für den Antriebsstrang eines mittleren Pkw (Basisjahr 2010).....	282
Tabelle 16-5: Technische Angaben zu den Fahrzeugkonfigurationen der Lkw .....	282
Tabelle 16-6: Leichtbau bei den Lkw.....	283
Tabelle 16-7: Angenommene Energiedichte verschiedener Zelltypen auf Akkusystemebene (in Wh/kg).....	285
Tabelle 16-8: Verwendete Materialien zur Modellierung der Lithium-Schwefel Zelle .....	289
Tabelle 16-9: Leistungsmerkmale von Schienenfahrzeugen der jeweiligen Fahrzeugkategorie.....	292
Tabelle 16-10: Materialeinsatz ausgewählter Fahrzeugvarianten (kg).....	293
Tabelle 16-11: Differenzierung der Flugzeuge .....	294

# ENDBERICHT

## ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

BEV – Batterie Electric Vehicle

BIP – Bruttoinlandsprodukt

BtL – Biomasse to Liquid

CFK - Faserverbundwerkstoffe

CGE – allgemeines Gleichgewichtsmodell

EE – erneuerbare Energien

EWf – Emission Weighting Factor

GV – Güterverkehr

FCEV – fuel cell electric vehicle

HFO - Heavy Fuel Oil

IOT – Input-Output-Tabelle

KiD – Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland

LiS – Lithium-Schwefel

LQ - Lebensqualität

LZ – Lastzüge

MiD – Mobilität in Deutschland

MIV – motorisierter Individualverkehr

O-Lkw – Oberleitungs-Lkw

ÖV – Öffentlicher Verkehr

ÖPNV – öffentlicher Personennahverkehr

PHEV – plug-in hybrid electric vehicle

PtG – Power to Gas

PtL – Power to Liquid

PtX – strombasierte Kraftstoffe

PV – Personenverkehr

RED – Renewable Energy Directive

# ENDBERICHT

REEV – range extender electric vehicle

SNG – Substitute Natural Gas

SZ – Sattelzüge

VGR – Volkswirtschaftliche Gesamtrechnung

VP 2030 – Verkehrsprognose 2030

## 1 EINLEITUNG

Der Klimawandel schreitet voran. Wenn wir die Erderwärmung aufhalten wollen, müssen wir den Ausstoß klimaschädlicher Treibhausgase radikal senken. Die Weltwirtschaft muss dazu rasch in eine Form umgewandelt werden, die wesentlich weniger Kohlenstoffdioxid als jetzt freisetzt. In Paris hat sich die Welt zu einer weitgehenden Dekarbonisierung und Treibhausgasneutralität unserer Lebens- und Wirtschaftsweise verpflichtet. Konkret heißt das: Wir müssen die Netto-Treibhausgas-Emissionen in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts weltweit auf null bringen. Um Paris umzusetzen, müssen wir unsere Politik auf das Leitbild der weitgehenden Treibhausgasneutralität bis zur Mitte des Jahrhunderts ausrichten. Was wir dann noch an CO<sub>2</sub> ausstoßen, muss an anderer Stelle wieder entzogen werden. Der Handlungsdruck für Maßnahmen zur Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen ist bereits heute enorm. Der Umbau von Energie-, Produktions- und Transportsystemen ist diskussionsintensiv und braucht viel Zeit.

Die Sektoren Landwirtschaft und Industrie können systembedingt nicht vollständig dekarbonisieren. Das heißt, dass die energiebedingten Emissionen auf null gesenkt werden müssen – das gilt auch für den Verkehr. Im Bereich der Stromerzeugung ist dafür die vollständige Umstellung auf erneuerbare Energien unumgänglich. Der Verkehrssektor kann nur durch eine Kombination von technologischen Neuerungen, effizienzsteigernden Maßnahmen und Änderungen der Rahmenbedingungen vollständig CO<sub>2</sub>-frei werden.

Die Treibhausgasneutralität des Verkehrssektors erfordert eine deutliche Trendumkehr. Während die verkehrsbedingten Treibhausgasemissionen nach 2000 leicht abgenommen haben, steigen sie in den letzten Jahren wieder an und befinden sich derzeit (2015) etwa auf dem Niveau von 1990. Das heißt, der Verkehrssektor hat bis jetzt keinen Beitrag zum Klimaschutz geleistet.

Das Projekt Renewbility hat sich in den vergangenen Jahren auf vielfältige Weise mit den Optionen für Politik, Wirtschaft und Zivilgesellschaft im Verkehrssektor auseinandergesetzt. Es handelt sich um ein Forschungsprojekt, das mögliche Entwicklungen des Verkehrssektors durch die Betrachtung von Szenarien darstellt. Dabei werden Optionen aufgezeigt, die Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors zu senken. Mit plausiblen, in sich konsistenten und vorstellbaren Szenarien werden die Potenziale konkreter Maßnahmen für einen sachgerechten Klimaschutz im Verkehr aufgezeigt – und zwar sowohl bezüglich der Umwelt-, als auch der ökonomischen Wirkung.

## 1.1 DAS PROJEKT RENEWBILITY

Ziel der dritten Phase des Projektes war die (Weiter-)Entwicklung eines Modellverbundes, mit dem belastbare Aussagen bezüglich des erforderlichen Anteils der Elektromobilität zum Erreichen der Klimaschutzziele und der Endenergiebedarfsreduzierung des Verkehrs unter der Berücksichtigung der Wirkungen anderer Maßnahmen und deren Wechselwirkungen getroffen werden können.

Für eine umfassende Darstellung möglicher Entwicklungen im Verkehrssektor wurde ein Modellierungsansatz verwendet, mit dem die Wirkung konkreter Instrumente und Maßnahmen hinsichtlich Verkehrsnachfrage, Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen quantifiziert und die damit verbundenen ökonomischen Effekte analysiert werden können. Die dritte Phase von „Renewbility“ zeigt auf, dass – und mit welchen Optionen – eine vollständige Dekarbonisierung des Verkehrssektors möglich ist.

Im Rahmen des Projektes „Renewbility I“ haben das Öko-Institut e.V. und das Institut für Verkehrsforschung im Deutschen Zentrum für Luft und Raumfahrt e.V., gefördert vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Laufzeit bis Ende 2009), einen Modellierungsansatz entwickelt, mit dem die Wirkung konkreter Instrumente und Maßnahmen quantifiziert werden kann. Der gewählte Modellierungsansatz bildet hierfür die Entwicklungen im Verkehrssektor bis zum Jahr 2030 sowohl auf der Angebots- als auch auf der Nachfrageseite ab. Die Analyse der Maßnahmenwirkungen sowie die anschließende CO<sub>2</sub>-Bilanzierung umfassen den innerdeutschen Straßen-, Schienen- und Binnenschiffverkehr und seine direkten sowie indirekten Emissionen. Das Modell wurde in enger Kooperation mit gesellschaftlichen Akteuren der Automobil-, Bahn-, Energie-, Logistik- und Mineralölbranche sowie von Umwelt- und Verbraucherschutzverbänden diskutiert und es wurden gemeinsam mehrere Klimaschutzszenarien für den Verkehrssektor abgeleitet.

Dieses Projekt wurde dann in einer zweiten Phase, im Auftrag des Umweltbundesamtes sowie des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, fortgesetzt (Laufzeit 2010-2012). Im Rahmen von „Renewbility II“ wurde der Modellverbund aktualisiert bzw. weiterentwickelt und weitere Szenarien – wiederum in enger Kooperation mit gesellschaftlichen Akteuren – ausgestaltet und berechnet. Das Ergebnis des zweijährigen Szenarioprozesses war die gemeinsame Ausgestaltung eines besonders ambitionierten Klimaschutzszenarios für den Verkehr bis zum Jahr 2030. Die Entwicklung dieses Szenarios stand unter der Maßgabe, ein konsistentes Maßnahmenbündel zu entwerfen, das einen möglichst hohen Klimaschutzbeitrag des Verkehrssektors bis 2030 ermöglicht. Es erhebt den Anspruch, einen schlüssigen Entwicklungspfad für den Verkehr und die Energiebereitstellung

in Deutschland bis 2030 darzustellen, wobei auch das Thema Elektromobilität in Ansätzen berücksichtigt wurde.

Im Rahmen von Renewability III wurden nun Szenarien erarbeitet, die auch bis zum Jahr 2050 reichen. Es wurde verstärkt auf das Thema „Strom im Verkehr“ und die Wechselwirkungen zwischen dem Verkehrssektor und dem Stromsektor eingegangen. Neue Mobilitätsangebote wie z. B. Carsharing werden in den Szenarien berücksichtigt und erstmals auch der internationale Luft- und Seeverkehr einbezogen. Auch in der dritten Projektphase wird die erfolgreiche Zusammenarbeit mit Stakeholdern in einem partizipativen Prozess fortgesetzt. Das Projekt wird im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) von Ende 2013 bis Ende 2016 durchgeführt. Die Komplexität und inhaltliche Breite des Projektes wird von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern des Öko-Instituts (Projektleitung), dem Institut für Verkehrsforschung im DLR, von INFRAS und dem ifeu-Institut abgedeckt. Für die Kommunikation ist die Agentur tippingpoints eingebunden.

## 1.2 DIE SZENARIO-GRUPPE

Im Projekt „Renewability“ wurde erstmals ein partizipativer Prozess mit der wissenschaftlichen Erarbeitung stoffstromorientierter Szenarien gekoppelt. Durch die Beteiligung von Stakeholdern aus den Bereichen Mobilität und Energie gingen auf Basis eines diskursiven Prozesses unterschiedliche Positionen und Interessen in die Gestaltung der Szenarien ein. Dies wurde über eine Diskussion im Rahmen einer sogenannten Szenario-Gruppe gewährleistet, die aus Vertretern der Automobil-, Bahn-, Energie- und Logistikbranche sowie Umwelt- und Verbraucherschutzverbänden bestand. In „Renewability I“ traf sich die Szenario-Gruppe in einem Zeitraum von etwa 2 Jahren für zwölf Sitzungen, im Rahmen von „Renewability II“ für fünf Sitzungen und brachte ihr Wissen und ihre Standpunkte in das Forschungsvorhaben ein. In der ersten Projektphase erfolgte basierend auf Ergebnissen verschiedener analytischer Szenarien im Kreis der Szenario-Gruppe eine eingehende Diskussion der Funktionalität des Analyseinstrumentariums und der Wirkungsweise und -mächtigkeit von unterschiedlichen Maßnahmen. Im Projektverlauf von „Renewability I und II“ wurde dann jeweils ein gemeinsames Bündel von Annahmen und Maßnahmen abgeleitet. Maßgabe hierbei war es, zusätzlich zum Basisszenario weitere Handlungsoptionen für den Klimaschutz im Verkehrssektor zu identifizieren und in ein Klimaschutzszenario für Deutschland zu integrieren, wobei „Renewability II“ auf ein besonders ambitioniertes Klimaschutzszenario abzielte, das über das von „Renewability I“ hinausgehen sollte.

Dieses partizipative und diskursive Verfahren hat sich im Verlauf des Projektes „Renewbility“ als sehr fruchtbar erwiesen. Daher wurde auch in der dritten Projektphase die erfolgreiche Zusammenarbeit mit Stakeholdern fortgesetzt. Die Konzeption und die Ergebnisse der Szenarien wurden in sechs gemeinsamen Workshops kritisch reflektiert. Die Mitglieder der Szenario-Gruppe haben sich in entscheidenden Phasen des Projekts über die gesamte Laufzeit hinweg z. T. auch bilateral beratend eingebracht. Aufgrund der Vielfalt an Expertise und Arbeitsfeldern der eingebundenen Personen spiegeln die Szenarien nicht notwendigerweise in allen Punkten die Meinung der gesamten Gruppe wieder.

Die Szenario-Gruppe umfasst folgende Vertreterinnen und Vertreter:

- ADAC e.V.: Michael Niedermeier
- AGORA Energiewende: Dr. Matthias Deutsch
- BMW Group: Dr. Carl-Friedrich Eckhardt
- BP Europa: Tobias Wolny
- Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft e.V.: Uta Maria Pfeiffer
- Dachser SE: Dr. Andreas Froschmayer
- Deutsche Bahn AG: Erhard Michel
- Deutsche Post DHL: Julia Binder
- E.ON SE: Dr. Stefan Becker
- Naturschutzbund Deutschland e.V. (NABU): Dietmar Oeliger, Daniel Rieger
- Shell Deutschland: Dr. Jörg Adolf
- Verband der deutschen Biokraftstoffindustrie: Elmar Baumann
- Verband der Automobilindustrie (VDA): Dr. Stefan Wöhrli
- Verband Deutscher Reeder: Matthias Plötzke
- Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV): Dr. Till Ackermann
- Verkehrsclub Deutschland e.V. (VCD): Gerd Lottsiepen, Michael Müller-Görnert

## 2 DIE SZENARIO-PHILOSOPHIE

Es gibt grundsätzlich mehrere Ansätze, Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor zu reduzieren:

- die Reduktion der Verkehrsnachfrage, beispielsweise durch kürzere Wege oder die Verringerung der Anzahl an Arbeitswegen,
- die Verlagerung auf energieeffizientere und klimafreundlichere Verkehrsmittel, etwa durch die Stärkung multimodaler Lösungen, steuerliche Maßnahmen oder die Förderung des Radverkehrs,
- den Einsatz energieeffizienterer Fahrzeuge, begünstigt durch verschärfte gesetzliche Rahmenbedingungen bei CO<sub>2</sub>-Grenzwerten oder eine Forcierung der Elektromobilität,
- die Dekarbonisierung der eingesetzten Energieträger durch den Einsatz von nachhaltigen bio- oder strombasierten flüssigen und gasförmigen Kraftstoffen und Strom aus erneuerbaren Energiequellen.

In Renewbility III werden nur Klimaschutzszenarien betrachtet, die bis zum Jahr 2050 zu einer vollständigen Dekarbonisierung des Verkehrssektors führen. Das bedeutet, dass die benötigte Energie zu diesem Zeitpunkt über Strom aus erneuerbaren Energien, mit strombasierten Kraftstoffen (mit Strom aus erneuerbaren Energien) oder Biokraftstoffen abgedeckt werden muss.

Um die Effekte der Dekarbonisierung einordnen und bewerten zu können, wurde zunächst ein „Basisszenario“ ohne Dekarbonisierung und zusätzliche Klimaschutzmaßnahmen entwickelt. Darauf aufbauend wurden zwei Klimaschutzszenarien (Effizienz und Effizienz plus) modelliert.

In dem Szenario Effizienz führt eine Effizienzsteigerung der Fahrzeuge bis zum Jahr 2050 zu einem sehr hohen Anteil der Elektromobilität, und zwar sowohl bei Pkw als auch bei Lkw. Die verbleibenden Flüssigkraftstoffe werden großteils auf Basis von Strom aus erneuerbaren Energiequellen bereitgestellt.

In einem Szenario Effizienz plus wurden zusätzlich zu den effizienzsteigernden Maßnahmen auch Schritte zur Steigerung der Lebensqualität (LQ) in Innenstädten und eine Ertüchtigung des Schienengüterverkehrs berücksichtigt.

In ergänzenden Szenarien wurde analysiert, wie die Entwicklung ohne Maßnahmen zur deutlichen Effizienzsteigerung verlaufen würde. Darüber hinaus wurden die Auswirkungen einer Pkw-Maut und die Folgen des Einsatzes von Oberleitungs-Lkw untersucht.

	SZENARIO BASIS	SZENARIO EFFIZIENZ	SZENARETTE FOKUS KRAFTSTOFFE	SZENARIO EFFIZIENZ PLUS	SZENARETTE PKW-MAUT	SZENARETTE OHNE O-LKW
Kraftstoffmix	konv. Kraftstoffe	95 % PtX 5 % Biokraftstoffe	95 % PtX 5 % Biokraftstoffe	95 % PtX 5 % Biokraftstoffe	95 % PtX 5 % Biokraftstoffe	95 %PtX 5 % Biokraftstoffe
Kraftstoffpreise	niedrige Kraftstoffpreise	hohe Kraftstoffpreise	mittlere bis hohe Kraftstoffpreise	hohe Kraftstoffpreise	hohe Kraftstoffpreise	hohe Kraftstoffpreise
Pkw-Grenzwert	95 g	60 g (2030) 10 g (2050)	95 g	60 g (2030) 10 g (2050)	60 g (2030) 10 g (2050)	60 g (2030) 10 g (2050)
Verfügbarkeit O-Lkw	konv. Lkw	Oberleitungs-Lkw	konv. Lkw	Oberleitungs-Lkw	Oberleitungs-Lkw	konv. Lkw
Maßnahmen zur Verlagerung				„Lebenswerte Innenstadt“ und „Ertüchtigung Schienengüterverkehr“		
Pkw-Maut	nein	nein	nein	nein	ja (4 ct/km)	nein

Quelle: Renewability III

Die Szenarien und Szenaretten bieten dabei Antworten auf Fragen wie die folgenden:

- Welche Optionen einer vollständigen Dekarbonisierung sind volkswirtschaftlich günstig, welche weniger?
- Wie viel Kraftstoff und Strom werden für die unterschiedlichen Pfade benötigt?
- Welche möglichen zusätzlichen Vorteile ergeben sich beispielsweise hinsichtlich der externen Kosten?

## 2.1 BASISZENARIO

Die Verkehrsprognose 2030 (VP 2030) ist die Referenzentwicklung, d. h. alle Nachfragemodelle wurden daran kalibriert.

Das Basisszenario im Rahmen von Renewability stellt jedoch ein Szenario mit „aktuellen Maßnahmen“ dar, d. h. ohne die zusätzlichen in der VP 2030 hinterlegten Maßnahmen. Damit ergeben sich folgende Unterschiede zur Verkehrsprognose:

- Mineralölsteuersätze bleiben real konstant, keine weitere Anhebung wie in VP 2030 hinterlegt
- Effizienzentwicklung und Antriebsmix Pkw wird nachfrageorientiert modelliert
- Lkw-Maut und Trassenpreise Schiene bleiben konstant
- keine Erhöhung der Luftverkehrssteuer
- geringerer Anteil Biokraftstoffe wird angenommen (~5 % statt über 10 %); nach 2030 nur noch Abfall- und Reststoffe
- konstante Lohnkosten im Güterverkehr
- Annahmen zu Auslastungen, Leerfahrtenanteilen und Umschlägen im Schienenverkehr.

Die Verkehrsprognose 2030 diente somit in Renewbility III als Vergleichs- und Ausgangspunkt sowie zur Kalibrierung der Modelle (VP 2030), insbesondere der Verkehrsnachfragemodelle, der Pkw-Neuzulassungen sowie der Motorisierungsrate.

Rahmendaten bis 2030 zu BIP, Wertschöpfung, Bevölkerungsentwicklung, Rohölpreisen werden der Verkehrsprognose 2030 entnommen (VP 2030). Eine Fortschreibung bis 2050 erfolgt in Anlehnung an das Szenario Aktuelle-Maßnahmen-Szenario 2012 (AMS (2012)) des Projektes „Klimaschutzszenario 2050“ des BMUB (KSZ 2050).

Wichtig anzumerken ist, dass das so gestaltete Basisszenario kein Klimaschutzszenario darstellt.

## 2.2 SZENARIO EFFIZIENZ

Die zentrale Fragestellung des Effizienz-Szenarios war: Was passiert, wenn die Dekarbonisierung der Kraftstoffe mit einer maximalen Fahrzeugeffizienz kombiniert wird, wenn also ein rein technologischer Ansatz zum Klimaschutz gewählt wird?

Wesentliche Annahmen im Szenario Effizienz sind:

- für Pkw gilt im Jahr 2030 ein CO<sub>2</sub>-Grenzwert von 60 g/km und in 2050 von 10 g/km,
- Oberleitungs-Lkw und die entsprechende Infrastruktur sind europaweit verfügbar,
- die Kraftstoffkosten steigen durch PtX-Kraftstoffe und Steuern deutlich an.

Die Effizienzsteigerung und der Anteil alternativer Antriebe bei den Neuzulassungen von Pkw und Lkw, welche sich unter diesen Rahmenbedingungen ergeben würden, werden von den eingesetzten Modellen berechnet.

*Grenzwerte für Pkw:* Die Pkw-Grenzwerte von 60 g/km in 2030 und 10 g/km in 2050 sorgen sowohl für eine deutliche Effizienzsteigerung der konventionellen Pkw als auch für einen zunehmenden Anteil elektrischer Fahrzeuge. Zur Ermittlung des Verbrauchs wurde dabei der „Neue Europäische Fahrzyklus (NEFZ)“ herangezogen und um einen Realaufschlag von 35 % ergänzt.

*Einführung von Oberleitungs-Lkw:* Auch mit drastischen Maßnahmen zur Förderung des Schienenverkehrs ist davon auszugehen, dass sich nur ein Teil des Güterverkehrs auf die Schiene verlagern lässt. Als energieeffiziente Option zur Dekarbonisierung des verbleibenden Straßengüterverkehrs wurde die Einführung von Oberleitungs-Lkw berücksichtigt. Dadurch lässt sich die Energieeffizienz des Straßengüterverkehrs gegenüber Verbrennungsmotoren weiter steigern. Die Annahmen gehen von einem langfristigen Aufbau einer europaweiten Infrastruktur und einem maximalen Potenzial in 2050 von 80 % an Oberleitungs-Lkw bei Last- und Sattelzügen aus. Es wird davon ausgegangen, dass diese wiederum 80 % ihrer

Strecken elektrisch zurücklegen. Dabei ist berücksichtigt, dass die Lkw auf Vor- und Zuläufen zu elektrifizierten Strecken durch eine Batterie ebenfalls elektrisch fahren können. Insgesamt würden damit rund zwei Drittel des Straßengüterfernverkehrs elektrisch zurückgelegt. Die Kosten der erforderlichen Infrastruktur werden vollständig von den Nutzern getragen. Ausgehend von einem Investitionsvolumen von 13 Milliarden Euro in zehn Jahren lassen sich bei einer Abschreibungsperiode von 20 Jahren damit etwa 8.000 km Autobahnen (60 %) beidseitig mit Oberleitung ausstatten (vgl. auch 3.3.1).

*Kraftstoffpreise:* In diesem Szenario wird der Steuervorteil für Dieselmotoren abgeschafft, die Energiesteuern werden nach Energiegehalt bemessen. Sie steigen bis 2040 auf 32 Euro (2010) pro Gigajoule für alle Kraftstoffe, was beispielsweise für Benzin eine Erhöhung auf rund 1 Euro/Liter bedeutet, für Diesel auf 1,15 Euro und für Strom auf 11,5 ct/kWh. Diese Annahme entspricht je Energieeinheit der Besteuerung, die gemäß der VP 2030 im Jahr 2030 auf Benzin eingehoben werden soll. Die Nutzer elektrischer Fahrzeuge müssten ab diesem Jahr dann auch die Kosten der Ladeinfrastruktur tragen. Das gilt sowohl für Pkw als auch für das Oberleitungssystem der Lkw.

Die Steuererhöhung ist dabei auch dadurch begründet, dass die Steuereinnahmen des Straßenverkehrs etwa gleich bleiben sollen. Denn durch steigende Effizienz würden sonst die Kraftstoffsteuereinnahmen erheblich zurückgehen, obwohl die zurückgelegte Pkw-Fahrleistung und die damit verbundenen volkswirtschaftlichen Kosten etwa für die Infrastruktur gleich blieben. Einen im Vergleich zu den Steuern wesentlich größeren Effekt auf die Nutzerkosten hat der zunehmende Anteil strombasierter Kraftstoffe auf 5 % in 2030 und 95 % in 2050.

Zwischen 2010 und 2030 steigen die realen Benzinpreise dadurch um 1,3 % pro Jahr, die Dieselpreise um 2,4 % real an – also zusätzlich zur normalen Inflation. Zwischen 2030 und 2050 liegt der Anstieg bei über 3 %. Die Verbraucherpreise für einen Liter Diesel sind damit im Jahr 2050 rund dreimal so hoch wie heute. Dagegen steigt der Strompreis zwischen 2030 und 2050 nur noch leicht an.

Das Klimaschutzziel wird darüber hinaus durch eine Dekarbonisierung der Kraftstoffe mit Biokraftstoffen und strombasierten Kraftstoffen erreicht (vergleiche Kapitel 2.4).

*Güterverkehr:* In allen Klimaschutzzszenarien wird eine dekarbonisierte Welt hinterlegt und von einer solchen ausgegangen. Dadurch gibt es Veränderungen im Transportaufkommen und auch der Transportleistung hinsichtlich z. B. Kohle, Stahl etc. (siehe Kapitel 8.2.1).

## 2.2.1 SZENARETTE FOKUS KRAFTSTOFFE

Was passiert, wenn die Effizienzverbesserung von Pkw und Lkw **nicht** durch politische Maßnahmen wie z. B. Grenzwerte unterstützt wird? Und wenn darüber hinaus auch weder die Voraussetzungen für den Einsatz von Oberleitungs-Lkw geschaffen, noch die Kraftstoffsteuern deutlich angehoben werden?

In dieser Situation kann das wesentliche politische Instrument zur Dekarbonisierung nur darin bestehen, einen wachsenden Anteil strombasierter Kraftstoffe im Verkehr sicherzustellen. Den einzigen Treiber für eine Effizienzsteigerung stellt dann die Steigerung der Kraftstoffkosten dar, die durch den über die Jahre ansteigenden Anteil der teureren strombasierten Kraftstoffe zustande kommt. Gegenüber 2010 steigen dadurch die Kraftstoffkosten bis 2030 um rund 30 % und bis 2050 um 110 bis fast 150 %. Der Anstieg der Strompreise liegt gegenüber 2010 dagegen bis 2050 bei nur knapp 50 %.

Wie würde sich eine solche rein kraftstoffbasierte Strategie auf Fahrzeugbestände, Verkehrsnachfrage und Energiebedarf auswirken? Das ist die Fragestellung der Szenarette Fokus Kraftstoffe.

## 2.3 DAS SZENARIO EFFIZIENZ PLUS

Zusätzlich zu einer maximalen Effizienzsteigerung bei den Fahrzeugen und zu der Dekarbonisierung der Kraftstoffe werden in diesem Szenario auf Basis von Diskussionen im Rahmen des Stakeholder-Dialogs Maßnahmenbündel zu den Themen Lebensqualität in Innenstädten und Verlagerung des Güterverkehrs auf die Schiene hinterlegt.

### 2.3.1 LEBENSQUALITÄT IN INNENSTÄDTEN

In dem Szenario Effizienz plus Lebensqualität gehen wir davon aus, dass im Jahr 2050 – zusätzlich zu den bereits im Szenario Effizienz hinterlegten Annahmen – eine Reihe weiterer Maßnahmen umgesetzt ist:

- **„Stadt der kurzen Wege“:** durch verbesserte Nahraumversorgung und eine stärkere Nutzungsdurchmischung in Städten ab 50.000 Einwohnern
- **Emissionsfreie Innenstädte:** innerstädtische Zufahrtsbeschränkungen für emittierende Fahrzeuge in Städten über 200.000 Einwohner mit flächendeckender Ladeinfrastruktur in diesen Gebieten
- **Carsharing-Angebote:** mit Elektrofahrzeugen in allen Städten über 50.000 Einwohner
- **Parkraummanagement:** mit substantieller Erhöhung der Preise, insbesondere in den Carsharing-Zonen, und gleichzeitiger Gebührenbefreiung für Carsharing-Fahrzeuge
- **Tempo 30:** als Regelgeschwindigkeit innerorts mit Ausnahme des Hauptstraßennetzes

- **Attraktivitätssteigerung des öffentlichen Verkehrs und des Radverkehrs sowie eine zunehmende Marktdurchdringung von Pedelecs:** dadurch eine Reisezeitverkürzung um 20 % im öffentlichen Verkehr und 16 % im Radverkehr.

Angesprochen werden aber auch die Verkehre über längere Distanzen. Daher geht das Szenario Effizienz plus Lebensqualität auch von einer Steigerung der Attraktivität des öffentlichen Fernverkehrs aus – in Form einer Reisezeitverkürzung von 10 bis 20 %. Einige der Maßnahmen werden bereits im Jahr 2030 vollständig oder teilweise umgesetzt.

### 2.3.2 SZENARETTE MIT PKW-MAUT

80 % der Verkehrsleistung wird außerhalb von Kernstädten und insbesondere auf den langen Distanzen erbracht. Hier ist eine Verlagerung des Personenverkehrs auf energieeffizientere Verkehrsmittel wünschenswert, um den Endenergiebedarf des Verkehrs zu reduzieren und dadurch eine vollständige Dekarbonisierung des Verkehrs zu erleichtern.

Dafür gibt es prinzipiell mehrere Optionen, etwa eine stärkere Förderung des öffentlichen Verkehrs, eine Änderung der Dienstwagenbesteuerung, Geschwindigkeitsbeschränkungen auf Autobahnen oder aber die Einführung einer fahrleistungsabhängigen Pkw-Maut.

Die Option „Pkw-Maut“ wurde in einer eigenen Szenarette abgebildet. Dafür wurde angenommen, dass es im Jahr 2050 eine Pkw-Maut in Höhe von 4 Cent/Kilometer auf allen Straßen gibt. Das entspricht etwa den durchschnittlichen Kosten für Bau und Erhalt der Infrastruktur, welche den Pkw zuzurechnen sind. Die Einführung der Maut auf allen Straßen verhindert Ausweicheffekte. Die Maut fällt pro gefahrenen Pkw-Kilometer an, ist also abhängig von der tatsächlich erbrachten Fahrleistung. Das sorgt dafür, dass diese Kosten bei jeder neuen Verkehrsmittelwahl berücksichtigt werden.

Wenn die Mauterlöse zu 100 % an die Bevölkerung zurückverteilt werden, handelt es sich um eine reine Lenkungssteuer. Sie ist abgesehen von den Umsetzungskosten für die öffentliche Hand haushaltsneutral.

### 2.3.3 ATTRAKTIVITÄTSTEIGERUNG SCHIENENGÜTERVERKEHR

Um die Attraktivität des Schienengüterverkehrs zu steigern, werden im Szenario Effizienz plus verschiedene Maßnahmen implementiert, die die Effizienz des Schienengüterverkehrs erhöhen. Durch automatische Bremsproben und eine automatische Fahrzeugüberwachung beschleunigt sich die Zugbildungszeit um die Hälfte. Es wird außerdem von einem um ein Drittel schnelleren Güterumschlag durch effizientere Technik im kombinierten Verkehr ausgegangen. Dadurch verringern sich die Transportzeiten und auch die Nutzungszeit der Wagen, die Kosten für die Übergabe von Wagen an das Transportunternehmen (erste/letzte

Meile), die Kosten für den Umschlag selbst und für Umstellvorgänge von Wagen. Weiterhin wird die mittlere freie Geschwindigkeit im Netz von 80 km/h auf 100 km/h erhöht und angenommen, dass sich durch betriebliche Maßnahmen und eine Erweiterung der Infrastruktur an Engstellen die Anzahl der Halte von durchschnittlich einem Halt je 50 km auf einen Halt je 100 km reduziert. Die Länge der Güterzüge wird unter Beibehaltung eines Maximalgewichts von 2.000 t (Erzzüge: 2.400 t) und einer Maximallänge von 750 m um maximal sechs Wagen verlängert.

#### 2.3.4 SZENARETTE OHNE OBERLEITUNGS-LKW

Um zu untersuchen, wie sich Endenergiebedarf und Emissionen ohne Einführung eines Oberleitungs-Lkw entwickeln, wurde in einer Szenarette das Szenario Effizienz plus auch ohne Oberleitungs-Lkw abgebildet. So lässt sich auch die Wirkung der Maßnahmen zur Ertüchtigung des Schienengüterverkehrs besser bewerten. Ob der Oberleitungs-Lkw eine realistische Option ist, hängt stark von seiner Wirtschaftlichkeit, den Finanzierungsmöglichkeiten und einer länderbergreifenden Lösung ab.

### 2.4 DIE ROLLE DER KRAFTSTOFFE IN DEN SZENARIEN

Der Beitrag der Biokraftstoffe ist aufgrund der ausschließlichen Nutzung von Abfall- und Reststoffen in den Renewability-Szenarien auf maximal rund 90 PJ beschränkt, im Jahr 2030 sind das nur rund 5 %.

Bei den strombasierten Kraftstoffen wird langfristig eine Verwendung nur dort für sinnvoll erachtet, wo es keine anderen Optionen gibt. Vor dem Hintergrund der Ziele der EU-Richtlinie zu erneuerbaren Energien wird in Renewability von einem Anteil von 5 % strombasierter Kraftstoffe in 2030 ausgegangen. Bis zum Jahr 2050 steigt der Anteil strombasierter Kraftstoffe an den flüssigen und gasförmigen Kraftstoffen in den Szenarien dann auf 95 % an. Zusammen mit dem Einsatz von Biokraftstoffen, dessen Anteil bei 5 % verbleibt, wird so eine vollständige Dekarbonisierung des Verkehrssektors möglich.

Um einen zunehmenden Anteil strombasierter Kraftstoffe zu erzielen, wird in den Renewability-Szenarien von einer Quote ausgegangen. Die Herstellungskosten werden zwar bis zum Jahr 2050 beispielsweise durch Skaleneffekte erheblich sinken. Trotzdem werden die Kosten strombasierter Kraftstoffe selbst bei optimistischen Annahmen im Jahr 2050 vermutlich noch rund 50 % über denen fossiler Kraftstoffe liegen.

Die Renewability-Szenarien gehen von einer 100-prozentigen Auslandsproduktion strombasierter Kraftstoffe auf Basis erneuerbarer Energien aus, da die Stromgestehungskosten dort niedriger sind und es größere Potenziale für erneuerbare

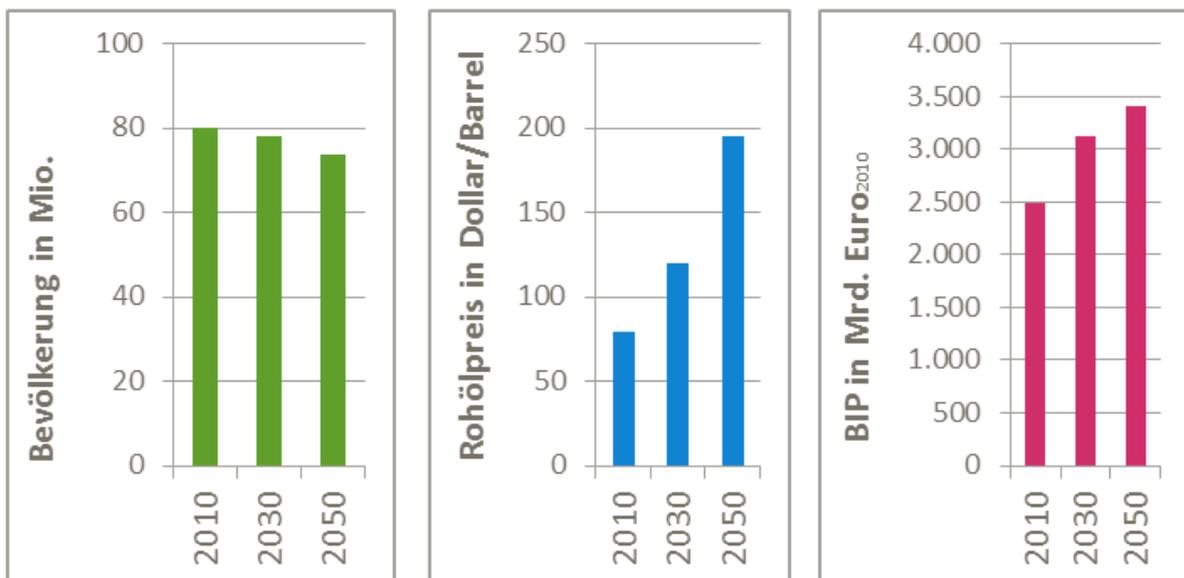
Energien gibt. Die zusätzlichen Herstellungskosten für die alternativen Kraftstoffe werden in den Szenarien vom Nutzer getragen.

## 3 RAHMENDATEN UND –ANNAHMEN

### 3.1 DEMOGRAPHISCHE UND GESAMTWIRTSCHAFTLICHE RAHMENDATEN

Die Rahmendaten bis 2030 zu BIP, Wertschöpfung, Bevölkerungsentwicklung und Rohölpreisentwicklung werden der Verkehrsprognose 2030 entnommen (VP 2030). Eine Fortschreibung bis 2050 erfolgt in Anlehnung an das AMS (2012) Szenario des Projektes „Klimaschutzszenario 2050“ (KSZ 2050) des BMUB (2015).

Abbildung 3-1: Entwicklung der Rahmendaten



Quelle: VP 2030 und BMUB 2015

**Exkurs: Klimaschutzszenario 2050**

Das vom BMUB geförderte Projekt Klimaschutzszenario 2050 (KSZ 2050) beschäftigt sich mit der Modellierung verschieden ambitionierter Klimaschutzszenarien für den Zeithorizont bis 2050. Zentrale Fragestellungen dabei sind: Welche Emissionsminderung könnte erreicht werden, wenn die aktuelle Energie- und Klimapolitik fortgeschrieben wird? Welche Maßnahmen und Strategien sind notwendig, um die Klimaziele zu erreichen? Welche Kosten/Nutzen-Relationen ergeben sich daraus für die Verbraucher und die Volkswirtschaft? In der nun 2. Runde dieses Vorhabens wurden folgende Szenarien betrachtet:

*Aktuelle-Politiken-Szenario: AMS (2012)*

Dieses Szenario ist dadurch gekennzeichnet, dass alle (klimaschutzrelevanten) Maßnahmen berücksichtigt werden, die bis Oktober 2012 ergriffen worden sind. Dieses Szenario bildet den Ist-Stand der energie- und klimapolitischen Rahmensetzungen ab.

*Klimaschutzszenario 80 (KS80)*

In diesem Szenario werden die im Energiekonzept der Bundesregierung festgelegten Ziele für Treibhausgasemissionen, erneuerbare Energien und Energieeffizienz möglichst erreicht. Die Treibhausgasemissionen in 2050 werden dabei gegenüber 1990 um 80 % verringert.

*Klimaschutzszenario 95 (KS95)*

In diesem, dem stringentesten Szenario, wird bis zum Jahr 2050 eine Reduktion der Treibhausgasemissionen in Deutschland von 95 % gegenüber 1990 erreicht.

*Rahmendaten*

Um diese Szenarien umfassend zu modellieren, wurde ein konsistentes Set von Rahmendaten erstellt. Neben Primärenergiepreisentwicklungen, betrifft dies beispielsweise auch Annahmen zum BIP und der Bevölkerung. Auf diese Rahmendaten wird daher im Rahmen von Renewbility III für das Basisszenario und den Zeitraum nach 2030 zurückgegriffen.

Darüber hinaus bilden wesentliche Outputs - Produktion von Gütern - des KS95 Szenarios den Input hinsichtlich des Transportaufkommens für die Güterverkehrsmodellierung in den Klimaschutzszenarien Renewbility III.

Weitere Informationen zum Projekt: <http://www.oeko.de/oekodoc/2451/2015-608-de.pdf>

## 3.2 POTENZIALE DEKARBONISierter ENERGIETräger

### 3.2.1 BIOKRAFTSTOFFE

In der Verkehrsverflechtungsprognose wurden die Biokraftstoffanteile aus TREMOD (ifeu 2012b) hinterlegt. Diese betragen 10 % für Ethanol im Ottokraftstoff und 13 % für Biodiesel im Diesel. Vor dem Hintergrund aktueller Entwicklungen auf nationaler und auf EU-Ebene werden in Renewbility diese Annahmen angepasst.<sup>1</sup> Entscheidend ist dabei die Deckelung des auf die Quote anrechenbaren Anteils der Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse auf maximal 7 % und der erklärte politische Wille, die Förderung dieser Kraftstoffart nach 2020 nach einem bisher jedoch noch nicht festgelegten Zeitplan zu beenden. Die EU-Kommission priorisiert zwar die sogenannten „*fortschrittlichen Biokraftstoffe*“, doch werden die derzeitigen Anreize („Richtwert“ von 0,5 % und Doppelanrechnung) seitens der Autoren nicht als ausreichend angesehen, um entsprechende Investitionen und Weiterentwicklungen in diesem schwierigen Bereich anzustoßen.

Basis- und Klimaschutzszenario werden daher genau an diesem Punkt differenziert:

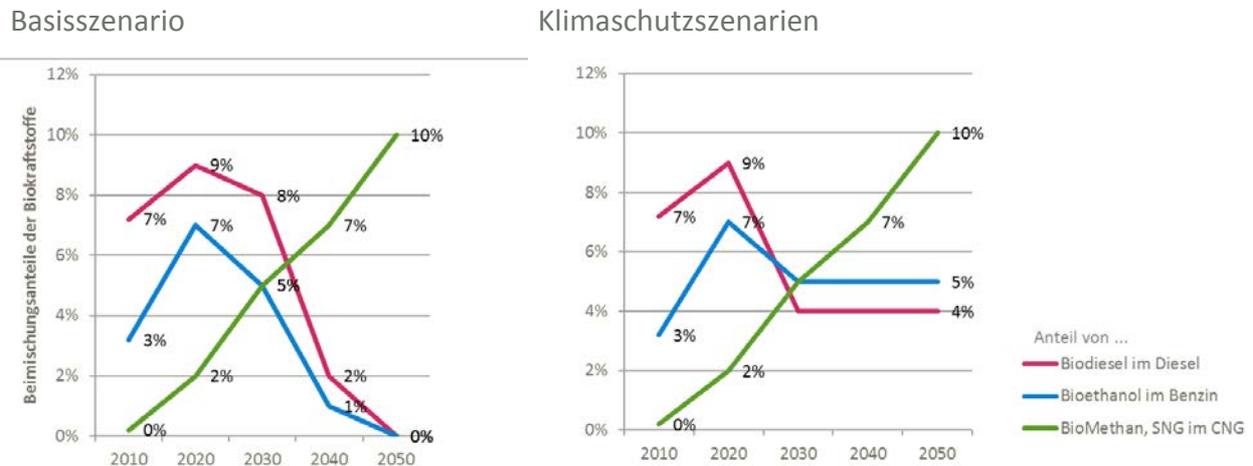
**Basisszenario:** Es finden entsprechend der aktuellen Diskussion in der Politik keine wesentlichen Bewegungen in der Biokraftstoffpolitik statt. Dies führt zu einem verschleppten Phase-out von Biokraftstoffen der 1. Generation bei wenig bis gar keinen Anteilen von fortschrittlichen Biokraftstoffen. Der Rückgang des Gesamtanteils an Biokraftstoffen bis auf null erfolgt bis 2050.

**Klimaschutzszenarien:** Politik-Input führt zu relativ rascher Zunahme von *progressive fuels* (auch mehr Biomethan/BioSNG), bei Phase-Out von Biokraftstoffen der 1. Generation bis 2050 (bei Bioethanol schneller, weil die für Lignozellulose-Technik eine etwas schnellere ökonomische Realisierung vermutet werden kann als bei Biodiesel auf BtL-Basis und die erste Generation Bioethanol sich generell langsamer umsetzt als beim Biodiesel<sup>2</sup>).

---

<sup>1</sup> Dies ist in erster Linie die Richtlinie (EU) 2015/1513 zur Änderung der RED und der FQD, die sogenannte „ILUC-Richtlinie“.

Abbildung 3-2: Entwicklung der Beimischungsanteile



Quelle: Renewbility III

### 3.2.1.1 Herkunft und Entwicklung der einzelnen Biokraftstoffarten

Ausgangsbasis bilden die Analysen der BLE (2014), in welchen die tatsächlichen Anteile an verschiedenen Biokraftstoffarten seit Geltung der BiokraftNachV ausgewertet wurden. Eckpunkte für die weitere Entwicklung bis 2020 bilden:

- der 7 %-Deckel für Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse,
- die Erfüllung der 6 % THG-Gesamtminderung im Kraftstoffbereich,
- die bereits beobachtbaren Trends durch Verschiebungen zu preislich günstigeren Erzeugnissen (z. B. Abnahme des Anteils von Rapsdiesel zu Gunsten steigender Anteile von hydriertem Palmöl (HVO)),
- die Ausschöpfung technischer und ökonomischer einfach zu hebender Potenziale an Reststoffen (v. a. Altpflanzenöl (UCO)),
- die ohne weitere starke Förderung nicht eintretende Etablierung der *progressive fuels* (hierin Unterscheidung der Szenarien).

Für die Entwicklung nach 2020 führt eine zurückhaltende Förderung fortschrittlicher Biokraftstoffe (Basisszenario) somit zum baldigen Phase-out. In den Klimaschutzszenarien wird bei Biodiesel noch ein Anteil kostengünstige erste Generation- und UCO-Biodiesel verbleiben, während BtL nur langsam eine wichtigere Rolle einnehmen wird. Bioethanol auf Lignocellulose dagegen wird eine flächendeckendere Rolle einnehmen, im Basisszenario jedoch nur auf geringem absolutem Niveau.

Diese Ansätze beruhen auf der Auswertung verschiedener Potenzialanalysen, v. a. Majer et al. (2014), FNR (2014), Erhard et al. (2014). Letztere haben bereits diverse

Grundlagenstudien zusammengeführt und dabei ein Potenzial von ca. 250 PJ Biokraftstoff abgeleitet: 60 % davon allein als BtL auf Basis verschiedener holzartiger Reststoffe, 23 % als Biomethan aus Gülle und Bioabfall sowie 15 % Bioethanol aus Stroh und Landschaftspflegematerial. Eine weitergehende kritische Bewertung dieser Einschätzung durch die Autoren lässt das als realisierbar anzusehende Potenzial von 250 PJ auf unter 100 PJ absinken, ausgehend von folgenden Reflektionen:

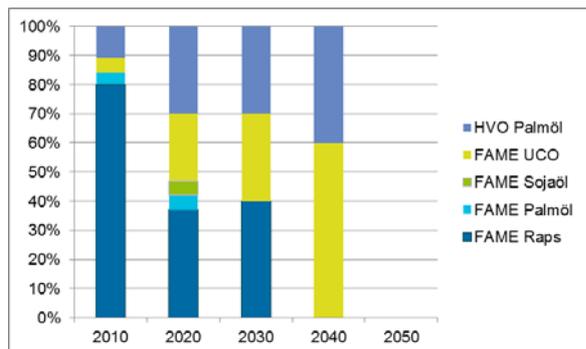
- Frischholz, welches in den Potentialstudien zu mehr als 80 % als Rohstoff für BtL angesetzt wird, wird einerseits aufgrund der Konkurrenz zur stofflichen Nutzung, andererseits aus Gründen naturnaher Waldbewirtschaftung als kritisch angesehen. Altholz ist in der Hinsicht unkritisch, unterliegt jedoch bereits einer weitgehenden Nutzung, die dann umgelenkt werden müsste.
- Stroh als Hauptrohstoff für Bioethanol müsste eine dezentralere und an die regionalen Bedingungen angepasste Nutzung erfahren, was der realen Struktur der stark zentralisierten Ethanolproduktion widerspricht.
- Güllevergärung ohne feste Biomasse ist mit verfügbarer Technik eher ineffizient. Auch hier sind daher Abstriche zu machen.

In den nachfolgenden Diagrammen sind die angenommenen Entwicklungen zu den Anteilen der Biokraftstoffarten nach den Szenarien dargestellt. Die *progressive fuels* sind darin abgebildet als BtL (aus Rest- und Abfallholz), LZ-Ethanol aus Stroh und UCO-FAME (Biodiesel aus Altpflanzenfetten).

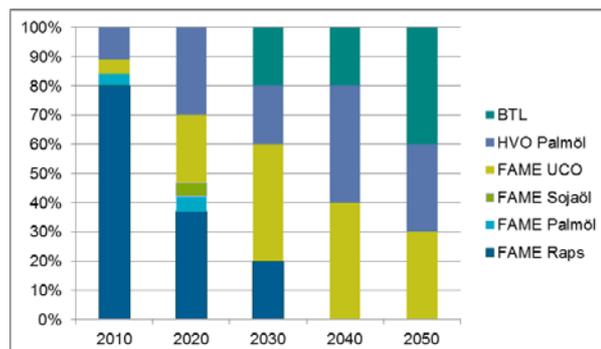


Abbildung 3-3: Entwicklung der Anteile von Biodiesel (oben) und Bioethanol (unten)

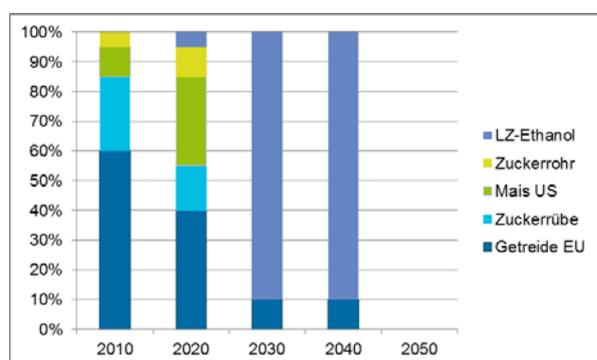
Basisszenario



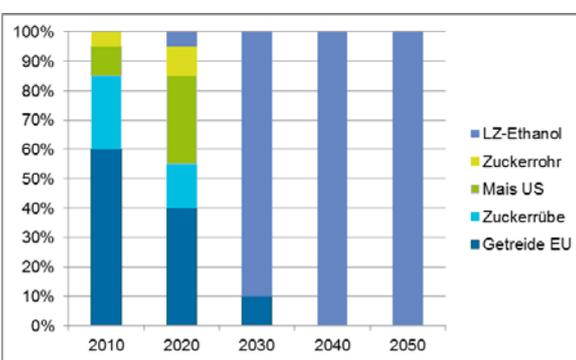
Klimaschutzszenarien



Basisszenario



Klimaschutzszenarien



Quelle: Renewbility III

### 3.2.2 STROM

Damit die zunehmende Elektrifizierung des Verkehrs optimal zum Klimaschutz beiträgt, muss der eingesetzte Strom aus erneuerbaren Energien bereitgestellt werden. In den Renewbility-Szenarien wird davon ausgegangen, dass für die zusätzliche Stromnachfrage des Verkehrs nur Strom aus zusätzlichen erneuerbaren Energien zum Einsatz kommt.

Für die Emissionen der Fahrzeugherstellung wird für den in Deutschland anfallenden Strombedarf der Emissionsfaktor vom deutschen Strommix hinterlegt. Für das Basisjahr 2010 wird der Emissionsfaktor für Strom mit 161,4 g CO<sub>2</sub>Äq/MJ hinterlegt. Die Entwicklung des Strommixes in Deutschland wird in Renewbility III an die Klimaschutzszenarien 2050 angelehnt (KSZ 2050). Bis 2030 wird von einem Anteil erneuerbarer Energie von 55 % inkl. Biomasse ausgegangen. Dies führt zu einer Reduktion der spezifischen Emissionen um gut 40 % auf 93,3 g CO<sub>2</sub>Äq/MJ. Der Anteil an Erneuerbaren steigt bis 2050 auf 83 %, (Erdgas

14%, Steinkohle 1%, andere 2%), somit werden die spezifischen Emissionen weiter auf 25,7 g CO<sub>2</sub>Äq/MJ reduziert.

### 3.2.3 STROMBASIERTE KRAFTSTOFFE

#### 3.2.3.1 PtX-Anteile

Für 2050 wird in den Renewbility-Klimaschutzszenarien eine vollständige Dekarbonisierung des Verkehrssektors hinterlegt, entsprechend liegt der PtX-Anteil in 2050 bei rund 95 % (die übrigen 5 % sind Biokraftstoffe).

Die Ableitung der Anteile an PtX-Kraftstoffen für das Jahr erfolgt folgendermaßen:

Die Renewable Energy Directive (RED) sieht vor, dass die EU-Mitgliedsstaaten bis zum Jahr 2020 10 % des nationalen Endenergiebedarfs des Verkehrs mit erneuerbaren Energien (EE) decken müssen (Artikel 3, Absatz 4). Dazu können Biokraftstoffe und strombasierte Kraftstoffe eingesetzt werden, aber auch erneuerbarer elektrischer Strom soll mit dem 2,5-fachen des Energiegehaltes anrechenbar sein. Der Prozess zur Fortschreibung der RED auf EU-Ebene für den Zeitraum bis 2030 ist aktuell im Gange und soll bis Ende 2016 abgeschlossen sein. Im Oktober 2014 hat der Europäische Rat ein verpflichtendes EU-weites Ziel für den Anteil erneuerbarer Energien in Höhe von 27 % beschlossen (EUCO 2014).

In der laufenden Konsultation zur Fortschreibung der RED und dem dazugehörigen Impact Assessment wird auch ein Ziel von 30 % oder 35 % EE diskutiert. Bei einem 40 %-GHG-Ziel ohne weitere RES-Subziele nennt das Impact Assessment einen Anteil von 12 bis 14 % im Verkehr. Dies basiert auf dem EU Reference Scenario (mit 40 %-Minderungsziel in 2030) (EC 2013). Bei einem 45 %-GHG-Ziel und 35 % RES beträgt der Anteil im Verkehr laut Impact Assessment 16 %.

Für Renewbility III werden folgende Annahmen für 2030 abgeleitet:

- Anteil EE im Verkehrssektor in Deutschland in den Klimaschutzzszenarien: 15 %.
- Der Beitrag von EE-Strom zur Erreichung des EE-Anteils im Verkehrssektor wird Szenarien-abhängig berechnet und liegt bei etwa 3,3 % (Basisentwicklung) bzw. 5,3 % (Förderung Elektromobilität).
- Der EE-Strom beim Schienenverkehr trägt ca. 1,3 % zur Zielerreichung bei.
- Der Anteil Bio-Kraftstoffe wird wie oben dargestellt mit ca. 5 % (mit Förderung 2. Generation) angenommen.

Aus dem „Rest“ ergibt sich der PtX-Anteil für 2030. Dieser beträgt dann in den Szenarien mit Förderung Elektromobilität etwa 5 %, in denen ohne ca. 7 %.

### 3.2.3.2 PtX-Kosten

In Hacker et al. (2014) wird gezeigt, dass bei einer vollständigen Dekarbonisierung des Verkehrs über PtX-Kraftstoffe selbst in den Jahren nach 2030 und in 2050 nur ein kleiner Anteil der für den Verkehr benötigten Strommenge über ansonsten ungenutzten, sogenannten „Überschussstrom“ aus erneuerbaren Energien in Deutschland bereitgestellt werden kann. Für die Herstellung von PtX-Kraftstoffen in relevanten Mengen müssen daher zusätzliche EE-Erzeugungskapazitäten aufgebaut werden. Im Rahmen von Renewbility III wird entsprechend UBA (2016) davon ausgegangen, dass die Kraftstoffe aufgrund niedrigerer Stromgestehungskosten und der größeren Potenziale für erneuerbare Energien im Ausland produziert und mit Schiffen oder per Rohrleitungssystem nach Deutschland transportiert werden. Die Kostenannahmen für strombasierte Kraftstoffe werden ebenfalls UBA (2016) entnommen. Hier werden in UBA (2016) vier Standorte im Ausland beispielhaft als mögliche Produktionsstandorte der PtX-Gestehung herangezogen, für die jeweils die Kraftstoffgestehungs- und Transportkosten abgeschätzt werden.

Wasserstoff ( $H_2$ ) wird über einen Elektrolyseur aus Strom gewonnen. Das über die Elektrolyse hergestellte  $H_2$  kann dann über eine Methanisierungsanlage unter Zugabe von  $CO_2$  zu PtG- $CH_4$  synthetisiert werden. Das dafür benötigte  $CO_2$  kann aus verschiedenen Quellen gewonnen werden. Einerseits kann die benötigte Menge  $CO_2$  aus der Umgebungsluft gewonnen werden, was hohe Kosten und Energiebedarf verursacht. Eine andere Möglichkeit ist die Nutzung von  $CO_2$  aus anderen Abscheidungsprozessen (z. B. industrielles  $CO_2$ ), das mehr oder weniger kostenfrei zur Verfügung steht. Für diese beiden Varianten der Kohlenstoffbereitstellung werden in UBA (2016) die PtX-Gestehungskosten ermittelt und abschließend gemittelt. Dafür werden eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und eine Annuitätenrechnung durchgeführt.

Über die Fischer-Tropsch-Synthese können aus  $H_2$  und  $CO_2$  die höheren Kohlenwasserstoffe (PtL) hergestellt werden. Analog zur Gestehung von PtG- $CH_4$  werden die Gestehungskosten für PtL berechnet. Für die Investitionskosten der PtL-Gestehungsanlagen werden in UBA (2016) die Investitionen für den Elektrolyseur und die Methanisierungsanlage angesetzt unter der Annahme, dass die Anlagentechnik ähnlich aufwendig ist. Da die Erzeugung von PtL spezifisch mehr  $CO_2$  benötigt als PtG- $CH_4$ , wird die Energiemenge zur Abscheidung des  $CO_2$  aus der Luft um den Faktor 1,33 im Vergleich zur Energiemenge bei der  $CH_4$ -Gestehung erhöht. Der zusätzliche Energiefaktor schlägt sich in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Anlage bei den Verbrauchskosten nieder.

Zusätzlich sind die Kosten für den Transport nach Deutschland und die Verteilung in Deutschland berücksichtigt.

**Tabelle 3-1: Kosten Gesteherung, Transport, Verteilung strombasierter Kraftstoffe**

Euro (2010)/ GJ	2010	2020	2030	2040	2050
PtL	209	113	83	67	57
PtG-CH <sub>4</sub>	185	91	67	55	47
PtG-H <sub>2</sub>	179	100	77	64	54

Quelle: UBA 2016

## 3.3 ENERGIEPREISE

### 3.3.1 KOSTEN DER ENERGIEVERSORGUNGSINFRASTRUKTUR

Die Kosten der Ladeinfrastruktur sind UBA (2016) entnommen. Sie enthalten einen hohen Wartungsanteil, so dass zwar mit ansteigendem Infrastrukturbedarf aufgrund der Investitionskosten diese bis 2040 ansteigen, aber auch nach Abschluss eines hohen Anteils an Investitionen ein relevanter Kostenblock für den Fahrstrom übrig bleibt. Die Infrastrukturkosten wurden dem UBA (2016)-Szenario entnommen (E+). Um die anfänglich hohen Investitionen in die Ladesäuleninfrastruktur zu ermöglichen, werden diese bis 2029 subventioniert, so dass im Zeitraum 2010-2039 einheitliche Kosten von 15 Euro/GJ für den Nutzer anfallen.

Auch die Kosten für die Investitionen in die Infrastruktur für Oberleitungs-Lkw werden auf den Nutzer umgelegt. Im Ausbauszenario der Oberleitungsinfrastruktur wird davon ausgegangen, dass nicht das gesamte Autobahnnetz elektrifiziert wird, sondern sich der Ausbau auf Abschnitte mit besonders hoher Güterverkehrsleistung beschränkt. Grundsätzlich sind auch Fahrzeugkonfigurationen denkbar, die über einen Batteriespeicher verfügen, welcher während der Fahrt auf elektrifizierten Streckenabschnitten aufgeladen wird. Damit könnten auch auf nicht elektrifizierten Streckenabschnitten elektrische Fahrleistungsanteile erbracht werden. Damit wäre es nicht notwendig die Abschnitte mit besonders hoher Güterverkehrsleistung vollständig zu elektrifizieren, sondern die Abschnitte mit Oberleitung so zu wählen, dass dort die Batterien aufgeladen werden und die Speicher dann zur Überbrückung nicht elektrifizierter Abschnitte genutzt werden. Damit ließe sich der notwendige Infrastrukturausbau weiter verringern.

Die Kosten für die Infrastruktur werden in Renewbility III pro Energieverbrauch hinterlegt und betragen in Anlehnung an UBA (2016):

**Tabelle 3-2: Nutzerkosten Ladeinfrastruktur**

Euro (2010)/ GJ	2010-2019	2020-2029	2030-2039	ab 2040
<b>Infrastruktur (Tankstellen)</b>	0,3	0,3	0,3	0,3
<b>Infrastruktur (Ladesäulen)</b>	15,0	15,0	15,0	10,0
<b>Infrastruktur (O-Lkw)</b>	Mittel über 2020 bis 2050: 7,7			

Quelle: Renewability III

## 3.3.2 ENERGIEPREISE IN DEN SZENARIEN

### 3.3.2.1 Preise Verkehrsprognose

In der VP 2030 werden die Energiepreise für Kraftstoffe deutlich angehoben. Es ist eine Anhebung des Mineralölsteuersatzes um (real) 2,3 % p.a. hinterlegt, so dass die Mineralölsteuer nominal im Jahr 2030 bei 1,53 Euro für Benzin (heute: 65 Cent) und 1,13 Euro Diesel (heute: 47 Cent) liegt. Die Strompreise werden in der VP 2030 nicht ausgewiesen. Für Schiffsdiesel wird für 2010 der Großverbraucherpreis von Gasöl von 54,87 Cent/l zu Grunde gelegt.

**Tabelle 3-3: Energiepreise VP 2030**

Preise VP 2030 in Euro (2010)/ GJ	2010	2020	2030
<b>Benzinpreis, Tankstelle</b>	<b>44</b>	<b>51</b>	<b>65</b>
<b>Rohöleinstandskosten</b>	12	14	18
<b>Verarbeitungskosten</b>	5	5	5
<b>Energiesteuer</b>	20	24	32
<b>Umsatzsteuer</b>	7	8	10
<b>Dieselpreis, Tankstelle</b>	<b>34</b>	<b>40</b>	<b>51</b>
<b>Rohöleinstandskosten</b>	11	14	17
<b>Verarbeitungskosten</b>	4	4	4
<b>Energiesteuer</b>	13	16	21
<b>Umsatzsteuer</b>	5	6	8

Quelle: VP 2030

### 3.3.2.2 Preise Basisszenario

Da es sich bei dem Basisszenario um ein Szenario handelt, das nur die bereits beschlossenen Maßnahmen abbildet, wird diesem Szenario keine Anhebung der Mineralölsteuer hinterlegt, sondern nur ein Inflationsausgleich, so dass sie in Preisen von 2010 real konstant bleibt. Dies entspricht einem nominalen Anstieg, bei Benzin z. B. von derzeit 65 Cent/Liter auf 97 Cent/Liter in 2030. Die Rohölpreise bis 2030 werden der Verkehrsprognose entnommen und nach 2030 auf Basis der Rohölpreisentwicklung des Projektes „Klimaschutzszenario 2050“ fortgeschrieben (BMUB 2015). Der Großverbraucherpreis Diesel

für Lkw liegt zusätzlich 5 % unter dem Dieselpreis an der Tankstelle. Die Preise für Schiffsdiesel werden analog der Entwicklung der Dieselpreise im Straßenverkehr fortgeschrieben.

In die Preisberechnung für Kraftstoffe sind auch die Biokraftstoffe einbezogen. Die Herstellungskosten der Biokraftstoffe wurden aus unterschiedlichen Quellen recherchiert und mit Hilfe von Verbandsinformationen angepasst. Teilweise wurden sie ausgehend von Rohstoffkosten ähnlicher Kraftstoffe extrapoliert (z. B. wurden Maisethanolpreise aus den Weizenethanolpreisen abgeleitet). Die Großhandelspreise sind für alle Ethanol- und Biodieselpfade jeweils gleich, da laut der Verbände im Großhandel nicht zwischen der Herkunft des Kraftstoffs unterschieden wird. Zu den Preisen wurden die Energiesteuer sowie die Mehrwertsteuer hinzu addiert.

Die Kostensteigerungen wurden von der Entwicklung der Rohstoffpreise abgeleitet, wie sie in Thrän et al. (2015) beschrieben ist. Für die 2. Generationen-Biokraftstoffe wurden die Kosten an die Entwicklung des Ölpreises gekoppelt, da diese (mit) dafür verantwortlich ist, ob diese Kraftstoffe marktfähig werden. Die sich ergebenden Kosten und Preise sind für 2010 und 2050 in der folgenden Tabelle dargestellt.

**Tabelle 3-4: Kosten und Preise von Biokraftstoffen**

	Kosten - [ct / MJ]		Preise- [ct / MJ]	
	2010	2050	2010	2050
<b>Biodiesel aus Rapsöl (RME)</b>	1,96	4,32	2,20	4,86
<b>Biodiesel aus Sojaöl (SyME)</b>	1,80	3,98	2,20	4,86
<b>Biodiesel aus Palmöl (PME)</b>	1,65	3,64	2,20	4,86
<b>HVO aus Palmöl</b>	1,65	3,64	2,20	4,86
<b>Biodiesel aus UCO</b>	2,14	3,31	2,20	4,86
<b>BtL aus Restholz</b>	2,77	3,84	3,04	4,23
<b>Bioethanol aus Weizen</b>	2,30	3,29	2,49	3,56
<b>Bioethanol aus Mais</b>	1,93	2,76	2,49	3,56
<b>Bioethanol aus Zuckerrübe</b>	1,41	2,02	2,49	3,56
<b>Bioethanol aus Zuckerrohr</b>	1,50	2,15	2,49	3,56
<b>Bioethanol aus Ligno-Zellulose</b>	3,10	4,30	3,41	4,74
<b>Biomethan aus org. Abfall</b>	1,75	2,66	1,98	3,00
<b>Biomethan aus Mais (Silage)</b>	2,01	3,05	2,28	3,45
<b>Bio-SNG aus Restholz</b>	2,16	3,00	2,34	3,30

Quelle: Renewbility III

Da in der Verkehrsprognose keine Strompreise ausgewiesen werden, werden diese für Renewbility III auf Basis des Projektes „Klimaschutzszenario 2050“ (BMUB 2015) und UBA (2016) hergeleitet. Beschaffung, Vertrieb, Netzentgelte und EEG-Umlage werden aus den BMUB-Klimaschutzszenarien abgeleitet. Um die Verteilung des Stroms innerhalb Deutschlands zu berücksichtigen, werden die Netzentgelte, mit denen der Betrieb und der Ausbau der Stromnetze finanziert werden, in die Gesteuerungskosten mit einbezogen. Eine Grundvoraussetzung bei der angenommenen Marktentwicklung der Elektromobilität in den Szenarien ist längerfristig die Gewährleistung der Lastverschiebung bei elektrischen Fahrzeugen, um die Stabilität in den Stromnetzen und die dargebotsbezogene Nachfrage des Strombezugs zu ermöglichen. Aus diesem Grund erfüllen elektrische Fahrzeuge auch eine netzentlastende Funktion, so dass im Folgenden für die elektrische Nachfrage aus dem Verkehrssektor der Mittelwert aus dem Netzentgelt für die Industrie und die Privathaushalte für das Jahr 2050 angesetzt wird (UBA 2016).

Die EEG-Umlage wird weiterhin berücksichtigt, da sie die Investitionskosten in neue EEG-Anlagen abdeckt. Wenn eine entsprechende Umlage abgeschafft werden würde, würden diese Kosten auf den Großhandelspreis aufgeschlagen, so dass schlussendlich die gleichen Kosten für den Verbraucher bestehen bleiben. Sonstige Abgaben Strom enthalten z. B. Konzessionsabgabe, KWK-Aufschlag, Offshore-Haftungsumlage. Sie machen grundsätzlich je Posten jedoch nicht viel aus und werden daher beibehalten.

**Tabelle 3-5: Zusammensetzung Haushaltsstrompreis**

Haushaltsstrompreis in Euro (2010)/ GJ	2010	2030	2050
<b>Strompreis</b>	<b>65,8</b>	<b>84,2</b>	<b>84,2</b>
<b>Beschaffung, Vertrieb, Netzentgelt, EEG-Umlage</b>	44,6	59,1	59,1
<b>Stromsteuer</b>	5,7	5,7	5,7
<b>sonstige Abgaben (ohne Stromsteuer)</b>	5,0	5,6	5,6
<b>Umsatzsteuer</b>	10,5	13,8	13,8

Quelle: Renewbility III auf Basis BMUB 2015 und UBA 2016

Für den Endkunden im Verkehr werden zusätzlich die in Kapitel 3.3.1 dargestellten Infrastrukturkosten für die Ladeinfrastruktur bzw. für Oberleitungen über den Strompreis auf den Nutzer umgelegt.

Die Bahnstrompreise setzen auf den Preisen 2015 auf. Die Fortschreibung erfolgt bezüglich Beschaffung und Vertrieb in Anlehnung an die Haushaltsstrompreise, der Anstieg der Netzentgelte beträgt 2 % p.a. entsprechend der Abschätzung der Entwicklung der Netzentgelte der öffentlichen Versorgung.

Tabelle 3-6: Bahnstrompreis

Bahnstrom 2015 cent/kWh		Quelle
Beschaffung und Vertrieb	6,00	Bahnstrompreisregelung Produkt Comfort, Hochtarif 60 %, Niedertarif 40 %
Netzentgelt	4,50	Preisblatt + eigene Abschätzungen
EEG-Umlage	1,23	Bahn: 20 % EEG-Umlage
Konzessionsabgabe	0,04	Preisblatt
Stromsteuer	1,14	
sonstige Steuern und Abgaben	0,10	Nach Preisblatt : KWK-Aufschlag, Umlage nach §19 Abs. 2 StromNEV, Offshore-Haftungsumlage, Umlage für abschaltbare Lasten
Mehrwertsteuer	2,51	19 % MWSt
<b>Summe</b>	<b>15,63</b>	

### 3.3.2.3 Preise Renewbility-Szenarien

Auch in den Klimaschutzszenarien im Rahmen von Renewbility III erfolgt die Fortschreibung der Rohölpreise auf Basis des Projektes „Klimaschutzszenario 2050“. Die Kosten der dekarbonisierten Kraftstoffe werden nutzerfinanziert, d. h. sie werden auf den Verbraucher umgelegt.

Die Infrastrukturinvestitionen und Wartungskosten werden ebenfalls vom Verbraucher getragen. Für PtL entsprechen die Kosten für die Infrastruktur der Tankstellen denen der fossilen Kraftstoffe (dort enthalten in Verarbeitungskosten).

Die Energiesteuer wird für die Szenarien Effizienz und Effizienz plus ab dem Jahr 2030 auf alle Energieträger (inkl. Strom und PtL) entsprechend des Energiegehaltes erhoben. Sie steigt bis 2040 auf 32 Euro<sub>2010</sub>/GJ an. Das entspricht dem Wert der VP 2030 für das Jahr 2030 für Benzin (d. h. langsamere Anhebung in den Klimaschutzszenarien als in der VP 2030, dafür Angleichung Benzin/Diesel auf den Steuersatz Benzin). In der VP 2030 wird die Anhebung der Mineralölsteuer wie folgt begründet: *Für ihn [den Mineralölsteuersatz] ist sowohl aus finanz- als auch aus klimaschutzpolitischen Gründen eine weitere (reale) Anhebung als wahrscheinlich zu betrachten.*

Die Strompreise entsprechen dem Basisszenario (s. o.). Insgesamt liegt man so in etwa in der Größenordnung der Haushaltsstrompreise der BMUB-Klimaschutzszenarien.

In der Tabelle 3-7 sind die Nutzerpreise (inkl. Steuern, nutzerfinanzierte Infrastrukturkosten etc.) der verschiedenen Szenarien dargestellt.

Tabelle 3-7: Energiepreise Renewbility-Szenarien

	Euro (2010)/ GJ	2010	2030	2050
<b>Basisszenario</b>	Benzin	44	51	64
	Diesel	34	41	53
	LPG	23	35	49
	Erdgas	21	32	44
	Kerosin	15	23	36
	Wasserstoff	226	105	78
	Strom (Batterieladen)	84	102	96
	Bahnstrom	42	46	46
<b>Szenario Effizienz und Effizienz plus</b>	Benzin	44	57	106
	Diesel	34	55	105
	LPG	23	56	106
	Erdgas	21	52	95
	Kerosin	15	28	68
	Wasserstoff	226	131	116
	Strom (Batterieladen)	84	121	127
	Strom, O-Lkw	75	112	124
	Bahnstrom	42	68	80
<b>Szenarete Fokus Kraftstoffe</b>	Benzin	44	56	92
	Diesel	34	46	83
	LPG	23	40	77
	Erdgas	21	36	66
	Kerosin	15	28	68
	Wasserstoff	226	105	78
	Strom (Batterieladen)	84	102	96
	Bahnstrom	42	46	46

Quelle: Renewbility III

In der Szenarete Fokus Kraftstoffe wird kein Anstieg der Mineralölsteuer hinterlegt, so dass hier nur die Mehrkosten der CO<sub>2</sub>-freien Kraftstoffe zu einem Anstieg der Kraftstoffkosten beitragen. Diese liegen damit in der Szenarete Fokus Kraftstoffe leicht unter denen der Szenarien Effizienz und Effizienz plus.

## 3.4 VORKETTENEMISSIONEN DER KRAFTSTOFFE

### 3.4.1 EMISSIONSFAKTOREN FOSSILE KRAFTSTOFFE

Die Bereitstellung der fossilen Kraftstoffe wurde auf breiter Basis modelliert unter Berücksichtigung nachfolgend zusammengestellter Kraftstoffarten.

**Tabelle 3-8: Emissionsfaktoren fossile Kraftstoffe (Vorketten)**

Kraftstoffe	Rohstoffherkunft	THG- Emissionsfaktoren in g CO <sub>2</sub> Äq/MJ	
		2015	2050
<b>Benzin</b>	Rohöl DE-Mix	17,23	14,31
<b>Diesel</b>	Rohöl DE-Mix	16,60	13,58
<b>LPG</b>	Rohöl DE-Mix	24,50	21,52
<b>Erdgas</b>	Erdgas DE-Mix	7,04	7,04
<b>CNG</b>	Erdgas DE-Mix	10,61	10,61
<b>LNG</b>	Erdgas Katar	13,58	13,58
<b>Kerosin</b>	Rohöl DE-Mix	14,06	11,12
<b>HFO</b>	Rohöl DE-Mix	11,60	8,70

Quelle: Berechnungen des IFEU

Die dargestellten Emissionsfaktoren basieren auf den im IFEU entwickelten Stoffstrommodellen für Erdöl und Erdgas sowie deren Produkte. Bei der Modellierung der Kuppelprodukte aus der Mineralölraffinerie wurde hier die Allokation auf der Basis der unteren Heizwerte gemäß den Regeln der RED für Biokraftstoffe angewandt. Hinsichtlich des Stands der Technik und der Emissionsniveaus wurde vorrangig auf das BVT-Referenzdokument der EU-Kommission Bezug genommen.

Wie aus der Tabelle zu entnehmen ist, wird von einem Rückgang der Emissionsfaktoren ausgegangen. Der Entwicklung der Zeitreihe wurden hierbei folgende Aspekte zu Grunde gelegt:

- Bei der Rohölgewinnung bleibt der Fördertyp "konventionell" (keine Ölsande oder -schiefer), da sonst die FQD (6 % Minderungsziel) nicht zu erfüllen wäre.

Die Prämisse hierzu lautet: die rechtlichen Anforderungen werden erfüllt, ein Verstoß (Nicht-Erfüllung der verbindlichen Minderungsziele) ist formal als Szenario auszuschließen.

Aktuell und im Trend der vergangenen Jahre sind im Übrigen auch keine nennenswerten Einfuhren von nicht konventionellen Rohölen (z. B. Schieferöl aus Estland) oder daraus erzeugte Produkte (z. B. Diesel aus den USA, der nach MWV-

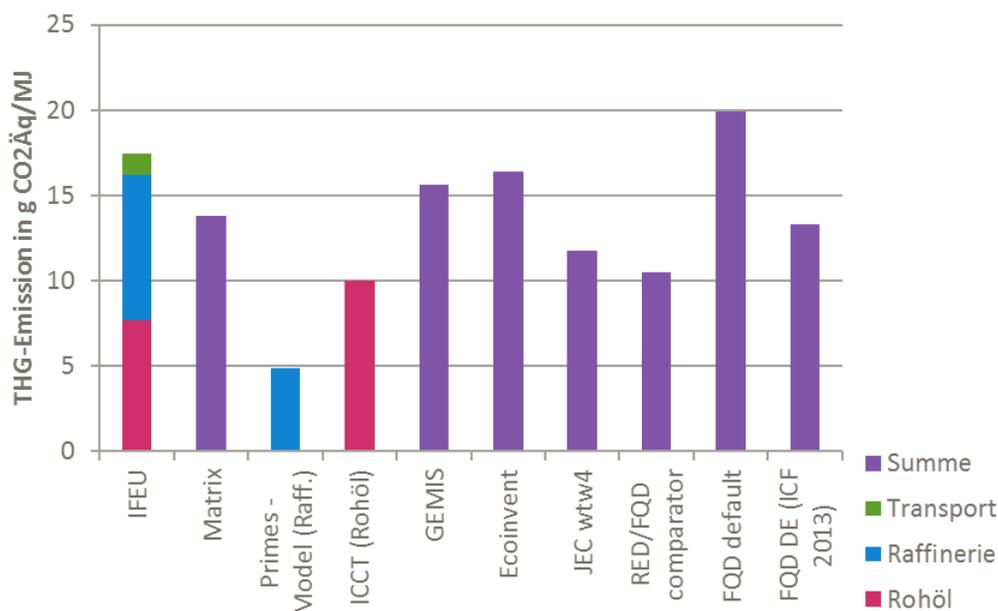
Zahlen ca. 1 % am Dieserverbrauch in Deutschland ausmacht) zu beobachten. Die Autoren können jedoch keinesfalls ausschließen, dass sich diese Anteile künftig vergrößern könnten. Die entscheidende Frage wird sein, ob die Einhaltung der FQD-Vorgaben dann auch mit funktionsfähigen Mechanismen in der Realität der Emissionswerte transparent sichergestellt werden kann.

- In den Emissionsfaktoren sind auch die vielfach noch praktizierten Vorgänge des Abfackelns („Flaring“) oder sogar des direkten Ablassens („Venting“) von Gasen bei der Rohölförderung berücksichtigt. Es wird hier davon ausgegangen, dass die bestehenden Reduktionspotenziale bei Flaring und Venting bis 2030 ausgeschöpft sein werden. Damit kann eine Reduktion von 30 % an CO<sub>2</sub> und 90 % bei CH<sub>4</sub> gegenüber 2015 in der Rohölvorkette realisiert werden.
- Künftige Effizienzgewinne bei Raffinerien werden durch höheren Verarbeitungsaufwand wegen steigender Kraftstoffqualitätsanforderungen ausgeglichen.

Aus diesen drei Grundannahmen resultieren die in obiger Tabelle erkennbaren Rückgänge in den Emissionsfaktoren.

Im Vergleich zu anderen Quellen für Emissionsfaktoren erweisen sich die hier verwendeten Werte zumeist als etwas höher, jedoch klar innerhalb der Streuung der verschiedenen Literaturwerte, wie in folgender Grafik am Beispiel Benzin dargestellt ist.

**Abbildung 3-4: Emissionsfaktoren Benzin**



Quelle: Zusammenstellung durch IFEU, Einzelquellen in der Grafik genannt

## 3.4.2 EMISSIONSFAKTOREN BIOKRAFTSTOFFE

Die Anforderungen werden wie folgt definiert:

- Die methodischen Regeln der RED sind anzuwenden.
- Die Emissionsfaktoren sollen weitgehend kompatibel mit der nationalen Emissionsberichterstattung nach Artikel 22 der RED sein.
- Sie sollen möglichst repräsentativ für die tatsächlichen Werte sein.

Um allen drei Punkten gerecht zu werden, wurden die Emissionsfaktoren aus dem UBA Projekt BioEm<sup>3</sup> übernommen, bzw. Werte verwendet, die sehr eng an diese Ergebnisse aus jenem Projekt angelehnt sind. Mit Blick auf die künftige Entwicklung wurden die als realistisch umsetzbar eingestuften Minderungsmöglichkeiten entsprechend der Zeitreihe ausgeschöpft, z. B. durch Effizienzgewinn im Verarbeitungsprozess, durch Ersatz von fossilen Brennstoffen oder durch Verbesserung bei der Düngemittelherstellung sowie -applikation (→ N<sub>2</sub>O-Vermeidung). In nachfolgender Tabelle sind die THG-Emissionsfaktoren für alle berücksichtigten Biokraftstoffe beispielhaft für die zwei Jahre 2015 und 2040 zusammengestellt.<sup>4</sup> Die Werte für 2015 beziehen sich jeweils auf eine mittlere typische Produktionssituation. Einzelne Produzenten erreichen bereits heute deutlich niedrigere Werte wie z. B. bei Biodiesel aus Raps.

---

<sup>3</sup> Aktualisierung der Eingangsdaten und Emissionsbilanzen wesentlicher biogener Energienutzungspfade; FKZ 28232

<sup>4</sup> Emissionsfaktoren für das Jahr 2050 sind entweder nicht relevant, da die Kraftstoffe im Mix nicht auftauchen, oder gleichen denen von 2040 (z. B. BtL).

Tabelle 3-9: Emissionsfaktoren Biokraftstoffe

Biokraftstoffe	THG- Emissionsfaktoren in g CO <sub>2</sub> Äq/MJ	
	2015	2040
Biodiesel aus Rapsöl (RME)	45,0	28,0
Biodiesel aus Sojaöl (SyME)	42,8	36,7
Biodiesel aus Palmöl (PME)	37,5	32,9
HVO aus Palmöl	32,7	27,8
Biodiesel aus UCO	15,8	14,3
BtL aus Restholz	15,0	14,6
Bioethanol aus Weizen	47,7	28,0
Bioethanol aus Mais (US)	44,5	36,7
Bioethanol aus Zuckerrübe	34,7	29,0
Bioethanol aus Zuckerrohr	21,5	20,1
Bioethanol aus Ligno-Zellulose	40,0	39,2
Biomethan aus org. Abfall	22,5	16,0
Biomethan aus Mais (Silage)	37,8	26,2
Bio-SNG aus Restholz	20,0	19,4

Quelle: Renewbility III

### 3.4.3 EMISSIONSFAKTOREN STROMGENERIERTE KRAFTSTOFFE

Die Vorkettenemissionen stromgenerierter Kraftstoffe werden aus (Edwards et al. 2014) übernommen.

Tabelle 3-10: Emissionsfaktoren strombasierter Kraftstoffe (Vorketten)

Kraftstoffe	THG- Emissionsfaktoren in g CO <sub>2</sub> Äq/MJ
PtL	1,3
PtG- CH <sub>4</sub>	3,3
PtG - H <sub>2</sub>	13

Quelle: (Edwards et al. 2014)

## 4 MODELLVERBUND

### 4.1 ÜBERSICHT ÜBER DEN MODELLVERBUND

Renewbility betrachtet Mobilitätsangebot und –nachfrage und modelliert darauf basierend den Endenergieverbrauch und die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Verkehrssektors. Die Wechselwirkungen zwischen Verkehrs- und Energiesektor werden mit berücksichtigt, um mögliche Nutzungskonkurrenzen der energienachfragenden Sektoren um erneuerbare Energien zu analysieren.

Zusammen mit der ökonomischen Analyse der Auswirkungen möglicher Maßnahmen auf die einzelnen Wirtschaftsakteure (Haushalte, Unternehmen), die Wirtschaftssektoren (Produktionsprozess, Beschäftigungsbedarf, Verkehrsintensität) und gesamtwirtschaftliche Indikatoren (BIP, Beschäftigung) zuzüglich der Darstellung der externen Kosten, ergibt sich aus dem Modellverbund ein konsistentes Gesamtbild.

Betrachtet werden der innerdeutsche Straßen-, Schienen-, Binnenschiff- und Luftverkehr, aber auch der interkontinentale Luft- und Seeverkehr. Renewbility bezieht neben den direkten Emissionen auch jene mit ein, die bei der Herstellung und Verteilung der Kraftstoffe im In- und Ausland sowie bei der Fahrzeugproduktion entstehen. Grundlage hierfür ist eine umfassende Technologiedatenbank zu Fahrzeugen und Kraftstoffen, die Daten zu Energieverbräuchen und Emissionen, aber auch Kosteninformationen enthält.

Abbildung 4-1: Modellverbund Renewbility III im Überblick



Quelle: Renewbility III

## 4.2 FAHRZEUGE: NEUZULASSUNGEN UND BESTAND

Bei der Modellierung der Fahrzeuge wird bei Pkw und Lkw der Fahrzeugbestand detailliert mittels eines Neuzulassungs- und Bestandsmodells abgebildet. Für die übrigen Verkehrsträger (Schienenverkehr, Schifffahrt, Luftfahrt, Busse, Motorräder, Fahrräder) wird kein Fahrzeugbestand explizit berechnet, sondern es werden Annahmen zum Anteil alternativer Antriebe und zur Effizienzentwicklung getroffen. Das Vorgehen wird im Folgenden im Detail dargestellt.

### 4.2.1 PKW

#### 4.2.1.1 Neuzulassungsmodellierung Pkw im Überblick

Das verwendete Neuzulassungsmodell bildet die Neuzulassungsstruktur ausgehend von dem Basisjahr 2010 bis in das Jahr 2050 ab. Dabei wird nach folgenden Parametern differenziert:

- Antriebsart
- Größenklasse
- Haltergruppe: Private oder gewerbliche Halter
- Regionstyp.

Die Berechnung der Struktur erfolgt durch Auswahl von Fahrzeugen durch Nutzer, welche im Wesentlichen durch ihre Haltegruppe und Jahresfahrleistung charakterisiert sind, basierend auf einem TCO<sup>5</sup>-Modell und einem Logit-Modell. Die verwendeten Nutzerdaten stützen sich im Wesentlichen auf die Erhebungen „Mobilität in Deutschland“ (MiD) für den privaten Kraftfahrzeugverkehr und „Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland“ (KiD) für den gewerblichen Verkehr.

Dabei stehen den Nutzern für jede Antriebsart verschiedene Fahrzeugmodelle, charakterisiert durch Kosten und Verbräuche, zur Verfügung. Die realisierbaren Effizienzentwicklungen der einzelnen Fahrzeugklassen im Straßenverkehr sind differenziert nach Größenklassen in der Technologiedatenbank zusammen mit Kostenannahmen hinterlegt. Die tatsächlich realisierte Effizienzentwicklung wird im Neuzulassungsmodul bestimmt. In dem Modell wird in folgende Antriebsarten unterschieden:

- Ottomotor
- Dieselmotor
- Plug-In Hybrid
- Batterieelektrischer Antrieb
- Erdgasantrieb
- Brennstoffzellenantrieb.

In einem ersten Schritt wird für jeden Nutzer für jede Antriebsart das nach der Kostenrechnung jeweilig günstigste Fahrzeugmodell bestimmt. In der Kostenrechnung werden neben den Anschaffungskosten auch Kraftstoff-, Wartungs- und Fixkosten über die Haltedauer und ein Fahrzeugrestwert berücksichtigt. Die Fixkosten wie z. B. die Kfz-Steuer berücksichtigen dabei die Differenzierungen nach Antriebstyp. Um eine Vergleichbarkeit zwischen den verschiedenen Jahren der Modellierung zu gewährleisten, werden alle Kosten auf das Jahr 2010 diskontiert. Anschließend werden über ein Logit-Modell Auswahlwahrscheinlichkeiten jedes Nutzers der verschiedenen Antriebsarten bestimmt.

Durch Anpassung der Kaufpreise für Pkw relativ zum fahrzeugspezifischen Ausstoß an CO<sub>2</sub>-Äquivalenten wird gewährleistet, dass die Emissionsstandards nach EU-Regulierung eingehalten werden. Dieser Modellierungslogik liegt die Überlegung bzw. Annahme zu Grunde, dass die Fahrzeughersteller – um den jeweiligen Grenzwert über die gesamten Neuzulassungen einzuhalten – nötigenfalls die Gewinnmarge bei effizienten Fahrzeugen

---

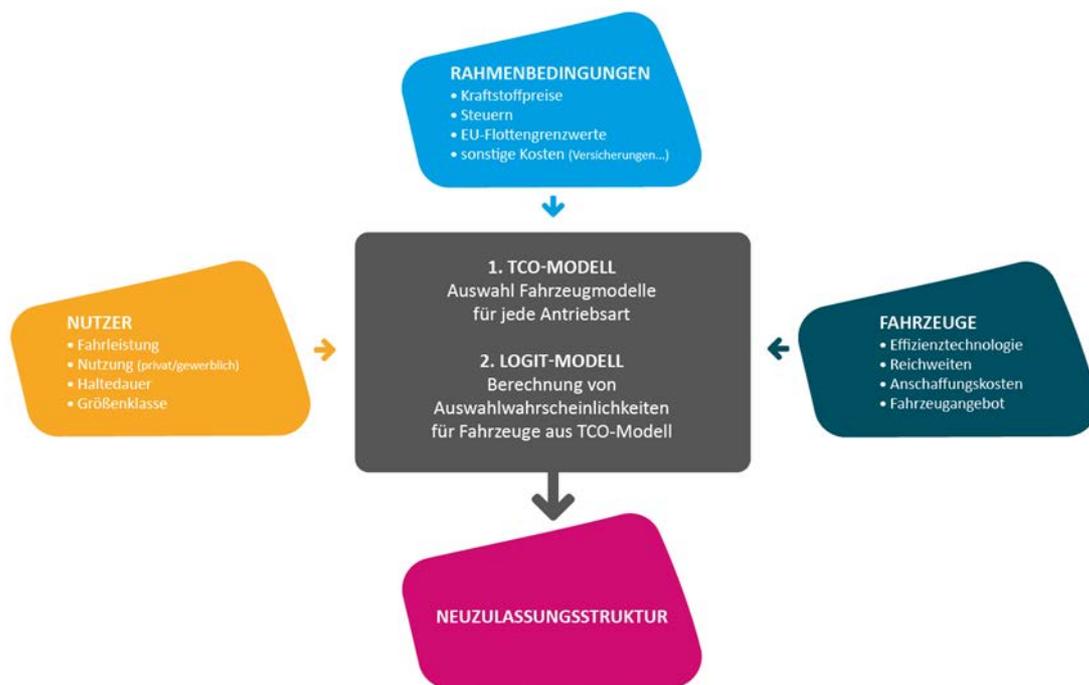
<sup>5</sup> Total Cost of Ownership

verringern werden und dafür weniger effiziente Fahrzeuge zu einem höheren Preis auf dem Markt anbieten werden.

Für Fahrzeuge mit Reichweitenbeschränkung wird eine Begrenzung der Auswahl durch Nutzer berücksichtigt. Dazu wird auf Basis der MiD-Daten eine Poissonverteilung der reichweitenüberschreitenden Fahrten in Abhängigkeit von Größenklasse und Fahrzeugstandort (Stadt/Umland) ermittelt. Anschaffungskosten der zur Verfügung stehenden Fahrzeuge werden basierend auf der vom Öko-Institut erstellten Technologiedatenbank (Öko-Institut 2014) verwendet und sind abhängig von der Effizienzvariante. Die Restwertberechnung der Fahrzeuge berücksichtigt neben dem Neupreis die nutzerspezifische Fahrleistung und Haltedauer.

Ergebnis des Modells ist die Neuzulassungsstruktur nach den oben genannten Parametern und die jeweiligen CO<sub>2</sub>-Emissionen.

**Abbildung 4-2: Schema der Neuzulassungsstruktur – Modellierung**



Quelle: Renewbility III

## 4.2.1.2 Datenbasis und Parameter

### Fahrzeuggrößenklassen

Bei Pkw wird dabei nach den Größenklassen klein, mittel, groß unterschieden. Die Zuordnung der KBA-Segmente zu Größenklassen wurde an die Segmentzuordnung des

Modells TREMOD des ifeu-Instituts angepasst, um kompatibel zu der dort verwendeten Methodik und der Emissionsberichterstattung zu sein. Die Zuordnung der KBA-Segmente zu Größenklassen ist in der folgenden Tabelle dargestellt:

**Tabelle 4-1: Im Neuzulassungsmodell verwendete Pkw-Größenklassen**

Größenklasse	KBA-Segment
<b>Klein</b>	Mini
	Kleinwagen
<b>Mittel</b>	Kompaktklasse
	Mini-Vans
<b>Groß</b>	Mittelklasse
	Sportwagen (inkl. Cabriolet)
	Großraum-Vans
	Obere Mittelklasse
	Utilities
	Geländewagen (incl. SUV)
	Oberklasse
Wohnmobile	
	Sonstige

Quelle: TREMOD / Renewbility III

Die Anteile der Größenklassen an den Neuzulassungen sind Modellinput. Die Größenklassen entsprechen der TREMOD-Einteilung.

**Tabelle 4-2: Anteile der Größenklassen an den Neuzulassungen**

privat	klein	mittel	groß
<b>2010</b>	32 %	36 %	32 %
<b>2014</b>	26 %	33 %	41 %
<b>ab 2020</b>	21 %	30 %	49 %

gewerblich	klein	mittel	groß
<b>2010</b>	21 %	31 %	48 %
<b>2014</b>	21 %	30 %	49 %
<b>ab 2020</b>	21 %	30 %	49 %

Quelle: Renewbility III

Für die Jahre 2010-2014 wurden die Anteile der Größenklassen an den Neuzulassungen je Haltergruppe ermittelt. Dazu wurden die EU-Datenbanken zu Neufahrzeugen, welche im

Rahmen der CO<sub>2</sub>-Grenzwertregulierung veröffentlicht werden, mit KBA-Daten zu Segmenten und Haltergruppen aus der Fachserie FZ 11 in einer Datenbank zusammengeführt.

Bei privaten Fahrzeugen ist zwischen 2010 und 2014 eine starke Zunahme bei den großen Fahrzeugen zu verzeichnen. Dieser derzeit zu beobachtende Trend einer weiteren Zunahme großer Pkw bei den Neuzulassungen insbesondere privater Halter wird bis zum Jahr 2020 fortgeschrieben. Es wurde daher die Annahme getroffen, dass die Anteile der kleinen, mittleren und großen Pkw bei den privaten Neuzulassungen sich bis 2020 an das Niveau der gewerblichen Zulassungen aus dem Jahr 2014 angleichen.

## Technologiedaten

Die Daten zu Fahrzeugtechnologien, deren Minderungspotenzial und Kosten basieren auf der Technologiedatenbank des Öko-Instituts (Öko-Institut 2014). Für die Verwendung im Modell wurden die vorhandenen Technologiedaten aufbereitet. In der Technologiedatenbank sind für alle Größenklassen und Antriebstypen Technologie- und Kostendaten in 10-Jahres-Schritten (von 2010 bis 2050) enthalten. Der Einsatz einer bestimmten Technologie führt dabei zu einem Effizienzsprung. Für die Modellierung ist es jedoch notwendig, kontinuierliche Kostenkurven zu verwenden und zudem auch für die Zwischenjahre (d. h. alle Jahre zwischen 2010 und 2050) Kostendaten zur Verfügung zu haben. Daher wurden die Daten der Technologiedatenbank hinsichtlich dieser beiden Dimensionen interpoliert. Im Resultat ergibt sich je Antriebstyp und Größenklasse eine Funktion, welche in Abhängigkeit vom Zulassungsjahr und der Effizienz des Fahrzeugs die Herstellungskosten angibt.

Die Annahmen zu den Technologiedaten und Kostenkurven sind detailliert in (Öko-Institut 2014) dokumentiert. Hinterlegt sind Batteriekosten in Höhe von 190 Euro/kWh im Jahr 2030 und 150 Euro/kWh im Jahr 2050.

Es wurde die Annahme getroffen, dass sich die durchschnittliche Reichweite batterieelektrischer Fahrzeuge von 150 Kilometer im Jahr 2010 bis zum Jahr 2030 auf 300 Kilometer erhöht. Dabei handelt es sich um die tatsächlich realisierbare Reichweite, d.h. unter Berücksichtigung der Tatsache, dass im realen Betrieb nicht die Reichweiten des Testzyklus (NEFZ) realisiert werden.

Die Technologiedaten und Minderungspotenziale beziehen sich auf den derzeit gültigen Testzyklus NEFZ, welcher mindestens bis 2021 maßgeblich sein wird zur Erreichung der EU-Grenzwerte. Die Abweichung zwischen den im NEFZ gemessenen Testzyklusemissionen und dem realen Verbrauch wird jedoch im Modell berücksichtigt. Dabei werden bis 2014 die

Abweichungen aus (Mock et al. 2014) übernommen. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass die Diskrepanz im Jahr 2015 bei 35 % liegt und danach nicht weiter ansteigt.

## Gewerbliche und private Nutzer

Für die Abbildung der Nutzerseite im Modell und die TCO-Rechnung wird unterschieden nach privaten und gewerblichen Nutzern, da unterschiedliche Entscheidungslogiken bei der Kaufentscheidung zu berücksichtigen sind. Nach Statistiken des KBA sind rund 60 % der Pkw-Neuzulassungen in Deutschland gewerblich. Nach Tabelle 4-3 sind von den gewerblichen Zulassungen je rund 1/3 auf den Fahrzeughandel und den relevanten Flottenmarkt zurückzuführen und je rund 1/6 auf den Fahrzeugbau und Autovermieter.

**Tabelle 4-3: Neuzulassungen nach Marktsegmenten im Jahr 2013**

	Anzahl Fahrzeuge 2013	In %
<b>Neuzulassungen gesamt</b>	<b>2.952.431</b>	<b>100 %</b>
<b>Relevanter Flottenmarkt</b>	654.916	22 %
<b>Fahrzeugbau</b>	270.321	9 %
<b>Fahrzeughandel</b>	605.661	21 %
<b>Autovermieter</b>	301.408	10 %
<b>Privat</b>	1.120.125	38 %

Quelle: Dataforce 2014

Beim Fahrzeughandel sind die Neuzulassungen vorwiegend Kurzzeitzulassungen und die Fahrzeuge werden schlussendlich auch an private Käufer verkauft. Es wird die Annahme getroffen, dass dies bei 75 % der Zulassungen im Fahrzeughandel der Fall ist und für diesen Anteil daher auch das private Entscheidungskalkül im Modell zu verwenden ist. Daher wird für die Modellierungszwecke der Anteil der Zulassungen mit gewerblichem Entscheidungskalkül entsprechend angepasst. Bis einschließlich 2014 konnte bezüglich des Anteils gewerblicher Käufer bei den Neuzulassungen auf die bereits veröffentlichten Daten des KBA zurückgegriffen werden. Für die Entwicklung nach 2014 wurde die Annahme getroffen, dass der Anteil der Nutzer mit gewerblichem Entscheidungskalkül konstant bleibt. Insgesamt werden damit in der Modellierung folgende Anteile von Nutzern mit gewerblichem Entscheidungskalkül verwendet:

**Tabelle 4-4: Im Neuzulassungsmodell verwendete Anteile von Haltergruppen**

	Gewerblich	Privat
<b>2010</b>	<b>0,423</b>	<b>0,577</b>
<b>2011</b>	<b>0,448</b>	<b>0,552</b>
<b>2012</b>	<b>0,468</b>	<b>0,532</b>
<b>2013</b>	<b>0,470</b>	<b>0,530</b>
<b>Ab 2014</b>	<b>0,488</b>	<b>0,512</b>

Quelle: Renewbility III

## Raumkategorisierung

Um verschiedene Rahmenbedingungen wie z. B. Carsharing oder emissionsfreie Innenstädte bei der Neuzulassungsmodellierung zu berücksichtigen, wird nach Raumtypen differenziert. Dabei wurde die Einteilung nach Ortsgrößenklassen verwendet, wie sie in der folgenden Tabelle dargestellt ist:

**Tabelle 4-5: Im Neuzulassungsmodell verwendete Raumkategorisierung**

Bezeichnung im Modell	Anzahl Einwohner
<b>ogk1</b>	<b>unter 5.000 Einw.</b>
<b>ogk2</b>	<b>5.000 bis unter 20.000 Einw.</b>
<b>ogk3</b>	<b>20.000 bis unter 50.000 Einw.</b>
<b>ogk4</b>	<b>50.000 bis unter 100.000 Einw.</b>
<b>ogk5</b>	<b>100.000 bis unter 500.000 Einw.</b>
<b>ogk6</b>	<b>500.000 und mehr Einw.</b>

Quelle: Renewbility III

## Nutzerprofile

Aus der Kombination von drei Fahrzeuggrößenklassen, zwei Haltergruppen und sechs Ortsgrößenklassen ergeben sich insgesamt 36 Gruppen. Für jede dieser Gruppen wiederum wurden in der Modellierung 20 verschiedene Nutzerprofile verwendet, d. h. insgesamt  $20 \cdot 36 = 720$  Profile. Die Nutzerprofile wurden auf Basis von MiD (für private Halter) sowie KiD (für gewerbliche Halter) abgeleitet.

## Fixkosten

Zu den Fixkosten der Fahrzeugnutzung zählen der Anschaffungspreis (gemäß Technologiedatenbank, s. o.) sowie jährliche Fixkosten, d. h. die Kfz-Steuer sowie Kosten für Versicherung.

# ENDBERICHT

Es wird die derzeit gültige Kfz-Steuer hinterlegt, welche sich aus einer vom Hubraum abhängigen Komponente und einer CO<sub>2</sub>-abhängigen Komponente zusammensetzt. Bei der CO<sub>2</sub>-abhängigen Komponente werden je Gramm CO<sub>2</sub>-Ausstoß oberhalb eines Freibetrages 2 Euro Steuer fällig. Dieser Freibetrag liegt seit dem Jahr 2014 bei 95 g CO<sub>2</sub>/km. Es wird angenommen, dass der Freibetrag ab dem Jahr 2021 40 g unterhalb des jeweils gültigen Grenzwertes liegen wird (z. B. bei 95-40 = 55 g im Jahr 2021). Für batterieelektrische Fahrzeuge, welche bis zum Jahr 2020 zugelassen werden, wird die Befreiung von der Kfz-Steuer für 10 Jahre hinterlegt, ab dann werden sie gewichtsabhängig besteuert.

Für die Versicherungskosten werden die in der folgenden Tabelle dargestellten Kosten hinterlegt.

**Tabelle 4-6: Im Neuzulassungsmodell verwendete Kosten für Versicherung**

		<b>Benzin klein</b>	<b>Benzin mittel</b>	<b>Benzin groß</b>	<b>Diesel klein</b>	<b>Diesel mittel</b>	<b>Diesel groß</b>
<b>Versicherung</b>	Euro / a	448,0	497,4	649,3	486,2	528,5	653,3

Quelle: Renewability III

## Variable Kosten

Variable Kosten der Fahrzeugnutzung sind zum einen die Kraftstoffkosten (in Abhängigkeit der Kraftstoffpreise). Bei den elektrischen Fahrzeugen sind dabei in den Renewability-Szenarien die Kosten für die Ladeinfrastruktur enthalten (s. o). Dazu kommen als weitere variable Kosten die Kosten für Reifen, Pflege, Wartung, Reparatur. Für alternative Antriebe werden bei den nicht-kraftstoffabhängigen variablen Kosten die Daten der Benzinfahrzeuge übernommen.

**Tabelle 4-7: Im Neuzulassungsmodell verwendete variable Kosten der Pkw-Nutzung (ohne Kraftstoffkosten)**

		<b>Benzin klein</b>	<b>Benzin mittel</b>	<b>Benzin groß</b>	<b>Diesel klein</b>	<b>Diesel mittel</b>	<b>Diesel groß</b>
<b>Variable Kosten ohne Kraftstoffkosten</b>	cent / km	5,0	5,9	7,1	5,3	5,1	6,8

Quelle: Renewability III

### 4.2.1.3 Modellierung der Kaufentscheidung

Die Kaufentscheidung wurde mit einem zweistufigen Modell, bestehend aus einem TCO-Modell und einem Logit-Modell, abgebildet. Das Logit-Modell dient dabei dazu,

antriebstypenspezifische Nutzenunterschiede, die über die rein ökonomische Betrachtung hinausgehen, zu berücksichtigen.

## TCO-Modell

Das TCO-Modell ermittelt die Gesamtkosten der Fahrzeugnutzung über die Haltedauer des Fahrzeugs aus Perspektive des Nutzers. In die TCO-Berechnung fließen folgende Kostenkomponenten ein:

- Anschaffungspreis,
- Kraftstoffkosten,
- Kfz-Steuer,
- Steuerersparnis durch Abschreibung (bei gewerblichen Nutzern)
- Sonstige Fixkosten (Wartung, Reparatur etc.),
- Restwert.

Je Antriebstyp und Größenklasse stehen dem Käufer verschiedene Fahrzeuge mit unterschiedlich hohem Verbrauch und damit unterschiedlichen Anschaffungspreisen und Kraftstoffkosten zur Auswahl. Die TCO-Kosten ergeben sich dann unter Berücksichtigung der Haltedauer und der jährlichen Fahrleistung des Nutzerprofils.

Bei privaten Fahrzeugkäufern werden die langfristigen Kosten der Fahrzeughaltung und -nutzung in der Kaufentscheidung meist nicht berücksichtigt, d. h. es findet eine gedankliche Abzinsung statt (Mock 2010). Es wird angenommen, dass die privaten Pkw-Käufer nur die ersten drei Jahre bei ihrer Kaufentscheidung zu Grunde legen und für zukünftige Zahlungen eine Diskontrate von 10 % anwenden. Bei gewerblichen Haltern wird eine Nutzungsdauer von 4 Jahren und eine Diskontrate von 5 % hinterlegt.

Zusätzlich wird bei gewerblichen Haltern die Abschreibung berücksichtigt, welche mindernd auf die Unternehmenssteuern wirkt. Es wird dabei ein Unternehmenssteuersatz von 30 % zu Grunde gelegt, sowie eine Abschreibungsdauer von 9 Jahren.

Für die Restwerte werden bei Pkw analog zum Vorgehen in (Hacker et al. 2015) Regressionskurven zu Grunde gelegt, welche den Restwert eines Fahrzeugs unter Berücksichtigung von Anschaffungspreis, Fahrleistung und Fahrzeugalter ermitteln. Der Restwert wird mittels dieser Kurve auf Basis der geplanten Haltedauer berechnet. Bei privaten Nutzern wird der Restwert nach 6 Jahren in der Kaufentscheidung berücksichtigt.

### Logit-Modell

Ergebnis der TCO-Modellierung sind die Kosten aus Perspektive des Nutzers für verschiedene Antriebe und Effizienzvarianten – jeweils pro Nutzerprofil. Zu welchen Anteilen entscheiden sich nun aber die Nutzer für die verschiedenen Antriebe? Eine reine Auswahl auf Basis der Kostenrechnung wäre nicht geeignet, die antriebsspezifischen Charakteristika bei der Pkw-Wahl zu berücksichtigen und würde somit z. B. zu einem sehr hohen Anteil an Erdgas- und Flüssiggasfahrzeuge führen, welche sich im realen Kaufverhalten jedoch nicht widerspiegelt. Die antriebsspezifischen Charakteristika werden daher über ein Logit-Modell abgebildet.

Zunächst wird dafür angenommen, dass sich der Nutzer *innerhalb* eines Segmentes und eines Antriebstyps für das jeweils günstigste Fahrzeug entscheiden würde. Mit dem Logit-Modell wird dann modelliert, für welchen Antriebstyp sich der Nutzer unter diesen Fahrzeugen entscheidet.

Die Wahrscheinlichkeit für den Kauf eines Pkw mit dem Antrieb  $i$  kann mit dem Logit-Modell beschrieben werden mittels der Gleichung

$$P(X_i) = \exp(\text{val}(X_i)) / \sum \exp(\text{val}(X_j))$$

Dabei bezeichnet  $X_i$  einen Pkw mit Antrieb  $i$ .  $\text{val}(X_i)$  ist eine Wertfunktion, die der TCO des Fahrzeugs  $X_i$  entspricht und sich je nach Käufer unterscheidet, denn sie hängt u. a. von der Haltergruppe (gewerblich / privat) und dem geplanten Fahrleistungsprofil des Käufers ab.

