TEXTE
56/2016

Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050

Für Mensch & Umwelt

Umwelt Bundesamt

TEXTE 56/2016

Umweltforschungsplan des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

Forschungskennzahl 3712 45 100
UBA-FB 002355

Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050

Fabian Bergk, Kirsten Biemann, Christoph Heidt, Wolfram Knörr, Udo Lambrecht, Tobias Schmidt
ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Heidelberg

Lutz Ickert, Martin Schmied
INFRAS AG, Bern

Patrick Schmidt, Werner Weindorf
LBST-Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, München

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber:
Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
info@umweltbundesamt.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

/umweltbundesamt.de
/umweltbundesamt

Durchführung der Studie:
Ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH
Wilckensstr. 3
69120 Heidelberg

Abschlussdatum:
Mai 2016

Redaktion:
Fachgebiet I 3.1 Umwelt und Verkehr
Martin Lambrecht

Publikationen als pdf:
http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/klimaschutzbeitrag-des-verkehrs-bis-2050

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Juni 2016

Das diesem Bericht zu Grunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit unter der Forschungskennzahl 3712 45 100 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Berichtskennblatt

Berichtsnummer	UBA-FB 002355
Titel des Berichts	Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050
Autor(en) (Name, Vorname)	Bergk, Fabian; Biemann, Kirsten; Heidt, Christoph; Ickert, Lutz; Knörr, Wolfram; Lambrecht, Udo; Schmidt, Tobias; Schmidt, Patrick; Schmied, Martin; Weindorf, Werner
Durchführende Institution (Name, Anschrift)	ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH Wilckensstraße 3, D-69120 Heidelberg, Deutschland INFRAS AG, Sennweg 2, CH-3012 Bern, Schweiz LBST-Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, Daimlerstrasse 15 D-85521 Ottobrunn
Fördernde Institution	Umweltbundesamt Postfach 14 06 06813 Dessau-Roßlau
Abschlussjahr	2016
Forschungskennzahl (FKZ)	3712 45 100
Seitenzahl des Berichts	214
Zusätzliche Angaben	
Schlagwörter	Klimaschutz, Emissionen, Energieverbrauch, Vorketten, Szenarien, Maßnahmen, Ziele, Verlagerung, Vermeidung, Verminderung, Kraftstoffe, Alternative Antriebe, Elektromobilität, Modell

Report Cover Sheet

Report No.	UBA-FB 002355
Report Title	Climate Change Mitigation in Transport until 2050
Author(s) (Family Name, First Name)	Bergk, Fabian; Biemann, Kirsten; Heidt, Christoph; Ickert, Lutz; Knörr, Wolfram; Lambrecht, Udo; Schmidt, Tobias; Schmidt, Patrick; Schmied, Martin; Weindorf, Werner
Performing Organisation (Name, Address)	ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH Wilckensstraße 3, D-69120 Heidelberg, Deutschland INFRAS AG, Sennweg 2, CH-3012 Bern, Schweiz LBST-Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, Daimlerstrasse 15 D-85521 Ottobrunn
Funding Agency	Umweltbundesamt Postfach 14 06 06813 Dessau-Roßlau
Report Date (Year)	2016
Project No. (FKZ)	3712 45 100
No. of Pages	214
Supplementary Notes	
Keywords	Climate Change Mitigation, Emissions, Final Energy Demand, Up-stream Emissions, Scenarios, Policies, Measures, Targets, Avoid-ance, Shifting, Improvement, Alternative Fuels, Electric Mobility, Model

Kurzbeschreibung

Ein wesentliches Ziel dieses Vorhabens war die Ableitung von ambitioniert-realistischen Minderungszielen der Treibhausgasemissionen für den Verkehrsbereich, unter Beachtung des sektorübergreifenden Minderungszieles von 80-95 % in 2050 gegenüber 1990. Zur Bewertung der Umsetzbarkeit der Ziele aus der Perspektive des Verkehrs wurde dabei ein Klimaschutzszenario für den Verkehr entwickelt. Ein Schwerpunkt war die Betrachtung des Güterverkehrs. Dabei wurden die Auswirkungen von Vermeidungs-, Verminderungs- und Verbesserungsmaßnahmen (Verkehrswende) und dem Einsatz erneuerbarer Energieträger (Energiewende) auf die Treibhausgasemissionen und den Bedarf an erneuerbaren Energien diskutiert. Die Energiewende im Güterverkehr wurde mit den Technikoptionen „aus erneuerbaren Strom hergestellten Power-to-Liquid“ und „Oberleitungshybrid-Lkw“ betrachtet.

Soll in Deutschland sektorübergreifend eine Treibhausgasminderung von 95 % erreicht werden, muss der Verkehr nahezu treibhausgasneutral sein. Von dieser Prämisse ausgehend ist das Klimaschutzszenario entwickelt worden. Kernelement eines treibhausgasneutralen Verkehrs ist dabei eine konsequente Energiewende im Verkehr, die den Einsatz von aus erneuerbaren Strom hergestellten Kraftstoffen einschließt. Die Umstellung des Verkehrs auf erneuerbare Energieträger wird einfacher und günstiger, wenn gleichzeitig mittels einer Verkehrswende der Endenergieverbrauch des Verkehrs deutlich sinkt. Die Ergebnisse zeigen dabei, dass mittels ambitionierter Maßnahmen der Verkehrswende, inklusive dem konsequenten Einsatz von Elektromobilität, eine Minderung des Endenergieverbrauchs (ohne Einbezug internationaler Verkehre) zwischen 50 und 60 % möglich ist. Im Straßengüterverkehr kann eine Minderung um 25 % erreicht werden. Zusammen mit der Energiewende im Verkehr wird diese Endenergiebedarfsminderung – und damit die Verkehrswende – als Ziel für den Verkehrsbereich zur effizienten Erreichung der sektorübergreifenden Klimaschutzziele vorgeschlagen.

Abstract

One major objective of this project was to derive ambitious but realistic targets for the reduction of greenhouse gases in the transport sector until 2050 in Germany. These targets should fit into the framework of the cross-sectoral target of 80-95 % greenhouse gas reduction in 2050 in reference to 1990. To evaluate the feasibility of the transport sector targets, a transport climate protection scenario was developed. Focus of the analysis has been freight transport. The effects of avoidance, shifting and improvement measures (‘Verkehrswende’ – transport transition) in combination with the use of renewable energy sources (‘Energiewende’ – energy transition) on greenhouse gas emissions and the demand for renewable energy have been analysed. The two technology options ‘renewable energy-based power-to-liquid’ and ‘catenary hybrid trucks’ were discussed for the usage of renewable energy in freight transport.