Die Logit-Parameter des Modells wurden auf Basis des Fahrzeugdatensatzes der MiD 2008 geschätzt, und zwar je Antriebstyp und Halter (Infas & DLR 2010). Nur für Antriebstypen, die in dem Datensatz ausreichend vorkommen – d. h. Benzin und Diesel, konnten daher Logit-Parameter geschätzt werden. Das Modell bildet mit den auf Basis der MiD-Daten ermittelten Parametern für Benzin und Diesel deren Neuzulassungsanteile in den Jahren 2010-2014 hinreichend gut ab. Für die Ermittlung von Logit-Parametern von alternativen Antrieben lagen keine ausreichenden empirischen Daten vor. Die Parameter für alternative Antriebe wurden deshalb so gewählt, dass die ermittelten Neuzulassungsanteile in den Jahren 2010-2014 möglichst gut zu den tatsächlichen Anteilen passen.

Bei Benzin- und Dieselfahrzeugen wurden die Logit-Parameter konstant gelassen, d. h. es wurde angenommen, dass sich – bis auf die Kosten – keine Veränderung ihrer Attraktivität ergibt. Bei elektrischen Fahrzeugen dagegen wurden die Logit-Parameter nicht konstant gelassen, denn es ist davon auszugehen, dass elektrische Fahrzeuge in Zukunft u. a. durch eine zunehmende Anzahl von Modellen attraktiver werden. Maßgeblich für die Fortschreibung der Logit-Parameter war die VP 2030, d. h. unter den Rahmenbedingungen

der VP sollten die dort hinterlegten Anteile von 6 Mio. Elektrofahrzeugen im Jahr 2030 erreicht werden.

Es wurde die Annahme getroffen, dass batterieelektrische Fahrzeuge bis zum Jahr 2050 und Plug-In-Fahrzeuge bis zum Jahr 2030 ebenso attraktiv sind (d. h. denselben Logit-Parameter haben) wie Benzin-Fahrzeuge. Mit dieser Annahme konnten die in der VP 2030 hinterlegten Bestandszahlen erreicht werden. Vor dem Hintergrund der derzeit sinkenden Batteriepreise und damit ggf. schnelleren Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen handelt es sich jedoch möglicherweise um eine eher konservative Annahme.

### Lange Fahrten als Restriktion für die Anschaffung von Elektrofahrzeugen

Ist bei der Anschaffung eines Pkw für den Käufer klar, dass mit diesem Fahrzeug mehrfach im Jahr lange Fahrten durchgeführt werden sollen, so kann dies eine Restriktion für die Anschaffung eines Elektrofahrzeugs darstellen. Dies wurde mit einer an dem Projekt OPTUM orientierten Methodik im Neuzulassungsmodell abgebildet.

Die Anzahl „langer Fahrten“ je Fahrzeug liegt im Fahrzeugdatensatz von MiD bzw. KiD nicht vor. Daher wurde zunächst aus dem Wegedatensatz von MiD bzw. KiD die durchschnittliche jährliche Anzahl von Fahrten, welche über eine bestimmte Distanz hinausgehen, ermittelt. Dies erfolgte für  $i=30$  Gruppen, welche differenziert sind nach Haltergruppe, Größenklasse, und unterteilt nach der Jahresfahrleistung der Pkw (<10.000, 10.000-20.000 und über 20.000 Kilometer bei privaten Pkw, bzw. Einsatzbereich nah/fern bei gewerblichen Pkw). Ist  $\lambda_i$  die durchschnittliche Anzahl langer Fahrten in einer Gruppe  $i$ , so wurde anschließend hinterlegt, dass die Anzahl langer Fahrten eines bestimmten Fahrzeugs dieser Gruppe einer Poisson-Verteilung mit Mittelwert  $\lambda_i$  folgt. Hieraus lässt sich dann die Wahrscheinlichkeit berechnen, dass eine bestimmte Anzahl  $x$  von langen Fahrten überschritten wird.

Es wird analog zu dem Projekt OPTUM (Zimmer et al. 2011) die tendenziell konservative Annahme getroffen, dass beim Kauf eines batterieelektrischen Pkw maximal acht Fahrten pro Jahr länger sein dürfen als die Reichweite des Fahrzeugs. Für Plug-In-Hybridfahrzeuge wird ein elektrischer Fahranteil in Höhe von 75 % der Fahrleistung hinterlegt.

Die durchschnittliche Anzahl langer Fahrten ist in der folgenden Tabelle dargestellt:

Tabelle 4-8: Durchschnittliche Anzahl langer Fahrten

Raumtyp	Größe	Halter	Kilometerklasse	Über 150 km	Über 300 km
Kernstadt	groß	privat	km<10t	1,2	0,0
Kernstadt	groß	privat	km[10t,20t[	5,6	5,6
Kernstadt	groß	privat	km>=20t	11,8	6,0
Umland	groß	privat	km<10t	3,2	1,0
Umland	groß	privat	km[10t,20t[	5,4	1,7
Umland	groß	privat	km>=20t	10,9	4,2
Kernstadt	mittel	privat	km<10t	5,8	2,4
Kernstadt	mittel	privat	km[10t,20t[	4,2	1,1
Kernstadt	mittel	privat	km>=20t	16,7	8,5
Umland	mittel	privat	km<10t	2,8	0,6
Umland	mittel	privat	km[10t,20t[	5,2	2,4
Umland	mittel	privat	km>=20t	11,1	2,8
Kernstadt	klein	privat	km<10t	1,5	0,5
Kernstadt	klein	privat	km[10t,20t[	4,7	2,2
Kernstadt	klein	privat	km>=20t	17,4	0,5
Umland	klein	privat	km<10t	0,9	0,5
Umland	klein	privat	km[10t,20t[	4,2	0,9
Umland	klein	privat	km>=20t	4,4	1,3
Kernstadt	groß	gewerblich	Nah	5,1	1,9
Umland	groß	gewerblich	Nah	5,1	1,9
Kernstadt	groß	gewerblich	Fern	36,9	12,1
Umland	groß	gewerblich	Fern	36,9	12,1
Kernstadt	mittel	gewerblich	Nah	1,0	0,0
Umland	mittel	gewerblich	Nah	1,0	0,0
Kernstadt	mittel	gewerblich	Fern	22,3	8,4
Umland	mittel	gewerblich	Fern	22,3	8,4
Kernstadt	klein	gewerblich	Nah	0,3	0,1
Umland	klein	gewerblich	Nah	0,3	0,1
Kernstadt	klein	gewerblich	Fern	13,7	5,1
Umland	klein	gewerblich	Fern	13,7	5,1

Quelle: Renewability III

### Berücksichtigung der Grenzwerte in der Modellierung

Bei einer ambitionierten Fortschreibung der Pkw-Emissionsstandards können diese durch die Hersteller unter Umständen nur eingehalten werden, wenn sie Anreize für den Kauf besonders effizienter Pkw schaffen. Dies wird im Modell über eine Anpassung der Kaufpreise durch die Hersteller berücksichtigt, bei der Fahrzeuge mit besonders niedrigen CO<sub>2</sub>-Emissionen günstiger werden und Fahrzeuge mit besonders hohen CO<sub>2</sub>-Emissionen im Gegenzug teurer werden. Dies wird so ausgestaltet, dass der Gesamtgewinn der Hersteller

gleich bleibt. Dieser Modellierungslogik liegt die Überlegung bzw. Annahme zu Grunde, dass die Fahrzeughersteller – um den jeweiligen Grenzwert über die gesamten Neuzulassungen einzuhalten – nötigenfalls die Gewinnmarge bei effizienten Fahrzeugen verringern werden und dafür weniger effiziente Fahrzeuge zu einem höheren Preis auf dem Markt anbieten werden.

Dabei wird folgendermaßen vorgegangen: Wird durch das Ergebnis von TCO-Modell und Logit-Modell (ohne Kaufanreize) der jeweils gültige Grenzwert nicht eingehalten, so werden mehrere Iterationsschritte mit dem Modell durchgeführt. Dabei wird der Kaufpreis in Abhängigkeit vom CO<sub>2</sub>-Ausstoß so lange variiert, bis der Grenzwert eingehalten wird.

#### **4.2.1.4 Bestandsmodellierung**

Die Größe des Pkw-Bestandes insgesamt ist (über die Motorisierungsrate) Inputgröße in die Modellierung. Die Lebensdauer im deutschen Pkw-Bestand wird über Überlebenskurven abgebildet, welche aus dem Modell TREMOD übernommen wurden (ifeu 2012b). Diese Überlebenskurven sind abhängig von Größenklasse und Antrieb. Es wird dabei ebenso wie in TREMOD jeweils der Bestand zur Mitte eines Jahres modelliert, da dieser als Proxy für die durchschnittlichen jährlichen Emissionen der Pkw in dem entsprechenden Jahr besser geeignet ist als der Pkw-Bestand zum Beginn oder zum Ende des Jahres. Die Anzahl der Neuzulassungen zwischen zwei Zeitpunkten  $i$  und  $i+1$  (d. h. z. B. zwischen dem 1.7.2020 und dem 1.7.2021) ergibt sich dann, indem von der Anzahl der Fahrzeuge zum 1.7.2021 (Modellinput) die Anzahl der Fahrzeuge abgezogen wird, welche bereits am 1.7.2020 zugelassen waren und auch noch ein Jahr später im Bestand sind (berechnet mittels der Überlebenskurven). Welchen Anteil die verschiedenen Antriebe an den Neuzulassungen haben und wie effizient die neu zugelassenen Pkw sind, ergibt sich aus dem Neuzulassungsmodell (s. o.). Dabei wird dann jeweils zur Hälfte die ermittelte Neuzulassungsstruktur für die Jahre  $i$  und  $i+1$  verwendet (im Beispiel also 2020 und 2021).

##### **4.2.1.1 Aussagekraft des Modells und Unsicherheiten**

Das Neuzulassungsmodell reagiert auf Veränderungen der Rahmenbedingungen (insbesondere Kraftstoffpreise und Pkw-Grenzwerte) und ermittelt eine unter diesen Rahmenbedingungen plausible Neuzulassungsstruktur. D. h. die ermittelten Neuzulassungen halten die Pkw-Grenzwerte ein, für die Fahrzeughersteller ergeben sich keine Veränderungen ihres Gewinns über die gesamte Flotte, und je höher die Kraftstoffpreise sind, desto effizientere Fahrzeuge werden angeschafft.

Da es sich um ein Modell handelt, sind Vereinfachungen der Realität notwendig und nicht alle Aspekte der komplexen Kaufentscheidungsprozesse sowie der Entwicklung des Bestands

können in dem Modell abgebildet werden. Nicht berücksichtigt sind z. B. der Gebrauchtwagenmarkt sowie die Anzahl der Fahrzeuge im Haushalt bzw. im Fuhrpark. Beim Thema lange Fahrten / Reichweite kann die Möglichkeit des Ausweichens auf ein anderes Fahrzeug und damit die Frage, wie viele Pkw prinzipiell zur Verfügung stehen, eine Rolle spielen. Unsicherheiten des Modells bestehen vor allem hinsichtlich der zukünftigen Entwicklung von Modellparametern wie z. B. der Attraktivität von Elektrofahrzeugen, welche sich im Modell in den Logit-Parametern widerspiegelt.

## 4.2.2 LKW

### 4.2.2.1 Neuzulassungsmodellierung Lkw im Überblick

Die Lkw-Neuzulassungen werden ähnlich wie die Pkw, allerdings über einen rein kostengetriebenen (d. h. TCO-)Ansatz modelliert. Je nach Szenario unterscheiden sich die Kosten für Anschaffung, Kraftstoffe, Versicherung und Maut und somit auch die Antriebswahl.

#### 4.2.2.1 Datenbasis und Parameter

##### Fahrzeuggrößenklassen

Neben den leichten Nutzfahrzeugen werden bei Lkw die Fahrzeuge nach zulässigem Gesamtgewicht unterschieden, und zwar in den folgenden vier Größenklassen:

- Lkw 3,5-7,5 t zGG
- Lkw 7,5-12 t zGG
- Lkw >12 t zGG
- Last- und Sattelzüge.

Die Anteile der Größenklassen an den Neuzulassungen sind Modellinput.

##### Technologiedaten

Die Daten zu Fahrzeugtechnologien, deren Minderungspotenzial und Kosten basieren auf der Technologiedatenbank des Öko-Instituts (Öko-Institut 2014). Für die Verwendung im Modell wurden die vorhandenen Technologiedaten aufbereitet, wobei dasselbe Vorgehen angewendet wurde wie bei den Pkw.

##### Nutzerprofile

Bei den Lkw und leichten Nutzfahrzeugen wurden je Größenklasse 50 Nutzerprofile verwendet. Diese wurden aus der KiD abgeleitet.

#### 4.2.2.2 Bestandsmodellierung

Die Bestandsmodellierung von Lkw wurde analog zur Bestandsmodellierung der Pkw durchgeführt. Analog zu TREMOD wird der deutsche Lkw-Bestand modelliert. Dies stellt eine Vereinfachung dar, da gerade bei Lkw ein relevanter Teil der Fahrleistung von ausländischen Lkw erbracht wird. Es wird also implizit die Annahme getroffen, dass sich die Effizienz der Lkw im europäischen Ausland entsprechend zu der Effizienz der in Deutschland zugelassenen Lkw entwickelt. Die Größe des Lkw-Bestandes ist Inputgröße in die Modellierung, und hängt von der im Güterverkehrsnachfragemodell ermittelten Verkehrsnachfrage ab.

#### 4.2.3 ÜBRIGE VERKEHRSTRÄGER

Bei den übrigen Verkehrsträgern wurden Neuzulassungen und Bestand nicht explizit modelliert, sondern es wurden Annahmen zum Anteil alternativer Antriebe sowie zur Effizienzentwicklung je Personenkilometer bzw. Tonnenkilometer getroffen (Annahmen zu den verschiedenen Szenarien siehe Kapitel 11.2.1).

### 4.3 MODELLIERUNG VON MATERIALVORLEISTUNGEN UND THG-EMISSIONEN DER FAHRZEUGHERSTELLUNG

Durch neue Fahrzeugkonzepte (z. B. Elektrofahrzeuge mit Akku oder Brennstoffzelle) und die Nutzung erneuerbarer Energiequellen (z. B. zusätzlich erneuerbaren Strom) für den Betrieb der Fahrzeuge sinken die direkten Umweltwirkungen aus der Fahrzeugnutzung. Gleichzeitig werden Umweltwirkungen der Fahrzeugherstellung zunehmend wichtig. Die Umweltwirkungen des Verkehrs verschieben sich also tendenziell von der Nutzungs- in die Herstellungsphase. Zur Bewertung der Erreichbarkeit langfristiger Umweltziele und der Eignung alternativer Entwicklungspfade wird daher die Abbildung der Umweltwirkungen des Verkehrs über den gesamten Lebensweg immer wichtiger. Zudem benötigen diese neuen Fahrzeugkonzepte andere Materialien. Dies gilt es vor dem Hintergrund der deutschen Importabhängigkeit von Metallen, dem insgesamt steigenden Rohstoffbedarf der Weltwirtschaft und den damit verbunden veränderten Umweltwirkungen zu bewerten.

Daher wurde mit eLCAr und TREMOD materials ein Modellcluster zur Ermittlung des Materialeinsatzes und der Umweltwirkungen für die Herstellung aller Kfz-Kategorien (Pkw, LNF, Lkw, Bus) sowie der übrigen Verkehrsmittel (Bahn, Binnenschiff, Flugzeug, Fahrrad/ Pedelec) aufgebaut. Das Modellcluster umfasst für jedes Verkehrsmittel alle nach derzeitigen Einschätzungen relevanten Antriebskonzepte nach heutigem Stand der Technik (z. B. Diesel-, Benzin- oder Gasfahrzeuge) ebenso wie mögliche zukünftige Fahrzeugtechnologien (z. B. batterieelektrische oder Brennstoffzellen-Fahrzeuge sowie Plug-In Hybride oder Oberleitungsfahrzeuge). Für diese Fahrzeugkonzepte können im Modell

unter Einbezug weiterer Fahrzeugmerkmale (z. B. Fahrzeuggröße, Herstellungsjahr) die Treibhausgasemissionen sowie weitere Umweltwirkungen (z. B. Versauerung, Eutrophierung) der gesamten Fahrzeugherstellung, der direkte Strombedarf in der Fahrzeugfertigung und der Materialeinsatz im Fahrzeug bestimmt werden. Basisdaten für das Modell sind Materialinventare und Ökobilanzdaten für Materialvorleistungen und Produktionsprozesse aus LCA-Datenbanken (insb. ecoinvent), Herstellerdaten und Literaturdaten.

Ausgangspunkt der Modellierung von Umweltwirkungen und Materialeinsatz der Fahrzeugherstellung ist die Definition einzelner Fahrzeugtypen anhand folgender Merkmale:

- Antriebskonzept (z. B. Elektrofahrzeug)
- Größenklasse bzw. Einsatzzweck (z. B. Kleinwagen oder Güterzug)
- Materialrelevante Detailtechnologien (z. B. Leichtbau)
- Herstellungsjahr der Fahrzeuge.

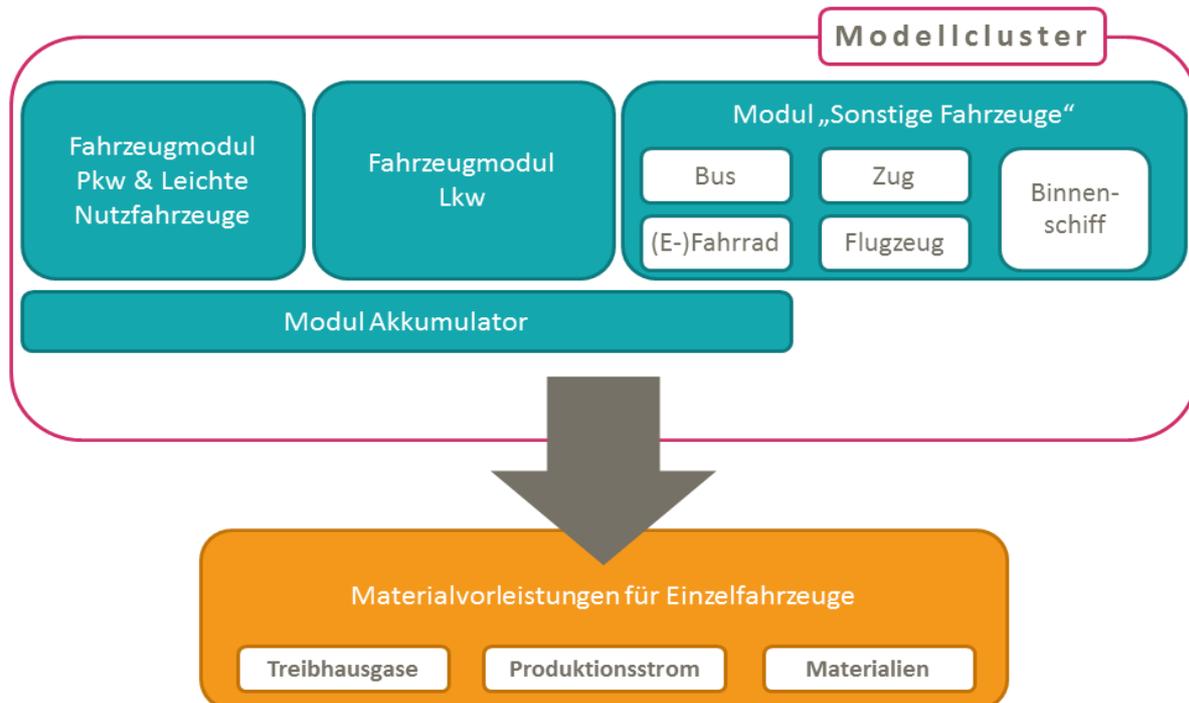
Die Modellierung erfolgt in verschiedenen Fahrzeugmodulen. Pkw und leichte Nutzfahrzeuge sowie schwere Nutzfahrzeuge werden aufgrund ihrer hohen Bedeutung für die gesamten THG-Emissionen des Verkehrssektors sowie der großen Vielfalt von Fahrzeuggrößen und Konzepten mit deutlich höherem Detaillierungsgrad analysiert als die übrigen Verkehrsmittel. Die in Hybrid- und batterieelektrischen Fahrzeugen benötigten Akkumulatoren werden in einem verkehrsmittelübergreifenden eigenen Modul analysiert.

Die Ergebnisse auf Basis der Einzelfahrzeuge werden anschließend mit den Fahrzeugflotten in den verschiedenen Szenarien und Bezugsjahren verknüpft und darüber die THG-Emissionen und Materialvorleistungen des gesamten Verkehrssystems hochgerechnet.

#### 4.3.1 EINSATZ DES MODELLCLUSTERS IN RENEWBILITY

In Renewbility wird das Modellcluster zur Bilanzierung der THG-Emissionen, des Produktionsstroms sowie des Materialeinsatzes der Fahrzeugherstellung eingesetzt. Abbildung 4-3 zeigt eine Übersicht des Modellclusters und der daraus im Rahmen des Renewbility-Modellverbunds ermittelten zentralen Ergebniskategorien.

Abbildung 4-3: Übersicht Modellcluster zur Ermittlung der Materialvorleistungen



Quelle: Renewbility III

Bei der **Analyse der Umweltwirkungen** wird für Renewbility im Unterschied zur umfangreichen Lebenswegbetrachtung einer Ökobilanz nur die Fahrzeugherstellung mit ihren Vorketten betrachtet („cradle-to-gate“) und sich auf die Umweltwirkungskategorie THG-Emissionen beschränkt. In weiteren Teilen des Renewbility-Modellverbunds wird sehr differenziert die Nutzungsphase der Verkehrsmittel abgebildet. Außen vor sind im Vorhaben die Wartungs- und Entsorgungsaufwendungen. Außerdem verbleibt der Fokus auf Fahrzeugen, so dass Aufwendungen in Bezug auf Infrastruktur (u. a. Straße, Schiene, Tankstelle, Verkehrsschilder usw.) nicht berücksichtigt werden.

Aufgrund dieser eingeschränkten Betrachtung der Materialvorleistungen erhebt die Analyse der Umweltwirkungen keinen Anspruch auf eine umfangreiche Lebenswegbetrachtung, macht aber einen wichtigen Schritt in diese Richtung. Die Herstellungs- und Nutzungsphase sind für den weitaus größten Beitrag an den Materialvorleistungen verantwortlich. Dies gilt insbesondere für Straßenfahrzeuge.

Neben den Treibhausgasemissionen wird auch der **Materialeinsatz in den Fahrzeugen** in Renewbility betrachtet. Dieser Betrachtungsfokus ist der aktuellen Diskussion um den globalen Ressourcenverbrauch geschuldet, die auf verschiedenen Ebenen geführt wird. Deutschland hat sich im Februar 2012 mit der Verabschiedung des Deutschen

Ressourceneffizienzprogramms (ProgRess) als einer der ersten Staaten auf Leitideen und Handlungsansätze zum Schutz der natürlichen Ressourcen festgelegt (Bundesregierung 2012). Damit wird die Ressourcenbewertung neben der Umweltbewertung immer wichtiger. Neben ökonomischen Aspekten wie der deutschen Importabhängigkeit bei Metallen oder dem steigenden globalen Rohstoffbedarf spielen auch die Umweltwirkungen der Rohstoffgewinnung und Materialherstellung eine Rolle. Die Betrachtung in Renewbility beschränkt sich an dieser Stelle auf metallische Rohstoffe, die im Fahrzeug zum Einsatz kommen.

In Fahrzeugen wird eine Vielzahl von Materialien eingesetzt, die in Zukunft bedingt durch die zunehmende Anzahl von neuen technologischen Komponenten im Fahrzeug, sich noch weiter differenzieren wird. Unter Materialeinsatz wird an dieser Stelle die Summe von Werkstoffen, wie sie in Fahrzeugen eingesetzt werden, verstanden. Bei diesen Werkstoffen handelt es sich bereits um weiterverarbeitete Primär- oder Sekundärrohstoffe. So wird bspw. nicht die Menge an eingesetztem Eisenerz oder Stahlschrott betrachtet, sondern lediglich die Summe des Stahls als Werkstoff. Die Materialbilanz wird als informatorische Liste neben den Treibhausgasemissionen der Materialvorleistungen verstanden, da sie lediglich die Information beinhaltet, welche Materialmengen in einem Fahrzeug verbaut sind. Nicht berücksichtigt werden Mengen von Schnittverlusten oder andere Verlustquoten im Produktionsprozess der Fahrzeugherstellung. Demnach ist die verbaute Menge nicht gleichzusetzen mit der benötigten Menge für die Fahrzeugherstellung und kann nicht direkt zur Berechnung der Umweltwirkungen genutzt werden.

Neben Werkstoffen, die in großen Mengen im Fahrzeug eingesetzt werden (z. B. Stahl), werden auch Materialien betrachtet, die zwar in der Massenbilanz eine geringe Rolle spielen, jedoch aufgrund ihrer ökonomischen oder ökologischen Bedeutung bereits in kleinen Mengen von Bedeutung für eine Materialbilanz sind. Zur Abschätzung der politisch-ökonomischen Bedeutung werden Studien zu kritischen Rohstoffen (EC 2014) und Rohstoffe für Zukunftstechnologien (ISI and IZT 2009) herangezogen. Zur Abschätzung der ökologischen Relevanz werden Kennzahlen zu den Umweltprofilen einzelner Materialien betrachtet (ifeu 2012). Tabelle 4-9 fasst die betrachteten Materialgruppen auf Grundlage ihrer Massenrelevanz, der politisch-ökonomisch bedeutsamen Rolle oder ihrer Rolle als wichtige zukünftige Technologie zusammen.

Tabelle 4-9: Betrachtete Materialgruppen für die Materialbilanz

Materialgruppe	Auswahlkriterium
Stahl und Gusseisen	Massenrelevanz
Aluminium	Massenrelevanz
Kupfer	Massenrelevanz
Nickel	Ökonomische Relevanz
Platinmetalle	Ökonomische Relevanz
Seltene Erden	Ökonomische Relevanz
Lithium-Verbindungen	Relevanz für Zukunftstechnologie
Sonstige Metalle	
Faserverbundwerkstoffe (CFK, GFK)	Relevanz für Zukunftstechnologie
Kunststoffe	Massenrelevanz
Gummi	Massenrelevanz
Glas	Massenrelevanz
Sonstige	

Quelle: Renewbility III

In den folgenden Unterkapiteln wird eine Übersicht der einzelnen Module des ifeu-Modellclusters (vgl. Abbildung 4-3) gegeben. Die Datengrundlagen der einzelnen Verkehrsmittel sowie Informationen zur Modellierung im Rahmen von Renewbility finden sich in Kapitel 4.2.

### 4.3.2 MODUL: PKW UND LEICHTE NUTZFAHRZEUGE

Grundlage für die Modellierungen des Fahrzeugmoduls für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge bildet das Ökobilanzmodell für generische Einzelfahrzeuge eLCAr. Abbildung 4-4 stellt den schematischen Aufbau der Fahrzeugkonzepte dar. Abhängig von der Fahrzeuggrößenklasse und dem Neuzulassungsjahr können verschiedene Fahrzeugkonzepte bilanziert werden. Dabei wird jedes Fahrzeug einer Größenklasse auf einem einheitlichen Fahrzeugrumpf mit spezifischem Antrieb und Energiespeicher aufgebaut.

- Reine Otto- und Dieselfahrzeuge umfassen neben dem Rumpffahrzeug einen Verbrennungsmotor mit entsprechenden Zusatzbauteilen (z. B. Abgasnachbehandlung) und einen Kunststofftank für den Kraftstoff.
- Rein elektrische Fahrzeuge haben einen Elektromotor mit entsprechenden Zusatzbauteilen, als Energiespeicher werden Lithiumakkus eingesetzt.

- Die Hybridfahrzeuge benötigen Bauteile aus beiden Antriebskonzepten, die sich anteilig je nach Schwerpunktlegung aufteilen.
- Das Brennstoffzellenfahrzeug benötigt neben dem Wasserstoff-Tank noch einen kleinen Akku.

Daten zum Energiespeicher bei Elektro-, Hybrid- und Brennstoffzellenfahrzeug werden aus dem Modul Akkumulator übernommen, dabei lässt sich die Speichergröße je nach Reichweitenbedarf variieren. Für das Rumpffahrzeug können unabhängig vom Antriebskonzept zudem verschiedene Leichtbauvarianten eingestellt werden.

**Abbildung 4-4: Modellierung der Fahrzeugherstellung bei Pkw**



Quelle: ifeu

### 4.3.3 MODUL: LASTKRAFTWAGEN

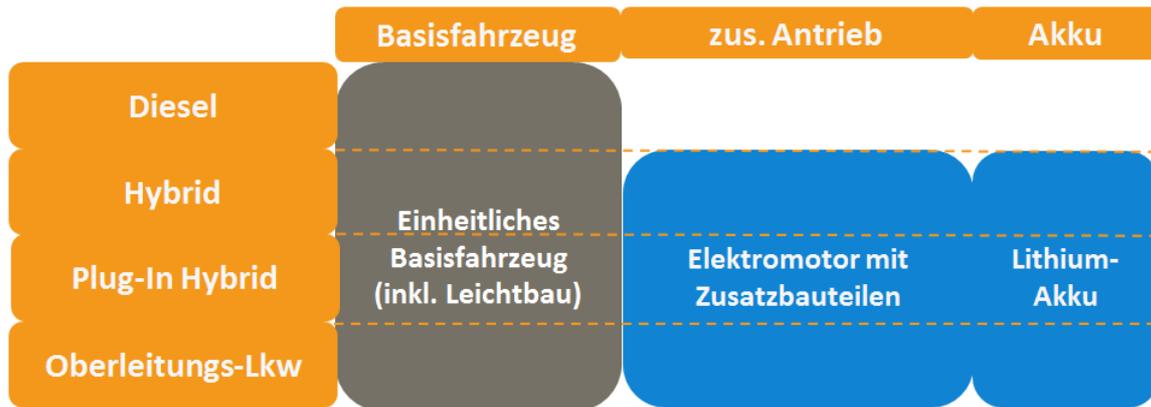
Mit dem Lkw-Modul können Analysen für die unterschiedlichen Antriebskonzepte und Größenklassen der schweren Nutzfahrzeuge durchgeführt werden. Abbildung 4-5 zeigt eine schematische Darstellung des Lkw-Moduls. Ähnlich wie bei den Pkw können auch hier verschiedene Fahrzeuggrößenklassen und Herstellungsjahre bilanziert werden.

Alle Fahrzeuge basieren auf dem klassischen Dieselfahrzeug, das im Modell aus dem Basisfahrzeug (Herstellung und Materialien) inkl. Antrieb und Abgasnachbehandlung besteht. Hybrid-, Plug-In-Hybrid- und Oberleitungsfahrzeuge bauen auf dem klassischen Dieselfahrzeug auf und werden zusätzlich um einen Elektromotor und einen Lithiumakku ergänzt. Vollelektrische Fahrzeugkonzepte werden in Renewbility bei schweren Nutzfahrzeugen nicht modelliert.

Die einzelnen Fahrzeugkomponenten werden je nach ihrem Gewicht (Leergewicht des Basisfahrzeuges) bzw. ihrer Leistung (Elektromotor und Akku) für die individuellen

Fahrzeugkonfigurationen angepasst. Optional kann für alle schweren Nutzfahrzeuge der Fahrzeugrumpf auch mit einer Leichtbauvariante gerechnet werden.

**Abbildung 4-5: Modellierung der Fahrzeugherstellung bei Lkw**



Quelle: ifeu

#### 4.3.4 MODUL: SONSTIGE VERKEHRSMITTEL

Neben der detaillierten Betrachtung der Pkw und leichten Nutzfahrzeuge sowie der Lastkraftwagen werden auch die weiteren Verkehrsträger (Bus, Binnenschiff, Zug, Flugzeug und (E-)Fahrräder) mit ihren Herstellungsaufwendungen abgebildet.

- Beim Schienenverkehr wird unterschieden in Straßen-/Stadt- und U-Bahn (SSU), Schienenpersonennahverkehr (SPNV), Schienenpersonenfernverkehr (SPFV) sowie Schienengüterverkehr (SGV). Bis auf SSU gibt es alle Fahrzeuge mit Elektro- und Dieseltraktion.
- Im Bereich Wasser werden nur Binnenschiffe (betrieben mit Diesel) betrachtet.
- Bei den Flugzeugen wird unterschieden in Passagierflugzeuge und Frachtflugzeuge.
- Radverkehr gliedert sich in konventionelle Fahrräder und E-Fahrräder.

In Renewbility werden für diese Verkehrsmittel keine Änderungen der Antriebskonzepte vorgesehen, daher werden lediglich Basisfahrzeuge betrachtet.

#### 4.3.5 MODUL AKKUMULATOR

Neben den Fahrzeugmodulen umfasst das Modellcluster ein separates Akkumodul. Eine hoch entwickelte Akkutechnologie ist Grundvoraussetzung für die Elektromobilität bei allen Fahrzeugkategorien im Straßenverkehr, gleichzeitig hat sie erhebliche Bedeutung für Umweltwirkungen und Materialeinsatz der Fahrzeugherstellung. Somit kommt dem Energiespeicher für Elektrofahrzeuge eine gesonderte Rolle in der Modellierung zu.

Heute eingesetzte Akkutechnologien verfügen noch nicht über eine ausreichende Energiedichte, um die Akkus möglichst klein und kompakt in das Fahrzeug zu integrieren. Diese Akkus können in rein elektrischen Pkw 300 kg und mehr wiegen. In diesem Bauteil kommen außerdem spezielle Materialien zum Einsatz, die auch für andere Schlüsseltechnologien eine Rolle spielen (z. B. Kupfer, Nickel, Kobalt, Lithium etc.). Die Größe dieser Akkus und die besondere Materialzusammensetzung sind ein wichtiger Treiber der Material- und Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen. Außerdem ist der Akku ein hoher Kostentreiber, weshalb Elektrofahrzeuge heute noch sehr teuer sind.

Die Industrie ist bestrebt, die Akkutechnologien weiter zu entwickeln, um Material und somit Kosten zu sparen. Daraus resultiert eine große Änderungsdynamik bei den Eigenschaften dieser Komponente, die sich schon in den nächsten Jahren abzeichnen wird.

Aus diesen Gründen wurde die Modellierung des Akkus differenziert in einem Modul abgebildet, diese umfasst unterschiedliche Zelltechnologien der Lithium-Ionen Akkus (z. B. Lithium-Eisen-Phosphat), ihre voraussichtliche Weiterentwicklung sowie zukünftige Akku-Konzepte (z. B. Lithium-Schwefel). Im Anhang 16 ist die Modellierung der Energiespeichertechnologien für Elektrofahrzeuge genauer beschrieben.

#### 4.4 NACHFRAGEMODELLIERUNG PERSONENVERKEHR

##### Nachfragemodellierung im Überblick

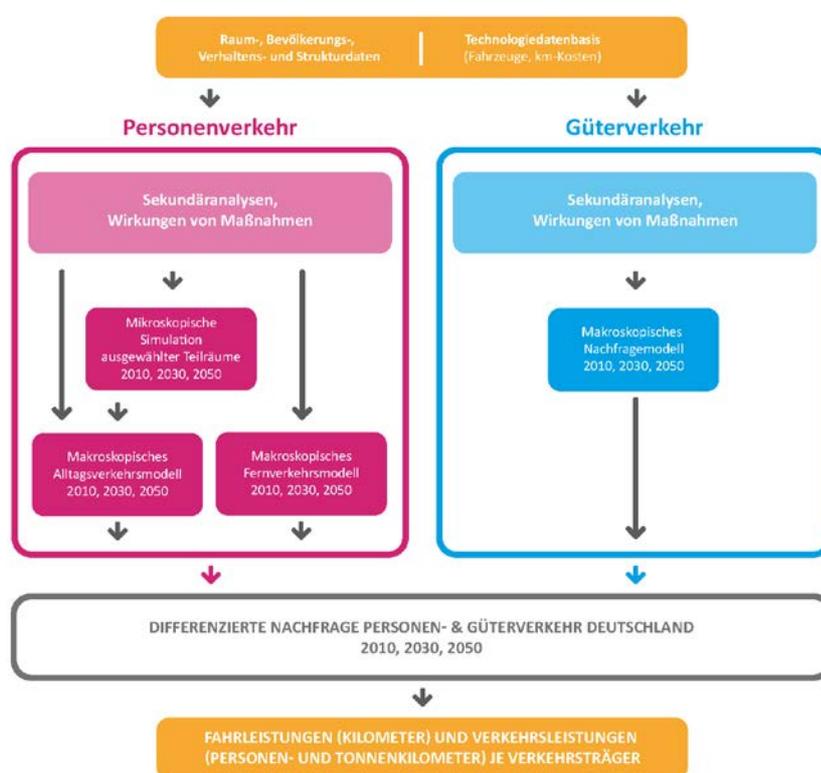
Die private Mobilität hat den größten Anteil am täglichen Verkehrsaufkommen. Das Verhalten der Menschen ändert sich aufgrund vieler unterschiedlicher Faktoren, wie Kosten, Infrastruktur und persönlicher Attribute. Dies führt zu einer Veränderung der Wegezwecke und -anzahl sowie der umweltrelevanten Emissionen.

Ziel der Verkehrsmodellierung ist es, die Entwicklung der Verkehrsnachfrage (Anzahl und Zweck von Ortsveränderungen, Wahl der Verkehrsmittel, gefahrene Personen- und Fahrzeugkilometer usw.) zu berechnen und für verschiedene Zeithorizonte und Szenarien zu prognostizieren. Vor allem für Szenarioberechnungen ist es wichtig, dass das Modell auf geänderte Rahmenbedingungen (bspw. Änderung der Bevölkerungsstruktur oder der Fahrpreise) und infrastrukturelle Maßnahmen reagieren kann.

Um künftige Veränderungen bei der Nachfrage im Personenverkehr möglichst realitätsnah abzubilden, wurde ein kombinierter Modellansatz gewählt, der das unterschiedliche Verkehrsverhalten einzelner Bevölkerungsgruppen berücksichtigt und zwischen unterschiedlichen räumlichen Strukturen unterscheidet. Zentrales Element dabei ist ein makroskopisches Modell zur Abbildung des deutschlandweiten Personenverkehrs, um einen

ganzheitlichen Überblick über die Wirkung von Szenarien zu erhalten. Zur besseren Abbildung der unterschiedlichen Wirkmuster, die sich im Alltagsverkehr und im Fernverkehr zeigen, unterteilt sich diese makroskopische Modellierung in zwei entsprechende Untermodelle (siehe 4.4.1). Eine wichtige ergänzende Informationsquelle sind des Weiteren „Lupenbetrachtungen“, bei denen das Verkehrsverhalten und die in den Szenarien betrachteten Maßnahmen in ausgewählten Teilräumen mit Hilfe eines Mikromodells noch stärker differenziert und detailliert abgebildet werden. Der gewählte Modellkomplex ist durch seine starke Differenzierung und die Kopplung verschiedener Modellansätze in der Lage, ausgesuchte Fragestellungen wie Auswirkungen der Elektromobilität insbesondere im urbanen Kontext zu beantworten und die Maßnahmenwirkung auf den individuellen Personenkontext abzubilden.

**Abbildung 4-6: Überblick über die Modellierungen des Personenverkehrs und Güterverkehrs**



Quelle: Renewbility III

## Zentrale Inputdaten für die Verkehrsnachfragemodellierung

Zu den wichtigsten Inputdaten der Verkehrsnachfragemodellierung zählen Bevölkerungsdaten, Verkehrsverhaltensdaten, Informationen zum Verkehrsangebot sowie zur Preisstruktur und Technologie verschiedener Verkehrsmittel. Dabei werden für das

Basisjahr 2010 die vorhandenen Datenquellen verwendet. Für die Prognosejahre wird die Wirtschafts- und Bevölkerungsentwicklung von der Verkehrsprognose 2030 übernommen. Die Informationen zur Bevölkerung setzen sich aus den Daten der Bevölkerungsstruktur des Statistischen Bundesamts und des Zensus 2011 zusammen. Hierbei wird für das Bezugsjahr 2030 auf Basis der zensusangepassten regionalen Strukturdatenprognose des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) eine „synthetische“ Bevölkerung generiert und räumlich verteilt. Für das Bezugsjahr 2050 wird der an den Zensus 2011 angepasste Eckwert dem Klimaschutzszenario 2050 des BMUB (2015) entsprechend regionalisiert fortgeschrieben. Die Altersgruppenverteilung für 2050 entspricht der Variante G1-L1-W1 der 13. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung des Statistischen Bundesamtes.

Das Verkehrsverhalten der Bevölkerung wird empirisch auf Basis der Erhebung „Mobilität in Deutschland“ (MiD) 2008 bestimmt und angewendet (Infas & DLR 2010). Im Falle des Regionalmodells wurde für den Berliner Raum zusätzlich auf die Daten der Erhebung „Mobilität in Städten–SrV 2008“ zurückgegriffen (TU Dresden o.J.). Die Daten dienen u. a. der Ableitung der personen- und zweckspezifischen Fahrten des deutschlandweiten Verkehrsnachfragemodells und auch der Bestimmung der detaillierten Wegeketten für das mikroskopische, regionale Verkehrsmodell der Lupenbetrachtungen. Die Informationen zur Lage von Arbeitsplätzen, Freizeit- und Einkaufsmöglichkeiten sowie Bildungs- und Betreuungsstätten werden aus verschiedenen Quellen abgeleitet und für die Zielwahl in den Modellen verwendet.

Der Erwerb bzw. der Besitz eines Pkw beeinflusst die Verkehrsmittelwahl über einen langen Zeitraum sehr wesentlich, und das konkrete Pkw-Modell ist maßgeblich für die Kosten und Emissionen bei der Nutzung des Fahrzeuges. Zur Bestimmung der künftigen Struktur der Neuzulassungen wird in Renewbility das in Kapitel 4.2.1.1 beschriebene Modell verwendet. Die daraus abgeleitete Größe und Zusammensetzung der Fahrzeugflotte stellt einen wichtigen Input für die Verkehrsnachfragemodelle dar – nicht zuletzt, da sie sich maßgeblich auf die Kilometerkosten des Individualverkehrs auswirken und den Pkw-Besitz der Bevölkerung bestimmen. Die Flottendaten werden auf Ebene der politischen Ortsgrößenklassen ermittelt und den einzelnen Personen und Haushalten in den jeweiligen Untersuchungsgebieten zugeordnet. Eine detaillierte Darstellung des Vorgehens findet sich in den nachfolgenden Abschnitten.

### Zentrale Outputs der Verkehrsnachfragemodellierung

Generell lässt sich die Verkehrsnachfrage nach verschiedenen Kriterien (bspw. Verkehrsmittel oder Wegezweck) differenzieren. Für die Wirkungsabschätzung von Maßnahmen und Szenarien können so bedeutende Kennwerte wie Personen- und Fahrzeugkilometer oder Verkehrsmittelanteile sowohl für das Basisjahr, als auch für die Prognosezeiträume insgesamt und für bestimmte Wegezwecke oder Modi berechnet werden. Aus dieser Entwicklung können anschließend mit Hilfe der weiteren Komponenten der Modelllandschaft des Projektes sowohl die Auswirkungen auf Umwelt und Energiebedarf als auch die ökonomischen Wirkungen bestimmt werden.

Der beschriebene Modellkomplex ist durch seine starke Differenzierung und die Kopplung verschiedener Modellansätze darüber hinaus in der Lage, ausgesuchte Fragestellungen wie Auswirkungen der Elektromobilität insbesondere im urbanen Kontext zu beantworten und die Maßnahmenwirkung auf den individuellen Personenkontext abzubilden.

Die Ergebnisse der Personenverkehrsnachfragemodelle geben einerseits Auskunft über die Wirkungen von in Szenarien formulierten Maßnahmenbündeln auf die Mobilität. Betrachtungen der ökonomischen Wirkung, die sich beispielweise durch eine Veränderung von Reisezeiten oder Transportkosten ergeben können, sowie die aus der realisierten Mobilität resultierenden Emissionen können darauf aufbauend im Modellverbund berechnet werden.

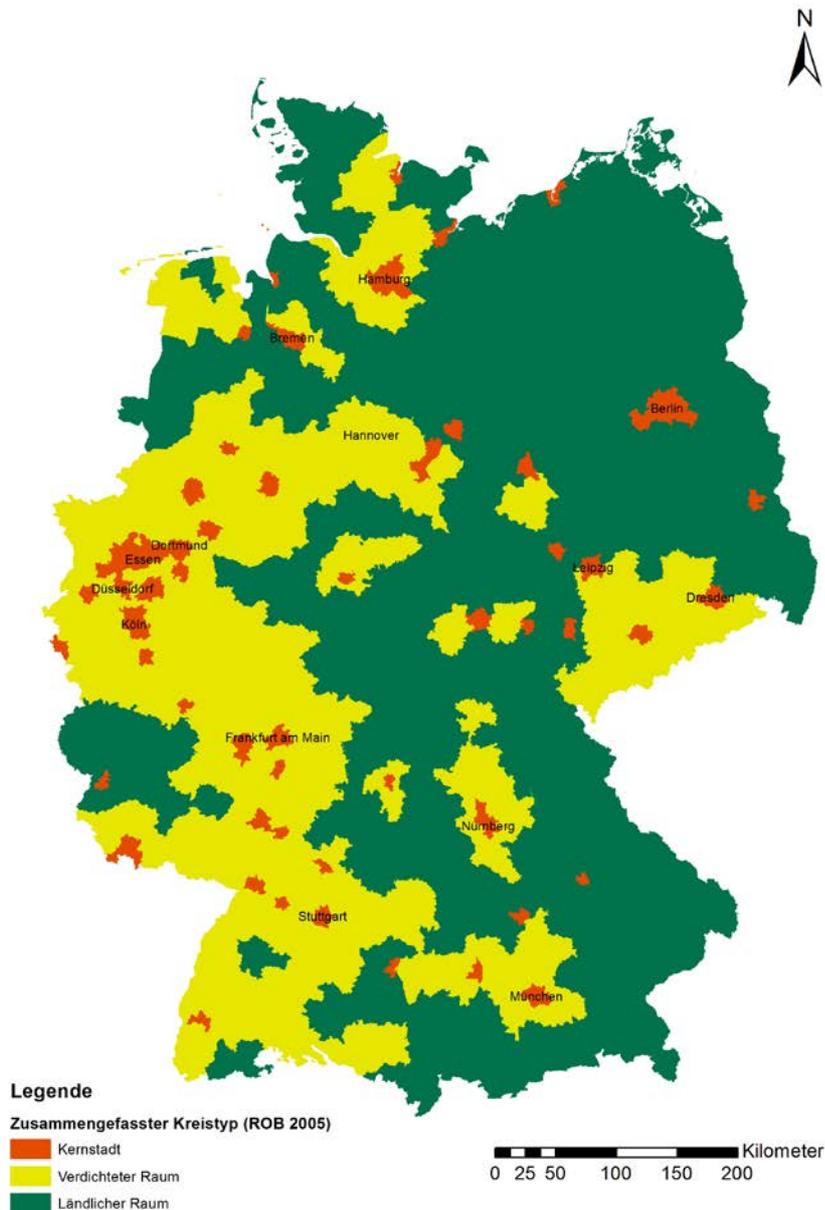
#### 4.4.1 DAS MAKROSKOPISCHE PERSONENVERKEHRSMODELL FÜR DEUTSCHLAND

Die makroskopische Verkehrsnachfragemodellierung betrachtet das unterschiedliche Verkehrsverhalten von typisierten Einzelpersonen in drei unterschiedlichen Raumtypen. Wie in Abbildung 4-7 dargestellt, wird dabei zwischen Kernstädten, verdichteten Räumen und ländlichen Räumen gemäß der Klassifikation des BBSR unterschieden (BBSR, ohne Jahresangabe). Basis der Zonierung des Modells des Alltagsverkehrs mit insgesamt 6561 Zellen stellen die offiziellen Gemeinden und Gemeindeverbände dar, die nach verkehrlichen Gesichtspunkten teilweise aggregiert und für knapp 300 Städte weiter aufgeteilt wurden. Das Fernverkehrsmodell operiert auf der Ebene der Kreise bzw. kreisfreien Städte (NUTS3-Zonierung) mit 412 Zellen, zum Gebietstand 31.12.2010.

Aufgrund der starken räumlichen sowie soziodemographischen Differenzierung ist das Modell in der Lage, unterschiedliche Reaktionen der Verkehrsteilnehmer auf bestimmte Rahmenbedingungen in Abhängigkeit von den individuellen Eigenschaften der betrachteten Personentypen und den jeweiligen räumlichen Gegebenheiten abzubilden. Aufgrund der gesamtdeutschen räumlichen Abdeckung sind die Ergebnisse des makroskopischen Modells

maßgebend für die darauf aufbauenden Berechnungen der Umweltwirkungen und des Energiebedarfs im Personenverkehr.

**Abbildung 4-7: Deutschland mit räumlicher Differenzierung nach zusammengefassten Kreistypen**

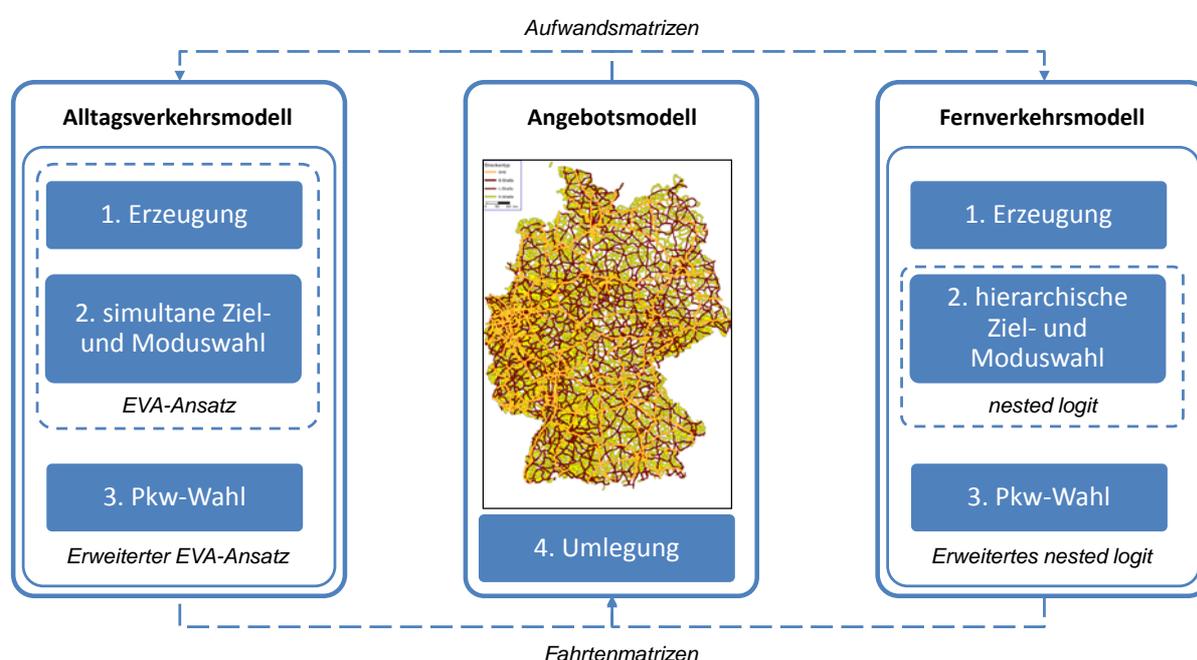


Quelle: Renewbility III

Um die unterschiedlichen privaten Verkehre in Deutschland differenziert abbilden und die Wirkung der zu untersuchenden Maßnahmenbündel adäquat abschätzen zu können, ist das deutschlandweite Verkehrsnachfragemodell, wie bereits erwähnt, in zwei komplementäre Modelle aufgeteilt. Das Alltagsmodell umfasst dabei Fahrten zu den aufgesuchten Aktivitätsorten bis zu einer Entfernung von 100 Kilometern. Längere Fahrten, die in der Regel

unregelmäßig auftreten, werden im Fernverkehrsmodell berücksichtigt. Alle diese Verkehre nutzen – gemeinsam mit dem Güterverkehr – die gleiche Verkehrsinfrastruktur, die im Angebotsmodell abgebildet wird. Das Angebotsmodell dient als Quelle für die Ermittlung wichtiger Aufwände, wie Kosten und Zeiten, die mit der Realisierung der Ortsveränderungen einhergehen. Diese Informationen sind wichtige Inputgrößen für die Verkehrsnachfragemodelle, deren Ergebnisse, die Fahrtenmatrizen, schließlich dem Angebot im Rahmen der Verkehrsumlegung gegenüber gestellt werden. Die Modellstruktur und diese Rückkopplungen sind in Abbildung 4-8 schematisch dargestellt.

**Abbildung 4-8: Überblick über das Deutschlandmodell**



Quelle: Renewbility III

Die Berechnungsabläufe der beiden Modellteile des deutschlandweiten Verkehrsnachfragemodells sind grundsätzlich ähnlich und umfassen die Verkehrserzeugung zur Ermittlung der Verkehrsaufkommen (Wegeanzahl), die Zielwahl zur Bestimmung der Quelle-Ziel-Relationen sowie die Moduswahl zur Ermittlung der relationspezifischen Verkehrsmittelanteile (Modal-Split). Zudem wurden beide Modellteile um die zusätzliche Komponente der Pkw-Wahl erweitert, deren Anwendung erstmalig in Renewbility III zur Anwendung kam. Über die gemeinsame Verkehrsumlegung, einschließlich der notwendigen Rückkopplungen, und die damit ermittelten Aufwände besteht eine direkte Wechselwirkung

der Modellteile sowie auch zum Güterverkehr. Nachfolgend wird auf ausgewählte Spezifika des Alltags- und des Fernverkehrsmodells kurz eingegangen.

#### 4.4.1.1 Alltagsverkehrsmodell

Das Alltagsverkehrsmodell basiert auf dem EVA-Modellansatz (EVA steht für **E**rzeugung, **V**erteilung und **A**ufteilung), wobei die Zielwahl (Verteilung) und die Verkehrsmittelwahl (Aufteilung) simultan erfolgen (Lohse 2011). Der Verkehr wird auf Basis dieses Modells makroskopisch modelliert, wobei das Verkehrsgeschehen in seiner Ursache stark differenziert betrachtet wird. Dies ist notwendig, um detaillierte Wirkungsabschätzungen der Maßnahmen zu ermöglichen. Das Modellkonzept beruht auf den sogenannten Quelle-Ziel-Gruppen. Dabei werden die täglichen Aktivitätenketten in Aktivitätspaare entsprechend der Aktivität am Startort und der Aktivität am Zielort (Zweck der Ortsveränderung) unterteilt. Beispielsweise entstehen aus einer Aktivitätenkette *Wohnen-Arbeiten-Wohnen* die beiden Quelle-Ziel-Gruppen *Wohnen-Arbeiten* und *Arbeiten-Wohnen*. Zudem werden jeder Quelle-Ziel-Gruppe maßgebende Personengruppen zugewiesen, die die Ortsveränderung durchführen und diese „produzieren“. So legen beispielsweise nur Erwerbstätige Wege von der Wohnung zur Arbeit zurück. Zudem erfolgt eine Zuweisung von Strukturdaten, welche als Attraktionsgröße dienen, z. B. Arbeitsplätze für die Quelle-Ziel-Gruppe *Wohnen-Arbeiten*.

Im Alltagsmodell erfolgt die Differenzierung der verkehrsbeeinflussenden Größen nach zahlreichen Kriterien. Hierzu zählt u. a. die Differenzierung der Bevölkerung nach:

- Alter
- Erwerbsstatus
- Pkw-Verfügbarkeit.

Die Strukturdaten sind unterteilt nach (Auswahl):

- Arbeitsplätze
- Schulplätze
- Einkaufsfläche
- Freizeitflächen.

Auf Basis der genannten Merkmale resultiert eine Einteilung in 13 Quelle-Ziel-Gruppen (Tabelle 4-10).

Tabelle 4-10: Quelle-Ziel-Gruppierung

von	nach	Wohnen	Arbeiten	Bildung	Einkaufen	Freizeit	Sonstiges
Wohnen	-	-	WA	WB	WE	WF	WS
Arbeiten	AW	-	-	AS			
Bildung	BW	SA	SA	SS			
Einkaufen	EW						
Freizeit	FW						
Sonstiges	SW						

Quelle: Renewbility III

Aufgrund der Einschränkung auf Ortsveränderungen unter 100 Kilometer stellen nicht alle möglichen Verkehrsmittel eine sinnvolle Alternative dar. Im Besonderen der Flugverkehr ist für diese Verkehre irrelevant. Die im Alltagsverkehrsmodell betrachteten Verkehrsmittel sind:

- Motorisierter Individualverkehr (MIV)
- Öffentlicher Personennahverkehr (ÖPNV)
- Radverkehr
- Fußgängerverkehr.

Darüber hinaus wird im Rahmen einzelner Szenarien auch das Carsharing als eigenständige Alternative modelliert, um detaillierte Aussagen über dessen Wirkung treffen zu können. Da für den Modus Carsharing entsprechend differenzierte und umfangreiche Daten zur Schätzung der Modelle zum derzeitigen Zeitpunkt nicht verfügbar sind, wurde in diesem Fall nach gängiger Praxis auf eine Kombination von ausgewählten ÖV- und Pkw-Parametern zurückgegriffen.

Eine Besonderheit im Rahmen von Renewbility III stellt die Verkehrsnachfragemodellierung unterschiedlicher Pkw-Typen, differenziert nach der Antriebsart, dar. Hintergrund ist die Notwendigkeit, die konkrete Wirkung von Maßnahmen abschätzen zu können, die sich nur auf ausgewählte Pkw-Typen beziehen. Hierzu zählen beispielsweise unterschiedliche Kilometerkosten oder auch Einfahrbeschränkungen in bestimmte Gebiete. Um dies abbilden zu können, wurde eine Modellerweiterung zum angewendeten EVA-Modell entwickelt.

Diese zusätzliche Modellebene umfasst die Pkw-Wahl unterteilt nach den Antriebsarten:

- Ottomotor
- Dieselmotor
- Plug-In Hybrid
- Batterieelektrischer Antrieb
- Sonstige (LPG, CNG und Brennstoffzelle).

Die Antriebstypen LPG, CNG und Brennstoffzelle – die im Flottenmodell differenziert ermittelt werden – wurden für die Abbildung im Deutschlandmodell zusammengefasst, um eine vertretbare Rechenzeit zu gewährleisten. Für die Modellgenauigkeit stellt diese Zusammenfassung kein Problem dar, da zum einen in den Szenarien generell nur wenige Fahrzeuge mit Antrieben dieser Typen vorkommen und außerdem die Gasfahrzeuge ähnlich (günstige) Nutzerkosten aufweisen und somit keine relevanten Unterschiede bei den Jahresfahrleistungen zu erwarten sind. Für die Berechnung von Energiebedarf und Treibhausgasemissionen wurden die für diese Fahrzeuggruppe ermittelten Fahrleistungen dann wieder disaggregiert bzw. auf die Antriebe verteilt (wobei eine gleichmäßige Jahresfahrleistung unterstellt wurde).

Die Pkw-Flotte in Deutschland geht räumlich nach den Ortsgrößenklassen differenziert in das Modell ein. Dieser Modellinput stellt ein Ergebnis des Flottenmodells (Kapitel 4.2.1.1) dar, wodurch eine konsistente Verknüpfung mit den im Projekt verwendeten Modellannahmen und -parametern gewährleistet ist.

Die Pkw-Wahl ist modellseitig direkt mit der simultanen Ziel- und Moduswahl verknüpft, indem sich die Eigenschaft, d. h. Kosten, Zeiten etc. des MIV unmittelbar aus den fünf verschiedenen Pkw-Typen ergeben. Die Verknüpfung wird mit einem nested logit-Ansatz realisiert. Für detailliertere Ausführungen zu dieser Modellentwicklung wird auf Mocanu und Winkler (2016) verwiesen.

#### **4.4.1.2 Fernverkehrsmodell**

Die Verfügbarkeit von Daten zu Fernverkehrsverhalten ist im Vergleich zu Daten über den Alltagsverkehr sehr dürftig. Da Verkehrsmodelle unmittelbar auf empirischen Daten basieren, ist es nicht möglich, das Fernverkehrsmodell in gleich hoher Differenzierung wie das Alltagsverkehrsmodell zu gestalten. Die Unterscheidungen betreffen beispielsweise die räumliche Einteilung oder die Anzahl an betrachteten Personengruppen.

Das Modell ist in der Verkehrserzeugung grundsätzlich ähnlich aufgebaut wie das Alltagsverkehrsmodell, jedoch werden die Ortsveränderungen nach folgenden Fahrtzwecken unterteilt:

## ENDBERICHT

- Arbeit
- Dienstliche Wege (Geschäftsreisen)
- Urlaub
- Sonstiges.

Arbeitswege umfassen hier sowohl die langen Pendler als auch die Wochenendpendler. Sonstige Wege sind beispielsweise Besuche von Freunden und Verwandten sowie Kurzurlaube.

Die Ziel- und Moduswahl erfolgt mit einem nested logit-Modellansatz (z. B. Ortúzar und Willumsen 2011). Dabei sind die beiden Modellstufen hierarchisch aufeinander aufgebaut und die Wahl des Verkehrsmittels (untere Ebene) hat unmittelbaren Einfluss auf die Wahl des Ziels. Dies erfolgt in vergleichbarer Weise wie die zusätzlich entwickelte und implementierte Ebene der Pkw-Wahl, deren Integration analog zum Alltagsmodell erfolgt.

Neben den Fahrtweiten und den Fahrtzwecken sind vor allem auch die relevanten Verkehrsmittel ein wesentlicher Unterschied zum Alltagsverkehr. Hierbei werden folgende Alternativen berücksichtigt:

- Motorisierter Individualverkehr (MIV)
- Fernbahn
- Busse (Reisebusse und Fernlinienbusse)
- Flugverkehr.

Nichtmotorisierte Verkehrsmittel spielen im Fernverkehr keine Rolle, hierfür besitzt der Flugverkehr mit zunehmender Entfernung eine Bedeutung, wenngleich innerhalb Deutschlands der Anteil relativ gering ist. Aufgrund der Marktliberalisierung und der erkennbaren Bedeutung wurde der Fernlinienbusverkehr als eigenständige Alternative berücksichtigt. Der MIV wird im Pkw-Wahlmodell wiederum in die fünf verschiedenen Pkw-Typen differenziert (siehe Ausführungen zum Alltagsverkehrsmodell).

Mit dem Fernverkehrsmodell werden die Verkehre modelliert, deren Start- und Zielpunkt innerhalb Deutschlands liegen. Um den gesamten Verkehr auf dem deutschen Territorium bestimmen zu können, sind diese Daten um den Quell-, Ziel- und Durchgangsverkehr zu ergänzen. Hierfür wurde ein Modell entwickelt, welches auf den entsprechenden Daten der aktuellen Verkehrsprognose des Bundes für das Jahr 2030 aufbaut und diese für die verschiedenen Szenarien anpasst. Die dafür notwendigen Elastizitäten wurden unmittelbar aus dem Deutschlandmodell abgeleitet, wodurch die methodische und inhaltliche Konsistenz gewährleistet ist.

#### 4.4.2 DAS MIKROSKOPISCHE MODELL FÜR AUSGEWÄHLTE TEILRÄUME

Flankierend zu den deutschlandweiten Berechnungen erfolgte eine „Lupenbetrachtung“ für ausgewählte Teilräume Deutschlands mit Hilfe eines mikroskopischen Modellansatzes. Aufgrund des höheren Detaillierungsgrades bei der Abbildung der Maßnahmen, der räumlichen Gegebenheiten sowie der Interdependenzen bei den täglichen Mobilitätsentscheidungen einer individuellen Person ermöglicht die mikroskopische Betrachtung eine tiefergehende Analyse der Wirkungen verkehrlicher Maßnahmen. So ermöglicht beispielsweise eine stärkere räumliche Differenzierung der Maßnahmenabbildung in den Kernstädten und eine Berücksichtigung der Implikationen auf die Gesamtgestaltung der täglichen Wegekette einen vertiefenden Einblick auf die resultierenden Verhaltensänderungen. Die Ergebnisse des mikroskopischen Modells werden darüber hinaus für die Validierung des makroskopischen Modells verwendet.

Die eingesetzte mikroskopische Verkehrsnachfragemodellierung TAPAS betrachtet das unterschiedliche Verkehrsverhalten einzelner Bevölkerungsgruppen und simuliert das Verhalten von Einzelpersonen und Haushalten. Damit können nicht nur Verhaltensunterschiede zwischen Personengruppen, sondern auch unterschiedliche Reaktionen der Verkehrsteilnehmer auf bestimmte Rahmenbedingungen abgebildet werden. Diese „synthetische Bevölkerung“ wird aus unterschiedlichen Datenquellen zu sozio-ökonomischen Personenmerkmalen wie Alter, Geschlecht, Erwerbsstatus und Einkommen erstellt. Dabei wird der demographische Wandel berücksichtigt, woraus sich bereits ein veränderter Mobilitätsbedarf in den Szenariozeiträumen ergibt. Als maßgebliche Datenquellen wurden hierbei analog zum Deutschlandmodell die Wirtschafts- und Bevölkerungsentwicklung von der Verkehrsprognose 2030 übernommen. Neben der zensusangepassten regionalen Strukturdatenprognose des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) kamen der Zensus 2011 sowie für detaillierte Angaben der Mikrozensus 2010 zum Einsatz. Informationen zur Verfügbarkeit von Verkehrsmitteloptionen (Pkw, ÖV-Karte, Fahrrad) wurden auf Basis der Erhebung „Mobilität in Deutschland“ (MiD) 2008 (Infas & DLR 2010) sowie für den Berliner Raum zusätzlich aufbauend auf der Erhebung „Mobilität in Städten–SrV 2008“ (TU Dresden o.J.) ergänzt.

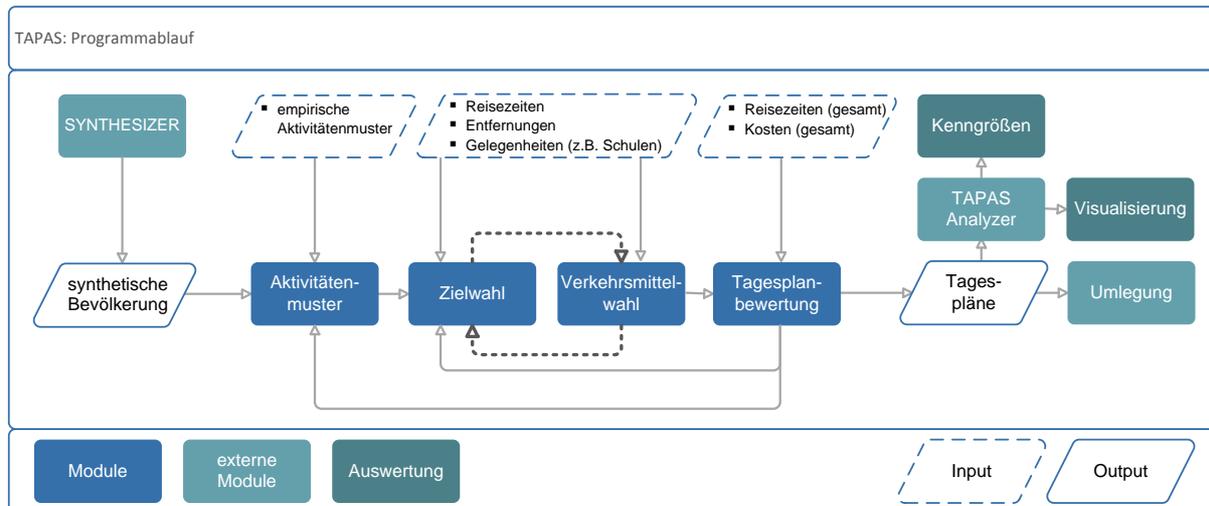
Da das Mobilitätsverhalten von räumlichen Gegebenheiten abhängt, werden neben den individuellen Eigenschaften der betrachteten Personentypen auch hier unterschiedliche Beispielräume betrachtet. Wie bereits in den Vorgängerprojekten wurden die Region Main-Rhön als Beispiel eines ländlich geprägten Gebietes, die Region Braunschweig als Beispiel einer Region mit Verstädterung sowie Berlin als Beispiel eines Agglomerationsraumes gemäß

der Klassifikation der Regionsgrundtypen des BBSR (BBSR, ohne Jahresangabe) ausgewählt. Detaillierte Angaben zur Auswahl der Beispierräume und den zugrunde gelegten Auswahlkriterien finden sich im Methodenbericht von Renewbility I (Öko-Institut & DLR-IVF 2009a). Die Untersuchungsräume weisen eine kleinräumige, in den Städten zusätzlich verdichtete Zonierung mit detaillierten Angaben zur Raumstruktur und ihrer Typisierung auf. Diese findet beispielsweise bei der im Szenario Effizienz plus beinhalteten Modellierung von Einfahrtsbeschränkungen in Innenstädten, aber auch der Zuweisung von differenzierten Flotten auf Ebene der Politischen Ortsgrößenklassen Anwendung. So verfügt die Untersuchungsregion Main-Rhön über 658 Zonen, die Region Braunschweig ist in 911, Berlin in 1.193 Zellen unterteilt. Die Lokalisierung von Wohnstandorten und Aktivitätenstandorten erfolgt dabei adressgenau.

TAPAS simuliert das gesamte Verkehrsaufkommen, indem für jeden Einwohner einer „synthetischen Bevölkerung“ für eine Stadt oder Region typische Aktivitätenmuster zugewiesen werden. Grundlage dieser Aktivitätenmuster stellen die empirisch berichteten Tagebücher der Zeitbudgeterhebung (ZBE) des Statistischen Bundesamtes dar (Destatis 2016). Eine kombinierte Ziel- und Verkehrsmittelwahl erstellt für diese Aktivitätenmuster konkrete Wegeketten mit den jeweiligen Aufenthaltsorten und gewählten Verkehrsmitteln. Das Modell bildet dabei das Verhalten individueller Personen ab und berücksichtigt unter anderem die lokalen Gegebenheiten, die Position des Weges innerhalb der geplanten Wegekette, den aktuellen Haushaltskontext (die individuelle Pkw-Verfügbarkeit) und die verfügbaren Zeit- und Finanzbudgets. Mathematische Grundlage der Wahl zwischen den Modi motorisierter Individualverkehr (MIV) mit einer Unterscheidung zwischen Fahrer und Beifahrer, dem Öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV), der Rad- oder Fußnutzung sowie der Nutzung eines etwaig verfügbaren Carsharing-Fahrzeuges stellt ein Multinomiales Logit-Modell dar. Neben der Verfügbarkeit eines Modus und den Reisezeiten sowie -kosten fließen hier soziodemographische Faktoren (u. a. Alter, Geschlecht, Einkommen), sowie Eigenschaften des Weges (Aktivitätentyp, Entfernung) in die Entscheidung für einen Modus ein. Die Berücksichtigung des Modus Carsharing erfolgt entsprechend dem Vorgehen im Alltagsverkehrsmodell (Kapitel 4.4.1.1). Durch die Differenzierung der Pkw mit je nach Antriebsart eigenen Kostenfaktoren und Reichweiten ist es möglich, die Auswirkungen einer teilweise elektrifizierten Flotte realistischer zu modellieren.

TAPAS erzeugt für jede einzelne Person im Untersuchungsgebiet einen detaillierten Tagesplan. Das kombinierte Ergebnis für alle Personen bestimmt die Mobilitätsnachfrage des untersuchten Gebietes.

Abbildung 4-9: Modellablauf des mikroskopischen Regionalmodells TAPAS



Quelle: Heinrichs et al. 2016

Abbildung 4-9 gibt einen Überblick über die Funktionsweise des Modells. Detaillierte Informationen finden sich in Heinrichs et al. 2016, Krajzewicz et al. 2016 sowie - für eine ältere TAPAS-Version - in Öko-Institut & DLR-IVF 2009a und Hertkorn 2005.

## 4.5 NACHFRAGEMODELLIERUNG GÜTERWIRTSCHAFTSVERKEHR

Ziel der Güterverkehrsmodellierung in Renewbility war die Abschätzung von Maßnahmenwirkungen auf den Modal Split und die Fahr- und Verkehrsleistungen im Güterverkehr in Deutschland getrennt nach Fahrzeugklassen für Stichjahre mit einem Zeithorizont bis 2050. Weiterhin sollte der Einfluss einer durch die Dekarbonisierung der Wirtschaft hervorgerufenen Änderung des Güterverkehrsaufkommens abgebildet werden. Um die Vergleichbarkeit der Szenarienergebnisse mit der Verflechtungsprognose des Bundes zu sichern, wurde die Nachfrageverflechtung aus dieser Prognose übernommen und das Modell im Basisjahr auf den dort ausgewiesenen Modal Split im Jahr 2030 eingestellt.

Das Güterverkehrsnachfragemodell FRIDAY, das in Renewbility eingesetzt wurde, ermittelt Fahr- und Verkehrsleistungen in mehreren Schritten.

Zunächst wird das Güterverkehrsaufkommen von 25 Gutarten (Einteilung wie in der Verkehrsprognose des Bundes) bestimmt (Frachterzeugung). Für 2030 wurde aus Konsistenzgründen das Aufkommen aus der Verkehrsprognose des Bundes übernommen. Dabei wurde Europa in über 500 Verkehrszellen aufgeteilt. Die Zellenstruktur entspricht derjenigen der Verflechtungsprognose des Bundes und ist somit feiner für Deutschland und die angrenzenden Regionen als für die fern von Deutschland gelegenen Länder. In

Deutschland entsprechen die Verkehrszellen den Landkreisen und kreisfreien Städten. Dieses Aufkommen wurde mittels eines Elastizitätenansatzes, der die Veränderung des Güterverkehrsaufkommens in Abhängigkeit des Bruttoinlandsprodukts beschreibt, differenziert nach deutschem Binnenverkehr, Seeverkehren und grenzüberschreitenden Verkehren für alle Gutarten bis 2050 fortgeschrieben. Für die Klimaschutzszenarien wurden anschließend die Aufkommen bestimmter Gutarten angepasst (vgl. Abschnitt 8.2.1). Ergebnis der Frachterzeugung ist das Frachtaufkommen der Verkehrszellen (Kreise) je Gutart in Tonnen.

Dieses Güterverkehrsaufkommen wurde gemäß der Verflechtungsmatrix der Verkehrsprognose des Bundes auf Relationen (also Quell-/Zielbeziehungen) aufgeteilt (Frachtverteilung). Es wird davon ausgegangen, dass sich die Raumüberwindungskosten durch die untersuchten Maßnahmen in Summe nicht drastisch verändern und deshalb die Verflechtung der Güterströme in den Szenarien gegenüber der Referenz gleich bleibt.

Im nächsten Schritt wird die Wahl eines Verkehrsträgers je Gutart und Relation für das Verkehrsaufkommen modelliert (Modalwahl). Unterschieden werden die drei Verkehrsträger Schiene, Straße und Binnenschiff. Das Modell benötigt Transportzeiten und Transportkosten als Eingangsgrößen, die in den Szenarien verändert wurden. Transportkosten setzen sich aus unterschiedlichen Komponenten wie Lohnkosten, Fahrzeugkosten und Energiekosten zusammen. Dadurch können die Wirkungen von Maßnahmen auf diese Komponenten detailliert betrachtet werden. Fahrzeugkosten und Energieverbräuche im Straßenverkehr stammen aus dem Flottenmodell (s. Abschnitt 4.2.1). Durch das Zusammenspiel mit dem Flottenmodell werden Kostenänderungen, die aus technologischen Änderungen der Flotte und ihrer Zusammensetzung resultieren, berücksichtigt.

Um die Veränderung der Aufteilung der Verkehrsnachfrage auf die Verkehrsträger in Klimaschutzszenarien gegenüber dem Basisszenario zu modellieren, kommt ein nutzenbasiertes diskretes Wahlmodell zum Einsatz (Multinomial Logit). Die Modellparameter sind anhand der Ergebnisse einer empirischen Erhebung geschätzt (BVU/TNS 2015). Das Modell reagiert je nach Gutart unterschiedlich elastisch auf Kosten und Transportzeitänderungen.

Die Verkehrsnachfrage der drei Verkehrsträger in Tonnen wird zuletzt in Fahrten umgerechnet. Dabei wird die durchschnittliche Zuladung je Fahrzeug, Schiff oder Zug nach Gutarten differenziert. Im Straßenverkehr werden vier Fahrzeugklassen nach zulässigem Gesamtgewicht und Konfiguration unterschieden (3,5 t-7,49 t, 7,5 t-12 t, Solo-Lkw >12 t,

Sattel- und Gliederzüge). Im Schienenverkehr werden als Zuggattungen Ganzzüge, Einzelwagenverkehre und kombinierte Verkehre differenziert. In der Binnenschifffahrt werden kombinierte und sonstige Verkehre unterschieden. Für diese jeweiligen Klassen werden auch die Transportkosten bestimmt.

Die Güterströme im Straßenverkehr werden entfernungsabhängig einer Fahrzeugklasse zugeordnet. Kleine Fahrzeuge werden im Nahverkehr, Sattelzugmaschinen und Gliederzüge vor allem im Fernverkehr eingesetzt. Grundlage für die Aufteilung sind die Fahrzeugstatistiken des KBA sowie die Erhebung „Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010“. Die Gewichtsauslastung der Fahrzeuge unterscheidet sich nach Gutarten und Fahrzeugklassen. Die Entwicklung der Auslastung über die Zeit ist aus Zeitreihen der KBA-Statistik extrapoliert.

Im Schienenverkehr wird eine Mischkalkulation für Nutzlasten, Auslastungen und Kosten verwendet, die je nach Gutart unterschiedliche Anteile der Zuggattungen annimmt. Zusätzlich werden Leerfahrten, im Straßenverkehr je nach Entfernung der Ladungsfahrt, hinzugerechnet.

Da vom Kraftfahrtbundesamt nur Fahrzeuge ab einer Zuladung von 3,5 t erfasst werden, ein großer Anteil der Fahrten im Güterverkehr aber von Fahrzeugen mit einer Nutzlast  $< 3,5$  t erbracht wird, wurden die Fahrleistungen dieser Fahrzeuge separat modelliert. Genutzt wurde hierfür und für den Personenwirtschaftsverkehr mit Pkw das Trip Chain Extrapolation Modell (Schneider 2011). Das Modell extrapoliert aus Strukturdaten für das Zieljahr und Fahrtenmustern aus der KiD. Es wurde die gleiche Zellenstruktur wie für den Güterverkehr genutzt. Aus dem Fahrtenaufkommen wurden die Fahrleistungen auf deutschem Territorium aggregiert. Dadurch ist sichergestellt, dass der gesamte Wirtschaftsverkehr berücksichtigt wird.

## 4.6 NACHFRAGEMODELLIERUNG INTERNATIONALER LUFT- UND SEEVERKEHR

### 4.6.1 LUFTVERKEHR

Der nationale Luftverkehr wird als integraler Bestandteil des Personenverkehrsmodells (siehe Kapitel 4.4) berechnet. Für den internationalen Luftverkehr (von Personen und Gütern) wurde in Renewbility ein eigenes Modell entwickelt, welches im folgenden Abschnitt dargestellt wird.

Bilanzgrenze ist die Verkehrsleistung der aus Deutschland abgehenden Flüge bis zur ersten Landung, welche auch die Grundlage der nationalen Treibhausgasinventare bzw. von TREMOD ist. Die Treibhausgasemissionen des internationalen Luftverkehrs werden in den

Inventaren ebenso wie die Treibhausgasemissionen des internationalen Seeverkehrs nur „nachrichtlich“ ausgewiesen.

Die Referenz zur Kalibrierung des Luftverkehrsmodells für das Jahr 2030 ist die Verkehrsprognose. Die Fortschreibung der Luftverkehrsnachfrage bis 2050 erfolgt über eine Regressionsanalyse historischer Daten auf Basis des BIP (d. h. Fortschreibung der Indikatoren tkm/BIP bzw. pkm/BIP). Für den Luftfrachtverkehr werden im Bericht zur Verkehrsprognose keine Angaben gemacht. Daher werden beim Luftfrachtverkehr auch für das Jahr 2030 die Ergebnisse der Regression herangezogen. In der Vergangenheit ist der Luftverkehr im Verhältnis zum BIP stets überproportional angestiegen, d. h. durch die Regression wird dieser Trend in die Zukunft fortgeschrieben.

In den Szenarien werden Kostenänderungen im Luftverkehr und deren Wirkung auf die Nachfrage abgebildet. Als Kostenkomponenten werden dabei Kraftstoffkosten, Steuern (Luftverkehrsteuer) sowie sonstige Kosten berücksichtigt.

Die Kostenentwicklung im Basisszenario wird wie folgt abgeleitet:

- Die Höhe des Effektes der Einführung der Luftverkehrsteuer im Jahr 2011 wird aus der VP 2030 entnommen (einmalig 3 %).
- Der Anteil der Kraftstoffkosten am Ticketpreis im Jahr 2010 beträgt 30 %.
- Die Entwicklung der übrigen (d. h. nicht Kraftstoff- bzw. steuerabhängigen) Kosten wird so kalibriert, dass die Gesamtkostenentwicklung der VP 2030 entspricht (Kostenkonstanz). Aus der Kalibrierung ergibt sich, dass die nicht-kraftstoffabhängigen Kosten um 0,26 % p.a. je Tonnenkilometer bzw. Personenkilometer sinken. Eine Kostensenkung kann beispielsweise über eine höhere Auslastung von Flugzeugen bzw. größere Flugzeuge erreicht werden.

In den Klimaschutzszenarien können Effekte unterschiedlicher Effizienzentwicklungen sowie unterschiedlicher Kerosinpreise (z. B. in Abhängigkeit des Anteils alternativer Kraftstoffe) abgebildet werden.

Für die Effekte der Preisänderungen auf die Verkehrsnachfrage werden folgende Preiselastizitäten der Nachfrage angenommen:

- Personenverkehr -0.8, abgeleitet auf Basis von Infrac (2009) und
- Frachtverkehr -0.5. (auf Basis von Brass et al. (2015). Zur Preiselastizität der Luftfracht gibt es wenig Literatur bzw. große Spannweiten, bei -0.5 handelt es sich um eine eher konservative Abschätzung (d. h. vergleichsweise kleine Preiselastizität).

#### 4.6.2 SEEVERKEHR

Ähnlich zum Luftverkehr bildet die Verkehrsprognose auch die Basis für die Berechnung der Seeverkehre. In der Verkehrsprognose sind allerdings nur Daten zu der Entwicklung der landseitigen Verkehre (Seehafenhinterlandverkehre) enthalten. Die Seeverkehre werden daher anhand der Entwicklung der deutschlandrelevanten Hinterlandverkehre abgeleitet, um Konsistenz bei der Basisentwicklung bis 2030 mit den anderen Verkehrsträgern zu wahren.

In einem ersten Schritt wird die Entwicklung der **Seehafenhinterlandverkehre** über güterklassenspezifische Regressionsanalysen ermittelt. Die Unterscheidung nach Güterklassen ist notwendig, da die Entwicklung des Transportaufkommens der Güter von jeweils unterschiedlichen Parametern abhängt. Es wurden folgende Güterklassen betrachtet:

- Kohle
- Mineralöl und Mineralölerzeugnisse
- Massengüter (z. B. Erze, Steine und Erden)
- andere Trockenladung (hauptsächlich Containerfracht).

Die Entwicklung der Transporte von Kohle und Mineralölerzeugnissen werden anhand der Entwicklung der Nachfrage von den jeweiligen Energieträgern bestimmt. Güterklassenspezifisch sind Annahmen zu Loco-Quoten hinterlegt. Auch wird die Zulieferverteilung mitbetrachtet, so dass Import- und Exportverhalten mittels Land- oder Binnenwassertransporten Berücksichtigung findet, wo es die Datenlage zulässt. Zusätzlich wird auf eine Veränderung der Güterstruktur eingegangen, womit sich der Im- und Exportbedarf unabhängig der Nachfrage verstärkt.

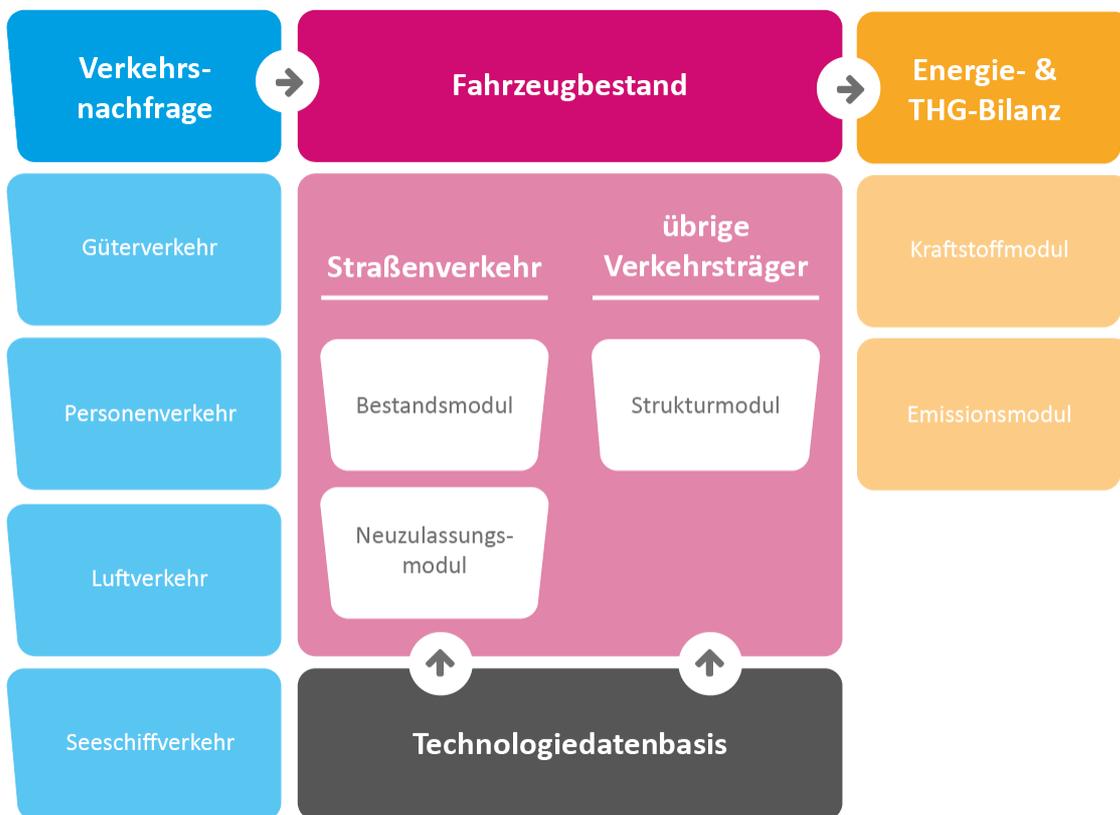
Massengüter und Trockenladung werden über eine Trendfortschreibung auf Basis des BIP berechnet. Für die jeweiligen Güterklassen wird der Anstieg des Aufkommens im Verhältnis zum Anstieg des BIPs an der Basis der VP 2030 berechnet und extrapoliert.

In einem zweiten Schritt werden aus dem historischen Verlauf der Hinterlandverkehre und der Projektion über die VP in 2030 bis 2050 die **Seeverkehre** abgeleitet, basierend auf der Seeverkehrsleistung deutscher Häfen (Empfang und Versand) nach DIW (2015). Hierbei wird zudem ein steigender Anteil deutscher Häfen am deutschlandrelevanten Hinterlandverkehr gemäß der Verkehrsprognose bis 2030 und linearer Extrapolation bis 2050 berücksichtigt. Dies ist notwendig, da die Seeverkehrsleistung nach DIW (2015) nur deutsche Häfen berücksichtigt, bei den Seehafenhinterlandtransporten aber alle deutschlandrelevanten erfasst und projiziert sind. Ein steigender Anteil deutscher Häfen bedeutet demnach einen stärkeren Anstieg der Seeverkehre deutscher Häfen.

## 4.7 MODELLIERUNG ENDENERGIEBEDARF UND TREIBHAUSGASEMISSIONEN

Das am Öko-Institut entwickelte Modell TEMPS (Transport **E**missions and **P**olicy **S**cenarios) ermöglicht es, den Endenergiebedarf und die Treibhausgasemissionen des Verkehrs für unterschiedliche Szenarien zu quantifizieren. Das Modell besteht aus den drei Komponenten Verkehrsnachfrage, Fahrzeugbestand, Energie- und Treibhausgasbilanz.

**Abbildung 4-9: Schematische Darstellung des Modells TEMPS**



Quelle: Renewbility III

### 4.7.1 SCHNITTSTELLE VERKEHRSNACHFRAGE

Im Renewbility-Modellverbund werden die Ergebnisse aus der Modellierung der Verkehrsnachfrage über eine Schnittstelle in das Modell TEMPS eingelesen. Bei der Verkehrsnachfrage der Pkw wird hierbei die je nach Antriebstyp unterschiedliche Jahresfahrleistung der Fahrzeuge, welche sich entsprechend der unterschiedlichen Kilometerkosten aus der Personenverkehrsnachfragemodellierung ergibt, berücksichtigt.

## 4.7.2 FAHRZEUGBESTAND

Für den Straßenverkehr erfolgt die Berechnung im Modell TEMPS detailliert auf Fahrzeugebene. Für die übrigen Verkehrsträger wird die Entwicklung in TEMPS auf einer aggregierten Systemebene modelliert. Die künftige Effizienzentwicklung im Straßenverkehr wird über das Neuzulassungsmodell und Bestandsmodell (siehe Kapitel 4.2) berechnet. Dadurch kann die Wirkung von beispielsweise CO<sub>2</sub>-Emissionsstandards oder von Maßnahmen zur Förderung alternativer Technologien auf die Bestandszusammensetzung im Modell abgebildet werden.

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.

## 4.7.3 ENDEENERGIEBEDARF UND TREIBHAUSGASEMISSIONEN

Die Entwicklung des Endenergiebedarfs des Verkehrs steht in unmittelbarem Zusammenhang mit der Modellierung von Verkehrsnachfrage und Fahrzeugbestand und wird in dem Modul Bottom-up ermittelt.

Dazu werden die Daten zu Verkehrsnachfrage und Fahrzeugbestand mit den Annahmen zum Energiemix (Anteil von Biokraftstoffen, strombasierten Kraftstoffen und fossilen Kraftstoffen) und den spezifischen Emissionsfaktoren der Kraftstoffe verknüpft.

Für die direkten Emissionen der Kraftstoffe wurden folgende Emissionsfaktoren verwendet:

**Tabelle 4-11: Direkte Emissionen fossiler Kraftstoffe**

Benzin	Diesel	LPG	CNG	Kerosin	HFO
72 g/MJ	74 g/MJ	66 g/MJ	56 g/MJ	77,5 g/MJ	74,2 g/MJ

Quelle: TREMOD (Ifeu 2012b)

## 4.8 ÖKONOMISCHE MODELLIERUNG

Für die ökonomische Modellierung wurde ein verkehrsdifferenziertes Input-Output-Modell (VEDIOM) entwickelt und angewendet. Dabei wurde in folgenden Schritten vorgegangen:

- Differenzierung der Verkehrsbranchen in der Input-Output-Tabelle (IOT) 2008

- Hochrechnung der differenzierten IOT 2008 auf die Stichjahre 2030 und 2050
- Erstellung der IO-Modelle VEDIOM mit den IOT 2030 und 2050
- IO-Simulation der Szenarien und Szenaretten und Ermittlung der Wertschöpfungs- und Beschäftigungswirkungen
- Ergänzung der volkswirtschaftlichen Sicht durch die Analyse der Auswirkungen der Szenarien und Szenaretten auf die externen Kosten.

Im Folgenden werden diese Schritte näher erläutert.

## 4.8.1 DIFFERENZIERUNG IOT 2008 FÜR VERKEHRSBRANCHEN

Die ökonomische Modellierung erfolgte mit einem Input-Output-Modell (IOM). Grundlage jedes IOM ist eine Input-Output-Tabelle (IOT).

In der deutschen Input-Output-Tabelle des statistischen Bundesamtes wird der Verkehr in vier Branchen dargestellt (Statistisches Bundesamt, Input-Output-Tabelle für Deutschland). Dabei werden beispielsweise der Schienen- und Straßenverkehr aggregiert dargestellt und die Infrastrukturen fast aller Verkehrsträger gemeinsam<sup>6</sup> ausgewiesen. Des Weiteren wird nicht zwischen Güter- und Personenverkehr unterschieden und der Werkverkehr (von nicht Verkehrsbranchen in Eigenregie durchgeführter Straßengüterverkehr) ist in den Verkehrsbranchen nicht enthalten. Um Szenarien mit Veränderungen in den Verkehrsstrukturen auf ihre wirtschaftlichen Wirkungen untersuchen zu können, wären jedoch genau diese Differenzierungen von zentraler Bedeutung. Daher wurden in einem ersten Schritt die vier bestehenden Verkehrsbranchen in 16 Teilbranchen aufgeteilt.

---

<sup>6</sup> Die Ausnahme ist der Straßenverkehr. Die Straßeninfrastruktur wird innerhalb der Branche «Dienstleistungen der öffentlichen Verwaltung und der Verteidigung» ausgewiesen.

Tabelle 4-12: Differenzierung der Wirtschaftsbereiche in den Verkehrsbranchen

Bisherige Differenzierung		Neue Differenzierung	
Wirtschaftsbereich	WZ08	Wirtschaftsbereich	WZ
<b>Landverkehr u. Transport in Rohrfernleitungen</b>	49	Personenbeförderung im Eisenbahnfernverkehr	49.1
		Güterbeförderung im Eisenbahnverkehr	49.2
		Personenbeförderung im Nahverkehr zu Lande (ohne Taxis)	49.31
		Rest sonstige Personenbeförderung im Landverkehr	Rest 49.3
		Güterbeförderung im Straßenverkehr, Umzugstransporte	49.4
		Transport in Rohrfernleitungen	49.5
<b>Schifffahrt</b>	50	Personenbeförderung in der See- und Küstenschifffahrt	50.1
		Güterbeförderung in der See- und Küstenschifffahrt	50.2
		Personenbeförderung in der Binnenschifffahrt	50.3
		Güterbeförderung in der Binnenschifffahrt	50.4
<b>Lagerei und sonstige Dienstleister für den Verkehr</b>	52	Schieneinfrastruktur	52.21
		Schifffahrtsinfrastruktur	52.22
		Luftfahrtinfrastruktur	52.23
		Rest 52	Rest 52

Quelle: Klassifikation der Wirtschaftszweige, WZ 2008

Basis der Verkehrsdifferenzierung bildete die Input-Output-Tabelle 2008 (Destatis). Die Differenzierung der Verkehrsbranchen basiert insbesondere auf zusätzlichen Informationen zu den Umsätzen, der Bruttowertschöpfungen, den Personalkosten, den Abschreibungen sowie den Importen und Exporten der Verkehrsteilbranchen sowie Informationen zu deren jeweiligen Produktionsstrukturen. Ein wichtiges Augenmerk galt dabei dem korrekten Umgang mit den verschiedenen Subventionen und Leistungsbeauftragungen, also dem Fluss öffentlicher Gelder im Verkehrsbereich und deren korrekter Abbildung (im öffentlichen Verkehr zahlen die Nutzer meist nur einen Teil der Herstellungspreise). Diese Differenzierungsarbeiten sind für künftige Simulationen mit dem IOM speziell in der

anvisierten Themenwelt dieses Vorhabens (E-Mobilität, Substitution anderer Verkehrsarten etc.) zentral.

## 4.8.2 GLEICHGEWICHTSMODELL FARM EU ZUR BEREITSTELLUNG VON ÖKONOMISCHEN RAHMENDATEN

Das FARM-EU Modell ist ein multi-regionales, multi-sektorales, sequenziell-dynamisches berechenbares allgemeines Gleichgewichtsmodell. FARM-EU wurde entwickelt, um Fragestellungen der Energiepolitik und des Klimaschutzes zu behandeln. Diese Fragestellungen werden in Form von Szenarienanalysen untersucht. Dabei werden alternative Politikmaßnahmen abgebildet, die sich über Veränderungen der relativen Preise, Angebots- oder Nachfragebeschränkungen oder -stimulation, Veränderungen in der Produktivität, im technischen Fortschritt oder in den Substitutionsmöglichkeiten ausdrücken lassen, und die gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen und Umwelteffekte in Relation zum Referenzszenario mit Hilfe des Modells über den gewünschten Zeithorizont simuliert. Das Modell bildet Deutschland und weitere EU Mitgliedsstaaten einzeln ab und fasst andere Länder in gewählte Regionen zusammen, so dass globale Marktinteraktionen dargestellt werden können. Somit können sowohl die nationalen wie auch die europäischen und internationalen Wirkungen von in Deutschland oder der EU eingeführten politischen Maßnahmen sowie globaler Maßnahmen analysiert werden.

Im Rahmen des Projektes stellte das Modell Grundlagen für die ökonomische Modellierung mit dem Input Output Modell VEDIOM bereit. Da ein Input Output Modell in der Regel ein statisches Modell ist und sich die Sektorenverflechtung auf ein bestimmtes Jahr bezieht, werden vorausschauende Modellierungen dann möglich, wenn es mit geeigneten Daten für künftige Perioden versorgt wird. Für diesen Zweck wurde das dynamische allgemeine Gleichgewichtsmodell FARM EU eingesetzt. Auf Basis der gegebenen Rahmendaten errechnete FARM EU die Verflechtung der Sektoren miteinander für die Jahre 2030 und 2050 und übergab diese an das Modell VEDIOM.

## 4.8.3 HERLEITUNG DER IOT FÜR 2030 UND 2050 MIT HILFE DES CGE MODELLS FARM EU

Im Rahmen des Vorhabens sollen die wirtschaftlichen Wirkungen von Verkehrsszenarien in den Jahren 2030 und 2050 analysiert werden. Es wird daher ausgehend von der IOT-2008 eine Projektion einer Wirtschaftsstruktur Deutschland der Jahre 2030 und 2050 erstellt.

Für die Erstellung der IOT 2030 wurde die Prognose der Entwicklung der Bruttowertschöpfung pro Branche sowie der bereinigten<sup>7</sup> modalen Verkehrsleistungen aus der Verkehrsverflechtungsprognose 2030 verwendet. Zudem wurde mit dem Allgemeinen Gleichgewichtsmodell FARM-EU eine Input-Output-Tabelle für das Jahr 2030 erstellt, aus welcher Informationen der im Jahr 2030 erwartbaren Verflechtung der Branchen entnommen wurden.

Für das Jahr 2050 existiert keine Verkehrsprognose analog der VP 2030. Die Basisentwicklung der branchenspezifischen Wertschöpfung bis 2050 wurde deshalb mit FARM EU projiziert und die Verkehrsentwicklung mittels Nachfragemodellierung des Personenverkehrs (vgl. Kapitel 4.4) und des Güterverkehrs (vgl. Kapitel 4.4) hergeleitet. FARM-EU lieferte zudem wiederum Ergebnisse zur Verflechtung der Branchen im Jahr 2050. Diese Inputs wurden für die Herleitung einer IOT 2050 verwendet.<sup>8</sup>

Die Hochrechnungen auf die Modellzeitpunkte starteten auf der Produktionsseite der Volkswirtschaft und hatten zum Ziel, möglichst sektorgenau vorzugehen. Danach erfolgte die Hochrechnung der Verwendungsseite der IOT, bevor dann der Ausgleich der beiden ineinandergreifenden Modellebenen Produktion und Verwendung erarbeitet wurde. In einem weiteren Schritt galt es dann, den Staatshaushalt (Einnahmen und Ausgaben) in Balance zu bringen. Die so erarbeiteten IOT für 2030 und 2050 stellen die Basisstruktur für den Aufbau von VEDIOM 2030/2050 und die anschließenden Wirkungsanalysen für die beiden Zeitpunkte dar.

#### 4.8.4 AUFBAU IO-SIMULATIONSMODELL VEDIOM 2030 UND 2050

Die IOT 2030 und 2050 wurden ins Input-Output-Modell eingefügt. Das Modell VEDIOM bildet dadurch die deutsche Wirtschaft in 16 Verkehrsbranchen und 30 weiteren Branchen ab. Mit dem Modell können die Auswirkungen von Maßnahmen und Instrumenten in den Jahren 2030 und 2050 auf Beschäftigung, BIP, sektorale Wertschöpfung, Importe und Exporte, den Konsum und den Staatshaushalt berechnet werden.

Mittels dieses IO-Simulationsmodells werden die ökonomischen Impulse der Szenarien analysiert und es lassen sich danach Aussagen machen, welche ökonomischen Auswirkungen

---

<sup>7</sup> Die Verkehrsleistung wurde vom DLR um die in der Basisentwicklung von Renewbility III leicht anders unterstellten Instrumente (insb. Energiebesteuerung) als in der VP 2030 bereinigt (vgl. Kapitel 2.2).

<sup>8</sup> Im Rahmen von Renewbility III konnte keine vollständige Verflechtungsprojizierung einer dekarbonisierten Gesamtwirtschaft (ohne Verkehrsbranchen) erstellt werden. Für die Hochrechnungen bis 2050 wurden mögliche Entwicklungen hin zu einer dekarbonisierten Wirtschaft über entsprechende Änderungen der Arbeits- und Energieproduktivitäten einzelner Branchen berücksichtigt, beispielsweise bei der Mineralölverarbeitung oder der Strombereitstellung.

unter den definierten Szenarien zu erwarten sind – bei der gegebenen Wirtschaftsstruktur gemäß Basisszenario.

Zu berücksichtigen ist, dass die Modelle auf Projektionen über 20 resp. 40 Jahre basieren. Projektionen unterliegen immer Unsicherheiten. Die Ergebnisse von Modellierungen dürfen daher nie als genaue Prognosen verstanden werden. Die Analysen erlauben es, die Wirkungsweisen von Maßnahmen erkenn- und diskutierbar zu machen, erwartete Größenordnung der Wirkungen abzuleiten und für (politische) Entscheidungen transparente Informationsgrundlagen zu erarbeiten. Zentral sind dabei auch eine konsistente Herleitung und Einbettung der Ergebnisse, sowie eine transparente Darstellung der Unsicherheiten.

#### 4.8.5 SIMULATION DER SZENARIEN MIT VEDIOM 2030 UND 2050

Mit VEDIOM 2030 und 2050 werden die volkswirtschaftlichen Auswirkungen der definierten Szenarien und Szenaretten berechnet. Hauptziel der Simulationen ist es, Aussagen zur Wirkung der Szenarien und Szenaretten auf die Bruttowertschöpfung und Beschäftigung in Deutschland insgesamt und unterteilt nach Branchen zu machen, besonders stark betroffene Branchen zu identifizieren sowie die Folgen für die Einnahmen und Ausgaben der öffentlichen Hand darzustellen. Zudem können aus den Simulationen Erkenntnisse zur Wirkung der Szenarien und Szenaretten auf den Außenhandel, den privaten Konsum sowie die Investitionen gewonnen werden.

##### **Funktionsweise von Input-Output-Modellen**

Input-Output-Modelle machen sich zu Nutze, dass die Volkswirtschaftliche Gesamtrechnung (VGR) mehrere Wege kennt, die Wirtschaft zu betrachten und das BIP (Bruttoinlandsprodukt) zu berechnen. Zwei davon sind die Betrachtung der Entstehungsseite und die Betrachtung der Verwendungsseite:

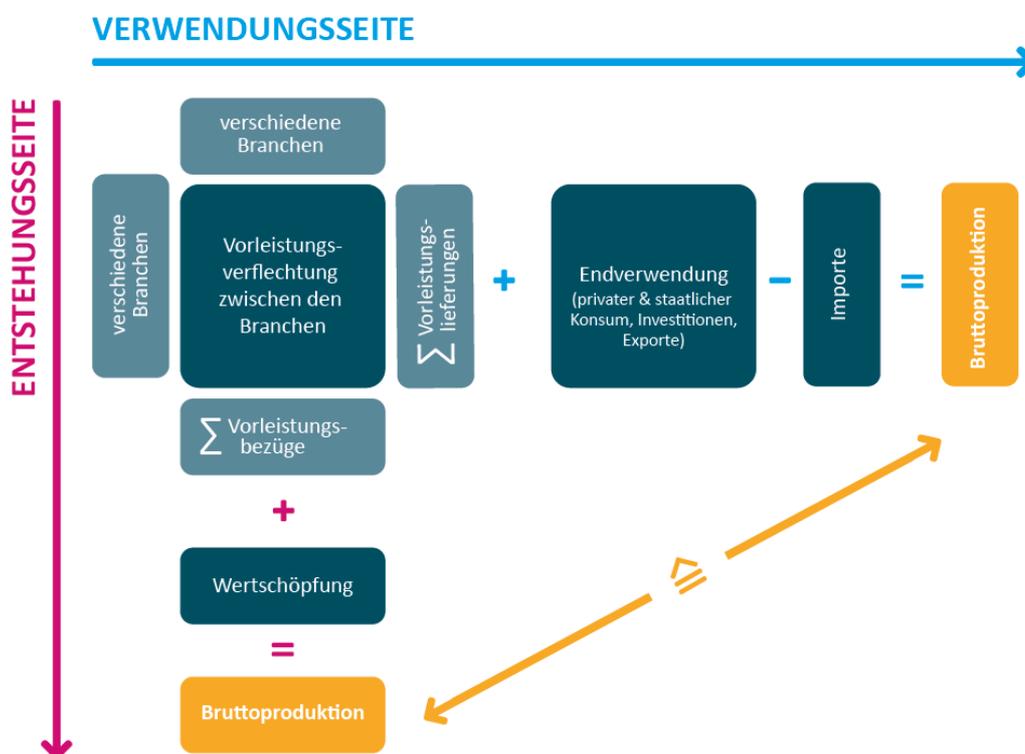
Auf der Entstehungsseite (Produktionsseite) wird der Produktionsprozess jeder Branche abgebildet. Im Produktionsprozess werden durch den Einsatz von Vorleistungen (Zukäufe von Dritten) sowie von primären Inputs (Arbeit und Kapital) Güter hergestellt. Die Entstehungsseite zeigt somit, mit welchen Vorleistungen aus welchen anderen Branchen eine einzelne Branche unter Bezug von Arbeits- und Kapitaleinsatz ihre Produkte erstellt. Die Entstehungsseite gibt Aufschluss über die Kostenstruktur der einzelnen Branchen sowie die gegenseitige Wirtschaftsverflechtung der Branchen.

Die Verwendungsseite zeigt, in welchen Bereichen die produzierten Güter verkauft werden, sei es als Vorleistungen für andere Branchen oder als Lieferungen an den privaten Konsum,

den Staatskonsum, die Investitionen oder die Exporte. Die Verwendungsseite gibt somit Aufschluss über die Absatzstruktur der Branchen.

Unabhängig von der Betrachtungsweise sind die resultierende Wertschöpfung und das Güteraufkommen der Gesamtwirtschaft der Betrachtungsweisen theoretisch identisch. Durch die Gegenüberstellung der Entstehungs- und Verwendungsseite kann daher ein Gleichungssystem aufgebaut werden, das die beiden Seiten in Beziehung setzt. Das Input-Output-Modell macht sich diese Eigenschaft zunutze. Es funktioniert nach der Logik einer doppelten Buchhaltung: Alles was konsumiert bzw. verwendet wird, muss im Prinzip in einem Stichtjahr auch produziert werden und umgekehrt.

**Abbildung 4-10: Input-Output-Tabelle in vereinfachtem Schema**



Quelle: Renewbility III

## Wirkungskanäle und Impulse

Die ökonomische Modellierung startet mit Nachfrageimpulsen, deren Wirkung mit VEDIOM ermittelt wird. Die benötigten Nachfrageimpulse leiten sich aus Ergebnissen der Verkehrs- und Emissionsmodellierungen ab, insbesondere aus den Veränderungen der Verkehrsleistungen, der Verkehrskosten, der Energiekosten, der Fahrzeugbestände sowie der Investitionen.

Für den öffentlichen Haushalt und die Einkommen der privaten Haushalte wird separat Rechnung geführt, wobei die beiden Konten über zwei Annahmen zusammenhängen:

- Ausgaben und Einnahmen des Staates müssen ausgeglichen sein: Ausgabenüberschüsse des Staates werden durch höhere Steuereinnahmen im gleichen Jahr ausgeglichen, wobei diese zusätzlichen Steuererträge bei den privaten Haushalten anfallen.
- Das verfügbare Einkommen der privaten Haushalte wird über zwei Kanäle beeinflusst: Erstens durch höhere oder niedrigere Verkehrsausgaben (Brutto-Einkommenseffekt), zweitens durch zusätzliche Steuerausgaben in der Höhe des Ausgabenüberschusses des Staates (resp. reduzierten Steuerausgaben im Falle von Ertragsüberschüssen des Staates). Der Brutto-Einkommenseffekt abzüglich der zusätzlichen Steuern (resp. zuzüglich reduzierte Steuerausgaben) ergibt das verfügbare Einkommen der privaten Haushalte nach Steuern (Netto-Einkommenseffekt).

Der Netto-Einkommenseffekt zeigt, wie sich die Ausgabenstruktur der Haushalte in den verschiedenen Szenarien verändert. Ein positiver Netto-Einkommenseffekt wirkt als zusätzlicher Nachfrageimpuls der Haushalte auf die Wirtschaft, ein negativer als zurückgehender Nachfrageimpuls. Per Annahme entspricht diese Nachfrageveränderung des privaten Konsums dem durchschnittlichen Konsumvektor der Haushalte im jeweiligen Jahr.

### **Modellierung in Renewbility III**

Die folgende Tabelle stellt die ökonomische Modellierung mit VEDIOM 2030 und 2050 in Renewbility III zusammenfassend dar. Alle ökonomischen Outputs werden in Euro zu Preisen im Jahr 2010 angegeben (Euro<sub>2010</sub>).

Tabelle 4-13: Modellierung der ökonomischen Auswirkungen

Modellierung der ökonomischen Auswirkungen	
<b>Das Ziel</b>	Eine mittel- und langfristige Bewertung der komplexen Folgen einzelner Szenarien für eine gesamte Ökonomie
<b>Die wichtigsten Inputs</b>	In die Modellierung fließen folgende Ergebnisse/Veränderungsimpulse aus den verschiedenen Modellbestandteilen des gesamten Renewbility-Modellverbundes (vgl. Übersicht in Kapitel 4.1) ein: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Energieverbrauch und Energiekosten</li> <li>• Verkehrsleistungen und Verkehrskosten</li> <li>• Zusammensetzung des Fahrzeugparks</li> <li>• Investitionen in Infrastrukturen</li> <li>• Steuerbelastungen Energie und Verkehr</li> </ul>
<b>Die wichtigsten Outputs</b>	Als wesentliche Parameter für eine ökonomische Bewertung werden folgende Aspekte modelliert: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Veränderungen in Konsum und Produktion</li> <li>• Veränderungen im Staatsbudget</li> <li>• Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte</li> <li>• Struktureffekte (Veränderung Produktionsstrukturen), sektorale Wirkung der Effekte)</li> </ul>
<b>Modell</b>	Das Input Output Modell VEDIOM für die Jahre 2030 und 2050 basiert auf einer verkehrsdifferenzierten Input-Output-Tabelle (16 Verkehrsbranchen und 30 weitere Branchen), die mithilfe des dynamischen allgemeinen Gleichgewichtsmodells FARM in die Jahre 2030 und 2050 projiziert wurde.

## 4.8.6 BERECHNUNG EXTERNE KOSTEN

Der Verkehr verursacht neben den direkt spürbaren Kosten, etwa für Kraftstoffe oder Fahrscheine, auch externe Kosten. Dazu gehören beispielsweise Klimakosten von CO<sub>2</sub>-Emissionen oder die Gesundheitskosten verursacht durch Luftschadstoffe oder Verkehrslärm. Externe Kosten finden sich nicht in den Marktpreisen für Mobilität, die jeder Benutzer bezahlt, weshalb sie bei der Berechnung des Bruttoinlandsproduktes (BIP) nicht berücksichtigt werden. Daher sind sie auch nicht Bestandteil der Simulation mit VEDIOM. Externe Kosten sind jedoch relevante Kosten von wirtschaftlichem Handeln. Beim Vergleich der volkswirtschaftlichen Auswirkungen der verschiedenen Szenarien ist es deshalb wichtig, neben der Wertschöpfung auch die Folgen für die externen Kosten zu berücksichtigen.

Um Umweltschäden sichtbar zu machen, kann man ihnen einen Wert zuordnen, etwa über Vermeidungs- oder Reparaturkosten. Bezüglich der exakten Höhe der externen Kosten bestehen je nach Kategorie unterschiedlich gelagerte Unsicherheiten. Trotz dieser Unsicherheiten lassen sich die externen Kosten berechnen. Würde man die externen Kosten gar nicht berücksichtigen, entstünden noch größere Ungenauigkeiten bei den Ergebnissen. Berücksichtigt man die externen Kosten eines Maßnahmenpakets oder eines Szenarios ergänzend zum BIP, ergibt sich eine volkswirtschaftlich breitere Sicht der Auswirkungen und die ökonomischen Ergebnisse bekommen eine höhere Aussagekraft.

Im Rahmen von Renewbility kam dabei ein vereinfachter Berechnungsansatz für die externen Kosten zum Einsatz. Er baut auf den unterschiedlichen Verkehrsleistungen verschiedener Antriebstypen und entsprechender Kostensätze zu den externen Kosten je Fahrleistungseinheit auf. Die verwendeten Kostensätze stützen sich auf die Methodenkonvention des Umweltbundesamts (Schwermer, Preiss, Müller 2014) und das „Handbook on External Costs of Transport“ (Gibson et al. 2014 und Maibach et al. 2008). Dabei wurden folgende Arten von externen Kosten berücksichtigt:

- Kosten für die direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen
- Luftschadstoffe aus Emissionen und Abrieb
- CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Up- und Downstream-Prozessen (jeweils Bau, Wartung und Entsorgung)
- Lärm und Unfallkosten.

## 5 FAHRZEUGBESTAND PKW

### 5.1 HINTERGRUND UND AUSGANGSLAGE

Der Pkw-Bestand stellt eine zentrale Einflussgröße auf den gesamten Personenverkehrs dar, zum einen aufgrund der Anzahl der verfügbaren Pkw, zum anderen beeinflusst die Zusammensetzung des Bestandes hinsichtlich Antriebstypen und Energieverbräuchen aber auch wesentlich die Kilometerkosten. Damit hat er wesentlichen Einfluss auf die schlussendlich resultierenden Energieverbräuche und Emissionen des Verkehrssektors.

### 5.2 ANNAHMEN UND PARAMETER

Wesentliche Parameter, die den Pkw-Bestand hinsichtlich Antriebstyp, Effizienz und Anzahl beeinflussen, sind die Fahrzeug- und Kraftstoffpreise. Letztere sind in Kapitel 3.3.2 beschrieben. Wesentlich ist, dass die Kraftstoffpreise in den Szenarien Effizienz und Effizienz plus für Flüssigkraftstoffe aufgrund des steigenden Anteils an strombasierten Kraftstoffen deutlich ansteigen. In 2050 liegen sie rund doppelt so hoch wie in der Basisentwicklung. In der Szenarette Fokus Kraftstoffe ist auch ein deutlicher Anstieg zu verzeichnen, jedoch fällt dieser gemäßigter aus.

Im Folgenden sind die wesentlichen Annahmen der Szenarien dargestellt. Die Herstellungskosten von Pkw sind in der Technologiedatenbank hinterlegt (siehe Kapitel 4.2.1.2).

#### Motorisierungsrate

Grundlage für die Ableitung der Motorisierungsrate in den Szenarien ist die Verkehrsprognose. Gemäß der Verkehrsprognose steigt die Anzahl der Pkw auf 45,9 Mio. Stück, was einem Anstieg der Motorisierungsrate zwischen 2010 und 2030 um rund 11 % entspricht. Für die Entwicklung bis 2050, welche sich unter den Rahmenbedingungen der VP ergeben würde, wird angenommen, dass die Motorisierungsrate nach 2030 konstant bleibt. Dies scheint plausibel vor dem Hintergrund, dass es bis dahin eine Sättigung beim Trend der nachholenden Motorisierung von Frauen geben dürfte, sowie unter der Annahme eines weiteren Anstiegs der Kraftstoffpreise um 2 % p.a.

In einem zweiten Schritt wird basierend auf diesem Ausgangswert die Motorisierungsrate in den Renewbility-Szenarien auf Basis der Entwicklung der Kosten der Fahrzeugnutzung sowie des Einflusses von Carsharing-Angeboten abgeleitet – d. h. je nach Szenario differiert die Größe des Pkw-Bestandes. Dabei wurde folgendermaßen vorgegangen:

Die Kosten für die Pkw-Anschaffung und für die Kraftstoffe beeinflussen auch die Anzahl der Pkw. Hierbei wird nach Regionstyp unterschieden. Die Elastizitäten des Pkw-Besitzes auf die Kosten wurden auf Basis von Dargay (2002) wie folgt abgeleitet:

- Ländlich (<20.000 EW): -0.47
- Städtisch (>100.000 EW): -0.69
- Andere -0.64.

Hinzu kommt im Szenario Effizienz plus die breite Verfügbarkeit von Carsharing, die ebenfalls einen deutlichen Einfluss auf die Pkw-Besitzquote hat. Carsharing wird flächendeckend in allen Städten ab 100.000 Einwohnern ab 2030 und in allen Städten ab 50.000 Einwohnern in 2050 eingeführt. Zur Ableitung des Pkw-Bestandes im Szenario Effizienz plus wurde folgendermaßen vorgegangen:

Die Ableitung des Carsharing-Nutzerpotenzials erfolgt auf der Basis von MiD-Daten für verschiedene Ortsgrößenklassen. Die Grundbedingung ist, dass die Jahresfahrleistung einer Person mit Führerschein unter 10.000 km liegt. Des Weiteren wird die Verfügbarkeit von Carsharing je nach Ortsgrößenklasse berücksichtigt. Es wird angenommen, dass Carsharing zu 100 % in Städten größer 100.000 Einwohner bereits 2010 verfügbar ist, in Städten mit 50.000 bis 100.000 Einwohnern in 2030 zu 80 % und in 2050 zu 100 %.

Das so ermittelte theoretische Potenzial wird mit einer generellen Nutzungsbereitschaft auf Basis aktueller Umfragen hinterlegt und mit einer Fortschreibung der Alterskohorten kombiniert (u. a. Landeshauptstadt Stuttgart 2013; Zimmer 2012; Schönduwe, Bock, Deibel 2012). Das bedeutet, dass die heute 20-Jährigen auch in 20 Jahren noch eine höhere Nutzungsbereitschaft aufweisen, als die heute 40-Jährigen. Zusätzlich werden die so ermittelten Carsharing-Nutzer mit Pkw-Abschaffquoten kombiniert. Diese werden auf Basis der Ergebnisse des Projektes WiMobil (2016) für 2010 (rund 10 %) im Szenario Effizienz plus, bei dem vielfältige Maßnahmen zur Steigerung der Attraktivität von Alternativen zum eigenen Pkw hinterlegt sind, auf 26 % für Städte kleiner 100.000 Einwohner, auf 40 % in Städten mit 100.000 bis 500.000 Einwohner und in Städten mit mehr als 500.000 Einwohner auf 60 % in 2050 fortgeschrieben. Im Ergebnis ergibt sich folgende Pkw-Abschaffquote bei der Gesamtbevölkerung gegenüber der Basisentwicklung differenziert nach der Größe der Städte.

**Tabelle 5-1: Reduktion der Pkw-Besitzquote durch Carsharing**

	50.000-100.000 EW	>100.000 EW	>500.000 EW
<b>2030</b>	0 %	8 %	12 %
<b>2050</b>	9 %	29 %	43 %

Quelle: Renewbility III

## Pkw-Grenzwerte

Wesentliche Treiber für die Zusammensetzung des Pkw-Bestandes nach Antriebstypen sind in den Szenarien die Kraftstoffkosten und die Fortschreibung der Pkw-Grenzwerte.

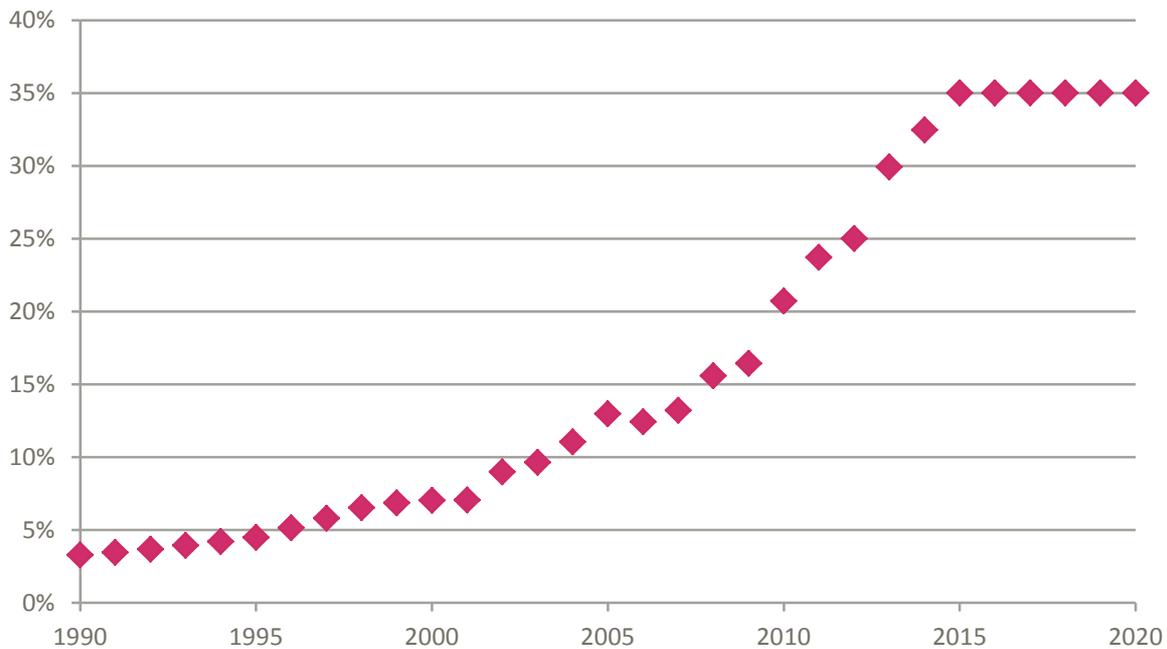
In allen Szenarien mit Ausnahme der Szenarettete Fokus Kraftstoffe werden die Grenzwerte auf 60 g/km in 2030 und 10 g/km in 2050 fortgeschrieben. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen deutscher Neuzulassungen lagen in der Vergangenheit durchschnittlich rund 7 % über den europäischen Neuzulassungen. Es wird davon ausgegangen, dass diese Diskrepanz erhalten bleibt.

Auch in der VP 2030 ist (implizit) ein Grenzwert von 60 g in 2030 hinterlegt. Das wird zwar im Bericht nicht erwähnt, aber um die in der VP 2030 angenommene Effizienzsteigerung von 1,5% p.a. bei konventionellen Fahrzeugen sowie 6 Mio. E-Pkw im Jahr 2030 zu erreichen, ist dieser Grenzwert notwendig – vorausgesetzt, die Diskrepanz zwischen NEFZ und realem Verbrauch steigt nicht weiter an.

## Diskrepanz zwischen Testzyklus- und Realverbrauch

Die Abweichung zwischen Testzyklus- und Realverbrauch bei Pkw hat in den letzten Jahren deutlich zugenommen. Auf Basis von (Mock et al. 2014) werden dabei die in Abbildung 5-1 dargestellten Abweichungen zwischen NEFZ und Realverbrauch zu Grunde gelegt.

Abbildung 5-1: Abweichung zwischen Testzyklus- und Realverbrauch



Quelle: (Mock et al. 2014), eigene Berechnungen und Annahmen

Es wird davon ausgegangen, dass die Abweichung bis 2015 auf 35 % ansteigt und danach konstant bleibt, d. h. nicht weiter ansteigt.

### Zugangsbeschränkungen für emittierende Fahrzeuge in Innenstädten

Ab dem Jahr 2030 werden im Szenario Effizienz Plus Zufahrtsbeschränkungen für emittierende Fahrzeuge in Innenstädten von Städten mit mehr als 500.000 Einwohnern und ab dem Jahr 2050 in Städten mit mehr als 200.000 Einwohnern eingeführt. Zufahrt in diese Zonen ist nur für BEV und Plug-In-Pkw erlaubt.

Diese Zufahrtsbeschränkungen haben auch eine Rückwirkung auf die Kaufentscheidung. Es wird angenommen, dass die Zufahrtsbeschränkungen 6 Jahre vor der Einführung angekündigt werden und sich dann ein steigender Anteil der Einwohner nur noch für lokal emissionsfreie Fahrzeuge (BEV, PHEV, Brennstoffzellenfahrzeug) entscheidet, bis dies ab der Gültigkeit der Zufahrtsbeschränkung alle Einwohner tun.

Die Anzahl der Neuwagenkäufer, für welche die Zufahrtsbeschränkungen einen Einfluss auf die Kaufentscheidung haben, wird also (vereinfachend) über den Wohnort und die Zufahrtsbeschränkung am Wohnort bestimmt. Weitere Faktoren könnten zu einem höheren, aber auch zu einem geringeren Einfluss der Zufahrtsbeschränkungen auf die Kaufentscheidungen führen. Einerseits könnte es für Haushalte mit mehreren Pkw (Zweitwagen) immer noch interessant sein, einen verbrennungsmotorischen Pkw für lange

Strecken zu kaufen. Andererseits sinkt aber für alle Haushalte unabhängig von ihrem Wohnort die Attraktivität verbrennungsmotorischer Pkw, da ja die Anzahl der Städte, in welche sie mit diesem Fahrzeug fahren dürfen, zurückgeht.

### Carsharing-Fahrzeuge

Vor dem Hintergrund der Zufahrtsbeschränkungen für emittierende Fahrzeuge wird angenommen, dass es sich bei den Carsharing-Flotten im Szenario Effizienz plus ab dem Jahr 2030 nur um elektrische Fahrzeuge handelt.

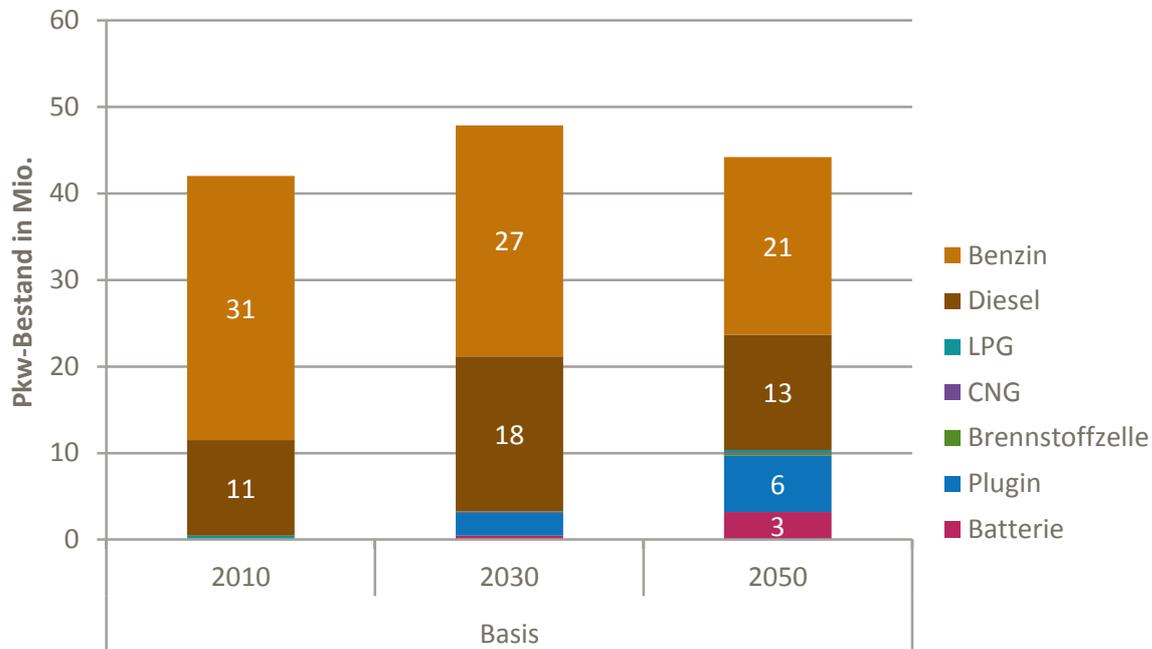
## 5.3 ERGEBNISSE BASISZENARIO

Die Entwicklung des Pkw-Bestands zeigt für Deutschland einen Bestand, der von rund 42 Mio. (2010) auf rund 48 Mio. Fahrzeuge im Jahr 2030 steigen wird. Dies bedeutet einen Zuwachs um 8,5 % gegenüber 2010. 2,7 % wurden in den beiden ersten Jahren bereits realisiert. Die Dichte wird wegen der leicht sinkenden Zahl der Erwachsenen etwas stärker zunehmen (rund 10 %). Bis 2050 nimmt der Pkw-Bestand dann auf rund 44 Mio. Pkw wieder leicht ab, liegt aber weiterhin um rund 5 % über 2010.

Die Bestandsausweitung bis 2030 ist zum einen auf die Personengruppen zurückzuführen, deren Motorisierungsgrad derzeit noch unterdurchschnittlich ausgeprägt ist. Dazu zählen nach wie vor ältere Personen. Bei ihnen fand in der jüngeren Vergangenheit der höchste Anstieg statt. Dies wird laut VP 2030 auch künftig der Fall sein, weil diese Altersgruppe immer mehr Personen enthält, die sich an den Umgang mit dem Pkw stark genug gewöhnt haben, um ihn auch im fortgeschrittenen Alter zu benutzen. Bei den Frauen liegt die Fahrzeugbesitzquote vor allem in den älteren Altersgruppen noch weit unter derjenigen der männlichen Bevölkerung. Sie wird sich letzterer weiter annähern. Bei den älteren Frauen ist der Abstand noch überdurchschnittlich hoch, so dass der Altersstruktureffekt hier stärker ausfällt als bei Männern. Hinzu kommen Einkommenseffekte, die einen Anstieg im Pkw-Bestand unterstützen. Nach 2030 kommt dann die Abnahme der Bevölkerung zum Tragen und der Pkw-Bestand reduziert sich wieder leicht.

Dadurch, dass nach 2021 der Grenzwert konstant gehalten wird, steigt in der Basisentwicklung die Effizienz der konventionell betriebenen Pkw bis 2030 um nur 26 % und bis 2050 um 31 %. Auch beeinflusst die Nichtfortschreibung der Grenzwerte den Antriebsmix. Ganz deutlich ist, dass bis 2050 weiterhin konventionell betriebene Fahrzeuge dominieren. In der Basisentwicklung nimmt der Anteil der elektrischen Pkw nur mäßig zu und liegt im Jahr 2030 mit rund 3 Mio. Fahrzeugen deutlich unter dem Ziel der Bunderegierung. Im Jahr 2050 sind ohne weitere Maßnahmen nur knapp 10 Mio. E-Pkw im Bestand.

Abbildung 5-2: Entwicklung des Pkw-Bestands in der Basis, 2010-2050



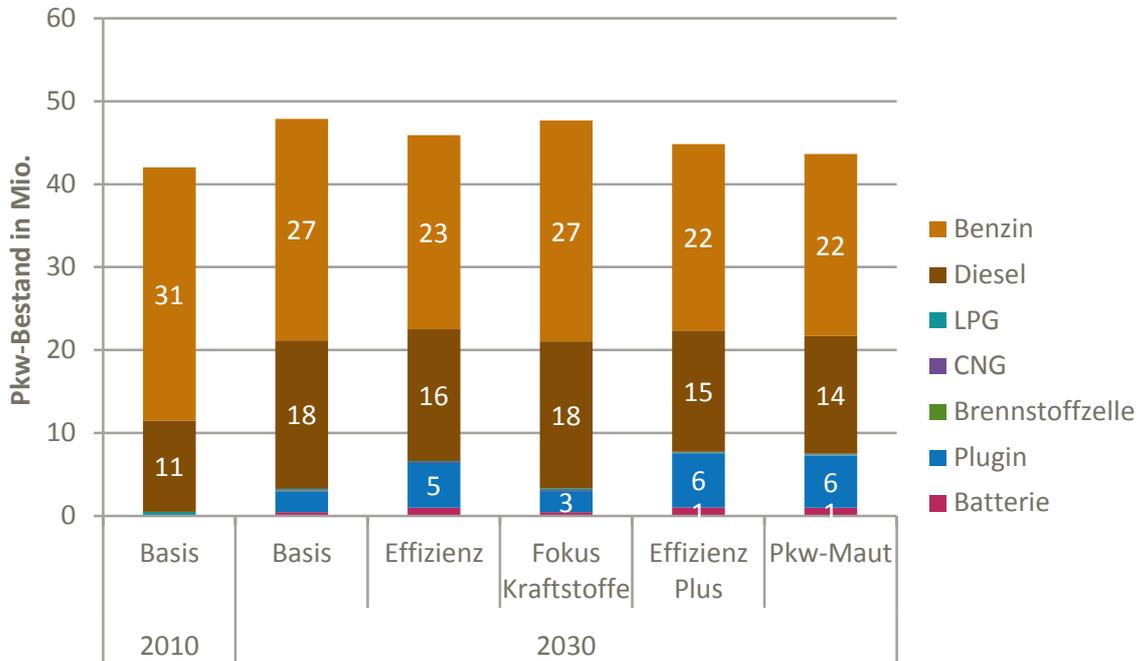
Quelle: Renewbility III

## 5.4 ERGEBNISSE 2030

### Pkw-Bestand

Die Pkw-Grenzwerte, welche im Szenario Effizienz und den Szenarien Effizienz plus hinterlegt sind, haben einen deutlich sichtbaren Effekt auf den Fahrzeugbestand. Durch den Grenzwert von 60 g/km sind im Jahr 2030 bereits 6 Millionen Elektro-Pkw im Bestand. Die Effizienzsteigerung konventioneller Fahrzeuge liegt bei rund 1,4 % pro Jahr statt bei 1,1 % im Basisszenario. Die Kosten für Kraftstoffe und die Anschaffung von Pkw liegen höher, so dass der Pkw-Bestand im Jahr 2030 nicht – wie im Basisszenario – auf 47,9 Millionen ansteigt, sondern nur auf 45,9 Millionen Fahrzeuge.

Abbildung 5-3: Pkw-Bestand im Jahr 2030

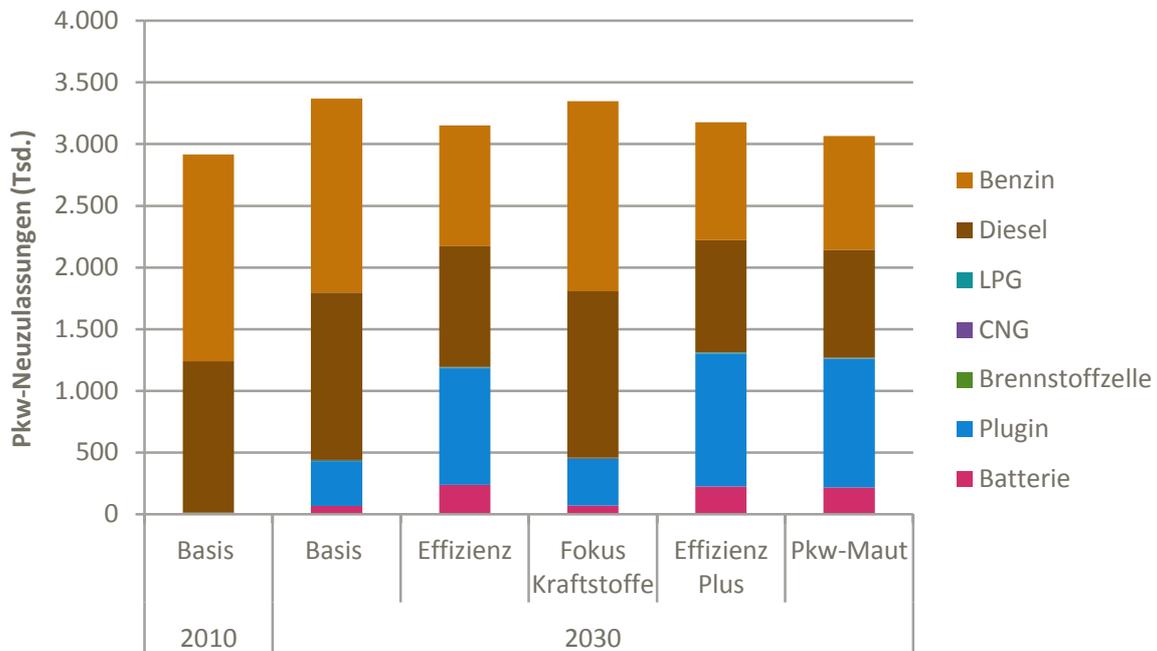


Quelle: Renewbility III

## Pkw-Neuzulassungen

Bei den Pkw-Neuzulassungen sind die Unterschiede zwischen den Szenarien im Jahr 2030 deutlicher sichtbar als beim Pkw-Bestand. Im Szenario Effizienz liegt der Anteil elektrischer Pkw an den Neuzulassungen bei 38 %, im Szenario Effizienz plus noch etwas höher bei 41 %. Dagegen sind im Basisszenario sowie in der Szenarettete Fokus Kraftstoffe nur 13 % der Neuzulassungen elektrisch. Insgesamt nimmt die Anzahl der Neuzulassungen bis 2030 in allen Szenarien noch etwas zu.

Abbildung 5-4: Pkw-Neuzulassungen im Jahr 2030

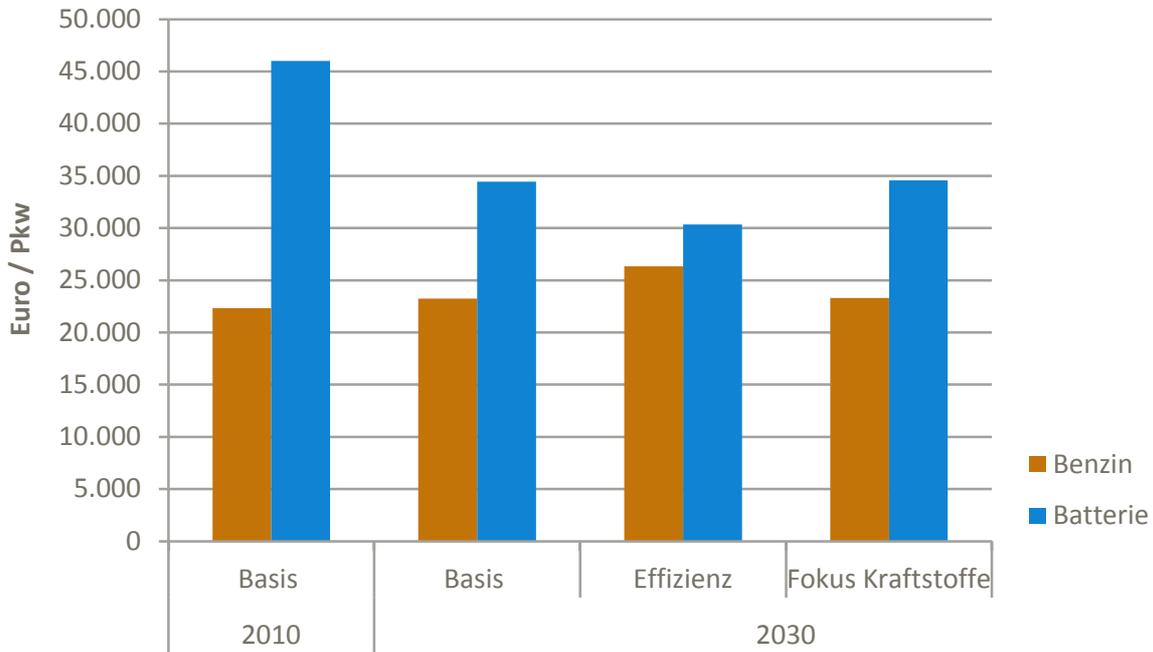


Quelle: Renewbility III

## Anschaffungspreise und Herstellungskosten von Pkw

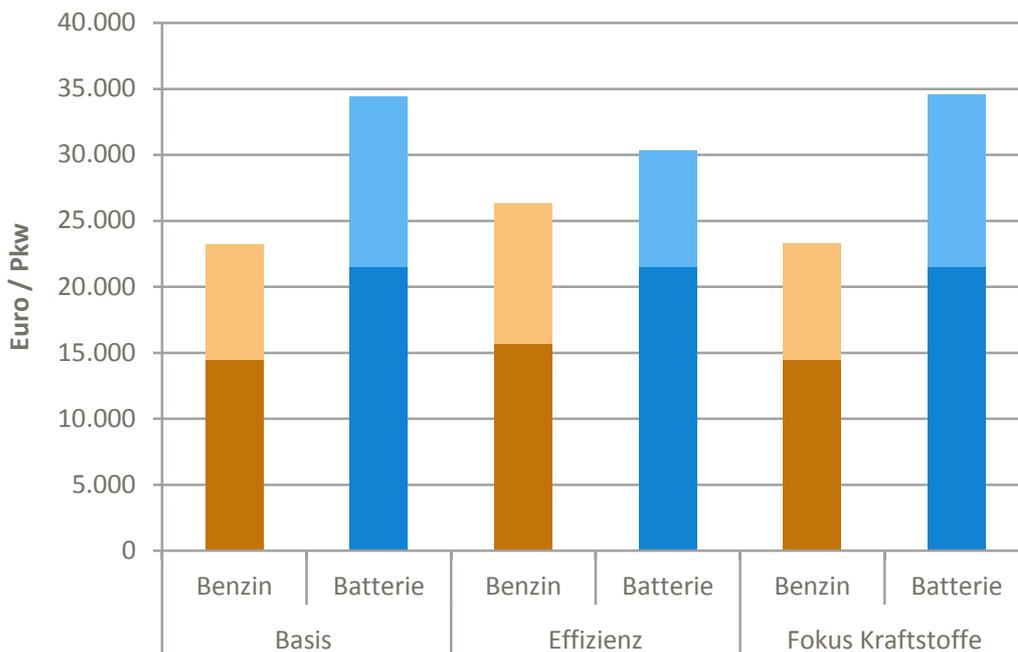
In der Abbildung 5-5 ist die Entwicklung der Anschaffungspreise am Beispiel eines Benzin- und eines Elektro-Pkw für die Szenarien Effizienz und Fokus Kraftstoffe dargestellt. Deutlich erkennen kann man die Kostendegression der batterieelektrischen Pkw zwischen 2010 und 2030. Der Kostenanstieg bei den Benzin-Pkw zwischen Basisentwicklung, Fokus Kraftstoffe und dem Szenario Effizienz liegt an der Preispolitik der Fahrzeughersteller zur Erreichung der Grenzwerte. Der Pkw-Grenzwert wird durch eine CO<sub>2</sub>-basierte Preispolitik der Hersteller erreicht, d. h. hoch emittierende Fahrzeuge werden teurer und niedrig emittierende Fahrzeuge günstiger (bei insgesamt über alle Fahrzeuge gleichbleibender Gewinnmarge). Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 5-6 dargestellt. Die dunkleren Bereiche geben dabei den Anteil der Herstellungskosten an den Anschaffungspreisen an. Die Herstellungskosten des Benziners liegen im Szenario Effizienz höher als in der Basis, da zusätzliche Minderungstechnologien verwendet werden. Der größere Anteil des Anstiegs ist jedoch auf die Preispolitik zurückzuführen.

Abbildung 5-5: Anschaffungspreise im Jahr 2030 am Beispiel eines Elektro- und Benzin-Pkw (Größenklasse mittel)



Quelle: Renewbility III

Abbildung 5-6: Herstellungskosten und Anschaffungspreise im Jahr 2030 am Beispiel eines Elektro- und Benzin-Pkw (Größenklasse mittel)



Quelle: Renewbility III

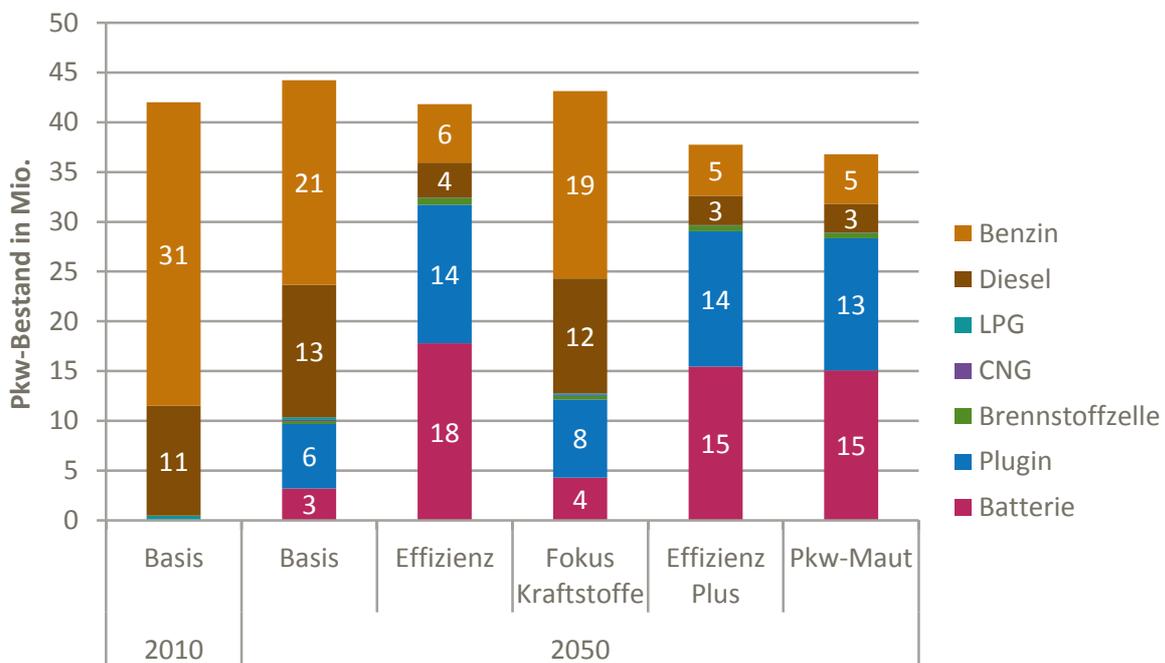
## 5.5 ERGEBNISSE 2050

### Pkw-Bestand

Abbildung 5-7 zeigt den Pkw-Bestand im Jahr 2050 nach Antriebstypen in den verschiedenen Szenarien. Durch den Grenzwert von 10 g/km im Jahr 2050 werden langfristig praktisch keine konventionellen Fahrzeuge mehr zugelassen und der elektrische Fahranteil steigt bis zum Jahr 2050 auf 76%. In der Basisentwicklung ergeben sich nur 2%. Brennstoffzellenfahrzeuge setzen sich aufgrund hoher Kosten nicht durch. Auch Gasfahrzeuge spielen keine bedeutende Rolle.

Ausnahme bildet die Szenarettete Fokus Kraftstoffe, in der die Grenzwerte nicht fortgeschrieben werden, sondern nach 2021 bei 95 g CO<sub>2</sub>/km bleiben. Die Anzahl elektrischer Pkw liegt dann im Jahr 2050 bei rund 12 Millionen. Aufgrund der höheren Kraftstoffpreise ist diese also höher als im Basisszenario (9 Millionen), auch die Effizienzentwicklung konventioneller Fahrzeuge fällt durch die höheren Kraftstoffpreise leicht höher aus.

**Abbildung 5-7: Pkw-Bestand im Jahr 2050**



Quelle: Renewbility III

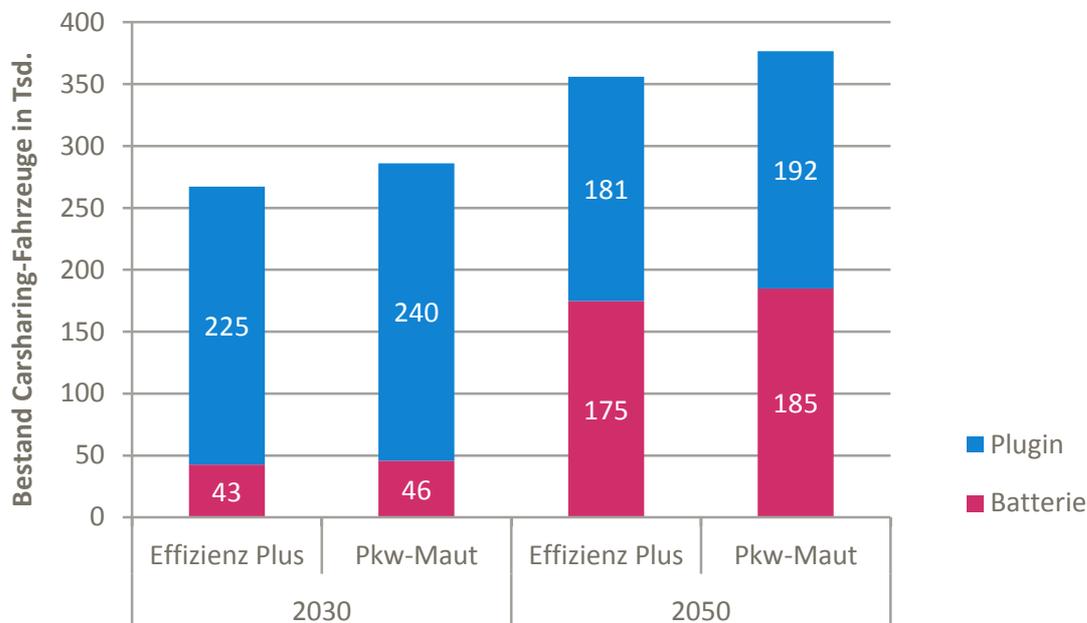
Die Motorisierungsrate geht im Szenario Effizienz plus durch die diversen Maßnahmen für lebenswertere Innenstädte in Deutschland um 10 % zurück, unter anderem deshalb, weil der Pkw-Besitz weniger attraktiv und mehr Carsharing genutzt wird. Durch die Einführung einer Pkw-Maut erhöhen sich die Gesamtkosten des Pkw-Besitzes. Das hat einen zusätzlichen

Effekt auf die Anzahl der Fahrzeuge. Die Motorisierungsrate geht in der Szenarettete um weitere 3 % zurück. Insgesamt liegt der Pkw-Bestand in der Szenarettete bei 36,8 Millionen Pkw. Das sind 18 % weniger als zu Beginn des Jahres 2016.

## Carsharing

Abbildung 5-7 zeigt den Bestand an Carsharing-Fahrzeugen. Bei den Carsharing-Fahrzeugen handelt es sich annahmegemäß nur um batterieelektrische und Plug-In-Hybridfahrzeuge, da die Zufahrtsbeschränkungen für emittierende Fahrzeuge insbesondere auch die Zonen mit Carsharing betreffen.

**Abbildung 5-8: Bestand Carsharing-Fahrzeuge**

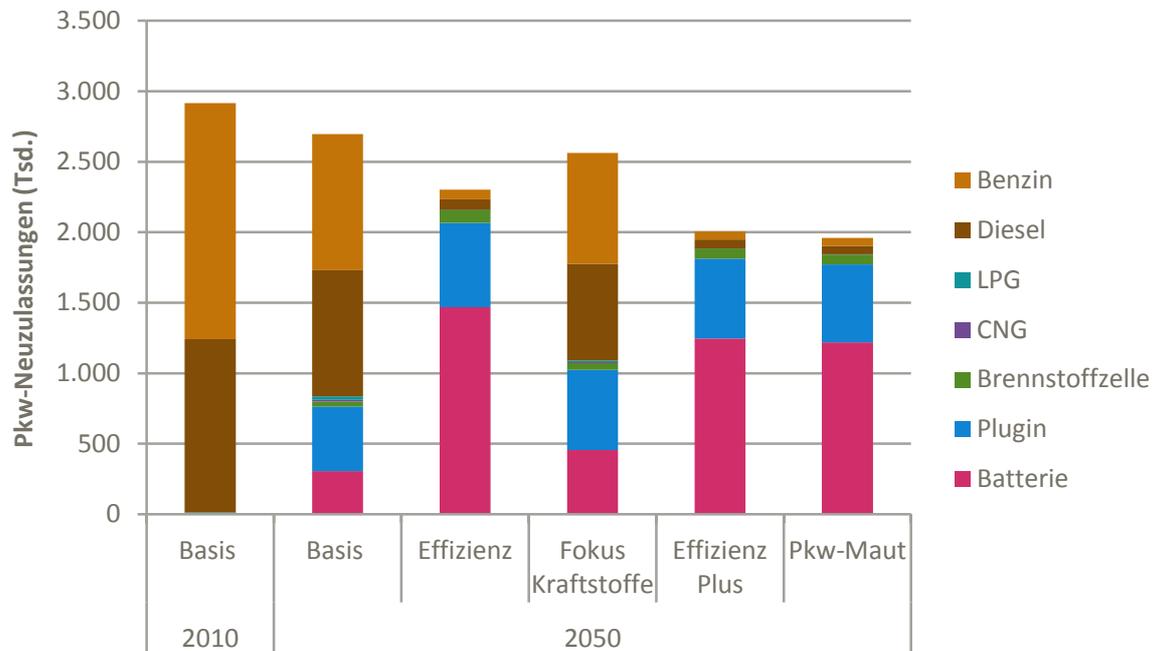


Quelle: Renewbility III

## Pkw-Neuzulassungen

Im Jahr 2050 sind im Szenario Effizienz und Effizienz Plus rund 95 % der Neuzulassungen elektrische Fahrzeuge. Während die Anzahl der Neuzulassungen im Basisszenario sowie der Szenarettete Fokus Kraftstoffe bei über 2,5 Mio. liegt, sinkt sie im Szenario Effizienz Plus auf 2 Mio. Fahrzeuge.

Abbildung 5-9: Pkw-Neuzulassungen im Jahr 2050

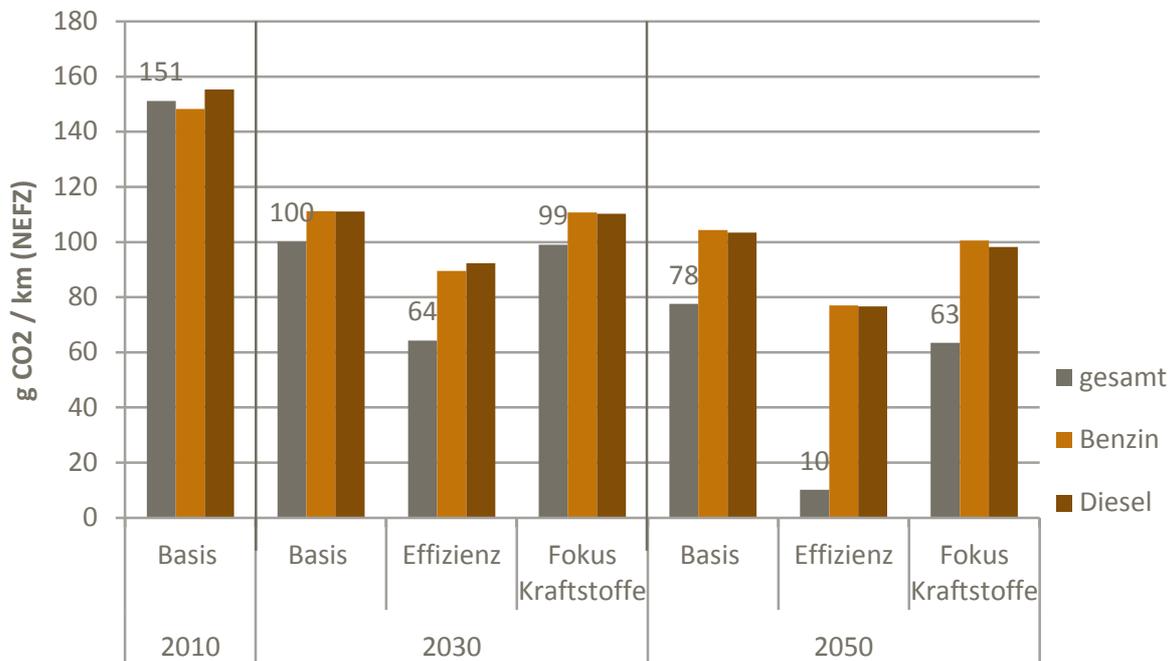


Quelle: Renewbility III

## Effizienz der Neuzulassungen

Die Pkw-Grenzwerte beeinflussen maßgeblich die Effizienz neu zugelassener Pkw. Aus der Modellierung ergibt sich, zu welchem Ausmaß die Grenzwerte über Effizienzsteigerungen konventioneller Fahrzeuge erreicht werden und welchen Beitrag zur Zielerreichung ein zunehmender Anteil alternativer Antriebe leistet. Abbildung 5-10 zeigt die durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen nach NEFZ in den Jahren 2030 und 2050.

Abbildung 5-10: Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen neu zugelassener Pkw in Deutschland gemäß NEFZ in 2030 und 2050



Quelle: Renewbility III

Die dargestellten Werte sind nach dem aktuellen Testzyklus (NEFZ) angegeben. Perspektivisch wird eine Umstellung der Grenzwerte auf den neuen Testzyklus WLTP erfolgen. An den grundsätzlichen Modellierungsergebnissen ändert dies jedoch nichts, auch wenn es möglicherweise einzelne Verschiebungen in der Kosteneffizienz bestimmter Minderungstechnologien geben kann (z. B. ist Start-Stopp-Automatik eine Technologie, welche im NEFZ zu deutlich höheren Minderungen führt als zukünftig im WLTP). Für den tatsächlichen Verbrauch der Fahrzeuge wurde ein Realaufschlag auf den NEFZ hinterlegt (s.o.).

## 5.6 FAZIT

Die Effizienzsteigerung der Fahrzeuge muss mit entsprechenden Rahmenbedingungen vorangebracht werden. Pkw-Grenzwerte beeinflussen zum einen maßgeblich die Effizienz neu zugelassener, konventioneller Pkw. Zum anderen unterstützen sie jedoch auch maßgeblich die Marktdurchdringung elektrischer Pkw, und sollten entsprechend ambitioniert fortgeschrieben werden. Alleine höhere Kraftstoffkosten reichen nicht aus, um die Ziele der Bundesregierung von 6 Mio. elektrischer Fahrzeuge im Bestand im Jahr 2030, sowie die aus energetischer und Klimaschutzpolitischer Sicht notwendige, maximale Elektrifizierung im Fahrzeugbestand bis 2050 zu erreichen.

## 6 FAHRZEUGBESTAND LKW UND LNF

### 6.1 HINTERGRUND UND AUSGANGSLAGE

Die Emissionen des Straßengüterverkehrs haben einen ganz wesentlichen Einfluss auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Verkehrssektors. Bereits jetzt liegt der Anteil bei rund einem Viertel. Wesentlich ist aber auch, dass die Verkehrsleistungen auf der Straße aller Voraussicht nach weiter deutlich zunehmen. Im Basisszenario wird ein Anstieg in Anlehnung an die VP 2030 bis 2030 mit 40 % angenommen. Umso wichtiger ist, dass die Emissionen der Lkw mit entsprechenden Maßnahmen deutlich gesenkt werden. Während der letzten 10 Jahre ist der spezifische durchschnittliche Kraftstoffverbrauch von Sattelzügen in der EU nicht wesentlich gesunken (ICCT 2015). Eine Regulierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von Lkw-Neuzulassungen kann daher die Transparenz auf dem Lkw-Markt erhöhen und einen Anreiz zur Effizienzsteigerung setzen, wenn das Messverfahren bzw. das Modellierungstool für die Bestimmung der CO<sub>2</sub>-Emissionen valide ist und tatsächliche Fahrsituationen sowie Fahrzeugaufbauten und Fahrzeugkonfigurationen ausreichend realistisch abbildet. Derzeit werden auf EU-Ebene entsprechende Vorgaben diskutiert.

### 6.2 ANNAHMEN UND PARAMETER

Auch bei Lkw sind – wie bei Pkw – Kraftstoffpreise und Fahrzeugkosten wesentliche Parameter, welche die Bestandsstruktur beeinflussen. Bei den Lkw gibt es im Gegensatz zu den Pkw bisher keine Grenzwerte. Die Entwicklung des Fahrzeugbestandes wurde über ein TCO-Modell abgebildet (siehe Kapitel 4.2.1.1). Grundsätzlich wird bei der Anschaffung von Lkw somit im Gegensatz zu den Pkw von einer rationalen, ökonomisch optimierten Kaufentscheidung ausgegangen.

Weiterhin wird im Gegensatz zu den Pkw die Größe des Lkw-Bestandes nicht a priori ermittelt, sondern es wird angenommen, dass der Lkw-Bestand im gleichen Maß zunimmt wie die Lkw-Fahrleistung, d. h. die durchschnittlichen Jahresfahrleistungen des Lkw-Bestandes bleiben konstant.

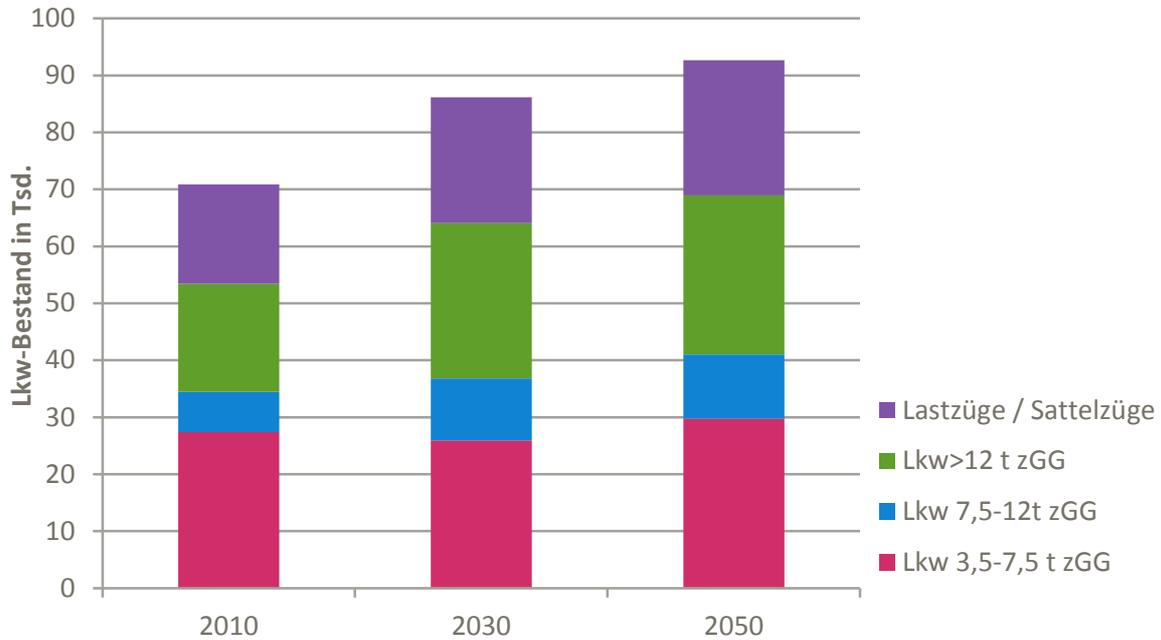
Wesentliche Annahme in den Szenarien stellt die Verfügbarkeit bestimmter Technologien dar. In den Szenarien Effizienz und Effizienz Plus wurde angenommen, dass der europaweite Aufbau einer Infrastruktur für Oberleitungs-Lkw erfolgt, und unter dieser Voraussetzung die Kaufentscheidung zwischen Oberleitungs-Lkw und konventionellen Antriebstypen rein ökonomisch getrieben erfolgt. Dies setzt also voraus, dass der Oberleitungs-Lkw die Anforderungen erfüllen kann, die heutige Diesel-Lkw mit sich bringen.

Im Ausbauszenario der Oberleitungsinfrastruktur wird davon ausgegangen, dass nicht das gesamte Autobahnnetz elektrifiziert wird, sondern sich der Ausbau auf Abschnitte mit besonders hoher Güterverkehrsleistung beschränkt. Der Sachverständigenrat für Umweltfragen gibt im Umweltgutachten 2012 eine Länge des zu elektrifizierendem Autobahnnetzes von 5.700 km an, um die wesentlichen Hauptmagistralen mit dem größtem Verkehrsaufkommen zu elektrifizieren (SRU 2012). In den Szenarien Effizienz und Effizienz plus wird in Anlehnung an UBA (2016) aufgrund der Fahrzeugkonfiguration mit einem Dieselaggregat angenommen, dass lediglich 4.000 km der Bundesautobahnen (rund 30 %) elektrifiziert werden, und dass auf diesen Strecken rund 60 % der Verkehrsleistung erbracht werden. Der Netzausbau ist im Jahr 2040 abgeschlossen. Aufgrund der gewählten Fahrzeugkonfiguration als Oberleitungshybridfahrzeug mit Dieselaggregat wird eine vollständige Elektrifizierung der 4.000 km unterstellt. Ein zusätzlicher Batteriespeicher in den Fahrzeugen könnte den Ausbaubedarf der Infrastruktur verringern, würde jedoch mit höheren Fahrzeugkosten zu Buche schlagen.

### 6.3 ERGEBNISSE BASISZENARIO

Abbildung 6-1 zeigt die Entwicklung des Lkw-Bestandes in Deutschland in der Basis. Insgesamt nimmt der Fahrzeugbestand um 30 % bis 2050 zu. Der Anteil der kleinen Lkw nimmt bis 2050 leicht ab, der der Lkw < 12 t hingegen leicht zu. In der Basisentwicklung fahren alle Lkw weiterhin mit Diesel-Antrieb.

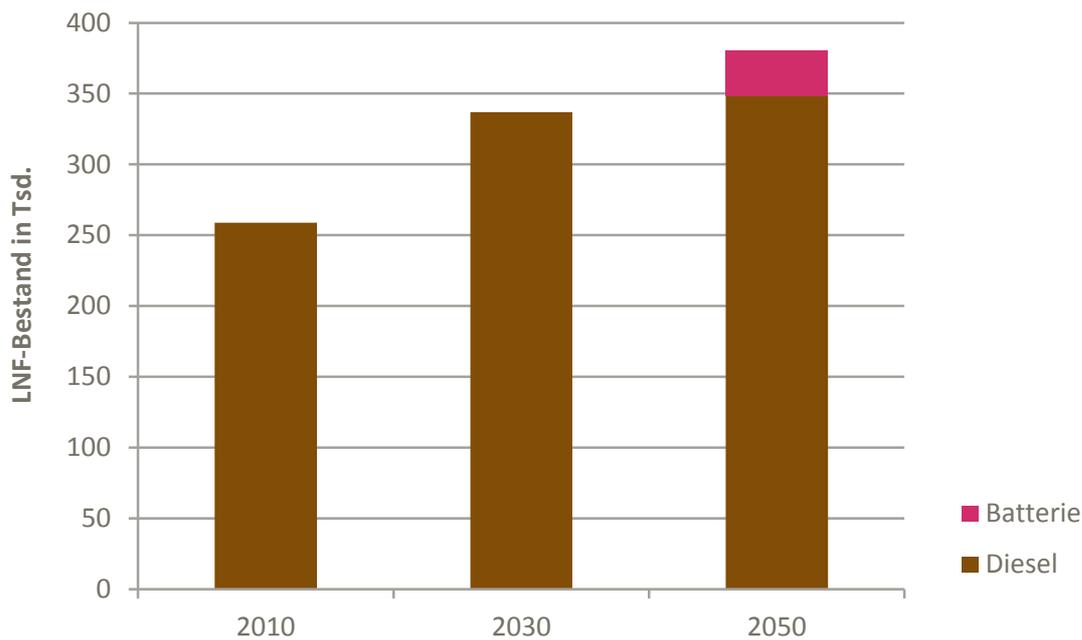
Abbildung 6-1: Entwicklung des Lkw-Bestands in der Basis, 2010-2050



Quelle: Renewbility III

Bei leichten Nutzfahrzeugen gibt es dagegen auch in der Basisentwicklung bereits batterieelektrische Fahrzeuge (Abbildung 6-2). Insgesamt beträgt der Anstieg fast 50 %.

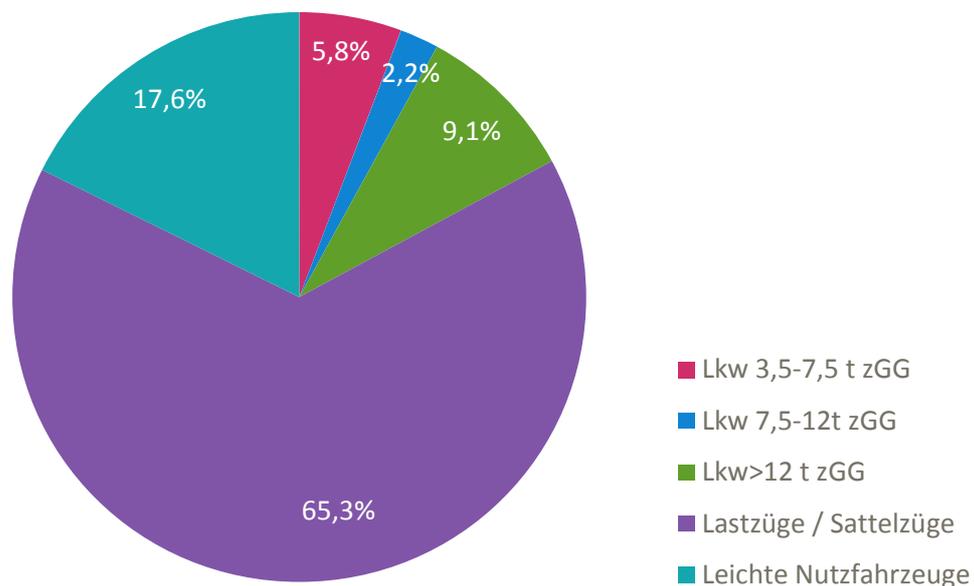
Abbildung 6-2: Entwicklung des Bestands leichter Nutzfahrzeuge in der Basis, 2010-2050



Quelle: Renewbility III

Die Bedeutung der unterschiedlichen Größenklassen für den Energieverbrauch und damit die Treibhausgasemissionen des Straßengüterverkehrs zeigt Abbildung 6-3. Die Anteile von Last- und Sattelzügen an der Fahrleistung und am Energieverbrauch liegen deutlich höher als die Anteile dieser Fahrzeuge am Bestand, da sowohl Jahresfahrleistung als auch spezifischer Energieverbrauch deutlich höher liegen als bei den anderen Größenklassen.

**Abbildung 6-3: Anteile der Größenklassen am Energieverbrauch des Straßengüterverkehrs im Jahr 2010**



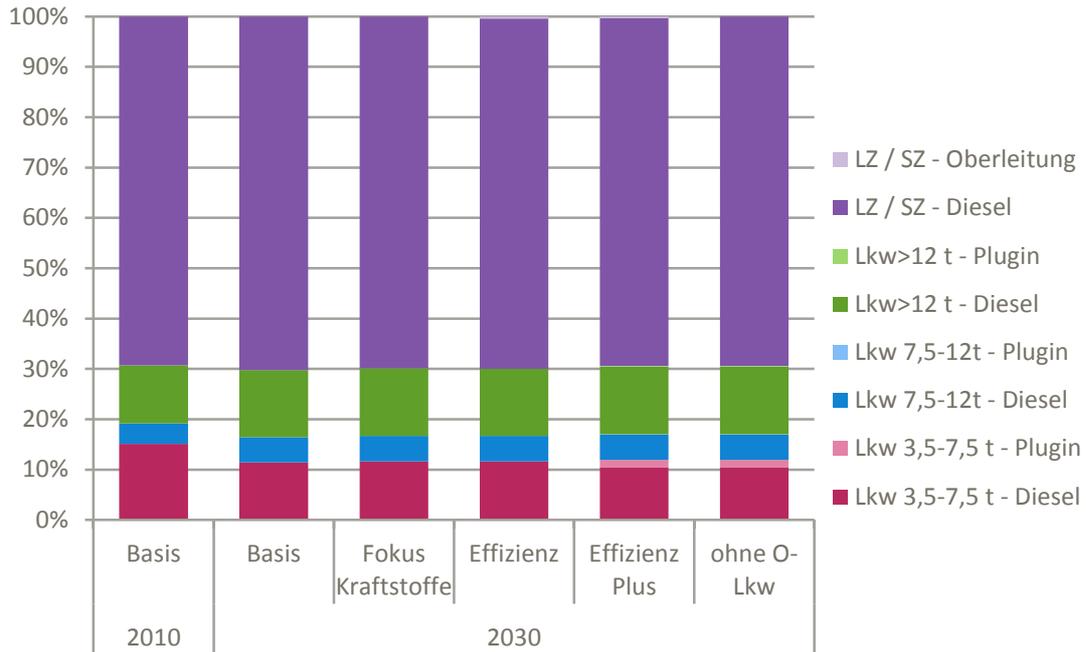
Quelle: Renewbility III

## 6.4 ERGEBNISSE 2030

Abbildung 6-4 zeigt die Anteile der Lkw-Größenklassen und Antriebe an der Fahrleistung im Jahr 2030 in den Szenarien. Die Darstellung nach Fahrleistungen ist aussagekräftiger, als wenn der Bestand dargestellt wird, da die jährlichen Fahrleistungen der einzelnen Größenklassen sehr stark differieren. So beträgt der Anteil der Last- und Sattelzüge in den Szenarien rund 25 %, deren Anteil an der Fahrleistung dominiert jedoch deutlich mit rund 70 %. Die Anteile alternativer Antriebe liegen in allen Szenarien im Jahr 2030 noch unter 2 %. Im Szenario Effizienz plus (sowie in der Szenarettete ohne O-Lkw) führen die Zufahrtsbeschränkungen in Innenstädten für emittierende Fahrzeuge, welche ab 2030 in Großstädten über 500.000 Einwohner eingeführt werden, dazu, dass auch Plug-In-Fahrzeuge in den Markt kommen.

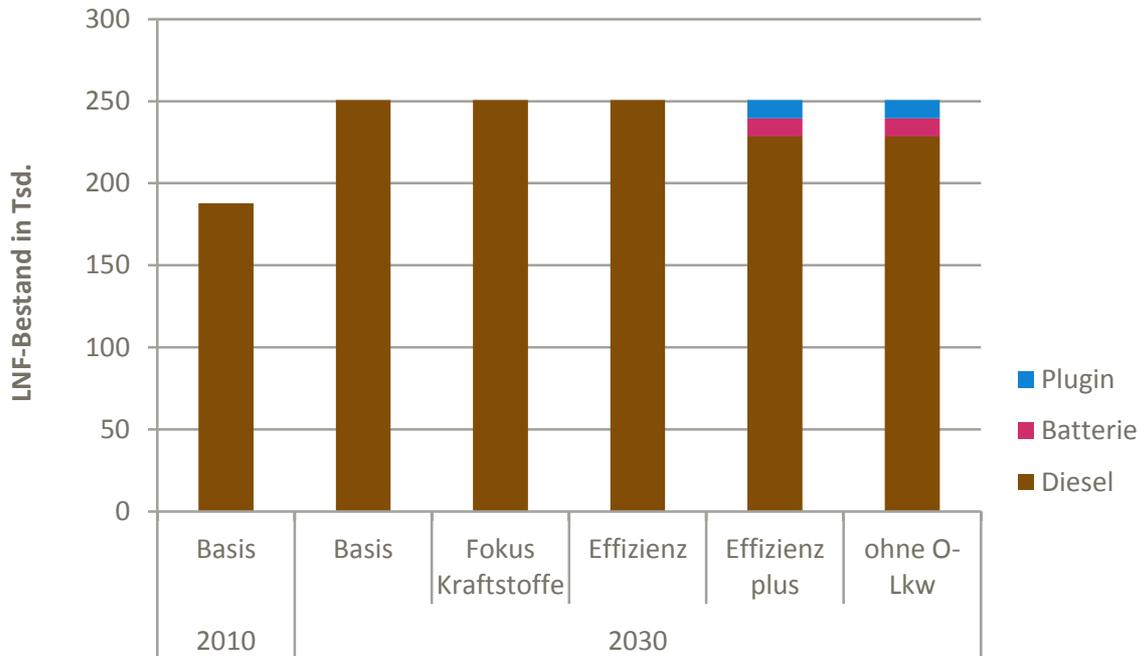
Dies hat auch Einfluss auf leichte Nutzfahrzeuge – hier liegt der Anteil von batterieelektrischen Fahrzeugen und Plug-In-Hybridfahrzeugen am Bestand im Szenario Effizienz Plus bei 9 %.

**Abbildung 6-4: Anteil der Fahrleistung Lkw im Jahr 2030 differenziert nach Antriebstypen und Größenklassen**



Quelle: Renewbility III

Abbildung 6-5: Bestand leichte Nutzfahrzeuge im Jahr 2030

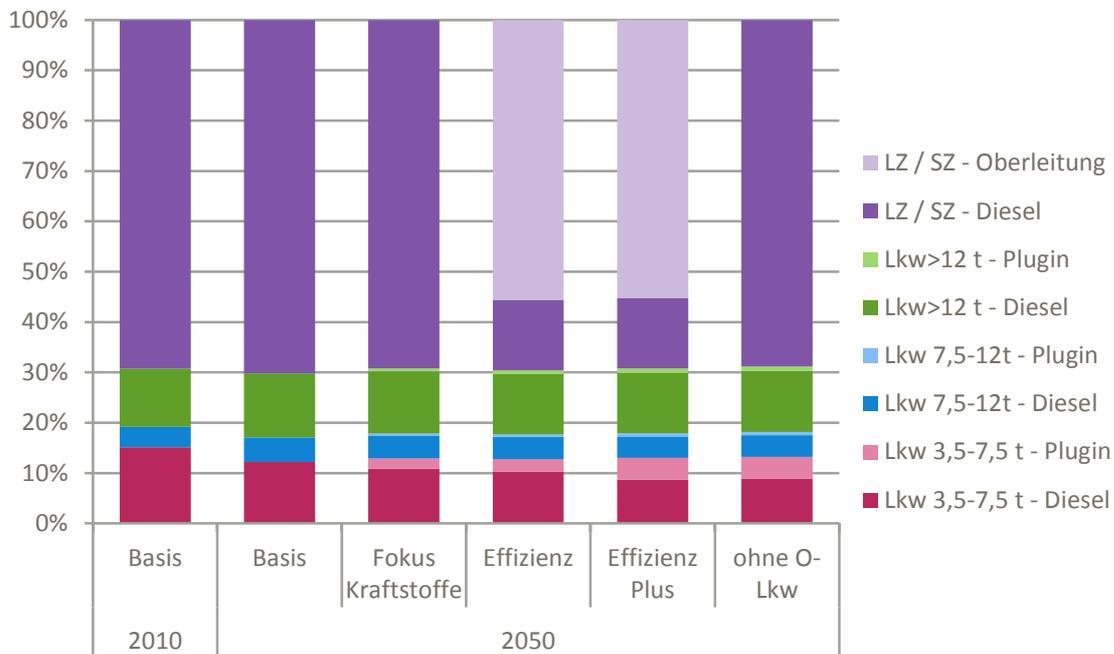


Quelle: Renewbility III

## 6.5 ERGEBNISSE 2050

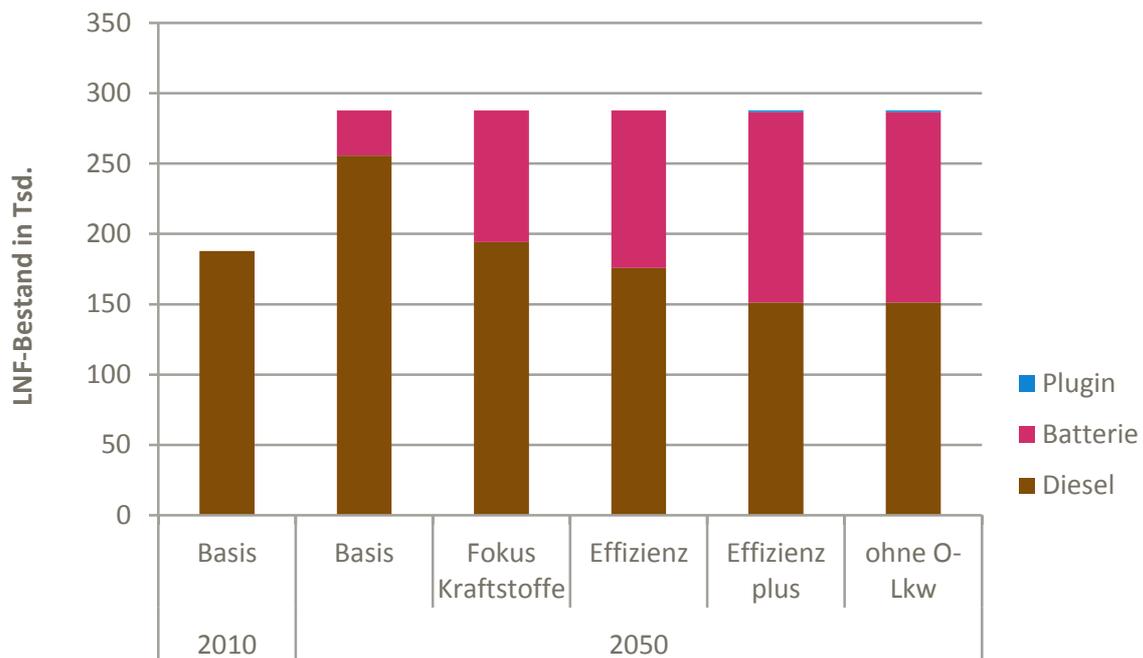
Wie in der Basisentwicklung nimmt der Bestand an Lkw bis 2050 deutlich zu. In den Szenarien mit Oberleitungs-Lkw beträgt deren Anteil am Bestand der Last- und Sattelzüge etwa 80 %, der Anteil der Last- und Sattelzüge an dem gesamten Lkw-Bestand rund ein Viertel. Diese machen jedoch den Großteil der Fahrleistung aus. Daraus ergibt sich, dass der Anteil der Fahrleistung von Oberleitungs-Lkw an der Gesamtfahrleistung des Straßengüterverkehrs in den Szenarien Effizienz und Effizienz Plus rund 60 % beträgt (Abbildung 6-6).

Abbildung 6-6: Lkw-Fahrleistung differenziert nach Antriebstyp und Größenklasse im Jahr 2050



Quelle: Renewbility III

Abbildung 6-7: Bestand leichte Nutzfahrzeuge im Jahr 2050



Quelle: Renewbility III

Bei den leichten Nutzfahrzeugen zeigt sich eine ähnliche Tendenz wie im Jahr 2030. Im Szenario Effizienz beträgt der Anteil an batterieelektrischen leichten Nutzfahrzeugen knapp 40 %. In den Szenarien Effizienz Plus steigt dieser dann auf fast 50 % an.

## 6.6 FAZIT

Die Effizienzsteigerung des Straßengüterverkehrs ist von herausragender Bedeutung. Bei den verbrennungsmotorisch betriebenen Lkw bestehen noch deutliche Effizienzsteigerungspotenziale. Die energieeffizienteste Lkw-Variante ist jedoch die elektromotorische. Die Einführung von Oberleitungs-Lkw wurde im Rahmen von Renewbility pauschal angesetzt und bedarf detaillierterer Untersuchungen, welche Einführungsstrategien in Deutschland und Europa, die Nachfrage durch die Transportunternehmen, technische Ausgestaltungsvarianten (System Fahrzeug-Infrastruktur) und die Wechselwirkung mit dem Schienenverkehr berücksichtigen.

## 7 PERSONENVERKEHR

### 7.1 HINTERGRUND UND AUSGANGSLAGE

Der Personenverkehr hat eine große soziale und wirtschaftliche Bedeutung. Allerdings sind damit auch zahlreiche negative Effekte verbunden, wie die Beeinflussung des Klimas durch hohe Treibhausgasemissionen. Die Reduzierung dieser negativen Effekte ist ein wichtiger Baustein in einer nachhaltigen Klimastrategie. Dies kann im Personenverkehr beispielsweise durch neue Technologien, aber auch durch Vermeidung oder Verlagerung von Verkehr erzielt werden.

Die historische Entwicklung der Verkehrsnachfrage zeigt, dass pro Person und Tag die durchschnittliche Anzahl an Wegen sowie die durchschnittliche für Verkehr aufgewendete Zeit zwar relativ stabil sind, die Summe der zurückgelegten Kilometer aber steigt. Festzustellen ist jedoch, dass die Zunahme in den letzten Jahren geringer ausfällt als in den vorangegangenen Jahrzehnten. Nennenswerte Zuwächse gibt es noch im Fernverkehr, bei dem vor allem eine Zunahme im Luftverkehr steigend auf die zurückgelegte Kilometerzahl wirkt.

In Renewbility III werden der Nah- und Fernverkehr separat modelliert. Damit ist es möglich, mit den Maßnahmen gezielt die jeweiligen relevanten Verkehrsmittel zu adressieren und die verkehrlichen Änderungen adäquat abzuschätzen. Zudem werden in der Abbildung und Analyse des Fernverkehrs in Deutschland neue Alternativen wie der Fernlinienbus berücksichtigt. Neben der Möglichkeit der Nutzung energieeffizienterer Verkehrsmittel des Öffentlichen Personenverkehrs sind auch ressourceneffizientere Antriebstechnologien des Motorisierten Individualverkehrs für einen klimafreundlichen Verkehr von zentraler Bedeutung. Das ist besonders wichtig, weil das Auto auch in den nächsten Jahrzehnten ein zentrales Verkehrsmittel bleiben wird. Alternative Antriebe und deren Nutzung werden daher explizit und detailliert modelliert und analysiert. Weiterhin wirft die neue Technologie des autonomen Fahrens ihren Schatten voraus. Dieses hochaktuelle Thema wird zunehmend an Bedeutung gewinnen. Die Auswirkungen auf Verkehrssystem und Umwelt sind noch nicht zweifelsfrei abschätzbar und werden heute und noch in einiger Zukunft diskutiert werden. Das vorliegende Kapitel umfasst einen Abschnitt zur Einführung in dieses Thema.

### 7.2 ANNAHMEN UND PARAMETER

Die Modellierung der Verkehrsnachfrage erfordert eine Vielzahl an Eingangsdaten und Annahmen. Neben der Modellstruktur selbst sind diese Faktoren maßgebend für die Modellergebnisse und deren Aussagekraft. Einen zentralen Grund für die Auswahl und Ausgestaltung dieser Einflussgrößen stellt die zu beantwortende Fragestellung dar, für deren

Beantwortung die Verkehrsmodelle herangezogen werden. Zahlreiche bedeutende Eingangsgrößen für die Personenverkehrsmodelle wurden bereits in Kapitel 4.4 beschrieben und sollen hier nicht wiederholt werden.

## 7.2.1 ALLGEMEINE ANNAHMEN UND KALIBRIERUNG AN DER VP 2030

Im Vorfeld des Projekts wurde die Verkehrsprognose 2030 des Bundes (VP 2030) erstellt, die den gleichen Untersuchungsraum besitzt und eine vergleichbare modellseitig methodische Herangehensweise aufweist. Für die VP 2030 wurden im großen Umfang die notwendigen Daten für die Modelle erhoben bzw. aktualisiert.

Aus diesem Grund, und auch zur Vergleichbarkeit und Einordnung der Ergebnisse aus Renewbility III in die aktuellen Daten des Bundes, bilden sowohl die Datengrundlagen als auch die Ergebnisse der VP 2030 den Orientierungsrahmen für die Modellierung im vorliegenden Projekt. Die in Renewbility III angewendeten Modelle basieren entsprechend auf den zur Verfügung gestellten Eingangsdaten der VP 2030 (vgl. Kapitel 3). Zudem wurden die Modellergebnisse an den Ergebnissen der VP 2030 kalibriert. Für die Kalibrierung wurde ein Szenario berechnet, in dem alle wesentlichen Annahmen (Nutzerkosten, Entwicklung des Pkw-Bestands) mit der VP 2030 übereinstimmen, und die Modelle wurden so kalibriert, dass die resultierende Verkehrsnachfrage mit den Ergebnissen der Verkehrsprognose übereinstimmt. Zentrale Vergleichsgrößen waren die verkehrsmittelspezifischen Verkehrsaufkommen sowie die Verkehrsleistungen.

Die VP 2030 hat das Jahr 2030 als Prognosehorizont. In Renewbility III werden hingegen auch Berechnungen für das Jahr 2050 durchgeführt. Da kaum belastbare Informationen über die weitere Entwicklung im Besonderen der Kosten der Verkehrsmittel vorliegen, wird diese auf Basis der Entwicklungen bis 2030 der VP 2030 fortgeschrieben. Zudem werden weitere notwendige Daten und Annahmen aus den Klimaschutzszenarien (KSZ 2050) übernommen, die als zusätzlicher Fortschreibungsrahmen bis 2050 dienen.

## 7.2.2 ENTWICKLUNG DER NUTZERKOSTEN

Von besonderer Relevanz sind die Nutzerkosten der Verkehrsteilnehmer bzw. deren jährliche Steigerungen. Bei Pkw und Lkw werden die Fahrkosten aus der Neuzulassungs- und Bestandsmodellierung abgeleitet. Eine Darstellung der resultierenden durchschnittlichen Kilometerkosten findet sich für 2030 in Tabelle 7-1, für 2050 in Tabelle 7-2. Darüber hinaus stellt Abbildung 7-5 am Beispiel des Szenarios Effizienz die Kilometerkosten je Antriebsart dar. Bei den übrigen Verkehrsträgern werden für die Entwicklung 2010 bis 2030 die Annahmen aus der Verkehrsprognose übernommen. Die Fortschreibung der Kosten als

wesentliche Determinante der Verkehrsnachfrage in der Basisentwicklung bis 2050 erfolgt gemäß der Steigerungsraten in der VP für den Zeitraum 2010-2030 – außer beim Luftverkehr, dort werden zahlreiche bedeutende Eingangsgrößen für die Entwicklung der Nutzerpreise anhand der Effizienzentwicklung und der Kraftstoffpreise in den Szenarien abgeleitet (siehe Kapitel 4.4). Als resultierende jährliche Steigerungsraten der Nutzerpreise ergeben sich somit:

- ÖPNV: 0,89 % p.a.
- Bahn: 0,5 % p.a.
- Busfernverkehr: 0,5 % p.a.
- Parkkosten: 50 % Steigerung gegenüber 2030
- Flug: 0,0 % p.a. (Basis)
- Flug: 0,25 – 0,5 % p.a. (Klimaschutzszenarien).

Die beschriebenen Annahmen beziehen sich auf die zugrunde gelegten Eingangsdaten für die Abbildung der Basisentwicklung.

### 7.2.3 ANNAHMEN IM SZENARIO EFFIZIENZ PLUS

Im Szenario Effizienz wurden keine über die Kilometerkosten für Pkw (Modellinput aus der Pkw-Bestandsmodellierung) hinausgehenden Maßnahmen hinterlegt. Die für die Konkretisierung des Szenarios Effizienz plus beinhalteten Maßnahmen werden in den nachfolgenden Abschnitten näher erläutert.

#### Zugangsbeschränkungen für emittierende Fahrzeuge in Innenstädten

In Städten über 200.000 Einwohnern (entspricht 39 deutschen Städten) werden Zufahrtbeschränkungen für emittierende Fahrzeuge eingeführt. Die Definition der Zonen erfolgt per GIS, und sie sind beschränkt auf Innenstadtbereiche.

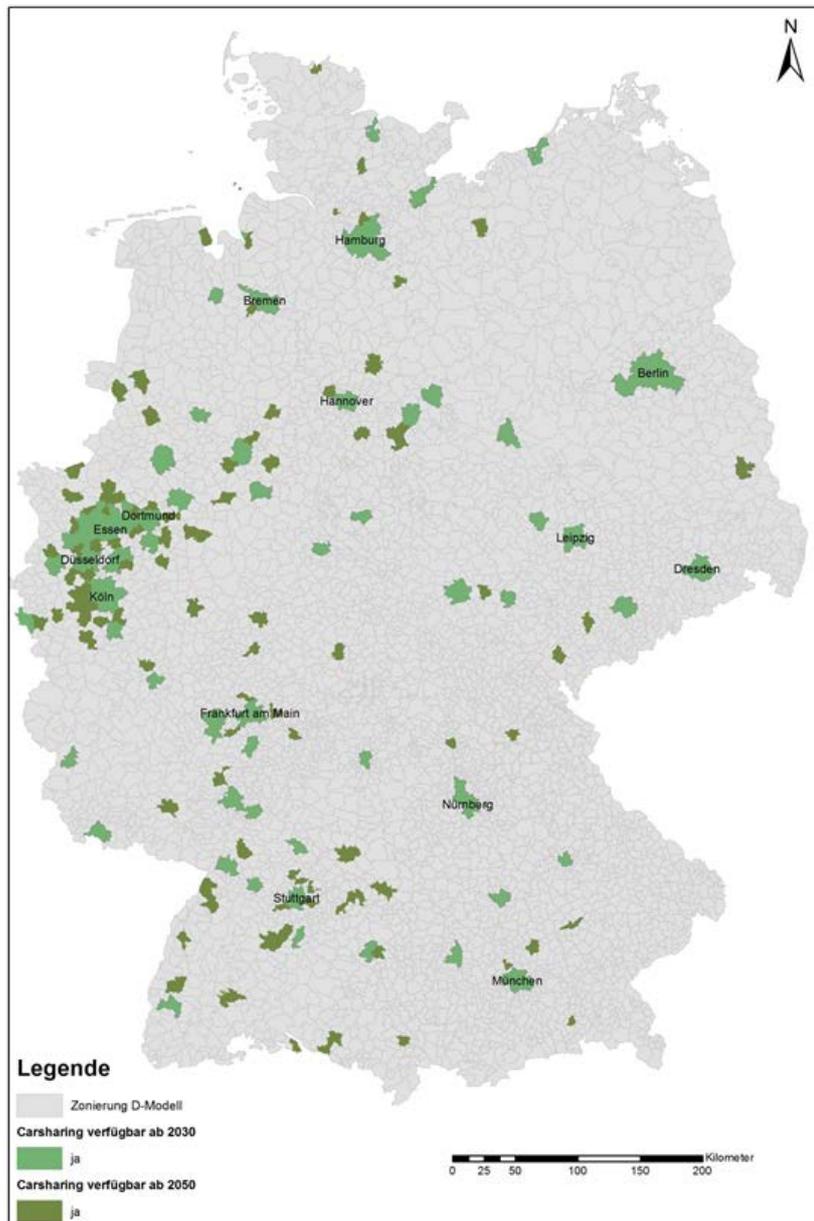
Zufahrt in diese Zonen ist nur für BEV und Plug-In-Pkw erlaubt. Die Beschränkung gilt ab 2030 für Städte ab 500.000, 2050 wird sie dann ausgedehnt auf Städte ab 200.000 Einwohner.

#### Carsharing

Carsharing steht flächendeckend innerhalb aller Städte ab 100.000 Einwohnern ab 2030 und innerhalb aller Städte ab 50.000 Einwohnern ab 2050 zur Verfügung (siehe Abbildung 7-1). Allen Personen mit Führerschein steht im Jahr 2030 die Option zur Verfügung, Carsharing zu

nutzen. Es wird ausschließlich mit Elektrofahrzeugen (PHEV und BEV) angeboten. Die Kosten liegen bei 60 Cent pro Kilometer für 2030 und 2050.

**Abbildung 7-1: Übersicht der in 2030 (hellgrün) und 2050 (dunkelgrün) im Szenario Effizienz Plus sowie der Szenarette Maut über ein Carsharingangebot verfügenden Städte**



Quelle: Renewbility III

## Parkraumbewirtschaftung

Im Szenario Effizienz plus erfolgt eine Ausweitung und Verteuerung der in der VP 2030 bereits ab 2010 selektiv angenommenen Parkraumbewirtschaftung. Für die Gebiete mit Carsharing-Angebot (siehe oben) erfolgt eine deutliche Anhebung der Preise, und zwar zusätzlich zu den gegebenenfalls bereits bestehenden Gebühren. Die zusätzlichen Kosten

belaufen sich auf durchschnittlich 50 Cent (2030) und 1 Euro (2050) für jeden Parkvorgang. Carsharing-Autos zahlen keine Parkgebühren. Gleichzeitig wird indirekt hinterlegt, dass der Parkraum reduziert wird. Dies wird im Modell abgebildet, indem die Zu- und Abgangszeiten leicht erhöht werden sowie die Parksuchzeit leicht verlängert wird. Es erfolgt keine Differenzierung nach Größe der Fahrzeuge bzw. Höhe der Emissionen oder nach Anwohnern/Nicht-Anwohnern.

Da im ländlichen Raum keine Parkkosten angesetzt wurden, bleiben auch die entsprechenden Zonen mit Carsharing kostenfrei.

## Stadt der kurzen Wege

Eine Nahraumversorgung/Nutzungsdurchmischung in Städten wird gefördert. Die Förderung einer entsprechenden Stadtentwicklung ist beispielweise mit den Instrumenten der Stadtentwicklungsplanung und städtebaulichen Planungsinstrumenten möglich. Räumlicher Bezugsrahmen der hier vorgenommenen Maßnahmenumsetzung sind für das Jahr 2030 Städte ab 100.000 Einwohnern und für 2050 Städte ab 50.000 Einwohnern - somit in Analogie zur Carsharing-Verfügbarkeit. Für die Wegezwecke Einkauf, Versorgung, Freizeit sowie teilweise für die sonstigen Wege sinken als Folge die Wegelängen in den jeweiligen Gebieten um 5 % (2030) bzw. 10 % (2050).

## Stärkung öffentlicher Verkehr

Im Zuge der Zufahrtsbeschränkungen müssen Alternativen geschaffen werden. Daher wird die Attraktivität des ÖV über die Reduktion der Reisezeiten gefördert, z. B. durch Ausweisung von Busspuren oder höhere Taktung. In Kernstädten liegt das Potenzial für die Beschleunigung höher als auf dem Land, so dass bei der Reduktion der Reisezeiten zwischen Kernstadt und sonstigen Gebieten differenziert wird.

Annahmen zur Attraktivitätssteigerung des ÖV durch Reisezeitverkürzung zusätzlich zur Basis 2030 (entspricht VP 2030):

- innerhalb Kernstadt: -20 %;
- Kernstadt zum Restgebiet: -10 %,
- Bahn fern: -10 % (2030)/-20 % (2050) mit Taktverdichtung.

## Radverkehrsförderung

Die Durchschnittsgeschwindigkeiten im Radverkehr werden aufgrund einer verbesserten Infrastruktur, einer LSA-Verbesserung und einer zunehmenden Marktdurchdringung von Pedelecs schrittweise erhöht.

Annahmen zur Reisezeitverkürzung des Radverkehrs durch die genannten Maßnahmen gegenüber 2010:

- 2030 -9 %
- 2050 -16 %.

Hierbei zu Grunde gelegt sind:

- eine Reisezeitverkürzung von 6 % in 2030 bzw. 10 % in 2050 durch verbesserte Infrastruktur und verringerte Standzeiten,
- ein Anteil von Elektrofahrrädern an der Fahrleistung von 20 % in 2030 und 40 % in 2050. Elektrofahrräder sind im Schnitt 15 % schneller als konventionelle Fahrräder (Schleinitz et al. 2015).
- Für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge wurde in einer internen Untersuchung eine verlagerbare Fahrleistung zu Lastenrädern von 3,8 % ermittelt. Hierbei wurde unterstellt, dass alle Touren, deren maximale Fahrweite 30 km nicht überschreiten und deren Tourenabschnitte nicht länger als 10 km sind und gleichzeitig das Transportgewicht unter 50 kg liegt, ersetzt werden können. Wir nehmen an, dass für 2030 20 % von diesen maximal ersetzbaren Fahrleistungen und für 2050 50 % ausgeschöpft werden. Die Fahrleistungen werden von Fahrten mit Pkw ohne elektrischen Antrieb, die dem Wirtschaftsverkehr zuzurechnen sind, abgezogen.

## Tempo 30 als Regelgeschwindigkeit innerstädtisch mit Ausnahme des Hauptstraßennetzes

Tempo 30 als Regelgeschwindigkeit wird innerorts mit Ausnahme des Hauptstraßennetzes eingeführt. Damit kommt es zu einer Änderung der Reisezeiten im MIV bei den betroffenen Relationen. Dies führt zu einer Verringerung der Attraktivität der Pkw-Nutzung bei der Verkehrsmittelwahl.

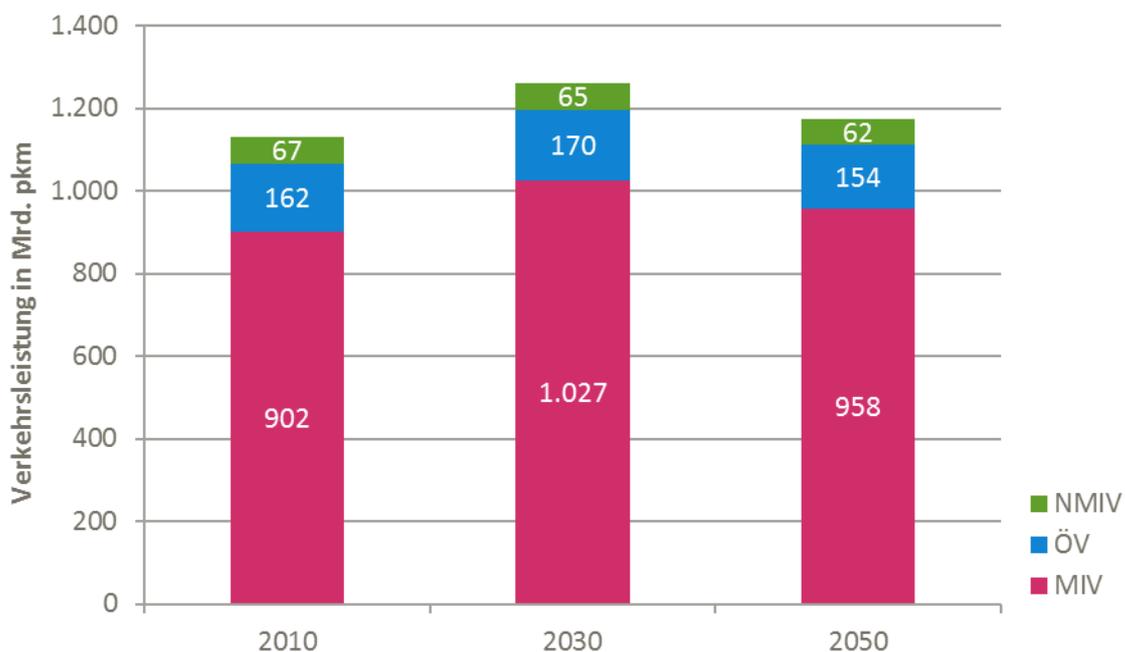
### 7.3 ERGEBNISSE BASISZENARIO

Die Modellergebnisse zeigen, dass es entsprechend der im Basisszenario getroffenen Annahmen im Vergleich zu 2010 bis zum Jahr 2030 einen Anstieg der Verkehrsleistung um 11 % geben wird – auf dann 1.261 Milliarden Personenkilometer. Der Anstieg resultiert dabei im Wesentlichen aus der Erhöhung der Verkehrsleistung des MIV (privater Pkw, gewerblicher Pkw, motorisierte Zweiräder), der ein Plus von ca. 14 % erzielt. Zu begründen ist dies vor allem mit Kohorteneffekten. So besitzen trotz einer geringfügigen Abnahme der Bevölkerung mehr Personen einen Führerschein. Zudem steigt im Basisszenario die Anzahl der Fahrzeuge im Bestand, was zu einer höheren Verfügbarkeit von Kraftfahrzeugen führt. Diese höheren Verfügbarkeiten führen einerseits zu einer zusätzlichen Attraktivierung des

MIV, andererseits weisen Personen, die über einen Pkw verfügen, eine höhere Mobilität und führen mehr Wege durch. Ein weiterer wichtiger Aspekt sind die moderaten Steigerungen der Pkw-Fahrtkosten pro Kilometer. Zwar steigen die Kraftstoffkosten pro Liter, durch effizientere Fahrzeuge und eine veränderte Flottenstruktur sinken die Kilometerkosten jedoch gegenüber 2010 um ca. 5 %.

Die Verkehrsleistung des ÖV steigt ebenfalls, wenngleich die Steigerung mit 5 % deutlich geringer ausfällt. Der ÖV zeigt dabei kein einheitliches Bild. So wirken die rückläufigen Schülerzahlen im Nahverkehr verkehrsleistungsdämpfend, während durch den angenommenen weiteren Ausbau der Schieneninfrastruktur – im Besonderen im Fernverkehr – zusätzliche Fahrgäste gewonnen werden können. Darüber hinaus etablierten sich die Fernlinienbusse als zusätzliche ÖV-Alternative im Fernverkehr und führen ebenfalls zu einer Steigerung der ÖV-Verkehrsleistung. Hierdurch werden die Verluste des Schülerverkehrs überkompensiert. Ebenfalls infolge des Rückgangs der jungen Bevölkerung sinkt die Verkehrsleistung des nicht-motorisierten Individualverkehrs (NMIV) leicht um 3 %.

**Abbildung 7-2: Entwicklung der Personenverkehrsleistung in der Basis**



Quelle: Renewbilty III

Bis 2050 erfolgt im Basisszenario dann gegenüber 2030 wieder eine leichte Abnahme auf 1.173 Milliarden Personenkilometer. Trotz des Bevölkerungsrückgangs liegt also die Personenverkehrsleistung im Jahr 2050 höher als heute. Dabei ist im Vergleich zum Jahr 2030 zu beachten, dass der demografische Effekt noch wesentlich stärker ins Gewicht fällt,

da gegenüber dem Zeitraum 2010-2030 im Zeitraum 2030-2050 die Personengruppen junger Menschen zahlenmäßig noch stärker rückläufig sind. Dies zeigt sich im Besonderen im ÖV, der nahezu 10 % gegenüber 2030 verliert. Zudem tritt im Laufe der Zeit eine gewisse Sättigung beim Führerscheinbesitz und der Pkw-Verfügbarkeit auf.

Zusammenfassend ändern sich die Verkehrsleistungen zwischen 2010 und 2050 nur verhältnismäßig geringfügig. Der MIV steigt um etwa 6 %, während der ÖV um ca. 5 und der NMIV um ca. 7 % zurückgehen.

#### 7.4 ERGEBNISSE 2030

Die folgenden Ergebnisse zeigen die Verkehrsnachfrage des Personenverkehrs für das Jahr 2030. Es werden die Ergebnisse der verschiedenen Szenarien und Szenareten gegenübergestellt und diskutiert. Die Wirkung der Rahmenbedingungen, wie der Bevölkerungs- und Wirtschaftsentwicklung, als wesentliche Treiber der Verkehrsnachfrage wurden bereits im vorherigen Unterkapitel diskutiert. Der Fokus hier besteht in der Beschreibung der Wirkung der Maßnahmen und Annahmen in den verschiedenen Szenarien. Es gibt zahlreiche Modellvariablen, die durch die verschiedenen Maßnahmen der Szenarien beeinflusst werden. Aufgrund der Vielzahl ist es jedoch nicht möglich, alle hier im Detail zu erläutern, vielmehr sollen die wichtigsten benannt werden. Hierzu zählen:

- neue Alternativen
- Kosten (Fahrtkosten, Parkkosten)
- Geschwindigkeiten bzw. Zeiten
- Pkw-Verfügbarkeiten
- Zufahrtbeschränkungen
- Raumstruktur.

Die Maßnahmen und damit die Variablen wirken auf verschiedene Wahlentscheidungen der Menschen. So wirkt eine geänderte Raumstruktur und veränderte Pkw-Verfügbarkeiten im Besonderen auf die Aktivitätenwahl, d. h. die Verkehrserzeugung sowie ebenso auf die Ziel- und Verkehrsmittelwahl. Kosten, Zeiten und Beschränkungen für einzelne Verkehrsmittel haben großen Einfluss auf die Wahl des Ziels und des Verkehrsmittels. Um einen Überblick über die verschiedenen Wirkungen zu erhalten, werden daher verschiedene Dimensionen der Verkehrsnachfrage beleuchtet, und zwar insbesondere das Verkehrsaufkommen, die Verkehrsleistung und die Fahrleistung.

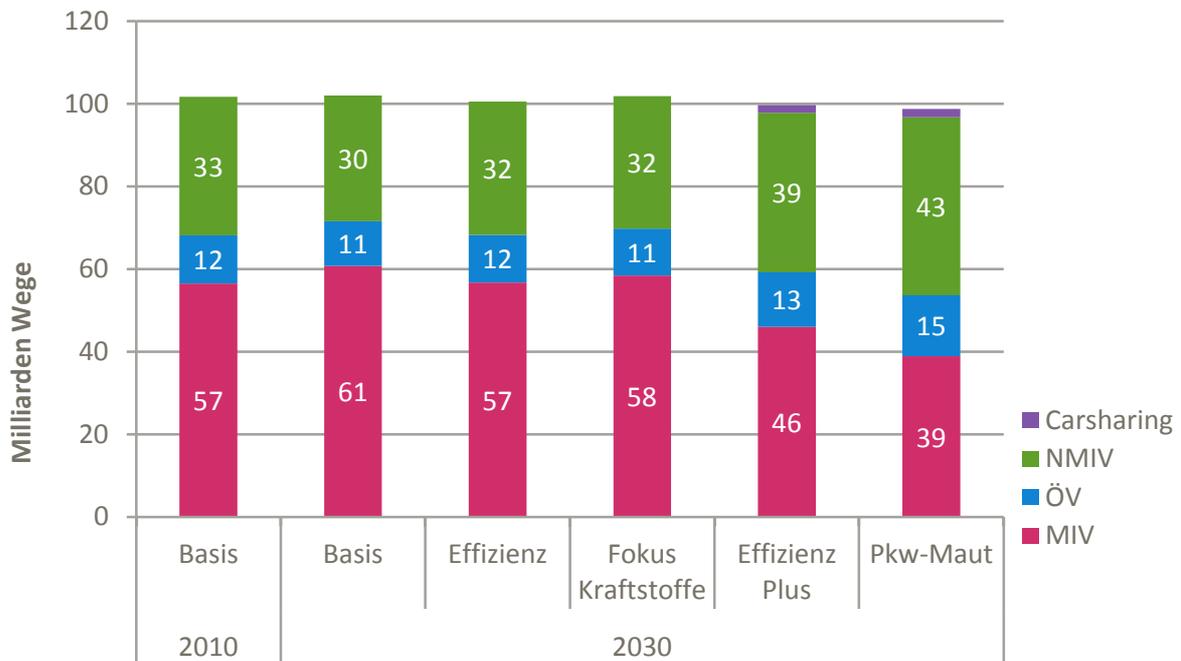
## Verkehrsaufkommen

In Abbildung 7-3 ist die Entwicklung der Verkehrsaufkommen, d. h. die Anzahl der Wege pro Jahr und Verkehrsmittel abgebildet. Darin wird deutlich, dass sich die Aufkommen der Verkehrsmittel zwischen der Basisentwicklung und dem Szenario Effizienz sowie der Szenarierete Fokus Kraftstoffe kaum unterscheiden. Das Gesamtverkehrsaufkommen über alle Verkehrsmittel ist nahezu konstant, wobei Basis und Fokus Kraftstoffe praktisch identisch sind und im Szenario Effizienz das Aufkommen um ca. 1,5 % zurückgeht. Grund für diesen Rückgang ist im Wesentlichen die geringere Motorisierung und damit geringere Pkw-Verfügbarkeiten. Zudem liegen die Fahrtkosten pro Kilometer des MIV leicht über der Basis.

Eine deutliche Verschiebung zwischen den Verkehrsmitteln ist in den Szenarien Effizienz Plus und Pkw-Maut zu erkennen. Im Szenario Effizienz Plus entfalten die Maßnahmen eine deutliche Wirkung und der MIV verliert ca. 15 Milliarden Wege gegenüber der Basis. Da Menschen dennoch Ortsveränderungen für die Ausübung ihrer Aktivitäten durchführen müssen, wählen sie andere Verkehrsmittel. Diese sind in dem Szenario deutlich verbessert und bieten eine attraktive Alternative zum MIV. Carsharing als neues Verkehrsmittel weist im Jahr 2030 deutschlandweit ein Aufkommen von knapp zwei Milliarden Wegen auf. Das Gesamtverkehrsaufkommen sinkt nur geringfügig um ca. 2 %.

Die zusätzliche Pkw-Maut wirkt als zusätzlicher Verstärker dieser Entwicklungen. Somit reduziert sich der MIV-Anteil am Gesamtwegeaufkommen von 60 % auf 39 %. Zudem geht das Gesamtverkehrsaufkommen um etwa 3 % zurück.

Abbildung 7-3: Entwicklung des Personenverkehrsaufkommens in den Szenarien 2030

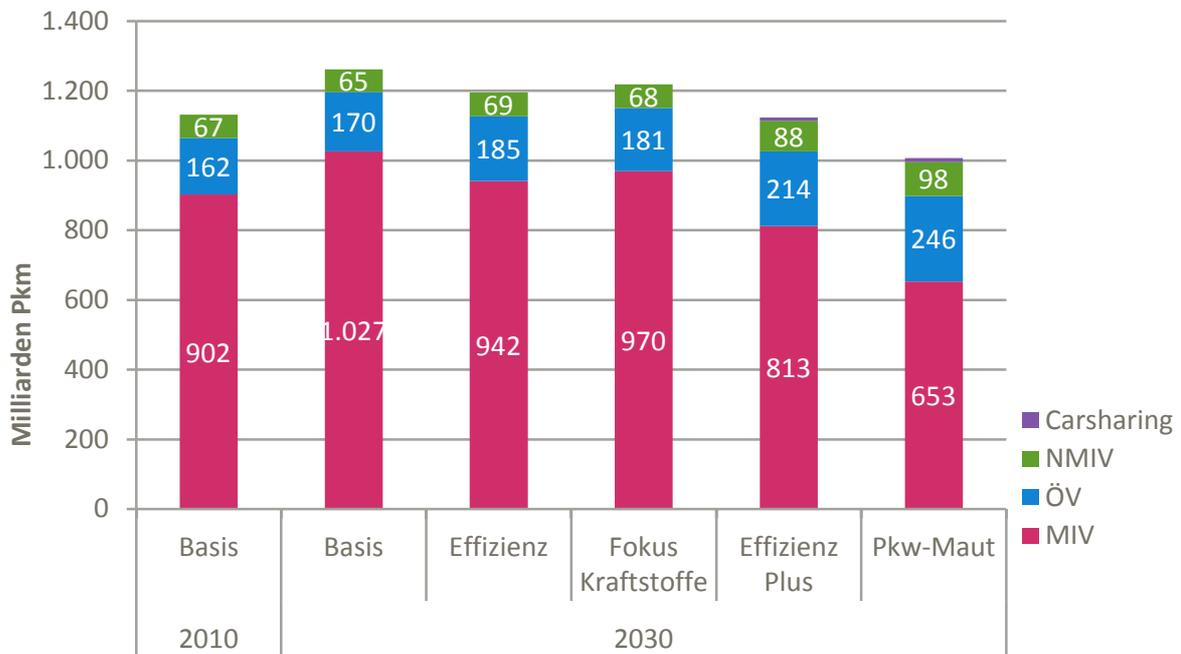


Quelle: Renewbility III

## Verkehrsleistung

Die Verkehrsleistung der Szenarien als wesentliche Verkehrskenngröße ist in Abbildung 7-4 dargestellt. In der Entwicklung der Verkehrsleistungen zeigen sich neben den oben bereits eingegangenen Änderungen der Aktivitäten- und Verkehrsmittelwahl auch die Wirkungen geänderter Zielwahl. So gehen die Verkehrsleistungen des MIV prozentual stärker zurück als die entsprechende Anzahl an Wegen. Dafür steigt die Verkehrsleistung des ÖV. Es werden also tendenziell kürzere MIV-Wege und etwas längere ÖV-Wege durchgeführt, was mit leicht erhöhten MIV-Kosten und vor allem im Szenario Effizienz Plus und der Szenarrette Pkw-Maut mit reduzierten ÖV-Zeiten zu begründen ist. In den letzten beiden Szenarien ist auch ein deutlicher Anstieg der Verkehrsleistung des NMIV zu verzeichnen. Dies liegt zum einen auch an der Verringerung der Attraktivität des MIV, zum anderen aber auch an der deutlichen Attraktivitätssteigerung des Radverkehrs.