To achieve a cross-sectoral target of 95% greenhouse gas reduction in Germany, the transport sector emissions have to be close to zero. The scenario has been developed on that premise. Key element of a zero-emission transport system is the substitution of fossil fuels with renewable energy. This includes the usage of renewable power-to-liquid. Shifting transport to renewable energy sources will be easier and more cost-effective if the final energy consumption is substantially decreased. The analysis shows that it is possible to achieve a final energy demand reduction in national transport from 50 to 60 % (freight transport: 25 %). This reduction can be realised with ambitious avoidance, shifting and improvement measures and a widespread use of electric mobility. Both the use of renewable energy and the calculated reduction in final energy demand are proposed as targets for the transport sector in order to achieve the cross-sectoral greenhouse gas reduction targets efficiently.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis 5
Abbildungsverzeichnis 8
Tabellenverzeichnis 12
Abkürzungsverzeichnis/ Glossar 15
Zusammenfassung 17
Summary 37
1 Hintergrund 57
2 Grundlagen Ziele – Maßnahmen – Szenarien 58
2.1 Abgrenzung des Verkehrssektors 58
2.1.1 Sektorale Abgrenzung 58
2.1.2 Verkehrliche Abgrenzungen 58
2.1.3 Ökobilanzielle Abgrenzung 59
2.1.4 Abgrenzung der Treibhauswirkung 59
2.1.5 Auswahl geeigneter Abgrenzungsprinzipien 60
2.2 Strategien zur Minderung der THG-Emissionen des Verkehrs 61
2.3 Minderungsziele verschiedener Akteure 63
2.4 Minderungsziele und -pfade in Szenarienstudien mit Zieljahr 2050 67
2.4.1 Szenarienstudien in Deutschland 67
2.4.2 Szenarienstudien für Europa 72
3 Sektorspezifische Klimaschutzziele für den Verkehr 74
3.1 Vorbemerkungen 74
3.2 Zielgrößen und Zeitpunkte 76
3.3 Abgrenzung des Verkehrssektors für Zielfestlegung 80
3.4 Diskussion möglicher Ziele für das Jahr 2050 82
3.4.1 Treibhausgasemissionen 82
3.4.2 Endenergieverbrauch 84
3.5 Diskussion möglicher Minderungspfade 2020 bis 2050 87
3.6 Mögliche Minderungsziele mit Einbezug internationaler Verkehre 90
3.7 Zusammenfassung möglicher Klimaschutzziele für den Verkehr 93
4 Methodischer und inhaltlicher Rahmen der Szenarienerstellung 95
4.1 Fahrzeugtechniken und Energieträger 95
4.1.1 Beschreibung und Diskussion der Optionen 95
4.1.1.1 Pkw und leichte Nutzfahrzeuge 95
4.1.1.2 Lkw 97

4.1.1.3 Auswahl der Techniken und Energieträger in den Szenarien 105
4.1.1.4 Übrige Verkehrsträger 106
4.1.2 Umsetzung der Technikannahmen in den Szenarien 106
4.1.2.1 Modellierung in TREMOD 106
4.1.2.2 Entwicklung der Fahrzeugflotten 109
4.1.2.3 Annahmen zu den Fahrleistungsanteilen 111
4.1.2.4 Fahrleistungsanteile nach Energieträger 112
4.1.2.5 Fahrzeugflotten und Fahrleistungen im Klimaschutzszenario E+ 113
4.1.2.6 Entwicklung der Energieeffizienz 114
4.1.2.7 Pkw und leichte Nutzfahrzeuge – Entwicklung bis 2030 115
4.1.2.8 Pkw und leichte Nutzfahrzeuge – Entwicklung 2030 bis 2050 117
4.1.2.9 Schwere Nutzfahrzeuge 117
4.2 Energetische Vorketten 118
4.2.1 Aufgabenstellung und Abgrenzungen 118
4.2.2 Sachbilanzen 119
4.2.3 Technikpfade Energieträger „Well-to-Tank“ 119
4.2.4 Auswahl Strom- und Kraftstoffszenarien 121
4.2.5 Abschätzung der Kosten von PtG/PtL-Kraftstoffen 124
4.3 Sozio-ökonomische Rahmenbedingungen in den Szenarien 124
4.4 Maßnahmen im Referenzszenario 125
4.5 Maßnahmenmodellierung im Klimaschutzszenario 125
4.5.1 Auswahl von Maßnahmen und Maßnahmenbündel 125
4.5.1.1 Personenverkehr 125
4.5.1.2 Güterverkehr 135
4.5.1.3 Infrastrukturausbau Schiene als verkehrssektorübergreifendes Handlungsfeld 143
4.5.1.4 Zwischenfazit zu den verkehrlichen Wirkungen 143
4.5.2 Vorgehen zur Operationalisierung der Maßnahmen 144
4.5.2.1 Personenverkehr 144
4.5.2.2 Güterverkehr 145
5 Referenzszenario 151
5.1 Entwicklung bis 2030 151
5.1.1 Entwicklung der Verkehrsleistungen 151
5.1.2 Annahmen zur Fahrleistungsentwicklung im Straßenverkehr 152
5.2 Referenzentwicklung bis 2050 153

5.2.1 Entwicklung Personenverkehr ... 153
5.2.2 Entwicklung Güterverkehr ... 153
5.3 Ergebnisse ... 159
5.3.1 Entwicklung der Verkehrsleistungen ... 159
5.3.2 Entwicklung des Endenergieverbrauchs ... 161
6 Klimaschutzszenario ... 162
6.1 Vorgehen ... 162
6.2 Verkehrliche Wirkungen der Maßnahmen im Personenverkehr ... 162
6.3 Verkehrliche Wirkungen der Maßnahmen im Güterverkehr ... 164
6.3.1 Wirkungen in den Teilsegmenten ... 164
6.3.2 Modale Entwicklungen ... 178
6.3.3 Gesamtergebnis ... 184
6.3.4 Fazit zu den Wirkungen nichttechnischer Maßnahmen im Güterverkehr ... 185
6.4 Ergebnisse ... 186
6.4.1 Verkehrsleistungen ... 186
6.4.2 Endenergieverbrauch (TtW) ... 187
6.4.2.1 Endenergieverbrauch nach Verkehrsträgern 187
6.4.2.2 Endenergieverbrauch nach Energieträgern 189
6.4.2.3 Endenergieverbrauch im Klimaschutzszenario E+ 191
6.4.2.4 Bewertung der Ergebnisse für den Endenergieverbrauch und der Vorschläge für sektorale Minderungsziele 194
6.4.3 Primärenergieverbrauch ... 196
6.4.3.1 Umsetzung der Maßnahmen zur Verlagerung, Vermeidung und Verbesserung (ASI) 196
6.4.3.2 Nichttechnische Maßnahmen und Umstellung auf THG-neutrale Kraftstoffe 197
6.4.3.3 Bedarf an EE-Strom im Jahr 2050 198
6.4.4 Direkte Treibhausgasemissionen (TtW) ... 201
6.4.5 Gesamte Treibhausgasemissionen (WtW) ... 203
6.4.5.1 Umsetzung der nichttechnischen Maßnahmen 203
6.4.5.2 ASI-Maßnahmen und Umstellung auf THG-neutrale Kraftstoffe 204
6.4.5.3 Herkunft der WtW-THG-Emissionen 205
6.4.5.4 Bewertung der Ergebnisse THG-Emissionen anhand der Zielwertdiskussion 205
7 Quellenverzeichnis ... 208