Abbildung 7-4: Entwicklung der Personenverkehrsleistung in den Szenarien 2030



Quelle: Renewbility III

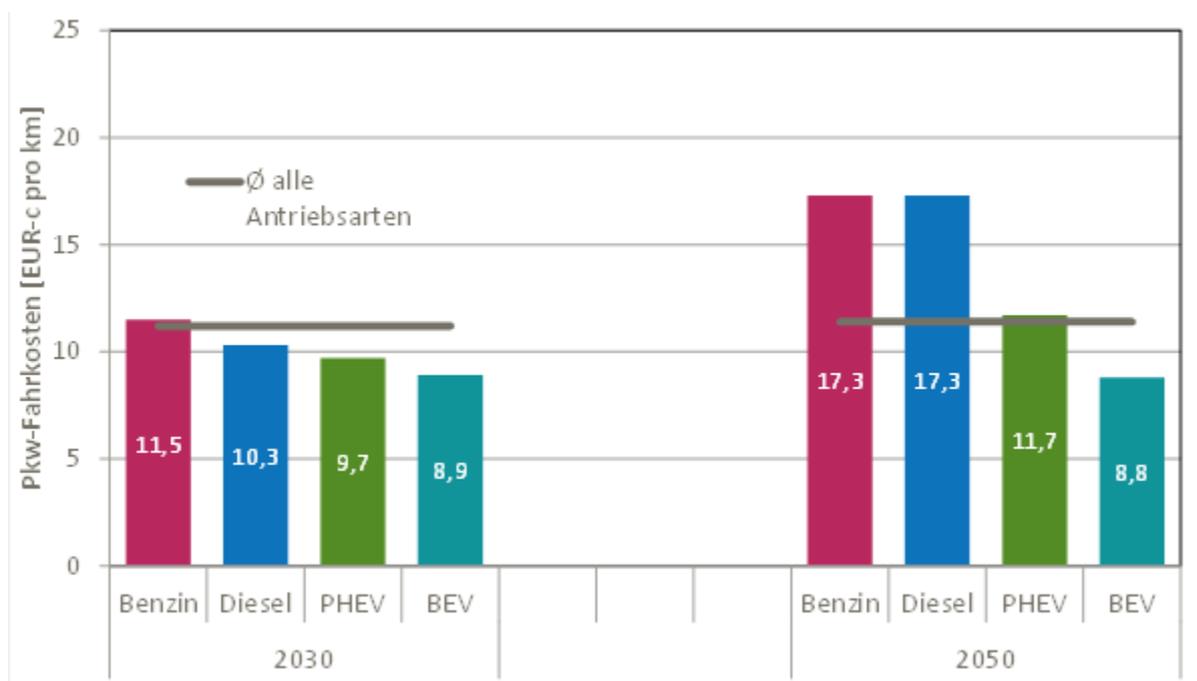
Die Wirkung der Pkw-Fahrtenkosten ist von besonderer Bedeutung. So steigen zwar die Kilometerkosten für die unterschiedlichen Pkw-Antriebsarten teilweise deutlich an, die tatsächlich realisierten Kosten bleiben zwischen den Szenarien jedoch nahezu unverändert bzw. sind nur geringfügig ansteigend (siehe Tabelle 7-1). Der Grund hierfür liegt in der veränderten Flottenstruktur und der Pkw-Wahl der Menschen. So führt der Anstieg der Kilometerkosten der fossilen Antriebe auch zur Anschaffung und Nutzung alternativer und fahrtkostengünstiger Fahrzeuge. Abbildung 7-5 verdeutlicht diesen Zusammenhang zwischen den durchschnittlichen Kosten pro Kilometer, den antriebsspezifischen Kosten sowie der Flottenzusammensetzung am Beispiel des Szenarios Effizienz. Nur in der Szenarrette Pkw-Maut sind die Kosten pro Kilometer deutlich höher, da es keine günstige Ausweichmöglichkeit innerhalb der Pkw-Flotte gibt. Dies hat somit einen sehr starken Effekt auf die Pkw-Nachfrage und führt zu einem gegenüber dem Szenario Effizienz Plus zusätzlichen deutlichen Rückgang der Verkehrsleistung.

Tabelle 7-1: Realisierte Pkw-Fahrtenkosten pro Kilometer im Jahr 2030

Szenario 2030	Basis	Effizienz	Fokus Kraftstoffe	Effizienz Plus	Pkw-Maut
Pkw-Fahrtkosten (Euro-c pro km)	9,8	11,2	11,0	11,3	15,7

Quelle: Renewbility III

Abbildung 7-5: Entwicklung der Pkw-Fahrtenkosten pro Kilometer und Antriebsart am Beispiel des Szenarios Effizienz

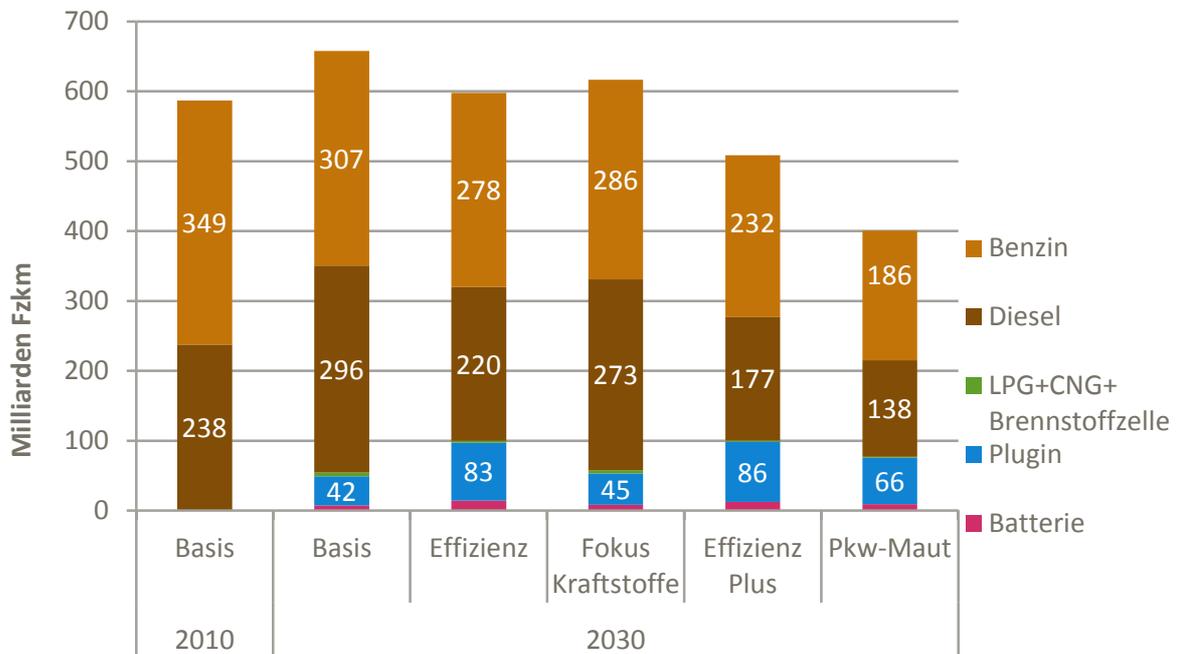


Quelle: Renewbility III

## Pkw-Fahrleistung

Neben dem Verkehrsaufkommen und der Verkehrsleistung ist die Pkw-Fahrleistung der dritte zentrale Kennwert zur Beschreibung der Verkehrsnachfrage und deren Änderung. Sie beschreibt die Summe aller mit dem Pkw zurückgelegten Wegstrecken und unterscheidet sich zur Pkw-Verkehrsleistung durch die Berücksichtigung der Besetzung der Pkw. Die Besetzungsgrade unterscheiden sich zwischen verschiedenen Fahrtzwecken teilweise deutlich. So liegt der mittlere Besetzungsgrad für die täglichen Arbeitswege bei nur knapp über einer Person, während er bei Urlaubsfahrten fast drei beträgt. Unter Berücksichtigung der zweckspezifischen Besetzungsgrade wurden die Fahrleistungen ermittelt.

Abbildung 7-6: Entwicklung der Pkw-Fahrleistung je Antriebsart in den Szenarien 2030



Quelle: Renewbility III

Für die Ermittlung detaillierter Ergebnisse der Klimawirksamkeit der Maßnahmen in den Szenarien sind antriebsdifferenzierte Fahrleistungen erforderlich. Hierfür erfolgte die Modellerweiterung und Anwendung zur Abbildung der Pkw-Wahl im Deutschlandmodell. Die Ergebnisse für das Jahr 2030 sind in Abbildung 7-7 dargestellt.

Zu erkennen ist zunächst, dass im Jahr 2010 nahezu ausschließlich mit Benzin und Diesel angetriebene Fahrzeuge in Deutschland genutzt wurden, wobei Benzinfahrzeuge mit ca. 60 % der Fahrleistung den höheren Anteil aufweisen. In der Basis 2030 legen dieselbetriebene Fahrzeuge fast genauso viele Kilometer zurück wie Benziner, während Plug-In-Fahrzeuge 40 Milliarden Kilometer zurücklegen und einen Anteil von ca. 6 % aufweisen. Alle anderen Antriebsformen weisen nur sehr geringe Anteile auf. In den anderen Szenarien nehmen die Fahrleistungen (wie die Verkehrsleistungen) ab. In den Szenarien Effizienz und Effizienz Plus erhöhen sich jedoch absolut die Fahrleistungen der Plug-In- und Batterie-Fahrzeuge. Die Fahrzeuge werden aufgrund der vergleichsweise geringeren Kilometerkosten mehr genutzt. So erreichen Plug-In-Fahrzeuge im Szenario Effizienz Plus über 16 % Anteil an den realisierten Fahrleistungen. Im Szenario Pkw-Maut reduzieren sich die Fahrleistungen aller Pkw-Typen, da die Maut für jedes Fahrzeug anfällt. Die Anteile der Antriebstypen zwischen den beiden letzten Szenarien sind nahezu identisch.

## 7.5 ERGEBNISSE 2050

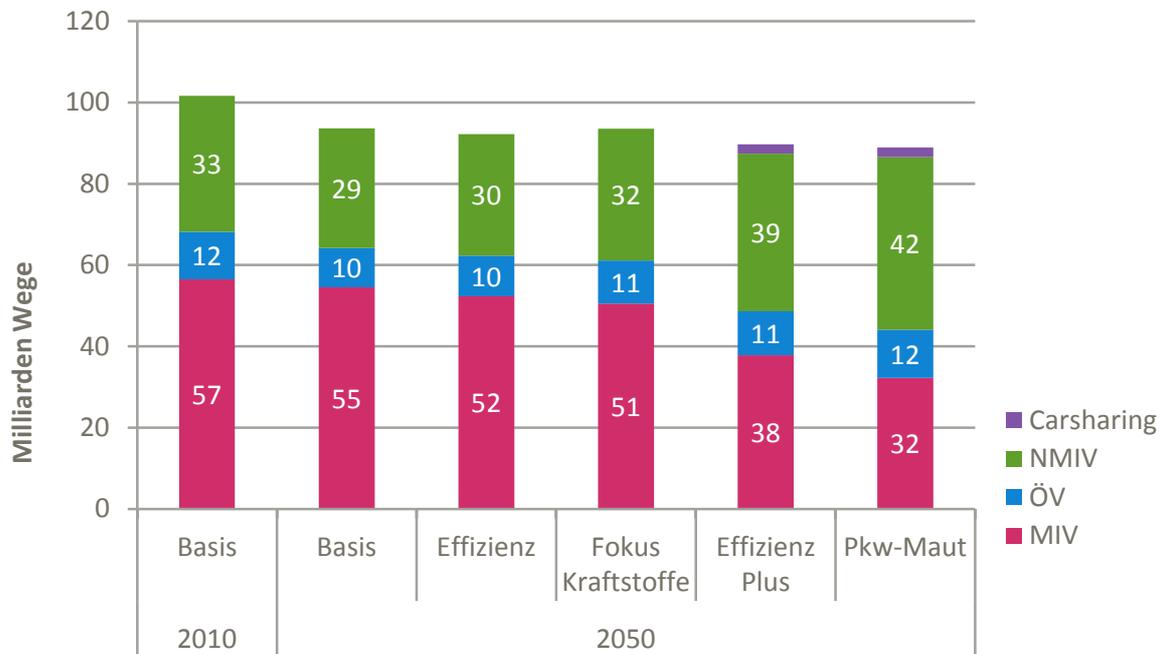
Neben der Betrachtung der mittelfristigen Ergebnisse des Jahres 2030 sind vor allem auch die Maßnahmenwirkungen und Ergebnisse für die langfristige Perspektive bis zum Jahr 2050 relevant. Zu dem Zeitpunkt haben die Maßnahmen und Regulierungen gegriffen und ermöglichen die Ableitung der klimarelevanten Wirkungen.

### Verkehrsaufkommen

In Abbildung 7-8 sind zunächst wiederum die Verkehrsaufkommen differenziert nach den Verkehrsmitteln abgebildet. Gut zu erkennen ist zunächst, dass die Verkehrsaufkommen insgesamt deutlich zurückgehen. Dies liegt, wie bereits in Kapitel 7.3 beschrieben, zunächst an der demografischen Entwicklung. Zudem gehen die Motorisierung und damit die Pkw-Verfügbarkeit zurück. Ist dies bei den Szenarien Effizienz und Fokus Kraftstoffe noch moderat mit etwas über 1 % gegenüber der Basis 2050, so sind es beim Szenario Effizienz Plus über 4 % und bei der Szenarrette Pkw-Maut 5 % Rückgang.

Interessant ist ebenfalls der Blick auf die Anteile der Verkehrsmittel an den Aufkommen. So bewegt sich der Anteil des MIV zwischen den Szenarien Basis, Effizienz und Fokus Kraftstoffe zwischen 54 und 58 %, für den ÖV zwischen zehn und 11 % und den NMIV zwischen 31 und 33 %. In den Szenarien Effizienz Plus und Pkw-Maut gibt es hingegen deutliche Verschiebungen zugunsten des NMIV (43 bzw. 48 %) und ÖV (12 bzw. 13 %). Der MIV weist hingegen nur noch einen Anteil von 42 % bzw. 36 % auf. Das Carsharing kommt auf 2 bzw. 3 % Anteil – bezogen auf ganz Deutschland. Es wird also bereits hier deutlich, dass in den Szenarien signifikante Unterschiede bei der Verkehrsnachfrage auftreten.

Abbildung 7-7: Entwicklung des Personenverkehrsaufkommens in den Szenarien 2050



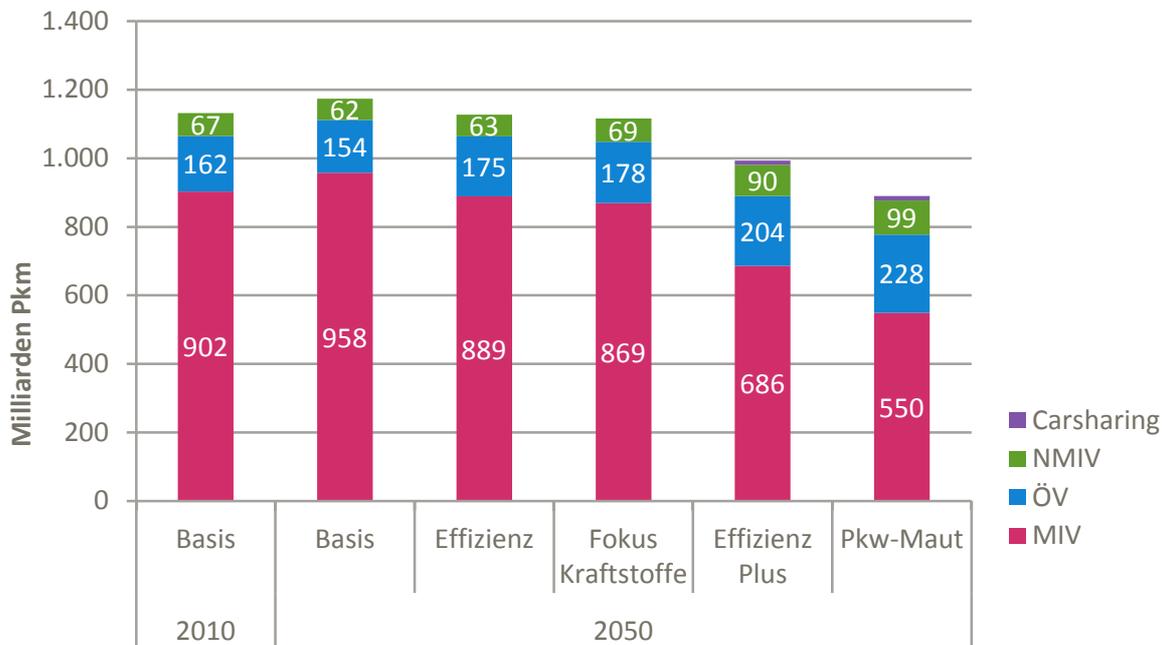
Quelle: Renewbility III

## Verkehrsleistung

Die Entwicklung der Verkehrsleistung ist in Abbildung 7-9 dargestellt. Insgesamt zeigt sich ein sehr ähnliches Bild wie im Jahr 2030, wobei die Verkehrsleistungen insgesamt szenarioabhängig um ca. 70 bis 130 Milliarden Personenkilometer niedriger liegen. Zu begründen ist dies wiederum mit den Änderungen der Rahmenbedingungen und der Wirkung der szenariospezifischen Maßnahmen. Die Verkehrsleistung fällt von der Basis bis zur Szenarettete Fokus Kraftstoffe leicht und in Effizienz Plus und Pkw-Maut deutlich ab. Getrieben wird dieses Bild wiederum durch die MIV-Verkehrsleistung.

Der Verlauf lässt sich erneut gut anhand der mittleren realisierten Pkw-Fahrtkosten verdeutlichen. Diese sind in Tabelle 7-2 zusammengestellt. Zwar unterscheiden sich die Kilometerkosten für die unterschiedlichen Antriebsarten deutlich, es zeigt sich jedoch, dass durch die realisierte Pkw-Wahl wiederum keine gravierenden Unterschiede auftreten (Ausnahme Pkw-Maut). Die Erhöhung der Kosten in der Szenarettete Fokus Kraftstoffe führt zur Reduzierung der MIV-Verkehrsleistung gegenüber der Basis 2050 um 9 %. Im Effizienz-Szenario sind die Kosten pro Pkw-Typ zwar nahezu identisch zur Szenarettete, durch eine deutlich veränderte Flotte sind jedoch viel mehr Plug-In- und Batterie-Fahrzeuge nutzbar, die geringere Kilometerkosten aufweisen. Somit fallen die realisierten Kilometerkosten um 1,3 Cent, und die MIV-Verkehrsleistung steigt um 20 Milliarden Personenkilometer.

Abbildung 7-8: Entwicklung der Personenverkehrsleistung in den Szenarien 2050



Quelle: Renewbility III

Die realisierten Pkw-Kilometerkosten sind im Szenario Effizienz Plus gegenüber dem Szenario Effizienz aufgrund der ähnlichen Flotte nahezu unverändert. Dennoch sinkt die Pkw-Verkehrsleistung aufgrund der zusätzlichen Maßnahmen und eine deutlich geringere Motorisierung um fast 23 %. Die zusätzliche Pkw-Maut erhöht die Kosten noch einmal erheblich. Zudem ist die Motorisierung noch etwas geringer als im Szenario Effizienz Plus. Dadurch fällt die Pkw-Verkehrsleistung auf 550 Milliarden Personenkilometer. Dies entspricht einem Rückgang gegenüber der Basis 2050 um ca. 43 %.

Die Verkehrsleistung des NMIV ist absolut vergleichbar mit dem Jahr 2030, was einem Anstieg des Anteils an der Gesamtverkehrsleistung 2050 entspricht. Hier wirken einerseits die Maßnahmen im Bereich des Pkw, aber auch die zusätzliche Attraktivierung. Der ÖV verliert zwar absolut an Verkehrsleistung, relativ entspricht die Änderung aber einem Anteilszuwachs an der Gesamtverkehrsleistung von bis zu 2 % gegenüber den jeweiligen Ergebnissen im Jahr 2030. Das Carsharing erzielt in den letzten beiden Szenarien einen deutschlandweiten Anteil von 1 bzw. 2 %.

Tabelle 7-2: Realisierte Pkw-Fahrtenkosten pro Kilometer im Jahr 2050

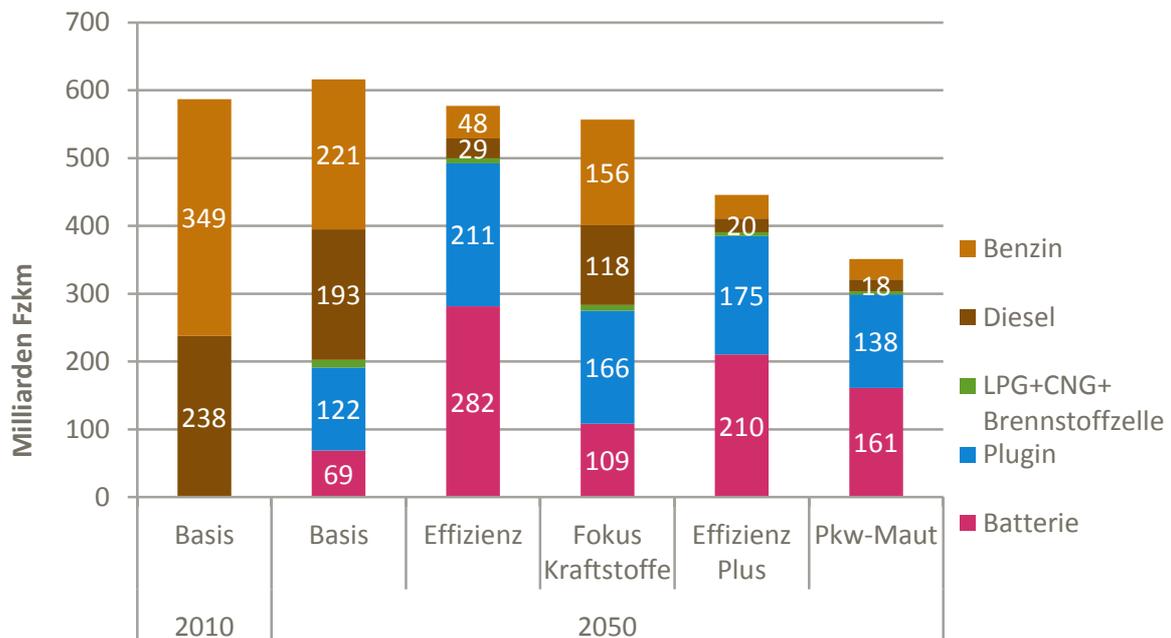
Szenario 2050	Basis	Effizienz	Fokus Kraftstoffe	Effizienz Plus	Pkw-Maut
<b>Pkw-Fahrtkosten (Euro-c pro km)</b>	10,7	12,7	11,4	11,5	16,0

Quelle: Renewbility III

## Pkw-Fahrleistung

In Abbildung 7-10 sind die Pkw-Fahrleistungen differenziert nach den Antriebsarten dargestellt. Gegenüber den Ergebnissen des Jahres 2030 sind deutliche Unterschiede zu erkennen. Bereits in der Basis weisen Plug-In- und Batterie-Fahrzeuge nennenswerte Anteile an der Gesamtfahrleistung auf (zusammen 31 %). Allerdings dominieren nach wie vor benzin- und dieselbetriebene Fahrzeuge. Im Effizienz-Szenario steigen die Anteile der Plug-In- und Batterie-Fahrzeuge auf knapp 85 %, bei einer Gesamtfahrleistung, die im Vergleich zur Basis um etwa 40 Milliarden Fahrzeugkilometer niedriger liegt.

Abbildung 7-9: Entwicklung der Pkw-Fahrleistung je Antriebsart in den Szenarien 2050



Quelle: Renewbility III

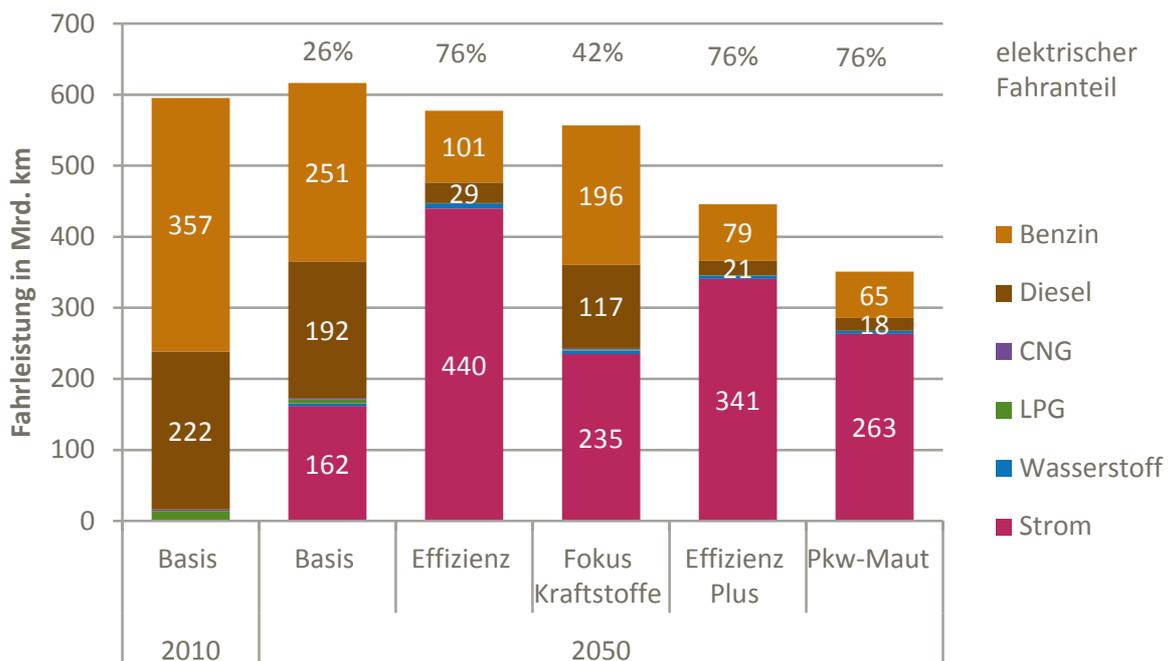
Ein gegenläufiger Effekt zeigt sich in der Szenarettete Fokus Kraftstoffe. Hier liegt der Anteil der Plug-In- und Batterie-Fahrzeuge an der Fahrleistung nur bei knapp 50 %, da keine spezifischen Maßnahmen zur Effizienzsteigerung oder zur Förderung von Elektromobilität

hinterlegt wurden. Aufgrund der höheren Kilometerkosten liegt die Fahrleistung insgesamt um 4 % niedriger als im Effizienz-Szenario. Die Anteile der Pkw-Typen an der Gesamtfahrleistung sind in den letzten drei Szenarien vergleichbar. Allerdings schlagen sich auch hier – wie auch bei der Verkehrsleistung – die zusätzlichen Maßnahmen in der Gesamtfahrleistung deutlich nieder.

Benzin- und Dieselfahrzeuge verlieren deutlich an Anteilen und besitzen zunehmend eine geringere Bedeutung. In den Szenarien Effizienz Plus und Pkw-Maut wird ein Großteil dieser Fahrleistungen im Fernverkehr erbracht, da die Fahrzeuge hier teilweise noch ihre Vorteile ausspielen können. Die Antriebe LPG, CNG und Brennstoffzelle spielen in allen Szenarien nur eine untergeordnete Rolle und weisen einen Anteil zwischen 1,9 % (Basis) bis 1,2 % (Effizienz Plus) auf.

Abbildung 7-11 zeigt die elektrisch zurückgelegte Fahrleistung in den Szenarien im Jahr 2050. Gegenüber der obigen Abbildung ist also auch der elektrische Fahranteil der Plug-In-Fahrzeuge berücksichtigt. Während der elektrische Fahranteil in der Basis nur bei 26 % liegt, werden in den Szenarien Effizienz, Effizienz Plus und Pkw-Maut über  $\frac{3}{4}$  der Pkw-Fahrleistung elektrisch zurückgelegt. In der Szenarierete Fokus Kraftstoffe dagegen liegt der elektrische Fahranteil nur bei 42 %.

**Abbildung 7-10: Elektrischer Fahranteil der Pkw im Jahr 2050**



Quelle: Renewbility III

## 7.6 FOKUS STADTVERKEHR

Zahlreiche Maßnahmen zielen auf die Reduzierung des MIV in Städten (siehe Kapitel 7.2). Daher sollen an dieser Stelle die Ergebnisse in Form der Summe der Verkehrsleistungen aller Kernstädte in Deutschland aufgezeigt werden. Dabei stehen die Szenarien Basis (zum Vergleich), Effizienz Plus und Pkw-Maut im Fokus, da hier die Maßnahmen im Besonderen zum Tragen kommen. Nach diesen deutschlandweiten Betrachtungen erfolgen zudem Lupenbetrachtungen am Beispiel Berlins.

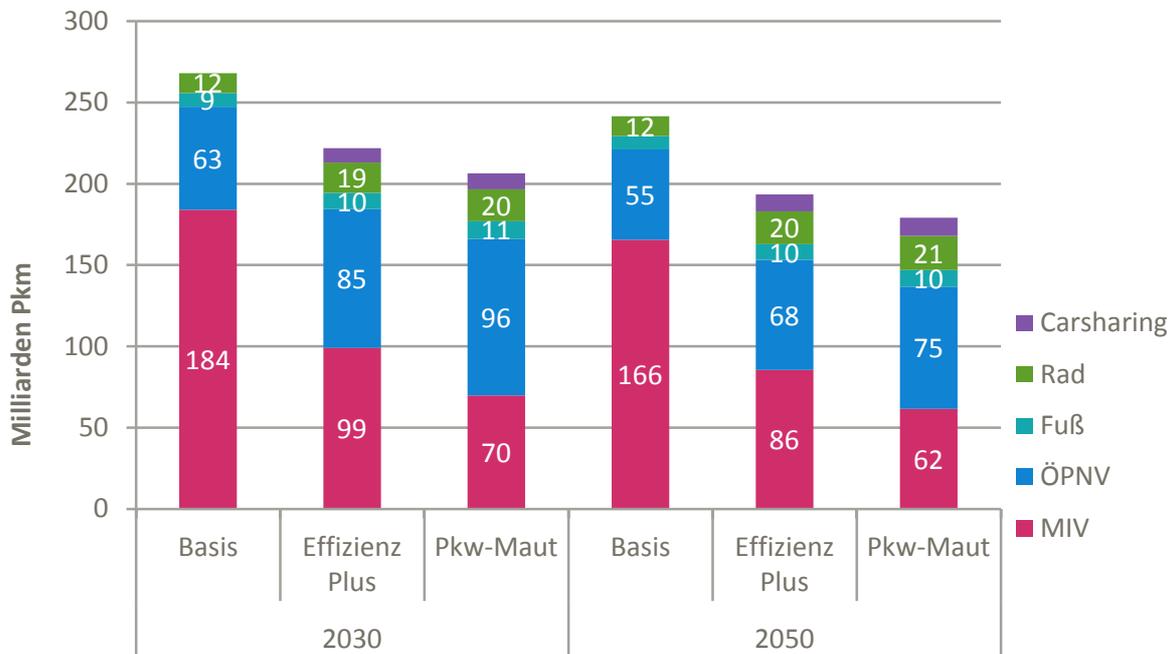
### Ergebnisse des Deutschlandmodells

In Abbildung 7-12 sind die Verkehrsleistungen der Kernstädte für die Jahre 2030 und 2050 gegenübergestellt. In der Basis 2030 dominiert der MIV mit 184 Milliarden Personenkilometer bei einer Gesamtleistung von 268 Milliarden. Dies entspricht einem Anteil von 69 %, während der ÖV auf 24 % sowie Fuß auf 3 % und Rad auf 5 % kommen. Die Basis im Jahr 2050 zeigt ein vergleichbares Bild, lediglich die Gesamtverkehrsleistung ist um etwa 10 % niedriger.

Das Szenario Effizienz Plus weist ein deutlich anderes Ergebnis auf. Die MIV-Verkehrsleistung sinkt im Jahr 2030 um 46 % und im Jahr 2050 um 53 % – jeweils bezogen auf die Basis 2030. Auch hier spielen die veränderten Kilometerkosten und Motorisierungsraten eine wichtige Rolle, zudem wirken aber zusätzliche Maßnahmen im städtischen Verkehr. Im Besonderen Einfahrbeschränkungen, aber auch attraktivierende Maßnahmen der konkurrierenden Verkehrsmittel, wie Beschleunigung des Radverkehrs oder das Carsharing, haben dabei einen großen Einfluss.

Die zusätzliche Pkw-Maut wirkt wiederum dämpfend auf die Verkehrsleistungen und führt zudem zu noch deutlicheren modalen Verschiebungen. So wird dann nur noch etwa ein Drittel der Verkehrsleistung in deutschen Kernstädten durch den MIV realisiert, während der Anteil des ÖV auf 42 % steigt. Das Carsharing erzielt einen Anteil von 6 % und etabliert sich somit als eine wichtige Alternative in den Städten.

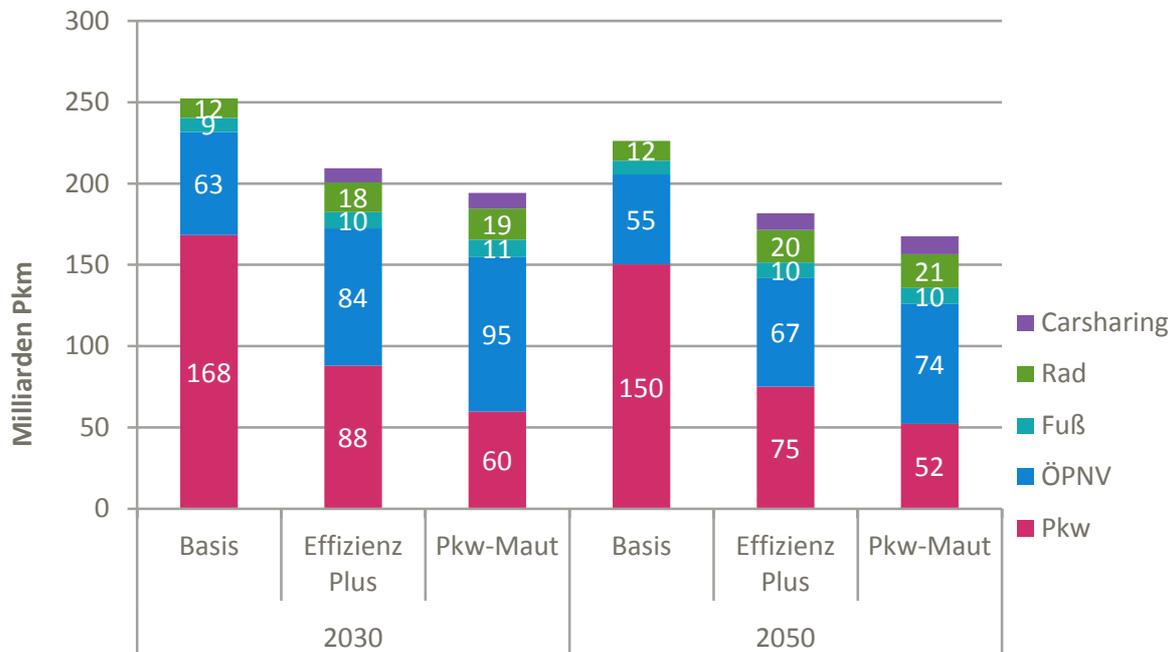
Abbildung 7-11: Entwicklung der Verkehrsleistung in Kernstädten in den Szenarien



Quelle: Renewbility III

In den oben gezeigten Daten wird der MIV betrachtet, d. h. private Pkw, gewerbliche Pkw und motorisierte Zweiräder. Um den Effekt auf private Pkw, welche die absolut dominierende Rolle im MIV spielen, noch zu verdeutlichen, sind in Abbildung 7-13 die Modellergebnisse dargestellt, die sich ohne Berücksichtigung der gewerblichen Pkw und motorisierten Zweiräder ergeben. Die Ergebnisse sind nahezu gleich, wobei die Verkehrsleistungen des Pkw etwas unter denen des MIV liegen. Zudem gibt es geringfügige Abweichungen bei einigen Alternativen, da aus Konsistenzgründen die verlagerten Verkehre der gewerblichen Pkw und Motorräder ebenfalls herausgerechnet wurden.

Abbildung 7-12: Entwicklung der Verkehrsleistung in Kernstädten in den Szenarien (ohne motorisierte Zweiräder und Personenwirtschaftsverkehr)



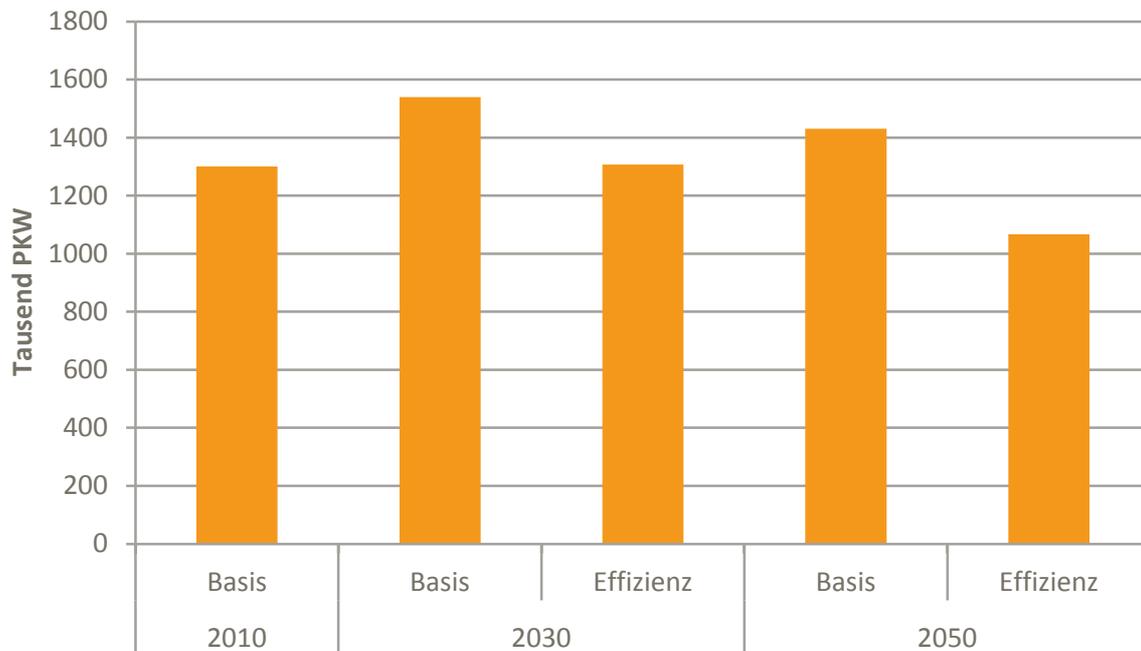
Quelle: Renewbility III

## Ergebnisse des Mikromodells: Beispiel Berlin

Begleitend zu der Modellierung der deutschlandweiten Maßnahmenwirkungen erfolgte eine Lupenbetrachtung der Szenarien für die Beispielräume Main-Rhön, Braunschweig sowie Berlin mit Hilfe des mikroskopischen Verkehrsnachfragemodells TAPAS (vgl. Abschnitt 4.4.2).

Beispielhaft werden hier die detaillierten Ergebnisse für den Binnenverkehr der Kernstadt Berlin dargestellt. Für die Analyse wurden die Flottengrößen für die Untersuchungsräume separat berechnet. Die resultierende Flottengröße für Berlin ist in der Abbildung 7-14 dargestellt. Wegen der geringen Unterschiede zum Szenario Effizienz Plus wurde auf eine separate Flottenanpassung durch die Pkw-Maut verzichtet.

Abbildung 7-13: Entwicklung der Flottengröße in Berlin in den Szenarien



Quelle: Renewbility III

Die Gesamtverkehrsleistung Berlins ist in Abbildung 7-15 dargestellt. Im Vergleich zum Bundesdurchschnitt der Kernstädte reduziert sich das Aufkommen sehr viel geringer um nur 3 % im Jahr 2030 und 9 % im Jahr 2050. Dies liegt hauptsächlich daran, dass die Maßnahmen zur Stadt der kurzen Wege in Berlin eine geringere Veränderung der Wegelängen hervorrufen. Die Nahversorgung in Berlin ist wegen der polyzentrischen Struktur bereits sehr gut. Daher zeigt ein zusätzlicher Ausbau der Nahversorgung weniger Wirkung.

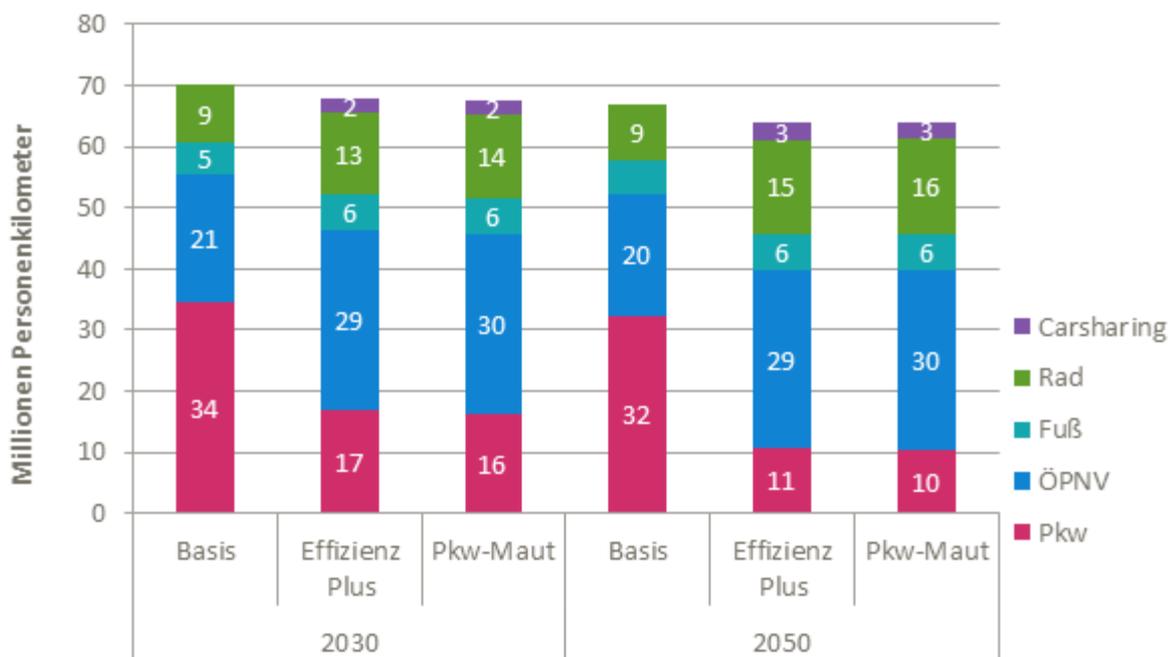
Schon in der Basis ist der Anteil der Verkehrsleistung des MIV geringer als der Bundesdurchschnitt der Kernstädte. Dies ist auf die geringere Pkw-Verfügbarkeit kombiniert mit einem flächendeckenden ÖV-Angebot zurückzuführen.

Der ÖV übernimmt in den Szenarien in Berlin die stärkste Rolle. Die starke Förderung des ÖV und die gleichzeitige Verringerung der Attraktivität und Verfügbarkeit des MIV führen dazu, dass 30 % der Wegelängen vom ÖV bewältigt werden. Ebenso werden im Vergleich zum Bundesdurchschnitt der Kernstädte überdurchschnittlich viele Wege mit dem Rad und zu Fuß durchgeführt, was wiederum in Einklang mit der reduzierten Pkw-Verfügbarkeit kombiniert mit der Beschleunigung des Radverkehrs steht. Der Umweltverbund aus Fuß, Rad und ÖV übernimmt den Großteil der Verkehrsleistung, so dass der MIV aus der Stadt zurückgedrängt wird.

Auch wenn in Berlin schon aktuell Carsharing-Angebote existieren, wurden diese aus Gründen der Konsistenz zur Modellierung im Deutschland-Modell für die Basis nicht berücksichtigt. In den Szenarien trägt Carsharing im Jahr 2030 mit 2 % nur einen geringen Teil der Fahrleistung bei. Allerdings werden 11 % der Pkw-Fahrten mit Carsharing-Angeboten zurückgelegt. In den Szenarien des Jahres 2050 zeigt sich eine Verstärkung dieses Trends: Obwohl der Pkw anteilig abnimmt, kann Carsharing seinen Anteil steigern und erfüllt damit den Zweck für spezielle Fahrten, die mit dem ÖV nicht zurücklegbar sind. Der Carsharing-Anteil an Pkw-Fahrten beträgt für das Jahr 2050 bereits 30 %.

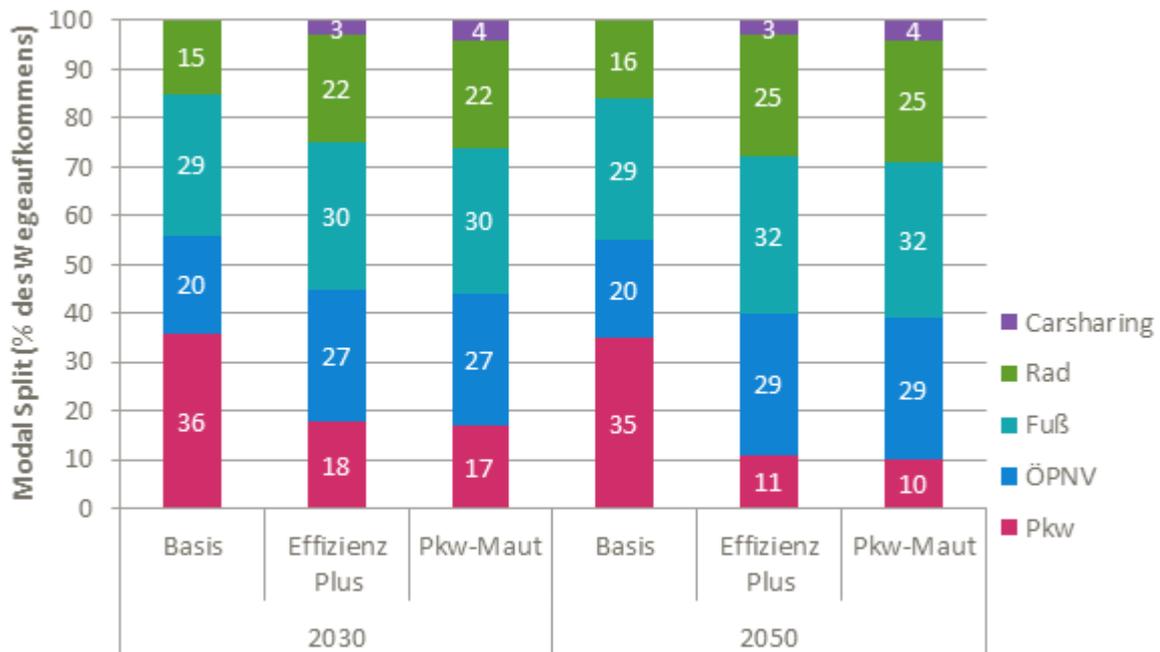
Insgesamt spiegelt die mikroskopische Betrachtung Berlins die Resultate der Kernstädte des Deutschlandmodells wider. Allerdings wirken sich Maßnahmen wie „Stadt der kurzen Wege“ geringer aus, wenn wie in Berlin bereits ein gut ausgebautes Nahversorgungsangebot existiert. Die Förderung des Umweltverbundes und die gleichzeitige Verringerung der Attraktivität des MIV hat großes Veränderungspotenzial und kann die Belastung durch den MIV in den Kernstädten verringern.

**Abbildung 7-14: Entwicklung der Verkehrsleistung in Berlin in den Szenarien (ohne Pendlerverkehr)**



Quelle: Renewbility III

Abbildung 7-15: Modal Split in Berlin in den Szenarien (ohne Pendlerverkehr)

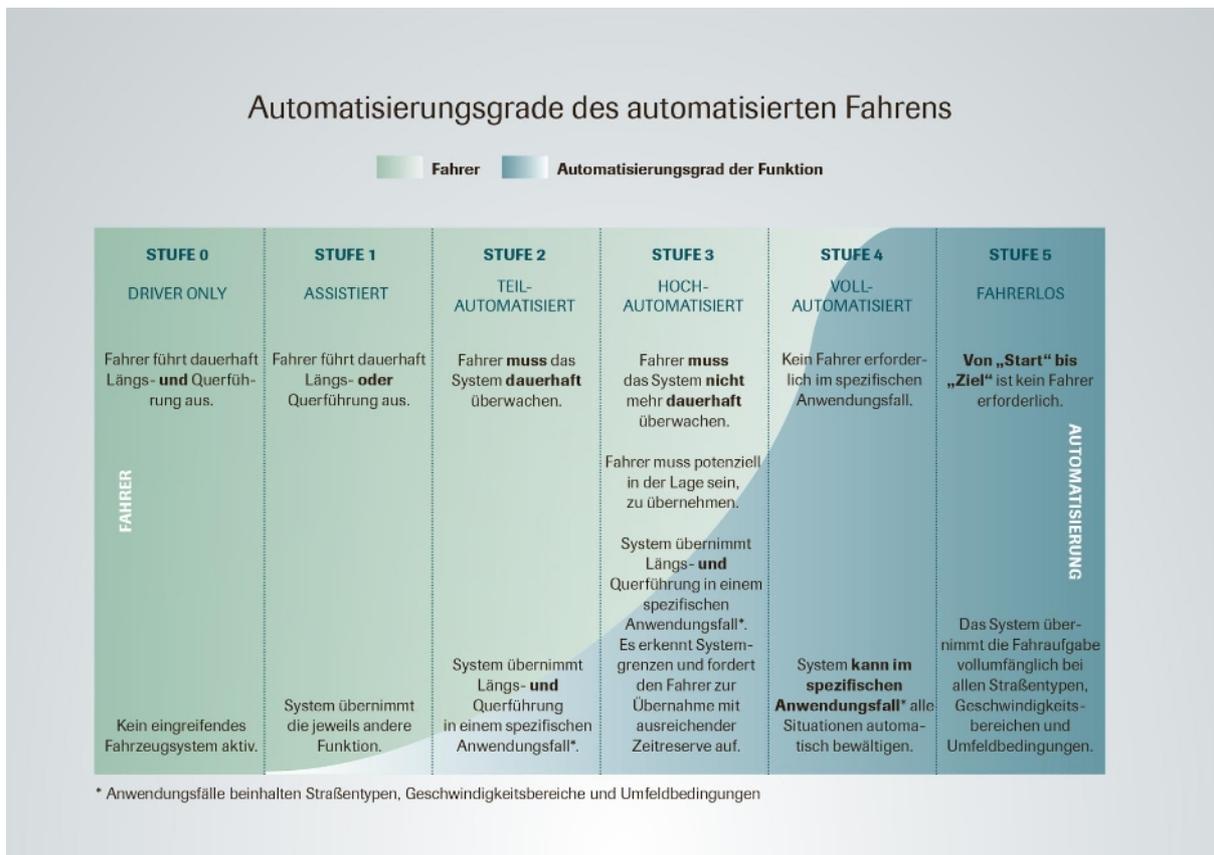


Quelle: Renewbility III

## 7.7 AUTONOMES FAHREN

Autonomes oder automatisiertes Fahren, insbesondere auf der Straße, hat sich in den letzten Jahren zu einem Thema entwickelt, mit dem sich mittlerweile nicht nur das Fachpublikum, sondern auch die breite Öffentlichkeit auseinandersetzt. Unter dem Begriff wird im Allgemeinen eine Technik verstanden, mit der Fahrzeuge ohne menschliche Einwirkung und mit Hilfe computergestützter Systeme die Navigation, sowie die komplette Längs- und Querführung selbstständig ausführen (VDA o.J., SAE 2014). Der Grad der Automatisierung variiert dabei stark und reicht vom Einsatz von Assistenzsystemen für spezifische Fahraufgaben bis hin zur vollständigen Automatisierung, bei der kein Eingriff der Insassen vorgesehen ist (vgl. Abbildung 7-17).

Abbildung 7-16: Automatisierungsgrade des Autonomen Fahrens gemäß VDA-Klassifikation

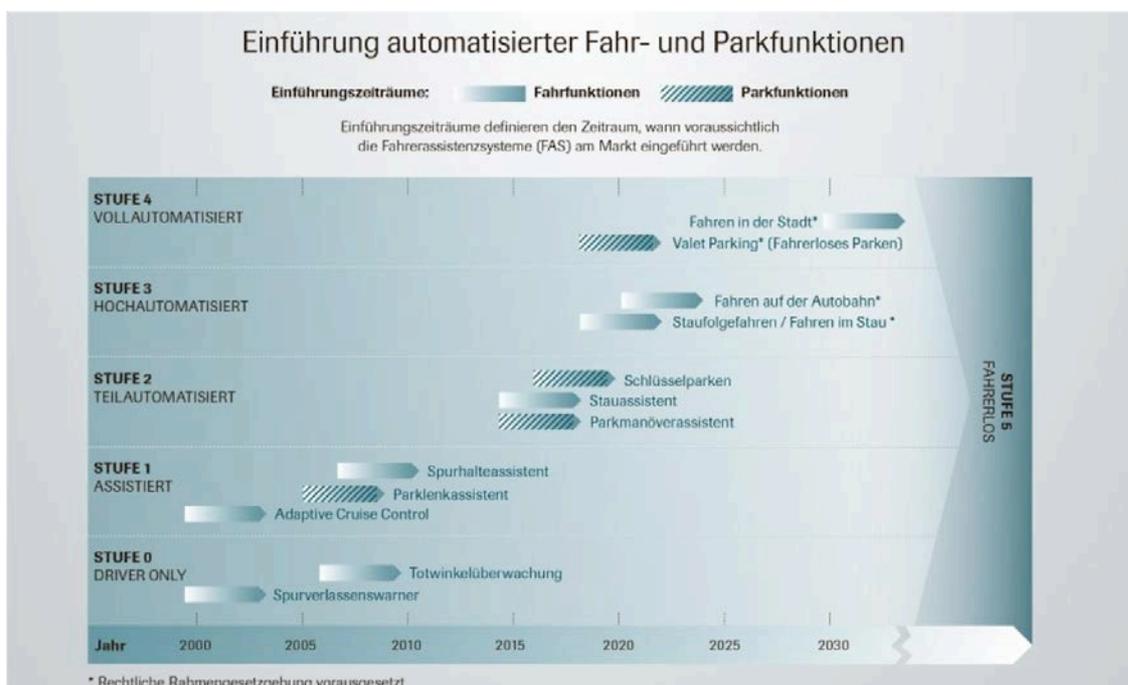


Quelle: VDA o.J.

Trotz bestehender Unsicherheiten, insbesondere hinsichtlich rechtlicher und technischer, aber auch ethischer Aspekte (vgl. Gasser et al. 2015), wird davon ausgegangen, dass erste Formen autonomer Straßenfahrzeuge innerhalb der nächsten Dekade in das Verkehrssystem implementiert und zu weitreichenden Folgen für das Verkehrssystem führen werden (Stoll 2016, Ciferri 2016, Hauser 2015). Abschätzungen zum zeitlichen Horizont, ab dem mit einem substantiellen Anteil entsprechender Fahrzeuge auf den Straßen zu rechnen ist, unterscheiden sich stark und sind nicht zuletzt stark abhängig vom angenommenen Anwendungsfall und Automatisierungsgrad (vgl. u. a. Litman 2015). Während bereits jetzt in den derzeitigen Premiumfahrzeugen weitreichende Unterstützungsfunktionen der ersten, teilweise auch höheren Klassifikation gemäß VDA verfügbar sind, wird davon ausgegangen, dass insbesondere bis zur Verfügbarkeit hochautomatisierter Fahrzeuge im städtischen Bereich noch mehrere Jahrzehnte vergehen werden (vgl. beispielsweise Abbildung 7-18). Die dabei vorrangig diskutierten, nachfolgend kurz skizzierten Anwendungsfälle höherer Automatisierungsgrade im Personenverkehr werden in Winner (2015) eingehend diskutiert:

- Beim Autobahnpilot kann die Fahraufgabe auf definierten Straßentypen (Bundesautobahnen und autobahnähnlichen Schnellstraßen) temporär abgegeben werden.
- Der Parkpilot, auch als Valet Parken bezeichnet, ermöglicht die fahrerlose Abstellung des Fahrzeuges an vorher definierten Stellen bzw. die Bereitstellung des Fahrzeuges am gewünschten Ort der Abholung.
- Dem vollautomatisierten Fahrzeug kann die Fahraufgabe bei Wunsch übertragen werden; der Fahrer muss dabei jederzeit in der Lage sein, diese nach Vorankündigung wieder zu übernehmen.
- Als Vehicle on Demand, oftmals auch als Robotaxi, werden Fahrzeuge bezeichnet, die als autonome Fahrzeugflotten eine individuelle Mobilität ermöglichen. Ein Eingriff der Passagiere in den Fahrvorgang ist dabei nicht vorgesehen.

**Abbildung 7-17: Einführungshorizonte automatisierter Fahr- und Parkfunktionen gemäß VDA**



Quelle: VDA o.J.

Insbesondere diesen Fahrzeugen mit höheren Automatisierungsgraden werden in der Fachöffentlichkeit weitreichende Potenziale zur Verbesserung drückender negativer Auswirkungen von Verkehr zugeschrieben – insbesondere hinsichtlich der Verbesserung des Verkehrsflusses (siehe bspw. Fagnant & Kockelman 2013) und der verkehrlich bedingten Emissionen (Wadud et al. 2016), der Verkehrssicherheit (u. a. Brookhuis et al. 2001, Hoogendorn et al. 2014), der (Park)Raum- (Heinrichs 2016) und der Zeitnutzung (Cyganski et al. 2015). Art und Umfang der erwarteten Auswirkung unterscheiden sich dabei stark je nach

Anwendungsfall, dem Grad der Durchdringung der Gesamtflotte mit der entsprechenden Technologie und einer Vielzahl der in den Studien zugrunde gelegten Annahmen. Gleichzeitig deuten Umfragen immer wieder darauf hin, dass weder die positive Betrachtungsweise noch das starke technologische Interesse von der generellen Öffentlichkeit in gleichem Maße geteilt werden (Fraedrich et al. 2016). So erklärte bspw. die Boston Consulting Group die gesellschaftliche Akzeptanz zum „Make or Break for AV Adoption“ (Lang et al. 2015) und neben technischen und regulativen Aspekten als größte Hürde der Einführung entsprechender Fahrzeuge (BCG 2015).

Mit einer Abgabe der Fahraufgabe nur in spezifischen Situationen wird der Autobahnpilot häufig als Einstiegsszenario in die Automatisierung betrachtet. Insbesondere auf längeren Überlandfahrten kann er zu einer Entlastung des Fahrenden beitragen – gemäß Continental (2013) ist eine entsprechende Funktion insbesondere bei stressbelasteten oder als lästig empfundenen Situationen wie Staus oder Baustellen positiv konnotiert. Neben der Entlastung ist die Möglichkeit einer veränderten, zumeist mit erhöhter Sinnhaftigkeit oder Produktivität assoziierten Zeitnutzung nach der verbesserten Verkehrssicherheit der wohl meistgenannte Vorteil entsprechender Fahrzeuge – der zu einer Attraktivitätssteigerung des Pkw führen dürfte.

Eine Zunahme der Fahrleistung scheint auch bei der Vollautomatisierung des privaten Pkw wahrscheinlich, wird hier nicht nur von einer besseren Nutzungsmöglichkeit der Onboardzeit, sondern auch von einem Sinken der Besitz- und Nutzungshemmungen insbesondere bei unerfahrenen, unsicheren oder auch älteren Fahrenden ausgegangen (vgl. u. a. Litman 2015, Cyganski 2016). Hinreichende Durchdringungsraten vorausgesetzt, wird außerdem mit einer Verbesserung des Verkehrsflusses und damit letztlich geringeren Stau- und Reisezeiten sowie einer erhöhten Planbarkeit des Reiseaufwandes gerechnet.

Einen besondere Rolle nimmt das Valet Parken ein, geht man davon aus, dass es sich quasi um einen nur geringfügig modifizierten „normalen“ Pkw handelt, bei dem die Fahraufgabe unverändert bestehen bleibt. Eine Kombination der Funktion mit anderen Automatisierungsformen ist jedoch stark anzunehmen. In seiner originären Form – der Parkunterstützung – wird dem Valet Parken insbesondere in urbanen Gebieten ein großes Potenzial zur Senkung des Parkdrucks und der Verringerung der Stellplatzflächen zugesprochen (vgl. u. a. Heinrichs 2016). Der Komfortanstieg, der sich dem Autonutzer durch die Verringerung der Zugangs- und Abgangszeiten bei gleichzeitig eventuell sinkenden Parkkosten bietet, dürfte gleichzeitig zu einer zunehmenden Nutzung des Pkw beitragen. Auch ist von einer substantziellen Verringerung der Parksuchverkehre in Gebieten mit hohem Parkdruck auszugehen.

Die Auswirkung der Valet-Park-Funktion auf den Pkw-Besitz wird vor allem in Kombination mit Vollautomatisierungsvarianten diskutiert, die zur Verfügbarkeit einer neuen Mobilitätsoption in Form autonomer Taxiflotten führen könnte. Sogenannte Vehicle on Demand oder Robotaxi könnten insbesondere in urbanen Gebieten weitreichende Auswirkungen auf das tägliche Verkehrsverhalten und das Verkehrssystem mit sich bringen. Nicht nur der Wegfall der etwaigen Stellplatzproblematik, auch ein substantieller Rückgang des privaten Pkw-Besitzes und ein Boom des Carsharings werden in diesem Zusammenhang prognostiziert (vgl. u. a. Willumsen 2013, Fagnant & Koppelman 2013, Cyganski 2016, Wadud et al. 2016). Die Verfügbarkeit einer individuellen, unabhängigen Mobilität auch für Personen ohne Führerschein könnte zu einem Anstieg der Pkw-Fahrleistung führen: Nicht nur durch die Zunahme der Pkw-Nutzung, sondern auch durch die Zunahmen von Leerfahrten. Gleichzeitig ist von einem substantiellen Rückgang sogenannter Bring- und Holwege auszugehen. Fahrdienste, Taxen und der öffentliche Verkehr könnten sich in einer verschärften Wettbewerbssituation zum Individualtransportmittel wiederfinden. Besondere Relevanz kommt dabei der Frage zu, ob diese Flotten durch die Schaffung einer gut aufeinander abgestimmten, verlässlichen Zubringermobilität zu den Angeboten des ÖV eine diesen stützende Funktion einnehmen oder auch die bequeme Überwindung der „letzten Meile“ im öffentlichen Fernverkehr gewährleisten und so die intermodale Verkehrsmittelnutzung fördern. Genauso denkbar ist zum derzeitigen Zeitpunkt aber auch, dass sie die Versorgung mit öffentlichen Massenverkehrsmitteln nicht ergänzen, sondern langfristig sogar ganz ersetzen könnten (vgl. bspw. Willumsen 2013).

Vor dem Hintergrund der skizzierten erwarteten Implikation autonomer Fahrzeuge auf das Verkehrssystem der Zukunft stellte Luis G. Willumsen, einer der renommiertesten Wissenschaftler für die Verkehrsmodellierung, folgerichtig bereits 2013 auf einer Fachkonferenz fest: „We can no longer ignore them [autonome Fahrzeuge], if planning horizon is 10+ years“ (Willumsen 2013). Gleichzeitig muss aber konstatiert werden, dass die Erkenntnissituation, ab wann, wie und in welchem Maße sich die neuen Technologien auf dem Markt etablieren und vor allem auf das Mobilitätsverhalten auswirken werden, naturgemäß schwierig ist und zum derzeitigen Zeitpunkt kaum belastbare Aussagen und Quantifizierungen der Wirkung zulässt.

Bis vor wenigen Jahren konzentrierte sich die verfügbare Literatur hauptsächlich auf technische Aspekte der Automatisierung. In jüngerer Vergangenheit finden sich zunehmend Studien, die sich mit der Nutzerakzeptanz und etwaigen aus der Verfügbarkeit autonomer Fahrzeuge resultierenden Änderungen im Mobilitätsverhalten auseinandersetzen. Diese lassen sich hinsichtlich ihrer Methodik in zwei Arten unterteilen (vgl. Lenz et al. 2016):

Zunächst existieren einige empirische Studien, die aufbauend auf qualitativen und quantitativen Methoden der empirischen Sozialforschung die Akzeptanz solcher Fahrzeuge und die jeweiligen Einstellungen und prospektiven Verhaltensänderungen der potenziellen Nutzer zu erforschen suchen. Beispiele hierfür sind u. a. Smud et al. (2015), Schoettle & Sivak (2014) oder Fraedrich et al. (2015). Eine zweite Methodengruppe umfasst in letzter Zeit vermehrt durchgeführte Studien, die versuchen, mit Hilfe von „Was-wäre-wenn-Szenarien“ die Implikationen spezifischer Anwendungsfälle des automatisierten Fahrens für das Verkehrsverhalten und die Verkehrsnachfrage zu explorieren. Das wohl am häufigsten untersuchte Beispiel ist hier das Vehicle on Demand (siehe bspw. Fagnant & Kockelman 2014 oder OECD/ITF & CPB 2015). Die Anwendung der hierbei in der Regel genutzten Verkehrsmodelle setzt eine Vielzahl an stark von Annahmen getriebenen Nutzungs- und Verlagerungsquantifizierungen voraus, die leider nicht immer gut dokumentiert sind und somit Nachvollziehbarkeit und Übertragbarkeit der Studien sehr erschweren. Die im Rahmen des IFMO-Projektes „Autonomes Fahren – Die Auswirkung der Fahrzeugautomatisierung auf das Verkehrsverhalten“ erstellte Studie zur Wirkung der Automatisierung bei privaten Pkw sei als Beispiel einer weitreichenden Dokumentation der zu Grunde gelegten Annahmen genannt (Kröger et al. 2016). Gleichzeitig gilt auch hier, dass Aussagen über Eintrittswahrscheinlichkeit und -zeitpunkt der getätigten Annahmen kaum möglich sind und insbesondere Interaktionen zwischen verschiedenen Formen des Angebotes, seien es unterschiedliche Ausprägungen der Automation oder auch das Zusammenspiel mit einem vorhandenen ÖV-Angebot, in ihrer Wirkung auf das Modalverhalten und den Pkw-Besitz schwer zu antizipieren sind.

Zusammenfassend lässt sich konstatieren, dass zeitlicher Horizont und Auswirkungen der Automatisierung zum derzeitigen Zeitpunkt kontrovers diskutiert werden. Belastbare Daten zur Wirkung des autonomen Fahrens auf den Besitz und die Nutzung entsprechender Fahrzeuge, insbesondere in der Wechselwirkung mit anderen Verkehrsmittelanangeboten, liegen kaum vor, sodass das autonome Fahren in den Verkehrsnachfragemodellen in den Szenarien von Renewbility III nicht adäquat abgebildet werden kann. Auf eine entsprechende Integration in die Szenarienrechnungen wurde daher verzichtet.

Zum derzeitigen Zeitpunkt sind zwei Entwicklungsrichtungen denkbar, die sich wie nachfolgend pointiert formulieren lassen:

- „Die Automatisierung wird Carsharing sehr stark pushen, private Pkw sind nicht mehr gefragt“: Trifft diese Aussage zu, so wären im städtischen Raum keine privaten Pkw mehr erforderlich, ihre Zahl würde stark zurückgehen. Die verbesserte Integration verschiedener Mobilitätsformen würde zu einer Verlagerung auf Alternativen führen, der

Bahnfernverkehr und der Personennahverkehr gewinnen Nutzer, indem sie die Angebote komplettieren.

- „Autofahren wird noch komfortabler, da das Auto alleine parkt und Fahrzeit nutzbar wird“: In dieser Variante steigt die Attraktivität des Pkw, die Nutzung nimmt im städtischen Raum und darüber hinaus substanziell zu. Der öffentliche Verkehr verliert an Bedeutung.

Da die Digitalisierung grundsätzlich sowohl dafür geeignet ist, den ÖPNV weiter zu attraktivieren als auch den MIV, wird eine Auswirkung der Automatisierung auf die Verkehrsnachfrage in die eine oder andere Richtung in den Szenarien nicht angenommen. Entscheidend für die Entwicklung des autonomen Fahrens werden neben der gesellschaftlichen Akzeptanz der Fahrzeuge, den Adaptionsraten vor allem auch die politischen Rahmenbedingungen sein: Fördern diese mehr Lebensqualität, mehr öffentlichen Verkehr und weniger Pkw? Oder wird weiterhin das aktuelle Modell des (privaten) Pkw in den Vordergrund gestellt?

## 7.8 FAZIT

Die Analysen zur Entwicklung des Personenverkehrs zeigen deutliche Änderungen der Verkehrsnachfrage für die verschiedenen Szenarien und betrachteten Jahre gegenüber der Basisentwicklung. So ändert sich zwar die Anzahl an Wegen zwischen den Szenarien insgesamt nur geringfügig, bis zum Jahr 2050 geht die Zahl jedoch generell zurück aufgrund des demografischen Wandels in Deutschland. In Abhängigkeit der Maßnahmen gehen die Verkehrsleistungen insgesamt deutlich zurück, wobei der MIV teilweise deutlich verliert, während die geförderten Verkehrsmittel (ÖV, Rad) hinzugewinnen. Der im Jahr 2050 hohe Bestand an alternativen Pkw-Antriebstechnologien und deren teilweise deutlich günstigeren Nutzerkosten pro Kilometer führen zu einer völlig neuen antriebspezifischen Zusammensetzung in den Pkw-Fahrleistungen hin zu alternativen Antrieben.

Die Berechnungen zeigen, dass durch Förderung klimafreundlicher Pkw-Technologien einerseits und gezielte verkehrspolitische Entscheidungen zur Förderung alternativer Verkehrsmittel andererseits nennenswerte Änderungen der bestehenden Verkehrsnachfragestrukturen im Personenverkehr hin zu einem nachhaltigen Gesamtverkehrssystem möglich sind.

Kernstädte machen etwa ein Drittel der Alltagsverkehrsleistung und ca. 20 % der Gesamtverkehrsleistung aus. Die Kommunen spielen eine ganz wesentliche Rolle: Die Verbesserung der Lebensqualität in Städten ist ein relevanter Hebel für den Klimaschutz im Verkehrssektor. Wesentliche Flankierungsmaßnahme für die Kommune ist die

Parkraumbewirtschaftung mit steigenden Gebühren. Wenn der öffentliche Verkehr und Fuß- und Radverkehr gefördert werden, bieten sich Pkw-Nutzern wählbare Alternativen.

## 8 GÜTERVERKEHR

### 8.1 HINTERGRUND UND AUSGANGSLAGE

Der Güterverkehr trägt momentan etwa ein Viertel zu den Treibhausgasemissionen des Verkehrs in Deutschland bei. Und er ist für ein Viertel des Verbrauchs an Endenergie verantwortlich. Dieser Anteil wird weiter steigen, da die Nachfrage stärker als im Personenverkehr wächst. Insbesondere der internationale Handel nimmt weiter zu, womit eine Zunahme der Transportentfernungen und ein überproportionales Wachstum der Verkehrsleistung (in Tonnenkilometern) gegenüber dem Verkehrsaufkommen (in Tonnen) einhergehen. Die Dekarbonisierung des Güterverkehrs hat deshalb hohe Priorität.

Ein zusätzlicher Treiber der Klimarelevanz des Güterverkehrs ist der sogenannte „Güterstruktureffekt“, also die Veränderung der Zusammensetzung der transportierten Güter: Massenguttransporte wie beispielsweise Kohle nehmen ab, das Aufkommen an hochwertigeren und häufig auch leichteren, aber dafür voluminöseren Produkten nimmt zu. Neben dem reinen Straßengüterverkehr ist der kombinierte Verkehr ein Gewinner dieser Entwicklung, während beispielsweise Ganzzugverkehre von Massengütern an Bedeutung verlieren.

Treibhausgase im Güterverkehr werden in Deutschland derzeit fast ausschließlich vom Straßenverkehr emittiert. Das System Schiene ist im Vergleich zum Straßenverkehr grundsätzlich deutlich energieeffizienter. Die aufwendige Zugbildung und die schlechtere Flächenerschließung machen die Schiene allerdings betriebswirtschaftlich nur bedingt konkurrenzfähig. Die Attraktivität der Schiene wächst mit zunehmender Entfernung und zunehmendem Volumen.

Durch eine dekarbonisierte Wirtschaft werden Transporte fossiler Energieträger weiter zurückgehen, die Kreislaufwirtschaft wird gemäß dem „Klimaschutzszenario 2050“ (BMUB 2015) zunehmen. Durch Effizienzverbesserungen werden beispielsweise auch Baustofftransporte abnehmen. Die Verkehrsleistung fällt damit in den Klimaschutzszenarien um etwa sechs Prozent geringer aus als in der Basisentwicklung.

### 8.2 ANNAHMEN UND PARAMETER

#### 8.2.1 GÜTERAUFKOMMEN

Das Güterverkehrsaufkommen für das Basisszenario 2030 entspricht der Verflechtungsprognose des Bundes (VP 2030). Damit ist die Vergleichbarkeit mit der Verkehrsprognose des Bundes sichergestellt. Für 2050 wird, wie in Abschnitt 4.4

beschrieben, das Güteraufkommen aus BIP-Elastizitäten der betrachteten Gutarten abgeschätzt.

In den Klimaschutzszenarien wird von einer „dekarbonisierten Welt“ ausgegangen. In dieser Welt verändern sich Energiebedarfe und Materialströme. Die Auswirkungen auf das Güterverkehrsaufkommen sind an die Ergebnisse des Szenarios KS 95 des Projektes „Klimaschutzszenario 2050“ angepasst (BMUB 2015). Das Transportaufkommen von fossilen Energieträgern verändert sich proportional zum Energieverbrauch. Erze, Steine und Erden, Koks sowie sonstige Mineralerzeugnisse entwickeln sich proportional zu für sie maßgeblichen Produktionsmengen (d. h. Oxygenstahl, Zement, Glas/Klinker/Gips). Es wird angenommen, dass 50 % des Rückgangs der Produktion von Baumaterialien (betrifft Steine und Erden, Stahl, sonst. Mineralerzeugnisse) durch geringere Nachfrage (d. h. weniger Bautätigkeit) entsteht, der Rest aus Ersatz durch andere Materialien als Teil einer Kreislaufwirtschaft. Für die Transportmengen ist nur der erste Teil relevant, da auch recycelte Materialien transportiert werden müssten. Die genauen Annahmen sind in Tabelle 8-1 zusammengestellt.

**Tabelle 8-1: Annahmen zum Güterverkehrsaufkommen in den Klimaschutzszenarien**

Gutart	Proxy	Veränderung KS95/AMS 2030	Veränderung KS95/AMS 2050	angesetzter Anteil
<b>Steinkohle</b>	Primärenergieverbrauch (PJ)	-57 %	-86 %	100 %
<b>Braunkohle</b>	Primärenergieverbrauch (PJ)	-92 %	-98 %	100 %
<b>Erdöl, Erdgas</b>	Primärenergieverbrauch (PJ)	-26 %	-87 %	100 %
<b>Erze</b>	Oxygenstahl (kt)	-7 %	-15 %	50 %
<b>Steine und Erden</b>	Zement (kt)	-3 %	-5 %	50 %
<b>Koks</b>	Oxygenstahl (kt)	-7 %	-15 %	50 %
<b>Mineralölerzeugnisse</b>	Endenergieverbrauch ohne Strom direkt (PJ)	-11 %	-66 %	100 %
<b>Sonst. Mineralerzeugnisse</b>	Glas, Klinker, Gips, Zement (kt)	-5 %	-9 %	50 %

Quelle: BMUB 2015, Renewbility III

Für den Seeverkehr wurden separate Annahmen getroffen (Tabelle 8-2), die ebenfalls an die Ergebnisse des Szenarios KS 95 des Projektes „Klimaschutzszenario 2050“ angepasst sind (Abschnitt 9.2.2).

**Tabelle 8-2: Veränderung des Güteraufkommens im Seeverkehr 2030 und 2050**

Gutartgruppe	Veränderung KS95/AMS 2030	Veränderung KS95/AMS 2050
Kohle	-62 %	-86 %
Öl & Mineralölerzeugnisse	-42 %	-21 %
Massengut	-15 %	-23 %
Anderes Trockengut	-11 %	-20 %

Quelle: BMUB 2015, Renewbility III

Das Fahrtenaufkommen von leichten Nutzfahrzeugen wird aus den Annahmen der Verkehrsprognose des Bundes abgeleitet und mit degressivem Verlauf bis 2050 fortgeschrieben. Diese Verkehrsprognose geht von einem deutlichen Wachstum im Kurier-Express-Paket-Segment aus (1.4 % p.a.). Des Weiteren wurde auch ein deutliches Wachstum im Handel (1,3 % p.a.) und im verarbeitenden Gewerbe und Baugewerbe angenommen (0.8 % p.a.).

## 8.2.2 AUSLASTUNGEN UND LEERFAHRTENANTEILE IM SCHIENENVERKEHR.

Zur Organisation des Schienenverkehrs und seiner Effizienz liegen keine öffentlich verfügbaren Statistiken vor. Um die Kosten und Transportzeiten des Schienenverkehrs ermitteln zu können, mussten deshalb Annahmen zum Leerfahrtenanteil von Ganzzügen, der Anzahl der zusätzlich zum Direkttransport erforderlichen Umschläge (z. B. Transport der Güter zum nächstgelegenen Schienenanschluss im konventionellen Verkehr), zur mittleren Auslastung der Güterzüge und zum Anteil des Einzelwagenverkehrs getroffen werden. Die Annahmen wurden nach den 25 verwendeten Gutarten differenziert.

Es wird davon ausgegangen, dass Nahrungsmittel, Textilien, Maschinen, Möbel und sonstige Stückgüter ausschließlich im Einzelwagenverkehr transportiert werden, während Massengüter wie Kohle und Erze nur im Ganzzugverkehr transportiert werden. Bei den übrigen Gütern sind beide Zuggattungen möglich, so dass eine Mischkalkulation der Kosten verwendet wird. Vor allem bei Massengut und Spezialtransporten (Chemie, Fahrzeuge) kehren Züge meist leer von ihrem Ziel zum Ausgangsbahnhof zurück, da keine geeignete Rückfracht existiert. Bei den anderen Gutarten wird im Ganzzugverkehr von 30-50 % Leerzuganteil ausgegangen. Die Kosten der leeren Züge werden den vollen Zügen hinzugerechnet. Im Einzelwagenverkehr und kombinierten Verkehr wird statt Leerzügen eine mittlere Anzahl an leeren Wagen und leeren Containern je Zug hinterlegt. Im Vergleich zum Direkttransport müssen im Schienenverkehr Güter zum Teil zusätzlich umgeschlagen werden (beispielsweise muss Rohholz zunächst zu einem Gleisanschluss transportiert

werden), was zusätzliche Kosten verursacht. Diese Kosten wurden als Mittelwerte je Gutart auf die Transportkosten aufgeschlagen. Schließlich wird davon ausgegangen, dass nicht alle Wagen mit der maximal möglichen Zuladung ausgelastet sind. Bei Stückgütern wird deshalb eine mittlere Gewichtsauslastung von 50 % bis 70 %, bei Massengütern von 70 % bis 100 % angesetzt.

## 8.2.3 MITTLERE GESCHWINDIGKEITEN UND ENERGIEVERBRÄUCHE IM SCHIENENVERKEHR

Die mittleren Geschwindigkeiten im Schienenverkehr werden vereinfacht aus der Höchstgeschwindigkeit (je nach Szenario 80 km/h oder 100 km/h) und einer mittleren Entfernung zwischen zwei Halten (je nach Szenario 50 km oder 100 km) abgeleitet. Der Energieverbrauch je Brutto-Zuggewicht wird in Anlehnung an Baumgartner (2001) für das Basisszenario und das Szenario Effizienz mit 18 Wh/tkm angenommen sowie für Szenario Effizienz plus und die zugehörige Szenarettete Ohne O-Lkw mit 22 Wh/tkm. Im Wert für Szenario Effizienz plus sind der Mehrverbrauch durch höhere Geschwindigkeiten und Verbrauchseinsparungen durch weniger Halte enthalten.

## 8.2.4 OBERLEITUNGS-LKW

Oberleitungs-Lkw sind mit einem Hybridantrieb ausgestattet, der auch abseits der elektrifizierten Strecke elektrisches Fahren ermöglicht. Es wird angenommen, dass 80 % ihrer Fahrleistung elektrisch erbracht werden kann. Die Kosten der Infrastruktur werden von den Nutzern getragen (vgl. Abschnitt 3.3.1). Der Oberleitungs-Lkw wird nur pauschal betrachtet, es wird also keine streckenfeine Betrachtung in Bezug auf die Infrastruktur vorgenommen.

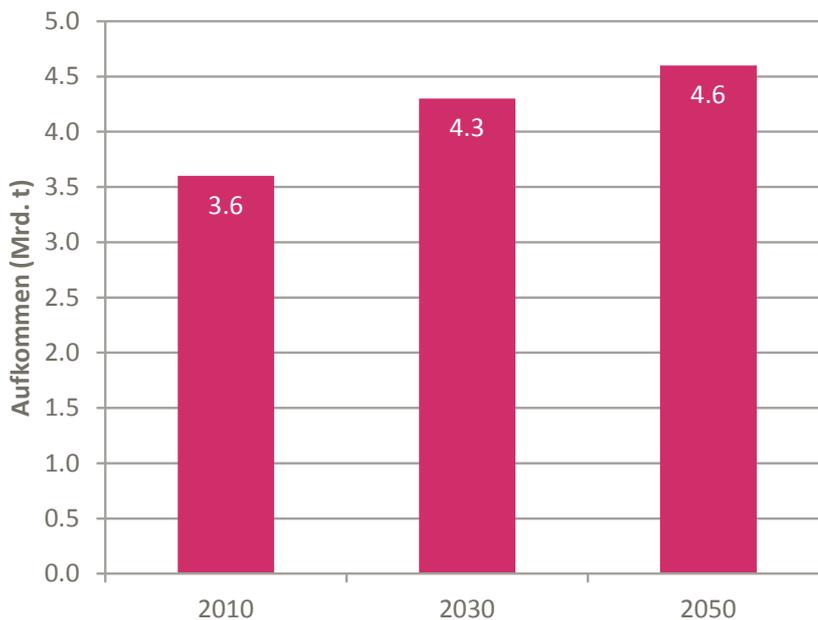
## 8.2.5 WEITERE ANNAHMEN

Es werden keine Kapazitätsgrenzen des Verkehrssystems hinterlegt. Eine Zunahme der Fahrleistungen erfordert ggf. einen Infrastrukturausbau. Die Beschleunigung von Güterzügen wird ohne Differenzierung nach Strecken vorgenommen. Die sich aus den Maßnahmen im Szenario Effizienz ergebenden Kostenänderungen für die Nutzer werden differenziert nach Vorhaltekosten der Wagen, Umschlagkosten, Zugbildungskosten, Kosten für den Anschluss eines Unternehmen an das öffentliche Schienennetz und Umstellkosten ggf. unterschieden nach Zuggattungen (kombinierter Verkehr, Einzelwagenverkehr, Ganzzugverkehr) abgeschätzt.

## 8.3 ERGEBNISSE BASISZENARIO

Das Güterverkehrsaufkommen wird im Basisszenario im Mittel um etwa 0.9 % pro Jahr auf 4,3 Mrd. Tonnen im Jahr 2030 zunehmen. Obwohl sich dieser Trend danach wegen des geringeren prognostizierten Wirtschaftswachstums abschwächen wird, wird das Aufkommen 2050 knapp 4,6 Mrd. Tonnen erreichen. Das entspricht einer Zunahme gegenüber 2010 von etwa 25 % (Abbildung 8-1).

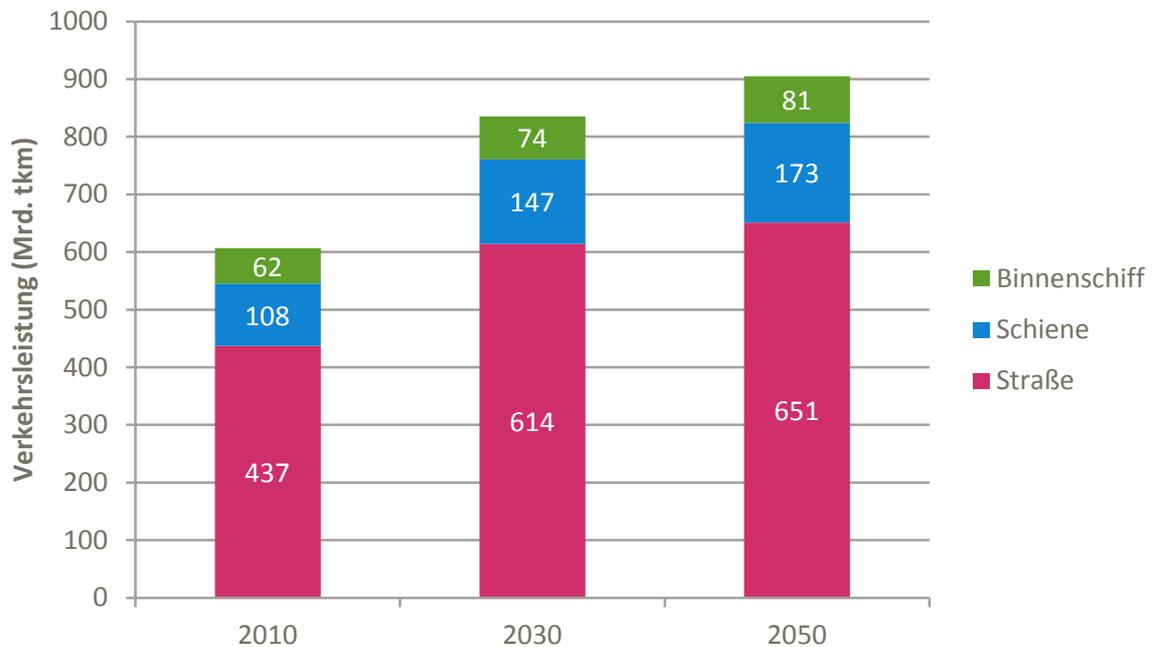
**Abbildung 8-1: Güterverkehrsaufkommen in Mrd. Tonnen im Basisszenario bis 2050**



Quelle: Renewbility III

Die mittlere Transportweite in Deutschland je transportierter Tonne wird zwischen 2010 und 2050 um 20 % auf fast 300 km zunehmen. Überproportional zum Aufkommen wird deshalb die Verkehrsleistung auf deutschem Territorium bis 2030 auf 835 Mrd. Tonnenkilometer und bis 2050 auf etwas über 900 Mrd. Tonnenkilometer anwachsen, also fast um die Hälfte gegenüber 2010 zunehmen. Am meisten wächst die Verkehrsleistung des Schienenverkehrs (+60 %), gefolgt von der Straße (+50 %) und dem Binnenschiff (+30 %) (Abbildung 8-2).

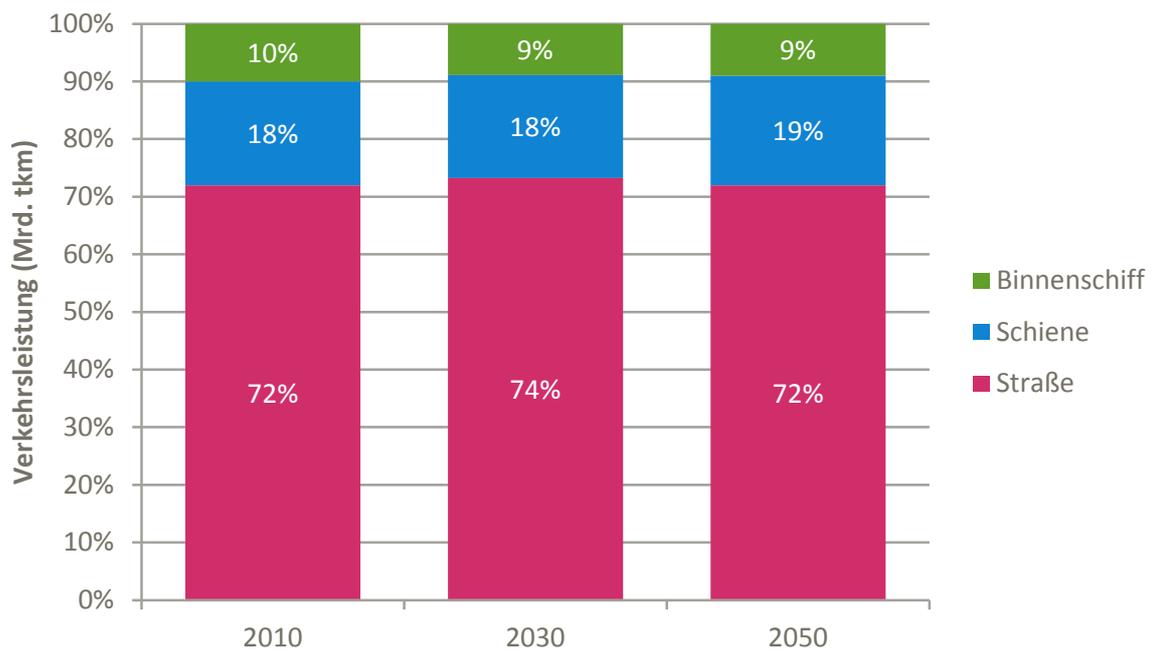
Abbildung 8-2: Verkehrsleistung im Güterverkehr nach Verkehrsträgern im Basisszenario



Quelle: Renewbility III

In Bezug auf den Modal Split ergibt sich gegenüber der heutigen Situation im Basisszenario eine geringe Verschiebung zur Schiene, die 2050 etwa 19 % an der Verkehrsleistung erreichen wird, während die Binnenschifffahrt von 10 % 2010 auf 9 % 2050 zurückgeht.

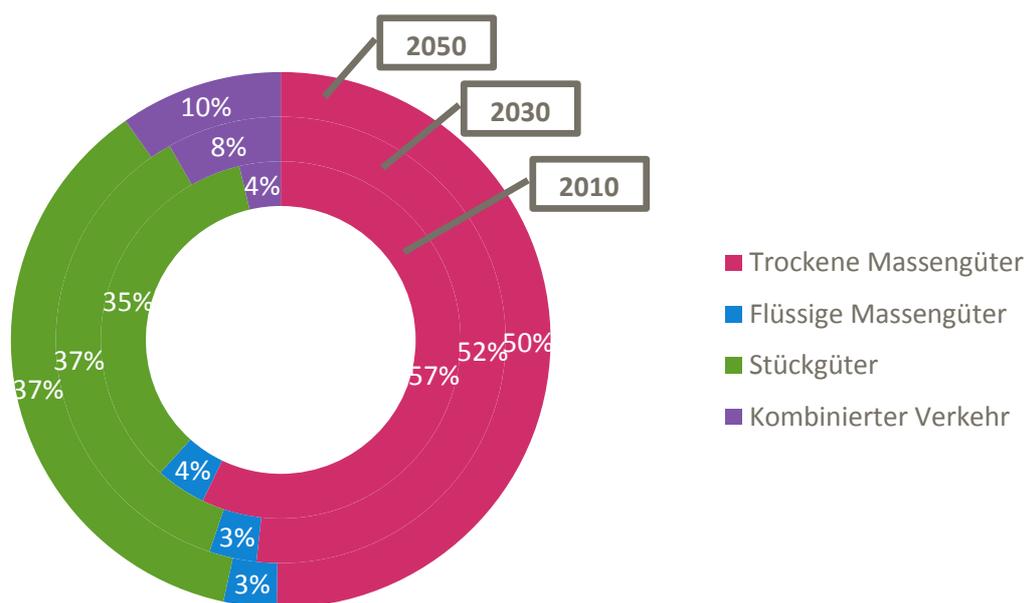
Abbildung 8-3: Verkehrsleistungs-Modal Split im Güterverkehr 2010, 2030 und 2050 im Basisszenario



Quelle: Renewbility III

Der Grund für das unterschiedliche Wachstum der Verkehrsträger liegt vor allem in der Zunahme internationaler Verkehre und den damit größeren Transportdistanzen, die der Schiene einen komparativen Vorteil verschaffen, sowie im Güterstruktureffekt, der zu einer Zunahme kombinierter Verkehre, aber auch einer Abnahme von Massenguttransporten führt (Abbildung 8-4).

**Abbildung 8-4: Güterverkehrsaufkommen nach Ladungskategorie (t) von 2010 bis 2050**



Quelle: Renewbility III

## 8.4 ERGEBNISSE 2030

Wie eingangs ausgeführt, wurden drei Handlungsstränge untersucht, um einen klimaneutralen Güterverkehr bis 2050 zu erreichen:

- Dekarbonisierung der Kraftstoffe aller verbrennungsmotorischen Lkw (alle Szenarien)
- Effizienzsteigerung des Straßenverkehrs als klimawirksamstem und aufkommensstärkstem Modus durch die Einführung von elektrisch angetriebenen schweren Lkw (Szenario Effizienz, Szenario Effizienz plus)
- Attraktivitätssteigerung des Schienenverkehrs (Szenario Effizienz plus, Szenario Ohne O-Lkw).

Zusätzlich zu diesen Maßnahmen ist in allen Klimaschutzszenarien eine dekarbonisierte Wirtschaft hinterlegt. Hierdurch wird – wie in 8.2.1 beschrieben – das Güterverkehrsaufkommen im Vergleich zur Basisentwicklung etwas weniger wachsen und 2030 etwa drei Prozent (und bis 2050 etwa fünf Prozent) geringer ausfallen. Auch die

Verkehrsleistung wächst dadurch und durch weitere Güterstruktureffekte bis 2030 nur auf 803 Mrd. Tonnenkilometer (Abbildung 8-5). Die Verschiebungen zwischen Ladungskategorien durch eine dekarbonisierte Wirtschaft bis 2050 sind in Abbildung 8-6 dargestellt. Die Abnahme der Verkehrsleistung gegenüber der Basisentwicklung in den Szenarien Effizienz und der Szenarette Fokus Kraftstoffe ist in erster Linie auf die dekarbonisierte Wirtschaft zurückzuführen.

Da angenommen wird, dass der Oberleitungs-Lkw 2030 erst allmählich in den Markt eintritt, weil zunächst die Infrastruktur aufgebaut werden muss, unterscheiden sich 2030 das Szenario Effizienz und die Szenarette Fokus Kraftstoffe (die sich nur durch den O-Lkw unterscheiden) nur unwesentlich. Gleiches gilt für die Szenarette Ohne O-Lkw gegenüber dem Szenario Effizienz plus. Einen spürbaren Effekt haben die Maßnahmen zur Effizienzsteigerung der Schiene im Szenario Effizienz plus. Die Verkehrsleistung der Schiene wächst durch diese Maßnahmen um etwa 20 Mrd. Tonnenkilometer (knapp 18 %) und erzielt dadurch einen um drei Prozentpunkte höheren Modal Split, während der Straßenverkehr im selben Maß abnimmt.

**Abbildung 8-5: Güterverkehrsleistung der Klimaschutzszenarien im Jahr 2030**



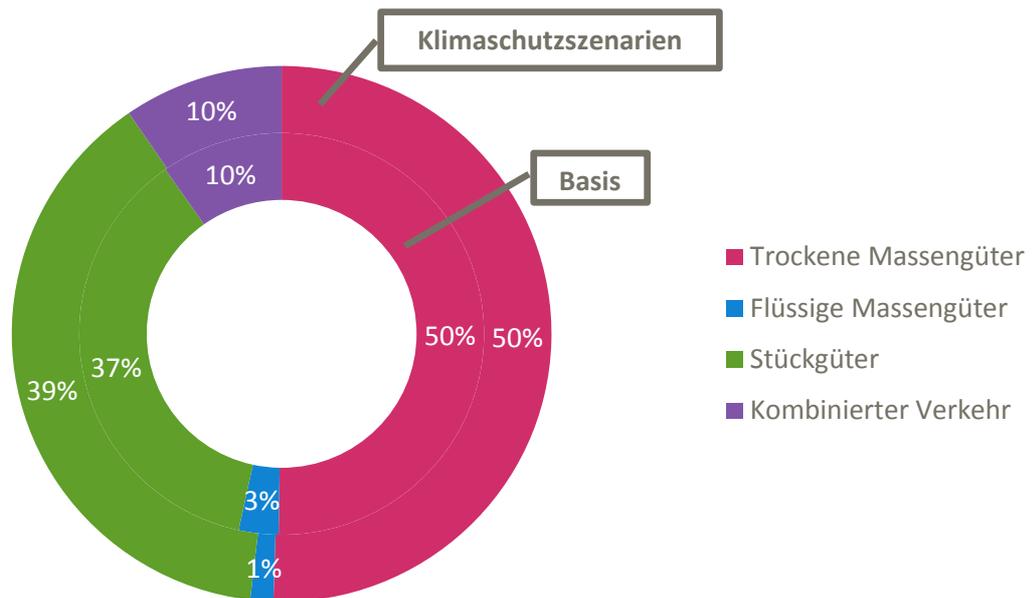
Quelle: Renewbility III

## 8.5 ERGEBNISSE 2050

Bis zum Jahr 2050 wird in den Klimaschutzszenarien eine weitere Dekarbonisierung der Wirtschaft mit den zuvor angesprochenen Veränderungen in der Güterstruktur und dem Aufkommen angenommen. Stückgüter erreichen einen Anteil von fast 40 % am

Transportaufkommen. Flüssige Massengüter machen nur noch weniger als 2 % aus (Abbildung 8-6).

**Abbildung 8-6: Güterstruktureffekt durch eine dekarbonisierte Wirtschaft 2050 (Prozent am Aufkommen in den Klimaschutzszenarien vs. Basisentwicklung)**



Quelle: Renewbility III

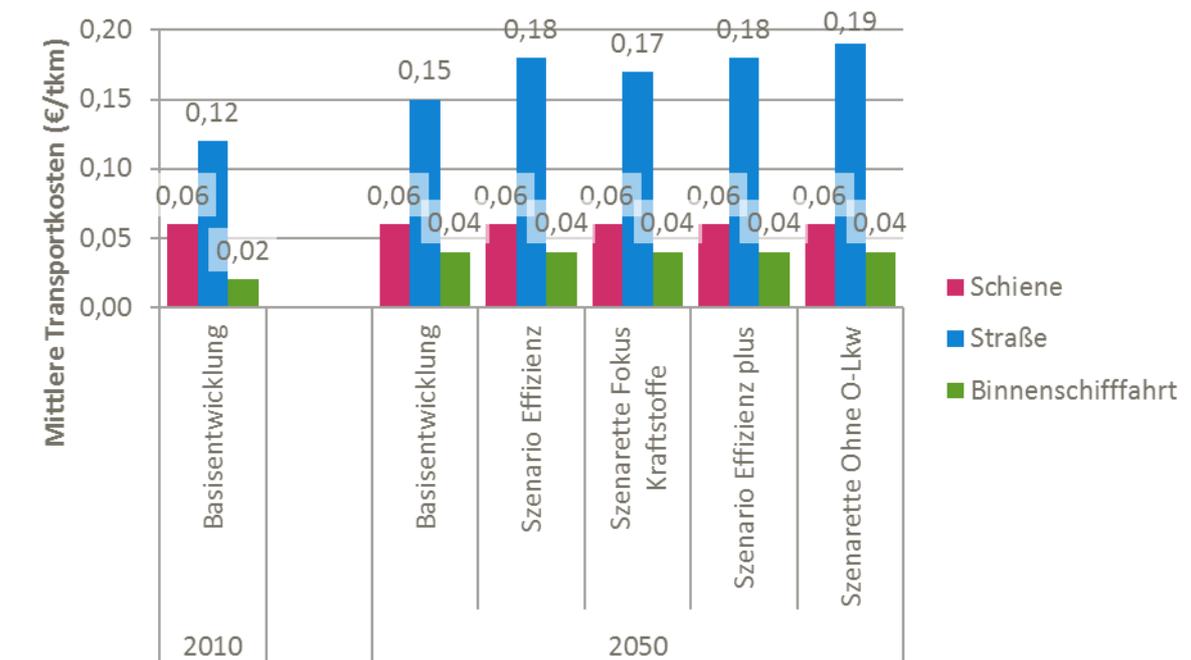
Die Verkehrsleistung erreicht in den Klimaschutzszenarien rund 850 Mrd. Tonnenkilometer. Dies entspricht einer Zunahme gegenüber 2030 um etwa sechs Prozent bzw. einer um etwa fünf Prozent geringeren Verkehrsleistung als in der Basisentwicklung 2050 (Abbildung 8-7).

Abbildung 8-7: Güterverkehrsleistung der Klimaschutzszenarien im Jahr 2050



Quelle: Renewability III

Abbildung 8-8: Entwicklung der mittleren Transportkosten<sup>9</sup> bis 2050 in Euro (2010)



Quelle: Renewability III

<sup>9</sup> Ohne Umschlagkosten an Quelle und Ziel.

Durch die steigenden Energiekosten, insbesondere durch die Dekarbonisierung der Kraftstoffe, nehmen die Transportkosten vor allem im Straßen- und Binnenschiffsverkehr bis 2050 merklich zu (Abbildung 8-8)

### 8.5.1 EINFÜHRUNG VON OBERLEITUNGS-LKW

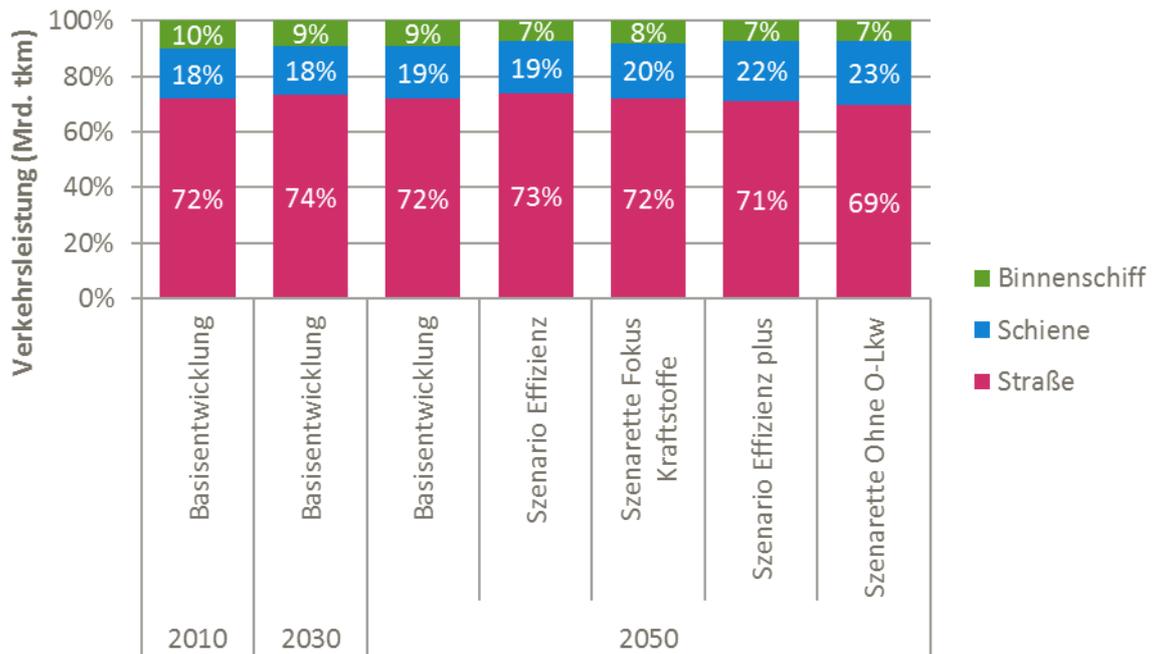
Die Einführung des O-Lkw bewirkt aufgrund der Effizienzsteigerung des Straßengüterverkehrs eine leichte Verlagerung von der Schiene und dem Binnenschiff zur Straße (Szenario Effizienz gegenüber Szenaretté Fokus Kraftstoffe). Der Modal Split der Straße wächst dadurch im Szenario Effizienz gegenüber der Basis von 72 % auf 73 % (Abbildung 8-9).

Grund für diese Verlagerung ist der Unterschied zwischen den strombasierten Kraftstoffkosten für Verbrennungsmotoren und den Stromkosten. Letztere beinhalten zwar die Finanzierung der Oberleitungs-Infrastruktur, sind aber dennoch deutlich niedriger als die Kosten strombasierter Kraftstoffe. Dadurch fallen die Kosten je Tonnenkilometer für einen Oberleitungs-Lkw bei durchschnittlichen Entfernungen geringer aus als jene für einen mit strombasierten Kraftstoffen angetriebenen Lkw.

Dies verdeutlicht die Bedeutung der Kosten für die Wahl eines Verkehrsmittels. Durch den hier unterstellten verhältnismäßig großen Anstieg der Kraftstoffkosten im Vergleich zu Strom- und Oberleitungsinfrastrukturkosten bleibt der Einfluss auf den Modal Split vergleichsweise gering. Es zeigt sich, dass bereits bei etwas geringeren Kosten verbrennungsmotorischer Lkw oder etwas höheren Kosten für die Oberleitungsinfrastruktur der O-Lkw betriebswirtschaftlich nicht mehr rentabel wäre. Umgekehrt fiel die Verlagerungswirkung hin zur Straße deutlicher aus, je günstiger der O-Lkw im Vergleich zu verbrennungsmotorischen Lkw wäre.

Ob ein Markt für den Oberleitungs-Lkw tatsächlich existiert, hängt aber unter anderem auch von der Einführungsstrategie (also wann er wo zu welchen Konditionen eingeführt wird) und der Tourenplanung der betroffenen Transportunternehmen ab. Welche Strecken zuerst elektrifiziert werden und wie diese Elektrifizierung im europäischen Kontext umgesetzt wird, spielt deshalb eine wesentliche Rolle. Nachfragestarke Fernstrecken-Relationen stellen dabei nicht nur ein großes Potenzial für den Oberleitungs-Lkw, sondern auch für multimodale Transporte dar. Es besteht also die Gefahr, dass der Oberleitungs-Lkw gerade dort eine Konkurrenz zur Schiene wird, wo diese zusätzliche Transporte übernehmen könnte und damit das im Vergleich zur Schiene energetisch weniger effiziente Verkehrsmittel gefördert wird.

Abbildung 8-9: Modal Split des Güterverkehrs im Jahr 2050



Quelle: Renewbility III

## 8.5.2 ATTRAKTIVITÄTSSTEIGERUNGEN IM SCHIENENVERKEHR

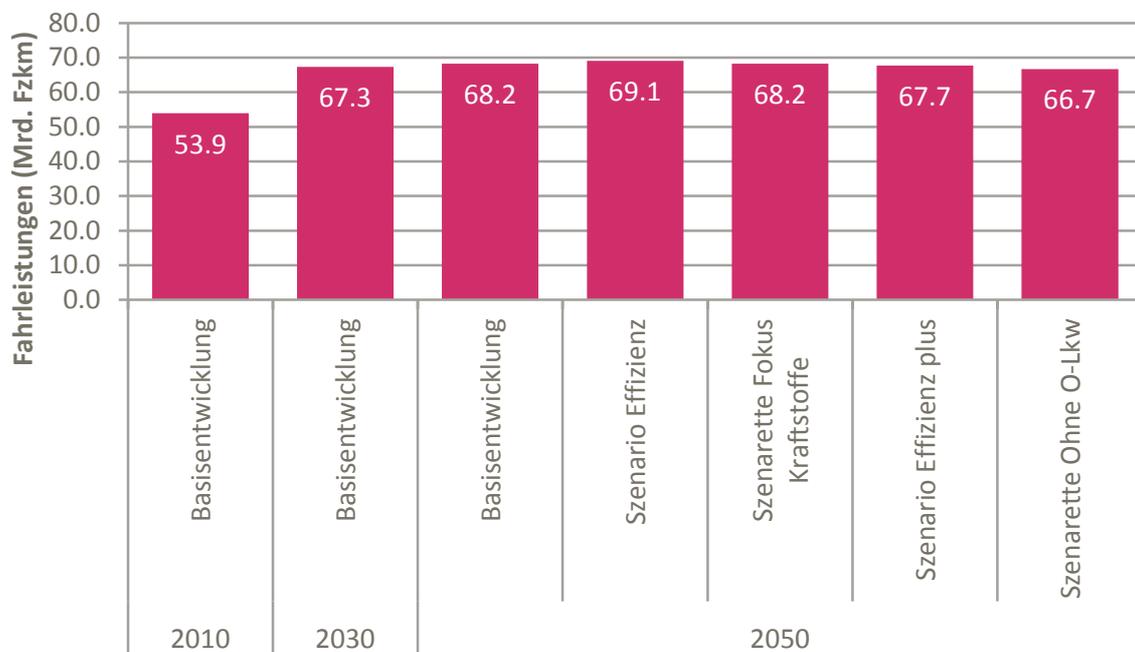
Im Szenario Effizienz plus bewirken die attraktivitätssteigernden Maßnahmen für den Schienenverkehr gegenüber Szenario Effizienz eine Verlagerung von 23 Mrd. Tonnenkilometern auf die Schiene. Wird der O-Lkw nicht eingeführt, sondern werden alleine Maßnahmen zur Stärkung des Schienengüterverkehrs ergriffen, können sogar 29 Mrd. Tonnenkilometer auf die Schiene verlagert werden (Szenarettre Ohne O-Lkw).

Auch wenn dieser Betrag absolut groß erscheint, zeigt er doch die Grenzen von konventionellen Maßnahmen zur Steigerung des Schienengüterverkehrs auf. Eine alleinige Verbesserung des Systems Schiene, wie es momentan besteht, bewirkt keine signifikante Verlagerung. Der Modal Split verändert sich durch die unterstellten Maßnahmen maximal um 5 %-Punkte und erhöht sich auf maximal 23 %. Die unterstellten Ausprägungen der Maßnahmen reizen ihr Potential möglicherweise nicht vollständig aus, verdeutlichen aber die Größenordnung, in der eine Verlagerung durch solche Maßnahmen möglich ist. Die Szenarettre Ohne O-Lkw unterstreicht dabei, dass immer das Verkehrssystem insgesamt betrachtet werden muss, also die Konkurrenz zwischen den Verkehrsträgern. Die Wirkung von Effizienzsteigerungen bei der Schiene auf den Modal Split kann durch Effizienzsteigerungen im Straßenverkehr deutlich gemindert werden. Wird zugleich die Attraktivität des Schienenverkehrs und des Straßenverkehrs gesteigert, wird die Verlagerungswirkung von der Straße auf die Schiene entsprechend geringer ausfallen.

## 8.5.3 FAHRLEISTUNGEN

Wesentliche Grundlage für die Ermittlung von Energieverbräuchen und Emissionen sind die Fahrleistungen. Fahrleistungen ergeben sich aus der Verkehrsleistung durch Division mit der transportierten Tonnage je Fahrzeug (Lkw/Zug/Schiff). Diese Tonnage wiederum hängt von der möglichen Zuladung von Nutzfahrzeugen, dem Auslastungsgrad und dem Leerfahrtenanteil ab. Besondere Bedeutung für Emissionen besitzen die Fahrleistungen im Straßengüterverkehr. Die Fahrleistungen aller Nutzfahrzeuge ab 3,5 t zulässigem Gesamtgewicht sind in Abbildung 8-10 dargestellt. Da sich die Auslastungen nach Gutarten und der Leerfahrtenanteil nach Entfernung eines Transportes unterscheiden, weichen die Veränderungen der Fahrleistung in den untersuchten Szenarien von denen der Verkehrsleistung ab. Beispielsweise wirkt sich die Dekarbonisierung der Wirtschaft weniger auf die Fahrleistung als auf die Verkehrsleistung aus, da schwere Güter mit entsprechend höheren Gewichtsauslastungen der Fahrzeuge stärker betroffen sind als Volumengüter, die in Bezug auf das Gewicht mehr Fahrten benötigen.

**Abbildung 8-10: Fahrleistungen im Straßengüterverkehr**



Quelle: Renewbility III

Die stärkste Minderung der Fahrleistungen wird durch eine Attraktivitätssteigerung des Schienenverkehrs ohne Einführung von Oberleitungs-Lkw erzielt (Szenarettre Ohne O-Lkw). Die Fahrleistungen sinken hier gegenüber der Basisentwicklung um 1,5 Mrd. Fahrzeugkilometer (2,2%). Im Vergleich zu den Fahrleistungen 2010 bedeutet dies immer noch ein Wachstum von fast 13 Mrd. Fahrzeugkilometern (+24%). Ohne Klimaschutz-

maßnahmen stiegen die Fahrleistungen gegenüber 2010 um über 14 Mrd. Fahrzeugkilometer (+27 %).

### 8.5.3.1 Automatisierung im Güterverkehr

Im Güterverkehr sind zwei Trends zu beobachten: neben der zunehmenden Automatisierung eine zunehmende Vernetzung. Automatisierung spielt dabei in vier Bereichen, die auch auf die Verkehrsnachfrage einen Einfluss haben, eine Rolle.

- Im **Straßengüterfernverkehr** lässt sich durch automatisiertes Fahren und die elektronische Kopplung von Fahrzeugen die Sicherheit erhöhen, Energie einsparen und die Infrastruktur effizienter nutzen. Wenn Fahrzeuge vollautomatisiert fahren könnten, bedeutete das eine deutliche Kostensenkung, da der Fahrer zumindest abschnittsweise nicht mehr erforderlich wäre oder aber andere Aufgaben übernehmen könnte. Diese zunehmende Automatisierung wird also sowohl die Effizienz als auch die Attraktivität des Straßengüterverkehrs erhöhen und damit zu einer Verlagerung auf die Straße führen.
- Eine weitere Automatisierung von **multimodalen Terminals** wird Umschlagprozesse weiter beschleunigen und effizienter gestalten. Dadurch lässt sich die Attraktivität multimodaler Transporte steigern. Eine solche Automatisierung ist bereits in Szenario Effizienz plus durch die Beschleunigung von Umschlagvorgängen eingegangen.
- Auch im **Schieneverkehr** kann die Effizienz deutlich durch Automatisierung verbessert werden. Im Szenario Effizienz plus sind beispielsweise automatische Bremsproben berücksichtigt, die die Zugbildung beschleunigen. Eine Vollautomatisierung von Zügen ermöglichte eine deutlich effizientere Nutzung der Infrastruktur und mehr Flexibilität. Die Schwierigkeiten bei der Entwicklung und Umsetzung eines europäischen Verkehrsleitsystems im Schienenverkehr (ERTMS) weisen jedoch darauf hin, dass es sich um eine langfristige Entwicklung handelt.
- Im **städtischen Bereich** könnten autonome Lieferfahrzeuge in Kombination mit neuen Formen der Belieferung von Kunden (z. B. wenn keine persönliche Zustellung durch einen Boten erforderlich ist) die Verkehrsnachfrage auf der letzten Meile deutlich verändern. Personalkosten könnten eingespart und die Lieferzeiten verkürzt werden, so dass die Belieferung kostengünstiger und damit attraktiver würde. Die Nutzung der Infrastruktur könnte effizienter gestaltet werden (z. B. kein Parken in der zweiten Reihe).

Auch in Bezug auf den Güterverkehr gelten die in Abschnitt 7.7 genannten Unsicherheiten bezüglich der Ausprägung und des Zeithorizonts der Automatisierung. Deshalb wurde – über die genannten Maßnahmen hinaus – eine weitergehende Automatisierung nicht in den Klimaschutzszenarien berücksichtigt.

## 8.6 FAZIT

Vier wesentliche Schlussfolgerungen lassen sich in Bezug auf den Güterverkehr bis 2050 ableiten.

1. Der Güterverkehr wird weiter deutlich zunehmen, sowohl im Aufkommen als auch in der Verkehrsleistung. Dadurch gewinnt er weiter an Bedeutung für die Klimawirkung des Verkehrs.
2. Der Straßenverkehr wird auch in Zukunft den mit Abstand größten Anteil an der Verkehrsleistung erbringen. Seine Effizienzsteigerung ist deshalb von herausragender Bedeutung, kann aber auch den aus Umweltsicht unerwünschten Effekt einer zusätzlichen Verlagerung von Schiene und Binnenschifffahrt zur Straße bewirken.
3. Nur bei einem deutlichen Anstieg der Kosten für Lkw mit Verbrennungsmotoren, wie sie in den Klimaschutzszenarien angenommen wurden, oder durch eine staatliche Förderung ist mit der Wirtschaftlichkeit und damit dem Markteintritt von Oberleitungs-Lkw zu rechnen. Ob die Einführung eines Oberleitungs-Lkw die beste Option zur Effizienzsteigerung ist, bedarf zusätzlicher detaillierterer Untersuchungen bezüglich der Einführungsstrategien in Europa, der Nachfrage durch die Transportunternehmen und der Wechselwirkung mit dem Schienenverkehr.
4. Um eine deutliche Verlagerung auf den Schienenverkehr zu bewirken, reichen die unterstellten Effizienzverbesserungen des bestehenden Schienenverkehrssystems alleine nicht aus. Sie sind jedoch eine wesentliche Voraussetzung zur Erschließung weiterer Nachfragesegmente für den Schienenverkehr, die durch veränderte verkehrspolitische Rahmenbedingungen unterstützt werden müssen. Aus heutiger Sicht stellen vor allem multimodale Verkehre, die die Vorteile von Straße und Schiene kombinieren, ein für die Verlagerung vielversprechendes Segment dar. Fast die halbe Verkehrsleistung entsteht durch Gütertransporte über Entfernungen von mehr als 300 Kilometern, die prinzipiell dazu geeignet sind, über weite Strecken auf der Schiene abgewickelt zu werden und den Lkw nur als Zubringer zur Schiene zu nutzen (multimodaler Gütertransport).

Eine Dekarbonisierungsstrategie für den Güterverkehr sollte daher nicht Straßen- und Schienenverkehr gegeneinander ausspielen, sondern beide Ziele verfolgen:

- Eine möglichst starke Verlagerung von Güterverkehr auf die Schiene, um eine hohe Energieeffizienz zu erreichen und die Vorteile des bereits hohen Dekarbonisierungsgrads zu nutzen. Voraussetzung hierfür sind in jedem Fall ausreichende Kapazitäten im Streckennetz und den Knoten.

- Die Verbesserung der Energieeffizienz und Dekarbonisierung des verbleibenden Straßenverkehrs. Die Elektrifizierung der Fahrzeuge ist deutlich energieeffizienter als eine Dekarbonisierung der Kraftstoffe. Die Wirkung einer größeren Effizienz des Straßenverkehrs auf den Modal Split sollte beachtet werden. Eine unerwünschte Verlagerung, die den oben angesprochenen Bemühungen zuwiderläuft, ist ggf. durch zusätzliche Maßnahmen abzufangen.

## 9 LUFT- UND SEEVERKEHR

### 9.1 HINTERGRUND UND AUSGANGSLAGE

Der internationale Luft- und Seeverkehr hat in den letzten Jahren die höchsten Wachstumsraten verzeichnet und stellt eine besondere Herausforderung für den Klimaschutz dar. Die Verantwortung zur Minderung der Emissionen liegt bisher nicht bei den Nationalstaaten, sondern bei internationalen Gremien. Grundsätzlich werden die Emissionen des internationalen Luft- und Seeverkehrs nicht dem nationalen Treibhausgasinventar zugerechnet, sondern nur (basierend auf dem Kerosinabsatz in Deutschland) nachrichtlich mitgeteilt.

### 9.2 ANNAHMEN UND PARAMETER

#### 9.2.1 LUFTVERKEHR

Gegenüber der Verkehrsprognose werden im Basisszenario die aktuellen politischen Maßnahmen abgebildet. Es werden daher folgende von der VP 2030 abweichende Annahmen getroffen:

- Entsprechend der derzeit gültigen Gesetzeslage bleibt die Summe aus Luftverkehrsteuer und ETS, welche die Luftverkehrswirtschaft insgesamt jährlich maximal zahlt, auf 1 Mrd. Euro gedeckelt und die Höhe der Luftverkehrsteuer wird entsprechend jährlich angepasst.
- Es wird eine Effizienzsteigerung in Höhe von 1,5 % p.a. (statt 2 %) je Personenkilometer bzw. Tonnenkilometer hinterlegt.

Einzige Maßnahme, die in den Klimaschutz-Szenarien im Rahmen von Renewbility III im Luftverkehr abgebildet ist, sind die im Vergleich zur Basisentwicklung höheren Kraftstoffpreise durch den steigenden Anteil an PtX. Da der Anteil der Kraftstoffkosten am Ticketpreis im Basisjahr rund 30 % beträgt, wirken sich diese dämpfend auf die Verkehrsnachfrage aus.

#### 9.2.2 SEEVERKEHR

Die getroffenen Annahmen für die Hinterlandverkehre im Seeverkehr werden im Folgenden spezifisch für die einzelnen Güterklassen Kohle, Mineralöl und Mineralölerzeugnisse, Massen- und Schüttgüter und sonstige Trockenladung erläutert. Ebenso werden Kraftstoffnutzung und Verbrauchsentwicklung näher beleuchtet.

### 9.2.2.1 Kohle

Unter der Güterklasse Kohle sind lediglich die Güter Braun- und Steinkohle aus der Verkehrsprognose gefasst. Braunkohle ist für die Hinterland- und somit auch für die Seeverkehre irrelevant, da es keine seeseitigen Im- oder Exporte gibt. Die Entwicklung von 2030 bis 2050 der Hinterlandverkehre für die Güterklasse Kohle ist daher einzig anhand der Nachfrageentwicklung von Steinkohle in Deutschland abgeleitet. Die Daten für die Entwicklung der Nachfrage von Steinkohle wurden dem „Aktuelle Maßnahmen Szenario“ des Projektes „Klimaschutzszenario 2050“ des BMUB (KSZ 2050) für das Basisszenario entnommen. Die Klimaschutzszenarien in Renewbility III lehnen sich an die Entwicklung des KS 95 an. Es wird angenommen, dass 100 % des Steinkohlebedarfs über Importe gedeckt werden, da die Einstellung der Subventionierung des Steinkohleabbaus in Deutschland in 2018 gleichzeitig das Aus der deutschen Steinkohleförderung bedeutet. In 2013 wurden noch 7,6 Mio. t in Deutschland gefördert (Andrulleit et al. 2014), dies entspricht rund 13 % des Eigenbedarfs.

Das bedeutet jedoch nicht, dass der gesamte Steinkohlebedarf über Seeverkehre importiert wird. Für Deutschland ist Polen das einzig relevante Exportland von Steinkohle, bei dem der Transport mit anderen Verkehrsträgern wirtschaftlicher ist. In 2013 wurden rund 8 % des Steinkohleverbrauchs über Importe aus Polen gedeckt. Für die Nachfragemodellierung im Seeverkehr wurde angenommen, dass das Verhältnis an der Gesamtnachfrage in Deutschland konstant bleibt. Im Gegensatz zu einer konstant bleibenden Liefermenge spiegelt dies die Bemühungen der Nachbarländer wieder, aktiv den Klimaschutz mitzugestalten. Weiterhin wird es bis 2030 eine starke Änderung der Loco-Quote, also den am Hafen verladenen, aber nicht weiter transportierten Gütern, geben. Es wird angenommen, dass ab 2030 30 % der importierten Kohle in küstennahen Kraftwerken eingesetzt wird, so dass die Loco-Quote dieser Güterklasse von 2,5 % in 2010 auf 30 % in 2030 steigt und dort stagniert.

### 9.2.2.2 Mineralöl und Mineralölerzeugnisse

Die Güterklasse Mineralöl und Mineralölerzeugnisse beinhaltet die Güter Erdöl und Erdgas sowie Mineralölerzeugnisse, wobei Erdöl und Erdgas nur 2 % des Aufkommens stellen. Importe dieser Güter finden in Deutschland hauptsächlich über Pipelines statt. Bei den Mineralölerzeugnissen ist eine weitere Differenzierung der Erzeugnisse interessant, da hier im Gegensatz zur Kohle nicht jeder Energieträger verschiedene Nachfragen decken kann. Zusätzlich können die Anteile der Fraktionen, die aus der Erdölraffination gewonnen werden (Benzin, Diesel, Schweröl etc.), nicht beliebig verschoben werden. So verbraucht Deutschland z. B. anteilig mehr Diesel als es die Fraktionierung der Raffinerien zulässt. Es

muss weiterer Dieselkraftstoff importiert werden. Da eine weitere Veränderung in der Nachfragestruktur der Mineralölerzeugnisse abzusehen ist, kann die Entwicklung der Transportströme nicht mit der Entwicklung des Endenergiebedarfs gleichgesetzt werden. Weiterhin wurden die Import- und Exportströme der einzelnen Fraktionen ausgewertet, um die Relevanz der Hinterlandverkehre für die einzelnen Fraktionen zu ermitteln (MWV 2014). Über die Entwicklung von Verkehrsnachfrage und Antrieben aus TEMPS, aber auch des Energieverbrauchs von dem Basisjahr über die Basisentwicklung bis 2030 und der Projektion bis 2050 werden Export- und Importmengen für die Szenarien bestimmt.

### 9.2.2.3 Massen- und Schüttgüter

Für die Massen- und Schüttgüter wurde über die Entwicklung der Hinterlandverkehre nach VP bis 2030 und die projizierte Entwicklung des BIP ein Trend ermittelt und bis 2050 fortgeschrieben. So steigen die Hinterlandverkehre pro BIP um knapp 25 % bis 2050 im Vergleich zur Basis. Somit wird eine im Verhältnis zum BIP stärker steigende Transportleistung abgebildet. IMO (2014) geht sogar von einem 40 % stärkeren Wachstum im Verhältnis zum BIP aus. Dieser Wert bezieht sich jedoch auf den Weltschnitt. Ein geringerer Anstieg für Deutschland als international bereits sehr vernetztes und auch wirtschaftlich starkes Land scheint plausibel.

### 9.2.2.4 Sonstige Trockenladung

Das Berechnungsprinzip der Massen- und Schüttgüter gilt für die sonstige Trockenladung. Hier wurde ein stärkerer Anstieg von 88 % im Verhältnis zum BIP für Deutschland ermittelt. IMO (2014) weist einen Anstieg um 105 % im weltweiten Mittel aus.

### 9.2.2.5 Kraftstoffe und Energieverbrauch

Die Energieverbräuche der Schiffe für das Basisjahr sind nach IMO (2014) und UNCTAD (2013) abgeleitet. Effizienzsteigerungen und Kraftstoffmix für das Basisjahr als auch Entwicklung bis 2050 (siehe Tabelle 9-1) sind aus IMO (2014) übernommen. Es werden Effizienzsteigerungen von 50 % bis 2050 angenommen.

**Tabelle 9-1: Verteilung der Kraftstoffe in 2050 für Basis und die dekarbonisierten Szenarien**

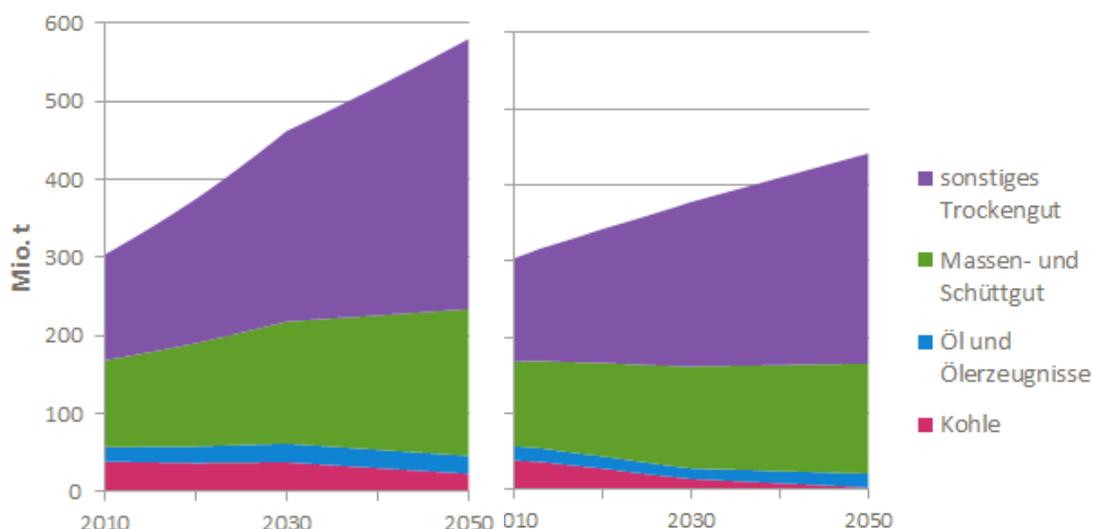
	LNG	Destilate, LSHFO	HFO
<b>Basiszenario 2050</b>	8 %	25 %	67 %
<b>Klimaschutzszenarien 2050</b>	25 %	35 %	40 %

Quelle: IMO 2014

## 9.3 ERGEBNISSE SEEVERKEHR

Für die Hinterlandverkehre wird insgesamt ein stetiges Wachstum projiziert, obwohl sich die einzelnen Güterklassen sehr heterogen entwickeln. Für die Kohletransporte wird im Basisszenario mit einem Rückgang des Hinterlandaufkommens um 40 % ausgegangen. Die an den Häfen verladenen Mengen reduzieren sich aber nur um 14 %, was auf den beschriebenen Effekt bei den Loco-Quoten zurückzuführen ist. In den dekarbonisierten Szenarien sinkt das Hinterlandaufkommen auf 8 % des Ausgangswertes aus 2010, die Verlademengen auf 12 %. Das Aufkommen von Öl und Ölerzeugnissen steigt im Basisverlauf um 24 % an, über die dekarbonisierten Szenarien geht das Aufkommen um 1 % zurück und bleibt somit fast konstant. Die Hinterlandverkehre der Massen- und Schüttgüter wachsen im Basisszenario um 69 % an. In den Szenarien, welche eine dekarbonisierte Welt abbilden, ist das Wachstum mit 30 % mäßiger. Der größte Zuwachs zwischen den Güterklassen ist bei den sonstigen Trockengütern, wobei der Containerverkehr hier hauptauschlaggebend ist, zu erwarten. In der Basisentwicklung steigt das Hinterlandaufkommen dieser Güterklasse um 156 % an, der Anstieg im Falle einer Dekarbonisierung beträgt noch 104 %. Die Entwicklung der Hinterlandverkehre insgesamt ist in Abbildung 9-1 veranschaulicht. Insgesamt wurde für 2050 ein Hinterlandaufkommen von 580 Mio. t ermittelt, dies entspricht einem Zuwachs von 91 % im Vergleich zum Basisjahr 2010. Für die Dekarbonisierungsszenarien ist der Anstieg von 45 % des Basiswertes auf 442 Mio. t moderater.

**Abbildung 9-1: Entwicklung der Hinterlandverkehre in Mio. t bis 2050 für Basis- und die Dekarbonisierungsszenarien**

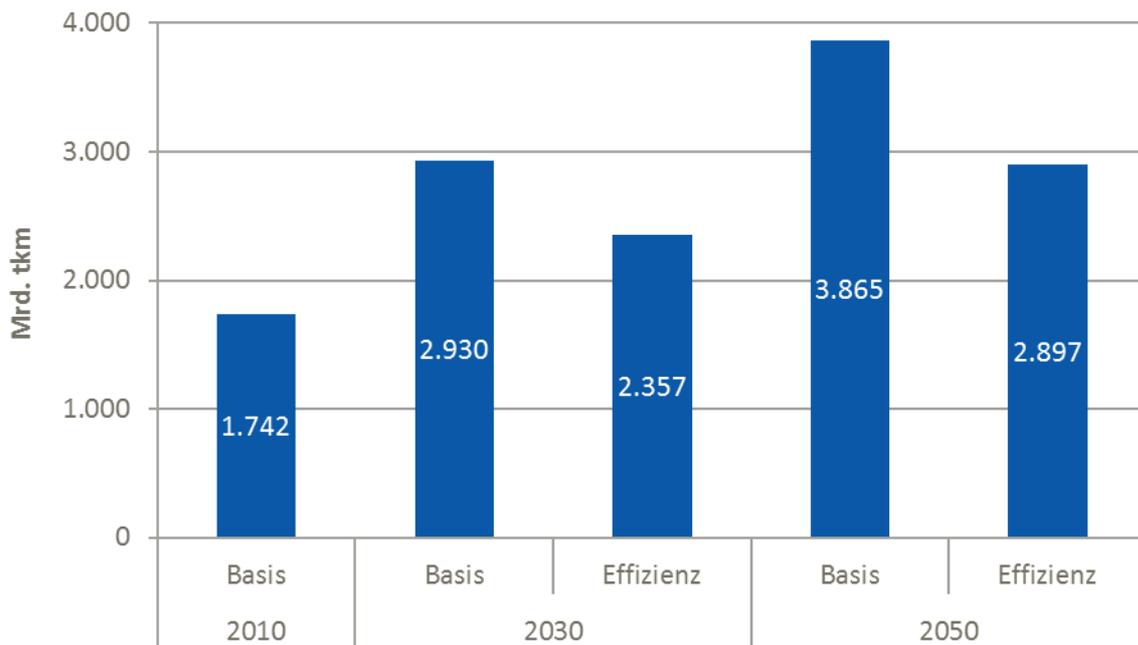


Quelle: Renewbility III

Wenn man davon ausgeht, dass es nicht zu Trendbrüchen kommt, so steigt der internationale Seeverkehr an deutschen Häfen bis 2050 um 120 % also mehr als das

Doppelte der Basistransportleistung an. Der Großteil des Wachstums entsteht durch die deutliche Zunahme im Containerverkehr. Allerdings: Ein nicht unwesentlicher Teil des Seeverkehrs sind Transporte fossiler Energieträger wie Kohle und Mineralölprodukte, sodass die Energiewende zu einer Reduktion von Seeverkehrstransporten führen kann. In den Klimaschutzszenarien liegt der Anstieg daher deutlich niedriger bei 66 %.

**Abbildung 9-2: Entwicklung der Transportleistung im Seeverkehr**



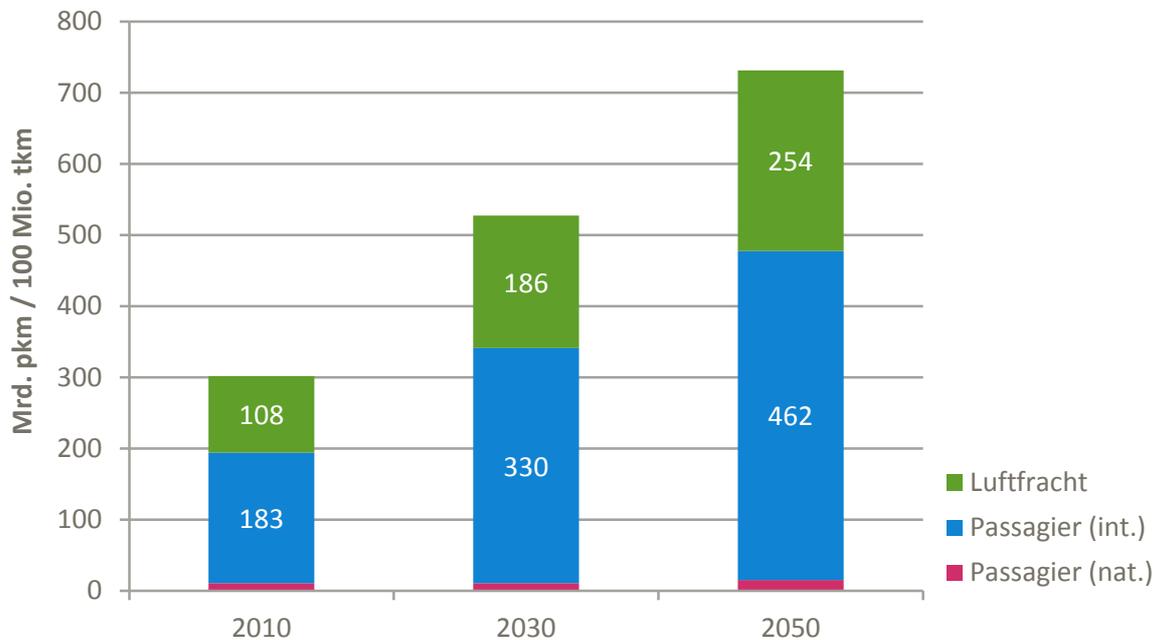
Quelle: Renewbility III

## 9.4 ERGEBNISSE LUFTVERKEHR

Die besonders starke Klimarelevanz pro Kopf und Reise kombiniert mit starken Wachstumsraten machen den Luftverkehr zu einem wesentlichen Handlungsfeld für den Klimaschutz im Verkehrssektor.

In Abbildung 9-3 ist die Entwicklung der Verkehrsnachfrage im Basisszenario differenziert nach Personenverkehr national und international sowie Luftfracht (fast ausschließlich international) dargestellt. Kalkuliert man einen Passagier mit Gepäck mit durchschnittlich 100 kg, so entspricht dies 1/10 Tonne. Daher sind in der Darstellung die Personenkilometer in der Einheit Milliarden und die Tonnenkilometer in der Einheit 100 Mio. angegeben.

Abbildung 9-3: Entwicklung der Verkehrsleistung des Luftverkehrs in der Basis, 2010-2050



Quelle: Renewbility III

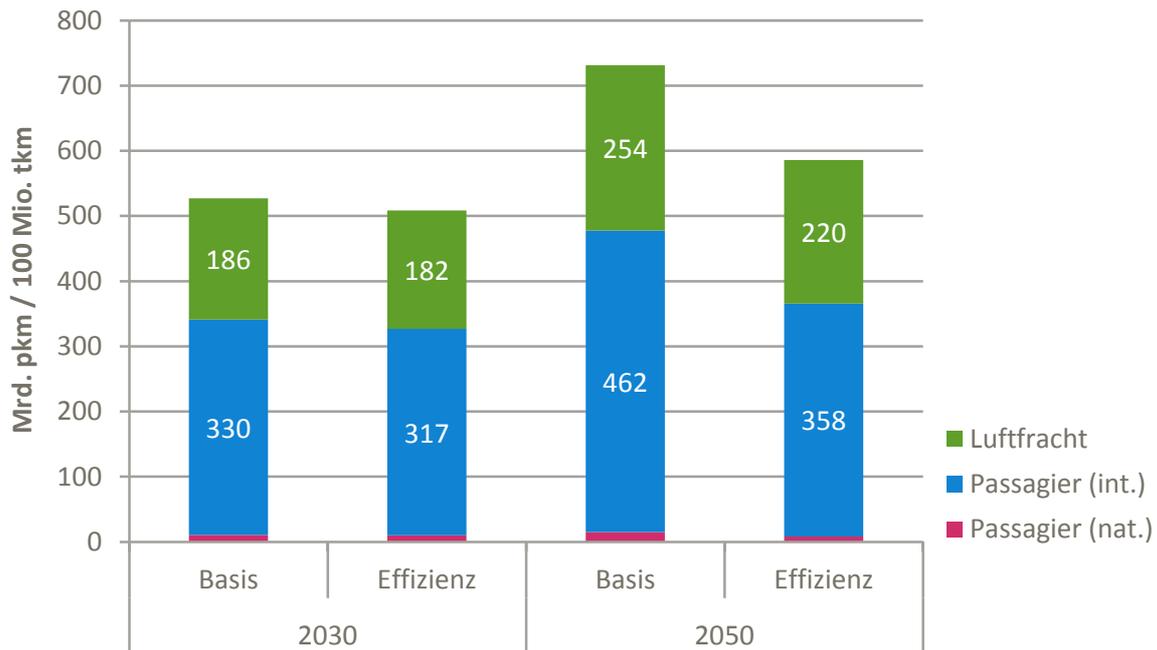
Im internationalen Luftverkehr gibt es im Basisszenario eine große Dynamik. Bereits bis zum Jahr 2030 steigen die Luftfracht um 70 % und der Personenverkehr um 80 % an. Die Verkehrsnachfrage im Jahr 2030 im Personenverkehr entspricht in etwa der Verkehrsprognose (dort: 332,4 Mrd. Personenkilometer im internationalen Luftverkehr). Grund dafür ist, dass bei zwei Annahmen von der Verkehrsprognose abgewichen wurde, welche gegenläufige Auswirkungen auf die Kosten haben und sich insgesamt nahezu ausgleichen: Einerseits wurde im Renewbility-Basisszenario im Gegensatz zur Verkehrsprognose die Deckelung der Luftverkehrsteuer auf 1 Mrd. Euro hinterlegt, was zu niedrigeren Kosten der Airlines führt. Andererseits wurde eine Effizienzsteigerung von 1,5 % statt 2 % angenommen, was zu höheren Kosten führt.

Zwischen 2030 und 2050 liegen die Wachstumsraten aufgrund des Bevölkerungsrückgangs und des damit verbundenen niedrigeren BIP-Wachstums nicht mehr ganz so hoch. Insgesamt steigt jedoch der Luftverkehr bis 2050 um rund 150 % gegenüber 2010 an. Das bedeutet, je Einwohner wird im Jahr 2050 rund 2,7 Mal so viel geflogen wie heute.

In den Renewbility-Szenarien wird als einzige Maßnahme im Luftverkehr, die auf die Verkehrsnachfrage wirkt, die Nutzerfinanzierung der zusätzlichen Herstellungskosten der CO<sub>2</sub>-freien Kraftstoffe hinterlegt. Die Kerosinkosten haben mit rund 30 % einen hohen Anteil an den Gesamtkosten der Airlines. Der Einsatz strombasierter Kraftstoffe in den Klimaschutzszenarien wirkt sich daher stark auf die Ticketpreise und damit auch auf die

Nutzerzahlen aus. Da Kerosin von der Energiesteuer befreit ist, haben höhere Herstellungskosten alternativer Kraftstoffe einen noch spürbareren Effekt auf die Nutzerpreise als dies bei Benzin und Diesel der Fall ist. In den Szenarien wird davon ausgegangen, dass im Luftverkehr international alternative Kraftstoffe eingesetzt werden und sich somit die Preise weltweit erhöhen werden.

**Abbildung 9-4: Verkehrsleistung im Luftverkehr im Jahr 2030 und 2050**



Quelle: Renewability III

Abbildung 9-4 zeigt die Verkehrsleistung im Basisszenario und im Szenario Effizienz im Vergleich. Die Entwicklung im Szenario Effizienz plus sowie den Szenaretten im internationalen Luftverkehr ist identisch zur Entwicklung im Szenario Effizienz und daher nicht zusätzlich dargestellt.

Die Personenverkehrsnachfrage liegt im internationalen Luftverkehr in den Klimaschutzszenarien im Jahr 2050 um 23 % niedriger als in der Basisentwicklung, ist allerdings immer noch fast doppelt so hoch wie im Jahr 2010. Bei der Luftfracht ist sie aufgrund der geringeren Preiselastizität dagegen nur um 13 % niedriger als im Basisszenario. Beim nationalen Luftverkehr wirken sich aufgrund der direkten Konkurrenz durch alternative Verkehrsmittel die höheren Preise deutlicher aus als im internationalen Luftverkehr und die Nachfrage geht um fast 50 % gegenüber dem Basisszenario zurück.

## 10 MATERIALVORLEISTUNGEN

### 10.1 HINTERGRUND UND AUSGANGSLAGE

Ein zentraler Pfad zur Dekarbonisierung des Verkehrssektors ist die Elektromobilität. Dies hat Auswirkungen über die direkten Emissionen des Verkehrs sowie der Energiebereitstellung hinaus. Elektrofahrzeuge benötigen andere Bauteile mit anderer Materialzusammensetzung als konventionelle Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor – das verändert die Energie- und Klimabilanz der Fahrzeugfertigung. Durch viele Millionen Elektrofahrzeuge verändert sich die technologische Basis der Kfz-Flotten massiv. Energieaufwand, Treibhausgasemissionen und andere Umweltwirkungen des Verkehrs werden damit aus der Phase der Nutzung zum Teil in die Herstellungsphase verlagert. Darüber hinaus verändert sich die Nachfrage nach Rohstoffen, da die Fahrzeuge aus anderen Materialien zusammengesetzt werden als bisher.

Zur umfassenden Betrachtung der Transformation des Verkehrssektors wird daher in Renewbility die Perspektive der Fahrzeugnutzung um die Fahrzeugherstellung erweitert. Die Ergebnisdarstellung für die Fahrzeugherstellung bezieht sich dabei immer auf die Treibhausgasemissionen und Materialbedarfe für die Fahrzeuge, die im betrachteten Jahr in die Flotte kommen (Neuzulassungen).

### 10.2 ANNAHMEN UND PARAMETER

In diesem Kapitel wird die Modellierung der Materialvorleistungen für alle Verkehrsmittel, die in Kapitel 4.3 grundlegend beschrieben ist, in den Kontext von Renewbility gestellt. Wichtige Modellparameter und die dazu getroffenen Annahmen werden erläutert.

#### 10.2.1 PKW UND LEICHTE NUTZFAHRZEUGE

Als erster Schritt zur Bilanzierung der Materialvorleistungen wurden die Fahrzeugkonzepte definiert. In Renewbility werden insgesamt 25 Pkw-Kombinationen sowie 3 LNF-Kombinationen betrachtet. Variiert werden dabei die technischen Ausprägungen nach den Größenklassen und nach Antriebskonzept:

- Pkw: Benzin, Diesel, CNG, LPG, Hybrid, BEV, PHEV, REEV, FCEV.
- LNF: Diesel, BEV, REEV

Tabelle 16-1 und Tabelle 16-2 im Anhang stellen alle Pkw- und LNF-Varianten nach verschiedenen Leichtbauvarianten beispielhaft für das Bezugsjahr 2030 dar. Die Gewichtsreduktion der Leichtbauvarianten bezieht sich dabei auf das Fahrzeug ohne Akku, da dieser in seiner Spezifikation vorgegeben war, deshalb spiegelt das absolute Leergewicht nicht exakt die prozentuale Gewichtsreduktion wider.

### 10.2.1.1 Rumpffahrzeug

Unter dem Rumpffahrzeug werden das Fahrgestell (Chassis) und die Fahrzeughülle verstanden. Das Rumpffahrzeug ist in einer Größenklasse für alle Antriebskonzepte identisch. Grundlage für die Bilanzierung von Pkw ist das Golf-Modell VI, das mit einem Marktanteil von 32 % in 2010 (KBA 2011) ein guter Repräsentant der Kompaktklasse ist. In (ifeu 2011) wurden detaillierte Gewichts- und Materialzusammensetzungen einzelner Bauteile auf Basis von Primärdaten von Volkswagen, wissenschaftlichen Studien und eigenen Abschätzungen ermittelt. Diese wurden auch in Renewbility verwendet. Zur Abbildung der verschiedenen Fahrzeuggrößen (klein, mittel, groß, LNF) wurde auch eine Variation der Materialverhältnisse untersucht. Literaturlauswertungen zeigen trotz der relevanten Unterschiede im Gesamtgewicht nur geringe Unterschiede zwischen den Pkw-Fahrzeuggrößen hinsichtlich der Materialzusammensetzung. Grundlage der Bilanzierung verschiedener Pkw-Fahrzeuggrößen ist daher eine lineare Skalierung des Materialeinsatzes. Für die LNF der Größenklasse „class III“ ergeben sich geringe, aber dennoch relevante Unterschiede im Materialverhältnis, sodass hier für das Rumpffahrzeug ein höherer Stahlanteil gegenüber Aluminium und Kunststoffen angenommen wurde (ifeu 2011).

Die zukünftige Entwicklung der Fahrzeuggewichte ist noch nicht absehbar. In der Vergangenheit ist das Fahrzeuggewicht durch steigende Komfort- und Sicherheitsansprüche insgesamt betrachtet gestiegen. Zukünftige Anforderungen zur Reduzierung des Energieverbrauchs dürften dem entgegenwirken. Die ursprüngliche Modellierung der Fahrzeugherstellung in eLCAr sieht die Abbildung einer einfachen Leichtbauvariante über einen höheren Aluminiemeinsatz in der Fahrzeugkarosserie vor (ifeu 2011, 2013, 2015). Da die Konzipierung der zukünftigen Fahrzeugkonzepte eine maßgebliche Rolle in Renewbility spielt und für zukünftigen Leichtbau sowohl neue Materialien als auch konstruktive Ansätze eine Rolle spielen können, wurde die Modellierung des Leichtbaus für Renewbility erweitert. Folgende Leichtbauvarianten sind in dem Modell abgebildet:

- Substitution von Stahlkomponenten durch Aluminium
- Substitution von Stahlkomponenten durch karbonfaserverstärkten Kunststoff (CFK)
- Reduktion des Materialeinsatzes durch optimierte Bauweise („Downsizing“).

Zur Abbildung der Fahrzeugausprägungen in Renewbility wurden vier Leichtbauszenarien für Pkw und drei Leichtbauszenarien für LNF entwickelt, die jeweils anteilig die Gewichtsreduktion gegenüber dem Referenzfahrzeug abbilden. Im ersten Schritt wurden Annahmen zur anteiligen oder vollständigen Substitution von Stahl getroffen. Im zweiten Schritt wurde die noch verbleibende Differenz zur insgesamt angestrebten

Leergewichtsreduktion mittels Downsizing proportional über alle Materialien abgebildet. Eine Übersicht der Leichtbauszenarien gibt Tabelle 16-3 im Anhang.

Nach Angaben des International Aluminium Institut (Alcan 2004) werden zwischen 0,5 kg und 0,8 kg Aluminium benötigt, um 1 kg Stahl zu ersetzen. In dieser Studie wird darauf basierend ein Wert von 0,6 angesetzt. Für CFK wurde schon heute eine Gewichtseinsparung gegenüber Stahl um 60 % nachgewiesen (Evertz et al. 2013). In Renewbility wird eine weitere technologische Verbesserung unterstellt. Somit wurde die Annahme getroffen, dass 0,34 kg CFK benötigt werden, um 1 kg Stahl zu ersetzen.

Die Prozessdaten für die Umweltbewertung der in den Fahrzeugen verbauten Materialien in eLCAr basieren auf ecoinvent. Für die Modellierung von karbonfaserverstärkten Kunststoffen (CFK) existieren in ecoinvent allerdings noch keine Prozessdaten. Deshalb wurde im Zuge von Renewbility ein Datensatz zur Modellierung der Leichtbauvarianten abgeleitet. Die Vorgehensweise ist im Anhang zu den Materialvorleistungen ausführlicher beschrieben.

#### **10.2.1.2 Antriebsstrang**

Der Antriebsstrang setzt sich aus dem Motor und weiteren antriebsspezifischen Zusatzbauteilen zusammen. Tabelle 16-4 im Anhang gibt eine Übersicht über die Bauteilgewichte für ein mittleres konventionelles (Diesel/Ottomotor) oder rein-elektrisches Fahrzeug aus dem Basisjahr 2010. Hybride Fahrzeuge benötigen Bauteile aus beiden Systemen, was zu einem insgesamt höheren Gewicht führt.

Bezogen auf die Abgasnachbehandlung ergeben sich Unterschiede im Einsatz der Platingruppenmetalle Platin und Palladium (PGM) zwischen Otto- und Dieselmotoren. Hier werden die Materialanteile nach (Öko-Institut 2009) zu Grunde gelegt und auf die Fahrzeuggrößen anteilig verrechnet.

Bei der Modellierung des Brennstoffzellenfahrzeugs liegt der Fokus der Bilanzierung auf den gegenüber Elektrofahrzeugen differierenden Komponenten. Fahrzeugrumpf, Motor und elektrische Zusatzbauteile werden analog dem batterieelektrischen mittleren Pkw bilanziert. Ein Akku wird benötigt, der den Brennstoffzellenantrieb in Leistungsspitzen unterstützt und die Rückgewinnung von Bremsenergie ermöglicht. Zudem werden die antriebsspezifischen Fahrzeugkomponenten Wasserstofftank und Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle (PEMFC) bilanziert. Eine Modellierung des Brennstoffzellenfahrzeugs wurde bereits im Zuge der UMBReLA-Studie umgesetzt (ifeu 2011) und für dieses Vorhaben nicht verändert.

### 10.2.1.3 Energiespeicher

Den Energiespeicher für die konventionellen Fahrzeuge bildet der Diesel- oder Benzintank, für einen mittleren konventionellen Pkw wird ein Kunststofftank (HDPE) von ca. 10 kg angenommen. Energiespeicher bei den alternativen Antriebskonzepten sind für die Elektrofahrzeuge der Akku und für die Brennstoffzelle der Druckwasserstofftank.

Für die Elektrofahrzeuge wurden in Renewbility fahrzeugspezifische Vorgaben für die Dimensionierung des Akkus getroffen. Für die Jahre 2010 und 2030 wurde jeweils ein energieoptimierter (für BEV und REEV) und ein leistungsoptimierter Lithium-Ionen Akku (für HEV und PHEV) bilanziert. Für 2050 wurde im Zuge der Anforderungen in Renewbility eine Post-Lithium-Ionen Technologie modelliert, in Form einer Lithiumsulfid-Zelle. Diese Akkusysteme wurden entsprechend auf die Vorgaben von Renewbility für die verschiedenen Fahrzeuge dimensioniert. Tabelle 10-1 gibt eine Übersicht der in Renewbility verwendeten Akkutypen. Die Modellierung ist im Anhang zu den Materialvorleistungen beschrieben.

**Tabelle 10-1: Akkutypen der verschiedenen Bezugsjahre für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge**

	2010	2030	2050
<b>Zell-Technologie</b>	Li-Ion	Li-Ion	Post Li-Ion (LiS)
<b>Wh/kg</b>	81 (energieoptimiert) 70 (leistungsoptimiert)	137 (energieoptimiert) 128 (leistungsoptimiert)	350
<b>kg THG/kWh</b>	111 (energieoptimiert) 137 (leistungsoptimiert)	60 (energieoptimiert) 73 (leistungsoptimiert)	34

Quelle: Renewbility III

Zur Speicherung von Wasserstoff im Brennstoffzellenfahrzeug wurde ein Kompositbehälter zur Speicherung von Druckwasserstoff bei 700 bar bilanziert. Diese Speicherung wird derzeit als sinnvollste Lösung angesehen (ifeu 2011). Der bilanzierte Komposittank besteht aus einem Kunststoffbehälter, der die Dichtigkeit des Systems gewährleistet und von einem Netz aus Kohlefasern ummantelt ist, welches für die notwendige Festigkeit des Systems sorgt. Die Materialzusammensetzung des Tanks richtet sich nach Angaben der Studie (Hua et al. 2010), die technische und wirtschaftliche Optimierungspotenziale von Hochdrucktanks untersucht. Dabei wird Kohlefaser durch Graphit abgebildet.

### 10.2.2 LASTKRAFTWAGEN

Im Rahmen von Renewbility wurde ein eigenes Modul für schwere Nutzfahrzeuge in eLCar mit Schwerpunkt auf Solo-Lkw sowie Last- und Sattelzügen erarbeitet. Es dient zur Ableitung der Treibhausgasemissionen aus der Fahrzeugfertigung und der Materialbedarfe für die

Lastkraftwagen. Analog zu Pkw wurden dabei verschiedene Lkw-Fahrzeugkonzepte über Fahrzeuggrößenklassen (d. h. das zulässige Gesamtgewicht) und Antriebskonzepte definiert. Abgebildet sind Solo-Lkw mit 3,5 bis 7,5 t zulässigem Gesamtgewicht (Leergewicht: 3,5 t), Solo-Lkw mit 7,5 bis 12 t zulässigem Gesamtgewicht (Leergewicht: 6 t), Solo-Lkw mit mehr als 12 t zulässigem Gesamtgewicht (Leergewicht: 11,2 t) sowie Last- und Sattelzüge mit bis zu 40 t zulässigem Gesamtgewicht (Leergewicht: 15,1 t). Alle Leergewichte stammen aus (AEA 2011) und gelten jeweils für die Basisvarianten mit Dieselantrieb.

Wie in Kapitel 4.3 beschrieben, setzt sich das Modell für schwere Nutzfahrzeuge aus unterschiedlichen Fahrzeugkomponenten zusammen, die je nach Fahrzeugkonfiguration separat angepasst werden können. Modelliert werden für Renewability Dieselfahrzeuge, Hybridfahrzeuge, Plug-In Hybride und Oberleitungsfahrzeuge, deren technische Daten in Tabelle 16-5 im Anhang gezeigt sind.

Für die meisten der benötigten Hintergrunddaten zu Materialvorketten und Energie werden Datensätze aus der ecoinvent Datenbank (Weidema et al. 2013) (Version 3.1) genutzt. Eine Ausnahme bildet der Emissionsfaktor für den direkt in der Produktion verwendeten Strom, dieser wird mit den Emissionsfaktoren für den nationalen Strommix im jeweiligen Renewability-Bezugsjahr angesetzt (vgl. Kapitel 3.2.2). Weiterhin wurde auch im Lkw-Modell mit dem übergreifenden Akku-Modul gearbeitet, das an die speziellen Randbedingungen bei schweren Nutzfahrzeugen angepasst wurde (s. Abschnitt „Zusatzkomponenten“).

Im Folgenden wird die Modellierung für die verwendeten Komponenten beschrieben.

#### **10.2.2.1 Basisfahrzeug**

Das Basisfahrzeug im Lkw-Modul setzt sich zusammen aus dem Rumpffahrzeug (Fahrzeugchassis, Aufbauten) und einem Diesel-Antriebsstrang. Es basiert auf einem Grunddatensatz („lorry 16 t RER“) aus der Ökobilanzdatenbank ecoinvent in der Version 3.1 (Weidema et al. 2013). Zur Vereinfachung wird angenommen, dass die Materialzusammensetzung eines schweren Nutzfahrzeuges weitgehend größenunabhängig ist, damit kann dieser Datensatz entsprechend des Leergewichts skaliert werden. Der Energiebedarf und die Hilfsstoffe für die Fertigung fallen in ecoinvent nur einmal pro Fahrzeug an und sind dort unabhängig von der Größe modelliert. Da eine Anfrage bei unterschiedlichen Herstellern schwerer Nutzfahrzeuge erfolglos blieb, konnten leider keine aktuelleren Daten für die Lkw-Herstellung abgeleitet werden.

Auf Grund des Alters des ecoinvent Basisdatensatzes haben schwere Nutzfahrzeuge hier noch keine Abgasreinigung. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass alle schweren Nutzfahrzeuge mit Dieselmotor heutzutage zur Einhaltung der Abgasgrenzwerte über ein

mehrstufiges Abgasreinigungssystem verfügen. Daher wurde im Rahmen von Renewbility eine Abgasnachbehandlung modelliert und der Basisdatensatz ergänzt. Diese basiert auf der Ökobilanz der Abgasnachbehandlung eines Radladers von Volvo nach (Salman and Chen 2013), da deren Material- und Fertigungsaufwendungen in etwa der Abgasnachbehandlung eines Euro 5 Lkw entsprechen. Für die verschiedenen Fahrzeuggrößenklassen wird die Abgasnachbehandlung in Renewbility je nach Leistung des verwendeten Dieselmotors skaliert. Ein wichtiges Material in der Abgasnachbehandlung ist Platin, das (vor allem als Primärplatin) sehr hohe Umweltwirkungen hat. Daher wurde der Anteil des Sekundärplatin gegenüberecoinvent aktualisiert und nach (Schmidt 2015) mit 25 % angesetzt.

### **10.2.2.2 Zusatzkomponenten für Elektrofahrzeuge**

Für die Fahrzeuge mit Elektroantrieb werden als weitere Komponenten der Elektroantrieb und ein Akku zum Basisfahrzeug addiert. Da in Renewbility ausschließlich hybride Elektrofahrzeuge vorkommen (PHEV, O-Lkw), bleibt der Diesel-Antriebsstrang inkl. Abgasnachbehandlung erhalten.

Die Bilanzierung des Elektromotors erfolgt nach (Habermacher, Althaus 2011). Der hier bilanzierte Elektromotor der Firma Brusa mit einer Leistung von 100 kW ist um die ebenfalls in der Quelle enthaltenen Converter, Inverter, Energieverteilung und Ladeelektronik ergänzt und wird je nach geforderter Leistung skaliert.

Die Modellierung der Lithium-Ionen Akkus erfolgt wie bei Pkw im übergreifenden Akkumodul (vgl. Kap. 4.3 und Anhang „16.4 Modellierung Energiespeichertechnologien für Elektrofahrzeuge“). Für die schweren Nutzfahrzeuge kommen grundsätzlich dieselben Akkus wie für die Pkw zum Einsatz, allerdings kann hier davon ausgegangen werden, dass die vorherrschende Zellchemie Lithiumeisenphosphat-Zellen (LFP) sind, da diese geringere Kosten als Lithiumakkus mit Mangancobaltoxid oder Nickelcobaltaluminiumoxid aufweisen. Bei den Lithium-Ionen Akkus mit Lithiumeisenphosphat-Zellen wird mit einer Energiedichte von 70 Wh/kg im Jahr 2010 und einer Energiedichte von 130 Wh/kg im Jahr 2030 gerechnet (ifeu 2015). Im Jahr 2050 werden ausschließlich Post-Lithium-Akkus mit Lithium-Schwefelzellen und einer Energiedichte von 350 Wh/ kg eingesetzt.

### **10.2.2.3 Abbildung von Leichtbau**

In Renewbility wird davon ausgegangen, dass durch Leichtbau 2,2 % des Kraftstoffverbrauchs von Lkw eingespart werden kann. Nach (ifeu, TU Graz 2015) gilt für 3 % Leergewichtsreduktion folgendes:

- Sattelzug: 400 kg Gewichtsreduktion bringen 0,7 % Verbrauchsreduktion
- Solo-Lkw: 200 kg Gewichtsreduktion bringen 1,2 % Verbrauchsreduktion.

Um die geforderten Verbrauchsreduktionen zu erreichen, muss demnach für Solo-Lkw eine Leergewichtsreduktion um etwa 6 % erfolgen. Für Sattelzüge wird eine erforderliche Leergewichtsreduktion um ca. 10 % angesetzt. Dabei wird angenommen, dass die Reduktion zur Hälfte konstruktiv (d. h. Materialreduktion durch andere Bauweise) und zur anderen Hälfte durch den Austausch von Stahlwerkstoffen durch Aluminium erreicht wird.

Die Leergewichtsreduktionen werden ausgehend vom Basisfahrzeug berechnet, wobei vereinfachend angenommen wird, dass Energiespeicher und Antrieb unverändert bleiben. Die damit erhaltenen Materialdifferenzen im Vergleich zum konventionellen Basisfahrzeug werden in Tabelle 16-6 im Anhang gezeigt.

### 10.2.3 SONSTIGE VERKEHRSMITTEL

Während Pkw, leichte Nutzfahrzeuge und Lkw aufgrund ihrer großen Bedeutung sehr detailliert betrachtet werden, wird für die anderen Verkehrsmittel in Renewbility ein vereinfachtes Vorgehen angewandt. Dabei werden lediglich die Treibhausgasemissionen aus der Herstellung der Basisfahrzeuge bezogen auf ihre Verkehrsleistung (Personen- bzw. Tonnenkilometer) bestimmt.

#### 10.2.3.1 Linien- und Reisebusse

Das Modell für die Linien- und Reisebusse basiert auf dem Datensatz („bus production“) aus der Ökobilanzdatenbank ecoinvent in der Version 3.1 (Weidema et al. 2013). Es werden dieselbetriebene Linienbusse (Leergewicht 11,8 t) und Reisebusse (Leergewicht 13,4 t) mit einer Länge von 12 Metern untersucht. Die Lebensdauer der Busse liegt bei 12 Jahren und ihre Jahresfahrleistung bei 60.000 km/a für den Linienbus bzw. 52.000 km/a für den Reisebus nach (McKinsey 2012), (busplaner.de 2012) und (busmagazin.de 2012).

Auch bei Bussen wird analog zum Lkw angenommen, dass die Materialzusammensetzung unabhängig von der Fahrzeuggröße konstant bleibt, und so wird der Materialeinsatz proportional zur Leergewichtsänderung skaliert. Der Energiebedarf und der Einsatz von Hilfsstoffen für die Fertigung sind wiederum in ecoinvent unabhängig von der Größe.

#### 10.2.3.2 Flugzeuge

Für die Flugzeugherstellung gibt es in ecoinvent nur einen stark vereinfachten Datensatz, der davon ausgeht, dass ein Flugzeug lediglich aus Aluminium und Kunststoff besteht. Daher wurde in Renewbility zur realistischeren Abbildung der Flugzeuge ein eigener Datensatz modelliert. Er basiert auf der Materialzusammensetzung eines Airbus A330-200 aus (de Oliveira Fernandes Lopes 2010), wobei weitere Materialien und Fertigungsverluste ergänzt wurden. Zusätzlich wurden die Fertigungsaufwendungen für Wasser und Energie sowie die

direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen der Flugzeugfabrik aus Daten einer Umweltbilanz von Airbus abgeschätzt (Airbus Operations SAS 2014). Diese Daten wurden genutzt, um die Treibhausgasemissionen und den Materialbedarf der verschiedenen Flugzeuge in Abhängigkeit ihres Leergewichtes zu modellieren. Nähere Infos zur Modellierung der Flugzeuge finden sich im Anhang in Kapitel 16.6.

### **10.2.3.3 Binnenschiffe**

Für die Schiffe wird mit dem ecoinvent 3.1 Datensatz „barge production“ gearbeitet und dieser anhand des Leergewichtes auf die mittlere Binnenschiffgröße (Leergewicht 330 t) in Deutschland skaliert. Die weiteren Daten der Binnenschiffe werden aus (Öko-Institut 2009) unverändert übernommen.

### **10.2.3.4 Schienenfahrzeuge**

Bereits in Renewbility I wurden Fahrzeugzusammensetzungen von Schienenverkehrsmitteln betrachtet, die im Rahmen von Renewbility III angepasst und aktualisiert wurden. Das Modul Schienenfahrzeuge wurde mit der Ökobilanzsoftware UmbertoNxt und Datensätzen aus ecoinvent 3.1 aufgesetzt. Die Schienenfahrzeuge werden definiert nach:

- Beförderungszweck (Personen- und Güterverkehr)
- Antriebsarten (Diesel/Elektro)
- Einsatzbereich (Nahverkehr, Fernverkehr).

Der Materialeinsatz von Schienenfahrzeugen wurde aufgrund der Datenlage und der geringen jährlichen Produktionsmengen von Schienenfahrzeugen in Renewbility nur näherungsweise abgeschätzt. Ecoinvent 3 enthält Daten zum Materialeinsatz für verschiedene Verkehrsmittel (Weidema et al. 2013). Aus der Zusammenstellung der vorliegenden Daten wurden Materialanteile abgeschätzt und mit den angesetzten Fahrzeugmassen verknüpft. Die Tabellen im Anhang in Kapitel 16.5 beschreiben die Fahrzeugkategorien im Schienenverkehr mit ihren spezifischen Leistungsmerkmalen sowie den spezifischen Materialeinsatz je Fahrzeugvariante.

### **10.2.3.5 Pedelec und Fahrrad**

In Renewbility III wurden zum ersten Mal die Zweiradkategorien Fahrräder und E-Fahrräder (Pedelecs) aus Gründen des zukünftigen Potentials abgebildet. Das Fahrrad bildet das Basisfahrzeug für das Pedelec, welches zusätzlich noch einen Elektromotor und einen Akku benötigt.

Tabelle 10-2 stellt die wichtigsten Kenngrößen der beiden Zweiradkategorien zusammen. Die Daten basieren hauptsächlich auf Ecoinvent 3.1 und dem 2015 abgeschlossenen Endbericht von Pedelec (ITD und ifeu 2015).

**Tabelle 10-2: Differenzierung von Zweirädern für das Basisjahr 2010**

Verkehrsmittel	Antriebskonzept	Lebensdauer [a]	Lebensfahrleistung [km]	Leergewicht [kg]
<b>Fahrrad</b>	Reine Muskelkraft	6	15.000	17
<b>E-Fahrrad</b>	Elektrische Unterstützung	6	15.000	25

Quelle: Renewbility III

Der Akku für die Pedelecs wurde analog zu der in Pkw verwendeten Lithium-Technologie modelliert. Im Unterschied zu den Pkw verwendet jedoch der Pedelec-Akku ein leichteres Kunststoffgehäuse (für Pkw wird aus Gründen der Sicherheit ein Stahlgehäuse angenommen). Für das Basisfahrrad wird ab 2030 ein Carbonrahmen angenommen. Dies ist teilweise heute schon bei Sporträdern in der Standardausführung umgesetzt. Die Energiedichte verbessert sich analog zu den Pkw-Akkus auch für die Pedelec-Akkus.

### 10.3 ERGEBNISSE AUF EINZELFAHRZEUGEBENE FÜR STRASSENFAHRZEUGE

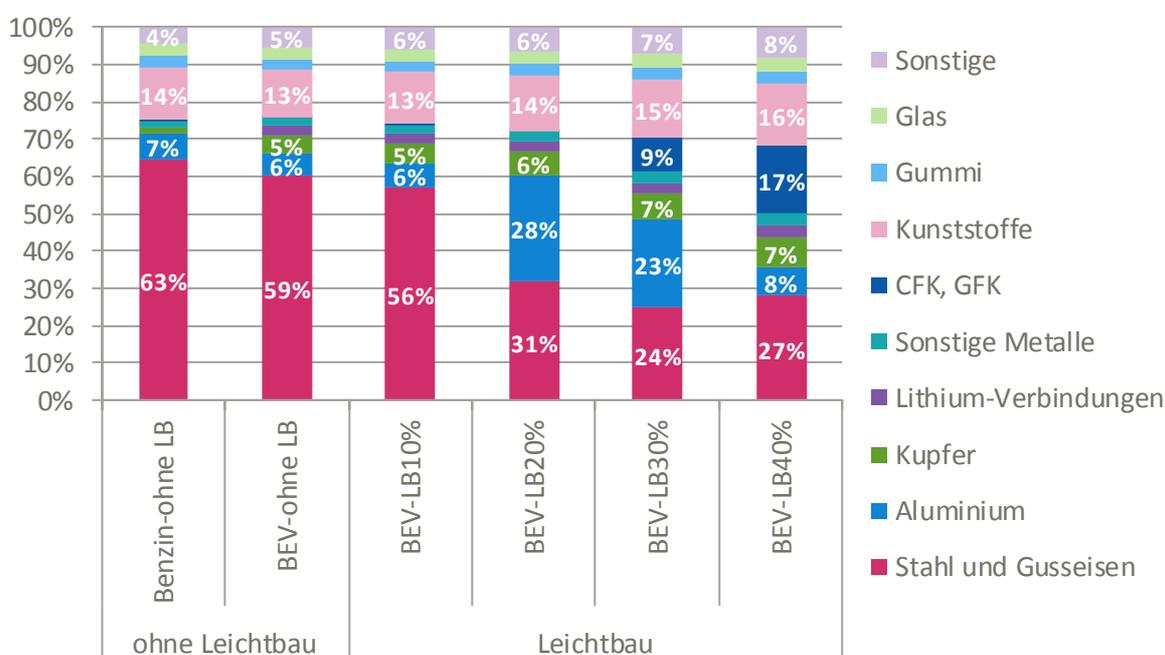
In der klassischen Betrachtung von Emissionsbeiträgen des Verkehrssektors werden häufig nur die Emissionen der Nutzungsphase betrachtet, da die Emissionen aus der Verbrennung des Kraftstoffs im Motor (direkte) und der Energievorkette (indirekte) die Gesamtemissionen eines Fahrzeuges dominieren. Im Zuge der Elektrifizierung von Fahrzeugen verschieben sich die Emissionsbeiträge stärker in die Herstellungsphase, da in Elektrofahrzeugen mehr und herstellungsintensivere Materialien verwendet werden. Umgekehrt nimmt insbesondere bei der Verwendung von erneuerbarem Strom der Betrag der THG-Emissionen in der Nutzungsphase ab. So konnte in verschiedenen Studien des ifeu (2011, 2013, 2016) gezeigt werden, dass bei konventionellen verbrennungsmotorischen Fahrzeugen die Herstellungsphase einen Beitrag von ca. 15 % an den gesamten Emissionen hat. In der Gesamtbetrachtung reiner Elektrofahrzeuge steigt der Anteil der Herstellungsphase unter Berücksichtigung des heutigen Energiemixes auf 27 %. Wird das Fahrzeug mit 100 % EE-Strom betankt, dominiert schließlich die Herstellung mit 75 % die Gesamtbilanz (ifeu 2016).

Elektrofahrzeuge benötigen andere Bauteile mit anderen Materialzusammensetzungen. Insbesondere der große Akku bei rein batterieelektrischen Fahrzeugen nimmt den größten Einfluss auf die Material- und Klimabilanz der Fahrzeuge. Außerdem werden in Zukunft

verschiedene Leichtbaustrategien eine Rolle spielen und ebenfalls relevante Auswirkungen auf die Ergebnisse der Materialvorleistungen haben. Deshalb liegt der Fokus in der folgenden Betrachtung auf den Pkw-Fahrzeugen.

Abbildung 10-1 stellt exemplarisch für das Herstellungsjahr 2030 die Materialzusammensetzung eines Benzin-Pkw ohne Leichtbauvariante dem Elektrofahrzeug mit verschiedenen Leichtbauvarianten gegenüber. Die Abbildung zeigt für das konventionelle Fahrzeug den dominierenden Anteil von Eisenmaterialien. Beim Elektrofahrzeug zeigt sich eine größere Vielfalt bei den Materialien mit Zunahme der Anteile von Kupfer und anderen Metallen (z. B. Nickel und Seltene Erden) und dem Hinzukommen von Lithium-Verbindungen. Mit zunehmend starker Leichtbaustrategie gewinnen in der Gegenüberstellung auch die Leichtbaumaterialien Aluminium und CFK an Bedeutung.

**Abbildung 10-1: Materialzusammensetzung auf Einzelfahrzeugebene für verschiedene Pkw-Konzepte und Leichtbauvarianten (Herstellungsjahr 2030)**



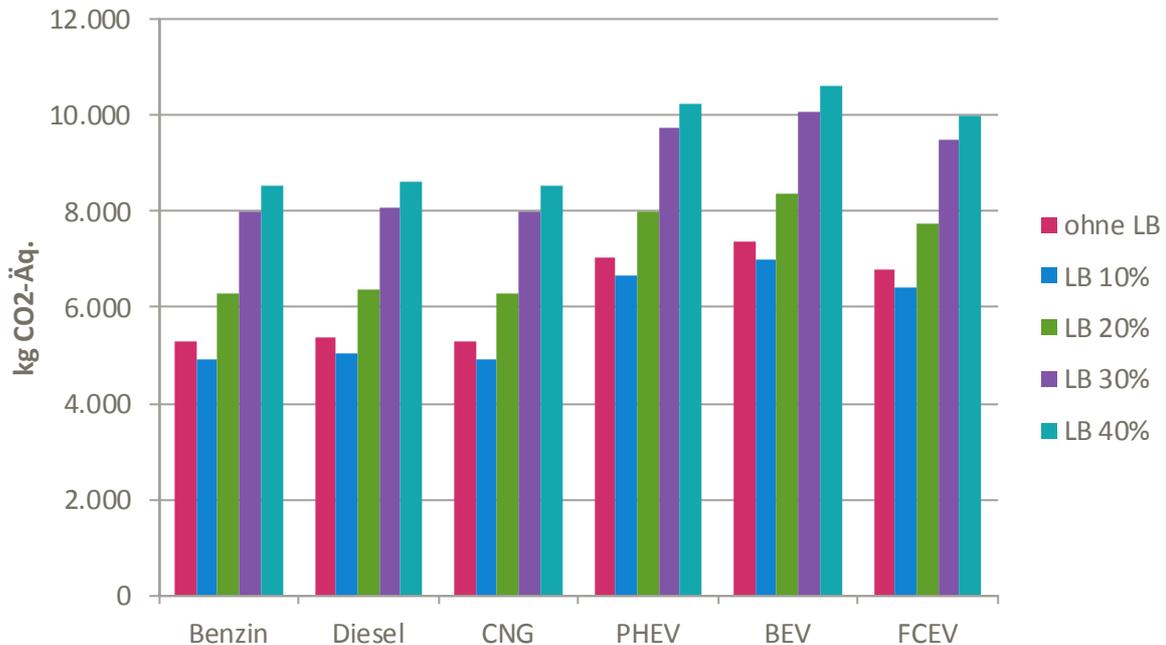
Quelle: Renewbility III

Abbildung 10-2 zeigt die THG-Emissionen der Fahrzeugherstellung auf Ebene der Einzelfahrzeuge für unterschiedliche Antriebskonzepte und Leichtbauvarianten für das Jahr 2030. Insgesamt wird deutlich, dass die alternativen Antriebe PHEV, BEV und FCEV in der Herstellungsphase höhere THG-Emissionen haben als die konventionellen Antriebe. Dies liegt an den hohen Emissionsbeiträgen der Energiespeicher der Elektrofahrzeuge.

Bei der Betrachtung der Leichtbauszenarien zeigt sich zunächst für die „Leichtbauvariante 10 %“ eine Reduktion der THG-Emissionen der Herstellung, dies ist auf den reduzierten Stahlbedarf dieser Fahrzeuge zurückzuführen. Dank verbesserter Stahlkonzepte und Downsizing-Strategien der Bauteile im Antriebsstrang wird weniger Material für das gleiche Fahrzeug benötigt. Die drei anderen Leichtbauvarianten setzen vermehrt die Leichtbaumaterialien Aluminium und CFK in der Karosserie ein, um höhere Gewichtsreduktionen zu erzielen. Da die Herstellung dieser Leichtbaumaterialien bisher mit höheren Herstellungsaufwendungen verbunden ist, bewirkt das eine Erhöhung der herstellungsbedingten Emissionen gegenüber Varianten ohne bzw. mit wenig Leichtbau.

An dieser Stelle zeigt sich die Schwierigkeit der Bewertung zukünftiger Entwicklungen der Materialvorleistungen. Im Zuge des Pariser Klimaabkommens sollen weltweit bis 2050 starke Treibhausgasreduzierungen in allen Sektoren erreicht werden, das schließt auch die Bereitstellungsprozesse für Aluminium, CFK und andere Fahrzeugmaterialien ein. Allerdings ist mittelfristig nicht auszuschließen, dass der Energiebedarf in anderen Ländern gerade für energieintensive Prozesse zunächst weiterhin in größerem Maße durch fossile Energien gedeckt wird oder bei stark zunehmender weltweiter Materialnachfrage der Beitrag fossiler Energien sogar zwischenzeitlich steigt. Renewbility adressiert Dekarbonisierungsstrategien im nationalen Politikrahmen, einschließlich eines steigenden Einsatzes von erneuerbarem Strom in der Fahrzeugindustrie. Zukünftige Veränderungen des weltweiten Energieeinsatzes für die Bereitstellung der benötigten Materialien können nach dem derzeitigen wissenschaftlichen Stand nicht bewertet werden. Daher werden in der Modellierung heutige spezifische Emissionen aus der Materialherstellung auch für die Szenarien beibehalten.

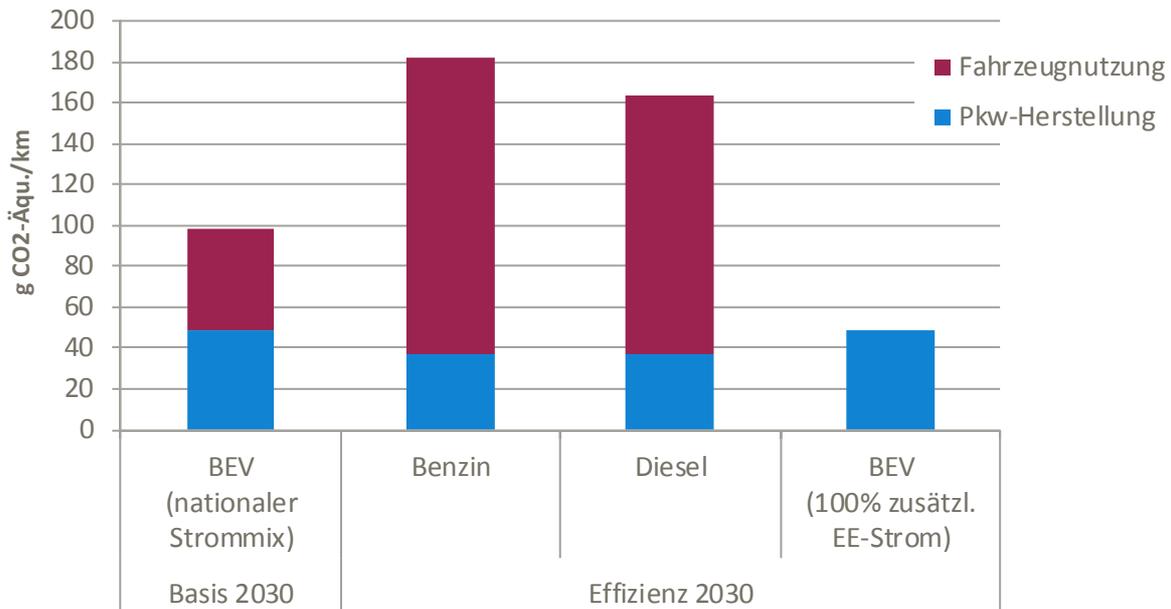
Abbildung 10-2: THG-Emissionen auf Einzelfahrzeugebene für verschiedene Pkw-Konzepte und Leichtbauvarianten (Herstellungsjahr 2030)



Quelle: Renewbility III

Die THG-Emissionen der Herstellung eines batterieelektrischen Pkw (BEV) sind im Jahr 2030 im Mittel etwa um ein Drittel höher gegenüber der Herstellung eines vergleichbaren Benzin- oder Diesel-Pkw. Diesen höheren herstellungsbedingten Treibhausgasemissionen stehen aber gleichzeitig deutlich niedrigere Treibhausgasemissionen in der Nutzungsphase gegenüber, wie Abbildung 10-3 exemplarisch zeigt. Bereits bei mittlerem nationalem Strommix im Jahr 2030 betragen die Emissionen der Fahrzeugnutzung beim BEV nur etwa 34 % bzw. 39 % gegenüber einem Benzin- bzw. Diesel-Pkw. In Summe aus Herstellung und Nutzung hat ein Elektro-Pkw im Jahr 2030 damit um 40 % bis 45 % niedrigere THG-Emissionen als ein vergleichbarer Benzin- oder Diesel-Pkw. Mit direktem Einsatz von 100 % zusätzlichem EE-Strom, wie im Effizienzscenario angenommen, kommt der BEV-Pkw im Jahr 2030 insgesamt auf ca. 70 % THG-Minderung gegenüber Benzin- und Diesel-Pkw. Beim Einsatz strombasierter Kraftstoffe treten zusätzlich noch neue Materialbedarfe bzw. Energieaufwände z. B. durch die Nutzung großer Elektrolyseure auf, die in diesem Rahmen nicht berücksichtigt wurden.

**Abbildung 10-3: Beiträge von Fahrzeugherstellung und –Nutzungsphase zu den gesamten THG-Emissionen der Pkw-Lebensdauer für verschiedene Pkw-Konzepte**

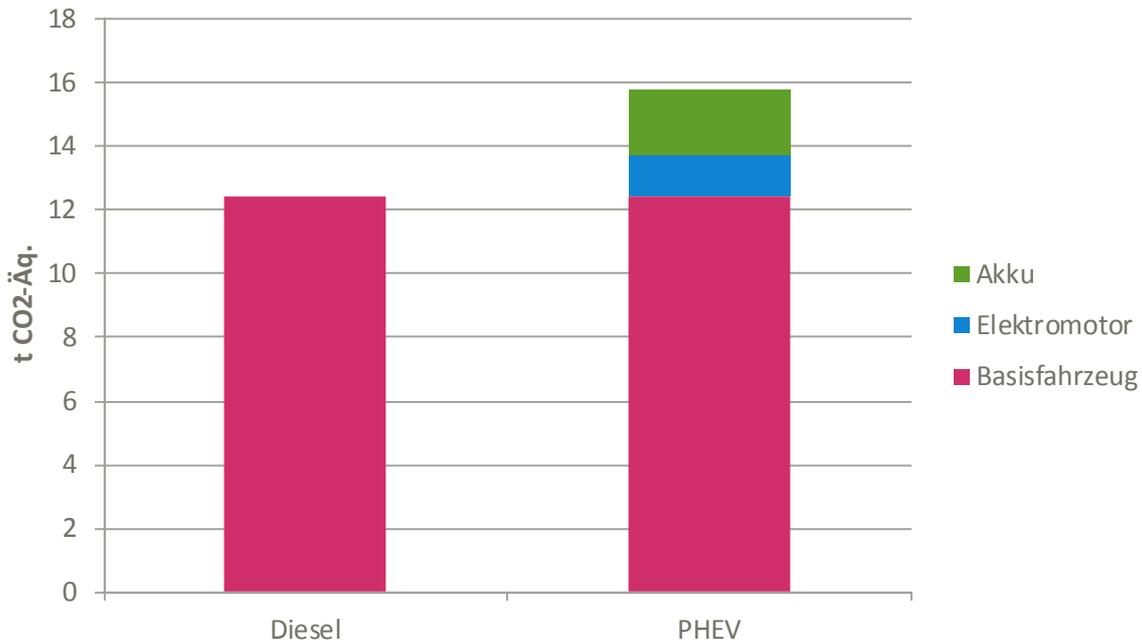


Quelle: Renewbility III

Zwischen 2030 und 2050 sinken die modellierten THG-Emissionen der Herstellung eines mittleren BEV-Pkw um 21 %, davon sind 12 % auf die Verbesserung in der Akkutechnologie zurückzuführen. Der hier abgebildete LiS Akku im Jahr 2050 ist trotz größerer Kapazität mit rund einem Drittel geringeren THG-Emissionen verbunden als der Li-Ion Akku im Jahr 2030 (vgl. Tabelle 10-1 und Anhang 16). Der restliche Reduktionsbeitrag (9 %) der THG-Emissionen ist auf den verbesserten Strommix für das Jahr 2050 in den Produktionsprozessen in Deutschland zurückzuführen. Unter der Voraussetzung, dass mit Umsetzung des Pariser Klimaabkommens auch weltweit bis 2050 die Materialbereitstellungsprozesse optimiert werden und die Nutzung von erneuerbaren Energien weltweit stark ansteigt, ist auch eine deutlich stärkere Absenkung der THG-Emissionen in der Fahrzeugherstellung möglich.

Für die anderen Straßenfahrzeuge ist der Trend bei Treibhausgasemissionen und Materialzusammensetzung pro Einzelfahrzeug ähnlich wie bei Pkw, dessen Ausprägung jedoch speziell bei Lkw auf Grund ihrer geringeren Elektrifizierung schwächer ausfällt. So kommen bis 2050 keine rein batterieelektrischen Lkw zum Einsatz, sondern nur Plug-In Hybride oder Oberleitungs-Lkw. Abbildung 10-5 zeigt die Gegenüberstellung eines Diesel- und eines PHEV-Lkw. Auch Leichtbau hat bei Lkw eine geringere Bedeutung als bei Pkw.

Abbildung 10-4: THG-Emissionen auf Einzelfahrzeugebene für Diesel- und PHEV-Solo-Lkw 3,5-7,5 t (Herstellungsjahr 2050)



Quelle: Renewability III

## 10.4 ERGEBNISSE BASISZENARIO

### 10.4.1 PKW-VERKEHR

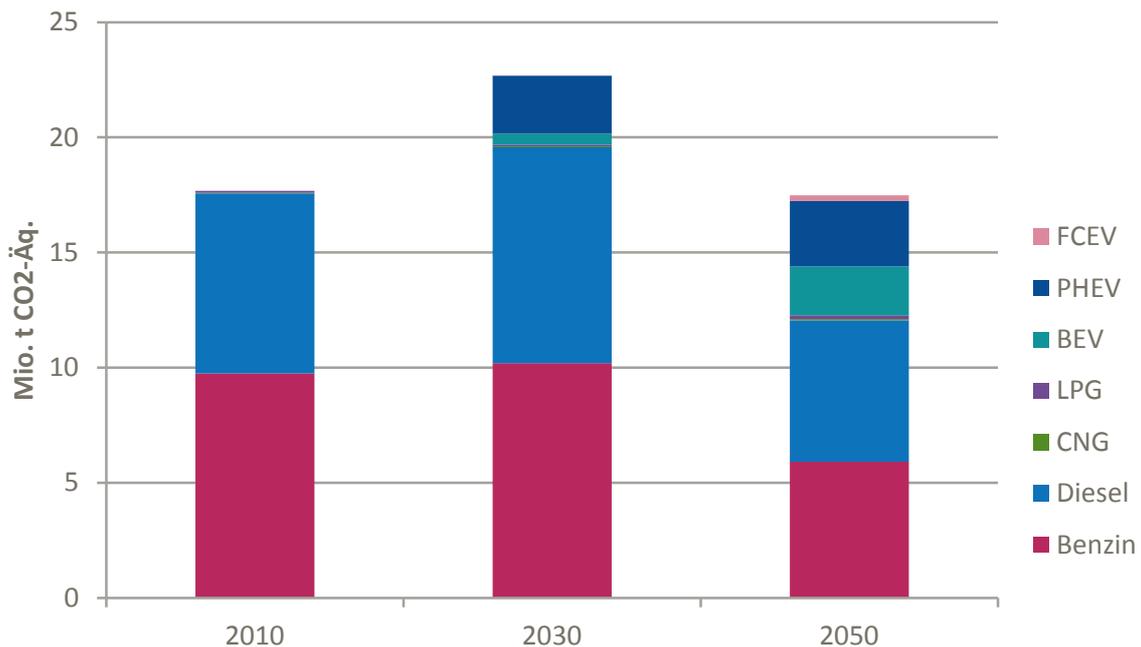
Die THG-Emissionen der Fahrzeugherstellung sowie die Materialvorleistungen hängen stark von der Anzahl der Neuzulassungen in einem Jahr sowie den Neuzulassungsanteilen verschiedener Fahrzeugkonzepte (Größenklasse, Antriebskonzept, Leichtbau) mit deren individuellen Materialzusammensetzungen ab. In allen Szenarien steigen die Pkw-Neuzulassungen bis zum Jahr 2030 zunächst an, bis 2050 gehen die Neuzulassungen dann je nach Szenario unterschiedlich stark zurück. Bereits in der Basisentwicklung kommt es zu Verschiebungen hin zu alternativen Antriebskonzepten (insbesondere Elektro-Pkw (BEV, PHEV, REEV)). Der Neuzulassungsanteil von Pkw mit konventionellen Antrieben (Benzin, Diesel) sinkt bis 2050 auf 70 % (vgl. Kapitel 5).

#### 10.4.1.1 Treibhausgasemissionen der Fahrzeugherstellung

Analog zu der Entwicklung der Neuzulassungen im Basisszenario steigen im Pkw-Verkehr die Treibhausgasemissionen aus der Fahrzeugherstellung bis 2030 zunächst an. Der Anstieg der Herstellungsemissionen wird dadurch verstärkt, dass mehr Hybride und reine Elektrofahrzeuge in die Flotte kommen. Diese Fahrzeugkonzepte sind in der Herstellung mit höheren spezifischen Treibhausgasemissionen verbunden (vgl. Kapitel 4.3). Bis 2050

verstärkt sich dieser Effekt weiter: Die Treibhausgasemissionen der Pkw-Herstellung sind im Basisszenario im Jahr 2050 nahezu gleichauf mit denen im Jahr 2010, obwohl die Neuzulassungen um 8 % zurückgegangen sind.

**Abbildung 10-5: THG-Emissionen in der Pkw-Herstellung im Basisszenario**



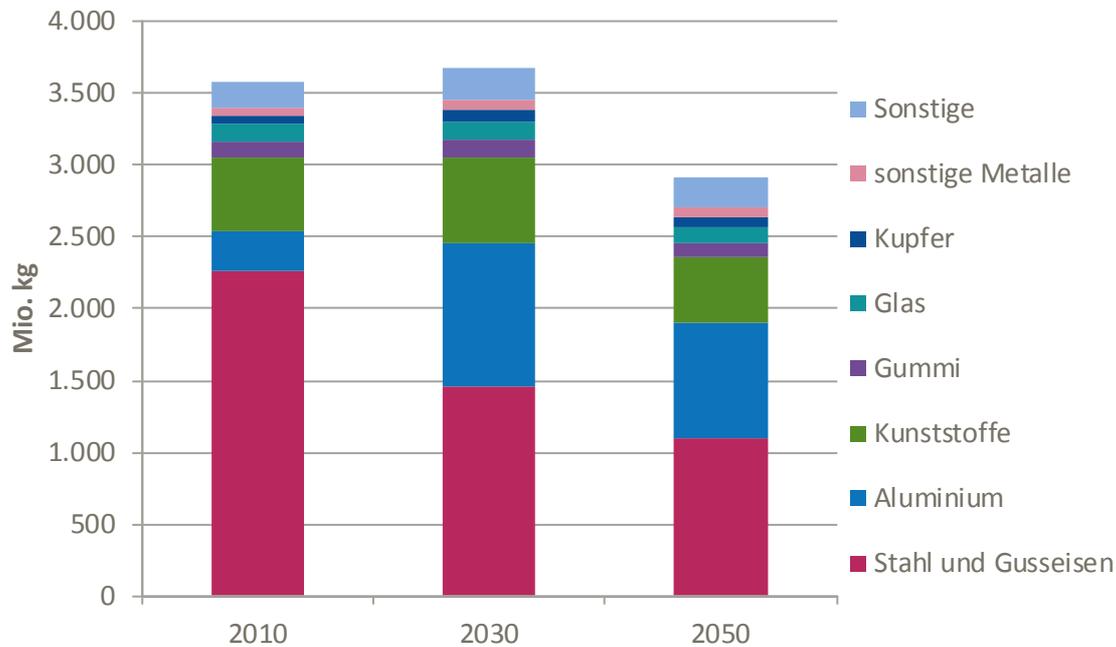
Quelle: Renewbility III

### 10.4.1.2 Materialeinsatz in den Fahrzeugen

Der Materialeinsatz in den neu produzierten Pkw steigt im Basisszenario zukünftig leicht bis 2030 an und geht dann stark zurück (Abbildung 10-6). Diese Entwicklung spiegelt ebenfalls die Entwicklung der Neuzulassungen wider. Dabei bewirkt der gleichzeitig steigende Leichtbauanteil eine zusätzliche Verringerung des Materialeinsatzes bis 2050. Außerdem kommen in Zukunft Akkuzellen mit einer höheren Energiedichte und somit leichtere Akkusysteme zum Einsatz, was ebenfalls zu einer Verringerung des spezifischen Fahrzeuggewichts führt. Der Materialeinsatz in der Neuzulassungsflotte ist damit im Basisszenario im Jahr 2050 insgesamt um 18 % niedriger als 2010.

Auch die Materialzusammensetzung der Neuzulassungsflotte spiegelt die Zusammensetzung auf Einzelfahrzeugebene und die Neuzulassungsanteile verschiedener Fahrzeugkonzepte wider. Generell zeigt sich die Dominanz von Eisen- und Stahlmaterialien in Pkw. Deutlich wird aber bereits in der Gesamtbetrachtung der überproportionale Zuwachs von Aluminium und Kupfer, getrieben durch den zunehmenden Alu-Leichtbau und die Akkumaterialien.

Abbildung 10-6: Materialeinsatz in der Pkw-Herstellung im Basisszenario



Quelle: Renewbility III

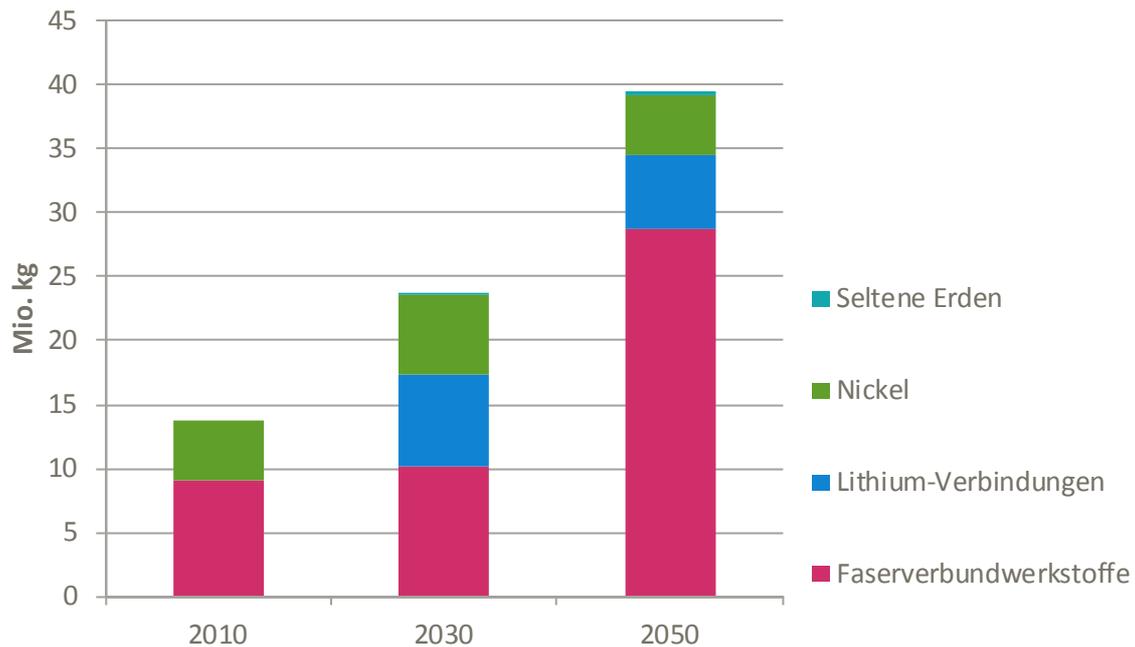
In der aggregierten Betrachtung des gesamten Materialeinsatzes wird die Entwicklung des Bedarfs an neuen Materialkonzepten teilweise überdeckt. Im Zusammenhang mit der Elektromobilität werden gerade die Rohstoffe Lithium, Nickel und Seltene Erden diskutiert. Diese Materialien kommen bei einer reinen Massenbetrachtung in einem weitaus geringeren Umfang im Vergleich zu den Massenmetallen Stahl oder Aluminium vor. Da sie aber global nicht im gleichen Umfang gefördert werden und auch andere Schlüsseltechnologien einen steigenden Nachfragedruck auf deren Förderungsstruktur ausüben, ist auch dieser auf den ersten Blick geringe Einsatz relevant für die Materialbetrachtung. Deshalb zeigt Abbildung 10-7 ausgewählte Schlüsselmaterialien abgetrennt von den übrigen Fahrzeugmaterialien.

Zum einen sieht man deutlich bis 2030 einen Anstieg des Bedarfs an Lithiumverbindungen, bedingt durch das stärkere Aufkommen der Elektrofahrzeuge. 2050 geht der Anteil der Lithiumverbindungen relativ gesehen zurück, obwohl 2050 mehr Elektrofahrzeuge zugelassen werden. Das ist auf den Einsatz von Post-Lithium-Ionen Akkus zurückzuführen, die sehr viel weniger Lithiumverbindungen benötigen.

Auch die eingesetzte Masse von Seltenen Erden steigt – getrieben durch ihren Einsatz in Elektromotoren – auf 325 t bis 2050 an.

Ein weiterer Trend für 2050 ist schließlich der Anstieg der Faserverbundwerkstoffe, die auch Karbonfasern umfassen. Das ist auf die zunehmende CFK-Leichtbauvariante zurückzuführen.

**Abbildung 10-7: Ausgewählte Materialien in der Pkw-Herstellung im Basisszenario**



Quelle: Renewbility III

## 10.4.2 STRASSENGÜTERVERKEHR

Auch im Straßengüterverkehr hängen die THG-Emissionen der Fahrzeugherstellung sowie die Materialvorleistungen stark von der Anzahl der Neuzulassungen sowie den Neuzulassungsanteilen verschiedener Fahrzeugkonzepte (Größenklasse, Antriebskonzept, Leichtbau) mit deren individuellen Materialzusammensetzungen ab.

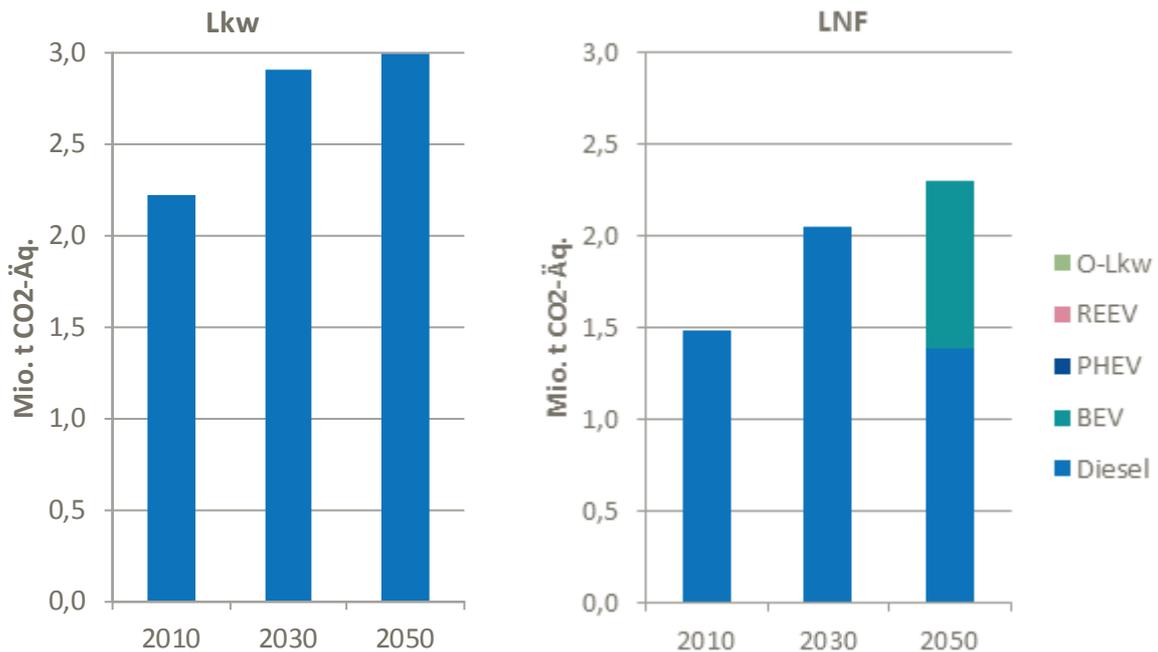
Im Gegensatz zu den Pkw steigt die Gesamtmenge der Neuzulassungen von Nutzfahrzeugen im Basisszenario auch nach 2030 weiter bis 2050, da die Verkehrsleistung im Straßengüterverkehr in Zukunft weiter zunimmt. Dabei kommen im Basisszenario bei Lkw > 3,5 t auch in Zukunft nur Dieselfahrzeuge zum Einsatz. (vgl. Kapitel 4.2.2). Auch die Zahl der Neuzulassungen bei den leichten Nutzfahrzeugen steigt an (etwas schwächer als bei den Lkw), hier findet im Basisszenario eine teilweise Elektrifizierung statt – etwa 30 % der LNF-Neuzulassungen im Jahr 2050 sind batterieelektrische Fahrzeuge.

### Treibhausgasemissionen der Fahrzeugherstellung

Analog zu den Neuzulassungen steigen bei den Straßengüterfahrzeugen auch die Treibhausgasemissionen aus der Fahrzeugherstellung im Laufe der Jahre an. Während der Anstieg bei den Treibhausgasemissionen der Lkw ausschließlich auf die steigenden

Neuzulassungen zurückzuführen ist, kommen bei den leichten Nutzfahrzeugen die höheren spezifischen Treibhausgasemissionen der batterieelektrischen Fahrzeuge bis zum Jahr 2050 dazu, so dass die Treibhausgasemissionen stärker als die Neuzulassungen zunehmen.

**Abbildung 10-8: THG-Emissionen in der Lkw- und LNF-Herstellung im Basisszenario**

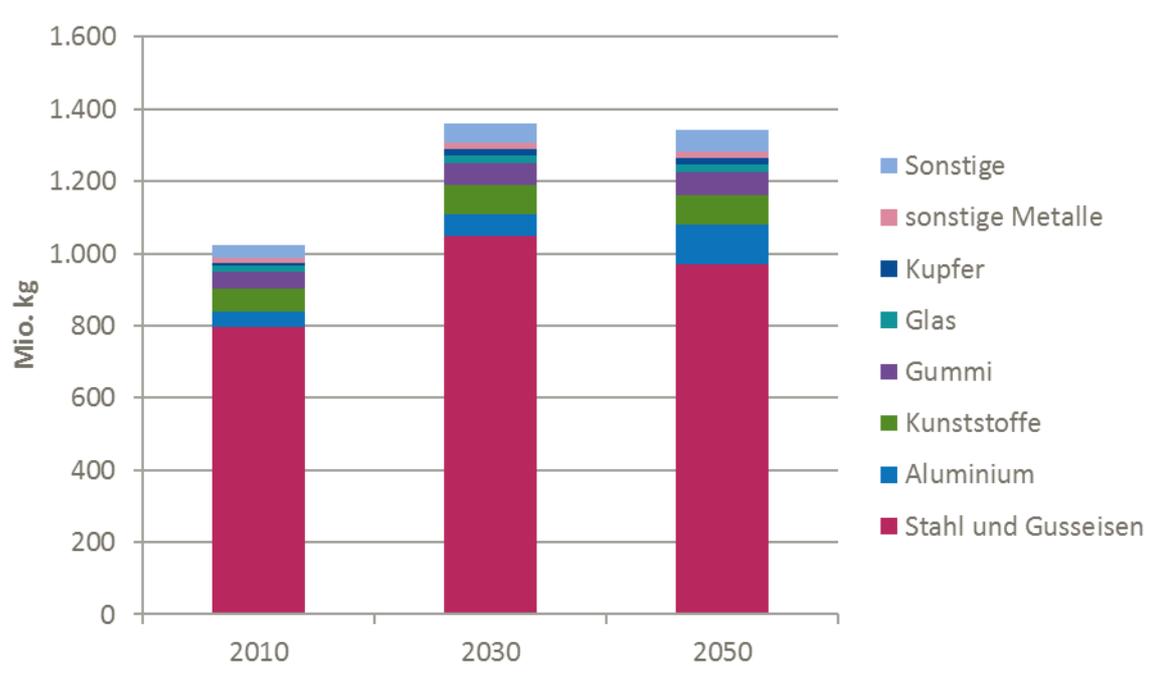


Quelle: Renewbility III

### Materialeinsatz in den Fahrzeugen

Auch der Materialeinsatz in leichten und schweren Nutzfahrzeugen steigt im Basisszenario zukünftig deutlich an (Abbildung 10-9). Der Gesamtanstieg des Materialeinsatzes ist vor allem auf die steigende Anzahl von Neuzulassungen zurückzuführen.

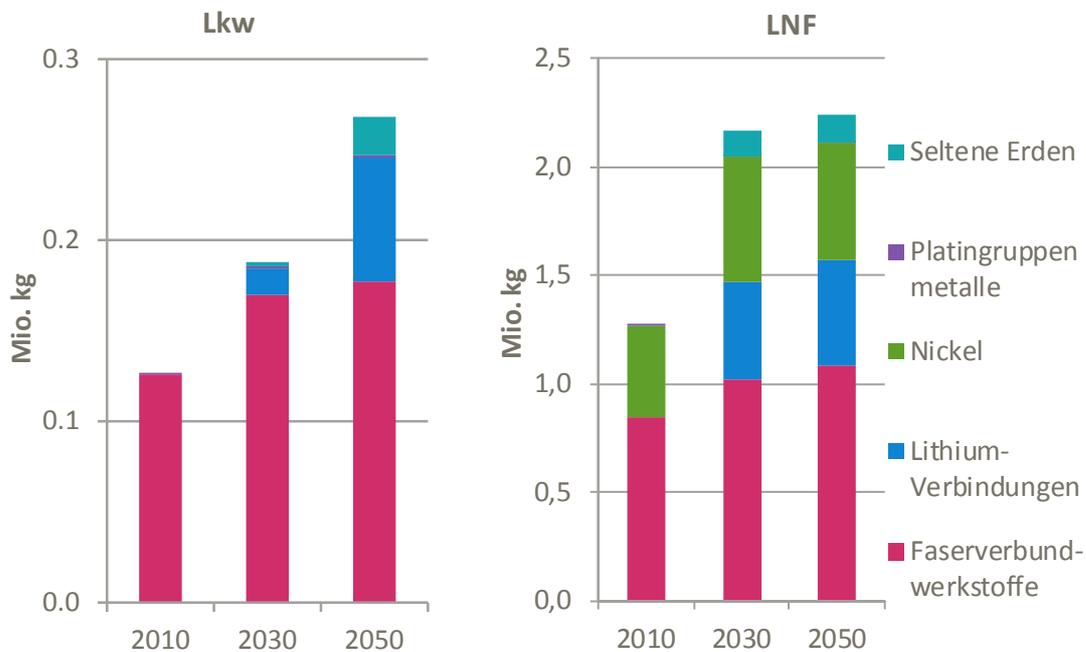
Abbildung 10-9: Materialeinsatz in der Lkw- und LNF-Herstellung im Basisszenario



Quelle: Renewbility III

Interessant ist (analog zu Pkw) auch hier die Betrachtung ausgewählter Materialien, die besondere Bedeutung für zukünftige Fahrzeugtechnologien haben (Abbildung 10-10). Speziell die für den Elektroantrieb und den Akku benötigten Materialien wie Lithium-Verbindungen, Nickel und seltene Erden werden im Basisszenario bei den leichten Nutzfahrzeugen verstärkt genutzt. Dabei wird analog zu den Entwicklungen im Pkw-Verkehr der Anstieg bei den Lithium-Verbindungen zwischen den Jahren 2030 und 2050 teilweise durch die Einführung von Lithium-Schwefel Akkus gedämpft. Da bei den Lkw > 3,5 t im Basisszenario keine elektrischen Fahrzeuge in die Flotte kommen, sondern lediglich Diesel-Lkw mit Hybridisierung eingesetzt werden, fällt dieser Effekt hier geringer aus.

Abbildung 10-10: Ausgewählte Materialien in der Lkw- und LNF-Herstellung im Basisszenario



Quelle: Renewbility III

### 10.4.3 GESAMTER VERKEHRSSSEKTOR

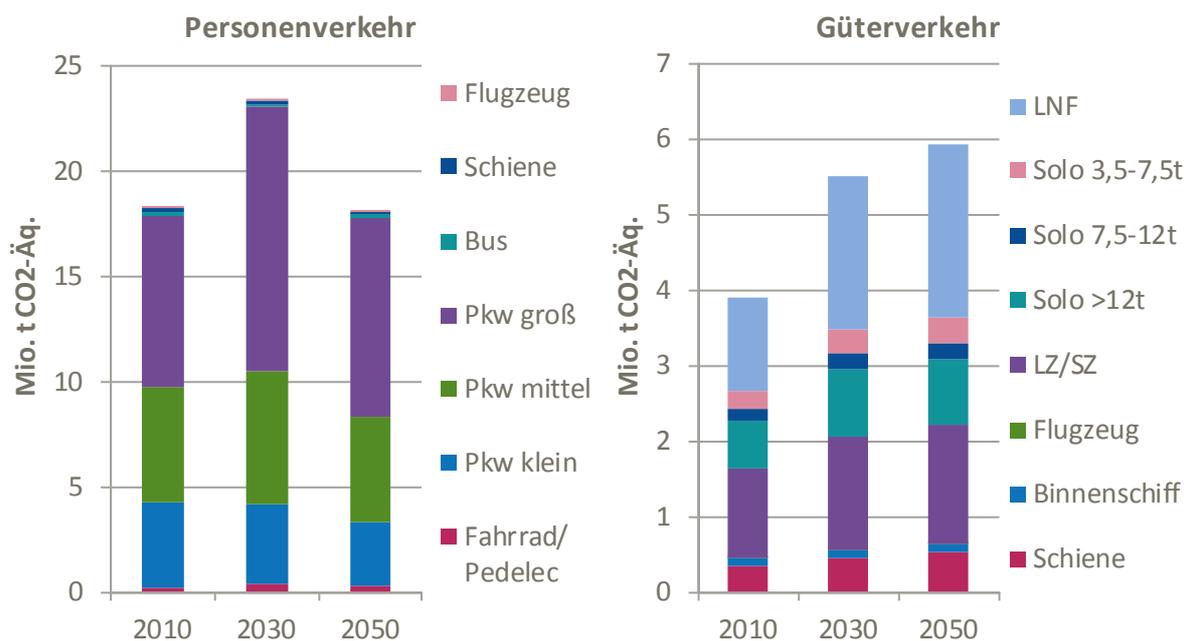
Im Unterschied zur Einzelbetrachtung der Pkw, LNF und Lkw können bei den anderen Verkehrsmitteln Treibhausgasemissionen und Materialeinsatz der Herstellung nicht über die jährlichen Neuzulassungen zugerechnet werden. Informationen zu den jährlich neu in die Flotte kommenden Schienenfahrzeugen, Schiffen und Flugzeugen sind in der Statistik nicht ausreichend erfasst. Daher werden für diese Verkehrsmittel die Herstellungsaufwendungen pro Fahrzeug auf eine mittlere Lebenslaufleistung umgelegt und anschließend pro Bezugsjahr über die jährlichen Personen-/Tonnen-Kilometer der gesamten Fahrzeugflotte hochgerechnet. Da in Renewbility bei den übrigen Verkehrsmitteln keine technischen Weiterentwicklungen und damit Änderungen der spezifischen Herstellungsaufwendungen pro Fahrzeug betrachtet werden, resultieren aus diesem Vorgehen – unter Annahme gleichmäßig über die Jahre erfolgender Flottenumschichtungen – keine Unterschiede der für einzelne Jahre auf Deutschland hochgerechneten THG-Emissionen der Fahrzeugherstellung.

Die Analysen zeigen, dass für die Treibhausgasemissionen der Fahrzeugherstellung sowohl im Personen- als auch Güterverkehr neben dem Straßenverkehr keine weiteren Verkehrsmittel eine größere Rolle spielen.

Die THG-Emissionen aus der Herstellung der Personenfahrzeuge (Abbildung 10-11, links) werden stark von Pkw dominiert, deren Anteil in allen Bezugsjahren > 96 % ist.

Im Güterverkehr (Abbildung 10-11, rechts) sind die anteiligen Treibhausgasemissionen der Herstellung anderer Verkehrsmittel (Binnenschiffe, Frachtflugzeuge, Güterzüge) etwas höher, aber auch hier dominiert der Beitrag der Straßenfahrzeuge in allen Jahren mit ca. 90 %. Zukünftige Emissionsanstiege sind vor allem auf die bereits genauer beschriebenen Herstellungsaufwendungen bei LNF und Lkw zurückzuführen.