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Entwicklung der Personenverkehrsleistung und des Modal Splits im Referenz- und Klimaschutzszenario 23

Abbildung 2: Entwicklung des Endenergieverbrauchs des Personenverkehrs im Referenz- und Klimaschutzszenario 24

Abbildung 3: Entwicklung der Güterverkehrsleistung und des Modal Splits im Referenz- und Klimaschutzszenario 25

Abbildung 4: Entwicklung des Endenergieverbrauchs des Güterverkehrs im Referenz- und Klimaschutzszenario 26

Abbildung 5: Entwicklung des Endenergieverbrauchs des besamten Verkehrs im Referenz- und Klimaschutzszenario 27

Abbildung 6: Entwicklung der direkten THG-Emissionen im Referenz- und Klimaschutzszenario 28

Abbildung 7: Entwicklung des Primärenergieverbrauchs des gesamten Verkehrs in den Szenarien 29

Abbildung 8: Entwicklung der WtW-THG-Emissionen des gesamten Verkehrs in den Szenarien mit EWF 30

Abbildung 9: Vergleich der Minderungsraten für den Endenergieverbrauch mit den Werten aus der Zielwertdiskussion für ein THG-Ziel von -95 % 31

Abbildung 10: Vergleich der Minderungsraten für die direkten THG-Emissionen (TtW) mit den Werten aus der Zielwertdiskussion (ohne EWF) 32

Abbildung 11: Verkehrsbedingte Emissionen nach Sektoren 59

Abbildung 12: Strategien und Instrumente zur THG-Minderung im Verkehr 62

Abbildung 13: Zulässige Pro-Kopf-CO_2-Emissionen nach dem WGBU-Budgetansatz für verschiedene Ländergruppen (Industrieländer (1): ›5.4 t CO_2/Kopf, Schwellenländer (2): 2.7-5.4 t CO_2/Kopf, Entwicklungsländer (3): ‹2.7 CO_2/Kopf) [WBGU, 2009] 80

Abbildung 14: Treibhausgasemissionen des Verkehrs (ohne internationale Verkehre) im Jahr 2050 in Abhängigkeit des Endenergieverbrauchs mit Nutzung des inländischen Potenzials erneuerbarer Energien und Import konventioneller Kraftstoffe 87

Abbildung 15: Zielwerte für die Minderung der Treibhausgase sowie des Endenergieverbrauchs des Verkehrs (ohne internationale Verkehre) für die Jahre 2020, 2030, 2040 und 2050 bei einem sektorübergreifenden Treibhausgasminderungsziel von 80 % 89

Abbildung 16: Zielwerte für die Minderung der Treibhausgase sowie des Endenergieverbrauchs des Verkehrs (ohne internationale Verkehre) für die Jahre 2020, 2030, 2040 und 2050 bei einem sektorübergreifenden Treibhausgasminderungsziel von 95 % 90

Abbildung 17: Berechnungsablauf von Verbrauch und Emissionen des Straßenverkehrs in TREMOD 107

Abbildung 18: Entwicklung der Neuzulassungen bei Pkw und leichten Nutzfahrzeugen nach Antriebstechnik in den Szenarien 110

Abbildung 19: Entwicklung des Fahrzeugbestands bei Pkw und leichten Nutzfahrzeugen nach Antriebstechnik in den Szenarien 110

Abbildung 20: Entwicklung der Neuzulassungen bei Lkw und Sattelzugmaschinen nach Antriebstechnik in den Szenarien 111

Abbildung 21: Entwicklung des Fahrzeugbestands bei Lkw und Sattelzugmaschinen nach Antriebstechnik in den Szenarien 111

Abbildung 22: Ableitung der Effizienzentwicklung bei schweren Nutzfahrzeugen 118

Abbildung 23: Strommixe im Referenzszenario nach Leitstudie 2011, Szenario A (linke Grafik) und im Klimaschutzszenario nach Leitstudie 2011, Szenario THG95 (rechte Grafik) [DLR et al., 2012] 122

Abbildung 24: Auswahl Kraftstoffmix im Referenzszenario 123

Abbildung 25: Auswahl Kraftstoffmix im Klimaschutzszenario 123

Abbildung 26 Segmentierung des Güterverkehrs im Wirkungsmodell 146

Abbildung 27: Wirkungsmodell Güterverkehr 147

Abbildung 28: Aufkommensbezogene Teilmarktentwicklungen im gesamtmodalen Binnenverkehr für das Referenzszenario 154

Abbildung 29: Aufkommensbezogene Teilmarktentwicklungen im gesamtmodalen grenzüberschreitenden Versand für das Referenzszenario 155

Abbildung 30: Aufkommensbezogene Teilmarktentwicklungen im gesamtmodalen grenzüberschreitenden Empfang für das Referenzszenario 156

Abbildung 31: Aufkommensbezogene Teilmarktentwicklungen im gesamtmodalen Durchgangsverkehr für das Referenzszenario 157

Abbildung 32: Entwicklung des aufkommensbezogenen Modal Split im Gesamtverkehr des Referenzszenarios 158

Abbildung 33: Entwicklung der Verkehrsleistungen im Gesamtverkehr nach Modi im Referenzszenario 159

Abbildung 34: Entwicklung der Personenverkehrsleistung und Modal Split im Referenzszenario 160

Abbildung 35: Entwicklung der Güterverkehrsleistung und Modal Split im Referenzszenario 160

Abbildung 36: Endenergieverbrauch Personen- und Güterverkehr im Referenzszenario 161

Abbildung 37: Anteile der Hauptverkehrsverbindungen im Basisjahr 2010 165

Abbildung 38: Einordnung der 40 Teilsegmente des Güterverkehrs (gereiht nach Tonnenkilometer), Basis: 2010 167

Abbildung 39: Entwicklung des aufkommensbezogenen Modal Split im Teilsegment der Konsumgüter zum kurzfristigen Verbrauch im Binnenverkehr 168

Abbildung 40: Entwicklung der modalen Verkehrsleistungen im Teilsegment der Konsumgüter zum kurzfristigen Verbrauch im Binnenverkehr 169

Abbildung 41: Entwicklung des aufkommensbezogenen Modal Split im Teilsegment der sonstigen Produkte im Binnenverkehr 170