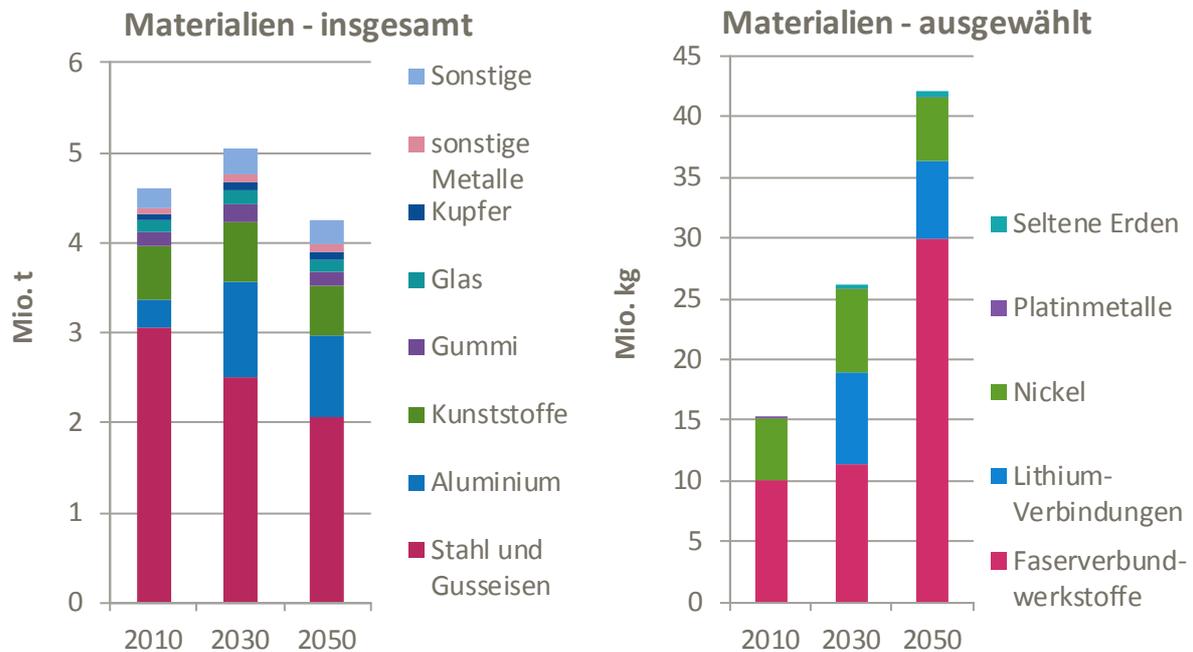
**Abbildung 10-11: THG-Emissionen der Fahrzeugherstellung im Basisszenario**



Quelle: Renewbility III

Der Materialeinsatz in den Fahrzeugen wurde in den Renewbility-Szenarien nur für den Straßenverkehr hochgerechnet. Im Basisszenario ist der Materialaufwand insgesamt (Abbildung 10-12) im Jahr 2030 höher als 2010, im Jahr 2050 dagegen niedriger als 2010. Der Bedarf an ausgewählten Materialien (insbesondere Lithium-Verbindungen und Faserverbundwerkstoffe) steigt hingegen bis 2050 stark an (s. Abbildung 10-12).

Abbildung 10-12: Materialien in der Herstellung von Pkw, Lkw und LNF im Basisszenario



Quelle: Renewbility III

## 10.5 ERGEBNISSE 2030

### 10.5.1 PKW-VERKEHR

Die Pkw-Neuzulassungen in den beiden Szenarien Effizienz und Effizienz plus sind im Jahr 2030 fast gleichauf und gegenüber dem Basisszenario um ca. 7 % niedriger. Deutlicher hat sich jedoch die Zusammensetzung der Antriebskonzepte der Neuzulassungen verändert, die im Jahr 2030 für die beiden Szenarien Effizienz und Effizienz plus eine fast identische Verteilung aufweisen (vgl. Kap. 5). Gegenüber dem Basisszenario steigt der Anteil von BEV an den Neuzulassungen von 2 % auf 8 % an. Noch deutlicher äußert sich der Anstieg bei PHEV von 10 % im Basisszenario auf 30 % im Szenario Effizienz bzw. 34 % im Szenario Effizienz plus. Der Neuzulassungsanteil von Benzin- und Diesel-Pkw sinkt hier auf einen Anteil von 62 % (Effizienz) bzw. 58 % (Effizienz Plus) gegenüber 87 % im Basisszenario.

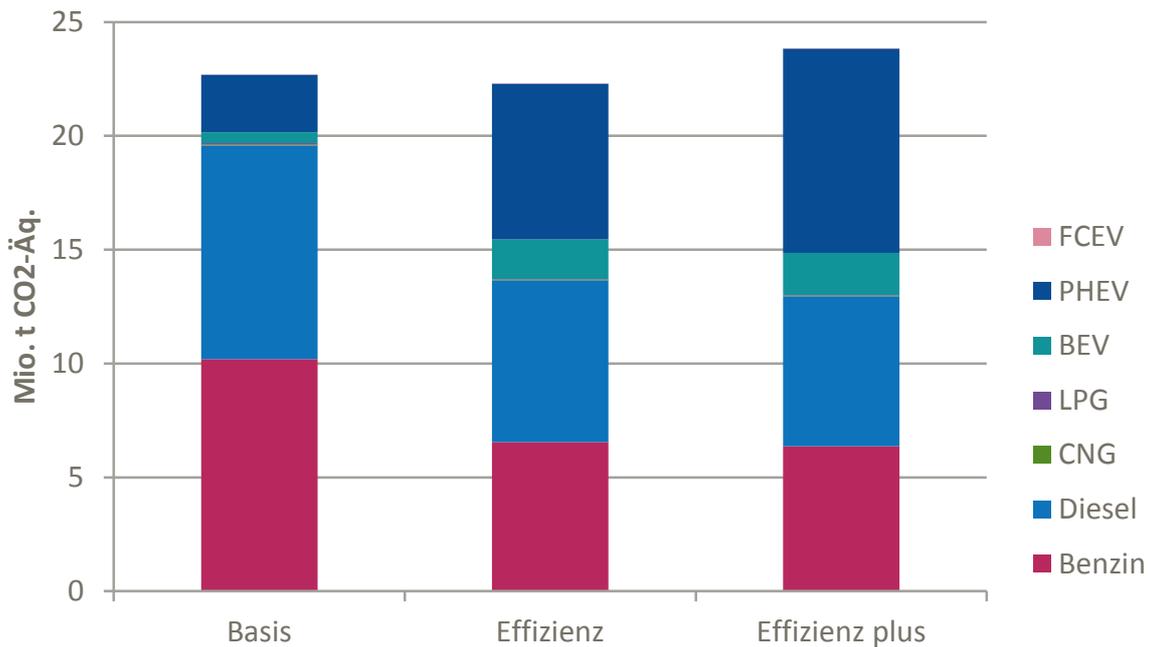
#### 10.5.1.1 Treibhausgasemissionen der Fahrzeugherstellung

Die Treibhausgasemissionen der Herstellung der Pkw im Jahr 2030 unterscheiden sich in den Szenarien Effizienz und Effizienz plus sowohl gegenüber der Basisentwicklung als auch untereinander, wie Abbildung 10-13 zeigt. Insgesamt sind die Emissionen im Szenario Effizienz um etwa 2 % niedriger, im Szenario Effizienz Plus um etwa 5 % höher als im Basisszenario. Dabei ist der Anteil der THG-Emissionen für PHEV und BEV stark gestiegen, was der Entwicklung der Neuzulassungen dieser Fahrzeugkonzepte folgt.

Im Szenario Effizienz fällt die Erhöhung der THG-Emissionen durch höhere Neuzulassungen von Elektro-Pkw (BEV, PHEV) etwas schwächer aus als die Emissionsverringerung durch verringerte Neuzulassungen konventioneller Pkw.

Im Szenario Effizienz plus ist der Emissionsanstieg durch Elektro-Pkw höher, bedingt durch die stärkere Durchdringung mit PHEVs.

**Abbildung 10-13: THG-Emissionen in der Pkw-Herstellung im Jahr 2030**

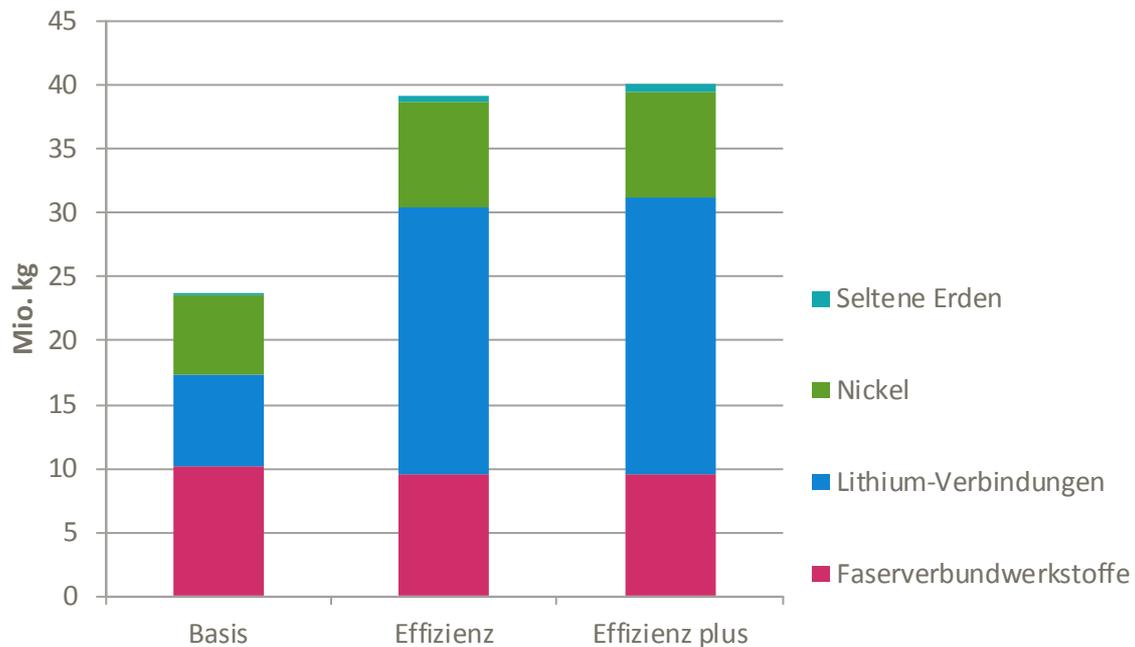


Quelle: Renewability III

### 10.5.1.2 Materialeinsatz in den Fahrzeugen

Bei der Betrachtung des gesamten Materialeinsatzes lassen sich aufgrund der auch in den Szenarien Effizienz und Effizienz plus einer hohen Anzahl von konventionellen Antrieben für das Jahr 2030 kaum Veränderungen gegenüber der Basisentwicklung erkennen. Bei der Betrachtung der ausgewählten Materialien (Abbildung 10-14) zeigt sich jedoch die zunehmende Bedeutung der Lithium-Verbindungen und Seltenen Erden, deren Bedarf sich gegenüber der Basisentwicklung verdreifacht.

Abbildung 10-14: Ausgewählte Materialien in der Pkw-Herstellung im Jahr 2030



Quelle: Renewbility III

## 10.5.2 STRASSENGÜTERVERKEHR

Die Anzahl der Neuzulassungen von Lkw > 3,5 t ist in den Szenarien Effizienz und Effizienz plus im Jahr 2030 insgesamt etwas niedriger als im Basisszenario. Zudem wird in beiden Szenarien ein kleiner Teil der Diesel-Lkw durch Oberleitungs-Lkw (2 % bei den Last- und Sattelzügen) ersetzt (s. Kapitel 6). Im Szenario Effizienz plus kommen zudem 12 % der neu zugelassenen Solo-Lkw als Plug-In Hybride in die Flotte.

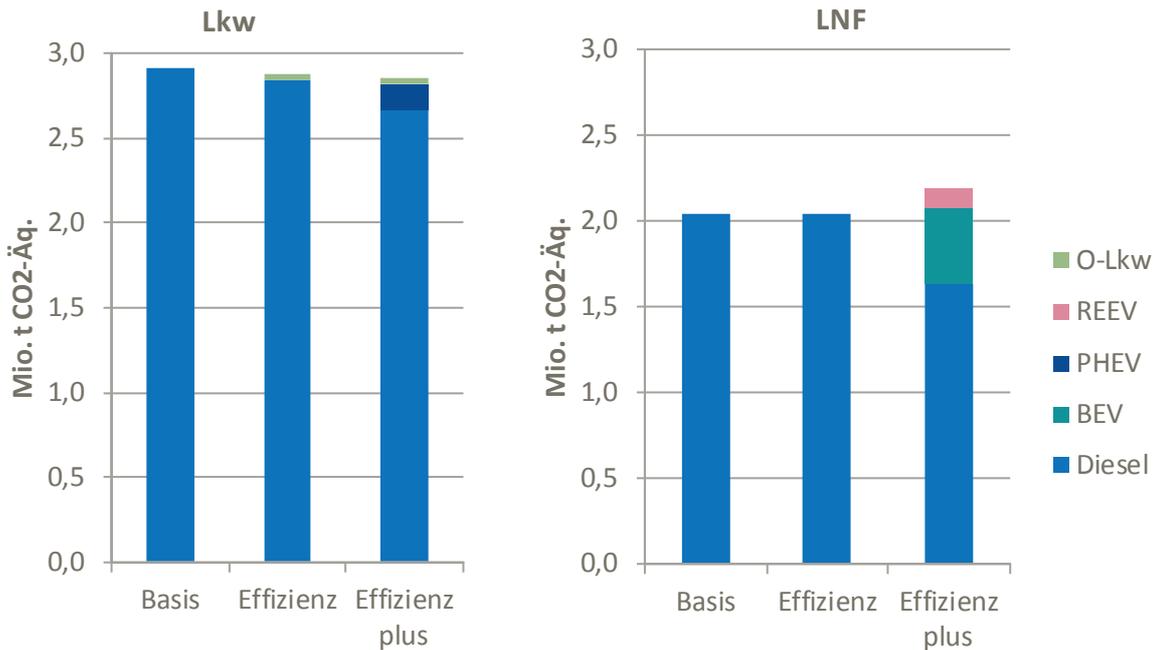
Bei den leichten Nutzfahrzeugen ist die Zahl der Neuzulassungen in allen Szenarien ähnlich. Im Szenario Effizienz gibt es auch keine Änderungen bei den Antriebskonzepten, dagegen kommen im Szenario Effizienz plus erste batterieelektrische und REEV- (range extender) Fahrzeuge in die Flotte.

### 10.5.2.1 Treibhausgasemissionen der Fahrzeugherstellung

Die Treibhausgasemissionen der Herstellung der Straßengüterfahrzeuge im Jahr 2030 weisen, wie Abbildung 10-15 zeigt, in den Szenarien Effizienz und Effizienz plus geringe Änderungen gegenüber dem Basisszenario auf. Bei den Lkw führt die sinkende Gesamtzahl an Neuzulassungen trotz geringer Anteile alternativer Antriebskonzepte (Oberleitungs-Lkw, PHEV) auch zu insgesamt sinkenden Treibhausgasemissionen aus der Fahrzeugfertigung. Bei den leichten Nutzfahrzeugen hingegen steigen die Treibhausgasemissionen im Szenario Effizienz plus trotz in allen Szenarien gleichen Neuzulassungszahlen leicht an, da die

erhöhte Anzahl an Neufahrzeugen mit elektrischen Antriebskonzepten höhere spezifische Treibhausgasemissionen in der Fertigung hat.

Abbildung 10-15: THG-Emissionen in der Lkw- und LNF-Herstellung im Jahr 2030



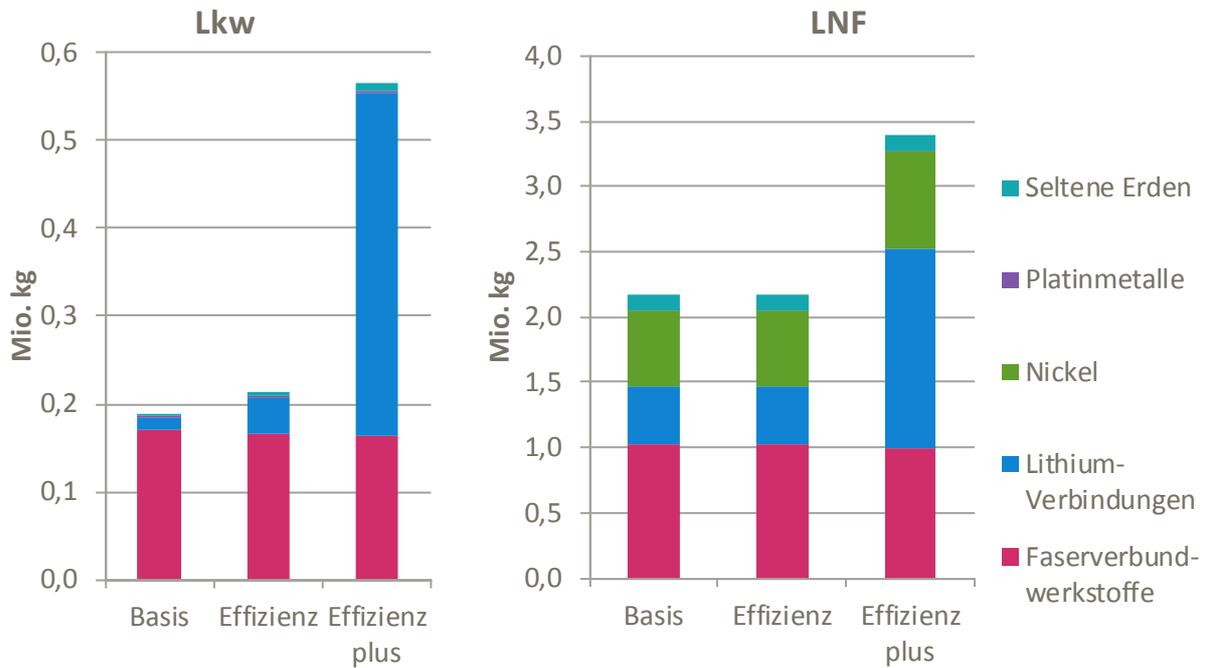
Quelle: Renewability III

### 10.5.2.2 Materialeinsatz in den Fahrzeugen

Auch beim Materialeinsatz zeigen sich für das Jahr 2030 insgesamt nur geringe Unterschiede zwischen den Szenarien. Augenfällig ist lediglich die Verringerung des Materialeinsatzes im Szenario Effizienz plus, insbesondere der leicht reduzierten Stahlmenge bei gleichzeitigem Anstieg des Aluminiumbedarfs durch den erhöhten Leichtbau in diesem Szenario.

Bei ausgewählten Materialien (Abbildung 10-16) gibt es dagegen einen steigenden Materialbedarf. Der Bedarf an Lithium-Verbindungen liegt im Szenario Effizienz plus bei Lkw mehr als 2.500 % höher liegt als im Basisszenario auf Grund der größeren Anzahl an Plug-In Hybriden. Auch bei leichten Nutzfahrzeugen kommt es im Szenario Effizienz plus zu einem deutlichen Anstieg von Nickel und Lithium-Verbindungen, die für die Lithium-Akkus der batterieelektrischen Fahrzeuge benötigt werden.

Abbildung 10-16: Ausgewählte Materialien in der Lkw- und LNF-Herstellung im Jahr 2030



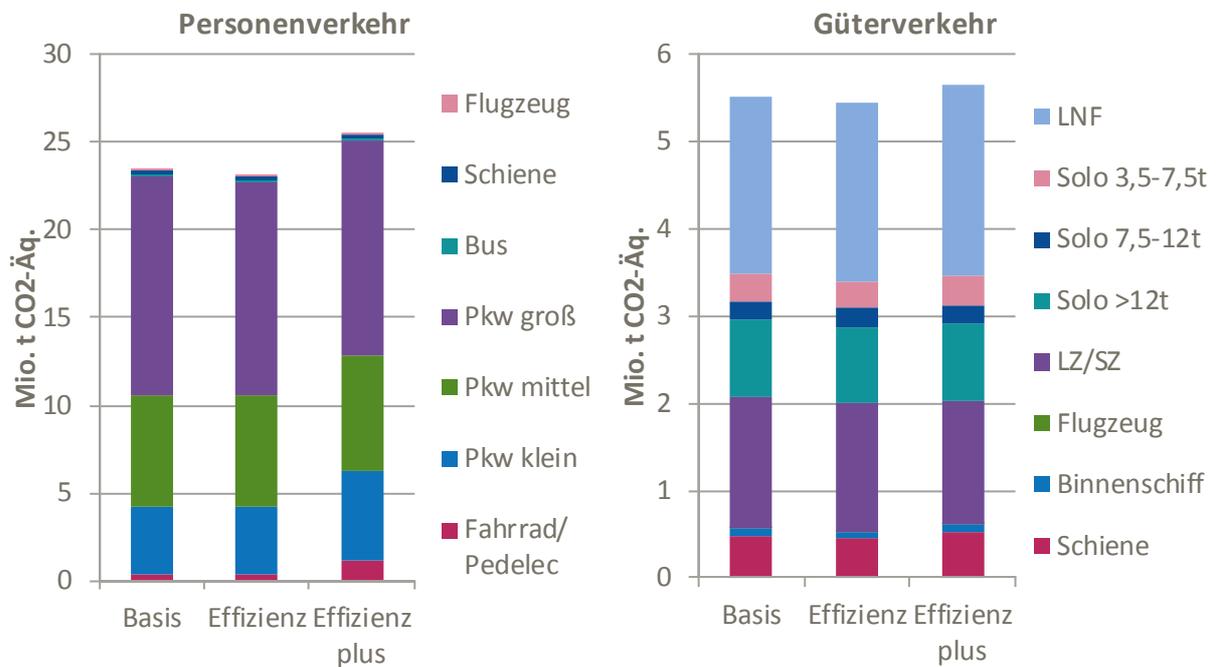
Quelle: Renewbility III

### 10.5.3 GESAMTER VERKEHRSEKTOR

Auch in den Szenarien Effizienz und Effizienz plus werden die THG-Emissionen der Fahrzeugherstellung im Personenverkehr wie im Basisszenario sehr stark durch die Pkw bestimmt, wie links in Abbildung 10-17 zu sehen ist. Zu beobachten ist zudem ein Anstieg bei den Fahrrädern und Pedelecs im Szenario Effizienz plus, begründet durch die Verlagerung von Pkw-Fahrten auf diese Verkehrsmittel (vgl. Kapitel 7).

Bei der Fahrzeugherstellung im Güterverkehr (Abbildung 10-17 rechts) kommt es nur zu geringen Veränderungen zwischen den Szenarien, die im Szenario Effizienz plus auch auf Verlagerungseffekte von Lkw-Fahrten auf den Schienenverkehr zurückzuführen sind. In allen Szenarien dominieren die Lkw und leichten Nutzfahrzeuge stark.

Abbildung 10-17: THG-Emissionen der Fahrzeugherstellung im Jahr 2030

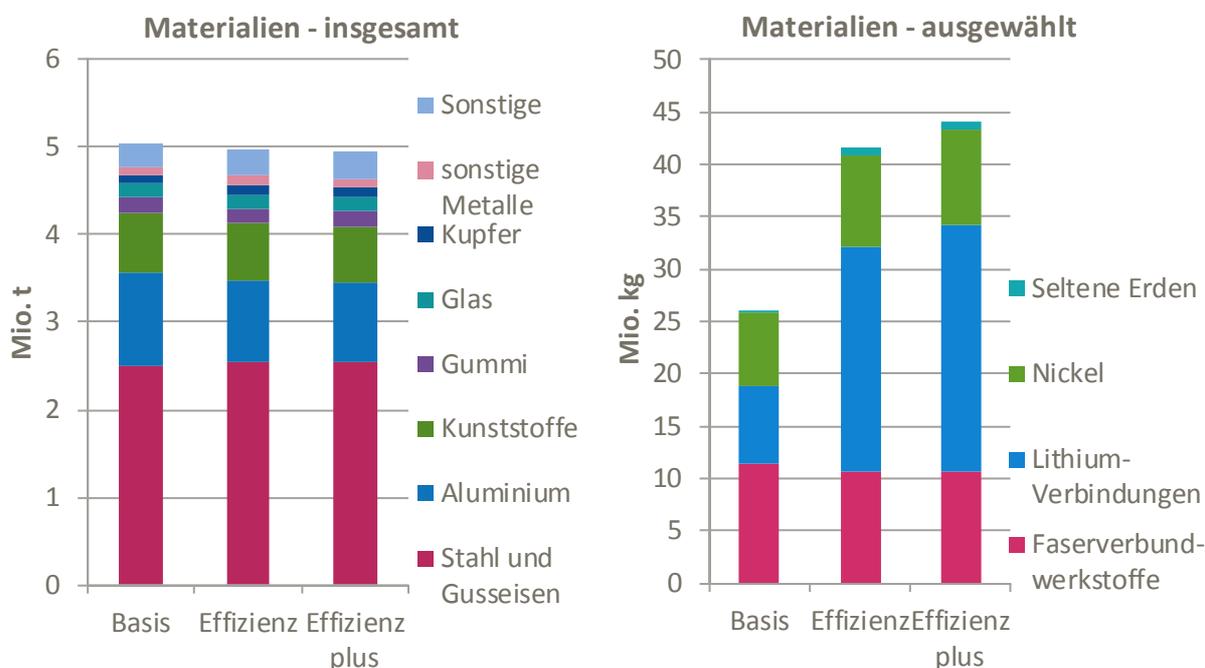


Quelle: Renewability III

Der Materialeinsatz in den neu zugelassenen Straßenfahrzeugen ist im Jahr 2030 in den Szenarien Effizienz und Effizienz plus etwas niedriger als im Basisszenario (Abbildung 10-18, links), vorrangig begründet durch die geringere Anzahl von Neuzulassungen im dominierenden Pkw-Bereich.

Bei den ausgewählten Materialien (Abbildung 10-18, rechts), kommt es jedoch im Jahr 2030 zu Anstiegen des Bedarfs an Lithium-Verbindungen und Nickel in den Szenarien Effizienz und Effizienz plus im Vergleich zum Basisszenario. Der Anstieg des Materialbedarfs ist dabei vor allem auf die höheren Neuzulassungen von Elektrofahrzeugen bei Pkw zurückzuführen: Von den im Szenario Effizienz plus insgesamt benötigten 23.610 t Lithium-Verbindungen entfallen auf Pkw 92 %, 6 % auf LNF und nur 2 % auf Lkw.

Abbildung 10-18: Materialien in der Herstellung (Pkw, Lkw und LNF) im Jahr 2030



Quelle: Renewbility III

## 10.6 ERGEBNISSE 2050

### 10.6.1 PKW-VERKEHR

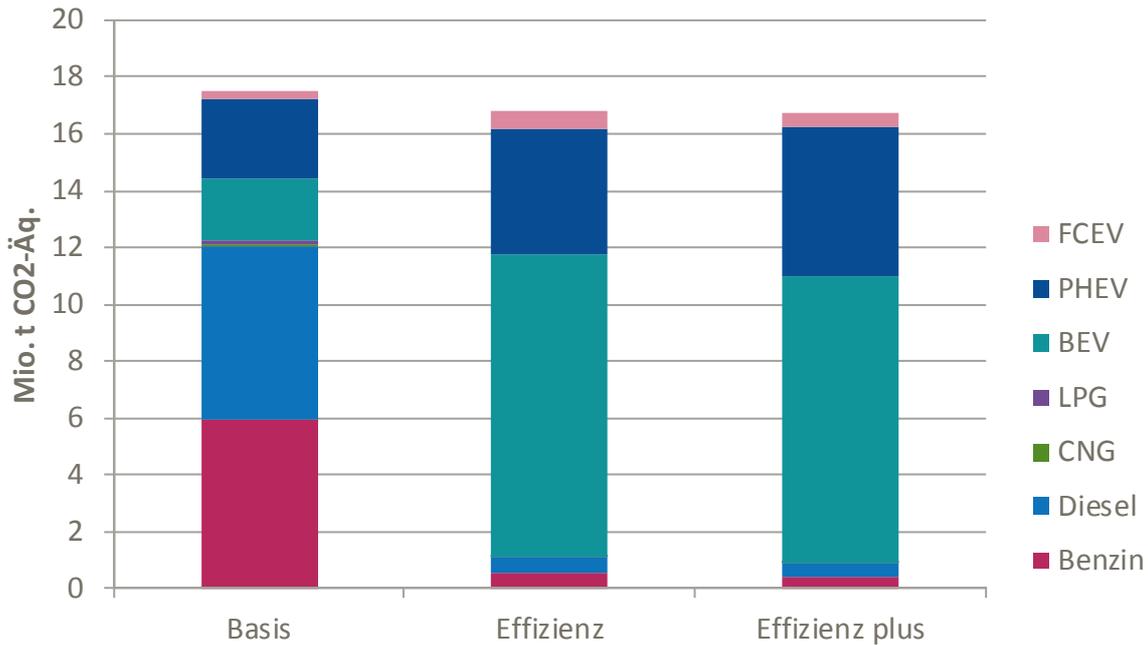
Bei den Neuzulassungen im Jahr 2050 zeichnen sich deutlichere Unterschiede gegenüber der Basisentwicklung ab, als das noch in der Betrachtung für das Jahr 2030 der Fall war (vgl. Kap. 5). Die absoluten Neuzulassungen gehen gegenüber der Basisentwicklung sehr viel stärker zurück: Im Szenario Effizienz um 15 % und im Szenario Effizienz plus um 26 % gegenüber der Basisentwicklung. Weiterhin weist die Antriebsstruktur der Neuzulassungen nun ein ganz anderes Bild gegenüber dem Basisszenario auf. Die konventionellen Antriebe mit Benzin- und Diesel-Pkw nehmen für beide Szenarien nur noch 6 % der Neuzulassungen ein, gegenüber 69 % in der Basisentwicklung. BEV und PHEV Fahrzeuge machen in beiden Szenarien rund 90 % der Neuzulassungen aus.

#### 10.6.1.1 Treibhausgasemissionen der Fahrzeugherstellung

Trotz der stark gesunkenen Neuzulassungen in den Szenarien Effizienz und Effizienz Plus im Jahr 2050 kommt es insgesamt nur zu minimalen Einsparungen in den THG-Emissionen der Fahrzeugherstellung. Grund dafür ist die starke Zunahme von Elektrofahrzeugen mit hohen fahrzeugspezifischen Herstellungsemissionen. Dabei wird der Anstieg der Emissionen von der hohen Anzahl in die Flotte kommender Elektrofahrzeuge sogar deutlich gebremst, da mit der Verbesserung der Speichertechnologie hin zu Post-Lithium-Ionen Akku die spezifischen

Emissionen der Akkuherstellung im Vergleich zu Lithium-Ionen-Akkus sinken (vgl. Abschnitt Energiespeicher in Kapitel 4.3.5).

**Abbildung 10-19: THG-Emissionen in der Pkw-Herstellung im Jahr 2050**

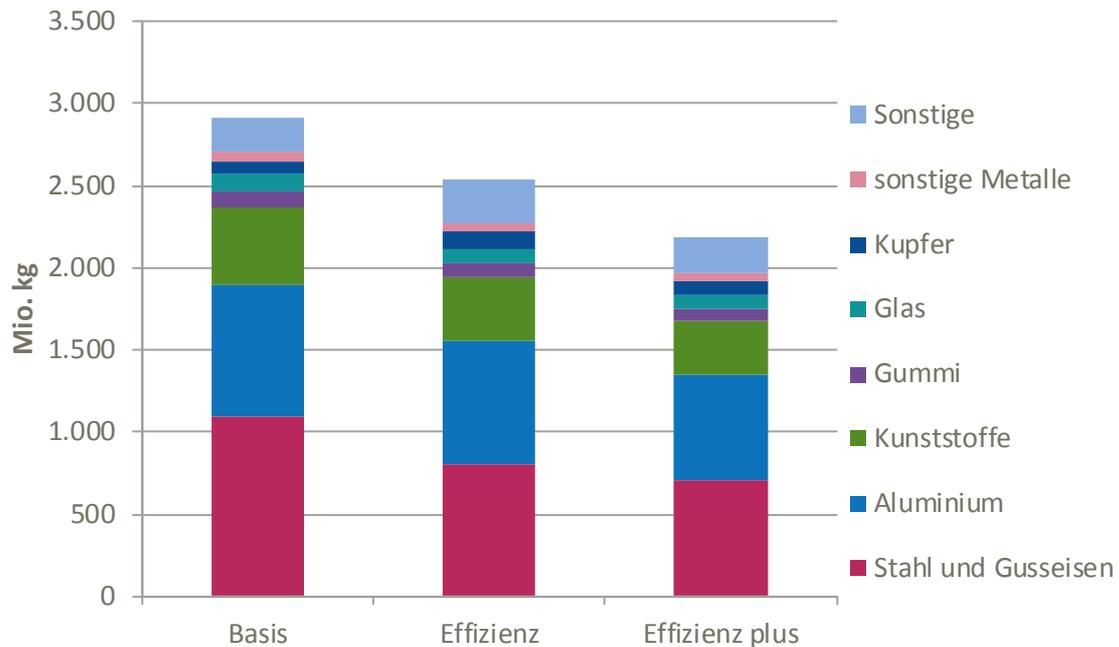


Quelle: Renewbility III

### 10.6.1.2 Materialeinsatz in den Fahrzeugen

Der Materialeinsatz folgt dem Trend der stark absinkenden Neuzulassungen und ist insgesamt im Szenario Effizienz um 13 % und im Szenario Effizienz Plus um 25 % niedriger gegenüber der Basisentwicklung. Die Verteilung der Materialanteile ist zwischen den Szenarien Effizienz und Effizienz Plus recht ähnlich. Gegenüber der Basisentwicklung nimmt der Anteil von Stahl und Eisen von 37 % auf 32 % ab. Die Anteile von Kupfer und Aluminium steigen hingegen von 2 % auf 4 % bzw. von 28 % auf 30 % (vgl. Abbildung 10-20). Somit wird bereits bei dieser Gesamtbetrachtung über alle Materialien die Bedeutung der höheren Anteile von Elektrofahrzeugen und des etwas verstärkten Leichtbaus deutlich.

Abbildung 10-20: Materialeinsatz in der Pkw-Herstellung im Jahr 2050

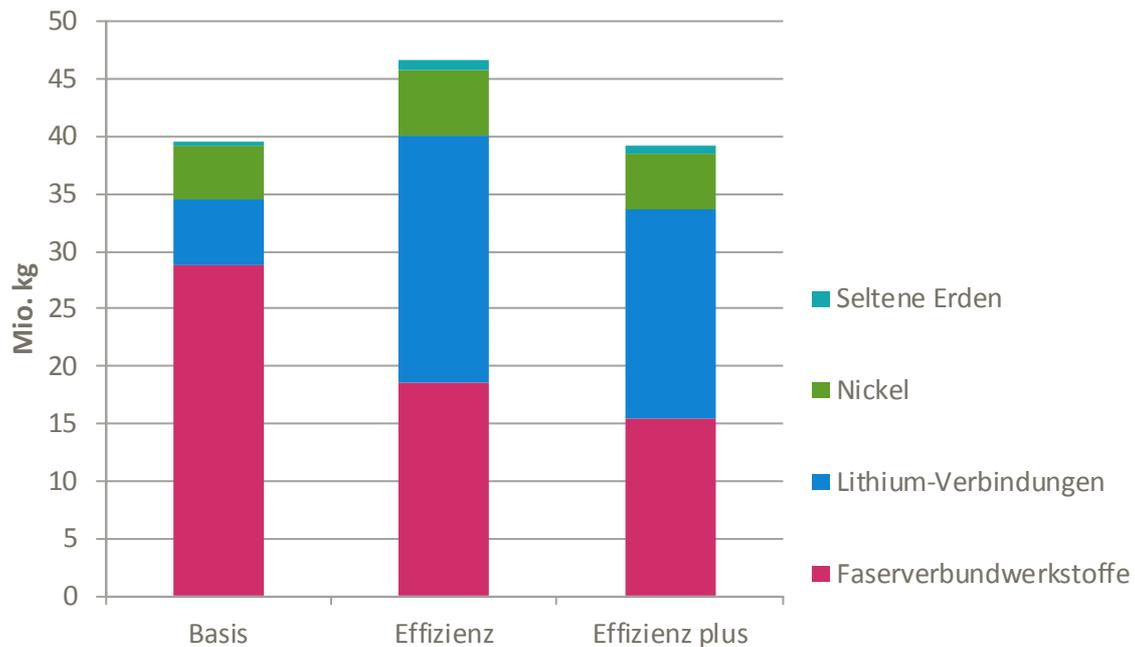


Quelle: Renewbility III

In der näheren Betrachtung der ausgewählten Materialien für das Jahr 2050 in Abbildung 10-15 zeigt sich erwartungsgemäß der starke Anstieg der spezifischen Materialien für Elektrofahrzeuge (Lithium-Verbindungen und Seltene Erden). Die Mengen von Faserverbundwerkstoffen nehmen in den Szenarien Effizienz und Effizienz plus trotz im Vergleich zur Basisentwicklung etwas verstärktem Leichtbau ab. Der Rückgang zeichnet vielmehr den Trend der deutlich niedrigeren Neuzulassungszahlen in diesen Szenarien nach.

Der Bedarf an Lithium-Verbindungen ist im Szenario Effizienz gegenüber 2030 ähnlich hoch, obwohl 2050 sehr viel mehr Elektrofahrzeuge zugelassen werden. Im Szenario Effizienz Plus liegt er sogar unter dem Lithiumbedarf von 2030, trotz höherer Neuzulassungszahlen. Grund dafür ist in beiden Szenarien die Verbesserung der Akkumulatoren hin zu Post-Lithium-Technologien und die damit verbundene Verringerung des spezifischen Materialbedarfs.

Abbildung 10-21: Ausgewählte Materialien in der Pkw-Herstellung im Jahr 2050



Quelle: Renewbility III

## 10.6.2 STRASSENGÜTERVERKEHR

Bei den Neuzulassungen von Lkw > 3,5 t sowie leichten Nutzfahrzeugen im Jahr 2050 sind die Unterschiede zwischen den Szenarien größer als im Jahr 2030 (vgl. Kapitel 6).

Die Gesamtzahl der neuzugelassenen Lkw > 3,5 t ist wie im Jahr 2030 niedriger als im Basisszenario. Dabei werden die Neuzulassungen bei Last- und Sattelzügen in beiden Szenarien Effizienz und Effizienz plus gleichermaßen von Oberleitungs-Lkw dominiert, die in der Basisentwicklung nicht vorkommen. Bei Solo-Lkw steigt der Anteil an Plug-In Hybriden im Szenario Effizienz auf 16 %, im Szenario Effizienz plus sogar auf 28 %.

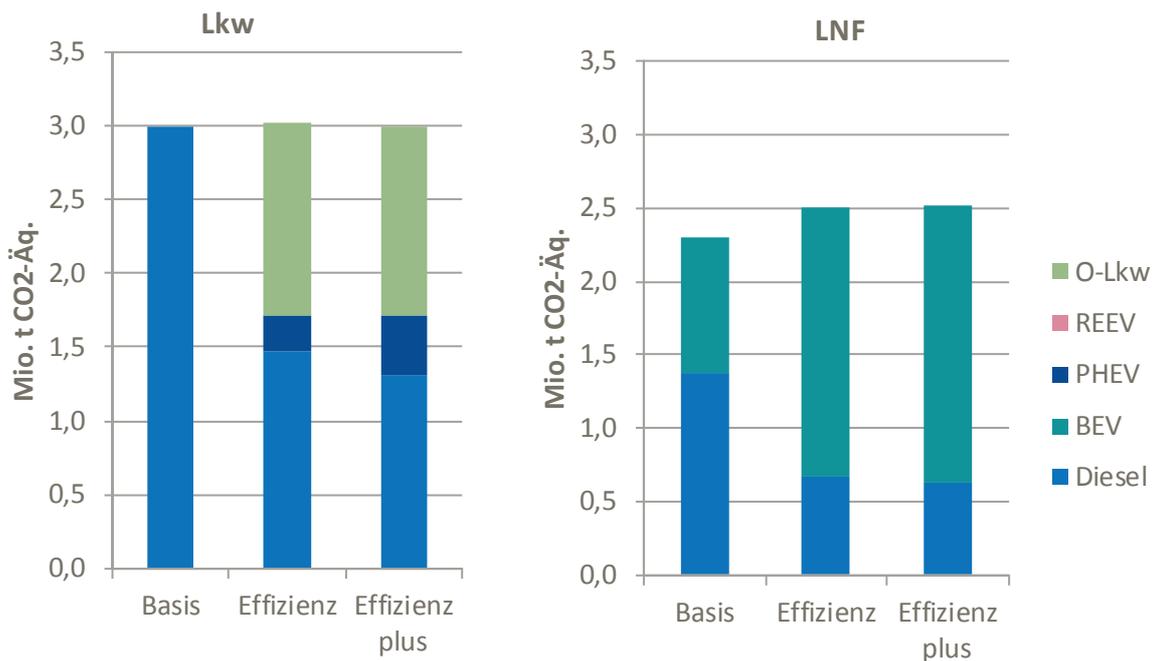
Bei den Neuzulassungen der leichten Nutzfahrzeuge bleibt auch im Jahr 2050 die Gesamtzahl zwischen den Szenarien gleich, allerdings steigt der Anteil an batterieelektrischen Fahrzeugen in den Szenarien Effizienz und Effizienz plus auf etwa 70 % an (gegenüber 30 % im Basisszenario).

### 10.6.2.1 Treibhausgasemissionen der Fahrzeugherstellung

Die Treibhausgasemissionen aus der Fahrzeugfertigung liegen im Jahr 2050 in den Szenarien Effizienz und Effizienz plus bei Lkw > 3,5 t etwa gleich hoch wie im Basisszenario (zu sehen in Abbildung 10-22, links), weil der Rückgang der Neuzulassungen die höheren spezifischen THG-Emissionen der Herstellung von Oberleitungs-Lkw und Plug-In Hybriden kompensiert.

Bei leichten Nutzfahrzeugen dagegen liegen Effizienz und Effizienz plus um etwa 10 % höher, weil bei gleicher Neuzulassungszahl der Anteil von Fahrzeugen mit Elektroantrieb und damit höheren spezifischen THG-Herstellungsemissionen signifikant höher ist als im Basisszenario.

**Abbildung 10-22: THG-Emissionen in der Lkw- und LNF-Herstellung im Jahr 2050**



Quelle: Renewbility III

### 10.6.2.2 Materialeinsatz in den Fahrzeugen

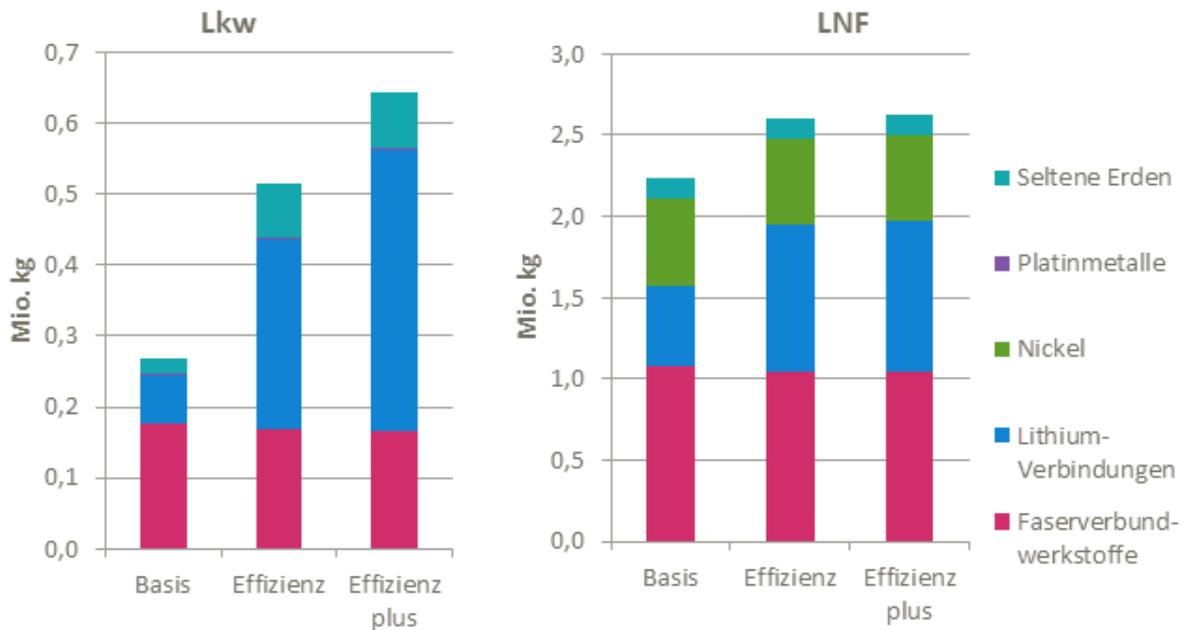
Der Materialeinsatz ist im Jahr 2050 insgesamt am größten im Basisszenario und am niedrigsten im Szenario Effizienz plus. Insgesamt werden in Effizienz plus 8 % weniger Materialien in neuen leichten Nutzfahrzeugen und Lkw eingesetzt als im Basisszenario, bedingt durch die geringere Anzahl an Neuzulassungen bei Lkw.

Bei den ausgewählten Materialien in neuen Lkw (Abbildung 10-23, links) kommt es im Jahr 2050 durch die verstärkte Einführung alternativer Antriebe zu starken Steigerungen des Materialbedarfs bei Lithium-Verbindungen und seltenen Erden gegenüber dem Basisszenario. Der Bedarf an Lithium-Verbindungen ist im Szenario Effizienz um 290 % höher, im Szenario Effizienz plus um 480 % höher als im Basisszenario. Der Bedarf an seltenen Erden ist im Szenario Effizienz um 260 % höher, im Szenario Effizienz plus um 280 % höher als im Basisszenario.

Im Vergleich zu 2030 steigt der Bedarf an diesen Materialien vor allem im Szenario Effizienz, da hier im Jahr 2030 bei Solo-Lkw noch keine Plug-In Hybride neu zugelassen werden. Im Szenario Effizienz plus steigt der zusätzliche Bedarf an diesen Materialien geringer, da in diesem Szenario bereits im Jahr 2030 Plug-In Hybride eine größere Rolle in den

Neuzulassungen spielen. Zwar ist die Anzahl der neuzugelassenen Plug-In Hybride auch hier deutlich höher als 2030, gleichzeitig sinkt aber der spezifische Bedarf an Lithium-Verbindungen pro Fahrzeug durch den Einsatz von Post-Lithium-Ionen Akkutechnologien.

**Abbildung 10-23: Ausgewählte Materialien in der Lkw- und LNF-Herstellung im Jahr 2050**



Quelle: Renewability III

Beim Einsatz der ausgewählten Materialien in leichten Nutzfahrzeugen (Abbildung 10-23, rechts) kommt es im Jahr 2050 zu einer Angleichung der Materialbedarfe in den Szenarien Effizienz und Effizienz plus, da sich hier auch die Anzahl an neu zugelassenen Elektrofahrzeugen zwischen beiden Szenarien angleicht. In beiden Szenarien ist der Bedarf an Lithium-Verbindungen im Jahr 2050 etwa 90 % höher als in der Basisentwicklung.

Gegenüber 2030 ist der Bedarf an Lithium-Verbindungen im Szenario Effizienz deutlich erhöht, da in diesem Szenario 2030 noch keine elektrischen leichten Nutzfahrzeuge neu zugelassen werden. Im Szenario Effizienz plus ist trotz höherer Neuzulassungszahl von Elektrofahrzeugen der Bedarf an Lithium-Verbindungen im Jahr 2050 deutlich niedriger als 2030. Grund dafür ist wie bei Pkw die Verbesserung der Akkumulatoren hin zu Post-Lithium-Technologien und die damit verbundene Verringerung des spezifischen Materialbedarfs.

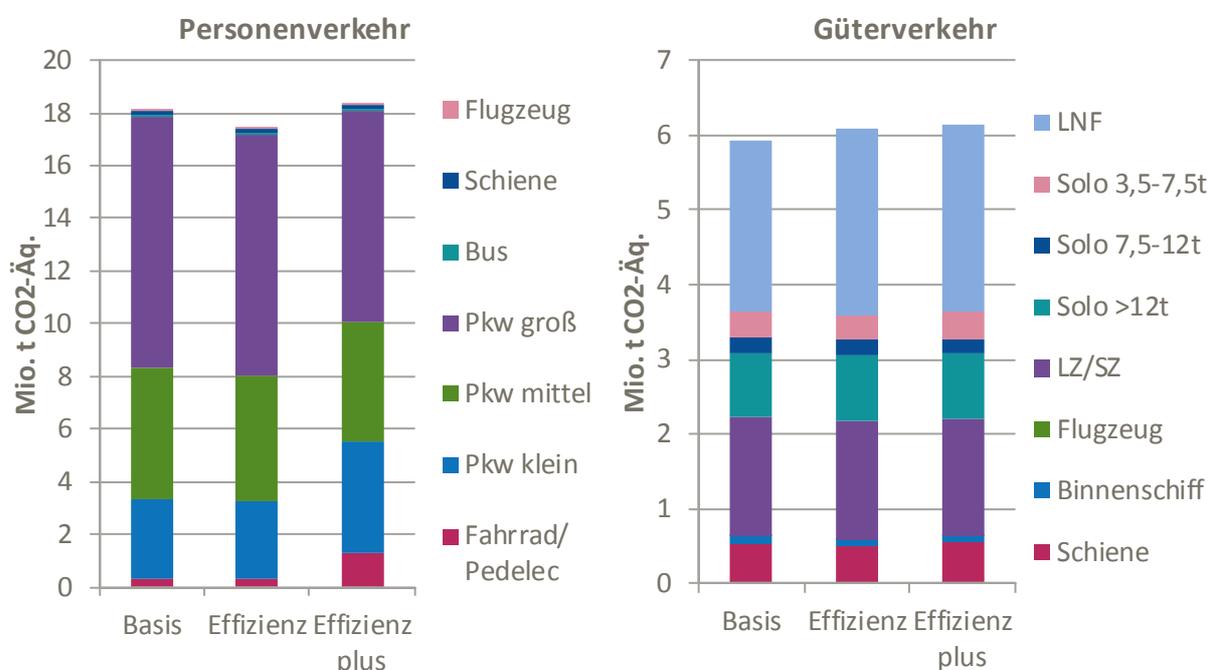
### 10.6.3 GESAMTER VERKEHRSSSEKTOR

Wie in den anderen Analysejahren werden auch im Jahr 2050 die Treibhausgasemissionen der Fahrzeugherstellung im Personenverkehr in allen Szenarien von den Pkw dominiert (Abbildung 10-24, links). Durch deren Rückgang bei den Neuzulassungszahlen sinken die

Treibhausgasemissionen im Szenario Effizienz und Effizienz plus – anders als im Jahr 2030, wo die Szenarien ähnliche Ergebnisse liefern. Dementsprechend sind die Treibhausgasemissionen der Fahrzeugherstellung im Jahr 2050 um etwa 23 % (Basisszenario) bis 32 % (Effizienz plus) niedriger als 2030.

Die Treibhausgasemissionen der Fahrzeugherstellung im Güterverkehr liegen im Jahr 2050 in den Szenarien Effizienz und Effizienz plus etwas höher als im Basisszenario (gezeigt in Abbildung 10-24, rechts). Dabei bleibt die Aufteilung auf die Fahrzeugarten ähnlich, dominierend sind in allen Szenarien die Straßengüterfahrzeuge (Lkw > 3,5 t und leichte Nutzfahrzeuge). Im Güterverkehr sind die Treibhausgasemissionen der Fahrzeugherstellung im Jahr 2050 insgesamt etwa 7 % bis 12 % höher als 2030.

**Abbildung 10-24: THG-Emissionen der Fahrzeugherstellung im Jahr 2050**



Quelle: Renewbility III

Der Materialeinsatz der jährlich in Deutschland neu zugelassenen Straßenfahrzeuge wird durch die Pkw dominiert. Dementsprechend zeigen sich die niedrigeren Pkw-Neuzulassungszahlen auch beim gesamten Materialbedarf, der – im Gegensatz zum Jahr 2030 – im Jahr 2050 in den Szenarien Effizienz und Effizienz plus niedriger als in der Basisentwicklung liegt (s. Abbildung 10-25, links).

Der Bedarf an ausgewählten Materialien (Abbildung 10-25, rechts) spiegelt ebenfalls im Wesentlichen die Entwicklungen bei Pkw wider.

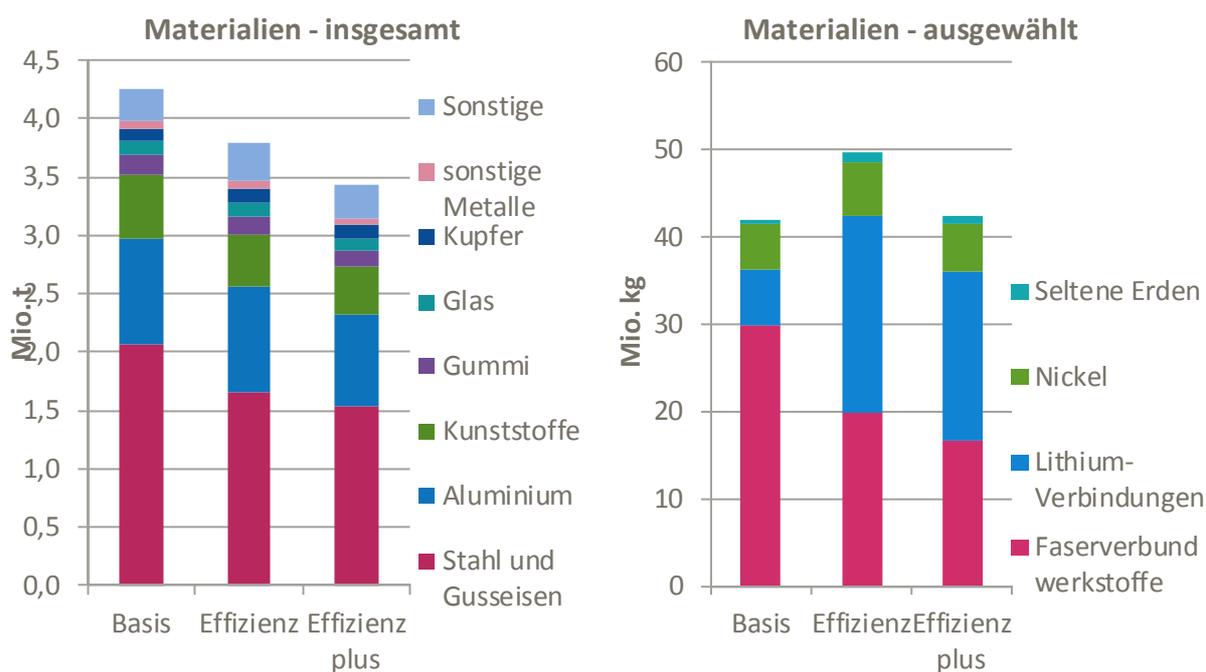
# ENDBERICHT

Der Bedarf an Faserverbundwerkstoffen, die vor allem im Leichtbau bei Pkw eingesetzt werden, ist analog zu den niedrigeren Pkw-Neuzulassungszahlen in den Szenarien Effizienz und Effizienz plus niedriger als im Basisszenario. In allen Szenarien werden im Jahr 2050 größere Mengen an Faserverbundwerkstoffen benötigt als 2030.

Umgekehrt ist der Bedarf an Lithium-Verbindungen, die in den Fahrzeug-Akkus der Elektro-Pkw benötigt werden, in beiden Effizienz-Szenarien mehrfach höher als im Basisszenario. Im Vergleich zu 2030 werden allerdings in allen Szenarien im Jahr 2050 trotz deutlich höherer Neuzulassungszahlen von Elektrofahrzeugen geringere Mengen an Lithium-Verbindungen benötigt, bedingt durch die verbesserten Akkutechnologien.

Nickel kommt in zweifacher Hinsicht in Fahrzeugen vor, zum einen als Legierungsmetall für Stähle und zum anderen als Bestandteil der Akkuzelle. Im Post-Lithium-Ionen-Akku mit Lithium-Schwefelzelle kommt sehr viel weniger Nickel vor als in einem Lithium-Ionen-Akku, weshalb der Materialeinsatz 2050 gegenüber 2030 deutlich niedriger liegt (um 30 %-40 %, vgl. Abbildung 10-18). Aufgrund des Einsatzes in einigen Stählen sind die Veränderungen aber nicht nur auf die Akkutechnologie zurückzuführen. Wenn Stahl durch andere Leichtbaumaterialien substituiert wird, sinkt so auch tendenziell der Nickeinsatz. Hier sei jedoch drauf verwiesen, dass aufgrund der Datenlage nicht für alle Fahrzeuge differenzierte Stahllegierungen abgebildet sind.

**Abbildung 10-25: Materialien in der Herstellung von Pkw, Lkw und LNF im Jahr 2050**



Quelle: Renewbility III

## 10.7 FAZIT

Für einen effizienten Einsatz erneuerbarer Energien zur Dekarbonisierung des Verkehrssektors ist die Integration alternativer Antriebe in das Verkehrssystem in Deutschland erforderlich. Mit zunehmender Verbreitung alternativer Antriebe, insbesondere durch die Elektromobilität, verlagern sich jedoch Umweltwirkungen des Verkehrs teilweise von der Nutzungsphase der Fahrzeuge hin zu deren Herstellung. Fahrzeuge mit alternativen Antriebskonzepten sind häufig mit aufwändigeren Komponenten ausgestattet, die wiederum eine größere Diversifizierung von Materialien aufweisen. Dadurch erfordern die Herstellungsvorketten einen größeren Energie- und Materialeinsatz gegenüber konventionellen Fahrzeugen, hinzu kommt bei steigendem Bedarf neuer Materialien die Frage nach deren langfristiger Verfügbarkeit. Für eine umfassende Bewertung der Dekarbonisierung des Verkehrssektors werden daher in Renewbility auch die Fragestellungen der Klimarelevanz von Materialvorleistungen in der Fahrzeugproduktion sowie Veränderungen des Materialeinsatzes in zukünftigen Fahrzeugflotten mit betrachtet.

Die jährlichen **Treibhausgasemissionen in der Fahrzeugherstellung** nehmen bis zum Jahr 2030 in allen Szenarien zu. Auch bei nachfolgender Reduktion liegen sie im 2050 höher als 2010, solange Materialbereitstellungsprozesse weltweit nicht in ähnlichem Maße dekarbonisiert werden, wie für die Produktionsprozesse in Deutschland angenommen. Die Emissionen sind dabei in den Szenarien Effizienz und Effizienz plus ähnlich hoch oder leicht höher als in der Basisentwicklung. Hauptverantwortlich für die Emissionsentwicklungen ist zum einen die Gesamtzahl der jährlichen Pkw-Neuzulassungen. Diese steigt in allen Szenarien bis 2030 und geht anschließend unterschiedlich stark zurück, am stärksten im Szenario Effizienz plus. Zum anderen ist die in den Szenarien unterschiedlich starke Zunahme der Neuzulassungsanteile von Elektro-Pkw für die Emissionsentwicklungen verantwortlich.

Die ähnliche Emissionsentwicklung in den Szenarien Effizienz und Effizienz plus gegenüber der Basisentwicklung ist dadurch begründet, dass einerseits die Neuzulassungen von Elektro-Pkw gegenüber der Basisentwicklung stark ansteigen, gleichzeitig aber eine deutliche Reduktion der Gesamtzahl an Pkw-Neuzulassungen angenommen wird. Im Falle einer starken Zunahme der Neuzulassungen von Elektro-Pkw ohne gleichzeitige Reduktion der Pkw-Neuzulassungszahlen insgesamt kann es demnach zukünftig zu einer stärkeren Zunahme der Treibhausgasemissionen aus der Fahrzeugherstellung kommen.

Auch bei leichten Nutzfahrzeugen und Lkw wird in Renewbility eine deutliche Zunahme der Neuzulassungen alternativer Antriebskonzepte angenommen. Aufgrund der deutlich

geringeren Neuzulassungszahlen spielen die Entwicklungen bei diesen Fahrzeugkategorien aber für die Gesamtentwicklungen im Verkehrssektor nur eine untergeordnete Rolle.

Einer Zunahme herstellungsbedingter Treibhausgasemissionen bei mehr Elektrofahrzeugen statt Kfz mit Verbrennungsmotor stehen gleichzeitig deutlich höhere Treibhausgasminderungen in der Nutzungsphase gegenüber. Ein Elektro-Pkw im Jahr 2030 hat in Summe von Herstellung und Energieverbrauch in der Nutzungsphase bereits bei durchschnittlichem nationalem Strommix um 40-45 % niedrigere Treibhausgasemissionen als ein Benzin- oder Diesel-Pkw. Bei Einsatz von 100% zusätzlich erzeugtem erneuerbarem Strom für die Elektro-Pkw erhöht sich der Treibhausgasvorteil weiter.

Die Modellierung der Treibhausgasemissionen für die Fahrzeugherstellung in Renewbility basiert auf weltweiten Materialbereitstellungsprozessen für die heutige Situation. Zukünftige Veränderungen dieser Prozesse können die spezifischen Emissionen der Fahrzeugherstellung signifikant beeinflussen. Mit heutigem Wissensstand ist noch nicht sicher zu beurteilen, welche Rolle langfristige Verbesserungen (optimierte Industrieprozesse, weltweiter Ausbau Erneuerbarer Energien), aber auch mögliche zwischenzeitliche Verschlechterungen (z. B. erhöhter Förderaufwand für Rohstoffe aus unkonventionellen Lagerstätten bei stark steigender weltweiter Nachfrage) spielen werden. In den Renewbility-Szenarien werden daher nur Dekarbonisierungsstrategien im nationalen Politikrahmen abgebildet. Unter der Voraussetzung, dass mit Umsetzung der auf der UN-Klimakonferenz in Paris 2015 verabschiedeten neuen internationalen Klimaschutz-Vereinbarung weltweit der Einsatz erneuerbarer Energien steigen wird, ist zukünftig eine Verringerung der spezifischen Emissionen bei den Materialvorleistungen für alle Antriebskonzepte anzunehmen, was den Anstieg der herstellungsbedingten Treibhausgasemissionen abschwächen würde. Zur vollständigen Klimaneutralität des Pkw-Verkehrs im Jahr 2050 sind die Bereitstellung CO<sub>2</sub>-freier Energieträger für die Fahrzeugnutzung und eine weltweite Dekarbonisierung der Materialbereitstellungsprozesse gleichermaßen erforderlich.

Die Höhe des **Materialeinsatzes in den Fahrzeugen im Straßenverkehr** wird insgesamt durch den Bedarf an Massenmetallen (v. a. Stahl, Aluminium) sowie Polymeren (Kunststoffe, Gummi) dominiert. Ausschlaggebend für zukünftige Entwicklungen sind daher vorrangig die Anzahl der Neuzulassungen sowie der Einsatz von Leichtbau. Die Neuzulassungsanteile alternativer Antriebe sind dagegen für den Materialeinsatz insgesamt kaum relevant.

Bis zum Jahr 2030 unterscheiden sich die Szenarien nur wenig, der Materialeinsatz steigt um rund 8 % bis 10 % gegenüber 2010. Nach 2030 geht der Materialeinsatz in allen Szenarien deutlich zurück und liegt 2050 auch niedriger als 2010. Am stärksten ist der Rückgang im

Szenario Effizienz plus, hier beträgt der Materialeinsatz im Jahr 2050 nur noch 75 % im Vergleich zu 2010. Hauptgrund dafür sind die in diesem Szenario niedrigsten Pkw-Neuzulassungszahlen. Neuzulassungen und Materialeinsatz bei leichten Nutzfahrzeugen und Lkw steigen in allen Szenarien an. Dementsprechend verschiebt sich auch der Materialeinsatz hin zum Straßengüterverkehr. Der Anteil der Pkw-Herstellung am Materialeinsatz sinkt von 78 % im Jahr 2010 bis 2050 im Szenario Effizienz plus auf 64 %.

Auch in Zukunft bleibt Stahl das dominierende Material, allerdings sinkt mit zunehmendem Leichtbau seine Bedeutung in allen Szenarien. Bereits im Jahr 2030 beträgt sein Anteil am Materialeinsatz nur noch 50 % (gegenüber 67 % im Jahr 2010), bis 2050 sinkt der Anteil auf 44 % bis 48 %. Gleichzeitig verdreifacht sich der Bedarf an Aluminium, sein Anteil am Materialeinsatz steigt von 7 % bis 2030 auf 18 % bis 21 % und bis 2050 auf 21 % bis 24 %.

Der **Bedarf an wichtigen Zukunftsmaterialien** wird beim Materialgesamteinsatz von den massenmäßig dominierenden Materialien überlagert. Bei ausgewählten Schlüsselmaterialien ist jedoch eine differenzierte Betrachtung wichtig, weil einige alternative Antriebe von ihrer Verfügbarkeit abhängen. Die Zunahme der Elektromobilität bedeutet neben einem erhöhten Einsatz von Kupfer und Nickel vor allem einen starken Anstieg des Bedarfs an Lithiumverbindungen zur Akkuherstellung sowie an Seltenen Erden für die Elektromotoren.

Im Jahr 2030 werden in der Basisentwicklung 7,5 Kilotonnen Lithium-Verbindungen benötigt, in den Szenarien Effizienz und Effizienz plus mit deutlich höherer Pkw-Elektromobilität ist der Bedarf mit 21 bis 23 Kilotonnen etwa dreimal so hoch. Im Jahr 2050 ist der Bedarf an Lithiumverbindungen ähnlich wie 2030, da die Zahl der Elektrofahrzeuge weiter ansteigt, aber gleichzeitig durch neue Akkutechnologien der spezifische Lithiumbedarf sinkt. In allen Szenarien entfallen über 90 % des Bedarfs an Lithiumverbindungen auf den Pkw-Verkehr.

An seltenen Erden werden im Jahr 2030 in der Basisentwicklung 0,3 Kilotonnen benötigt, in den Szenarien Effizienz und Effizienz plus ist der Bedarf mehr als doppelt so hoch. Bis 2050 steigt der Bedarf weiter an und ist im Szenario Effizienz mit 1,1 Kilotonnen am höchsten. Auch wenn die steigende Elektromobilität bei Nutzfahrzeugen für seltene Erden eine größere Rolle spielt als bei Lithium-Verbindungen, entfallen 70 % bis 80 % des Bedarfs an seltenen Erden auf den Pkw-Verkehr.

Bei einer ambitionierten Steigerung der Elektromobilität nicht nur in Deutschland sowie unter Beachtung des Bedarfs für andere Zukunftstechnologien (z. B. Windkraft oder stationäre Energiespeicher) kann der Bedarf von Lithium und seltenen Erden für 2050 allein mit den heutigen Fördermengen nicht gedeckt werden. Die globale Jahresproduktion müsste sich dem gesteigerten Bedarf anpassen. Aktuelle Studien kommen für Lithium zu dem

Ergebnis, dass bei einer reinen Hochrechnung der benötigten Mengen verglichen mit den Reserven vorerst keine Knappheiten auftreten (z. B. (Gruber et al., 2011 / Grosjean et al., 2012). Weitere Faktoren wie ökologische und soziale Kriterien oder die Anpassungsfähigkeit der Förderstruktur können die Verfügbarkeit von Lithium jedoch einschränken. Ähnlich verhält es sich für seltene Erden. Allerdings ist hier ein direkter Vergleich globaler Fördermengen und Reserven schwierig, da Zahlen nur aggregiert vorliegen, aber nicht für einzelne in der Elektromobilität besonders relevante Metalle (v. a. Neodym, Dysprosium), und zudem hohe Unsicherheiten aufweisen.

## 11 ENDEENERGIEBEDARF

### 11.1 HINTERGRUND

Der Endenergiebedarf des Verkehrs ist ganz entscheidend dafür, inwieweit die Dekarbonisierung in diesem Sektor gelingen kann. Je niedriger der Endenergiebedarf, desto geringer der Bedarf an – begrenzten und kostenintensiven – CO<sub>2</sub>-freien Energieträgern. Beeinflusst wird der Endenergiebedarf ganz wesentlich von der Effizienz – und damit auch dem Antriebstyp – der genutzten Fahrzeuge. Aber auch Maßnahmen zur Reduktion der Verkehrsleistung sowie zur Verlagerung auf effiziente Verkehrsmittel können deutlich zur Reduktion des Energiebedarfs des Verkehrssektors beitragen.

### 11.2 ANNAHMEN UND PARAMETER

Der Endenergiebedarf wird Bottom-up auf Basis der inländischen Verkehrsnachfrage und der Effizienzentwicklung des Fahrzeugbestands differenziert nach Energieträgern modelliert.

Für die Interpretation der Ergebnisse ist wichtig, dass keine Kalibrierung der Ergebnisse an den Daten der Energiebilanz erfolgte und damit die absoluten Werte nicht unmittelbar mit den Daten aus der Treibhausgasberichterstattung vergleichbar sind. Um Aussagen zum Grad der Zielerfüllung zu ermöglichen, wurden jedoch prozentuale Minderungen berechnet.

Die spezifischen Energieverbräuche von Pkw und Lkw sind Modell-Output (Kapitel 5). Für Schienenverkehr, Busse und Binnenschifffahrt werden die im Folgenden dargestellten Annahmen getroffen.

#### 11.2.1 EFFIZIENZENTWICKLUNG ÜBRIGER VERKEHRSTRÄGER

**Schiene:** Minderung des spezifischen Energieverbrauchs je Platz-km (PV) bzw. je tkm (GV) entsprechend TREMOD: 2010 bis 2030 Elektro: 20 %, Diesel: bis 2030 10 %, 2030 bis 2050 pauschal 10 % (Ifeu 2012b). Im Szenario Effizienz plus steigt der Energieverbrauch des Schienengüterverkehrs durch die Geschwindigkeitserhöhung um rund 20 % an.

Durch zunehmende Elektrifizierung erhöht sich der Anteil von Strom am Energieverbrauch im Personennahverkehr von 81 % in 2010 auf 90 % in 2050 und im Güterverkehr von 93 % in 2010 auf 95 % in 2050. Die Auslastung bleibt konstant.

**Binnenschiff:** Entsprechend Wurster et al. (2014) sinkt der spezifische Energieverbrauch zwischen 2012-2050 um 20 % technisch, 10 % betrieblich, insgesamt also um 30 %.

**Busse:** Busse im Nahverkehr werden ab 2025 zunehmend elektrifiziert. Der Anteil rein elektrischer Busse im Nahverkehr steigt auf 25 % in 2050 im Basisszenario und auf 50 % in den Renewbility-Szenarien. Zudem steigt durch Hybridisierung auch die Effizienz der

dieselbetriebenen Busse deutlich an; der spezifische Energieverbrauch reduziert sich um rund 40 % im Zeitraum 2010-2050. Reisebusse und Fernlinienbusse fahren auch zukünftig mit Dieselantrieb und ihr spezifischer Energieverbrauch je Platzkilometer geht bis 2050 um rund 20 % zurück. In den Szenarien mit Oberleitungs-Lkw werden diese entsprechend auch über Oberleitungen mit Strom versorgt.

Für die Auslastung von Reisebussen wird der Wert aus TREMOD in Höhe von 60 % übernommen und beibehalten. Für die Auslastung von Fernlinienbussen werden 51 % Auslastung gemäß den Zahlen des statistischen Bundesamtes für das Jahr 2014 hinterlegt.<sup>10</sup>

**Luftverkehr:** Es wird eine Effizienzsteigerung in Höhe von 1,5 % p.a. je Personenkilometer bzw. Tonnenkilometer hinterlegt.

**Seeverkehr:** Effizienzsteigerungen und Kraftstoffmix für das Basisjahr als auch Entwicklung bis 2050 sind aus IMO (2014) übernommen. Es werden Effizienzsteigerungen von 50 % bis 2050 angenommen.

### 11.2.2 ENERGIEMIX

Die Anteile von biogenen und strombasierten Kraftstoffen ergeben sich aus den Überlegungen im Kapitel 3.2. Der Beitrag der Biokraftstoffe ist aufgrund der ausschließlichen Nutzung von Abfall- und Reststoffen in den Renewbility-Szenarien auf maximal rund 90 PJ beschränkt, im Jahr 2030 sind das rund 5 %. Vor dem Hintergrund der Ziele der EU-Richtlinie zu erneuerbaren Energien wird in Renewbility von einem Anteil von 5 % strombasierter Kraftstoffe in 2030 ausgegangen. Bis zum Jahr 2050 steigt der Anteil strombasierter Kraftstoffe an den flüssigen und gasförmigen Kraftstoffen in den Szenarien auf 95 % an. Zusammen mit dem Einsatz von Biokraftstoffen, dessen Anteil bei 5 % verbleibt, wird so eine vollständige Dekarbonisierung des Verkehrssektors möglich.

## 11.3 ERGEBNISSE BASISZENARIO

Wenn keine zusätzlichen Maßnahmen verabschiedet werden, wird der Endenergiebedarf im nationalen Verkehr bis 2030 nur um 9 % gegenüber 2010 reduziert, bis 2050 läge die Reduktion bei 26 %. Ursache dafür ist, dass es in der Basisentwicklung nur zu einer moderaten Entwicklung bei der Effizienz und dem Anteil der Elektromobilität kommt. Der Anteil an der elektrischen Fahrleistung liegt in 2050 bei 26 %. Der Endenergiebedarf des MIV

---

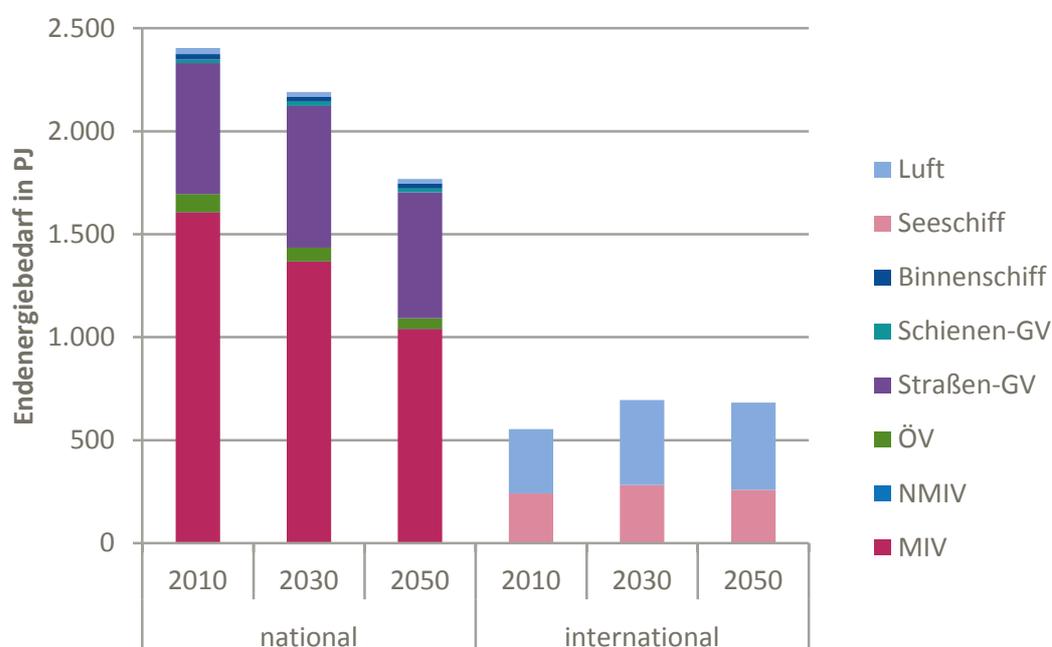
<sup>10</sup> Der folgende Link führt ins Internet: [https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/2015/10/PD15\\_377\\_461.pdf.pdf;jsessionid=6FEF4EE789AA8375122F0EA55AD7FCA7.cae2?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/2015/10/PD15_377_461.pdf.pdf;jsessionid=6FEF4EE789AA8375122F0EA55AD7FCA7.cae2?__blob=publicationFile)

wird damit bis 2050 um 35 % reduziert. Der Energiebedarf des Straßengüterverkehrs steigt aufgrund seines starken Wachstums trotz leichter Effizienzverbesserungen bei den Fahrzeugen bis 2030 sogar an, bis 2050 nimmt er um nur 4 % gegenüber 2010 ab.

Auch im internationalen Verkehr werden die Fahrzeuge effizienter. Aber hier kommt es bis 2050 durch die hohen Wachstumsraten zu einem weiteren Anstieg des Energieverbrauches, 7 % beim See- und 35 % beim Luftverkehr.

Die Ziele des Energiekonzepts, also eine Minderung um 10 % bis 2020 und 40 % bis 2050, werden ohne zusätzliche Maßnahmen verfehlt.

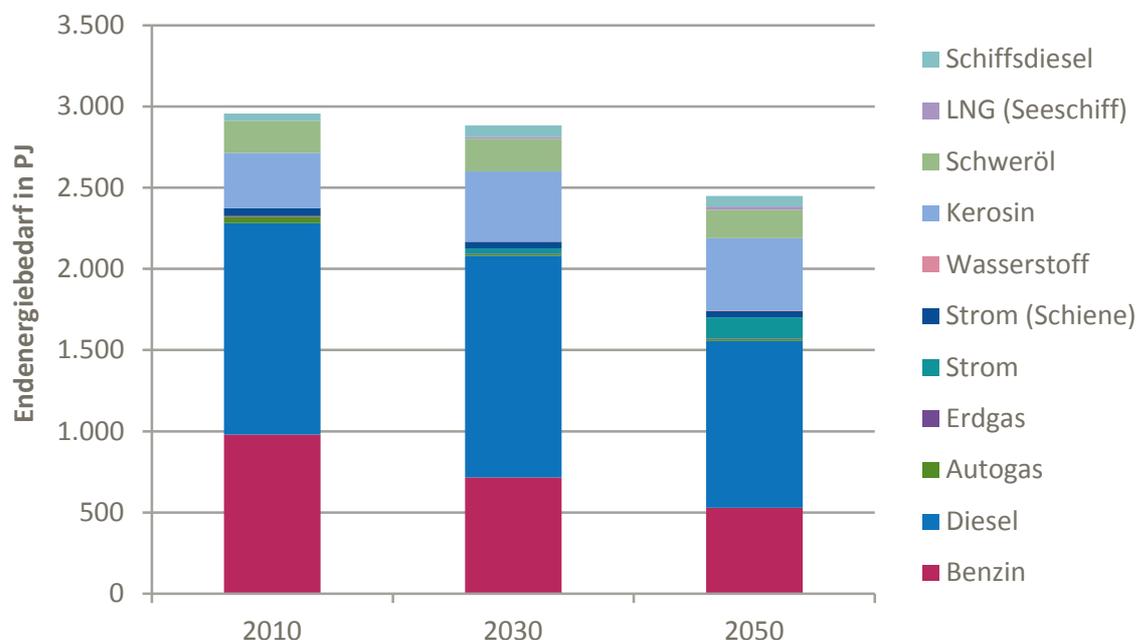
**Abbildung 11-1: Endenergiebedarf in der Basis, 2010-2050**



Quelle: Renewbility III

Der Energieträgermix ändert sich bis zum Jahr 2050 in der Basisentwicklung nur leicht. So nimmt der Anteil an Benzin von 33 % in 2010 auf 22 % in 2050 ab, der Anteil Diesel reduziert sich ausgehend von 44 % nur um 2 Prozentpunkte, da hier der Güterverkehr einen starken Einfluss hat, und der Anteil an Strom für Elektrofahrzeuge steigt von nahezu Null auf 5,3 %.

Abbildung 11-2: Endenergiebedarf in der Basis nach Kraftstoffen, 2010-2050



Quelle: Renewbility III

Tabelle 11-1: Endenergiebedarf (national und international) in PJ in der Basis nach Kraftstoffen, 2010-2050

	2010	2030	2050
<b>Benzin</b>	980	715	528
<b>Diesel</b>	1.303	1.367	1.028
<b>Autogas</b>	38	9	12
<b>Erdgas</b>	9	4	5
<b>Strom</b>	0	30	130
<b>Strom (Schiene)</b>	44	42	38
<b>Wasserstoff</b>	0	0	5
<b>Kerosin</b>	342	433	445
<b>Schweröl</b>	196	201	174
<b>LNG (Seeschiff)</b>	0	11	21
<b>Schiffsdiesel</b>	45	71	65
<b>Gesamtergebnis</b>	<b>2.958</b>	<b>2.885</b>	<b>2.450</b>

Quelle: Renewbility III

## 11.4 ERGEBNISSE 2030

Die Minderung des Endenergiebedarfs des nationalen Verkehrssektors bis 2030 bewegt sich in den Szenarien zwischen -9 % in der Basis und -35 % in der Szenarette mit Pkw-Maut.

Eine Effizienzstrategie bei Pkw und Lkw (Szenario Effizienz) kann die Energieeinsparung von minus 9 % auf minus 20 % erhöhen. Weitere 7 %-Punkte lassen sich durch die Maßnahmen für lebenswerte Innenstädte und eine Verbesserung des Verkehrssystems im Szenario Effizienz plus erzielen, und nochmals 8 %-Punkte kommen in der Szenarette mit Pkw-Maut dazu.

**Abbildung 11-3: Endenergiebedarf des nationalen Verkehrs in 2030**

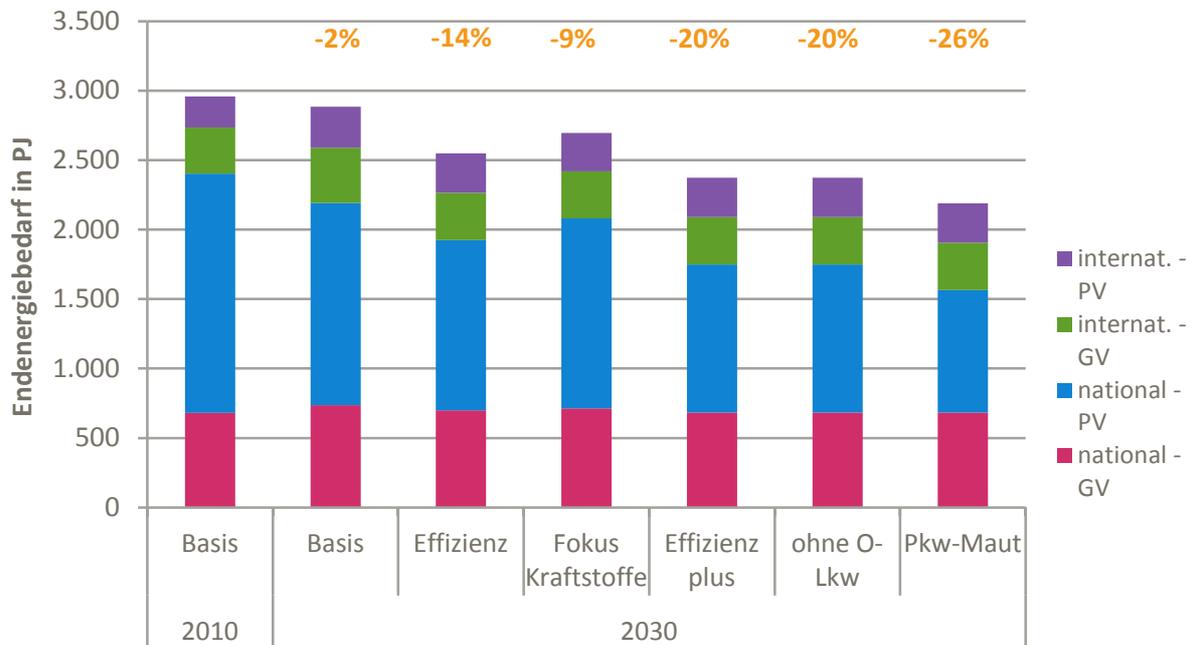


Quelle: Renewbility III

Betrachtet man den gesamten Verkehr inklusive des internationalen Seeverkehrs, so fällt die Minderung des Endenergiebedarfs niedriger aus.

Abbildung 11-4 zeigt, dass ein Reduktionsbeitrag bis 2030 trotz der hinterlegten Maßnahmen nur der nationale Personenverkehr liefert. Dagegen steigt der Endenergiebedarf im Güterverkehr und bei den internationalen Verkehren gegenüber 2010 weiter an.

Abbildung 11-4: Endenergiebedarf des Verkehrs inkl. Internationaler Verkehr in 2030



Quelle: Renewability III

## 11.5 ERGEBNISSE 2050

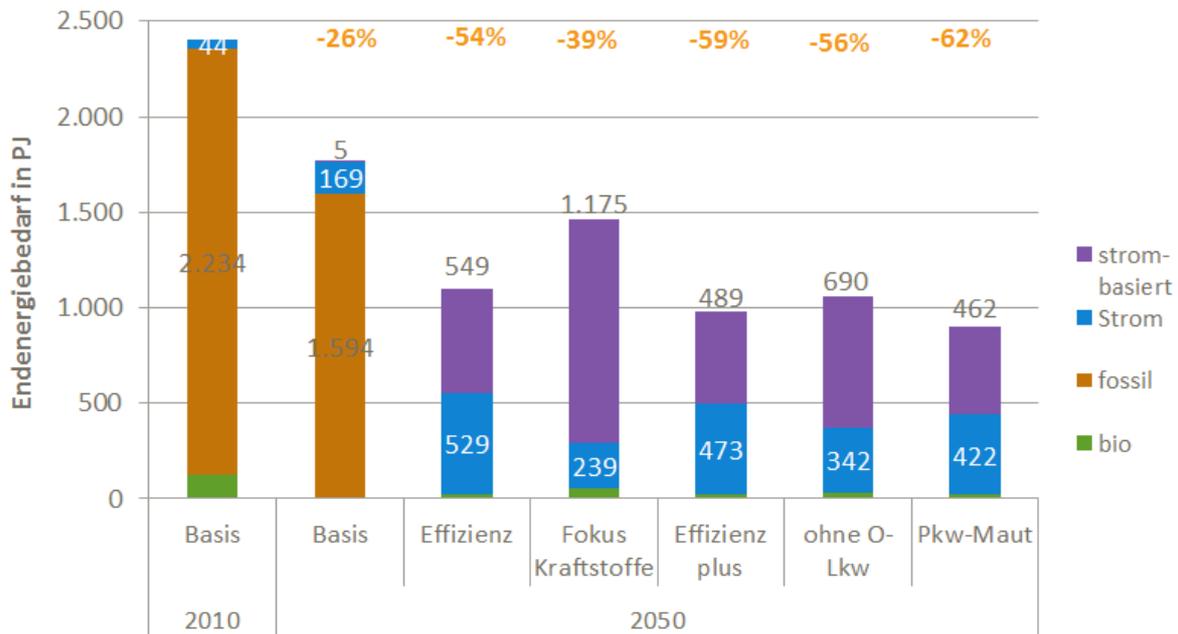
Die Minderung des Endenergiebedarfs des nationalen Verkehrs bis 2050 bewegt sich in den Szenarien zwischen -26 % in der Basis und -62 % in der Szenarettete mit Pkw-Maut. Das bedeutet: In der Szenarettete mit Pkw-Maut liegt der Endenergiebedarf nahezu nur noch halb so hoch wie in der Basisentwicklung im Jahr 2050. Das Endenergieziel von -40 % gegenüber 2005 wird in fast allen Klimaschutzszenarien (nur nicht in der Szenarettete Fokus Kraftstoffe) deutlich übertroffen.

Im Szenario Effizienz ist bereits rund die Hälfte des Energieverbrauchs auf die direkte Stromnutzung zurückzuführen – der elektrische Anteil an der Verkehrsleistung liegt in diesem Szenario also deutlich über 50 %.

In der Szenarettete Fokus Kraftstoffe liegt der Endenergiebedarf um 33 % (364 PJ) höher als im Szenario Effizienz, da hier der Anteil der elektrisch betriebenen Fahrzeuge deutlich geringer ist und entsprechend auch der Anteil der direkten Stromnutzung mit 239 PJ im Vergleich zu den anderen Szenarien sehr niedrig ausfällt.

In der Szenarettete ohne O-Lkw liegt der Endenergiebedarf um rund 8 % bzw. 80 PJ höher als im Szenario Effizienz plus, was an dem geringeren Wirkungsgrad der verbrennungsmotorischen Lkw liegt.

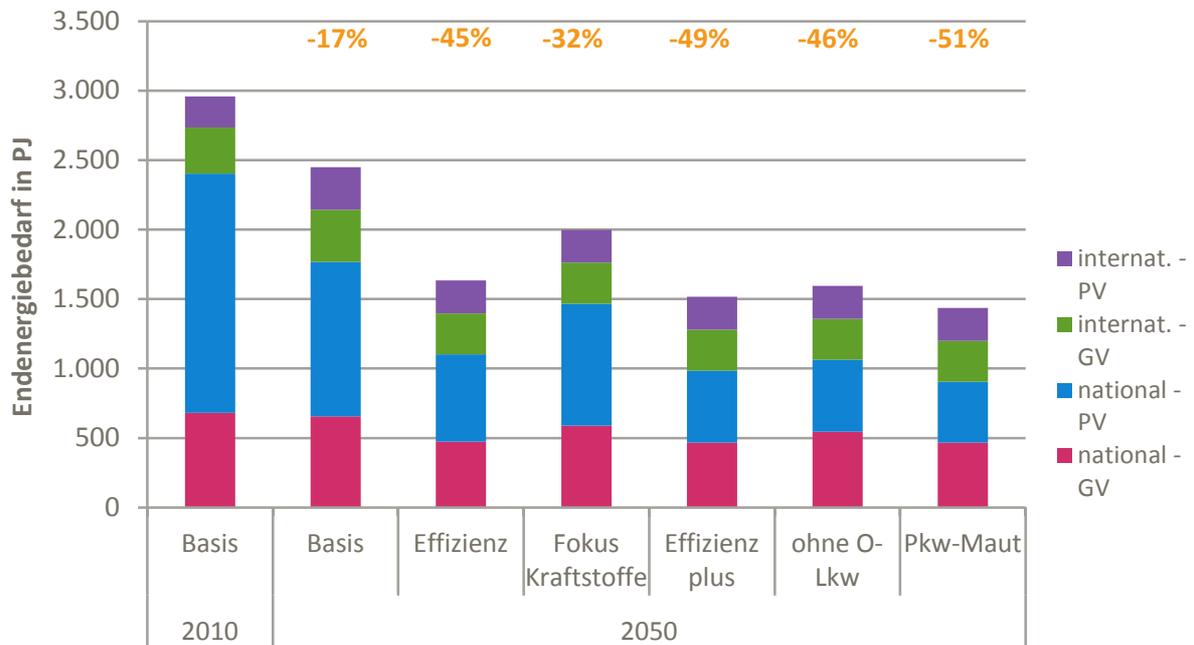
Abbildung 11-5: Endenergiebedarf des nationalen Verkehrs in 2050



Quelle: Renewbility III

Abbildung 11-6 zeigt den Endenergiebedarf inklusive des internationalen Verkehrs und differenziert nach Personen- und Güterverkehr. Wie in 2030 liefert auch in 2050 der nationale Personenverkehr den größten Minderungsbeitrag und reduziert seinen Endenergiebedarf in den Klimaschutzszenarien um 60 bis 75 %. Dies ist vor allem auf den hohen Anteil der batterieelektrischen Fahrzeuge zurückzuführen.

Abbildung 11-6: Endenergiebedarf des Verkehrs inkl. internationaler Verkehr in 2050

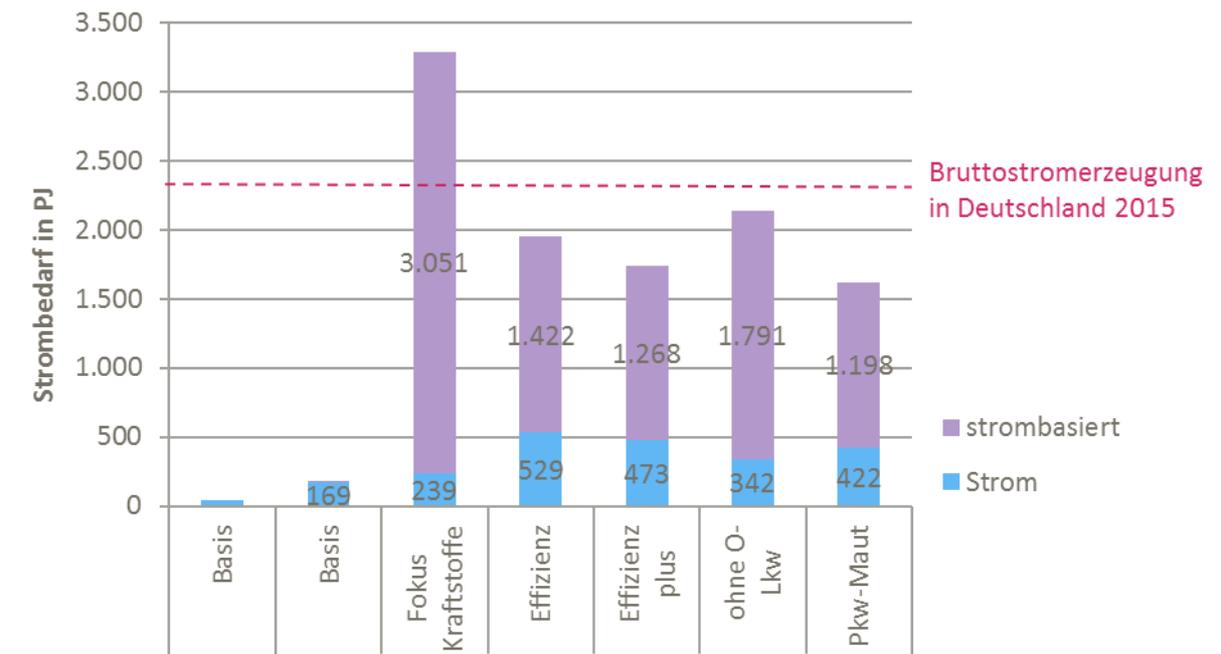


Quelle: Renewbility III

## 11.6 ERGEBNISSE STROMBEDARF DES VERKEHRSEKTORS

Der Endenergiebedarf des nationalen Verkehrs kann in der Szenarettete ohne Grenzwertfortschreibung bis 2050 nur um 39 % reduziert werden. Im Szenario Effizienz sind es hingegen 54 %. Bei einer hohen Menge an strombasierten Kraftstoffen zur Dekarbonisierung ist aber vor allem folgende Frage spannend: Welcher Strombedarf des Verkehrssektors entsteht über die direkte Fahrzeugnutzung hinaus durch die Produktion der Kraftstoffe?

Abbildung 11-7: Strombedarf des nationalen Verkehrs 2050



Quelle: Renewbility III

Der gesamte Strombedarf des nationalen Verkehrs – also inklusive des zur Produktion benötigten Stroms – steigt in der Szenarreihe durch die hohen Mengen strombasierter Kraftstoffe bis 2050 deutlich an. Der Strombedarf für den Verkehrssektor liegt 2050 bei knapp 3.300 PJ. Zum Vergleich: Im Jahr 2015 belief sich die gesamte Bruttostromerzeugung in Deutschland auf rund 2.350 PJ, davon stammten 702 PJ aus erneuerbaren Energiequellen. Wird die direkte Stromnutzung – also die Elektromobilität und der Einsatz von Oberleitungs-Lkw – maximal vorangetrieben, kann dieser Strombedarf um gut ein Drittel reduziert werden, wie das Szenario Effizienz zeigt. Im Jahr 2050 würde er dann bei rund 2.000 PJ liegen.

Eine Dekarbonisierung des Verkehrssektors allein mit strombasierten Kraftstoffen scheint möglich, aber der Energiebedarf ist extrem hoch. Der zusätzliche Bedarf an Strom aus erneuerbaren Energien muss garantiert werden können. Aus Klimaschutzsicht ist eine effiziente Allokation daher dringend erforderlich. Der Strom muss überall dort, wo es möglich ist, direkt genutzt werden. Strombasierte Kraftstoffe sollten nur dann zum Einsatz kommen, wenn diese Option nicht zur Verfügung steht, also voraussichtlich im Luft- und Seeverkehr.

## 11.7 FAZIT

Die Szenarien zeigen, dass eine Reduktion des Endenergiebedarfs im Verkehrssektor bis 2050 von rund 60 % möglich ist – durch eine Kombination der Effizienzsteigerung des Verkehrssystems und der Fahrzeuge selbst. Wesentlich bei letzterem ist eine direkte Stromnutzung überall dort, wo es machbar ist. Strombasierte Kraftstoffe sollten nur dann zum Einsatz kommen, wenn keine andere Option besteht. Eine Dekarbonisierungsstrategie, die ausschließlich auf CO<sub>2</sub>-freien Kraftstoffen basiert, ist aus energetischer Sicht ineffizient – sie erfordert Strommengen, die über die heutige Bruttostromerzeugung deutlich hinausgehen.

Für die Energiebedarfe, bei denen keine direkte Stromnutzung möglich ist, sind stromgenerierte Kraftstoffe erforderlich. Der zusätzliche Strom aus erneuerbaren Energiequellen muss dafür sichergestellt werden. Auch muss bedacht werden, dass die stromgenerierten Kraftstoffe voraussichtlich zum überwiegenden Teil außerhalb Deutschlands in Ländern mit höheren Potenzialen für erneuerbare Energien produziert werden. Wesentlich ist es daher, dass frühzeitig Nachhaltigkeitsstandards für strombasierte Kraftstoffe auf internationaler Ebene, z. B. hinsichtlich Konkurrenzen um Wasser in Trinkwasserqualität, vereinbart werden. Auch muss bedacht werden, dass die Systemumstellung zu Importabhängigkeiten bei strombasierten Kraftstoffen wie bisher vom Erdöl führt.

## 12 TREIBHAUSGASEMISSIONEN

### 12.1 ANNAHMEN UND PARAMETER

Die Treibhausgasemissionen werden Bottom-up auf Basis des Endenergiebedarfs differenziert nach den einzelnen Energieträgern modelliert. In diesem Kapitel wird der Fokus auf die direkten Emissionen gelegt, da diese sektorale Abgrenzung Grundlage beispielsweise der Klimaberichterstattung, des Klimaschutzaktionsprogramms 2020 und auch des Klimaschutzplans 2050 ist. Damit ist eine bessere Vergleichbarkeit gegeben. Es werden nur die CO<sub>2</sub>-Emissionen dargestellt, da die übrigen Treibhausgase bei den direkten Emissionen nicht ins Gewicht fallen und auch die Ziele meist für CO<sub>2</sub> definiert werden. Ausnahme bilden die Materialvorleitungen, bei den direkten und indirekten Emissionen sind daher die Emissionsmengen aller Treibhausgase ausgewiesen.

Ein Unterschied zur Methodik der Klimaberichterstattung besteht darin, dass die Emissionen im Rahmen von Renewbility auf Basis der tatsächlichen, inländischen Verkehrsleistung berechnet werden und nicht auf Basis des Kraftstoffabsatzes in Deutschland, so dass sich dadurch leichte Unterschiede ergeben. Wesentlich zu beachten ist, dass bei der sektoralen Abgrenzung Biokraftstoffe und Strom mit null CO<sub>2</sub>-Emissionen bilanziert werden. Die Emissionen der Kraftstoffbereitstellung und der Fahrzeugherstellung werden in separaten Abschnitten ebenfalls mit dargestellt.

#### 12.1.1 EMISSIONSFAKTOREN

Die Emissionsfaktoren der Kraftstoffe – direkte und indirekte Emissionen – sind in Kapitel 3.4 dargestellt. Bei erneuerbaren strombasierten Kraftstoffen sowie Biokraftstoffen werden die direkten Emissionen mit null bewertet und nur in der Vorkette fallen Emissionen an. Die Emissionen der Materialvorleistungen ergeben sich aus der Modellierung der Materialvorleistungen (siehe Kapitel 10).

#### 12.1.2 KLIMAWIRKSAMKEIT DES LUFTVERKEHRS

Der Luftverkehr ist einerseits durch die Emission von Treibhausgasen, insbesondere von CO<sub>2</sub>, direkt klimawirksam. Es gibt aber darüber hinaus noch andere Effekte, die in großer Flughöhe wirksam werden. Dazu zählen Emissionen von Stickoxiden, Rußpartikeln und Wasserdampf ebenso wie die teilweise damit verbundene verstärkte Wolken- und Kondensstreifenbildung. Die Berechnung der Klimawirkung des Luftverkehrs beziehungsweise die Festlegung auf pauschale Faktoren stellt eine besondere Herausforderung dar. Die Klimawirkung ist nämlich neben der Emissionsstärke auch vom Emissionsort, also der Höhe, der geografischen Länge und Breite sowie von der Zeit

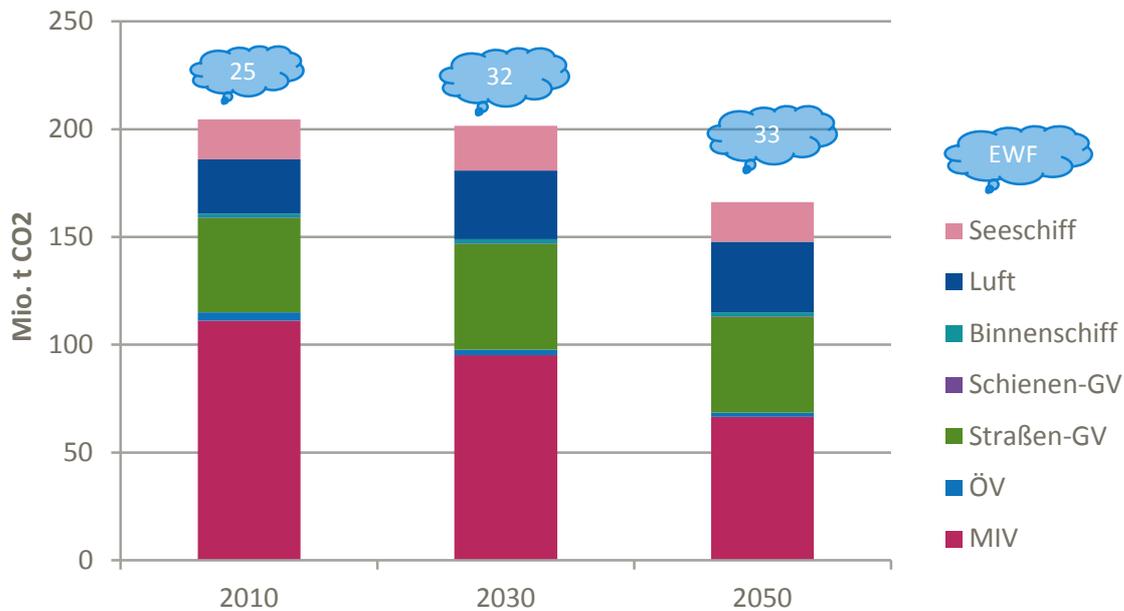
abhängig. Dass der Luftverkehr großen Einfluss auf das Klima hat, ist in der Wissenschaft unumstritten. Die Klimawirksamkeit kann durch die Berücksichtigung eines „Emission Weighting Factor“ (EWF) dargestellt werden. Dieser gewichtet die aus dem Flugverkehr entstehenden CO<sub>2</sub>- und Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte aus der Verbrennung der Kraftstoffe in großer Höhe gegenüber dem CO<sub>2</sub>-Effekt am Boden. Der EWF wird bei Flughöhen angewendet, die über neun Kilometern liegen. Aufgrund der sehr komplexen Zusammenhänge, die in den Renewbility-Modellen nicht abgebildet werden können, wird die erhöhte Klimawirksamkeit mit einem Gewichtungsfaktor EWF von 1,2 bis 2,7 (dargestellt mit einem mittleren Wert von 2) berücksichtigt. Das bedeutet, dass die tatsächliche Klimawirkung des Luftverkehrs je nach Ort und Höhe der Emissionen 1,2- bis 2,7-mal höher ist als jene der bloßen CO<sub>2</sub>-Emissionen. Auch wenn CO<sub>2</sub>-freie Kraftstoffe eingesetzt werden, bleibt dieser Klimateffekt bestehen. Das wird entsprechend in Klimaschutzszenarien berücksichtigt.

## 12.2 ERGEBNISSE BASISZENARIO

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Verkehrs inklusive der internationalen Verkehre können in der Basisentwicklung bis 2030 nicht reduziert werden – erst bis 2050 gehen sie etwas zurück.

Neben der direkten Klimawirksamkeit der emittierten Treibhausgase gibt es zusätzliche Klimawirkungen des Luftverkehrs (12.1.2). Diese können auch durch den Einsatz strombasierter Kraftstoffe nicht vermieden werden. Zur Beschreibung dieser Faktoren dient der „Emission Weighting Faktor“ (EWF), der aufgrund der Unsicherheiten in den Abbildungen als Wolken dargestellt ist.

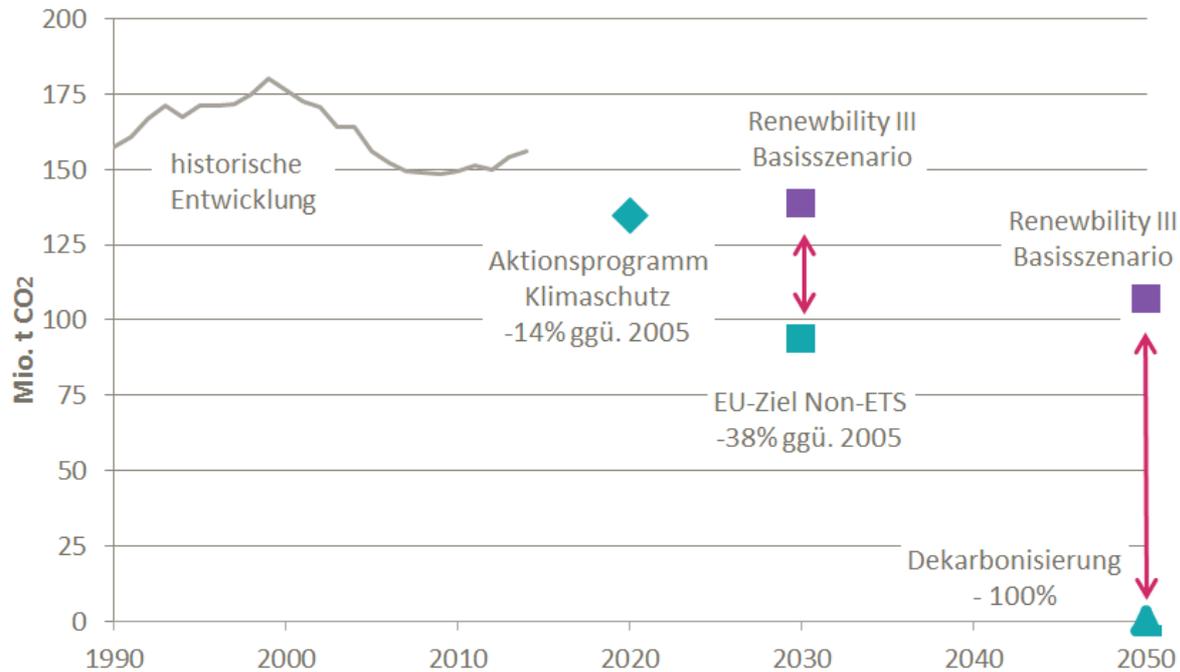
Abbildung 12-1: Treibhausgasemissionen in der Basis, 2010-2050



Quelle: Renewability III

Bei den nationalen CO<sub>2</sub>-Emissionen des Verkehrssektors ergibt sich im Basisszenario bis 2030 eine Reduktion um 8 %, bis 2050 um 28 %. Auf europäischer Ebene werden derzeit für die Sektoren Verkehr, Gebäude und Landwirtschaft, die nicht vom EU-Emissionshandel (ETS) umfasst werden, Ziele für 2030 gesetzt. Demnach sollen in Deutschland die CO<sub>2</sub>-Emissionen in diesen Sektoren um 38 % im Vergleich zum Jahr 2005 gesenkt werden. Das Energiekonzept der Bundesregierung aus dem Jahr 2010 sieht bis 2050 eine sektorübergreifende CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung um 95 % vor – im Vergleich zum Jahr 1990. Dieses Ziel wird in der Basisentwicklung – ebenso wie die vollständige Dekarbonisierung des Verkehrssektors – deutlich verfehlt. Das bedeutet, dass ohne die Umsetzung weiterer Maßnahmen im Verkehrssektor Deutschland seine Klimaschutzziele nicht erreichen kann (Abbildung 12-2).

Abbildung 12-2: Verkehrssektor: Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen (Historie, Basisszenario und Ziele)



Quelle: Renewability III

## 12.3 ERGEBNISSE 2030

### Direkte CO<sub>2</sub>-Emissionen

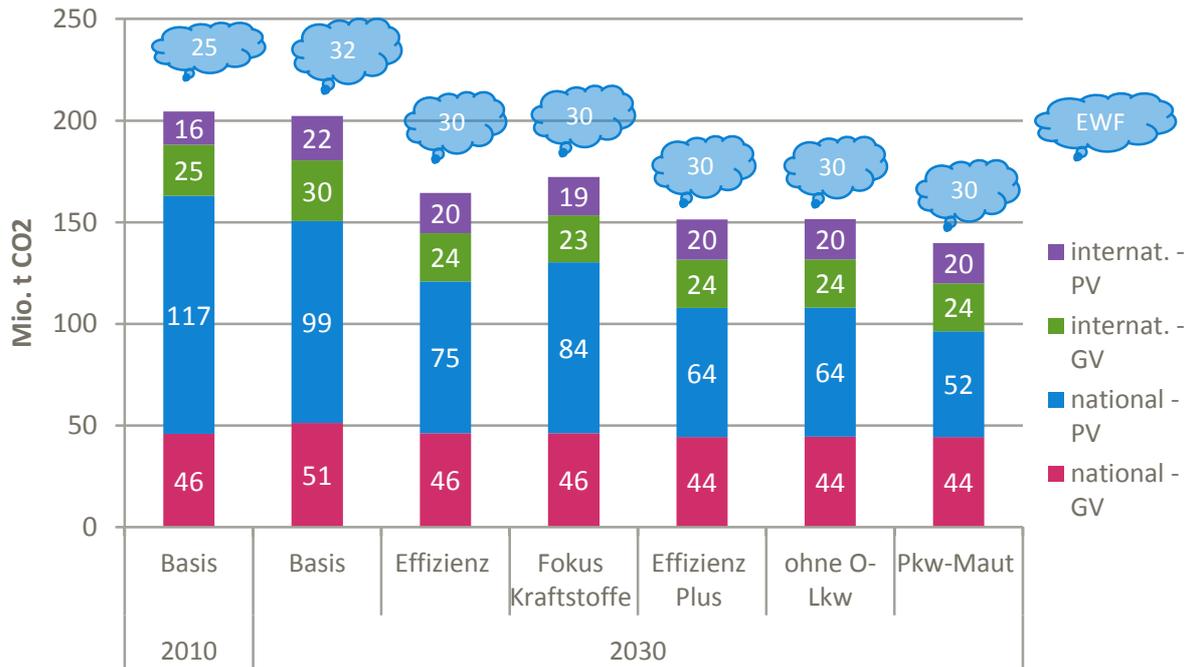
Das Ziel einer vollständigen Dekarbonisierung des Verkehrssektors bis 2050 kann auf verschiedenen Wegen und mit unterschiedlichem Tempo angegangen werden. Die Geschwindigkeit der Dekarbonisierung ist entscheidend dafür, wie viele Treibhausgasemissionen der Verkehr insgesamt bis zum Erreichen des Dekarbonisierungsziels noch emittieren wird. Dafür spielt die Entwicklung der Emissionen bis zum Jahr 2030 eine entscheidende Rolle. Im Rahmen der EU-Effort Sharing Decision wurde für die nicht-Emissionshandelssektoren und damit indirekt auch den Verkehrssektor in Deutschland bis 2030 eine Reduktion von 38 % gegenüber 2005 vorgeschlagen.

Die Renewability-Szenarien zeigen, dass eine Strategie, die nur auf Effizienz setzt, nicht zur Erreichung einer Minderung von 38 % ausreicht. Im Szenario Effizienz wird gegenüber 2005 im nationalen Verkehrssektor nur eine Reduktion von gut 29 % erzielt. Mit zusätzlichen Maßnahmen zur Verlagerung und zur Erhöhung der Lebensqualität in Innenstädten wird im Szenario Effizienz plus eine Minderung von 37 % erreicht.

Eine Minderung der direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen um 44 % im nationalen Verkehr gelingt bis zum Jahr 2030 in der Szenarettete mit Pkw-Maut, d. h. wenn zusätzlich zur Effizienzsteigerung

und den Maßnahmen zur Verbesserung der Lebensqualität in Städten auch die Nutzerkosten des MIV erhöht werden.

**Abbildung 12-3: CO<sub>2</sub> – Emissionen im Jahr 2030**



Quelle: Renewbility III

**Tabelle 12-1: Prozentuale Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen ggü. 2005**

	Basis	Effizienz	Fokus Kraftstoffe	Effizienz plus	ohne O-Lkw	Pkw-Maut
National	-12%	-29%	-24%	-37%	-37%	-44%
Gesamt	-4%	-22%	-18%	-28%	-28%	-33%
Gesamt inkl. EWF	1%	-16%	-13%	-21%	-22%	-27%

Quelle: Renewbility III

**Tabelle 12-2: Prozentuale Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen ggü. 1990**

	Basis	Effizienz	Fokus Kraftstoffe	Effizienz plus	ohne O-Lkw	Pkw-Maut
National	-13%	-30%	-25%	-38%	-38%	-45%
Gesamt	1%	-18%	-14%	-24%	-24%	-30%
Gesamt inkl. EWF	11%	-8%	-4%	-14%	-14%	-19%

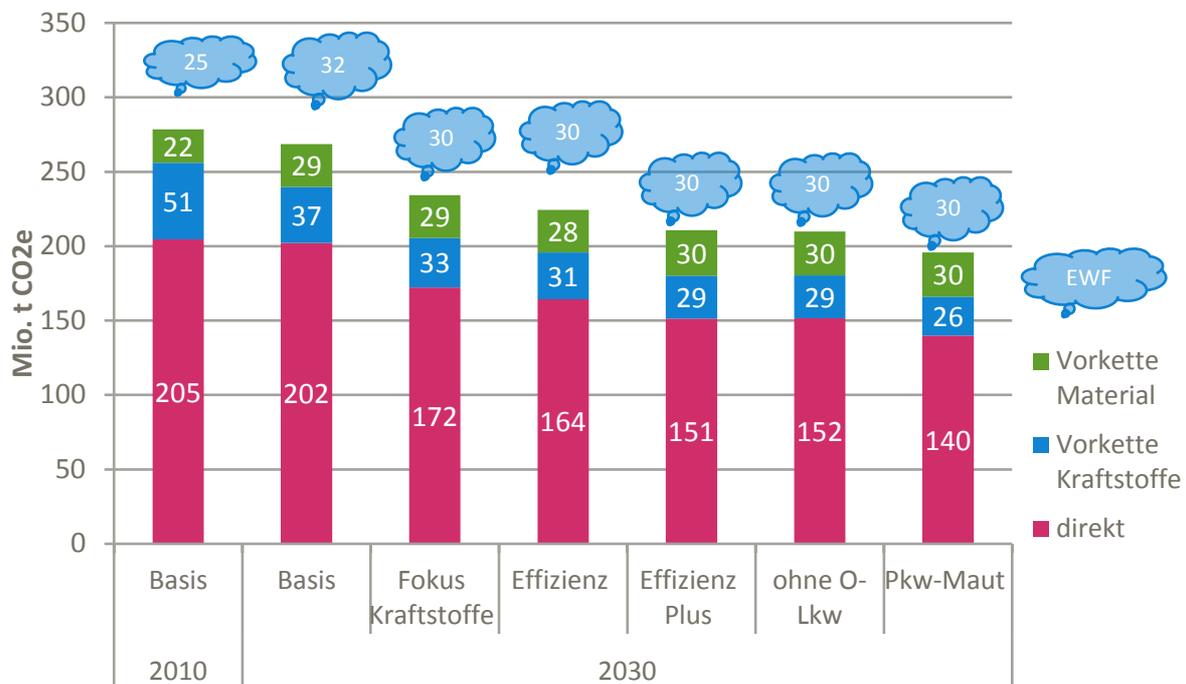
Quelle: Renewbility III

### Treibhausgasemissionen inklusive Produktion Energieträger und Fahrzeugherstellung

Mit dem Einsatz erneuerbarer Energieträger und mit dem Einsatz von Elektrofahrzeugen werden die direkten Treibhausgasemissionen aus dem Verkehr stark reduziert. Gleichzeitig kommt es aber auch zu Verlagerungen von Umweltwirkungen aus der Fahrzeugnutzung zur vorgelagerten Bereitstellung der Energieträger und zur Produktion der Fahrzeuge. Zur umfassenden Betrachtung der Treibhausgaswirkungen verschiedener Dekarbonisierungspfade in Renewbility wurde daher die Betrachtung um die Treibhausgasemissionen von Kraftstoffvorketten und Fahrzeugherstellung erweitert. Dabei ist zu beachten, dass Emissionen der Kraftstoffvorketten und der Fahrzeugherstellung, soweit sie in Deutschland anfallen, im nationalen Treibhausgasinventar nicht dem Verkehr zugerechnet werden, sondern dem Umwandlungssektor und der Fahrzeugindustrie. Sie können daher nicht direkt mit sektorspezifischen Minderungszielen im Verkehr verknüpft werden.

Während die direkten Emissionen und die Emissionen in der Kraftstoffvorkette bis 2030 in den Szenarien bereits deutlich abnehmen, steigen die Emissionen bei der Fahrzeugherstellung aufgrund der steigenden Neuzulassungszahlen sowie gleichzeitig steigenden Anteilen von Elektrofahrzeugen mit höheren spezifischen Herstellungsemissionen an (vgl. Kapitel 10). In der Gesamtbetrachtung unter Einbezug von direkten Emissionen der Fahrzeugnutzung sowie vorgelagerten Emissionen der Kraftstoffbereitstellung und Fahrzeugproduktion ergibt sich damit insgesamt eine Minderung der Treibhausgasemissionen zwischen 2010 und 2030 um 20 % im Szenario Effizienz und um 24 % im Szenario Effizienz plus.

Abbildung 12-4: Treibhausgasemissionen inkl. Vorketten im Jahr 2030



Quelle: Renewbility III

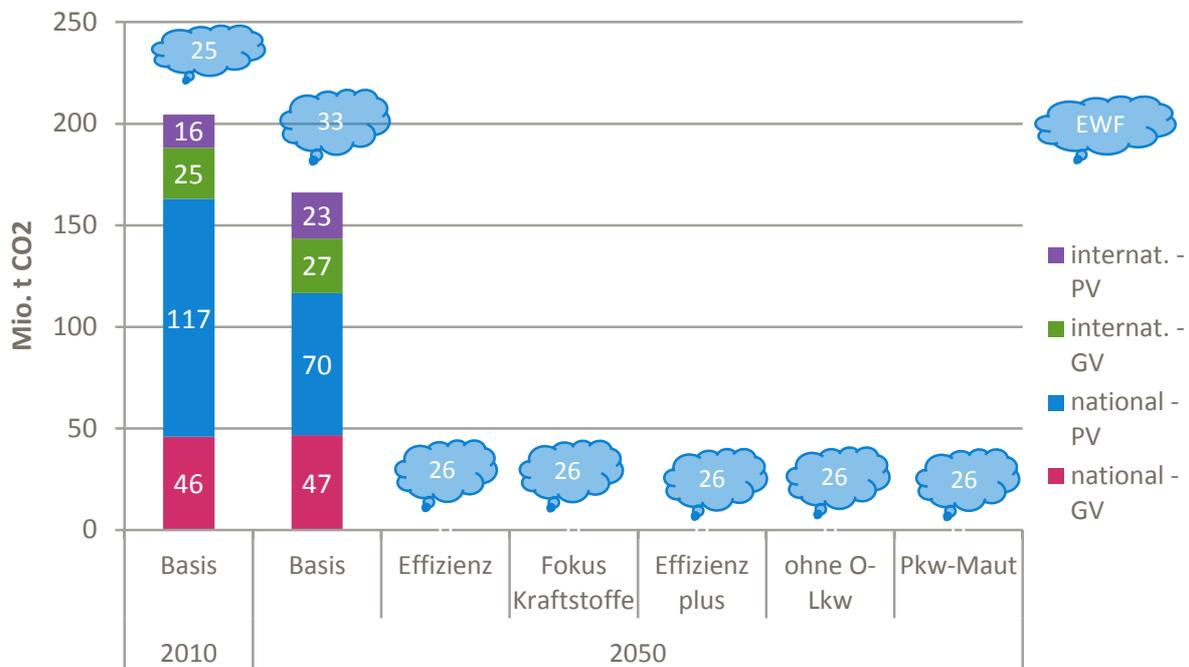
## 12.4 ERGEBNISSE 2050

### Direkte CO<sub>2</sub>-Emissionen

Die vollständige Dekarbonisierung des Verkehrssektors wird in den Klimaschutzszenarien im Rahmen von Renewbility III vorausgesetzt. Die direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2050 werden daher durch den Einsatz erneuerbarer Energien – 95 % strombasierte und 5 % biogene Kraftstoffe – vermieden. Zentral ist damit auch das Gelingen der Energiewende im Stromsektor. Würde der heutige Strommix für die Energiebedarfe (direkte Stromnutzung und Herstellung strombasierter Kraftstoffe) der Szenarien Effizienz und Effizienz plus für das Jahr 2050 hinterlegt, so würden sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen gegenüber heute mehr als verdoppeln.

Trotz vollständiger Dekarbonisierung bleiben jedoch die Klimawirkungen des internationalen Luftverkehrs. Werden diese berücksichtigt, so können die Klimawirkungen der direkten Emissionen bis 2050 nur um rund 88 % gegenüber 1990 reduziert werden.

Abbildung 12-5: CO<sub>2</sub> – Emissionen im Jahr 2050



Quelle: Renewbility III

Tabelle 12-3: Prozentuale Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen ggü. 1990

	Basis	Effizienz	Fokus Kraftstoffe	Effizienz plus	Ohne O-Lkw	Pkw-Maut
National	-33 %	-100 %	-100 %	-100 %	-100 %	-100 %
Gesamt	-17 %	-100 %	-100 %	-100 %	-100 %	-100 %
Gesamt inkl. EWF	-6 %	-88 %	-88 %	-88 %	-88 %	-88 %

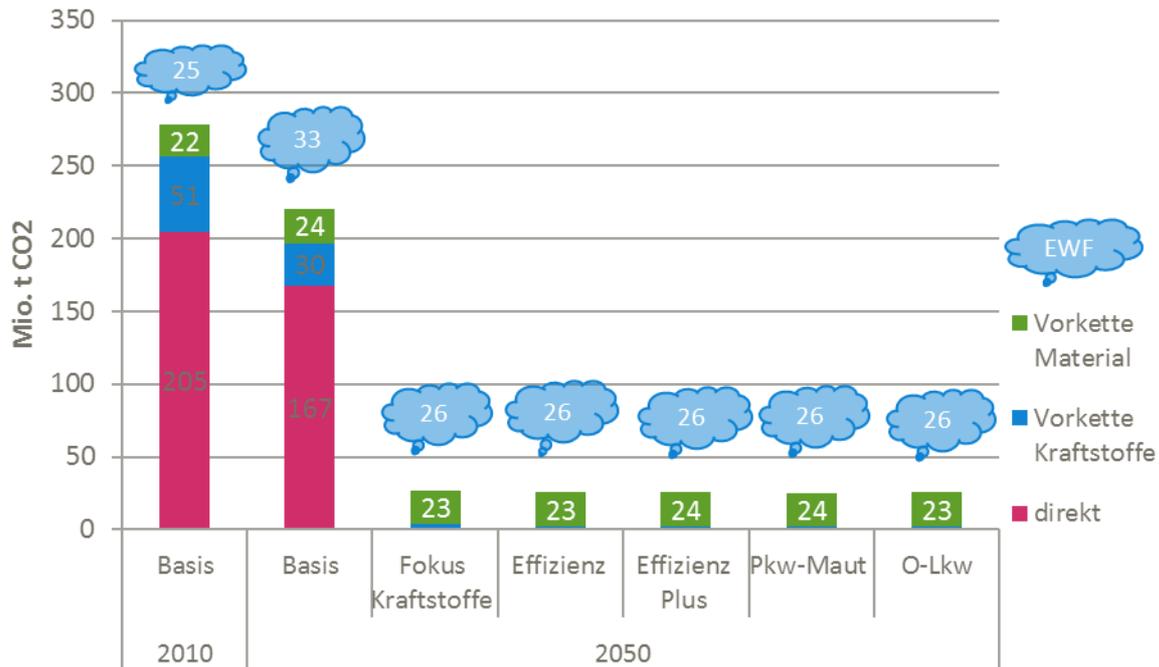
Quelle: Renewbility III

## Treibhausgasemissionen inklusive Produktion Kraftstoffe und Fahrzeugherstellung

Im Jahr 2050 verbleiben in den Klimaschutzszenarien neben den Klimawirkungen des internationalen Flugverkehrs nur noch Treibhausgasemissionen aus der Herstellung der Fahrzeuge. Die direkten Emissionen sowie die Emissionen der Kraftstoffherstellung (Strom aus erneuerbaren Energien) belaufen sich auf null. Die verbleibenden Emissionen aus der Herstellung der Fahrzeuge begründen sich mit Materialbereitstellungsprozessen im Ausland, wo nach den hier getroffenen Annahmen der Energiebedarf nicht zu 100 % mit erneuerbaren Energien gedeckt wird. Werden global die Klimaschutzziele ernst genommen

und der Anteil erneuerbarer Energien steigt weltweit langfristig stark an, werden sich auch die Emissionen aus der Materialbereitstellung noch einmal deutlich reduzieren.

**Abbildung 12-6: Treibhausgasemissionen inkl. Vorketten im Jahr 2050**



Quelle: Renewbility III

## 12.5 FAZIT

Prämisse der Klimaschutzszenarien in Renewbility III war eine vollständige Dekarbonisierung bis 2050. Entsprechend wird bis zum Jahr 2050 im Verkehrssektor kein CO<sub>2</sub> mehr emittiert. Dies erfolgt auf unterschiedlichen Wegen und – was ganz wesentlich ist – mit unterschiedlichen Energiebedarfen. Voraussetzung dieser Klimaneutralität in 2050 ist jedoch, dass die CO<sub>2</sub>-freien Kraftstoffe bis dahin dann auch tatsächlich CO<sub>2</sub>-frei sind, d. h. vor allem der Strom auf erneuerbaren Energien basiert – unabhängig davon, wo er produziert wird.

Wenn die benötigten Energiemengen CO<sub>2</sub>-frei bereitgestellt werden können, so verbleibt am Ende nur noch die nicht-CO<sub>2</sub>-bedingte Klimawirksamkeit des Luftverkehrs, die nur mit entsprechenden Maßnahmen, vor allem zur Dämpfung der Nachfrage, weiter reduziert werden kann.

Ganz wesentlich ist jedoch auch der Blick ins Jahr 2030 und auf das EU-Ziel für Deutschland, die CO<sub>2</sub>-Emissionen in den nicht-Emissionshandelssektoren und damit indirekt auch im Verkehrssektor um 38 % gegenüber 2005 zu reduzieren. Die Renewbility-Szenarien zeigen

nämlich, dass eine Strategie, die nur auf Effizienz setzt, nicht zur Erreichung einer Minderung von 38 % ausreicht. Im Szenario Effizienz wird nur eine Reduktion von rund 29 % gegenüber 2005 erzielt. Mit zusätzlichen Maßnahmen zur Verlagerung und zur Erhöhung der Lebensqualität in Innenstädten wird im Szenario Effizienz plus eine Minderung von 37 % erreicht. Das 2030 Ziel ist im Verkehrssektor damit nur durch eine Kombination aus sehr ambitionierten Grenzwertfortschreibungen bzw. Setzung für Lkw und einer Effizienzverbesserung des gesamten Verkehrssystems bei gleichzeitiger Anhebung der Kraftstoffsteuern (zur Vermeidung von Rebound-Effekten) zu erreichen. Die Rolle der CO<sub>2</sub>-freien Kraftstoffe sollte im Jahr 2030 noch vergleichsweise klein sein, um zunächst eine effiziente Allokation des bis dahin zur Verfügung stehenden erneuerbaren Energien-Stroms gewährleisten zu können.

## 13 ÖKONOMISCHE EFFEKTE

### 13.1 HINTERGRUND UND AUSGANGSLAGE

Was bedeuten die verschiedenen Szenarien nun für die Volkswirtschaft in Deutschland? Mit der ökonomischen Analyse schließt sich der Modellierungskreis im Rahmen von Renewbility III: Die Ergebnisse der Verkehrs- und Emissionsmodellierungen fließen als Inputs in die ökonomische Modellierung, indem sie als unterschiedliche Impulse für die Volkswirtschaft aufbereitet werden: Was bedeutet eine verminderte Nachfrage im Straßenverkehr für die Fahrzeugherstellung in Deutschland? Welche Folgen hat der Mehrbedarf an ÖPNV für die öffentliche Hand? Wie verändert sich die Einkommenssituation für die privaten Haushalte?

In einem ersten Schritt werden die Inputgrößen aus den anderen Modellierungen berücksichtigt und integriert, etwa die gefahrenen Fahrzeugkilometer oder die Anzahl Fahrzeuge je Szenario. Diese Daten werden danach in wirtschaftliche Größen umgesetzt wie die Ausgaben der Konsumenten, die Investitionen in einzelnen Branchen oder den Steuerbedarf des Staates. Mit diesen ökonomischen Impulsen folgt in einem weiteren Schritt die Simulation der gesamtwirtschaftlichen Wirkungen der Maßnahmen in den beiden Szenarien sowie in den Szenaretten – unter Berücksichtigung der wirtschaftlichen Verflechtungen zwischen den Branchen und den Einkommensrestriktionen der Haushalte. Die zentralen Ergebnisindikatoren für diese Wirkungen sind die Veränderungen der Wertschöpfung sowie der Beschäftigung gegenüber dem Basisszenario.

Die Analysen beziehen sich analog zu den anderen Modellierungen auf die beiden Zeitpunkte 2030 und 2050. Startpunkt ist jeweils eine dekarbonisierte Wirtschaft Deutschlands (außer im Verkehrsbereich). Darauf setzen die Analysen auf, indem sie die Frage beantworten, welche volkswirtschaftlichen Auswirkungen die verschiedenen Szenarien der Dekarbonisierung des Verkehrs in Deutschland in etwa erwarten lassen – bei der gegebenen Wirtschaftsstruktur gemäß Basisszenario.

Diese ökonomischen Auswirkungen der Szenarien können aus verschiedenen Betrachtungswinkeln mit unterschiedlichen Betrachtungstiefen analysiert werden. Es folgen Erläuterungen zu den wichtigsten Ebenen, welche bei der ökonomischen Modellierung einbezogen wurden.

#### Akteurs-Ebene

In den ökonomischen Analysen betrachten wir drei Gruppen von Akteuren: die privaten Haushalte, die Unternehmen sowie den Staat.

## Betrachtungsebene

Eine Volkswirtschaft und deren Akteure können auf unterschiedlichen Aggregationsebenen analysiert werden. Auf einer Mikro-Ebene stehen die Auswirkungen für die einzelnen Haushalte oder Unternehmen. Zusammengefasst ergibt sich daraus die Meso-Ebene, in welcher Unternehmen zu Wirtschaftsbranchen und einzelne Haushalte zur Summe der Haushalte aggregiert werden. Auch der Staat als wesentlicher Akteur ist auf dieser Ebene anzuordnen. Letztlich ergeben die addierten Effekte auf der Meso-Ebene die gesamtwirtschaftlichen Effekte (Makro-Ebene).

Die ökonomischen Analysen mit dem IO-Modell VEDIOM konzentrieren sich auf die Meso- und die Makro-Ebene. Auf diesen Ebenen liefert das Modell Ergebnisse für die Haushalte (Veränderung der Haushaltseinkommen) sowie für die Unternehmen nach Branchen (Veränderung von Wertschöpfung und Beschäftigung).

## Produktions- und Verwendungsebene

Die Produktionsseite einer Volkswirtschaft stellt das Angebot dar. Hier ist im Rahmen der Modellanalysen insbesondere zwischen Betriebslogik und Investitionssicht zu unterscheiden. Bei ersterer stehen die eigentlichen Produktionskosten im Mittelpunkt, beispielsweise die Kosten, um eine Kilowattstunde Elektrizität herzustellen. Die Investitionen umfassen Ausgaben für die künftige Produktion, beispielsweise das Verteilnetz für Elektrizität. Neben der direkten Produktion von Gütern in einer Volkswirtschaft sind die Importe gleichartiger Güter je Branche hinzuzuzählen. Sie erweitern das Angebot im Inland.

Die Verwendungsseite stellt demgegenüber die Nachfrageseite einer Volkswirtschaft dar und beantwortet die Frage, wem das produzierte Güteraufkommen verkauft, bzw. von wem es nachgefragt wird und zu welchem Zweck (Vorleistungsinput, Produktion oder Endverwendung). Je nach verfügbarem Einkommen der Haushalte kann sich beispielsweise eine unterschiedlich hohe Nachfrage des privaten Konsums nach öffentlichem Verkehr ergeben.

Mittler zwischen der Produktionsseite und der Verwendungsseite sind die Preise auf den jeweiligen Gütermärkten. Für die ökonomischen Modellierungen ist hier insbesondere die Unterscheidung zwischen Hersteller- und Nutzerpreisen absolut zentral: Herstellerpreise sind jene Preise, welche aufgrund der beim Produzenten vorliegenden Kostenstruktur resultieren. Nutzerpreise hingegen sind jene Preise, welche die Haushalte (oder andere Unternehmen) für ihren Konsum entrichten müssen. Sie umfassen neben den Herstellerpreisen weitere Abgaben und Steuern und sind um allfällige Subventionen zu bereinigen.

# ENDBERICHT

## Verkehrsebenen

Im Rahmen der Renewbility-Arbeiten wurde eine nach 16 Verkehrsbranchen differenzierte Input-Output-Tabelle für Deutschland erstellt, um den bei der Verkehrsnachfrage verwendeten Detaillierungsgrad bei der ökonomischen Analyse nachbilden zu können (siehe Kapitel 4.8).

## Zielgrößen

Eigentliche Zielgröße von ökonomischen Analysen verschiedener Entwicklungsszenarien sind Aussagen zur Veränderung des volkswirtschaftlichen Wohlergehens einer Gesellschaft. Weder liegen für die aktuellen Messungen relevante und konsolidierte Messgrößen hierfür vor, noch können für diese in der Zukunft Aussagen gemacht werden. Die ökonomischen Analysen fokussieren deshalb als Hilfsindikatoren stark auf das BIP, ergänzt durch Informationen zur Beschäftigung.

Diese Hilfsgröße ist jedoch Einschränkungen ausgesetzt. Keine Aussagen können beispielsweise gemacht werden über jene Nutzen, welche über den bezahlten Preis eines Gutes hinausgehen (Konsumentenrente) oder über die Nutzen von öffentlichen Gütern oder über den Wert von nicht-monetärem Nutzen. So sind etwa diverse negative Umwelteffekte nicht im BIP abgebildet. Aus den Modellierungen liegen verschiedene physikalische Größen vor, insbesondere die Treibhausgasemissionen und der Energiebedarf für alle Szenarien. Mit Hilfe dieser Ergebnisse lassen sich die externen Kosten berechnen (vgl. Kapitel 0). Die Reduktion dieser Kosten in einzelnen Szenarien gegenüber dem Basisszenario lässt sich den Wertschöpfungseffekten gegenüberstellen. Dadurch erweitert sich die Perspektive und die ökonomischen Resultate erhalten eine höhere Aussagekraft.

## Fazit

Mit dem gewählten Vorgehen können verschiedene Aspekte durch die ökonomische Analyse abgedeckt werden: Einerseits finden betriebliche als auch investive Auswirkungen der Szenarien Eingang in die Berechnungen. Andererseits berücksichtigen wir weitere Größen wie Preiseffekte, Veränderungen im Staatsbudget, THG-Vermeidungskosten (Externe Kosten), Veränderungen in Konsum und Produktion, Effekte auf die sektorale Wertschöpfung, Strukturwandel und Beschäftigungseffekte.

Folgende Tabelle fasst die wichtigsten Ebenen zusammen und zeigt in den einzelnen Zellen entsprechende Veranschaulichungsbeispiele für das bessere Verständnis.

**Tabelle 13-1: Wichtigste Analyseebenen der ökonomischen Modellierung**

	<b>Betrieb</b>	<b>Investitionen</b>
<b>Unternehmen</b>	Herstellung von Elektrizität	Infrastrukturkosten für Stromübertragungsnetze
<b>Haushalte</b>	Nachfrage nach öffentlichem Verkehr, Kauf von Treibstoffen	Fahrzeugkäufe
<b>Staat</b>	Bestellung von Leistungen im öffentlichen Verkehr	Kosten für den Ausbau der Schieneninfrastruktur

Quelle: Renewbilty III

In der politischen Diskussion steht häufig die Frage im Zentrum, wie sich eine Maßnahme oder ein Szenario in Bezug auf die einzelnen Wirtschaftssektoren sowie in Relation zur heutigen Wirtschaftsstruktur (Meso-Ebene) auswirkt, oder wie sich Größen wie BIP, Investitionen, Exporte, Importe oder Beschäftigung im Aggregat der Gesamtwirtschaft verändern. Mit dem im Rahmen von Renewbilty erstellten Input-Output-Modell (VEDIOM) können diese Fragen beantwortet werden. Zu berücksichtigen sind dabei Unsicherheiten im Zusammenhang mit den langen Zeithorizonten von 20 resp. 40 Jahren. Die Antworten auf die Fragen sind demnach als Informationsgrundlagen zu verstehen und nicht als punktgenaue Prognosen.

## 13.2 ANNAHMEN UND PARAMETER

Wie bereits in Kapitel 4.8 dargelegt, kommt das Input-Output-Simulationsmodell VEDIOM zur Anwendung, um die ökonomischen Auswirkungen der Dekarbonisierungsszenarien im Verkehr zu analysieren. Mit VEDIOM lassen sich Abweichungen in der Gesamtwirtschaft vom Basisszenario für die konstruierten Szenarien abbilden. Ausgangslage ist eine differenzierte Input-Output-Tabelle für Deutschland 2008, welche auf die Jahre 2030 und 2050 hochgerechnet wird. Wichtige Eigenschaften der Hochrechnung sind:

- Fokus auf bezüglich Fragestellung relevante Branchen: Analyse für 46 Branchen mit stark differenzierten Verkehrsbranchen und einer Aggregation der restlichen Branchen gemäß der Differenzierung in der VP 2030,
- Konstante Preise für alle Zeitpunkte (Basis 2010),
- Keine strukturellen Veränderungen der Produktionsstrukturen,
- Übernahme der Wachstumsfaktoren bis 2030 resp. für 2030-2050 aus der VP 2030 sowie aus Analysen des FARM-Modells.

Für die Analyse sind die Auswirkungen der definierten Szenarien auf die Lebensqualität relevant. Diese Größe ist jedoch nicht direkt erfassbar und messbar. Daher fokussiert die ökonomische Analyse mit Hilfe der IO-Simulationsmodelle auf das pro Jahr erarbeitete Einkommen, die beobachtete Nachfrage und die verkaufte Produktion (BIP). Diese Hilfsindikatoren erlauben eine indikative Aussage zur volkswirtschaftlichen Entwicklung, ohne die Lebensqualität direkt zu messen. Mit dem Einbezug der externen Kosten können die Aussagen zudem breiter abgestützt werden, indem in den Marktpreisen nicht berücksichtigte Kosten ebenfalls einfließen.

Grundsätzlich baut die ökonomische Analyse auf den Ergebnissen auf, welche aus der Modellierung der Verkehrsnachfrage sowie der Umweltwirkungen hervorgehen. Alle dort getroffenen Annahmen beeinflussen deren Outputdaten und fließen deshalb indirekt auch in die ökonomischen Analysen der einzelnen Szenarien. Die wichtigsten Inputgrößen je Szenario für die ökonomische Entwicklung sind:

- Veränderte Produktionskosten (insb. Energiepreise) und Verkehrs- sowie Energienachfrage,
- Investitionen in Fahrzeuge (Fahrzeugnachfrage) und Infrastruktur (z. B. Tankinfrastruktur),
- Veränderung der Nutzerpreise im Verkehr sowie Unterscheidung zwischen Nutzer- und Herstellungspreisen,
- Importanteile der Treibstoffe (PtX) und der Fahrzeugnachfrage.

### Annahmen

Wichtige Annahmen für die Modellanalysen mit VEDIOM sind:

- Mehrbedarf an öffentlichen Finanzmitteln wird durch zusätzliche Steuereinnahmen gedeckt (keine Finanzierung über langfristige Erhöhung der Staatsverschuldung). Das verfügbare Einkommen der privaten Haushalte hängt damit auch von der Veränderung der Staatsquote ab: Höherer Bedarf an öffentlichen Mitteln bedeutet höhere Steuern und somit niedrigere verfügbare Haushaltseinkommen.
- Außenhandel hat direkten Einfluss auf die Produktion im Inland: So weisen wichtige Gütergruppen in den Szenarien hohe Importanteile auf; insbesondere werden PtX-Kraftstoffe vollständig importiert. Ebenso bleibt die Importquote bei Fahrzeugen über alle Szenarien konstant. Das heißt, es wird davon ausgegangen, dass die Fahrzeugindustrie in Deutschland auch künftig Marktanteile halten kann, die mit jenen von heute vergleichbar sind.

- Die Differenzierung von Nutzerpreisen und Herstellungspreisen insbesondere im Personenverkehr basiert auf verschiedenen Quellen: Neben den Ergebnissen aus der Verkehrsmodellierung wurden weitere Inputdaten aus einer Reihe von Studien und Berichten verwendet (insb. Pkw-Kostenrechnungen ADAC, Studien zur Verkehrsfinanzierung in Deutschland, Geschäftsberichte DB).
- Veränderungen der Konsumnachfrage werden entsprechend der Struktur des Konsums im Basisszenario ins Modell eingespeist, d. h. es wird ein gleichbleibendes Konsummuster zwischen den Szenarien unterstellt.

## Wesentliche Wirkungskanäle

Die Szenarien beeinflussen die volkswirtschaftlichen Outputs insbesondere über drei Wirkungskanäle:

1. Die abnehmende Verkehrsnachfrage der Haushalte erhöht deren Mittel, welche für den Konsum anderer Güter verfügbar sind und sich wiederum direkt auf die Hersteller dieser Güter und indirekt auf deren Zulieferbranchen auswirkt.
2. Die veränderte Energie- und Verkehrsnachfrage wirkt sich direkt auf die herstellenden und die diese Produkte nachfragenden Branchen aus sowie indirekt auf deren Zulieferbranchen.
3. Je nach Szenario verändert sich die Staatsquote (Veränderung des Bedarfs öffentlicher Mittel z. B. durch abnehmende Steuererträge oder durch zusätzliche staatliche Investitionen) und damit indirekt das verfügbare Haushaltseinkommen, das die Budgetrestriktion für die Konsumausgaben der privaten Haushalte darstellt.

### **„Warum die Nutzer die Kosten strombasierter Kraftstoffe tragen sollen ...“**

Inwiefern höhere Kraftstoffkosten von der öffentlichen Hand getragen werden sollen oder direkt von den Verkehrsbenutzern, ist aus ökonomischer Sicht eine interessante Fragestellung. Im Rahmen von Renewbility III wurde dieser Aspekt ebenfalls analysiert. So war in einer ersten Modellierungsrunde die aktuelle Szenarettete Fokus Kraftstoffe etwas anders ausgestaltet: Die Differenz zwischen den aktuellen Energiepreisen und den höheren Preisen der PtX-Kraftstoffe wurde durch den Staat subventioniert, ein Wechsel des Kraftstoffes hatte keine Kostenfolge für die Verkehrsteilnehmer zur Folge.

Aus der Gegenüberstellung dieser beiden Szenarien gehen wichtige Erkenntnisse zur Wirkung der verschiedenen Instrumente hervor:

Mobilitätskosten wie die Kraftstoffpreise fließen in die Entscheidungen der Verkehrsbenutzer mit ein: Subventioniert der Staat die Kraftstoffpreise, hat eine

Preiserhöhung keine direkte Wirkung auf die Verkehrsnachfrage. In der ersten Modellierungsrunde hat sich im entsprechenden Szenario wohl die Zusammensetzung des Energiebedarfes geändert im Vergleich zum Basisszenario, nicht aber die nachgefragte Verkehrsleistung im Personenverkehr. Die Szenarettete Fokus Kraftstoffe verzeichnet dahingegen verminderte Verkehrsleistungen im Personenverkehr und einen Shift vom motorisierten Straßenverkehr zum öffentlichen Verkehr.

Subventionen des Staates wirken sich auf den Staatshaushalt aus: Trägt der Staat die Mehrkosten für teurere Kraftstoffe, muss er die Preise subventionieren. Diese Subventionen erhöhen jedoch die staatlichen Ausgaben, was ceteris paribus zu Ausgabenüberschüssen führt. Im erwähnten Szenario aus der ersten Modellierungsrunde fallen denn auch die staatlichen Ausgaben im Energiebereich um rund 50 Mrd. Euro höher aus als in der Szenarettete Fokus Kraftstoffe.

Ausgabenüberschüsse des Staates werden in Renewbility III per Annahme durch höhere Steuern für private Haushalte finanziert: Im herangezogenen Szenario aus der ersten Modellierungsrunde müssen die Haushalte demnach insgesamt etwa 50 Mrd. Euro mehr Steuern bezahlen, damit die öffentliche Hand die unterstellten Kraftstoffsubventionen finanzieren kann. Diese Mehrausgaben der Haushalte bedeuten bei gleichbleibenden Einkommen Einsparungen bei anderen (Konsum-)Ausgaben. Dieser Effekt trägt stark dazu bei, dass im erwähnten Szenario der ersten Modellierungsrunde volkswirtschaftlich ein deutlich negativeres Ergebnis resultiert als in der Szenarettete Fokus Kraftstoffe.

Tragen Verkehrsbenutzer ihre Kosten selber, reagieren sie direkt auf Preisänderungen, was zu Verhaltensänderungen führt. Wird der Preis für die gewünschte Mobilität teurer, senken sie ihre Nachfrage oder kaufen Produkte, deren Verbrauch geringer ist. Subventioniert der Staat hingegen steigende Kraftstoffpreise, tragen die Verkehrsbenutzer die wahren Kosten nur indirekt und unabhängig von ihrem Verkehrsverhalten über Steuern. Das bedingt für die Haushalte Einsparungen bei anderen Ausgabenposten mit entsprechend negativen volkswirtschaftlichen Effekten. Darüber hinaus wird der Handlungsspielraum der Haushalte eingeschränkt, da ihr frei verfügbares Einkommen sinkt.

### 13.3 ERGEBNISSE BASISZENARIO

Wie bereits erläutert, bildet die Verkehrsprognose 2030 (VP 2030) die Referenzentwicklung für das Jahr 2030, an welchem sich auch die ökonomische Analyse orientiert. Zusätzlich stützt sich die Analyse auf das Aktuelle-Maßnahmen-Szenario 2012 (AMS 2012) der Klimaschutzszenarien 2050 (KSZ 2050) für den Zeithorizont 2050.

Die folgend dargelegten Eckwerte weichen von obigen Quellen ab, da aufgrund der Differenzierung der Verkehrsbranchen einige zusätzliche Berechnungen gemacht werden mussten.

**Tabelle 13-2: Eckwerte Basisszenario**

	2008	2030	2050
<b>Wertschöpfung (Mrd. EUR)</b>	2.217	2.876	3.136
<b>Beschäftigung (1.000 Beschäftigte)</b>	40.350	39.850	35.430

Quelle: Renewbility III

Unter Verwendung dieser Eckwerte resultieren für Wertschöpfung und Beschäftigung bis 2030/2050 im Basisszenario unterschiedliche Entwicklungen: Während die Wertschöpfung weiter zulegt (+30 % bis 2030 resp. +41 % bis 2050), nimmt die Beschäftigung als Folge des demografischen Wandels um 12 % bis 2050 ab. Der Anteil aller Verkehrsbranchen an der gesamten Bruttowertschöpfung liegt aktuell bei 4,5 % und sinkt bis 2050 auf 3,6 %. Nicht enthalten in diesen Anteilen ist der motorisierte Individualverkehr, dessen Transportleistung von Individuen erbracht werden (Selbstfahrer). Die mit den dazu notwendigen Vorleistungen zusammenhängende Wertschöpfung fällt in anderen Branchen an, insbesondere im Handel (Kraftfahrzeuge, Reparaturen, Betankung), in der Fahrzeugherstellung und im Versicherungsbereich. Diese Effekte wurden bei der Wirkungsanalyse der Szenarien mit einbezogen.

Tabelle 13-3: Wertschöpfungsanteile der Branchen 2008 und 2050 (Basisszenario)

Branchen	2008	2050
Immobilien, Forschung, Freiberufe	19.6 %	21.7 %
Einzel- /Großhandel	11.0 %	10.0 %
Öffentliche Dienstleistungen	9.7 %	9.5 %
Medien, Telekom, IT, Finanzen/Vers.	7.8 %	8.1 %
Gesundheit & Soziales	6.8 %	7.8 %
Maschinen, EDV, Optik & Elektronik	6.0 %	6.1 %
Div. private Dienstleistungen	5.3 %	4.4 %
Kultur, Sport, restl. Dienstleistungen	4.5 %	4.6 %
Metall	3.2 %	2.7 %
Chemie, Pharma & Kunststoff	2.9 %	2.7 %
Kraftfahrzeuge	2.7 %	3.3 %
Personenbeförderungsleistungen	0.7 %	0.4 %
Güterbeförderungsleistungen Straße	1.1 %	0.9 %
Luftfahrtleistungen	0.4 %	0.5 %
Restliche Verkehrsleistungen	2.3 %	1.8 %
Restliche Branchen	16.0 %	15.5 %

Quelle: Renewbility III

## 13.4 KERNERGEBNISSE DER KLIMASCHUTZSZENARIEN IM ÜBERBLICK

Als Kernergebnisse stehen die Erkenntnisse aus der ökonomischen Analyse der beiden Szenarien Effizienz und Effizienz plus im Zentrum. Hierzu folgen in diesem Kapitel eingangs die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst. Die Annahmen je Szenario werden an dieser Stelle nur mehr knapp dargelegt. Für die detaillierte Beschreibung sei auf Kapitel 2.2 und 2.3 verwiesen. Die Kapitel 13.5 und 13.6 beleuchten danach die Erkenntnisse aus den Analysen für jedes Szenario im Detail.

Das Szenario Effizienz verknüpft die Dekarbonisierung der Kraftstoffe mit maximaler Fahrzeugeffizienz (technologischer Ansatz). Zentral für die ökonomischen Modellierungen sind die unterlegten Emissionsgrenzwerte für Pkw im Personenverkehr und die Nutzung von Oberleitungs-Lkws im Güterverkehr, welche zu starken Verlagerungen bei den Verkehrsträgern führen. Zudem haben die steigenden Kraftstoffkosten (PtX) nicht nur einen Einfluss auf die Wahl des Verkehrsträgers der Haushalte und Unternehmen, sie verändern auch die relativen Preise, was sich wiederum auf die Nachfrage der Nutzer auswirkt. Die

Umschichtungen bei der Energienachfrage führen nur in der kurzen Frist (bis 2030) zu verminderten Steuereinnahmen der öffentlichen Hand; bis 2050 kompensieren sich Mindereinnahmen bei herkömmlichen und zusätzliche Erträge bei neuen Energieformen. Die nutzerfinanzierten Kraftstoffpreiserhöhungen lassen die Verkehrsnachfrage sinken (vgl. obigen Kasten „Warum die Nutzer die Kosten strombasierter Kraftstoffe tragen sollen ...“), was die Steuererträge etwas reduziert und zu einem leicht höheren Finanzbedarf der öffentlichen Hand führt.

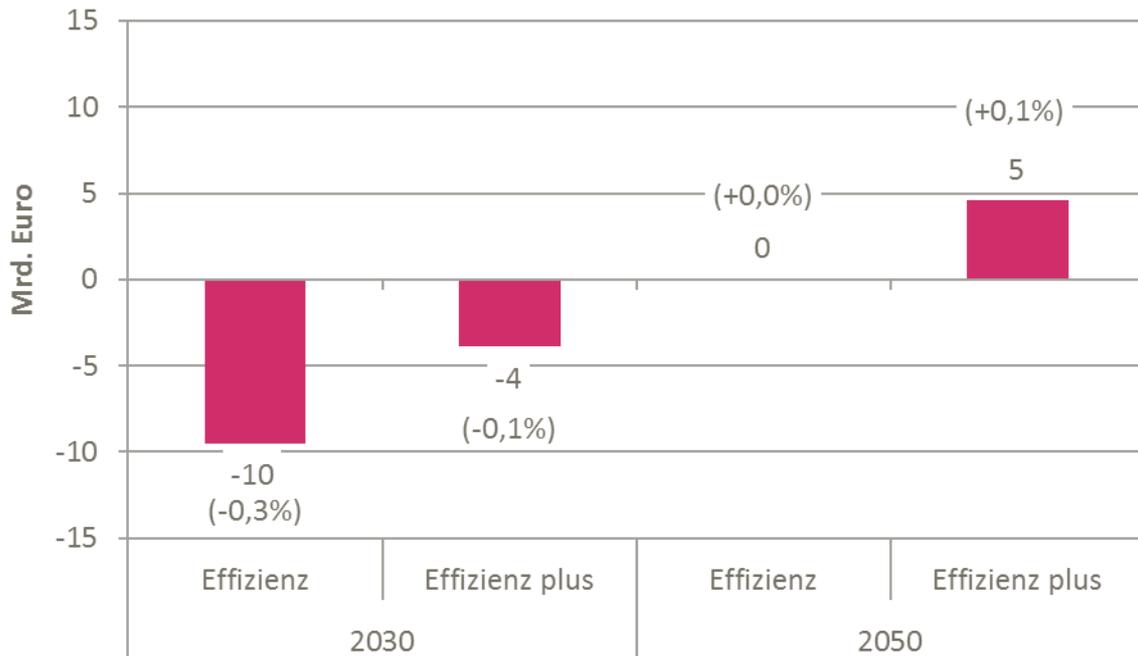
Im Szenario Effizienz plus sind darüber hinaus eine Reihe weiterer Maßnahmen unterstellt, welche die Innenstädte attraktiver gestalten sollen und gleichzeitig den öffentlichen Verkehr zusätzlich fördern (vgl. Kapitel 2.3.1). Dadurch mindert sich die relative Attraktivität des Straßenverkehrs, was dessen Nachfrage stark dämpft.

Aus ökonomischer Sicht führen die Maßnahmen im Szenario Effizienz zu einer stark erhöhten Nachfrage nach Strom, sowohl im Personen- als auch im Güterverkehr, weil die unterstellten CO<sub>2</sub>-Emissionsgrenzwerte für Pkw den Anteil elektrischer Fahrzeuge erhöhen. Die Haushalte geben zudem weniger für Mobilität aus und können somit höhere Konsumausgaben außerhalb des Verkehrs tätigen: Beim Staat führen die in der Summe verminderten Einnahmen aus dem Verkehrsbereich zwar zu einem Ausgabenüberschuss, welcher über erhöhte Steuern für die Haushalte gedeckt werden muss. Gleichzeitig entlastet die sinkende Nachfrage im Straßenverkehr jedoch die diesbezüglichen Ausgaben der Haushalte in größerem Umfang.

Im Szenario Effizienz plus reduzieren die unterstellten Maßnahmen die Wirtschaftsleistung in Pkw-nahen Branchen stark. Dieser negative Effekt ist bei diesen Branchen 2050 gut 50 % höher als im Szenario Effizienz. Er wird jedoch stark überkompensiert durch freiwerdende Budgets der privaten Haushalte aufgrund der stark sinkenden Nachfrage nach Personenstraßenverkehr.

Es ist wichtig, die Ergebnisse entlang der Zeitachse zu betrachten: Während 2030 in beiden Szenarien noch eine negative Wirkung auf die gesamte Wertschöpfung festzustellen ist, ändert sich dies bis ins Jahr 2050, indem in etwa eine neutrale Wirkung auf die Wertschöpfung zu erwarten ist. Die Wertschöpfungseffekte fallen mit längerer Wirkungsphase der Maßnahmen günstiger aus. Bis 2030 ist mit Wertschöpfungseinbußen von zehn (Szenario Effizienz) resp. vier (Szenario Effizienz plus) Milliarden Euro zu rechnen. 2050 sind keine Einbußen mehr nachweisbar resp. es resultiert im Szenario Effizienz plus gar ein leichter Wertschöpfungszuwachs von fünf Milliarden Euro gegenüber dem Basisszenario.

Abbildung 13-1: Veränderung der Wertschöpfung gegenüber dem Basisszenario

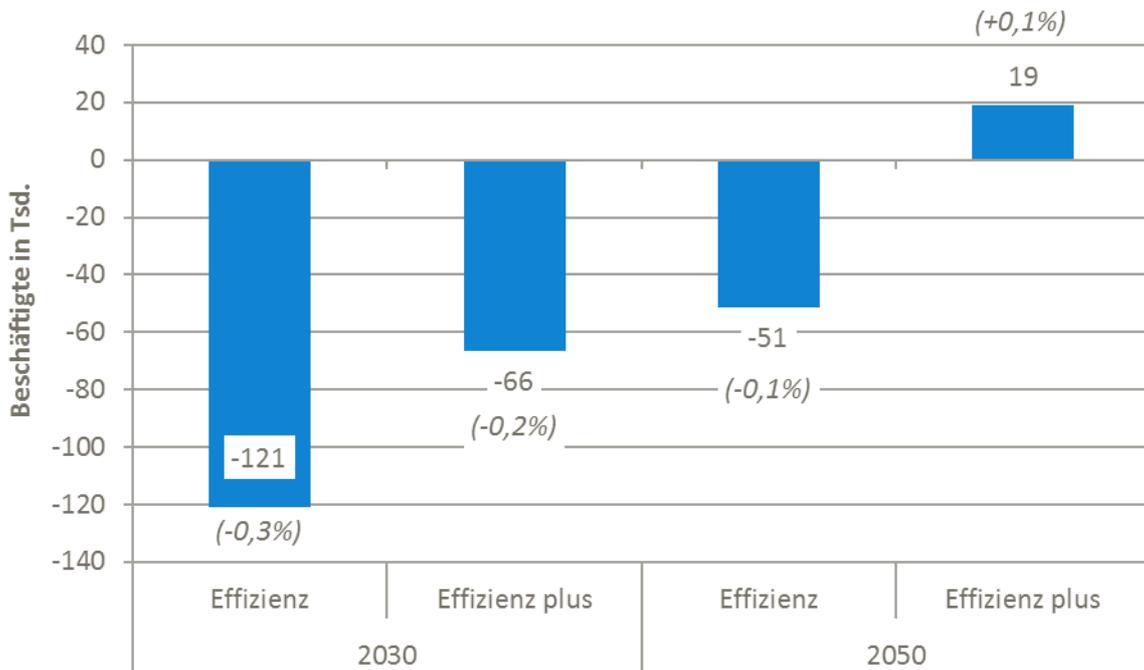


Werte in Klammern geben die relative Veränderung gegenüber dem Basisszenario an.  
Quelle: Renewbility III

Im Szenario Effizienz verbessert sich zwar die Beschäftigungswirkung von 2030 bis 2050 aufgrund eines Anstiegs in eher beschäftigungsintensiven Branchen. Der Gesamteffekt bleibt hingegen auch 2050 negativ (-51.000 Beschäftigte). Besser schneidet das Szenario Effizienz plus ab, für welches im Jahr 2050 sowohl bei Wertschöpfung als auch bei der Beschäftigung mit positiven Effekten zu rechnen ist. Beide Szenarien weisen für 2030 noch keine positive volkswirtschaftliche Bilanz auf: Die unterstellten Maßnahmen können bis dahin noch nicht genügend greifen resp. entfalten ihre Wirkung erst später.

Die resultierenden wirtschaftlichen Effekte sind demnach in der mittleren Frist bis 2030 leicht negativ, verbessern sich bis 2050 in beiden Szenarien, wobei die Wertschöpfung im Szenario Effizienz plus ganz leicht positiv sein dürfte: Hier wirkt die sinkende Verkehrsnachfrage der Haushalte sehr stark, so dass den Haushalten freiwerdende Mittel für Konsum in anderen Branchen zur Verfügung stehen. In Bezug auf die Gesamtwirtschaft sind die Effekte insgesamt sehr gering. Die Analysen zeigen, dass die Dekarbonisierung des Verkehrs in beiden Szenarien keinen Schock für die Gesamtwirtschaft in Deutschland darstellt.

Abbildung 13-2: Veränderung der Beschäftigung gegenüber dem Basisszenario



Werte in Klammern geben die relative Veränderung gegenüber dem Basisszenario an.  
Quelle: Renewbility III

## 13.5 SZENARIO EFFIZIENZ

Haupttreiber der ökonomischen Effekte bilden in diesem Szenario die unterlegten Emissionsgrenzwerte für Pkws. Dadurch werden die Fahrzeuge in zunehmendem Maße effizienter gebaut, was unter den gesetzten Annahmen zu einem starken Wechsel in Richtung Elektromobilität führt. Dies beeinflusst die Struktur der Energienachfrage markant, konventionelle Energieträger wie Diesel und Benzin werden bis 2050 nicht mehr nachgefragt, hingegen steigt die Nachfrage nach strombasierten Energieträgern (PtX) und Elektrizität stark. Letzterer Effekt wird zudem getrieben durch die Verfügbarkeit von Oberleitungs-Lkw im Güterverkehr. Die ökonomischen Wirkungen dieser Veränderungen sind je nach Branche unterschiedlich: Während die inländische Mineralölverarbeitung starke Einbußen verzeichnet, steigert sich die Wertschöpfung im Stromsektor aufgrund des beschriebenen Nachfrageschubs – dies unter der getroffenen Annahme, dass Deutschland die heutige Quote an inländisch produziertem Strom bis ins Jahr 2050 halten kann. Für die PtX-Kraftstoffe wird eine 100 %ige Importquote unterstellt. Da deren Nachfrage sowohl 2030 als auch 2050 höher ausfällt als im Basisszenario, erhöhen sich die Importe im Szenario Effizienz stark.

Ein weiterer Einflussfaktor im Szenario Effizienz sind die sich unter dem gegebenen Setting ändernden relativen Energiepreise. Je nach Verkehrsträger resultieren dadurch

Veränderungen in der Nachfrage mit den entsprechenden wirtschaftlichen Auswirkungen: So findet eine leichte Verlagerung statt zum öffentlichen Fernverkehr und zum ÖPNV. Hingegen muss der Luftverkehr mit starken Rückgängen bei der Verkehrsnachfrage und damit auch bei der Wertschöpfung rechnen. Ebenso nimmt die Verkehrsleistung im Personenstraßenverkehr ab, mit entsprechend negativen Folgen für die Fahrzeugherstellung, den Fahrzeugverkauf oder das Versicherungsgeschäft.

Diesen negativen Wertschöpfungswirkungen stehen Bau- und Anlageninvestitionen gegenüber, welche notwendig sind, um die Tankinfrastruktur auf die veränderten Energieträger anzupassen sowie für die Oberleitungsinfrastruktur für den Straßengüterverkehr. Diese nutzerfinanzierten Mehrinvestitionen stärken die inländische Wertschöpfung.

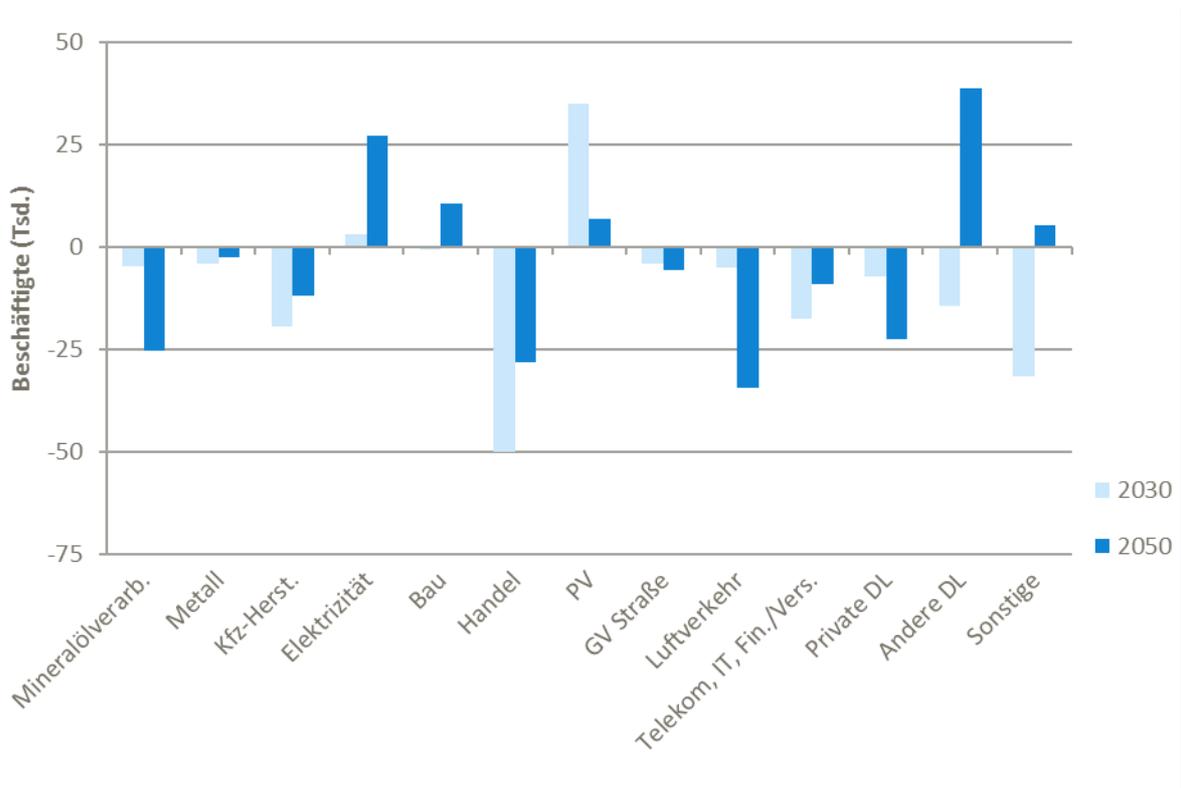
Diese Mehrinvestitionen sind in den Energiekosten enthalten, werden von den Benutzern getragen und belasten den öffentlichen Haushalt nicht zusätzlich. Allerdings führen die Umschichtungen bei den Energieträgern bis 2030 zu namhaften Steuerausfällen bei der öffentlichen Hand, welche sich erst 2050 in etwa ausgleichen. Zu diesem Zeitpunkt fallen hingegen die zusätzlichen Ausgaben für den öffentlichen Verkehr mehr ins Gewicht, weshalb der Staat auch 2050 im Vergleich zum Basisszenario höhere Ausgaben zu tragen hat. Dieser zusätzliche Finanzierungsbedarf wird per Annahme über höhere Steuern bei den privaten Haushalten finanziert. Für letztere resultiert 2050 insgesamt jedoch eine Zunahme des verfügbaren Einkommens (nach Steuern) durch die Maßnahmen des Szenarios Effizienz: Die Minderausgaben aufgrund der gesunkenen Nachfrage im Straßenverkehr sind höher als die zusätzlich zu tragenden Steuern. Insgesamt gesehen wird demnach der Konsum der Haushalte gestützt.

Die Klimaziele können in diesem Szenario unter den unterstellten Rahmenbedingungen und Maßnahmen in der Summe praktisch ohne längerfristige Einbußen bei der Wertschöpfung erreicht werden, die Beschäftigung sinkt dabei leicht.

#### 13.5.1 BESCHÄFTIGUNGSWIRKUNG NACH BRANCHEN

Die beschriebenen Wertschöpfungseffekte wirken sich auch auf die Beschäftigung in den einzelnen Branchen aus. Insgesamt resultiert eine negative Beschäftigungswirkung im Szenario Effizienz von 121.000 Beschäftigten im Jahr 2030. Bis 2050 mindert sich dieser Effekt auf ein Minus von 51.000 Beschäftigten. Die folgende Abbildung zeigt die entsprechenden Beschäftigungswirkungen im Detail nach Branchen.

Abbildung 13-3: Szenario Effizienz – Veränderung der Beschäftigung nach Branchen



Quelle: Renewbilty III

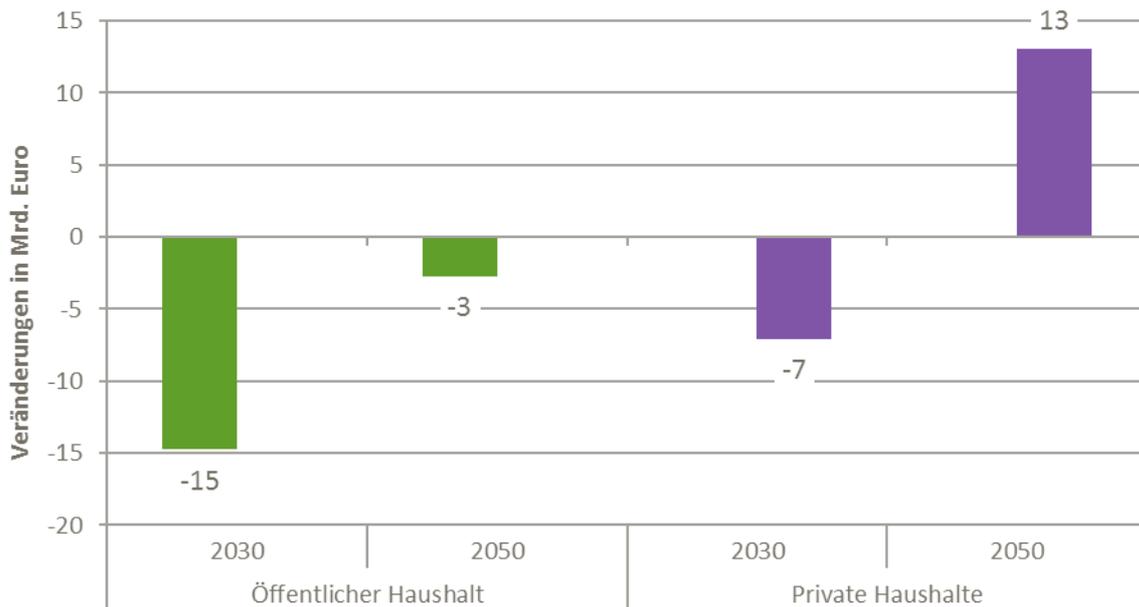
Am meisten Beschäftigte verlieren bis 2050 die Branchen des Luftverkehrs, des Handels (insb. Fahrzeugverkauf und -reparatur) und der Mineralölverarbeitung. Diese absoluten Effekte sind in Bezug auf die gesamte zu erwartende Beschäftigung meist von untergeordneter Bedeutung. Ausnahmen hierbei sind die Mineralölverarbeitung, welche in der heutigen Form 2050 nicht mehr existiert und praktisch keine Beschäftigten mehr aufweist. Die angeführten Beschäftigungsverluste in der Luftfahrt sind mit rund einem Viertel ebenfalls beträchtlich. Auf der Zuwachseite profitiert bis 2050 die Strombranche mit einem Wachstum der Beschäftigten von über einem Viertel.

### 13.5.2 WIRKUNG AUF STAATSHAUSHALT UND VERFÜGBARE EINKOMMEN

Die Veränderungen in der Verkehrsnachfrage wirken sich auf den öffentlichen Haushalt aus: Mehr öffentlicher Verkehr erfordert bei gleichbleibendem Kostendeckungsgrad zusätzliche staatliche Mittel; Umschichtungen in der Verkehrsnachfrage verändern den Treibstoffmix und damit das Steuersubstrat der öffentlichen Hand. Resultiert daraus ein Ausgabenüberschuss durch Ertragsminderungen oder Ausgabenwachstum, wird dieses Defizit per Annahme durch eine entsprechende Steuererhöhung bei den privaten Haushalten finanziert. Das drückt deren real verfügbares Einkommen. Hinzu kommen für die

Haushalte weitere Ausgabenveränderungen: Bei den analysierten Szenarien spielen insbesondere die verminderten Ausgaben für den Straßenverkehr eine zentrale Rolle, welche das real verfügbare Einkommen der Haushalte erhöhen. In der folgenden Abbildung sind diese Effekte für den öffentlichen und für die privaten Haushalte summarisch dargestellt.

**Abbildung 13-4: Szenario Effizienz – Veränderungen bei den Haushalten**



Quelle: Renewbility III

Im Szenario Effizienz resultiert 2030 ein Ausgabenüberschuss der öffentlichen Hand von fast 15 Mrd. Euro, hauptsächlich bedingt durch das veränderte Steuersubstrat beim Endenergiebedarf im Verkehr. Etwa ein Viertel ist auf wegfallende Steuereinnahmen aus dem Straßenverkehr resp. auf zusätzliche Ausgaben im öffentlichen Verkehr zurückzuführen. Bis ins Jahr 2050 reduziert sich der Ausgabenüberschuss auf noch 3 Mrd. Euro. Gründe hierfür sind insbesondere höhere Steuereinnahmen bei der Elektrizität.

Wie obige Abbildung zeigt, sinken 2030 die Konsumausgaben der Haushalte um rund 7 Mrd. Euro, obwohl die Haushalte gleichzeitig Staatsausgaben in der Höhe von 15 Mrd. Euro zusätzlich finanzieren müssen. Die Differenz von 8 Mrd. Euro entspricht dem Brutto-Einkommenseffekt, also jenen Mitteln, welche den Haushalten aufgrund der reduzierten Ausgaben im Straßenverkehr in diesem Szenario zusätzlich zur Verfügung stehen. Im Jahr 2050 übertrifft der Brutto-Einkommenseffekt den Ausgabenüberschuss des Staates: Insgesamt steigen die verfügbaren Einkommen der privaten Haushalte um 13 Mrd. Euro

(Netto-Einkommenseffekt nach Steuern), welche in Form von Konsumausgaben zusätzlich in die Wirtschaft fließen.

### 13.5.3 SZENARETTE FOKUS KRAFTSTOFFE

Eine Untervariante des Szenarios Effizienz beleuchtet die Wirkungen auf die Volkswirtschaft, wenn in Abweichung zum Szenario Effizienz keine politischen Emissionsgrenzwerte eingeführt und keine Voraussetzungen für den Einsatz von Oberleitungs-Lkw geschaffen werden. In diesem Fall basiert die Dekarbonisierung ausschließlich auf strombasierten, importierten Kraftstoffen.

Die Analysen zeigen, dass dadurch mit deutlich negativeren Folgen für die Volkswirtschaft zu rechnen ist – sowohl in Bezug auf die Wertschöpfung als auch auf die Beschäftigung. Die Dekarbonisierung ist weiter machbar, allerdings nur mit erheblicheren wirtschaftlichen Einbußen – im Vergleich zum Basisszenario aber auch im Vergleich zum Szenario Effizienz. Im Gegensatz zu diesem verstärken sich in der betrachteten Szenarette die negativen ökonomischen Wirkungen über die Zeit. Die volkswirtschaftlichen Einbußen sind 2050 deutlich grösser als 2030.

Hauptunterschied zum Szenario Effizienz ist die veränderte Energienachfrage: Durch den geringeren Anteil an Elektromobilität in der Szenarette ist die Nachfrage nach Strom geringer. Die Nachfrage nach dieser größtenteils im Inland produzierten Energieform wird substituiert durch die Nachfrage nach PtX-Treibstoffen, welche vollumfänglich importiert werden.

Dadurch erhöht sich der Importanteil des Energiebedarfs in der Szenarette mit entsprechend negativen Auswirkungen für die inländische Volkswirtschaft. Die Nachfrage nach mineralölbasierten Kraftstoffen und deren inländischer Verarbeitung sinkt, die Produktion inländischer erneuerbarer Energien (insb. Strom) vermag jedoch diese Verluste nicht zu kompensieren, da neu vor allem PtX-Treibstoffe eingesetzt werden.

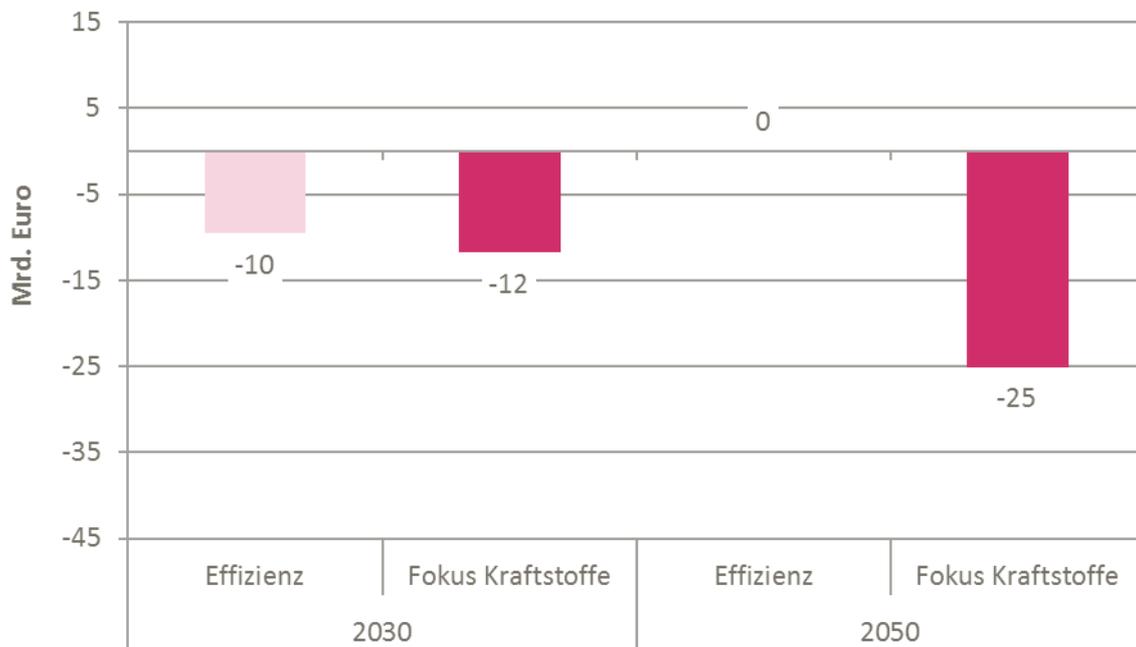
Der MIV nimmt in vergleichbarem Maße ab wie im Szenario Effizienz. Hier sind denn auch die ökonomischen Auswirkungen auf die Branchen ähnlich, mit Einbußen in der Mineralölverarbeitung, in den dem MIV nahestehenden Branchen (Fahrzeugherstellung, und -verkauf, Dienstleistungen wie Versicherungen) und im Luftverkehr. Positive Effekte verzeichnen die Branchen des öffentlichen Verkehrs wie auch die Energiebranchen – letztere allerdings in weit geringerem Ausmaß als im Szenario Effizienz.

Die Energiesteuern werden in der Szenarette Fokus Kraftstoffe nicht zusätzlich erhöht. Das Aufkommen aus Kraftstoff- und Energiesteuern und die Einnahmen der öffentlichen Hand

sind damit im Vergleich zum Szenario Effizienz im Jahr 2050 deutlich geringer. Da der Bruttoeinkommenseffekt der Haushalte in der Szenarettete Fokus Kraftstoffe geringer ist als im Szenario Effizienz vermag dieser die zusätzlichen Ausgaben für Steuern der Haushalte nicht vollständig zu kompensieren. Im Vergleich sinkt das verfügbare Einkommen der Haushalte.

Wie die folgende Abbildung zeigt, verfügt die Szenarettete Fokus Kraftstoffe in der langen Frist eine negative Tendenz, die Wertschöpfungsverluste nehmen zu – im Gegensatz zum Szenario Effizienz. Im Jahr 2050 ergibt sich eine Verminderung der Wertschöpfung (BIP) um 25 Milliarden Euro, die Zahl der Beschäftigten fällt um rund 180.000 geringer aus als im Basisszenario.

**Abbildung 13-5: Veränderung der Wertschöpfung gegenüber dem Basisszenario**



Quelle: Renewbility III

## 13.6 SZENARIO EFFIZIENZ PLUS

Das Szenario Effizienz plus unterscheidet sich gegenüber dem Szenario Effizienz durch weitere Maßnahmen zur Förderung der Lebensqualität in den Innenstädten, zur Förderung des öffentlichen Verkehrs sowie zur Stärkung des Schienengüterverkehrs. Grundsätzlich wirken damit einerseits die gleichen Effekte wie im Szenario Effizienz. Andererseits entfalten die zusätzlichen Maßnahmen weitergehende Wirkungen.

Verglichen mit dem Szenario Effizienz sinkt die Nachfrage nach motorisiertem Individualverkehr nun stärker gegenüber dem Basisszenario. So gewinnt der öffentliche Fernverkehr durch Reisezeitverkürzungen zusätzlich an Attraktivität gegenüber dem Straßenpersonenverkehr und entsprechend an Nachfrage. Ebenso erleidet die Straße auf kurzen Distanzen einen Nachfragerückgang, der ÖPNV hingegen starke Zuwächse.

Die stark verringerte Nachfrage nach MIV wirkt sich auch auf die Fahrzeugflotte aus – deren Nutzung darüber hinaus mittels Carsharing-Angeboten optimiert wird. Diese Effekte führen zu deutlichen Rückgängen der Nachfrage nach Fahrzeugen, Kraftstoffen, Reparatur- und Versicherungsleistungen – mit gegenüber dem Basisszenario sinkender Wertschöpfung in den entsprechenden Branchen.

Diese negativen Nachfragewirkungen sind größer als im Szenario Effizienz. Sie wären aber noch höher, wenn nicht auch Branchen mit Wertschöpfungszuwächsen zu verzeichnen wären: Es sind dies wie erwähnt der öffentliche Fernverkehr und der ÖPNV. Zudem resultieren durch die Förderung von Carsharing-Angeboten positive Beschäftigungs- und Wertschöpfungseffekte. Weitere positive Impulse lösen die Infrastrukturinvestitionen im Schienengüterverkehr aus. Gegenüber dem Basisszenario sind weiter positive Impulse in der Strombranche zu verzeichnen. Im Vergleich mit dem Szenario Effizienz sind diese Effekte aber etwas geringer, da das Szenario Energie plus insgesamt einen niedrigeren Energiebedarf ausweist.

Der öffentliche Haushalt verzeichnet verminderte Steuereinnahmen aufgrund der neu zusammengesetzten Energienachfrage und zwar in vergleichbarem Umfang wie im Szenario Effizienz. Hinzu kommen Rückgänge bei verkehrsrelevanten Steuern im Straßenverkehr sowie ein Ausgabenwachstum im öffentlichen Verkehr.

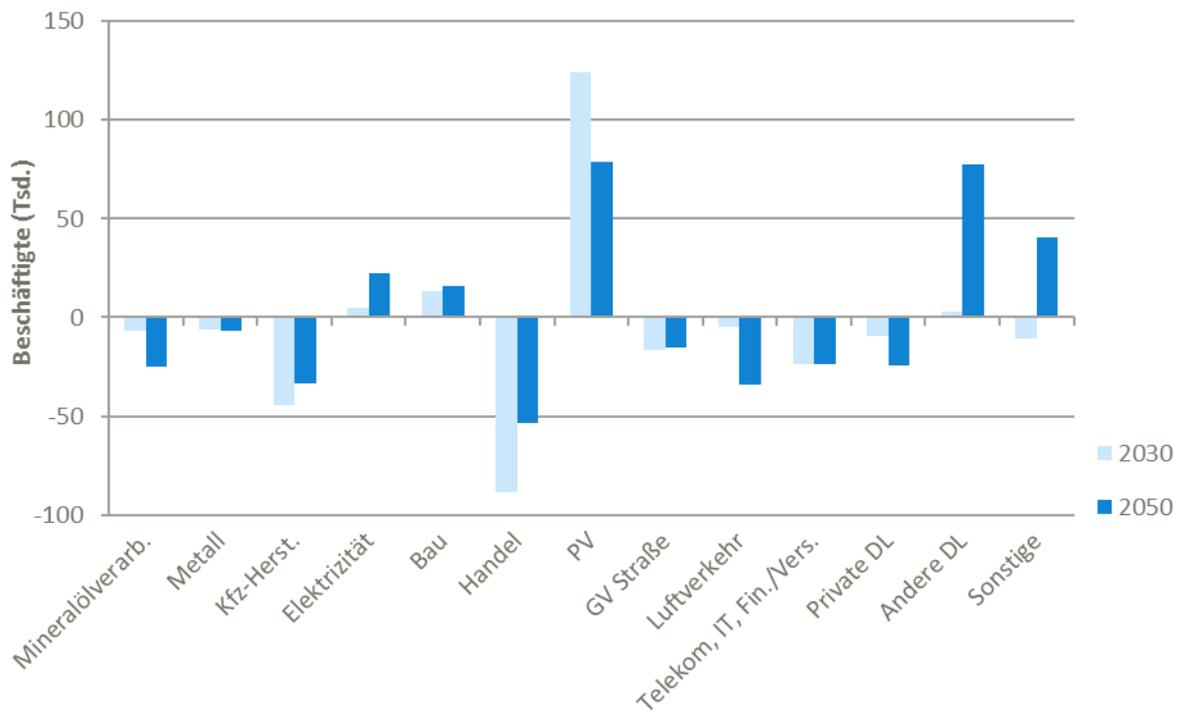
Da die Haushalte aber dadurch einen massiv geringeren Anteil ihres frei verfügbaren Einkommens für eigene Fahrzeuge und Mobilität insgesamt ausgeben, bleibt ihnen mehr Geld für andere Ausgaben als im Szenario Effizienz – trotz Mehrausgaben für die Finanzierung des Defizits der öffentlichen Hand. Netto überwiegt demnach der positive Effekt, was zu einem günstigeren Ergebnis als im Szenario Effizienz führt. Das liegt daran, dass die in Deutschland anfallende Wertschöpfung aus den Verkehrsaktivitäten etwa aufgrund der Treibstoffimporte vergleichsweise geringer ausfällt als im Durchschnitt der Volkswirtschaft. Per Annahme geben die Haushalte freiwerdendes Einkommen analog zum durchschnittlichen Konsumbündel aus. Dieses Umschichten von Verkehrsausgaben hin zu anderen Konsumausgaben führt letztlich zu positiven Wertschöpfungseffekten in einer Netto-Betrachtung. Die Ausgaben für Mobilität sinken, der öffentliche Verkehr ist günstiger

als der MIV – auch wenn ein Teil des Mehreinkommens wegen zusätzlicher Staatsausgaben für die Mitfinanzierung des wachsenden öffentlichen Verkehrs durch den Staat wieder wegfällt. Diese Einsparungen bei den Mobilitätsausgaben führen in zahlreichen Branchen zu zusätzlicher Nachfrage, welche auch neue, negative Auswirkungen auf die Umwelt haben kann.

### 13.6.1 BESCHÄFTIGUNGSWIRKUNG NACH BRANCHEN

Die beschriebenen Wertschöpfungseffekte haben auch Effekte hinsichtlich der Beschäftigung in den einzelnen Branchen. Insgesamt resultiert eine negative Beschäftigungswirkung im Szenario Effizienz plus von 66.000 Beschäftigten im Jahr 2030. Bis 2050 kehrt sich dieser Effekt ins Positive: Im Vergleich zum Basisszenario ist mit einer Beschäftigungszunahme von etwa 19.000 Beschäftigten zu rechnen. Die folgende Abbildung zeigt die entsprechenden Beschäftigungswirkungen im Detail nach Branchen.

**Abbildung 13-6: Szenario Effizienz plus – Veränderung der Beschäftigung nach Branchen**



Quelle: Renewability III

Der größte Beschäftigungszuwachs ist bei den Personenbeförderungsleistungen (PV) zu verzeichnen, was auf den wachsenden öffentlichen Verkehr zurückzuführen ist. Ebenso sind starke Effekte in beschäftigungsintensiven Dienstleistungsbranchen zu verzeichnen. Am

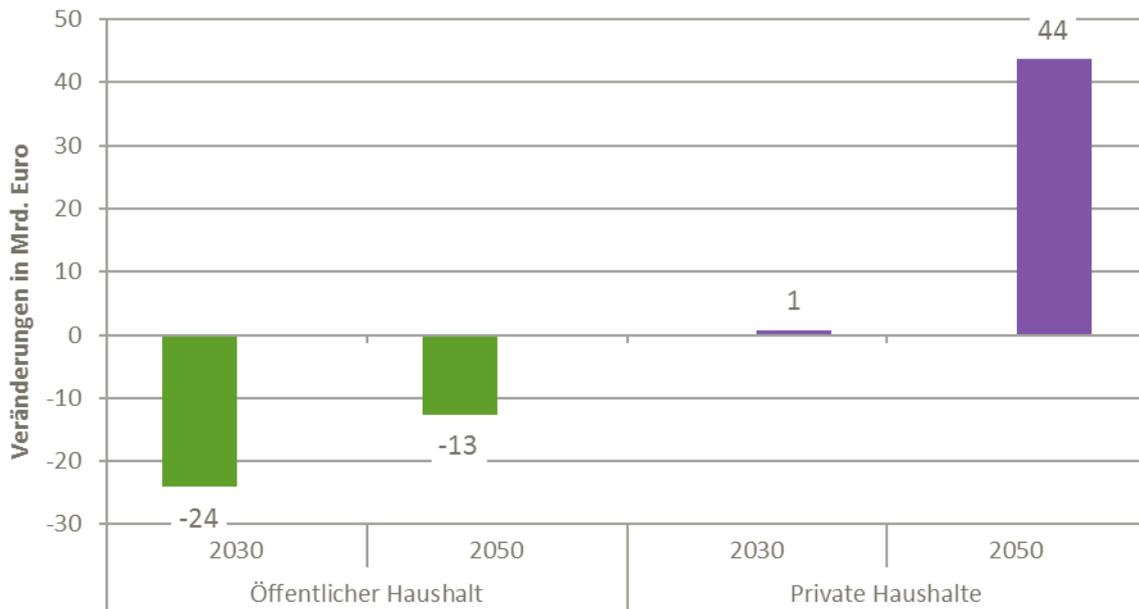
meisten Beschäftigte verliert im Vergleich zum Basisszenario bis 2050 der Handel (u. a. Fahrzeugverkauf und -reparaturen), gefolgt vom Luftverkehr und der Fahrzeugherstellung.

Wiederum gilt, dass diese absoluten Effekte in Bezug auf die gesamte zu erwartende Beschäftigung von untergeordneter Bedeutung sind. Ausnahme hierbei ist die Mineralölverarbeitung, welche in der heutigen Form 2050 nicht mehr existiert und praktisch keine Beschäftigten mehr ausweist. Die angeführten Beschäftigungsverluste in der Luftfahrt sind mit rund einem Viertel ebenfalls beträchtlich. Diese beiden Effekte sind praktisch deckungsgleich mit dem Szenario Effizienz.

## 13.6.2 WIRKUNG AUF STAATSHAUSHALT UND VERFÜGBARE EINKOMMEN

Die Veränderungen in der Verkehrsnachfrage hat ebenso wie im Szenario Effizienz Auswirkungen auf den öffentlichen Haushalt und die frei verfügbaren Einkommen der privaten Haushalte (vgl. Kapitel 13.5.2). Auch an dieser Stelle soll noch einmal erwähnt sein, dass ein größerer Ausgabenüberschuss im öffentlichen Haushalt über höhere Steuern für die privaten Haushalte ausgeglichen wird. Das mindert deren frei verfügbares Einkommen. In der folgenden Abbildung sind diese Effekte für den öffentlichen und für die privaten Haushalte summarisch für das Szenario Effizienz plus dargestellt.

Abbildung 13-7: Szenario Effizienz plus – Veränderungen bei den Haushalten



Quelle: Renewbility III

Im Szenario Effizienz plus resultiert 2030 ein Ausgabenüberschuss der öffentlichen Hand von 24 Mrd. Euro, hauptsächlich bedingt durch das veränderte Steuersubstrat beim Endenergiebedarf im Verkehr. Je etwa ein Fünftel ist auf wegfallende Steuereinnahmen aus dem Straßenverkehr resp. auf zusätzliche Ausgaben im öffentlichen Verkehr zurückzuführen. Diese beiden Posten sind deutlich ausgeprägter als im Szenario Effizienz, weshalb der Ausgabenüberschuss höher ist. Bis ins Jahr 2050 reduziert sich der Ausgabenüberschuss auf 13 Mrd. Euro. Gründe hierfür sind insbesondere höhere Steuereinnahmen bei der Elektrizität, analog zum Szenario Effizienz.

Der Brutto-Einkommenseffekt entspricht jenen Mitteln, welche den privaten Haushalten zusätzlich zur Verfügung stehen – z. B. aufgrund der reduzierten Ausgaben im Straßenverkehr in diesem Szenario. Dieser Effekt ist im Szenario Effizienz plus deutlich ausgeprägter als im Szenario Effizienz: Der Brutto-Einkommenseffekt kompensiert die zusätzlichen Steuerausgaben der Haushalte 2030 vollständig. Dadurch resultiert kein negativer Konsumimpuls über diesen Kanal. 2050 übertrifft der Brutto-Einkommenseffekt den Ausgabenüberschuss des Staates sehr stark, was dazu führt, dass ein deutlich positiver Impuls durch den Konsum dieser Mittel entsteht. Die verfügbaren Einkommen der privaten Haushalte nehmen um rund 44 Mrd. Euro zu (Netto-Einkommenseffekt nach Steuern) und sind wesentlicher Grund für die positive gesamtwirtschaftliche Wirkung des Szenarios Effizienz plus.

### 13.6.3 SZENARETTE PKW-MAUT

Das Szenario Effizienz plus fokussiert auf Maßnahmen in Innenstädten. Der größte Teil der Verkehrsleistung fällt allerdings außerhalb dieser Kernstädte an. Eine Verlagerung dieser Verkehrsströme auf energieeffizientere Verkehrsmittel wird deshalb in der Szenarette Pkw-Maut betrachtet: Als mögliches Instrument für dieses Ziel steht dabei die Einführung einer fahrleistungsabhängigen Pkw-Maut in der Höhe von vier Cent pro Kilometer auf allen Straßen im Fokus. Die Höhe von vier Cent entspricht etwa den durchschnittlichen Kosten für Bau und Erhalt der Infrastruktur, welche den Pkw zuzurechnen sind. Die Maut-Einnahmen werden vollständig an die Haushalte zurückverteilt, die Pkw-Maut stellt also eine reine Lenkungssteuer dar, welche die Staatsquote, abgesehen von Umsetzungskosten, nicht verändert.

Die Einführung einer Pkw-Maut hat starke Wirkungen auf die Nutzer, da sie in ihrer Verkehrsmittelwahl unmittelbar mit höheren Kosten im Straßenverkehr konfrontiert sind (vgl. obigen Kasten „Warum die Nutzer die Kosten strombasierter Kraftstoffe tragen sollen ...“). Dies führt sowohl in Bezug auf die Wertschöpfung als auch auf die Beschäftigung zu praktisch keinen negativen Effekten – weder 2030 noch 2050.

Haupteinflusskanal ist dabei der starke Rückgang der Verkehrsnachfrage und die vermehrte Verlagerung auf den öffentlichen Verkehr. Die Szenarette Pkw-Maut verzeichnet einerseits unter allen untersuchten Szenarien und Szenaretten die geringste Verkehrsleistung im Personenverkehr. Andererseits sinkt der motorisierte Individualverkehr deutlich stärker als im Szenario Effizienz plus, der öffentliche Verkehr legt noch stärker zu. Aus ökonomischer Perspektive werden durch eine Pkw-Maut die Effekte gegenüber dem Szenario Effizienz plus noch einmal verstärkt: Da die Verkehrsteilnehmer die Kosten direkt tragen, reduziert sich die Nachfrage im MIV deutlich – und der öffentliche Verkehr wird im relativen Preisvergleich attraktiver.

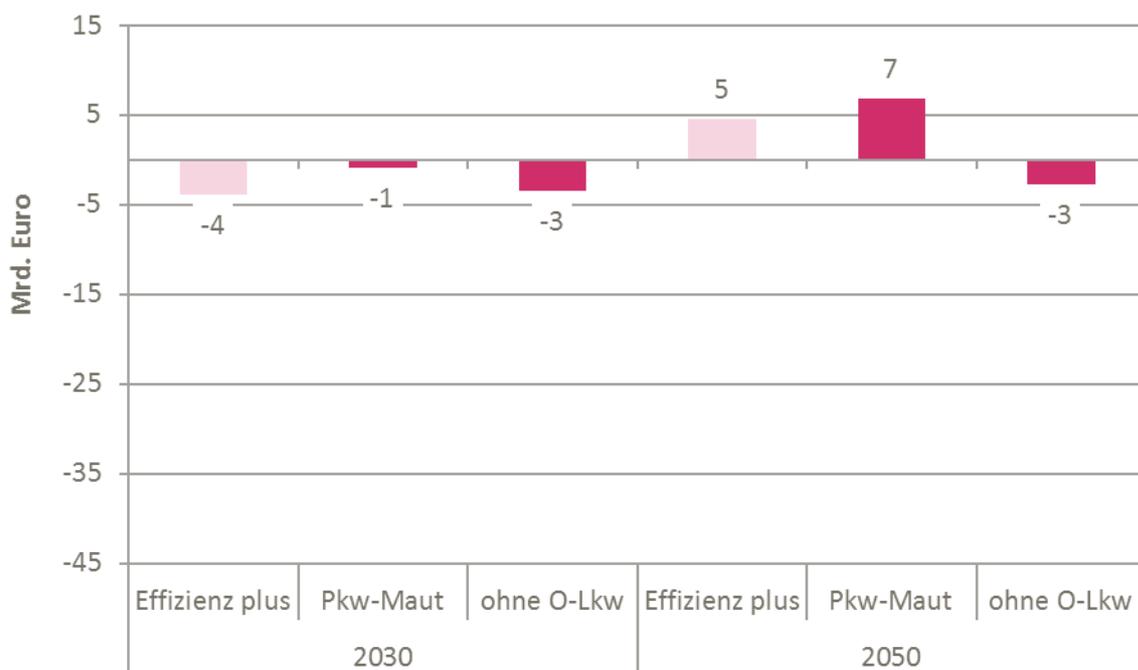
Diese Veränderungen führen zu außerordentlich hohen Brutto-Einkommenseffekten bei den Haushalten: Weniger Ausgaben im Bereich MIV und zusätzliche Einnahmen aus der Rückverteilung der Pkw-Maut. Gleichzeitig nehmen die Ausgaben des Staates für den öffentlichen Verkehr zu, die Einnahmen aus Steuern im Verkehrsbereich hingegen ab. In der Summe übertreffen die Brutto-Einkommenseffekte jedoch den resultierenden Ausgabenüberschuss des Staates deutlich, was zu einem sehr starken Netto-Einkommenseffekt führt – die verfügbaren Einkommen nach Steuern steigen. Diese frei verfügbaren Mittel der Haushalte fließen mittels Konsum in die Wirtschaft zurück, was die positiven ökonomischen Wirkungen nach sich zieht.

## 13.6.4 SZENARETTE OHNE OBERLEITUNGS-LKW

In einer weiteren Untervariante des Szenarios Effizienz plus steht der Güterverkehr im Mittelpunkt mit der Frage, wie die Wirkungen aussehen, wenn keine Oberleitungs-Lkw eingeführt werden. Diese Szenarette schneidet gegenüber dem Szenario Effizienz plus schlechter ab: Der Wegfall der Oberleitungs-Lkw reduziert die Stromnachfrage, welche zu großen Teilen mit inländischer Produktion gestillt wird. Ersetzt wird dieser Energiebetrag mehrheitlich durch PtX-Kraftstoffe, welche gemäß den unterstellten Annahmen zu 100 % importiert werden. Dies schmälert die im Inland anfallende Wertschöpfung, es werden weniger Arbeitskräfte im Inland benötigt, was die gesamtwirtschaftliche Wirkung gegenüber dem Szenario Effizienz plus verschlechtert – insbesondere in der langen Frist bis 2050.

Die folgende Abbildung fasst die Ergebnisse für die Szenaretten Pkw-Maut und ohne O-Lkw zusammen und zeigt den Vergleich zum Szenario Effizienz plus.

**Abbildung 13-8: Veränderung der Wertschöpfung gegenüber dem Basisszenario**



Quelle: Renewability III

## 13.7 EINBEZUG DER EXTERNER KOSTEN

Die Dekarbonisierung des Verkehrs verändert die Gewichte innerhalb der Verkehrsbranchen und wirkt sich auf andere Branchen aus. Auf gesamtwirtschaftlicher Ebene verändern sich dadurch Wertschöpfung und Beschäftigung. Die Dekarbonisierung mindert daneben die Treibhausgasemissionen des Verkehrs maßgeblich und wirkt sich auf den Grad der

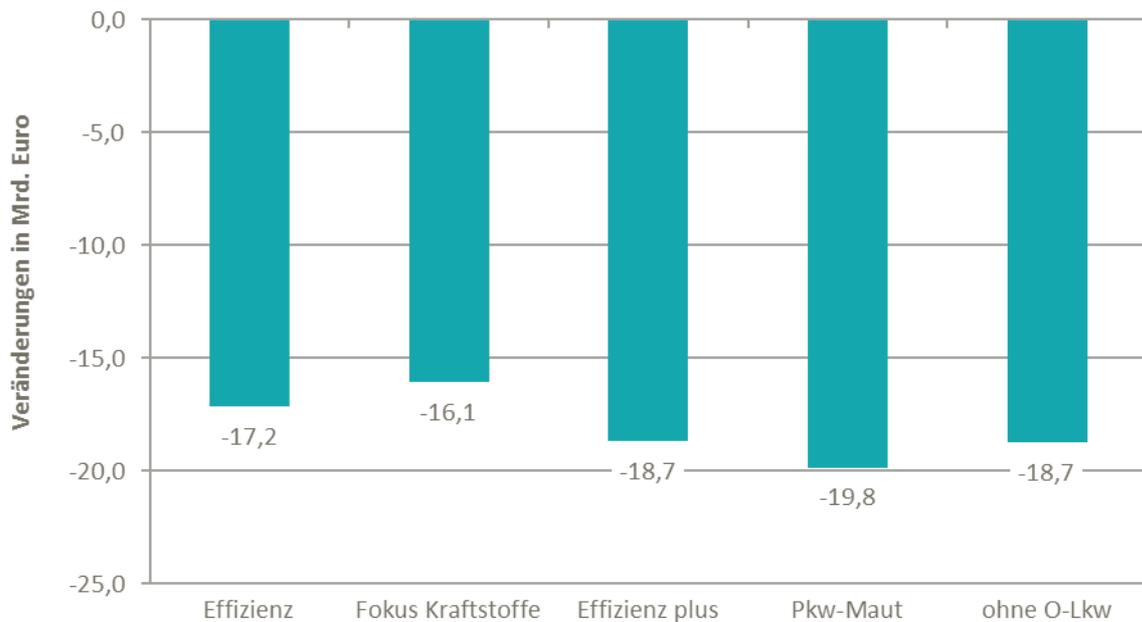
Luftverschmutzung aus. Weiter führt sie zu einer Verlagerung zwischen den Verkehrsträgern, was beispielsweise einen Einfluss auf die entstehenden Unfallkosten hat.

Diese Aspekte werden in den externen Kosten des Verkehrs zusammengefasst, jenen Kosten, welche nicht durch die Verursachenden der Verkehrsaktivität gedeckt werden. Sie stellen die Differenz dar zwischen dem bezahlten Preis für die Verkehrsaktivität und den dadurch verursachten Kosten (vgl. Ecoplan, INFRAS 2014). Diese Differenz resultiert vielfach aus einem Marktversagen, da es sich beispielsweise bei den betroffenen Umweltleistungen um öffentliche Güter handelt. Die externen Kosten sind daher im Bruttoinlandsprodukt nicht abgebildet. Beim Vergleich der ökonomischen Auswirkungen verschiedener Szenarien ist es deshalb sinnvoll, auch die Wirkung auf die externen Umwelteffekte und somit die externen Kosten zu berücksichtigen. Damit ergibt sich eine volkswirtschaftlich breitere Sicht der Auswirkungen und die Aussagekraft der ökonomischen Ergebnisse vergrößert sich.

Die externen Kosten stellen bei den vorliegenden Szenarien eine relevante Größe dar: Durch die Dekarbonisierung des Verkehrs werden die direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2050 praktisch auf null gesenkt. Heute stellen die Klimakosten hingegen den größten Teil der externen Kosten im Verkehr dar (vgl. z. B. Ecoplan, INFRAS 2014).

So nehmen die externen Kosten gegenüber dem Basisszenario in allen Szenarien und Szenareten deutlich ab, und zwar im Umfang von drei bis neun Milliarden Euro (für das Jahr 2030) und 16 bis 20 Milliarden Euro pro Jahr (für das Jahr 2050).

Abbildung 13-9: Veränderung der externen Kosten gegenüber dem Basisszenario 2050



Quelle: Renewbility III

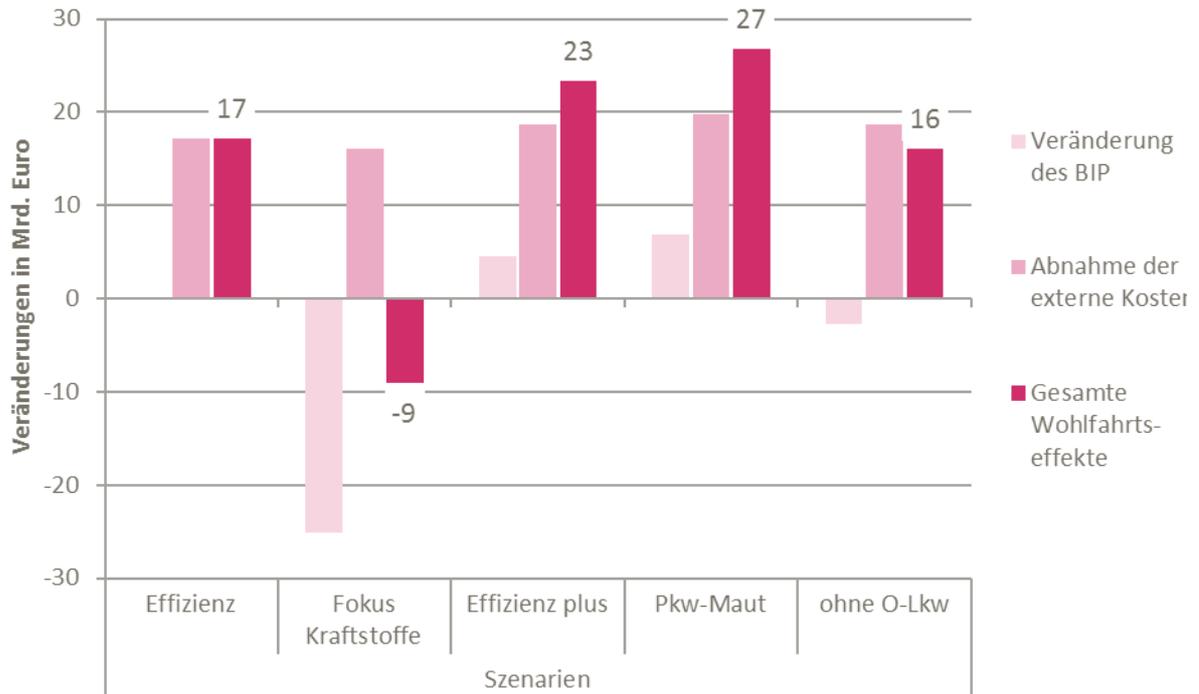
Aufgrund der Reduktion der Klimagas- und Luftschadstoffemissionen sowie teilweise auch des Lärms wirken sich jene Szenarien besonders positiv aus, die auf die Umstellung auf Elektromobilität setzen. Am geringsten sind die externen Kosten des Verkehrs, wenn darüber hinaus noch die Pkw-Verkehrsleistung reduziert wird – etwa durch die Förderung des NMIV und der Lebensqualität in Innenstädten. Hier ist auch der zusätzliche Einfluss auf die Unfallzahlen relevant.

### 13.8 ÖKONOMISCHE GESAMTERGEBNISSE UND FAZIT

Welche volkswirtschaftlichen Auswirkungen haben nun die beiden Szenarien und die drei Szenaretten im Gesamtüberblick? Mit Hilfe der dargelegten Ergebnisse in Bezug auf die Wertschöpfung (BIP) und die externen Kosten lässt sich diese Frage – unter den getroffenen Annahmen – beantworten: Die Szenarien Effizienz und Effizienz plus bieten beide die Chance, die Klimaschutzziele zu erreichen ohne signifikanten Einbußen bei der Wertschöpfung. Unter Einbezug der vermiedenen externen Kosten sind die volkswirtschaftlichen Auswirkungen gar leicht positiv, wie die folgende Abbildung zeigt. Dargelegt sind die zu erwartenden Wohlfahrtseffekte der Szenarien der Dekarbonisierung

des Verkehrs in Deutschland gegenüber einer gegebenen Wirtschaftsstruktur gemäß Basisszenario.<sup>11</sup>

**Abbildung 13-10: Wohlfahrtseffekte der Szenarien im Jahr 2050**



<sup>11</sup> In der volkswirtschaftlichen Analyse in diesem Projekt sind diese Wohlfahrtseffekte definiert als BIP-Wirkungen plus Veränderung der externen Kosten (Minderung der externen Kosten erhöht die Wohlfahrt). Die Wohlfahrt umfasst tatsächlich mehr (Lebensqualität, soziale Kontakte, Zufriedenheit etc.).

Quelle: Renewbility III

**Tabelle 13-4: Wohlfahrtseffekte der Szenarien im Jahr 2050**

In Mrd. Euro gegenüber dem Basisszenario	Szenario Effizienz	Szenarette Fokus Kraftstoffe	Szenario Effizienz plus	Szenarette Pkw-Maut	Szenarette ohne O-Lkw
BIP	0	-25	5	7	-3
Externe Kosten	17	16	18	20	19
<b>Total</b>	<b>17</b>	<b>-9</b>	<b>23</b>	<b>27</b>	<b>16</b>

### Entwicklung der Verkehrsbranchen

In den Szenarien werden lediglich die Effekte einer Dekarbonisierung des Verkehrs betrachtet, während für den Rest der Realwirtschaft die Dekarbonisierung bereits unterstellt ist. Insgesamt gesehen sind die volkswirtschaftlichen Effekte der Szenarien deshalb klein – allerdings machen die Verkehrsbranchen im Jahr 2050 auch lediglich 3,6 % des gesamten Bruttoinlandsprodukts aus. Mit einem Anteil von 4,5 % lag dieser Wert 2008 noch etwas höher. Die Verkehrsbranchen wachsen in Bezug auf das BIP bis 2050 leicht unterproportional zur Gesamtwirtschaft. Dafür können zwei verschiedene Gründe angeführt werden: Zum einen führt die zunehmende Dichte zu kürzeren Wegen im städtischen Raum. Das mindert die Durchschnittskosten für Mobilität, die Wertschöpfung der Verkehrsbranchen sinkt (Dichtevorteile, economies of density). Zum anderen können die durchschnittlichen Transportkosten und damit die Wertschöpfung der Branche durch größere Anbieter mit Skaleneffekten (economies of scale) sinken. Beide Effekte stellen Effizienzsteigerungen dar, welche den Anteil der Verkehrsbranchen an der gesamten Wertschöpfung bis 2050 mindern. Dazu zählen ein höherer Auslastungsgrad im Güterverkehr oder Größenveränderungen bei den Fahrzeugen. Zu beachten ist dabei, dass die von privaten Haushalten als Selbstfahrer genutzte Mobilität nicht den produzierenden Branchen zugerechnet wird. Kauft ein Haushalt ein neues Fahrzeug, verzeichnet der Fahrzeugverkauf (Handel) einen Zuwachs, nicht eine Verkehrsbranche. Im Basisszenario ist der Luftverkehr der einzige Verkehrsträger, welcher noch leicht zunehmende Anteile am BIP aufweist.

### Erkenntnisse aus den verschiedenen Szenarien

Die Ergebnisse weichen in den beiden Szenarien sowie in den Szenaretten voneinander ab. Daraus lassen sich zusätzliche Erkenntnisse gewinnen, welche Maßnahmen oder Instrumente sich in der Tendenz wie auswirken können.

So zeigt sich im Szenario Effizienz mit einer starken Marktdurchdringung der Elektromobilität sowie dem Einsatz strombasierter Kraftstoffe, dass sich langfristig nach den erforderlichen Anpassungsprozessen – beispielsweise bei Haushalten, Produktionsprozessen und Beschäftigung – verglichen mit der Basisentwicklung keine negativen Effekte auf das BIP ergeben. Wird die mit dem Szenario verbundene Minderung negativer externer Kosten mit betrachtet, ergibt sich sogar ein leicht positiver Wohlfahrtseffekt. Im Gegensatz dazu stellt sich ein anderes Ergebnis ein, wenn politisch keine Emissionsgrenzwerte festgelegt werden (Szenarete Fokus Kraftstoffe): Hier resultiert in der mittleren (2030) als auch in der langen Frist (2050) eine Abnahme der Wertschöpfung und der Beschäftigung gegenüber dem Basisszenario.

Wenn hingegen zusätzlich zum Szenario Effizienz weitere Maßnahmen zur Verbesserung der Lebensqualität in Innenstädten, zu Attraktivitätssteigerungen im öffentlichen Verkehr und zur Ertüchtigung des Schienengüterverkehrs umgesetzt werden, dann kann langfristig ein positiver Beitrag einer Verkehrswende auf das BIP resultieren. Hinzu kommt die durch die im Szenario hinterlegten Maßnahmen ausgelöste stärkere Minderung der negativen externen Effekte, sodass quantitativ der Wohlfahrtseffekt (BIP plus geringere externe Effekte) noch klarer positiv ausfällt. Zudem sind die mit dem Szenario einhergehenden Verbesserungen der Lebensqualität im BIP und den externen Kosten noch nicht abgebildet.