Abbildung 42: Entwicklung der modalen Verkehrsleistungen im Teilsegment der sonstigen Produkte im Binnenverkehr 171

Abbildung 43: Entwicklung des aufkommensbezogenen Modal Split im Teilsegment der chemischen Erzeugnisse und Kunststoffe sowie Baustoffe im Binnenverkehr 172

Abbildung 44: Entwicklung der modalen Verkehrsleistungen im Teilsegment der chemischen Erzeugnisse und Kunststoffe sowie Baustoffe im Binnenverkehr 173

Abbildung 45: Entwicklung des aufkommensbezogenen Modal Split im Teilsegment der Erze, Steine und Erden im Binnenverkehr 174

Abbildung 46: Entwicklung der modalen Verkehrsleistungen im Teilsegment der Erze, Steine und Erden im Binnenverkehr 175

Abbildung 47: Aufkommensbezogene Verlagerungswirkung des Klimaschutzszenarios bis 2050 gegenüber dem Referenzszenario (gereiht nach Shift-Potenzial zur Schiene) 176

Abbildung 48: Leistungsbezogene Minderungswirkung des Klimaschutzszenarios bis 2050 gegenüber dem Referenzszenario im Straßengüterverkehr (gereiht nach relativer Höhe der Leistungsreduktion) 178

Abbildung 49: Entwicklung des aufkommensbezogenen Modal Split im Gesamtverkehr 179

Abbildung 50: Entwicklung der Verkehrsleistungen des Straßengüterverkehrs nach Hauptverkehrsverbindungen im Referenz- und Klimaschutzszenario 181

Abbildung 51: Entwicklung des leistungsbezogenen Modal Split im Gesamtverkehr 182

Abbildung 52: Entwicklung der Verkehrsleistungen im Gesamtverkehr nach Modi im Referenz- und Klimaschutzszenario 185

Abbildung 53: Entwicklung Personenverkehrsleistungen im Klimaschutzszenario 186

Abbildung 54: Entwicklung der Güterverkehrsleistungen im Klimaschutzszenario 187

Abbildung 55: Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Personenverkehr in den Szenarien 188

Abbildung 56: Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Güterverkehr in den Szenarien 188

Abbildung 57: Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Gesamtverkehr in den Szenarien 189

Abbildung 58: Entwicklung des Endenergieverbrauchs des Straßengüterverkehrs in den Szenarien 190

Abbildung 59: Entwicklung des Endenergieverbrauchs des Straßenverkehrs in den Szenarien 190

Abbildung 60: Entwicklung des Endenergieverbrauchs des gesamten Verkehrs in den Szenarien 191

Abbildung 61: Entwicklung des Endenergieverbrauchs des Straßengüterverkehrs in den Szenarien Klimaschutz und Klimaschutz E+ 192

Abbildung 62: Entwicklung des Endenergieverbrauchs des Straßenverkehrs in den Szenarien Klimaschutz und Klimaschutz E+ 193

Abbildung 63: Entwicklung des Endenergieverbrauchs des gesamten Verkehrs in den Szenarien Klimaschutz und Klimaschutz E+ 193

Abbildung 64: Vergleich der Minderungsraten für den Endenergieverbrauch (TtW) mit den Werten aus der Zielwertdiskussion 194

Abbildung 65: Entwicklung des Primärenergieverbrauchs des gesamten Verkehrs in den Szenarien ohne Umstellung auf THG-neutrale Kraftstoffe 197

Abbildung 66: Entwicklung des Primärenergieverbrauchs des gesamten Verkehrs in den Szenarien mit Umstellung auf THG-neutrale Kraftstoffe 197

Abbildung 67: Direkte TtW-Treibhausgasemissionen des Straßengüterverkehrs in den Szenarien 201

Abbildung 68: Direkte TtW-Treibhausgasemissionen des Straßenverkehrs in den Szenarien 201

Abbildung 69: Direkte TtW-Treibhausgasemissionen des Gesamtverkehrs in den Szenarien 202

Abbildung 70: Direkte TtW-Treibhausgasemissionen des Gesamtverkehrs in den Szenarien mit Detailbetrachtung der Emissionen 2050 202

Abbildung 71: Entwicklung der WtW-THG-Emissionen des gesamten Verkehrs in den Szenarien ohne Umstellung auf THG-neutrale Kraftstoffe 203

Abbildung 72: Entwicklung der WtW-THG-Emissionen des gesamten Verkehrs in den Szenarien mit Umstellung auf THG-neutrale Kraftstoffe 204

Abbildung 73: Entwicklung der WtW-THG-Emissionen des gesamten Verkehrs in den Szenarien mit Unterscheidung des Emissionsortes nach Inland und Ausland 205

Abbildung 74: Vergleich der Minderungsraten für die THG-Emissionen (TtW) mit den Werten aus der Zielwertdiskussion 206

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vorschläge für Minderungsziele des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen des Verkehrs in Deutschland bei einem sektorübergreifenden THG-Ziel von -95 % 20

Tabelle 2: Treibhausgaswirkung ausgewählter Treibhausgase für den Zeithorizont 100 Jahre (GWP100) 60

Tabelle 3: Sektorübergreifende THG-Minderungsziele in Deutschland und in der EU (jeweils in Bezug zu 1990) 64

Tabelle 4: THG-Minderungsziele für den Verkehrssektor in der EU (jeweils in Bezug zu 1990) 64

Tabelle 5: Spezifische THG-Minderungsziele für den Verkehrssektor in der EU 65

Tabelle 6: Ziele zur Senkung des Endenergieverbrauchs in der EU und in Deutschland 65

Tabelle 7: Ziele zur Effizienzsteigerung bei verschiedenen Verkehrsträgern 66

Tabelle 8: Ziele zum Anteil regenerativer Energie am Endenergieverbrauch in der EU und in Deutschland 66

Tabelle 9: Ziele zur Reduktion der Verkehrsleistung in Deutschland 67

Tabelle 10: Modal Split Ziele für den Güterverkehr in der EU und in Deutschland 67

Tabelle 11: Studien mit sektorübergreifenden Zielen in Deutschland 68

Tabelle 12: Nach Abgrenzungsprinzip differenzierte Entwicklung der Verkehrsleistung im Luftverkehr zwischen 2004 und 2025 69

Tabelle 13: Vergleich der Reduktion der Emissionen in den Szenarien 70

Tabelle 14: Endenergieverbrauch und Einsatz erneuerbarer Energieträger im Verkehr in den Szenarien [PJ] 70

Tabelle 15: Biomassepotenziale in den Szenarien 71

Tabelle 16: Studien mit normativen Zielszenarien in der EU 73

Tabelle 17: Emissionsminderungen einzelner Sektoren in der EU zur kostenoptimalen Erreichung eines sektorübergreifenden Treibhausgasminderungsziels von rund 80% 75

Tabelle 18: Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile eines verkehrsspezifischen Ziels zur Reduktion des Endenergieverbrauchs 78

Tabelle 19: Vorschläge für Minderungsziele des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen des Verkehrs in Abhängigkeit der Gesamt-Klimaschutzziele in Deutschland mit und ohne internationale Verkehre 94

Tabelle 20: Allgemeine Eigenschaften Diesel-Lkw 98

Tabelle 21: Eigenschaften Diesel-Lkw in einem THG-armen Energiesystem 99

Tabelle 22: Eigenschaften Diesel-Lkw im Transformationspfad 99
Tabelle 23: Allgemeine Eigenschaften CNG/LNG- bzw. Dual-Fuel-Lkw 100
Tabelle 24: Eigenschaften CNG/LNG- bzw. Dual-Fuel-Lkw in einem THG-armen Energiesystem 101
Tabelle 25: Eigenschaften CNG/LNG- bzw. Dual-Fuel-Lkw im Transformationspfad 101
Tabelle 26: Allgemeine Eigenschaften Brennstoffzellen-Lkw 102
Tabelle 27: Eigenschaften Brennstoffzellen-Lkw in einem THG-armen System 102
Tabelle 28: Eigenschaften Brennstoffzellen-Lkw im Transformationspfad 103
Tabelle 29: Allgemeine Eigenschaften von OH-Lkw 104
Tabelle 30: Eigenschaften von OH-Lkw in einem THG-armen System 104
Tabelle 31: Eigenschaften von OH-Lkw im Transformationspfade 105
Tabelle 32: Anpassung der Fahrleistungsrelationen für neue Fahrzeugkonzepte bei Pkw und LNF anhand der vorhandenen konventionellen Konzepte 112
Tabelle 33: Elektrischer Fahrleistungsanteil für PHEV (Pkw und LNF) 113
Tabelle 34: Bestand, Fahrleistung und Verkehrsleistung der OH-Lkw im Jahr 2050 im Klimaschutzszenario E+ 114
Tabelle 35: Entwicklung der spezifischen CO_2-Emissionen der Pkw im Referenzszenario bis 2030 116
Tabelle 36: Bereitstellungswirkungsgrade (gerundet) für PtG-H_2, PtG-CH_4 und PtL-Pfade, mit CO_2 aus Luft, inklusive Stromnetz Mittelspannungsebene 120
Tabelle 37: Annahmen zu den sozio-ökonomischen Rahmenbedingungen in der Verflechtungsprognose 2030 124
Tabelle 38: Entwicklung der Personenverkehrsleistung 2010-2030 in der „Verkehrsverflechtungsprognose 2030“ 151
Tabelle 39: Entwicklung der Transportleistung 2010-2030 in der „Verkehrsverflechtungsprognose 2030“ 152
Tabelle 40: Entwicklung der Fahrleistungen 2010-2030 152
Tabelle 41: Änderung der Verkehrsleistung im Klimaschutzszenario gegenüber dem Referenzszenario (Alltagsmobilität) 163
Tabelle 42: Annahmen zur Berechnung der Preiselastizität im Luftverkehr 164
Tabelle 43: Entwicklungen des Güterverkehrsaufkommens nach Modi und Hauptverkehrsverbindungen zwischen 2010 und 2050 im Referenz- und Klimaschutzszenario 180
Tabelle 44: Anteile der drei Landverkehrsträger am aufkommensbezogenen Modal Split im Gesamtverkehr zwischen 2010 und 2050 im Referenz- und Klimaschutzszenario 180

Tabelle 45: Entwicklungen der Güterverkehrsleistung nach Modi und Hauptverkehrsverbindungen zwischen 2010 und 2050 im Referenz- und Klimaschutzszenario 183

Tabelle 46: Anteile der drei Landverkehrsträger am leistungsbezogenen Modal Split im Gesamtverkehr zwischen 2010 und 2050 im Referenz- und Klimaschutzszenario 183

Tabelle 47: Zusammenfassung wichtiger Ergebnisse zur Entwicklung des Endenergieverbrauchs in den Szenarien 195

Tabelle 48: Energiebedarf 2050 in den betrachteten Varianten 199

Tabelle 49: Bedarf an EE-Strom im Verkehr im Jahr 2050 in den betrachteten Varianten 200

Abkürzungsverzeichnis/ Glossar

ASIF	Avoid, Shift, Improve, Fuel (Vermeiden, Verlagern, Verbessern, Kraftstoffe)
BEV	Battery Electric Vehicle (batteriebetriebenes Elektro-Fahrzeug)
CBA	Cost-benefit analysis (Kosten-Nutzen-Analyse)
CH_4	Methan
CNG	Compressed Natural Gas (komprimiertes Erdgas)
CO_2e	CO_2-Äquivalente: Einheit für die gewichteten Treibhausgase
EE-Kraftstoffe	aus erneuerbaren Energien erzeugte Kraftstoffe (bei flüssigen Kraftstoffen: EE-Power-to-Liquid (PtL), bei gasförmigen Kraftstoffen: EE-Power-to-Gas (PtG))
EE-Strom	aus erneuerbaren Energien erzeugter Strom
EE-PtG	→ EE-Kraftstoffe
EE-PtL	→ EE-Kraftstoffe
EWF	Emission Weighting Factor: Quantifizierung der zusätzlichen THG-Wirkung des Luftverkehrs in großen Flughöhen
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle (Brennstoffzellen-Fahrzeug)
GG	Gesamtgewicht
GWP	Global Warming Potential (Treibhausgaspotenzial)
HEV	Hybrid Electric Vehicle (Hybridfahrzeug)
H2	Wasserstoff
HPDI	High Pressure Direct Injection (direkte Hochdruckeinspritzung)
Internationaler Verkehr	von deutschen Flughäfen abgehender grenzüberschreitender Luftverkehr und der internationale Seeverkehr
LNF	Leichte Nutzfahrzeuge mit einem zulässigen Gesamtgewicht bis zu 3,5 Tonnen
LNG	Liquefied Natural Gas (verflüssigtes Erdgas)
LPG	Liquefied Petrol Gas: Flüssiggas, ein Gemisch aus Propan und Butan
LULUCF	Land Use, Land-Use Change and Forestry (Landnutzung und Forstwirtschaft)
MIV	Motorisierter Individualverkehr
MKS	Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung
Modal Shift	Verlagerung auf ein anderes Verkehrsmittel
Modal Split	Aufteilung der Verkehrs auf die verschiedenen Verkehrsmittel
Nationaler Verkehr	Straßen-, Schienen- und Binnenschiffsverkehr auf inländischen Verkehrswegen sowie Flugverkehr zwischen den inländischen Flughäfen
N_2O	Distickstoffoxid (Lachgas)
NST	Nomenclature Uniforme de Marchandises pour les Statistiques de Transport (Einheitliches Verzeichnis der Güterverkehrsstatistik): Erfasst werden 20 Abteilungen von Gütertransporten.
OH-Lkw	Oberleitungs-Hybrid-Lkw