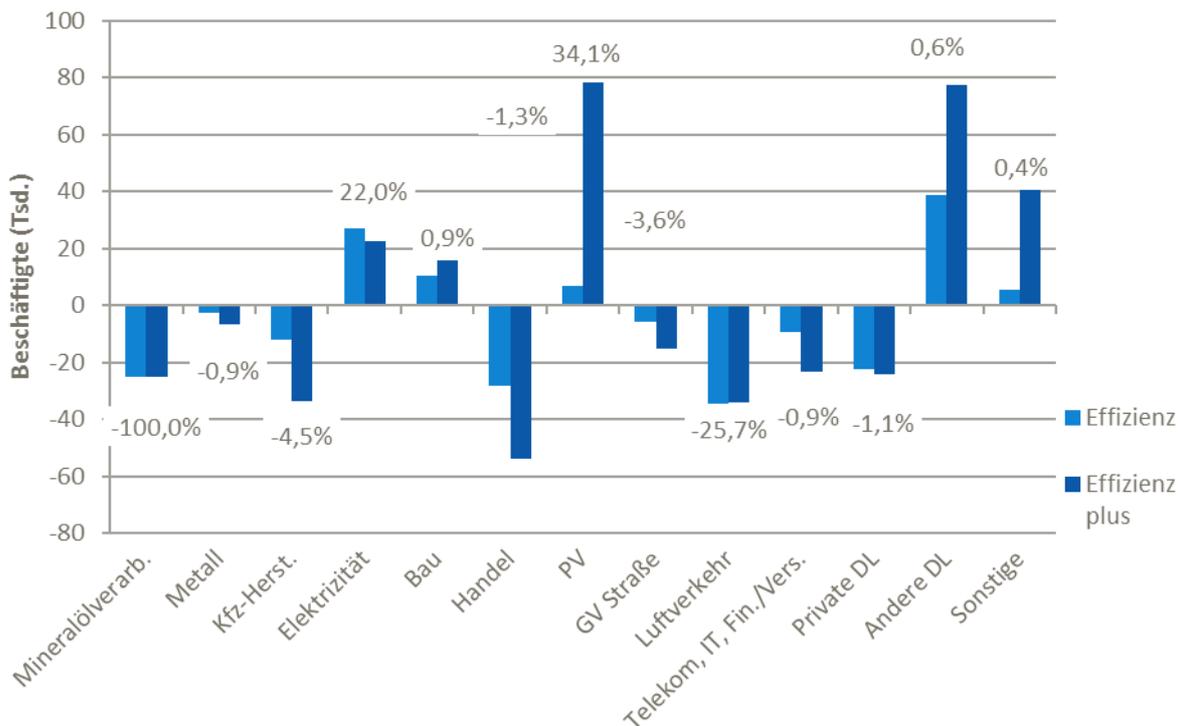
Die Wertschöpfungseffekte sowie die Minderung der externen Kosten im Szenario Effizienz plus lassen sich beispielsweise mit einer Pkw-Maut weiter steigern. Wie die Analyse der Szenarete Pkw-Maut zeigt, kann eine reine Lenkungssteuer die volkswirtschaftlichen Wirkungen der Dekarbonisierung des Verkehrs weiter verbessern. Aus den Arbeiten geht auch hervor, dass die Oberleitungs-Lkw und die damit verbundene Nachfrage nach Elektrizität einen wichtigen Wertschöpfungseffekt haben: So schneidet das Ergebnis der Szenarete ohne O-Lkw in Bezug auf die Wertschöpfung schlechter ab als das Szenario Effizienz plus.

### **Auswirkungen auf Branchenebene**

Bei der Analyse der Auswirkungen der verschiedenen Maßnahmen in den einzelnen Szenarien sind starke branchenspezifische Unterschiede zu beachten, wie die nachstehende Abbildung zeigt. So entstehen erhebliche Einbußen in der Mineralölverarbeitung, welche in der heutigen Form nicht mehr existieren wird. Ebenso sind starke Rückgänge bei der Herstellung von Kraftfahrzeugen oder im Detailhandel zu verzeichnen. Auch der Luftverkehr oder Versicherungen müssen mit Umsatzeinbußen rechnen. Auf der anderen Seite profitieren Branchen wie die Stromerzeugung, diverse Dienstleistungen, der öffentliche Verkehr oder der Bausektor von deutlich positiven Impulsen. Die Dekarbonisierung im

Verkehr könnte für Deutschland wesentlich positivere wirtschaftliche Auswirkungen haben, wenn beispielsweise im Inland Know-how und Produktionsstrukturen für strombasierte Kraftstoffe aufgebaut werden würden.

**Abbildung 13-11: Beschäftigungseffekte 2050 nach Branchen gegenüber dem Basisszenario**



Angaben in % beziehen sich auf den relativen Anteil der Beschäftigungsveränderung in Bezug auf die gesamte Beschäftigung im Jahr 2050 für das Szenario Effizienz plus. Aus Gründen der Lesbarkeit werden die Anteile für das Szenario Effizienz weggelassen.

Quelle: Renewbility III

## Auswirkungen der konkreten Umsetzung

Die dargelegten Ergebnisse zeigen den modellierten Zustand der Volkswirtschaft für die Szenarien, welcher unter den gewählten Annahmen und Modellen im jeweiligen Jahr zu erwarten ist. In diesem Sinne stellen sie einen Gleichgewichtszustand dar. Mit den Ergebnissen lassen sich aber keine genauen Aussagen machen, wie der Zielpfad verlaufen wird. So sind kurzfristig aufgrund der eingeführten Maßnahmen durchaus ökonomische Verwerfungen und Umschichtungen zwischen Wirtschaftssektoren möglich. Dies hängt etwa davon ab, ob und wie zuverlässig die Maßnahmen und Instrumente angekündigt werden, wie diese umgesetzt werden und unter welchen Rahmenbedingungen sich die Wirtschaftsakteure darauf einstellen und wie sie sich an die neue Situation anpassen können. Insbesondere die oben erwähnten Branchen mit deutlich negativen

Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekten sind möglicherweise anfällig für starke Umschichtungen.

## **Weitere Wirkungen**

Zuletzt lässt sich aus den Ergebnissen schließen, dass die Dekarbonisierung mit den analysierten Maßnahmen und Instrumenten zu keiner Situation führen wird, in welcher die Volkswirtschaft – beurteilt anhand der Indikatoren Wertschöpfung, Beschäftigung und externe Kosten – einen erheblich schlechteren Zustand aufweist als im Basisszenario. Insbesondere der Einbezug der externen Kosten (sprich der kostenlosen Nutzung knapper Umweltressourcen), welche sich in allen Szenarien gegenüber der Basisentwicklung deutlich mindern, zeigt ein Element des möglichen Wohlfahrtszuwachses durch die Dekarbonisierung. Ebenso sind die Maßnahmen im Szenario Effizienz plus mit weiteren günstigen Wirkungen auf die umfassende Lebensqualität verbunden, insbesondere in gesellschaftlicher Hinsicht in den Innenstädten.

## 14 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Renewbility ist ein Forschungsprojekt, das mögliche Entwicklungen des Verkehrssektors durch die Betrachtung von Szenarien darstellt. Mit plausiblen, in sich konsistenten und vorstellbaren Szenarien werden die Potenziale konkreter Maßnahmen für einen sachgerechten Klimaschutz im Verkehr aufgezeigt – und zwar sowohl bezüglich der Umwelt-, als auch der ökonomischen Wirkung. In Renewbility III werden nur Szenarien betrachtet, die bis zum Jahr 2050 zu einer vollständigen Dekarbonisierung des Verkehrssektors führen. Das bedeutet, dass die benötigte Energie zu diesem Zeitpunkt über Strom aus erneuerbaren Energien, mit strombasierten Kraftstoffen (hergestellt mit Strom aus erneuerbaren Energien) oder Biokraftstoffen abgedeckt wird. In verschiedenen Szenarien und Szenaretten wurde die Dekarbonisierung der Energieträger auf unterschiedliche Art und Weise mit weiteren Optionen hinsichtlich Fahrzeugeffizienz und Maßnahmen zur Verkehrsverlagerung verknüpft.

Die Modellergebnisse hinsichtlich Entwicklung von Fahrzeugbestand, Personen- und Güterverkehrsnachfrage, ökonomischen Auswirkungen und Endenergiebedarf sowie Treibhausgasemissionen und deren Vergleich zwischen den betrachteten Szenarien lassen folgende Schlussfolgerungen zu:

### **Dekarbonisierung des Verkehrssektors 2050 ist möglich und es gibt verschiedene Optionen**

In den Klimaschutzszenarien Renewbility III werden bis zum Jahr 2050 im Verkehrssektor keine CO<sub>2</sub>-Emissionen mehr emittiert. Die Ergebnisse zeigen, dass diese Zielerreichung auf unterschiedlichen Wegen und – was ganz wesentlich ist – mit unterschiedlichen Energiebedarfen erfolgen kann: Je nach analysiertem Szenario stehen andere Technologien und Maßnahmen im Fokus. Gleichbleibende Voraussetzung dieser Klimaneutralität in 2050 ist, dass die verwendeten Kraftstoffe (Strom, PtX, biogene Kraftstoffe) bis dahin CO<sub>2</sub>-frei sind und auf erneuerbaren Energien basieren – unabhängig davon, wo sie produziert werden.

Wenn die benötigten Energiemengen CO<sub>2</sub>-frei bereitgestellt werden können, so verbleibt am Ende nur noch die nicht-CO<sub>2</sub>-bedingte Klimawirksamkeit des Luftverkehrs, die mit entsprechenden Maßnahmen – vor allem zur Dämpfung der Nachfrage - weiter reduziert werden kann. Zu beachten ist auch, dass in gewissem Rahmen eine Verlagerung von Klimawirkungen in die vorgelagerte Herstellung der Fahrzeuge auftreten kann. Die Flottendurchdringung mit Elektrofahrzeugen führt zu erhöhten Anforderungen in Herstellungsprozessen und an die Bereitstellung von Fahrzeugmaterialien, insbesondere auch außerhalb Deutschlands. Analog zur erforderlichen Bereitstellung von CO<sub>2</sub>-freien

Kraftstoffen ist daher eine weitere Voraussetzung zur vollständigen Klimaneutralität, dass auch Materialbereitstellungsprozesse zukünftig weltweit CO<sub>2</sub>-neutral werden.

## Elektromobilität ist eine tragende Säule für Klimaschutz im Verkehr

Eine vollständige Dekarbonisierung des Verkehrssektors ist ohne bedeutende Einbußen bei der Wertschöpfung möglich. Wichtig ist dabei die maximale Effizienzsteigerung im Verkehr, also eine direkte Stromnutzung überall dort, wo es machbar ist. Strombasierte Kraftstoffe sollten nur dann zum Einsatz kommen, wenn keine andere Option besteht - und damit voraussichtlich nur im Luft- und Seeverkehr.

Denn eine Dekarbonisierungsstrategie, die ausschließlich auf CO<sub>2</sub>-freien Kraftstoffen basiert, ist aus energetischer und volkswirtschaftlicher Sicht ineffizient. Sie würde Strommengen erfordern, die über die heutige Bruttostromerzeugung in Deutschland deutlich hinausgehen und gegebenenfalls erhebliche Stromimporte bedingen. Um die Entwicklung in Richtung Dekarbonisierung zu stützen und gleichzeitig maximale Effizienzsteigerung anzustreben, sollte das Endenergieziel für den Verkehrssektor für 2050 von derzeit 40 % auf eine 60-prozentige Minderung gegenüber 2005 angehoben werden.

## Die Sicherstellung des Strombedarfs aus erneuerbaren Energien ist zentral

Für die verbleibenden Energiebedarfe, bei denen keine direkte Stromnutzung möglich ist, sind stromgenerierte Kraftstoffe erforderlich. Dabei muss sichergestellt werden, dass der zusätzliche Strom aus erneuerbaren Energiequellen bereitgestellt werden kann. Auch ist zu beachten, dass die stromgenerierten Kraftstoffe zum überwiegenden Teil außerhalb Deutschlands in Ländern mit höheren Potenzialen für erneuerbare Energien produziert werden müssen. Wesentlich ist es daher, dass frühzeitig Nachhaltigkeitsstandards für strombasierte Kraftstoffe auf internationaler Ebene vereinbart werden - z. B. hinsichtlich Konkurrenzen um Wasser in Trinkwasserqualität. Auch führt die Systemumstellung zu neuen Importabhängigkeiten bei strombasierten Kraftstoffen wie bisher vom Erdöl. Die wirtschaftlichen Effekte der Dekarbonisierung im Verkehr könnten für Deutschland positiver ausfallen, wenn im Inland früh Know-how und Produktionsstrukturen für PtX aufgebaut würden. Die Vor- und Nachteile einer entsprechenden Kopplung von Verkehrs- und Stromsektor müssen jedoch genauer überprüft werden.

## Fortschreibung der Pkw-Grenzwerte und Erhöhung der Kraftstoffpreise sind notwendig

Gleichzeitig gilt es, die Effizienzsteigerung der Fahrzeuge mit entsprechenden Rahmenbedingungen voranzubringen. Alleine höhere Kraftstoffkosten reichen nicht aus, um die Ziele der Bundesregierung von 6 Mio. elektrischer Fahrzeuge im Bestand im Jahr 2030, sowie die aus energetischer und Klimaschutzpolitischer Sicht notwendige, maximale

Elektrifizierung im Fahrzeugbestand bis 2050 zu erreichen. Dafür ist eine ambitionierte Fortschreibung der Pkw-Grenzwerte in Kombination mit einer Erhöhung der Kraftstoffpreise notwendig, was dann einen weitgehenden Ausstieg aus dem Verbrennungsmotor beutet.

#### Die Zielerreichung 2030 im Verkehrssektor ist erreichbar

Eine Minderung der direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen um 38 % gegenüber 2005 im nationalen Verkehr, wie auf EU-Ebene im Rahmen der *effort sharing decision* für die nicht-Emissionshandelssektoren und damit indirekt für den deutschen Verkehrssektor vorgeschlagen, gelingt bis zum Jahr 2030 nur mit einer Kombination von Maßnahmen, welche die Effizienzsteigerung der Fahrzeuge und des Verkehrssystems adressieren. Effizienzsteigerungen der Fahrzeuge, Maßnahmen zur Verbesserung der Lebensqualität in Städten, Maßnahmen zur Verlagerung von Güterverkehren auf die Schiene und eine Erhöhung der Nutzerkosten des MIV müssen Hand in Hand gehen. Die Anhebung der Nutzerkosten kann auch in Form einer fahrleistungsabhängigen Pkw-Maut erfolgen. Mautsysteme können besonders positive volkswirtschaftliche Effekte haben, wenn sie verursachergerecht gestaltet sind und eine Rückverteilung der Erträge erfolgt.

#### Im Güterverkehr sollten Straße und Schiene nicht gegeneinander ausgespielt werden

Wesentlich für den Güterverkehr ist, dass eine Dekarbonisierungsstrategie nicht Straßen- und Schienenverkehr gegeneinander ausspielt, sondern zwei Ziele verfolgt: Zum einen eine möglichst starke Verlagerung von Güterverkehren auf die Schiene, um den im Vergleich zur Straße bereits hohen Grad der Dekarbonisierung zu nutzen und eine hohe Energieeffizienz zu erreichen. Zum anderen sollte die Verbesserung der Energieeffizienz und Dekarbonisierung des verbleibenden Straßenverkehrs, der auch in Zukunft den mit Abstand größten Anteil an der Güterverkehrsleistung erbringen wird, zum Ziel gesetzt werden. Zwar bestehen bei den Lkw mit Verbrennungsmotoren noch deutliche Effizienzsteigerungspotenziale, die Elektrifizierung der Fahrzeuge ist jedoch schlussendlich deutlich energieeffizienter als eine Dekarbonisierung der Kraftstoffe. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass durch eine Effizienzsteigerung im Straßengüterverkehr die Kilometerkosten sinken und diese damit gegebenenfalls den unerwünschten Effekt einer Verlagerung von Schiene und Binnenschiff auf die Straßen bewirken kann. Um eine deutliche Verlagerung von Güterverkehren auf die Schiene zu erreichen, sind neben attraktivitätssteigernden Maßnahmen des bestehenden Schienenverkehrssystems auch die Erschließung weiterer Potenziale vor allem durch multimodale Verkehre erforderlich, was entsprechende politische Randbedingungen voraussetzt.

## Maßnahmen im städtischen Verkehr zeigen deutliche Wirkung

Die Ergebnisse der Szenarien zeigen, dass in Kernstädten bis zum Jahr 2050 die Fahrleistung des motorisierten Individualverkehrs gegenüber einer Basisentwicklung halbiert werden kann. Dabei spielen veränderte Kilometerkosten und Motorisierungsraten eine wichtige Rolle. Zudem braucht es jedoch zusätzliche Maßnahmen im städtischen Verkehr. Wenn der öffentliche Verkehr und Fuß- und Radverkehr gefördert werden, bieten sich Pkw-Nutzern wählbare Alternativen. Zu den wesentlichen Maßnahmen gehört aber auch die Parkraumbewirtschaftung mit deutlich steigenden Gebühren. Die Kommunen spielen damit eine ganz wesentliche Rolle, denn die Verbesserung der Lebensqualität in Städten ist ein relevanter Hebel für den Klimaschutz im Verkehrssektor. Gleichzeitig verringert sie weitere negative Umweltauswirkungen, indem sie nachhaltige Mobilität unterstützt, und hat positive Auswirkungen für die Wohlfahrt. Die Zunahme des öffentlichen Verkehrs wirkt sich auch günstig auf die Beschäftigung aus. Wichtig ist dabei eine optimierte Auslastung der Verkehrsmittel über den Tag. Der höhere Bedarf nach öffentlichem Verkehr kann unter geeigneten Rahmenbedingungen zu einer besseren Auslastung der Infrastruktur sowie der Fahrzeuge und damit zu besseren Kostendeckungsgraden führen.

## Branchen sind unterschiedlich von der Dekarbonisierung betroffen

Bei der Analyse der Auswirkungen der verschiedenen Maßnahmen in den einzelnen Szenarien sind starke branchenspezifische Unterschiede zu beachten. So entstehen erhebliche Einbußen in der Mineralölverarbeitung, welche in der heutigen Form nicht mehr existieren wird. Ebenso sind Rückgänge bei der Herstellung von Kraftfahrzeugen oder im Einzelhandel zu verzeichnen. Auch der Luftverkehr oder Versicherungen müssen mit Umsatzeinbußen rechnen. Auf der anderen Seite profitieren aber Branchen wie die Stromerzeugung, diverse Dienstleistungen, der öffentliche Verkehr oder der Bausektor von deutlich positiven Impulsen. Solch ein Strukturwandel muss frühzeitig und sorgfältig vorbereitet werden. Wie stark die wirtschaftlichen Wirkungen je Branche und Unternehmen ausfallen, hängt auch stark von den konkreten Reaktionen der Unternehmen auf die anstehenden Herausforderungen ab.

## Neue Technologien als Chance für die Volkswirtschaft

Maßgeblich für eine günstige volkswirtschaftliche Bilanz ist auch, dass Deutschland auf dem globalen Markt bei den neuen Technologien (z. B. Elektrofahrzeugen) zukünftig eine ebenso wichtige Rolle spielt wie bisher bei den konventionellen Fahrzeugen. Grundsätzlich kann eine Dekarbonisierung des Verkehrssektors damit die Chance bieten, Klimaschutz bei positivem volkswirtschaftlichem Ergebnis zu erreichen. Die Politik muss dafür den Rahmen schaffen:

Indem sie die Elektromobilität und damit die Effizienz der Fahrzeuge voranbringt und das Verkehrssystem durch Verlagerung und Vermeidung so umgestaltet, dass der Primärenergieverbrauch deutlich gesenkt wird.

## 15 LITERATUR

- A123. (2011). Datenblatt: Nanophosphate® High Power Lithium Ion Cell. Waltham.
- AEA. (2011). Reduction and Testing of Greenhouse Gas (GHG) Emissions from Heavy Duty Vehicles – Lot 1: Strategy. Didcot: Nikolas Hill et al. Retrieved (Der folgende Link führt zur zur zuvor genannten Veröffentlichung: [http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/heavy/studies\\_en.htm](http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/heavy/studies_en.htm)).
- Airbus Operations SAS. (2014). BILAN DES EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE (GES).
- Alcan. (2004). Buxmann, K.: Email Vom 27.4.2004.
- Alias, Arbizzani et al. (2015). Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles. edited by Bruno; Scrosati, Jürgen; Garche, and Werner; Tillmetz. Cambridge Waltham Kidlington.
- Andruleit et al. (2014). Andruleit, Harald; Bahr, Andreas; Babies, Hans Georg; Hesse, Bernd; Meßner, Jürgen; Rebscher, Dorothee ; Schauer, Michael; Schmidt, Sandro; Schulz, Peggy; von Goerne, Gabriela. Energiestudie 2014. Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen. Herausgeber: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Verfügbar unter: Der folgende Link führt zur zur zuvor genannten Veröffentlichung: [http://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Themen/Energie/Downloads/Energiestudie\\_2014.pdf?blob=publicationFile&v=7](http://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Themen/Energie/Downloads/Energiestudie_2014.pdf?blob=publicationFile&v=7)
- Bauer, Christian. (2010). Ökobilanz von Lithium-Ionen Batterien: Analyse Der Herstellung von Energiespeichern Für Den Einsatz in Batteriefahrzeugen. Villigen: Eine Studie im Auftrag der Volkswagen AG. Paul Scherrer Institut, Labor für Energiesystem-Analysen (LEA).
- Baumgartner, J. P. (2001), Prices and costs in the railway sector, EPFL, S. 15
- BCG (Boston Consulting Group)(2015). Massenmarkttauglichkeit autonomer Fahrzeuge steht noch vor großen Hürden. Der folgende Link führt zur zur zuvor genannten Veröffentlichung: <http://www.bcg.de/media/PressReleaseDetails.aspx?id=tcm:8995833>. Abgerufen am 8.7.2016.
- BLE (2014): Evaluations- und Erfahrungsbericht für das Jahr 2013 (Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung und Bio-kraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung), Bonn 2014
- BMUB (2015). Öko-Institut und Fraunhofer ISI. Klimaschutzszenario 2050. 2. Modellierungsrunde. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umweltschutz, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Der folgende Link führt zur zur zuvor genannten Veröffentlichung: <http://www.oeko.de/oekodoc/2441/2015-598-de.pdf>
- Bose-Munde, Annedore. (2014). CFK Ist Für BMW Schlüssel Zu „Revolutionen Im Automobilbau“. VDI Nachrichten vom 19. Dezember 2014, 51. Retrieved (Der folgende Link führt zur zur zuvor genannten Veröffentlichung: <http://www.vdi-nachrichten.com/Technik-Wirtschaft/CFK-fuer-BMW-Schluessel-zu-Revolutionen-im-Automobilbau>).

- Brass, James; Congdon, Louise; Welsh, Chris. (2015). Implications for the Air Freight Sector of Different Airport Capacity Options. Final Report. (Der folgende Link führt zur zuvor genannten Veröffentlichung: <http://content.tfl.gov.uk/air-freight-implications-from-new-capacity.pdf>)
- Brookhuis K. A.; de Waard D. und W. H. Janssen. (2001). Behavioural impacts of Advanced Driver Assistance Systems – an overview. Special Issue: Implementation Issues of Advanced Driver Assistance Systems, European Journal of Transport and Infrastructure Research, Vol. 3, S. 245-254.
- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumplanung (BBSR). (ohne Jahresangabe). Der folgende Link führt zur zuvor genannten Veröffentlichung: [http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Raumbeobachtung/Downloads/downloads\\_node.htm](http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Raumbeobachtung/Downloads/downloads_node.htm). Abgerufen am 17.8.2016.
- Bundesregierung. (2012). Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgResS). Berlin. Retrieved (Der folgende Link führt zur zuvor genannten Veröffentlichung: [http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/progress\\_bf.pdf](http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/progress_bf.pdf)).
- Bundesverband CarSharing e. V. (bcs). Online verfügbar unter: Der folgende Link führt zur zuvor genannten Veröffentlichung: <http://www.carsharing.de/alles-ueber-carsharing/faq>, zuletzt geprüft am 27.01.2015.
- Bundesverband CarSharing e. V. (bcs) (2014a): 1 Million Teilnehmer im deutschen CarSharing. Berlin. Willi Loose, Kurfürstendamm 52, 10707 Berlin, Telefon: 030 - 92 12 33 54. Online verfügbar unter: Der folgende Link führt zur zuvor genannten Veröffentlichung: <http://www.carsharing.de/presse/pressemitteilungen/1-million-teilnehmer-im-deutschen-carsharing>.
- Bundesverband CarSharing e. V. (bcs) (2014b): Carsharing-Boom hält an. Bundesverband CarSharing e. V. (bcs) veröffentlicht Jahresbilanz 2013. Berlin. Willi Loose, Kurfürstendamm 52, 10707 Berlin, Telefon: 030 - 92 12 33 54. Online verfügbar unter: Der folgende Link führt zur zuvor genannten Veröffentlichung: <http://www.carsharing.de/presse/pressemitteilungen/carsharing-boom-haelt-an>.
- Burke, Andrew, and Marshall Miller. (2009). "Performance Characteristics of Lithium-Ion Batteries of Various Chemistries for Plug-in Hybrid Vehicles." Pp. 1–13 in EVS24 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium.
- busmagazin.de. (2012). "Mercedes Benz Tourismo R HD - Ein Bus Für Alle Fälle." BusMagazin. Retrieved July 27, 2016 (Der folgende Link führt zur zuvor genannten Veröffentlichung: [http://www.busmagazin.de/fileadmin/user\\_upload/Busmagazin/Fahrzeugtests/MB\\_Tourismo\\_RHD\\_02\\_2012.pdf](http://www.busmagazin.de/fileadmin/user_upload/Busmagazin/Fahrzeugtests/MB_Tourismo_RHD_02_2012.pdf)).
- busplaner.de. (2012). "MAN Lion's Coach 12 M." Retrieved July 27, 2016 (Der folgende Link führt zur zuvor genannten Veröffentlichung: <http://www.busplaner.de/omnibusmagazin/omnibustest/8487/MAN/MAN-Lion-s-Coach-12-m>).
- Ciferri, Luca (2016): Ford's Nair: Sensors, software are self-driving cars' main obstacles. In: Automotive News. 27. Februar 2016. Der folgende Link führt zur zuvor genannten Veröffentlichung: <http://www.autonews.com/article/20160227/>

- [OEM02/302299994/fordsnair-sensors -software-areself-driving-cars-main-obstacles](http://OEM02/302299994/fordsnair-sensors-software-areself-driving-cars-main-obstacles).  
Abgerufen am 7. 7.2016.
- Continental. (2013). Continental Mobilitätsstudie 2013. Der folgende Link führt zur zuvor genannten  
Veröffentlichung: [http://www.continentalcorporation.com/www/download/pressportal.com/en/general/ov\\_automated\\_driving\\_en/ov\\_mobility\\_study\\_en/download\\_channel/pres\\_mobility\\_study\\_en.pdf](http://www.continentalcorporation.com/www/download/pressportal.com/en/general/ov_automated_driving_en/ov_mobility_study_en/download_channel/pres_mobility_study_en.pdf). Abgerufen am 22.7.2016.
- Cyganski, Rita. (2015). Autonome Fahrzeuge und autonomes Fahren aus Sicht der Nachfragemodellierung, in: Markus Maurer, J. Christian Gerdes, Barbara Lenz und Hermann Winner (Hrsg.), *Autonomes Fahren: Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte*, Berlin: Springer, S. 241-263.
- Cyganski, Rita; Fraedrich, Eva und Barbara Lenz. (2015). Travel-time valuation for automated driving: A use-case-driven study. In: *Proceedings of the 94th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, 11.-15. Januar 2015, Washington, USA.
- Dargay, Joyce. (2002). Determinants of car ownership in rural and urban areas: a pseudo-panel analysis. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. Volume 38. Issue 5, September 2002, Pages 351-366
- Dataforce (2014): Persönliche Mitteilung von Dataforce vom 13.06.2014, basierend KBA Daten. 2014
- de Oliveira Fernandes Lopes, Joao Vasco. (2010). Life Cycle Assessment of the Airbus A330-200 Aircraft Engenharia Aeroespacial Júri. Retrieved (Der folgende Link führt zur zuvor genannten  
Veröffentlichung: [https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395142223995/Tese\\_JoaoVascoLopes.pdf](https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395142223995/Tese_JoaoVascoLopes.pdf)).
- Deffner, J.; Hefter, T.; & Götz, K. (2014). Multioptionalität auf dem Vormarsch? Veränderte Mobilitätswünsche und technische Innovationen als neue Potenziale für einen multimodalen Öffentlichen Verkehr. In: *Öffentliche Mobilität*, Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 201–227.
- Destatis. (2016). Der folgende Link führt ins Internet: [http://www.gbe-bund.de/gbe10/abrechnung.prc\\_abr\\_test\\_logon?p\\_uid=gast&p\\_aid=0&p\\_knoten=FID&p\\_sprache=D&p\\_suchstring=7832](http://www.gbe-bund.de/gbe10/abrechnung.prc_abr_test_logon?p_uid=gast&p_aid=0&p_knoten=FID&p_sprache=D&p_suchstring=7832). Abgerufen am 23.8.2016.
- Dieselnet.com. n.d. Emission Standards. Retrieved October 19, 2015 (Der folgende Link führt zur zuvor genannten Veröffentlichung: <https://www.dieselnet.com/standards/>).
- Dufloy, J. R., J. De Moor, I. Verpoest, and W. Dewulf. (2009). Environmental Impact Analysis of Composite Use in Car Manufacturing. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 58(1):9–12.
- EBS Business School. (2012). AIM Carsharing-Barometer Vol. II - Schwerpunkt: Corporate Carsharing. Oestrich-Winkel.
- EBS Business School. (2013). AIM Carsharing-Barometer Vol. III - Schwerpunkt: Carsharing-Kunden. Oestrich-Winkel.
- EBS Business School. (2014). AIM Carsharing-Barometer Vol. IV - Schwerpunkt: Fehlverhalten bei Carsharing-Nutzung. Oestrich-Winkel.

- EC. (2014). Report on Critical Raw Materials for the EU. Brüssel: Report of the Ad hoc Working Group on defining critical raw materials. Retrieved (Der folgende Link führt zur zuvor genannten Veröffentlichung: [http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/crm-report-on-critical-raw-materials\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/crm-report-on-critical-raw-materials_en.pdf)).
- EC. (2013). EU Energy, Transport and GHG Emissions Trends to 2050. Reference Scenario 2013. Retrieved (Der folgende Link führt zur zuvor genannten Veröffentlichung: [http://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030/docs/eu\\_trends\\_2050\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030/docs/eu_trends_2050_en.pdf))
- ECC. (2013). ECC-LFPP 42/45. Geesthacht: ECC Repenning GmbH.
- Ecoplan, INFRAS. (2014). Externe Effekte des Verkehrs 2010, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Raumentwicklung ARE. Bern, Zürich, Altdorf.
- Edwards, Robert; Larivé, Jean-Francois; Rickeard, David; Weindorf, Werner (2014). Well-to-Tank Report Version 4.a. JEC Well-to-Wheels Analysis. Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context. Joint Research Centre (JRC); CONCAWE; Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST). Ispra (JRC Technical Reports).
- Emsley, John. (2014). LITHIUM-AIR BATTERIES ARE GREAT, BUT SO ARE THEIR PROBLEMS. (November 2014). Retrieved September 18, 2015 (Der folgende Link führt zur zuvor genannten Veröffentlichung: <http://sciencewatch.com/articles/lithium-air-batteries-are-great-so-are-their-problems>).
- Erhard, J., Reh, W., Treber, M., Oeliger, D., Rieger, D., Müller-Görnert, M. (2014). Klimafreundlicher Verkehr in Deutschland - Weichenstellungen bis 2050; Hg.: WWF, BUND, NABU, Germanwatch, VCD.
- Evertz, Thomas et al. (2013). Die Leichtbauwerkstoffe Für Den Fahrzeugbau. in Leichtbau in der Fahrzeugtechnik, edited by H. E. Friedrich. Wiesbaden: Vieweg Springer.
- EUCO. (2014). 2030 Climate and Energy Policy Framework. EUCO 169/14. Brussels. Retrieved (Der folgende Link führt zur zuvor genannten Veröffentlichung: [http://www.consilium.europa.eu/uedocs/cms\\_data/docs/pressdata/en/ec/145397.pdf](http://www.consilium.europa.eu/uedocs/cms_data/docs/pressdata/en/ec/145397.pdf)).
- Fagnant, D. J. und K. M. Kockelman. (2013). Preparing a Nation for Autonomous Vehicles: Opportunities, Barriers and Policy Recommendations for Capitalizing on Self-Driven Vehicles. Transportation Research Part A: Policy and Practice, Transportation Research Board. Washington D.C., S. 1-26.
- Fagnant, D. J. und K.M. Kockelman. (2014). The travel and environmental implications of shared autonomous vehicles, using agent-based model scenarios. Transportation Research Part C, Vol 40: 1-13.
- Firnkorn, J.; Müller, M. (2012). Selling mobility instead of cars: new business strategies of automakers and the impact on private vehicle holding. In: Business Strategy and the environment 21 (4), S. 264–280.
- FNR (2014). Leitfaden Biogasaufbereitung und -einspeisung. (Der folgende Link führt zur zuvor genannten Veröffentlichung: <http://www.klimaaktiv.at/erneuerbare/biogas/FNRLeitfadenBiogas.htm>). zuletzt geprüft am 06.10.2016

- Follmer, R. et al. (2010). Mobilität in Deutschland (MiD) 2008. Datensätze. Bonn. Online verfügbar unter: Der folgende Link führt zur zuvor genannten Veröffentlichung: [http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/MiD2008\\_Abschlussbericht\\_I.pdf](http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/MiD2008_Abschlussbericht_I.pdf).
- Fraedrich, Eva; Cyganski, Rita; Wolf, Ingo und Barbara Lenz. (2016). User Perspectives on Autonomous Driving: A Use-Case-Driven Study in Germany. Arbeitsberichte des Geographischen Institutes, Heft 187. Humboldt Universität zu Berlin. Der folgende Link führt zur zuvor genannten Veröffentlichung: [https://www.geographie.huberlin.de/de/institut/publikationsreihe/n/arbeitsberichte/download/Arbeitsberichte\\_Heft\\_187.pdf](https://www.geographie.huberlin.de/de/institut/publikationsreihe/n/arbeitsberichte/download/Arbeitsberichte_Heft_187.pdf).
- Freese C.; Schönberg T.; Horstkötter D. (2014). Shared mobility. How new businesses are rewriting the rules of the private transportation game. Roland Berger Strategy Consultants, zuletzt geprüft am 25.02.2015.
- Frischknecht, Rolf. (2012). Umweltaspekte von Elektroautos - Ein Argumentarium. Uster: ESU-services Ltd.
- Gaines, Linda, Jennifer Dunn. (2012). Comparison of Li-Ion Battery Recycling Processes by Life-Cycle Analysis. Baltimore: Argonne National Laboratory.
- Gasser, Tom et al. (2015). Bericht zum Forschungsbedarf. Runder Tisch Automatisiertes Fahren – AG Forschung. Der folgende Link führt zur zuvor genannten Veröffentlichung: <http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/Digitales/bericht-zumforschungsbedarf-runder-tisch-automatisiertes-fahren.pdf?blob=publicationFile>. Aufgerufen am 22.1.2016.
- Gibson, Gena; Varma, Adarsh; Cox, Victoria; Korzhenevych, Artem; Dehnen, Nicola; Bröcker, Johannes; Holtkamp, Michael; Meier, Henning (2014). Update of the Handbook on External Costs of Transport. Studie im Auftrag der Europäischen Kommission. Ricardo-AEA, DIW econ, CAU. London.
- Gruber, P. W. / Medina, P. a. / Keoleian, G. a. / Kesler, S. E. / Everson, M. P. / Wallington, T. J. (2011): Global Lithium Availability. In: Journal of Industrial Ecology. Vol. 15, No.5, S. 760–775.
- Grosjean, C. / Miranda, P. H. / Perrin, M. / Poggi, P. (2012): Assessment of world lithium resources and consequences of their geographic distribution on the expected development of the electric vehicle industry. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews. Elsevier Ltd. Vol. 16, No.3, S. 1735–1744.
- Gsell, M.; Dehoust, G.; Hülsmann, F.; Brommer, E.; Cheung, E.; Förster, H. et al. (2015). Nutzen statt Besitzen: Neue Ansätze für eine Collaborative Economy. laufendes Forschungsvorhaben im Auftrag des Umweltbundesamtes. Öko-Institut und infras.
- Haan, Peter De, and Rainer Zah. (2013). Chancen Und Risiken Der Elektromobilität in Der Schweiz. Dübendorf: Zentrum für Technologiefolgen-Abschätzung. Retrieved (Der folgende Link führt zur zuvor genannten Veröffentlichung: [http://www.vdf.ethz.ch/service/3487/3488\\_Chancen-und-Risiken-der-Elektromobilitaet-in-der-Schweiz\\_OA.pdf](http://www.vdf.ethz.ch/service/3487/3488_Chancen-und-Risiken-der-Elektromobilitaet-in-der-Schweiz_OA.pdf)).
- Habermacher, Fabienne, Althaus, Hans-Jörg (2011): Modeling Material Inventories and Environmental Impacts of Electric Passenger Cars - Comparison of LCA Results

- between Electric and Conventional Vehicle Scenarios. Dep. of Environmental Sciences Master:94.
- Hacker, F.; Blanck, R.; Hülsmann, F.; Kasten, P.; Loreck, C.; Ludig, S.; Mottschall, M. & Zimmer, W. (2014). eMobil 2050. Szenarien zum möglichen Beitrag des elektrischen Verkehrs zum langfristigen Klimaschutz. Berlin: Öko-Institut.
- Hacker, Florian; Waldenfels, Rut von; Mottschall, Moritz (2015). Wirtschaftlichkeit von Elektromobilität in gewerblichen Anwendungen. Betrachtung von Gesamtnutzungskosten, ökonomischen Potenzialen und möglicher CO<sub>2</sub>-Minderung im Auftrag der Begleitforschung zum BMWi Förderschwerpunkt IKT für Elektromobilität II: Smart Car – Smart Grid – Smart Traffic. Öko-Institut. Berlin.
- Haefeli, U., Matti, D., Schreyer, C., Maibach, M. (2006): Evaluation Carsharing, Schlussbericht. Im Auftrag des Bundesamtes für Energie, Bern.
- Hawkins, Troy R., Bhawna Singh, Guillaume Majeau-Bettez, and Anders Hammer Strømman. (2013). Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles. *Journal of Industrial Ecology* 17(1):53–64. Retrieved August 14, 2013 (Der folgende Link führt zur zuvor genannten Veröffentlichung: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1530-9290.2012.00532.x>).
- Heinrichs, D. (2016). Autonomous Driving and Urban Land Use. In: Maurer M.; Gerdes, JC.; Lenz, B; and H. Winner (ed.). *Autonomous Driving. Technical, Legal and Social Aspects*. Wiesbaden: Springer. P. 213-231.
- Heinrichs, Matthias; Krajzewicz, Daniel; Cyganski, Rita und von Schmidt, Antje. (2016). Disaggregated car fleets in microscopic travel demand modelling. In: *The 7th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (ANT 2016)*. The 7th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies, 23.-26. Mai 2016, Madrid, Spanien. DOI: 10.1016/j.procs.2016.04.111.
- Hertkorn, Georg. (2005). Mikroskopische Modellierung von zeitabhängiger Verkehrsnachfrage und von Verkehrsflußmustern. Dissertation. DLR, Institut für Verkehrsforschung.
- Hoogendoorn, R.; Arem B. Van und S. Hoogendoorn. (2014). Automated Driving, Traffic Flow Efficiency and Human Factors: Literature Review. *Proceedings of the 93th Annual Meeting of the Transportation Research Board*. Washington D.C.
- Hua, T. Q. et al. (2010). Technical Assessment of Compressed Hydrogen Storage Tank Systems for Automotive Applications. *International Journal of Hydrogen Energy* 36.
- Hülsmann, F.; Zimmer, W. (2014): Klimaschutz durch geteiltes Fahrglück? Carsharing. In: *politische ökologie "Postfossile Mobilität" (137)*, S. 67–73, zuletzt geprüft am 21.01.2015.
- Hülsmann, F.; Zimmer, W.; Sunderer, G.; Götz, K. (2014): share - Wissenschaftliche Begleitforschung von car2go mit batterieelektrischen und konventionellen Fahrzeugen. Laufendes Forschungsvorhaben, gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Präsentation Zwischenergebnisse Juni 2014. Öko-Institut & ISOE. Online verfügbar unter: Der folgende Link führt zur zuvor genannten Veröffentlichung: <http://www.oeko.de/oekodoc/2052/2014-629-de.pdf>, zuletzt geprüft am 21.02.2015.

- ICCT (2015). overview of the heavy-duty vehicle market and CO2 emissions in the European Union. Rachel Muncrief; Ben Sharpe. Working Paper 2015-6.
- ifeu, TU Graz. (2015). Zukünftige Maßnahmen Zur Kraftstoffeinsparung Und Treibhausgasreduzierung Bei Schwere Nutzfahrzeugen. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (ifeu) und Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, Technische Universität Graz. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Forschungskennzahl 3711 96 105. Dessau-Roßlau, April 2015.
- ifeu (2011). Umbrella: Umweltbilanzen Elektromobilität - Grundlagenbericht. Heidelberg: Wissenschaftlicher Grundlagenbericht gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. H. Helms, J. Jöhrens, J. Hanusch, U. Höpfner, U. Lambrecht, M. Pehnt. Institut für Energie- und Umweltforschung. Retrieved (Der folgende Link führt zur zuvor genannten Veröffentlichung: <http://www.emobil-umwelt.de/>).
- ifeu (2012). Indikatoren / Kennzahlen Für Den Rohstoffverbrauch Im Rahmen Der Nachhaltigkeitsdiskussion. Dessau: UBA Text 01,2012. J. Giegrich, A.I Liebich, C. Lauwigi, J. Reinhardt. Institut für Energie- und Umweltforschung.
- ifeu (2012b). TREMOD 5.3. Aktualisierung "Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030. Heidelberg: Knörr, W. et al. Gutachten im Auftrag des Umweltbundesamtes. 2012
- ifeu (2013). Ökologische Begleitforschung Zum Flottenversuch Elektromobilität - Endbericht. Heidelberg: H. Helms, U. Lambrecht, J. Jöhrens, M. Pehnt, A. Liebich, U. Weiß, C. Kämper. Institut für Energie- und Umweltforschung.
- ifeu (2015). Weiterentwicklung Und Vertiefte Analyse Der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen. Heidelberg: Institut für Energie und Umweltforschung. Im Auftrag des Umweltbundesamtes.
- ifeu (2016). Weiterentwicklung Und Vertiefte Analyse Der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen. Dessau-Roßlau: Hinrich Helms, Julius Jöhrens, Claudia Kämper, Jürgen Giegrich, Axel Liebich, Regine Vogt, Udo Lambrecht. ifeu- Institut für Energie- und Umweltforschung (ifeu). Umweltbundesamt. UBA Texte. Retrieved April 5, 2016 (Der folgende Link führt zur zuvor genannten Veröffentlichung: <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/weiterentwicklung-vertiefte-analyse-der>).
- IMO (2014). Reduction of Green House Gas emissions of ships - Third IMO GHG Study 2014 – Final Report. International Maritime Organization.
- Infras (2009). Einbezug des Schweizer Flugverkehrs ins EU EHS – Wirtschaftliche Auswirkungen möglicher Szenarien. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Zivilluftfahrt.
- Infas & DLR (2010). Mobilität in Deutschland 2008: Ergebnisbericht. Struktur - Aufkommen - Emissionen - Trends. Technischer Bericht. Der folgende Link führt zur zuvor genannten Veröffentlichung: [http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/MiD2008\\_Abschlussbericht\\_I.pdf](http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/MiD2008_Abschlussbericht_I.pdf).
- Irvine, E.A., B.J. Hoskins, K.P. Shine (2014): A simple framework for assessing the trade-off between the climate impact of aviation carbon dioxide emissions and contrails for a single flight, Environmental Research Letters 9 (2014) 064021

- ISI and IZT. (2009). Rohstoffe Für Zukunftstechnologien. edited by Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung. Stuttgart: G. Angerer, L. Erdmann, F. Marscheider-Weidemann, M. Scharp, A. Lüllmann, V. Handke, M. Marwede. Fraunhofer Institut für System und Innovationsforschung. Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung. ISI-Schriftenreihe "Innovationspotenziale."
- ISI. (2012). Technologie-Roadmap Energiespeicher Für Die Elektromobilität 2030. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung. Retrieved (Der folgende Link führt zur zuvor genannten Veröffentlichung: [http://www.isi.fraunhofer.de/isi-media/docs/v/de/publikationen/Technologie\\_Roadmapping\\_Broschuere.pdf](http://www.isi.fraunhofer.de/isi-media/docs/v/de/publikationen/Technologie_Roadmapping_Broschuere.pdf)).
- ITD, ifeu. (2015). Pedelection: Verlagerungs- Und Klimaefekte Durch Pedelec-Nutzung Im Individualverkehr. Braunschweig, Heidelberg: Martina Lienhop, Dirk Thomas, Alexander Brandies, Claudia Kämper, Julius Jöhrens, Hinrich Helms. Institut für Transportation Design. Institut für Energie- und Umweltforschung. Gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktors.
- KBA (2011). Datenbankauswertung Der Fahrzeugbestände Und Neuzulassungen 2001-2010 Für TREMOD. Kraftfahrt-Bundesamt. Im Auftrag der BAST.
- Klose, M. (2014). Nachhaltig Mobil in Stuttgart. Wie tickt die Stuttgarter Jugend in bezug auf Carsharing und Elektromobilität. Ergebnisse einer Jugend-Verkehrsbefragung 2013. Hg. v. Statistik und Informationsmanagement, Monatsheft 10/2014.
- Köhler, Uwe (2011). Die Lithium-Ionen-Batterie: Ein Modernes Energiespeichersystem Für Die Elektromobilität. Hannover: Johnson Controls-Saft. MobiliTec 2011, 6.04.2011.
- Korthauer, Reiner (2013). Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. edited by Reiner Korthauer. Berlin, Heidelberg: Springer. Retrieved (Der folgende Link führt zur zuvor genannten Veröffentlichung: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-30653-2>).
- Krajzewicz, Daniel; Cyganski, Rita; Heinrichs, Matthias und Erdmann, Jakob (2016). Benefits of using microscopic models for simulating air quality management measures. Transportation Research Board Annual Meeting, 11.-14. Jan. 2016, Washington, D.C., USA.
- Kröger, Lars; Kuhnimhof, Tobias und Stefan Trommer (2016). Modelling the Impact of Automated Driving – Private AV Scenarios for Germany and the US. European Transport Conference 2016, 4.-7. Oktober 2016, Barcelona, Spanien. (noch nicht erschienen).
- Landeshauptstadt Stuttgart, Statistisches Amt (2013). Verkehr und Mobilität in Stuttgart. Ergebnisse der Bürgerumfrage 2013. In: Statistik und Informationsmanagement (9/2013), S. 232–260, zuletzt geprüft am 21.01.2015.
- Lang, Nikolaus; Mei-Pochtler, Antonella; Rüßmann, Michael und Jan-Hinnerk Mohr. (2015). Revolution Versus Regulation: The Make-or-Break Questions About Autonomous Vehicles. Der folgende Link führt zur zuvor genannten Veröffentlichung: <https://www.bcgperspectives.com/content/articles/automotive-revolution-versus-regulation-makebreakquestions-autonomous-vehicles/>. Abgerufen am 7. 7.2016.
- Lenz, Barbara; Fraedrich, Eva; Cyganski, Rita (2016). Riding in an autonomous car: what about the user perspective? 21th International Conference of the Hong Kong Society

- for Transportation Studies (HKSTS), 10.-12. Dezember 2016, Hong Kong (zur Veröffentlichung akzeptiert).
- Litman, Todd (2015). Autonomous Vehicle Implementation Predictions. Implications for Transport Planning. Victoria Transport Policy Institute. Der folgende Link führt zur zuvor genannten Veröffentlichung: <http://vtpi.org>
- Lohse, Dieter (2011). Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung, Band 2., 3. Auflage. Beuth Verlag GmbH. Berlin u. a. O.
- Maibach, M.; Schreyer, C.; Sutter, D.; van Essen, H.P.; Boon, B.H.; Smokers R., Schroten, A.; Doll, C.; Pawlowska, B.; Bak, M. (2008): Handbook on estimation of external costs in the transport sector, erarbeitet im Rahmen der Studie „Internalisation Measures and Policies for All external Cost of Transport IMPACT“. Studie im Auftrag der Europäischen Kommission. INFRAS, CE Delft, ISI Fraunhofer, Universität Gdansk. Delft.
- Majeau-Bettez, Guillaume, Troy R. Hawkins, and Anders Hammer Strømman. (2011). Life Cycle Environmental Assessment of Lithium-Ion and Nickel Metal Hydride Batteries for Plug-in Hybrid and Battery Electric Vehicles. Environmental science & technology 45(10):4548–54. Retrieved (Der folgende Link führt zur zuvor genannten Veröffentlichung: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21506538>).
- Majer, S., Stecher, K., Adler, P., Thrän, D. & Müller-Langer, F., 2013. Biomassepotenziale und Nutzungskonkurrenzen: Kurzstudie im Rahmen der Wissenschaftlichen Begleitung, Unterstützung und Beratung des BMVBS in den Bereichen Verkehr und Mobilität mit besonderem Fokus auf Kraftstoffen und Antriebstechnologien sowie Energie und Klima. (Der folgende Link führt zur zuvor genannten Veröffentlichung: <http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/UI-MKS/mks-kurzstudie-nutzungskonkurrenzen>)
- MAN. n.d. Euro 6: Sauber Und Kraftstoffsparend – Dank Innovativer Technologien. Retrieved October 19, 2015 (Der folgende Link führt zur zuvor genannten Veröffentlichung: <http://www.corporate.man.eu/de/man-kann/die-zukunft-mitgestalten/Euro-6.html>).
- McKinsey (2012). Urban Buses : Alternative Powertrains for Europe.
- MiD 2008. Follmer, R.; Gruschwitz, D.; Jesske, B.; Quandt, S.; Lenz, B.; Nobis, C.; Köhler, K. & Mehlin, M. (2010). Mobilität in Deutschland 2008. Datensätze der MiD 2008. Berlin, Bonn: infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH (infas); Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR).
- Miehlke, Peter (2005). Der Fluggastsitz – Vom Konzept Zum Produkt. Retrieved (Der folgende Link führt zur zuvor genannten Veröffentlichung: [http://www.mp.haw-hamburg.de/pers/Scholz/dglr/hh/text\\_2005\\_10\\_13\\_Fluggastsitz.pdf](http://www.mp.haw-hamburg.de/pers/Scholz/dglr/hh/text_2005_10_13_Fluggastsitz.pdf)).
- Mocanu, Tudor; Winkler, Christian (2016). Petrol, Diesel or Electric? An Extension of Passenger Transport Models for Differentiating Car Travel Demand. Paper presented at the 6th TRB Innovations in Travel Modeling Conference, Denver, Colorado. Der folgende Link führt zur zuvor genannten Veröffentlichung: [http://tfresource.org/images/5/5e/ITM16\\_PETROL%2C\\_DIESEL\\_OR\\_ELECTRIC%3F\\_AN\\_EXTENSION\\_OF\\_PASSENGER\\_TRANSPORT\\_MODELS.pdf](http://tfresource.org/images/5/5e/ITM16_PETROL%2C_DIESEL_OR_ELECTRIC%3F_AN_EXTENSION_OF_PASSENGER_TRANSPORT_MODELS.pdf).

- Mock, Peter (2010). Entwicklung eines Szenariomodells zur Simulation der zukünftigen Marktanteile und CO<sub>2</sub>-Emissionen von Kraftfahrzeugen (VECTOR21). Dissertation. Universität Stuttgart, zuletzt geprüft am 05.10.2016.
- Mock, Peter; Tietge, Uwe; Franco, Vicente; German, John; Bandivadekar, Anup; Ligterink, Norbert; Lambrecht, Udo (2014). From Laboratory to Road. A 2014 Update of Official and „Real-World“ Fuel Consumption and CO<sub>2</sub> Values for Passenger Cars in Europe. White Paper. International Council on Clean Transportation (ICCT); Nederlandse Organisatie voor toegepast-natuurwetenschappelijk onderzoek (TNO); Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU); Kühlwein - Ingenieurwissen für saubere Umwelt (KISU).
- MWV (2014). Mineralölwirtschaftsverband e.V. Einfuhr/Ausfuhr/Erzeugung von Mineralölprodukten 2014. Verfügbar unter: Der folgende Link führt zur zuvor genannten Veröffentlichung: <http://www.mwv.de/index.php/daten/statistikeninfoportal>. Zuletzt zugegriffen am 07.10.2015.
- Notter, Dominic a et al. (2010). Contribution of Li-Ion Batteries to the Environmental Impact of Electric Vehicles. Environmental science & technology 44(17):6550–56. Retrieved (Der folgende Link führt zur zuvor genannten Veröffentlichung: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20695466>).
- OECD/ITF und CPB. (2015). Urban Mobility System Upgrade. How shared selfdriving cars could change city traffic. Der folgende Link führt zur zuvor genannten Veröffentlichung: [http://www.internationaltransportforum.org/Pub/pdf/15CPB\\_Self\\_drivingcars.pdf](http://www.internationaltransportforum.org/Pub/pdf/15CPB_Self_drivingcars.pdf). Abgerufen am 22.1.2016.
- Öko-Institut, DLR-IVF (2009a). Renewbility – Stoffstromanalyse nachhaltige Mobilität im Kontext erneuerbarer Energien bis 2030. FZK 0327547 im Auftrag d. Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Endbericht Teil 1: Methodik und Datenbasis.
- Öko-Institut (2011). Ökobilanz Zum Recycling von Lithium-Ionen-Batterien (Projekt LithoRec). Freiburg: M. Buchert, W. Jenseit, C. Merz, D. Schüler. Öko-Institut.
- Öko-Institut (2013). Treibhausgas-Emissionen Durch Infrastruktur Und Fahrzeuge Des Straßen-, Schienen- Und Luftverkehrs Sowie Der Binnenschifffahrt in Deutschland. Berlin: Moritz Mottschall, Thomas Bergmann. Umweltbundesamt. Retrieved (Der folgende Link führt zur zuvor genannten Veröffentlichung: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/treibhausgas-emissionen-durch- infrastruktur>).
- Öko-Institut (2014). Konventionelle und alternative Fahrzeugtechnologien bei Pkw und schweren Nutzfahrzeugen – Potenziale zur Minderung des Energieverbrauchs bis 2050. Berlin: Friederike Hülsmann, Moritz Mottschall, Florian hacker, Peter Kasten. Working Paper 3/2014
- Ortúzar, Juan de Dios; Willumsen, Luis G. (2011). Modelling Transport. 4. Auflage. John Wiley & Son Ltd., Chichester u. a. O.
- Oxis Energy Ltd. (2013). Rechargeable Lithium-Sulfur Pouch Cell – Application Note Electric Vehicles. Rechargeable Lithium-Sulfur Pouch Cell (0):1.

- Oxis Energy Ltd. (2016). Next Generation Battery Technology. Rechargeable Lithium Sulfur batteries have a wide range of applications due to their light weight, high gravimetric energy density and inherent safety. Retrieved March 18, 2016 (Der folgende Link führt zur zuvor genannten Veröffentlichung: <http://www.oxisenergy.com/applications/#electric-vehicle>).
- Penanhoat, O. (Snecma), et al.: Emission measurements and combustion modelling in CAER project; Sustainable Aviation Fuels Forum – FORUM-AE Workshop, Madrid, 21.10.2014 Der folgende Link führt zur zuvor genannten Veröffentlichung: [http://www.core-jetfuel.eu/Shared%20Documents/Joseph\\_Burguburu\\_CAERresults.pdf](http://www.core-jetfuel.eu/Shared%20Documents/Joseph_Burguburu_CAERresults.pdf)
- Randelhoff, M. (2012). Besitzen junge Menschen wirklich weniger Pkw? Oder: Spaß mit Statistik. Online verfügbar unter: Der folgende Link führt zur zuvor genannten Veröffentlichung: <http://www.zukunft-mobilitaet.net/11251/analyse/studie-jugendliche-pkw-besitz-wandel/>.
- Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) (2012). Umweltgutachten. Verantwortung in einer begrenzten Welt.
- Salman, Omer, and Yanbin Chen (2013). Comparative Environmental Analysis of Conventional and Hybrid Wheel Loader Technologies - A Life Cycle Perspective.
- Sauer, Dirk Uwe, Achim Kampker, Christoph Deutschens, and Hans Heimes. (2013). Batteriesysteme Und Deren Steuerung. in Elektromobilität: Grundlagen einer Zukunftstechnologie, edited by Achim Kampker, Dirk Vallée, and Armin Schnettler. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- Scherr, Christopher (2015). Elektrochemisches Verhalten von Lithium-Schwefel-Zellen Mit Unterschiedlicher Kathodenstruktur. Schriftenr. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing.
- Schleinitz et al. (2015). The German Naturalistic Cycling Study – Comparing cycling speed of riders of different e-bikes and conventional bicycles. Safety Sci.
- Schmidt, Michael (2015). Rohstoffrisikobewertung – Platingruppenmetalle.
- Schneider, Sebastian (2011). A methodology for the extrapolation of trip chain data. Dissertation. DLR-Forschungsbericht. DLR-FB 2011-18
- Schoettle, B. und M. Sivak (2014). Public opinion about self-driving vehicles in China, India, Japan, the U.S., the U.K., and Australia. The University of Michigan, Transportation Research Institute, Report No. UMTRI-2014-30.
- Schönduwe, R.; Bock, B.; Deibel, I. (2012). Alles wie immer, nur irgendwie anders? Trends und Thesen zu veränderten Mobilitätsmustern junger Menschen (10).
- Schweimer, Georg W., and Marcel Levin (2000). Life Cycle Inventory for the Golf A4. Environment and Research 1–40. Retrieved (Der folgende Link führt zur zuvor genannten Veröffentlichung: [http://www.volkswagenag.com/vwag/vwcorp/info\\_center/en/publications/2007/01/Golf\\_A4\\_Life\\_Cycle\\_Inventory.-bin.acq/qual-BinaryStorageItem.Single.File/golfa4\\_english.pdf](http://www.volkswagenag.com/vwag/vwcorp/info_center/en/publications/2007/01/Golf_A4_Life_Cycle_Inventory.-bin.acq/qual-BinaryStorageItem.Single.File/golfa4_english.pdf)).
- Schwermer, Sylvia; Preiss, Phillip; Müller, Wolf (2014). Best-Practice-Kostensätze für Luftschadstoffe, Verkehr, Strom- und Wärmerzeugung, Anhang B der „Methodenkonvention 2.0 zur Schätzung von Umweltkosten“. Hg. v.

- Umweltbundesamt (UBA). Institut für Energiewirtschaft und rationelle Energieanwendung (IER Stuttgart). Dessau.
- Society of Automotive Engineers (SAE) (2014). Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems. Surface Vehicle Information Report.
- Statistisches Bundesamt (2014). Einwohnerzahlen nach Altersgruppen, 2000 – 2030.
- Stoll, John D. (2016). GM Executive Credits Silicon Valley for Accelerating Development of Self-Driving Cars. In: The Wall Street Journal, 10. Mai 2016. Der folgende Link führt zur zuvor genannten Veröffentlichung: <http://www.wsj.com/articles/gmexecutive-credits-silicon-valley-foraccelerating-development-of-self-driving-cars-1462910491>. Abgerufen am 7. 7.2016.
- TNS Infratest (2014): Einschätzungen zum innerstädtischen Wohnen in Stuttgart. Repräsentative Bevölkerungsbefragung im Auftrag von Wüstenrot & Württembergische, 2014, Der folgende Link führt zur zuvor genannten Veröffentlichung:: [https://www.wwa-ag.com/rmedia/media/konzern/dokumente\\_2/studien/14-04-15\\_Grafiken\\_WW-Umfrage\\_Stuttgart\\_WohnenInnenstadt.pdf](https://www.wwa-ag.com/rmedia/media/konzern/dokumente_2/studien/14-04-15_Grafiken_WW-Umfrage_Stuttgart_WohnenInnenstadt.pdf), zuletzt geprüft am 23.01.2015.
- Thrän et al. (2015). Meilensteine 2030 - Elemente und Meilensteine für die nachhaltige Entwicklung einer tragfähigen und nachhaltigen Bioenergiestrategie. Leipzig.
- TU Dresden. (ohne Jahresangabe). Der folgende Link führt zur zuvor genannten Veröffentlichung: <https://tu-dresden.de/bu/verkehr/ivs/srv/>. Abgerufen am 23.8.2016.
- UBA (1999). Emissionsbilanz Pkw Über Den Gesamten Lebensweg. Stuttgart: Universität Stuttgart, IFEU, PE International.
- UBA (2016). Öko-Institut, INFRAS, DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT). Erarbeitung einer fachlichen Strategie zur Energieversorgung des Verkehrs bis zum Jahr 2050. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes.
- UNCTAD (2013). Review of maritime transport 2013. United Nations Conference on Trade and Development. New York. United Nations.
- VDA (ohne Jahresangabe). Der folgende Link führt ins Internet: <https://www.vda.de/de/themen/innovation-undtechnik/automatisiertes-fahren/schritt-fuer-schritt-in-die-zukunft.html>. Abgerufen am 17.8.2016.
- Verband Region Stuttgart (2011). Begleituntersuchungen zur Fortschreibung des Regionalverkehrsplans – Band 1: Mobilität und Verkehr in der Region Stuttgart 2009/2010. Regionale Haushaltsbefragung zum Verkehrsverhalten. Hg. v. Verband Region Stuttgart. Stuttgart (29), zuletzt geprüft am 21.01.2015.
- VP 2030. Verkehrsverflechtungsprognose 2030, Intraplan, BVU, IVV, Planco im Auftrag des BMVI. Schlussbericht Juni 2014.
- VW (2008). Der Golf. Umweltprädikat - Hintergrundbericht. Wolfsburg: Volkswagen AG.
- VW (2010a). Daten per Mail. Wolfsburg: B. Boßdorf-Zimmer.Volkswagen AG.
- VW (2010b). Der Neue Transporter. Umweltprädikat - Hintergrundbericht. Wolfsburg: Volkswagen AG.

- Wadud, Zia; MacKenzie, Don und Paul Leiby (2016). Help or hindrance? The travel, energy and carbon impacts of highly automated vehicles. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Jg. 86, S. 1–18.
- Wadud, Zia; MacKenzie, Don und Paul Leiby (2016). Help or hindrance? The travel, energy and carbon impacts of highly automated vehicles. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Jg. 86, S. 1–18.
- Weidema, B. P. et al. (2013). *The Ecoinvent Database: Overview and Methodology, Data Quality Guideline for the Ecoinvent Database Version 3*. Zürich: Ecoinvent Center. Retrieved (Der folgende Link führt zur zuvor genannten Veröffentlichung: [www.ecoinvent.org](http://www.ecoinvent.org)).
- Wikipedia (2016). Lithium–sulfur Battery. *Wikipedia: The Free Encyclopedia* 6. Retrieved (Der folgende Link führt zur zuvor genannten Veröffentlichung: [https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium-sulfur\\_battery](https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium-sulfur_battery)).
- Willumsen, Luis. G. (2013). Forecasting the impact of Self-Driving-Cars. What to do about them in our models and forecasts. Vortrag auf der 2013 Citilab Asia User Conference, Karon, Thailand, unveröffentlicht.
- WiMobil (2016). BMW AG, DLR, DB Rent GmbH, Landeshauptstadt München, Universität der Bundeswehr München, Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Berlin. Wirkung von E-Car Sharing Systemen auf Mobilität und Umwelt in urbanen Räumen (WiMobil). Gemeinsamer Abschlussbericht. Online verfügbar unter: Der folgende Link führt zur zuvor genannten Veröffentlichung: [http://www.erneuerbar-mobil.de/de/projekte/foerderung-von-vorhaben-im-bereich-der-elektromobilitaet-ab-2012/ermittlung-der-umwelt-und-klimafaktoren-der-elektromobilitaet/Abschlussbericht\\_WiMobil.pdf](http://www.erneuerbar-mobil.de/de/projekte/foerderung-von-vorhaben-im-bereich-der-elektromobilitaet-ab-2012/ermittlung-der-umwelt-und-klimafaktoren-der-elektromobilitaet/Abschlussbericht_WiMobil.pdf) (letzter Zugriff am 19.09.2016).
- Winner, Hermann (2015). Use-Cases for Autonomous Driving. In: Markus Maurer, Chris Gerdes, Barbara Lenz, und Hermann Winner (Hrsg.), *Autonomous Driving. Technical, Legal and Social Aspects*, Springer, S. 9-37.
- Wurster, R.; Weindorf, W., Tittel, W; Schmidt, P. Heidt, C., Lambrecht U; Lischke, A.; Müller, S. (2014). LNG als Alternativkraftstoff für den Antrieb von Schiffen und schweren Nutzfahrzeugen. Im Auftrag des BMVI. München/Ottobrunn, Heidelberg, Berlin
- Yan, Jianhua et al. (2015). High-Performance Lithium–Sulfur Batteries with a Cost-Effective Carbon Paper Electrode and High Sulfur-Loading. *Chemistry of Materials* 27(18):6394–6401. Retrieved (Der folgende Link führt zur zuvor genannten Veröffentlichung: <http://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.chemmater.5b02533>).
- Zimmer, R. (2012). Bedeutung von Mobilität für Jugendliche in Stadt und Land. *Forschungsforum „Mobilität für Alle“ 2012 – jung und mobil*. Unabhängiges Institut für Umweltfragen (UfU) e.V. Wien, 17.10.2012, zuletzt geprüft am 22.01.2015.
- Zimmer, Wiebke; Buchert, Matthias; Dittrich, Stefanie; Hacker, Florian; Harthan, Ralph; Hermann, Hauke et al. (2011). OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen. Integrierte Betrachtung von Fahrzeugnutzung und Energiewirtschaft. Öko-Institut; ISOE. Förderung durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Berlin.
- Zmud, J., Sener, I.N. und J. Wagner (2016). Consumer Acceptance and Travel Behavior Impacts of Automated Vehicles. *Texas A&M Transportation Institute: PRC 15-*

49F.Brookhuis K. A.; de Waard D. und W. H. Janssen. (2001). Behavioural impacts of Advanced Driver Assistance Systems – an overview. Special Issue: Implementation Issues of Advanced Driver Assistance Systems, European Journal of Transport and Infrastructure Research, Vol. 3, S. 245-254

## 16 ANHANG: MODELLIERUNG VON MATERIALVORLEISTUNGEN

### 16.1 BASISTABELLEN PKW UND LEICHTE NUTZFAHRZEUGE

**Tabelle 16-1: Differenzierung von Personenkraftwagen für das Stützjahr 2030**

Größen- -klasse	Antriebs- -konzept	Leergewicht nach Leichtbauvariante				
		Ohne	-10 %	-20 %	-30 %	-40 %
<b>Klein</b>	Benzin	1.077	969	861	754	646
	LPG	1.077	969	861	754	646
	Diesel	1.086	978	870	763	655
	CNG	1.077	969	861	754	646
	Hybrid	1.158	1.050	942	835	727
	PHEV	1.251	1.143	1.035	928	820
	BEV	1.186	1.078	970	863	755
	FCEV	1.241	1.133	1.025	918	810
<b>Mittel</b>	Benzin	1.196	1.076	956	837	717
	LPG	1.196	1.076	956	837	717
	Diesel	1.207	1.087	967	848	728
	CNG	1.196	1.076	956	837	717
	Hybrid	1.288	1.168	1.048	929	809
	PHEV	1.399	1.279	1.159	1.040	920
	BEV	1.337	1.217	1.097	978	858
	FCEV	1.382	1.262	1.142	1.023	903
<b>Groß</b>	Benzin	1.436	1.292	1.148	1.005	861
	LPG	1.436	1.292	1.148	1.005	861
	Diesel	1.448	1.304	1.160	1.017	873
	CNG	1.436	1.292	1.148	1.005	861
	Hybrid	1.545	1.401	1.257	1.114	970
	PHEV	1.674	1.530	1.386	1.243	1.099
	BEV	1.593	1.449	1.305	1.162	1.018
	FCEV	1.659	1.515	1.371	1.228	1.084

Bemerkung: Gewichtsreduktion der Leichtbauvarianten berücksichtigt nicht den Akku, weshalb der Reduktionsanteil der Elektrofahrzeuge gegenüber den konventionellen Antrieben etwas niedriger ausfällt.

Quelle: Renewbility III

**Tabelle 16-2: Differenzierung von leichten Nutzfahrzeugen N1 class III für das Stützjahr 2030**

Größen- klasse	Antriebs- konzept	Leergewicht nach Leichtbauvariante			
		Ohne	-10 %	-25 %	-40 %
<b>N1 III</b>	Diesel	1.833	1.700	1.375	1.100
	REEV	2.131	1.948	1.673	1.215
	BEV	1.907	1.724	1.449	1.174

Quelle: Renewbility III

Tabelle 16-3: Ausprägung der Leichtbauszenarien für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge

Personenkraftwagen	
<b>10 % Leichtbau</b>	10 % weniger Stahlmaterial aufgrund von „High-strength-Steels“. Downsizing: Anteilige Gewichtsreduktion von Karosserie und Antriebsstrang auf 90 % des Ausgangsgewichts
<b>20 % Leichtbau</b>	10 % weniger Stahlmaterial aufgrund von „High-strength-Steels“. 70 % der übrigen Stahlkomponenten werden durch Aluminium substituiert. Downsizing: Anteilige Gewichtsreduktion von Karosserie und Antriebsstrang auf 80 % des Ausgangsgewichts.
<b>30 % Leichtbau</b>	10 % weniger Stahlmaterial aufgrund von „High-strength-Steels“. 65 % der übrigen Stahlkomponenten werden durch Aluminium substituiert. 35 % der übrigen Stahlkomponenten werden durch CFK substituiert. Downsizing: Anteilige Gewichtsreduktion von Karosserie und Antriebsstrang auf 70 % des Ausgangsgewichts.
<b>40 % Leichtbau</b>	10 % weniger Stahlmaterial aufgrund von „High-strength-Steels“. 100 % der übrigen Stahlkomponenten werden durch CFK substituiert. Downsizing: Anteilige Gewichtsreduktion von Karosserie und Antriebsstrang auf 60 % des Ausgangsgewichts.
Leichte Nutzfahrzeuge	
<b>10 % Leichtbau</b>	10 % weniger Stahlmaterial aufgrund von „High-strength-Steels“. Downsizing: Anteilige Gewichtsreduktion von Karosserie und Antriebsstrang auf 90 % des Ausgangsgewichts.
<b>25 % Leichtbau</b>	10 % weniger Stahlmaterial aufgrund von „High-strength-Steels“. 90 % der übrigen Stahlkomponenten werden durch Aluminium substituiert. Downsizing: Anteilige Gewichtsreduktion von Karosserie und Antriebsstrang auf 75 % des Ausgangsgewichts.
<b>40 % Leichtbau</b>	10 % weniger Stahlmaterial aufgrund von „High-strength-Steels“. 20 % der übrigen Stahlkomponenten werden durch Aluminium substituiert. 80 % der übrigen Stahlkomponenten werden durch CFK substituiert. Downsizing: Anteilige Gewichtsreduktion von Karosserie und Antriebsstrang auf 60 % des Ausgangsgewichts.

Quelle: Renewbility III

**Tabelle 16-4: Bauteilgewichte für den Antriebsstrang eines mittleren Pkw (Basisjahr 2010)**

Bauteil	Gewicht (kg)
<b>Motor (Ottomotor)</b>	126
<b>Motor (Diesel)</b>	135
<b>Motor (Elektro)</b>	34
<b>Zusatzbauteile (Diesel/Benzin)</b>	141-143
<b>Zusatzbauteile (BEV/FCEV)</b>	170-179
<b>Brennstoffzelle (FCEV)</b>	125

Quelle: (ifeu 2011)

## 16.2 BASISTABELLEN LASTKRAFTWAGEN

Die Grundlagen der Modellierung der Lastkraftwagen wurden in Kapitel 10.2.2 bereits beschrieben, hier werden daher lediglich die technischen Angaben zur Fahrzeugkonfiguration (Tabelle 16-5) und die Materialdifferenzen der Leichtbauvarianten gegenüber dem Basisfahrzeug (Tabelle 16-6) gezeigt.

**Tabelle 16-5: Technische Angaben zu den Fahrzeugkonfigurationen der Lkw**

	Zul. Gesamtgewicht	Antriebsart	Elektromotor	Akku (2010/2030/2050)
<b>Solo-Lkw</b>	3,5 bis 7,5 t	Diesel		
		HEV*	50 kW	3,7 / 3,0 / 2,7 kWh
		PHEV**	110 kW	90,6 / 68,2 / 63,2 kWh
	7,5 bis 12 t	Diesel		
		HEV*	50 kW	5,4 / 4,4 / 4,0 kWh
		PHEV**	130 kW	132,8 / 97,4 / 90,0 kWh
	> 12 t	Diesel		
		HEV*	60 kW	7,5 / 6,1 / 5,6 kWh
		PHEV**	200 kW	186,4 / 141,9 / 131,5 kWh
<b>Last-/ Sattelzug</b>	bis 40 t	Diesel		
		HEV*	70 kW	10,8 / 8,7 / 8,0 kWh
		O-Lkw	320 kW	10,1 / 8,2 / 7,6 kWh

\*HEV = Hybrid, \*\*PHEV= Plug-In Hybrid, \*\*\*O-Lkw = Oberleitungs-Lkw

Quelle: Renewbility III

**Tabelle 16-6: Leichtbau bei den Lkw**

	Zul. Gesamtgewicht	Leichtbau (konstruktiv)	Differenz Stahl	Differenz Aluminium
<b>Solo-Lkw</b>	3,5 bis 7,5 t	-105 kg	-241 kg	+53 kg
	7,5 bis 12 t	-180 kg	-412 kg	+91 kg
	> 12 t	-336 kg	-770 kg	+170 kg
<b>Last-/Sattelzug</b>	bis 40 t	-755 kg	-1.730 kg	+383 kg

Quelle: Renewbility III

## 16.3 MODELLIERUNG KARBONFASERVERSTÄRKTE KUNSTSTOFFE (CFK)

Zur Abbildung der Leichtbauvarianten im Fahrzeugbau spielen neben Aluminium und optimierter Stahlbauweise karbonfaserverstärkte Kunststoffe (CFK) eine wichtige Rolle. Bereits heute wird CFK im Fahrzeugbau eingesetzt, jedoch aufgrund seiner kostenintensiven Herstellung noch nicht in der Massenfertigung. Beispiele für CFK-Fahrzeugbau sind der Flugzeugbau und die Spezialkarosserien von Rennsportfahrzeugen. Der BMW i3 ist das erste Fahrzeug mit einer CFK Karosserie in großer Stückzahl. CFK bietet von allen Werkstoffsystemen bisher das höchste Leichtbaupotenzial. So wurden bisher 25 % Gewichtseinsparung gegenüber Aluminium und 60 % gegenüber Stahl in vielen Anwendungsbeispielen nachgewiesen (Evertz et al. 2013). Viele große Autobauer setzen auf CFK als eine der wichtigsten Technologien für zukünftige Autos (Bose-Munde 2014).

Der heute noch hohe Preis für CFK-Komponenten ist auf den hohen Energieeinsatz und die aufwändige heute noch vielfach manuelle Herstellung zurückzuführen. Die ecoinvent 3.1 Datenbank bietet noch keine Prozesse für CFK Module an. Aufgrund der zentralen Rolle von Leichtbau für die Renewbility Szenarien wurde ein eigener CFK-Datensatz für die Bewertung der herstellungsbedingten Treibhausgasemissionen erarbeitet. Aufbauend auf ecoinvent Prozessdaten zu Glasfasern wurde nach (Duflou et al. 2009) die Herstellung eines karbonfaserverstärkten Fahrzeugbauteils mit benötigten Materialien und Herstellungsaufwendungen modelliert. Der wichtigste Beitrag, den die Herstellung zur Klimabilanz leistet hängt mit dem Produktionsstroms des Bauteils zusammen. Dieser liegt gegenüber Stahl um ca. das 2,5 fache höher, so dass heute gefertigte CFK-Karosserien bei durchschnittlichem Strommix eine schlechtere Klimabilanz haben als konventionelle Stahlkarosserien.

## 16.4 MODELLIERUNG ENERGIESPEICHERTECHNOLOGIEN FÜR ELEKTROFAHRZEUGE

Die Elektrifizierung verschiedener Verkehrsmittel betrifft sowohl den Personen- als auch den Güterverkehr. Im Zuge von verschiedenen Projekten zur Umweltbilanzierung von Fahrzeugen wird in dem Modul Akkumulator in eLCAR auf eigene Akkudaten zurückgegriffen, die sich aus Literaturrecherche und Herstellerdaten zusammensetzen. Derzeit ist die verbreitetste Speichertechnologie für Fahrzeuge der Lithium-Ionen Akku. Sowohl für die Personenkraftwagen und Elektrofahrräder als auch für die schweren Nutzfahrzeuge wird auf die gleiche Datengrundlage der Akkutechnologie zurückgegriffen. Angepasst wird die jeweilige Dimensionierung des speziellen Akkus nach Fahrzeug (z. B. Kapazität). Im Folgenden wird die allgemeine Zusammensetzung der Zellchemie beschrieben.

### 16.4.1 LITHIUM-IONEN TECHNOLOGIE

Der Akku ist eine der wichtigsten zwischen den Fahrzeugkonzepten differierende Komponenten, der einen relevanten Einfluss auf die Klima- und Materialbilanz nimmt. Betrachtet wurden die drei derzeit am häufigsten in Fahrzeugen eingesetzten Kathodentypen, jeweils mit einem Akkugehäuse aus Stahl: Der Nickel-Kobalt-Aluminium-Akku (NCA), der Nickel-Mangan-Kobalt-Akku (NMC) und der Lithium-Eisenphosphat-Akku (LFP). Dabei wird für alle Kathodentypen von der heute marktgängigen Graphit-Anode ausgegangen. Alternative Lithium-Titanat-Anoden ( $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$  = LTO-Akkus) können ebenfalls mit verschiedenen Kathodenmaterialien kombiniert werden, kommen bisher vor allem aufgrund der hohen Kosten jedoch selten zum Einsatz.

Die Materialzusammensetzung der einzelnen Zelltypen wurde auf Basis verschiedener Publikationen abgeleitet (Bauer 2010; Gaines and Dunn 2012; Hawkins et al. 2013; Majeau-Bettez, Hawkins, and Strømman 2011; Notter et al. 2010; Öko-Institut 2011) und greift außerdem auf vertrauliche Herstellerdaten zurück (ifeu 2013). Die in den Zellen eingesetzte Materialmenge wird dann im Wesentlichen von der Kapazität und Energiedichte der Akkus bestimmt. Die Akkukapazitäten je Fahrzeugkategorie und -konzept wurden in Renewbility vorgegeben. Die Energiedichte der einzelnen Akkutypen (siehe Tabelle 16-7) wurde aus verschiedenen Datenblättern und Studien abgeleitet.

**Tabelle 16-7: Angenommene Energiedichte verschiedener Zelltypen auf Akkusystemebene (in Wh/kg)**

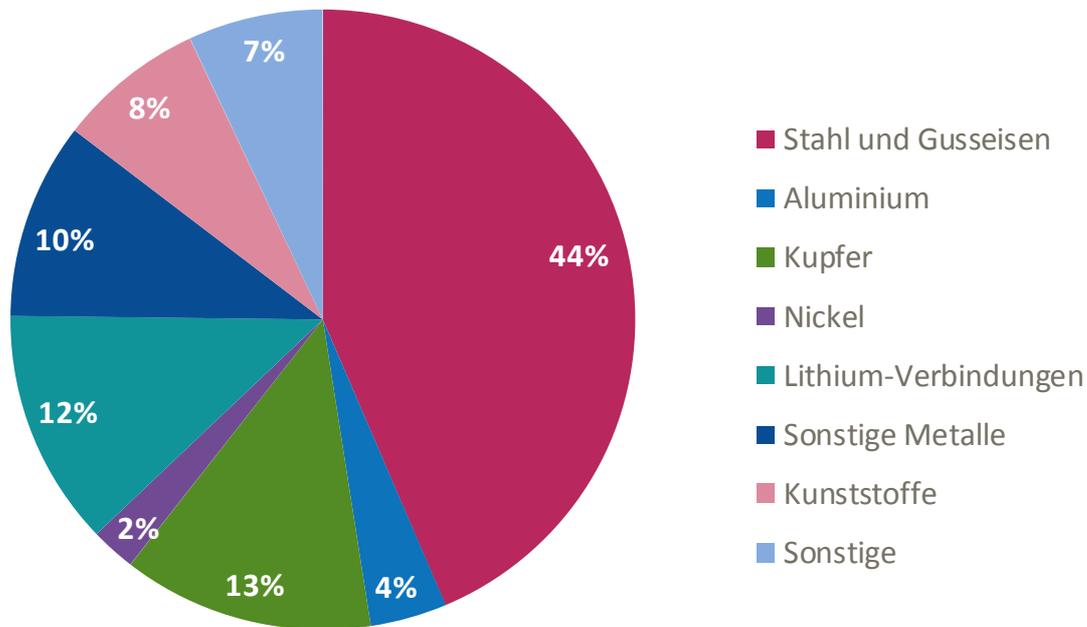
		2015	2030
<b>Energieoptimiert für BEV und REEV</b>			
<b>LFP</b>	System	70	130
<b>NMC</b>	System	90	155
<b>NCA</b>	System	85	130
<b>Leistungsoptimiert für PHEV, HEV und FCEV</b>			
<b>LFP</b>	System	56	120
<b>NMC</b>	System	72	145
<b>NCA</b>	System	68	120

Quelle: ifeu Abschätzung auf Basis (A123 2011; Burke and Miller 2009; ECC 2013; Frischknecht 2012; Haan and Zah 2013; ISI 2012; Köhler 2011; Korthauer 2013; Sauer et al. 2013)

Bei der Bilanzierung wird sowohl die Materialherstellung und Materialverarbeitung als auch die Fertigung von Zellen, Akkumanagementmodul und Akkugehäuse berücksichtigt. Zusätzlich werden Energieeinsatz und Transportprozesse der Fertigung bilanziert. Der Strom- und Wärmebedarf der Herstellung hängt dabei vor allem vom Automatisierungsgrad der Fertigung ab. Es wurde für die heutige Situation von einer modernen Serienfertigung in Deutschland auf Basis von Primärdaten ausgegangen. Für das Szenario 2030 wird angenommen, dass (1) der Energieeinsatz der Zellproduktion proportional zur verarbeiteten Werkstoffmenge sinkt, also bezogen auf die Kilowattstunde Akkukapazität mit einer Steigerung der Energiedichte, und (2) die kumulierte Produktionsmenge bis 2030 deutlich steigt, so dass zusätzlich zu Skaleneffekte kommt. Dabei wird die Entwicklung des Energieeinsatzes mit der Entwicklung der Energiedichte korreliert.

Abbildung 16-1 zeigt die Materialzusammensetzung eines BEV-Akkus für das Stützjahr 2015. Die Herstellung von einer Kilowattstunde dieser Akku ist mit 110 kg Treibhausgasemissionen und mit einem kumulierten Energieaufwand von 1.290 MJ verbunden.

Abbildung 16-1: Materialzusammensetzung eines Lithium-Ionen Akkus für 2015



Anmerkung: Angenommen ist ein Mix aus den Kathodentypen NMC, NCA und LFP  
Quelle: ifeu.

## 16.4.2 POST-LITHIUM-TECHNOLOGIE

Seit ihrer Einführung in der 90er Jahren wurden wieder aufladbare Lithium-Ionen-Akkus kontinuierlich weiterentwickelt. So konnte die Energiedichte durch Optimierung der Akkubestandteile wie Elektrodenmaterialien oder Elektrolyt, sowie durch technische Verbesserungen im Zellbau, stetig verbessert werden. Sowohl die spezifische als auch die volumetrische Energiedichte konnten mehr als verdoppelt werden, bis 2030 werden noch weitere Verbesserungen erwartet. Offensichtlich ist aber auch, dass nach 2030 bedingt durch physikalische Grenzen keine weiteren Steigerungen mehr zu erwarten sind (Korthauer 2013). Deshalb ist es notwendig, für den Zeitraum bis 2050 in Renewbility die Einführung von Alternativen zur Lithium-Ionen-Technologie und deren Einsatz in zukünftigen Fahrzeugkonzepten abzubilden.

In der Wissenschaft werden verschiedene Post-Lithium-Ionen-Technologien diskutiert, welche die Lithium-Ionen Technologie in Zukunft ersetzen sollen. Dazu gehören insbesondere die Lithium-Schwefel-Technologie, welche bereits seit den 1960er Jahren erforscht wird – damals als Primärzelle (Lithium / Schwefeldioxid) kommerziell vermarktet – und die Lithium-Luft-Technologie. Sollten diese Akkutypen bis hin zu kommerziell einsetzbaren Systemen entwickelt werden, würde dies bei der spezifischen Energiedichte

einen Sprung gegenüber der aktuellen Lithium-Ionen-Technologie bedeuten. Die wichtigsten Gründe für die hohe Energiedichte beider Zellkonzepte sind (Korthauer 2013):

- Leichtere Elemente für die Kathode,
- Pro Formeleinheit kann mehr Lithium gespeichert werden,
- Metallisches Lithium ersetzt Graphitanode,
- Verwendung von Schwefel bzw. Sauerstoff anstelle der vergleichsweise teuren Übergangsmetallverbindungen.

Die Herausforderung für die Modellierung des zukünftigen Energiespeichers besteht darin, die Herstellung einer noch nicht bis zur automobilen Anwendungsreife entwickelten Technologie ökobilanziell abzubilden. Dies kann nur auf Basis von Annahmen und Schätzungen geschehen.

Zur Abbildung der Postlithium-Technologie in Renewbility wird der Lithium-Schwefel Akku herangezogen. Zum einen ist die Datenlage für den Lithium-Schwefel Akku (LiS) bisher ergiebiger als für andere Technologien, zum anderen hier kann mit einer potenziellen Marktreife für Elektrofahrzeuge ab 2020/25 (bei jedoch bestehenden Unwägbarkeiten und Unsicherheiten) gerechnet werden. Erste Akkumulatoren mit einer maximal erreichten Energiedichte auf Zellebene zwischen 300 und 350 kWh/kg sind bereits durch die Hersteller<sup>12</sup> OXIS Energy Limited (UK) und Sion Power Corporation (USA) am Markt erhältlich. Die Energiedichte einer serienfertigungsgerechten Pouchzelle beträgt laut aktuell<sup>13</sup> verfügbarem Anwendungsdatenblatt (Oxis Energy Ltd 2013) etwa 200 Wh/kg und soll im Zuge des Revolutionary Electric Vehicle Battery Projects bis 2016 auf 400 Wh/kg gesteigert werden (Oxis Energy Ltd 2016). Folgende Aspekte unterliegen bei der Lithium-Schwefeltechnologie weiterhin der aktuellen Forschung:

- Zusammensetzung bzw. strukturelle Gestaltung des Metalls und des Schwefels
- Zusammensetzung der Kohlenstoff-Schwefel-Struktur
- Wahl bzw. die Wirkmechanismen des Elektrolyten
- Schutz der Lithium-Elektrode
- Untersuchung organischen Verbundmaterials, das Schwefel enthält.
- Der Markteintritt im Falle des Lithium-Luft-Akkumulators ist weitaus unsicherer, da unter anderem folgende Probleme gemäß (Emsley 2014) im Wesentlichen noch nicht gelöst sind:

---

<sup>12</sup> Der folgende Link führt ins Internet: <http://www.oxisenergy.com/technology> [Oxis Energy Limited (Oxfordshire, UK)]  
der folgende Link führt ins Internet: <http://www.sionpower.com/technology.html> [Sion Power Corp. (Tucson, USA)]

<sup>13</sup> Stand: März 2016. Das Anwendungsdatenblatt selbst wurde bereits 2013 erstellt.

## ENDBERICHT

- Entwicklung eines Elektrolyten, der nicht mit dem hochreaktiven Lithium und den sich bildenden Peroxiden reagiert.
- Das Verhindern der Bildung von  $\text{LiOH}$  und  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  aufgrund feuchter Luft und  $\text{CO}_2$ . Hierzu wird eine einfach umzusetzende Zerlegung atmosphärischer Luft benötigt, die heute jedoch so noch nicht verfügbar ist.
- Die Entwicklung reaktionsbeständiger Kathodenmaterialien gegenüber Lithiumperoxid, um die Wiederaufladbarkeit zu gewährleisten.

Weitere Post-Lithium-Technologien, wie beispielsweise Feststoffakkus, Natrium-Ionen bzw. Natrium-Luft, Magnesium- sowie Halogen-basierte Technologien werden aufgrund ihrer Systemeigenschaften oder ihres Entwicklungsstandes ebenfalls außer Acht gelassen.

### 16.4.3 MODELLIERUNG DES LITHIUM-SCHWEFEL-AKKUS

Es gibt unterschiedliche Möglichkeiten der technologischen Umsetzung, die aktuell Gegenstand der Forschung sind. Dies betrifft einerseits den Aufbau der Zelle im Hinblick auf das mechanische Zelldesign des Gehäuses (Beutel, Zylinder oder Prisma) mit den unterschiedlichen Methoden der Elektrodenanordnungen (in Form einer Biskuitrolle oder in gestapelter Abfolge) und andererseits die ebenfalls auf die mechanischen Eigenschaften, aber primär auf die Zellreaktionen einwirkende Wahl des Elektrolyten, des Kathodenaufbaus und des Separators. Wobei die bisher beschriebenen Zellaufbauten noch nicht den gewünschten Spezifikationen im Hinblick auf Zyklenfestigkeit, Energiedichte und Kosten entsprechen, um die Lithium-Ionen-Technologie ablösen zu können. (Scherr 2015), (Wikipedia 2016) und (Alias 2015).

Für die Erstellung der Sachbilanz in Renewbility fiel die Wahl aufgrund der Material- und Gewichtseinsparmöglichkeiten auf ein gestapelt angeordnetes Elektrodendesign mit beutelförmigen Gehäuse (Pouch). Die Anode besteht aus reinem Lithium. Der anodenseitige Stromableiter besteht aus Kupfer. Die Kathode wird in Anlehnung an (Yan et al. 2015) als eine auf Schwefel, Ruß und Nanokohlenstoffäden bestehende Struktur, die auf einen Aluminiumstromableiter aufgebracht wurde, angenommen. Als Separator kommt eine Polypropylenfolie zum Einsatz. Als Elektrolyt kommt eine volumetrische Mischung von 1:1 aus DME (1,2 Dimethoxyethan) und DOL (1,3 Dioxolan) zum Einsatz. Als Leitsalz wird häufig Lithium-bis(trifluoromethansulfonyl)imid ( $\text{LiTFSI}$ ) oder Lithiumhexafluorophosphat  $\text{LiPF}_6$  eingesetzt. Aus Gründen der Ökobilanzdatenverfügbarkeit wird in Renewbility das ebenfalls Verwendung findende Lithiumperchlorat ( $\text{LiClO}_4$ ) verwendet. Als Elektrolytadditiv wird Lithiumnitrat ( $\text{LiNO}_3$ ) dem Elektrolytgemenge beigemischt. Das Zellgehäuse besteht aus einem Laminat von Polyamid-, Aluminium- und Polypropylenfolie.

# ENDBERICHT

Die Herstellung einer LiS-Zelle wurde nach dem gleichen Schema wie für LFP, NMC und NCA Zellen im eLCAr-Akku-Modul modelliert, dabei wurden Prozesse aus ecoinvent Version3.1 verwendet. Tabelle 16-8 listet die Materialien der Lithium-Schwefel-Zelle auf. Für das Zellgehäuse wird ein flexibler Zellpouch modelliert. Das Akkugehäuse und das Managementsystem werden entsprechend des Li-Ionen Akkus nachgebildet.

**Tabelle 16-8: Verwendete Materialien zur Modellierung der Lithium-Schwefel Zelle**

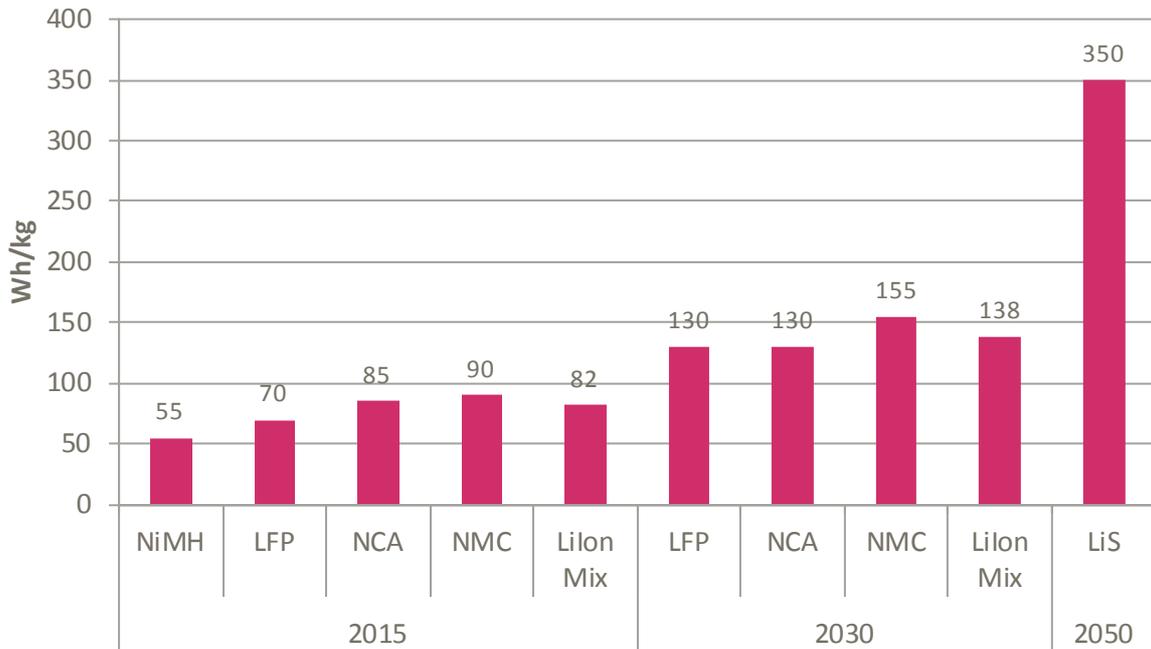
<b>Schwefel</b>
<b>Carbon Nano Fibres</b>
<b>Carbon Black (Ruß)</b>
<b>Aluminium</b>
<b>Kupfer</b>
<b>Dimethoxyethan (DME, C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>O<sub>2</sub>)</b>
<b>1,3-Dioxolan (DOL, C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O<sub>2</sub>)</b>
<b>Lithium</b>
<b>Lithiumperchlorat</b>
<b>PP</b>
<b>Polyamid (PA 66)</b>

Quelle: ifeu.

## 16.4.4 MATERIALZUSAMMENSETZUNG UND TREIBHAUSGASEMISSIONEN DER HERSTELLUNG EINES LITHIUM-SCHWEFEL-AKKUS

Laut der Technologievorgabe in Renewbility sollen die im Jahr 2050 für Elektrofahrzeuge benötigten Lithium-Schwefel-Akkus eine Energiedichte von 350 Wh/kg erreichen, dazu müssen auf Zellebene etwa 483 Wh/kg erreicht werden. Abbildung 16-2 stellt die angestrebte spezifische Energiedichte des Lithium-Schwefel-Akkus den verschiedenen in Renewbility modellierten Lithium-Ionen-Speichertechnologien gegenüber.

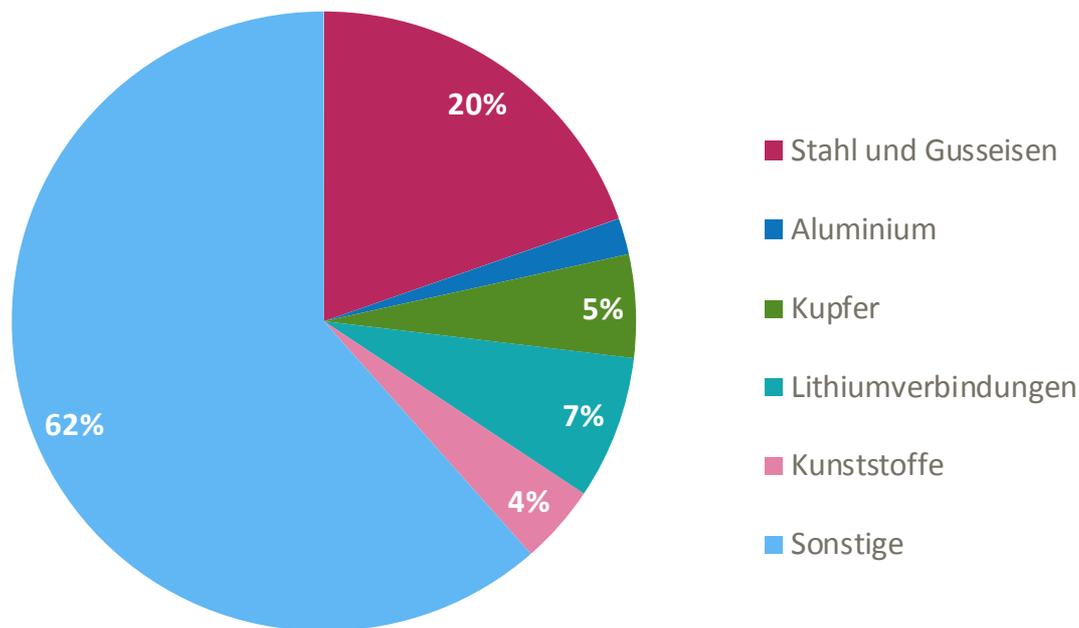
Abbildung 16-2: Spezifische Energiedichte der Speichertechnologien auf Akkuebene



Quelle: ifeu.

Aggregiert nach den Materialgruppen ergibt sich für den Lithium-Schwefel-Akku ein Anteil von 20 % Stahl und Gusseisenkomponenten, 2 % Aluminium, 5 % Kupfer, 7 % Lithiumverbindungen, 4 % Kunststoffe und 62 % sonstige Werkstoffe (vgl. Abbildung 16-3). Die sonstigen Werkstoffe setzten sich in diesem Fall insbesondere aus Schwefel und Elektrolyt Additiven zusammen.

Abbildung 16-3: Materialzusammensetzung eines Lithium-Schwefel Akkus für 2050

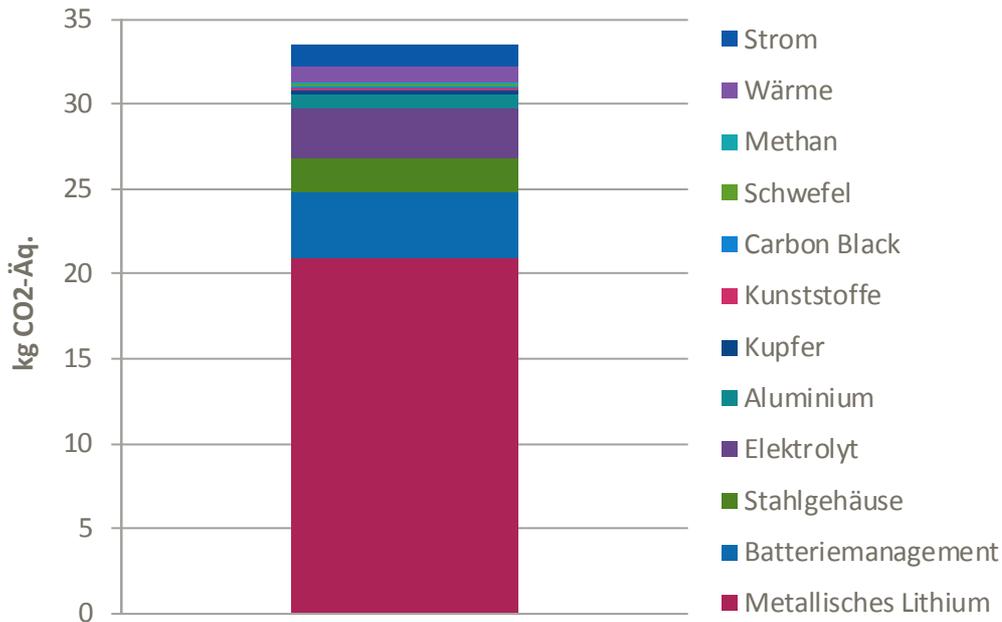


Quelle: ifeu.

Die Treibhausgasbilanz für die Herstellung eines LiS-Akkus (1 kWh) ergibt 32,3 kg CO<sub>2</sub>-Äq (vgl. Abbildung 16-4). Der größte Beitrag resultiert mit 65 % aus der Herstellung von metallischem Lithium. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Anode komplett aus metallischem Lithium mit hohem Reinheitsgrad besteht. Auf dem Markt wird heute überwiegend Lithiumcarbonat gehandelt, daraus werden entsprechende Lithiumverbindungen wie etwa Lithiummanganoxid oder Lithiumeisenphosphat direkt am Fertigungsstandort hergestellt. Die Gewinnung von reinem Lithium aus Lithiumcarbonat ist relativ energieintensiv und unter Umständen mit einem größeren Aufwand verbunden als die Herstellung von anderen Lithiumverbindungen. Die Vorkette aus ecoinvent weist für die heutige Herstellung von Lithium sehr große Lasten auf, da aber keine anderen Herstellungsangaben vorliegen, wurde auf diesen Datensatz zurückgegriffen. Weitere relevante Emissionen resultieren aus der Herstellung des Akkumanagementsystems, dem Stahlgehäuse und dem Elektrolyten.

Insgesamt betragen die spezifischen THG-Emissionen eines LiS-Akkus ungefähr ein Drittel der Emissionen, die für einen heutigen Li-Ionen-Akku gleicher Kapazität nötig sind. Aufgrund der Modellierung mit heutigen ecoinvent Prozessen, ist davon auszugehen, dass es zu einem weiteren Effizienzgewinn innerhalb der Prozesse bis 2050 kommt, so dass die Emissionen aus der Vorkette weiter sinken werden. Diese Effekte waren nach heutiger Datenlage noch nicht abzubilden.

Abbildung 16-4: THG-Emissionen aus der Herstellung eines LiS-Akku (1 kWh) bezogen auf Inputgrößen



Quelle: ifeu.

## 16.5 BASISTABELLEN SCHIENENFAHRZEUGE

Tabelle 16-9: Leistungsmerkmale von Schienenfahrzeugen der jeweiligen Fahrzeugkategorie

Fahrzeugkategorie	Antrieb	Leergewicht	Kapazität	Auslastung	Fahrleistung [km/a]	Lebensdauer [a]
<b>Straßenbahn</b>	Elektro	55 t	249 Plätze	45 Pers.	37.000	30
<b>Regionalzug</b>	Diesel	200 t	250 Plätze	53 Pers.	170.000	40
<b>Regionalzug</b>	Elektro	200 t	250 Plätze	53 Pers.	170.000	40
<b>Fernzug</b>	Diesel	600 t	700 Plätze	308 Pers.	250.000	40
<b>Fernzug</b>	Elektro	400 t	500 Plätze	220 Pers.	500.000	40
<b>Güterzug</b>	Diesel	524 t	1160 t	440 t	50.000	25
<b>Güterzug</b>	Elektro	524 t	1160 t	440 t	50.000	25

Quelle: Datensätze aus ecoinvent 3.1, eigene Abschätzungen und Berechnungen

**Tabelle 16-10: Materialeinsatz ausgewählter Fahrzeugvarianten (kg)**

Fahrzeug-kategorie	Eisen-metalle	Alu-minium	Kupfer	Sonstige Metalle	Kunst-stoffe	Gummi	Glas	Sonstige
<b>Straßenbahn Elektro</b>	43.800	1.500	3.800	170	2.200	510	2.000	970
<b>Regionalzug Elektro/Diesel</b>	146.900	12.900	9.000	1.900	16.700		9.300	3.300
<b>Fernzug Elektro</b>	194.200	54.200	20.700		93.300		30.100	7.600
<b>Fernzug Diesel</b>	99.600	294.000	18.300		141.500		34.900	11.600
<b>Güterzug Elektro/Diesel</b>	455.500	26.400	7.400	290	7.300	190	260	26.600

Anmerkung: Der Fernzug „Diesel“ und „Elektro“ weisen ganz unterschiedliche Materialzusammensetzungen auf, da der Diesel-Fernzug gegenüber dem Elektro-Fernzug in ecoinvent überwiegend einen Aluminiumaufbau hat. Andere Daten zu den Zügen waren nicht verfügbar.

Quelle: Datensätze aus ecoinvent 3.1

## 16.6 MODELLIERUNG DER FLUGZEUG-HERSTELLUNG

Die Modellierung der Flugzeugherstellung basiert auf der Materialzusammensetzung eines Airbus A330-200 in (de Oliveira Fernandes Lopes 2010). Das Herstellerleergewicht eines A330-200 beträgt 108,2 t, dafür sind aus (de Oliveira Fernandes Lopes 2010) für 105,5 t die Materialien bekannt. Da das Betriebsleergewicht eines A330-200 etwa bei 124 Tonnen liegt, vernachlässigt [de Oliveira Fernandes Lopes, 2010] etwa 16 Tonnen weitere Materialien, die für Einbauten in das Flugzeug anfallen, insbesondere für die Passagiersitze. Nach (Miehlke 2005) wiegt ein Flugzeugsitz etwa 30 Kilogramm und besteht hauptsächlich aus Aluminium und Polycarbonat, für die 303 Sitze des A330-200 ergibt sich ein Gewicht von 9 Tonnen. Damit fehlen lediglich die Materialangaben zu 8 % des Flugzeuggewichtes.

In (de Oliveira Fernandes Lopes 2010) wurde keine vollständige Ökobilanz für das Flugzeug erarbeitet, sämtliche Fertigungsaufwendungen (wie z. B. für Strom, Wärme oder Wasser) und Fertigungsverluste fehlen. Zur Bestimmung der Energieaufwendungen in der Fertigung wurde die Umweltbilanz von Airbus für 2013 ausgewertet (Airbus Operations SAS 2014). Airbus schreibt in der Umweltbilanz, dass sie im Jahr 2013 Flugzeuge mit 62.451 Sitzen (entspricht etwa 21.270 Tonnen Flugzeuge), außerdem 1.905 Tonnen Flugzeuge sowie weitere 7.549 Tonnen Flugzeugteile ausgeliefert haben. Dafür fielen 157.480 Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente an. Außerdem wurden für Strom (Emissionsfaktor 60 g/kWh) 19.509 Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente emittiert und für Dampf (Emissionsfaktor 254 g/kWh) 6.084 Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente (Airbus Operations SAS 2014). Pro Tonne fertiggestelltes Flugzeug(teil) wurden also näherungsweise

## ENDBERICHT

5,13 Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente direkt emittiert sowie 10,58 MWh<sub>el</sub> und 0,78 MWh<sub>th</sub> (Dampf) gebraucht. Diese Daten werden ebenfalls für die Ökobilanz berücksichtigt.

Um von den Materialien im Flugzeug auf die zur Flugzeugherstellung benötigten Rohstoffmengen zu kommen, wurden zusätzlich Annahmen zu den Fertigungsverlusten der wichtigsten Materialien getroffen. Für die karbonfaserverstärkten Kunststoffe wird davon ausgegangen, dass ein Flugzeugteil ein ähnliches Fertigungsverfahren aufweist wie ein Pkw-Teil, damit kann der oben im Anhang beschriebene Datensatz für die CFK-Herstellung verwendet werden. Dieser enthält bereits die auftretenden Fertigungsverluste. Der zweite dominierende Werkstoff bei einer Treibhausgasbilanz der Flugzeugmaterialien ist das eingesetzte Aluminium. Hier wird ebenfalls davon ausgegangen, dass die Fertigungsverluste beim Flugzeug analog zu denen beim Pkw sind und nach (Schweimer and Levin 2000) bei 11 % liegen. Da die anderen Materialien einen deutlich geringeren Einfluss auf die Treibhausgasemissionen der Flugzeugherstellung haben, werden die weiteren Fertigungsverluste vernachlässigt.

Tabelle 16-11 zeigt die Kapazität, den mittleren Auslastungsgrad, die Lebensdauer, die jährliche Flugleistung und das Leergewicht der Flugzeuge.

**Tabelle 16-11: Differenzierung der Flugzeuge**

	<b>Kapazität</b>	<b>Auslastungs- grad</b>	<b>Lebensdauer</b>	<b>Jahresflug- leistung</b>	<b>Leer- gewicht</b>
<b>Passagier- flugzeug</b>	164 Plätze	69 %	25 Jahre	2.235.000 km	43 t
<b>Güter- flugzeug</b>	51 t	62 %	25 Jahre	2.235.000 km	79 t

Quelle: (Öko-Institut 2013).