ÖPNV	Öffentlicher Personenfernverkehr
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle (Steckdosen-batterieelektrisch/ verbrennungsmotorisches Hybridfahrzeug)
PJ	Petajoule
Pkm	Personenkilometer
Pkw	Personenkraftwagen
PtG	Power-to-Gas (Überbegriff für PtG-CH4 und PtG-H2)
PtG-CH4	Power-to-Methane Gas (Strom-zu-Methan)
PtG-H2	Power-to-Hydrogen Gas (Strom-zu-Wasserstoff)
PtL	Power-to-Liquid (Überbegriff für Strom-zu-Flüssigkraftstoffen)
RE	Renewable Energy
REEV	Range Extender Electric Vehicle (Reichweitenverlängertes (batterie-) elektrisches Fahrzeug)
RFI	Radiative Forcing Index: Quantifizierung der zusätzlichen THG-Wirkung des Luftverkehrs in großen Flughöhen
SNF	Schwere Nutzfahrzeuge mit einem zulässigen Gesamtgewicht über 3,5 Tonnen
SPFV	Schienenpersonenfernverkehr
SPNV	Schienenpersonennahverkehr
StVO	Straßenverkehrsordnung
t	Tonne (Masseneinheit)
TEN	Trans European Networks (Transeuropäische Netze)
THG	Treibhausgase
tkm	Tonnenkilometer
TtW	Tank-to-Wheel (Energieverbrauch und Emissionen der Fahrzeuge)
VVP 2030	Verkehrsverflechtungsprognose 2030 [BVU et al., 2014]
WtT	Well-to-Tank: (Energieverbrauch und Emissionen der Energiebereitstellung)
WtW	Well-to-Wheel: (Energieverbrauch und Emissionen der Energiebereitstellung und der Fahrzeuge)

Zusammenfassung

1. Ziele und Betrachtungsrahmen der Studie

Ausgangslage

Es ist Ziel der Bundesregierung, die Treibhausgasemissionen über alle Sektoren bis 2020 um 40 Prozent, bis 2030 um 55 Prozent, bis 2040 um 70 Prozent und bis 2050 um 80-95 Prozent (jeweils gegenüber 1990) zu senken. Um dieses Ziel zu erreichen, muss der Verkehrssektor einen angemessenen Beitrag leisten. Wie hoch dieser Beitrag sein muss, wie er konkret aussehen kann und welche Handlungsoptionen sich daraus ableiten, ist bisher nicht ausreichend untersucht worden. Dies gilt in besonderem Maß hinsichtlich der Zeitperspektive 2050.

Projektschwerpunkte

Eine wichtige Aufgabe dieses Projektes ist es, unter Beachtung des sektorübergreifenden Minderungszieles ein ambitioniert-realistisches Minderungsziel der Treibhausgasemissionen bis 2050 im Verkehrsbereich abzuleiten. Um die Umsetzbarkeit der Ziele aus der Perspektive des Verkehrs abzuschätzen, wird ein Klimaschutzszenario für den Verkehr bis zum Jahr 2050 entwickelt. Bei diesem wird insbesondere die Wirkung von Vermeidungs- und Verlagerungsmaßnahmen untersucht und die zusätzliche Minderung gegenüber einem Referenzszenario mit Schwerpunkt auf Effizienzmaßnahmen ermittelt.

Die Entwicklung des Klimaschutzszenarios hat folgende Schwerpunkte:

- Analyse der Wirksamkeit von Vermeidungs-, Verminderungs- und Verbesserungsmaßnahmen mit Schwerpunkt auf den Güterverkehr (**Verkehrswende**).
- Diskussion der Technikoptionen zum Einsatz erneuerbarer Energieträger zur Erreichung der THG-Minderungsziele mit Schwerpunkt auf den Straßengüterverkehr (**Energiewende**).
- Wirkung der Verkehrswende bei vorgegebener Technikoption in der Energiewende (Schwerpunkt auf aus erneuerbarem Strom hergestelltem Power-to-Liquid (EE-PtL)).

Zusätzlich zum Klimaschutzszenario wird eine Variante **Klimaschutzszenario E+** mit weitergehender Elektrifizierung im Straßenverkehr als Sensitivität für den Einfluss zusätzlicher technischer Potenziale berechnet, bei der im Pkw-Verkehr die Ziele der Bundesregierung bis 2030 (1 Mio. Elektrofahrzeuge bis 2020, 6 Mio. bis 2030) berücksichtigt werden und ab 2020 im Straßengüterfernverkehr der Oberleitungs-Hybrid-Lkw eingeführt wird.

Schließlich werden die Ergebnisse des Klimaschutzszenarios in Hinblick auf die vorgeschlagenen sektorspezifischen Ziele bewertet hinsichtlich

- des Beitrags der Vermeidungs-, Verminderungs- und Verbesserungsmaßnahmen (Verkehrswende),
- des Beitrags der Maßnahmen zum Einsatz von erneuerbaren Energieträgern (Energiewende) und
- des Beitrags des Verkehrs zu den THG-Emissionen außerhalb des Verkehrssektors.

Abgrenzungen in dieser Studie

Der **Sektor „Verkehr“** umfasst die folgenden Teilsektoren, die entsprechend in der Zielbetrachtung und in der Szenarienrechnung dargestellt werden:

- **Nationaler Verkehr:** Straßen- (motorisierte Zweiräder, Pkw, leichte Nutzfahrzeuge, Lkw, Last- und Sattelzüge, Busse sowie sonstige Kfz), Schienen- (Straßen- , Stadt- und U-Bahnen

sowie Eisenbahnverkehr) und Binnenschiffsverkehr auf inländischen Verkehrswegen sowie Flugverkehr zwischen den inländischen Flughäfen.
- **Internationaler Verkehr:** von deutschen Flughäfen ausgehender grenzüberschreitender Verkehr (Gesamtflugstrecke bis zur ersten Landung außerhalb Deutschlands) und der internationale Seeverkehr (in dieser Studie nachrichtlich abgebildet über die Treibstoffbunkermengen nach Energiebilanz).

Die betrachteten **Umweltindikatoren** sind entsprechend der Klimaschutzziele:

- Der **Endenergieverbrauch** der Fahrzeuge (Tank-to-Wheel, TtW).
- Die **direkten Treibhausgasemissionen** der Fahrzeuge (TtW, angegeben in CO_2-Äquivalenten (CO_2e) nach [IPCC, 2007]); für regenerative Energieträger (Biokraftstoffe, Kraftstoffe aus EE-Strom) werden die direkten CO_2-Emissionen mit Null bewertet, so dass hier nur die THG-Emissionen der sonstigen Treibhausgase (N_2O, CH_4) bilanziert werden.
- Darüber hinaus werden in den Szenarien die entsprechenden Emissionen und Energieverbräuche aus der **Energiebereitstellung** (Well-to-Tank, WtT) ermittelt, die in anderen Sektoren und ggf. außerhalb Deutschlands entstehen. So sind mögliche Auswirkungen von Aktivitäten im Verkehrsbereich auf andere Sektoren und Länder erkennbar.
- Als Zusatzbetrachtung wird die Klimawirkung des Flugverkehrs oberhalb der Tropopause über den **Emission Weighting Faktor (EWF)** erfasst und in die Bewertung einbezogen.

Nicht einbezogen werden die Aufwendungen für **Herstellung, Unterhalt und Entsorgung der Fahrzeuge und Infrastruktur**. Diese werden beispielsweise in [UBA, 2015] und in [UBA, 2013a] betrachtet.

Schließlich ist noch zu berücksichtigen, dass die sektorale Bilanzierung und Zieldiskussion gemäß der nationalen Berichterstattung auf der absatzorientierten **Energiebilanz** beruht, die nicht mit dem Energieverbrauch des inländischen Verkehrssektors innerhalb eines Kalenderjahres übereinstimmen muss. Die Ausgangswerte für den Energieverbrauch weichen daher bei der Szenarienrechnung auf Basis der inländischen Verkehrsleistung von den Energiebilanzwerten der nationalen Berichterstattung ab. Ein Vergleich zwischen Zielen und Szenarienergebnissen erfolgt daher anhand der relativen Entwicklung zwischen Basis- und Zieljahr.

2. Sektorspezifische Minderungsziele für den Verkehr

In der Studie wurden mögliche THG-Minderungsziele für den Verkehr untersucht. Als Randbedingung für die Erreichung der Ziele wurde angenommen, dass die anderen Sektoren ihre Minderungspotenziale in hohem Maße ausschöpfen, da diese in der Regel geringere Treibhausgasminderungskosten aufweisen als im Verkehr. Bisher wurde für den Verkehrssektor das Ziel zur Reduktion des Endenergieverbrauchs bis 2020 um 10 % und bis 2050 um 40 % gegenüber 2005 formuliert [Bundesregierung, 2010]. Eine Empfehlung dieser Studie ist es, die Festlegung von Zielwerten zur Minderung der Treibhausgasemissionen als auch des Endenergieverbrauchs des Verkehrs aufeinander abzustimmen. Eine abgestimmte Festlegung von **Energieverbrauchszielen** hat zwei Vorteile:

- Es wird darauf hingewirkt, dass der Energieverbrauch weiter zurück geht und damit eine Versorgung des Verkehrs mit erneuerbaren, treibhausgasarmen bzw. -freien Energieträgern ermöglicht wird. Eine erneuerbare Energieversorgung für den Verkehr wird auf jeden Fall benötigt, um hohe Treibhausgasminderungen beim Verkehr zu erreichen.
- Die kombinierte Festlegung von Energieverbrauchszielwerten und Treibhausgasminderungszielen erlaubt es, dass die Treibhausgasminderung in den nächsten 10-20 Jahren

vorrangig über anspruchsvolle Energieverbrauchsziele, im darauf folgenden Zeitraum bis 2050 durch anspruchsvolle Treibhausgasminderungsziele erfolgen kann.

So wird sichergestellt, dass die verfügbaren erneuerbaren Energien zunächst in Sektoren zum Einsatz kommen können, wo sie in den nächsten Jahren aufgrund der besseren Gesamteffizienz, insbesondere gegenüber EE-PtG-CH_4 und EE-PtL im Verbrennungsmotor, höhere Treibhausgasminderungen erzielen. Gleichzeitig kann bei geringerem Endenergieverbrauch des Verkehrs der Anteil erneuerbarer Energien in dessen Energiemix leichter erhöht werden.[1]

Hierzu ist es notwendig, nicht nur Zielwerte für das Jahr 2050 festzulegen. Es bedarf ganz gezielt der Festlegung von Zielen für die Zwischenjahre 2020, 2030 und 2040 um die Vorteile des kombinierten Steuerungsmechanismus aus Treibhausgas- und Endenergiezielen zu nutzen. Hiermit kann den Akteuren ein robuster Orientierungsrahmen für ihre Investitionssicherheit an die Hand gegeben werden.

Wie hoch die sektorale Minderung von Treibhausgasemissionen und Endenergieverbrauch ausfallen muss, hängt entscheidend vom sektorübergreifenden Klimaschutzziel sowie von den Minderungen der sonstigen Sektoren ab. Die Bundesregierung hat sich bereits verpflichtet, die Treibhausgasemissionen aller Sektoren bis zum Jahr 2050 um 80-95 % (gegenüber 1990) zu senken. Damit ergibt sich die Mindestanforderung an den Verkehr dadurch, dass von den insgesamt „erlaubten“ Treibhausgasemissionen die nicht vermeidbaren Treibhausgasemissionen der anderen Sektoren (v.a. Landwirtschaft und industrielle Prozesse) abgezogen werden. Soll ein sektorübergreifendes Ziel von 95 % Treibhausgasminderung im Jahr 2050 gegenüber 1990 erreicht werden, bedeutet dies, wegen der nicht vermeidbaren THG-Emissionen in den anderen Sektoren, dass der **Verkehr seine Treibhausgasemissionen um rund 98 %** senken muss. Der Verkehr im Jahr 2050 muss demnach nahezu treibhausgasneutral sein. Lediglich bei geringeren sektorübergreifenden Zielen ergäbe sich mehr Spielraum für den Verkehr.

Erreicht werden können diese Ziele durch Senkung des Endenergieverbrauchs sowie durch treibhausgasarme oder -freie Energieträger. Es wird dabei angenommen, dass aufgrund von Kosten- und Ressourceneffizienz die Realisierung der im Klimaschutzszenario errechneten Endenergieverbrauchsminderung von 53 % (gegenüber 2005) ein Maßstab für das Mindestziel sein soll. Diese geht deutlich über das Ziel von -40 % im Energiekonzept der Bundesregierung hinaus [Bundesregierung, 2010]. Aufgrund der Unsicherheiten bezüglich der Umsetzung der im Klimaschutzszenario vorgeschlagenen Maßnahmen sowie der Verfügbarkeit von EE-Kraftstoffen wird dabei ein Ziel von 50 bis 60 % Endenergieverbrauchsminderung für 2050 vorgeschlagen. Dabei sollte bei den Zwischenzielen für die Jahre 2020-2040 zunächst ein Minderungspfad in Richtung 60 % gesetzt werden, der bei sich abzeichnender hoher Verfügbarkeit von erneuerbaren Energien entsprechend angepasst werden kann.

Tabelle 1 zeigt die Zielwerte für die Endenergieverbrauchs- wie auch für die Treibhausgasminderung für das Jahr 2050 und für die Zwischenjahre 2020, 2030 und 2040. Der Endenergieverbrauch wird in den Zwischenjahren linear auf den Zielwert 2050 zurückgeführt. Die Treibhausgasemissionen orientieren sich bis 2030 stark an den Minderungen des Endenergieverbrauchs. Im Zeitraum danach werden im Vergleich zum Endenergieverbrauch stärkere prozentuale Minderungen unterstellt, da dann erneuerbare Kraftstoffe auch für den Verkehrsbereich verfügbar sein können.

[1] Dabei ist sicherzustellen, dass die für die Erreichung des Klimaschutzzieles benötigten Technikoptionen wie EE-PtG-CH_4 und EE-PtL nach 2030 im industriellen Maßstab verfügbar sein müssen. Je nachdem, wie schnell der Markthochlauf dieser Techniken erreicht werden kann, sind für deren Etablierung daher auch zeitweise THG-Mehremissionen zu akzeptieren. Einführungskurven von strombasierten Kraftstoffen werden im Kapitel 5.2.4 diskutiert.

Tabelle 1: Vorschläge für Minderungsziele des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen des Verkehrs in Deutschland bei einem sektorübergreifenden THG-Ziel von -95 %

	2020	2030	2040	2050
Energieverbrauch Verkehr (bezogen auf 2005)	-16 %	-31 %	-45 %	-50 bis -60 %
THG-Emissionen Verkehr (bezogen auf 1990)	-20 %	-40 %	-70 %	-98,5 %

Grundsätzlich sind die **Zielwerte für den Verkehr ohne internationale Verkehre und ohne EWF** abgeleitet worden. Die Ausführungen zeigen aber, dass die gleichen relativen Minderungen auch dann zugrunde gelegt werden können, wenn die internationalen Verkehre in die Ziele mit einbezogen werden. Die Erreichung der Zielwerte wird dabei aufgrund der erwarteten starken Zunahmen des Luft- und Seeverkehrs jedoch schwieriger. Denn auch wenn der internationale Verkehr nicht Bestandteil nationaler Minderungsziele ist, weil diese in internationalen Gremien verhandelt und beschlossen werden, wird Deutschland für ein anspruchsvolles THG-Minderung dennoch ähnliche Beiträge liefern müssen wie es bei einer rein nationalen Initiative der Fall ist. Ob die Ziele auch inklusive der internationalen Verkehre erreicht werden können, wird daher ebenfalls mittels der Szenarien überprüft.

Alle Zielwerte sind zudem als Vorschläge zu verstehen. Unabhängig davon muss aber klar festgestellt werden, dass ambitionierte sektorübergreifende Klimaschutzziele mit Treibhausgasminderungen über 90 % nur mit einem nahezu treibhausgasneutralen Verkehr möglich sind – unabhängig davon, ob der internationale Verkehr in die Zieldefinition einbezogen wird oder nicht.

3. Rahmen der Szenarienmodellierung

Randbedingungen zur Technikentwicklung

Der umfassende Einsatz alternativer Fahrzeugtechnik ist ein zentraler Baustein zur Erreichung ambitionierter Klimaschutzziele sowie zur effizienten Nutzung von Energie. Schlüsseltechnik ist hierbei die **Elektrifizierung des Straßenverkehrs**. Batterieelektrische und Plug-in-Hybrid-elektrische Fahrzeuge (BEV/PHEV) sind bereits auf dem Markt, vorwiegend im Bereich der **Pkw und leichten Nutzfahrzeuge** (LNF)**.** Ziel der Bundesregierung ist es, bis zum Jahr 2020 eine Million und bis zum Jahr 2030 sechs Millionen Elektrofahrzeuge auf die Straße zu bringen.

Beim **Straßengüterverkehr** ist eine Elektrifizierung insbesondere in dem prognostiziert stark wachsenden Segment „Fernverkehr“ aus heutiger Sicht keine einfach zu realisierende Option. Die im Betrieb wirtschaftlichste und effizienteste Technik für den Fernverkehr ist der Oberleitungs-Hybrid-Lkw (OH-Lkw), auch unter Berücksichtigung des hohen Aufwands für die Infrastruktur. Allerdings erfordert diese Technik einen hohen Umstellungs- und Nutzungsgrad im Lkw-Bestand. Weitere Optionen für die größeren Fahrzeuge im Straßengüterverkehr sind die Brennstoffzelle, die aus Wasserstoff den Strom für den Elektromotor liefert, sowie Konzepte, die weiterhin einen Verbrennungsmotor benötigen. Neben dem etablierten Dieselmotor, der zukünftig mit PtL-Dieselkraftstoff aber auch mit Gemischen aus CNG/LNG und Dieselkraftstoff betrieben werden kann, werden im Rahmen dieser Studie mit CNG/LNG betriebene Ottomotoren diskutiert. Bei den kleineren Fahrzeugen (bis 12t zulässiges Gesamtgewicht) sind prinzipiell die gleichen Techniken wie bei Pkw und LNF einsetzbar.

Beim **Schienenverkehr** ist die oberleitungsgebundene Elektrotraktion die Standardtechnik, die zukünftig noch weiter ausgebaut wird, so dass nur noch ein kleiner Rest nicht oberleitungsgebundener

Verkehr verbleibt. Anders sieht es beim Schiffs- und Flugverkehr aus. Wichtigste Optionen für den **Schiffsverkehr** sind, bis auf einzelne Anwendungsfälle (z.B. Kurzstreckenfährbetrieb, Segelenergie), auf Flüssigkraftstoff sowie Gasen basierende Antriebstechniken. Auch beim **Flugverkehr** werden aus heutiger Sicht weiterhin auf Flüssigkraftstoffen basierende Antriebe die dominierende Technik bleiben.

Die Umsetzung anspruchsvoller THG-Minderungsziele bedeutet für **alle Antriebsenergien**, dass sie zukünftig nahezu THG-neutral produziert werden müssen. Dies erfordert zwingend eine auf erneuerbaren Energien basierende Stromproduktion (in- und ausländisch). Schließt man bei den Kraftstoffen, wie vom Umweltbundesamt in „Treibhausgasneutrales Deutschland 2050“ [UBA, 2014a] oder auch von der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen in „Renewables in Transport 2050“ [LBST, 2016] angenommen, die Verwendung von Biokraftstoffen im Verkehr aus, müssen die benötigten Kraftstoffe (Wasserstoff, CNG, LNG, Benzin, Diesel, Flug- und Schiffskraftstoffe) hauptsächlich via PtG/PtL-Verfahren aus erneuerbarem Strom erzeugt werden. Eine konsequente Energiewende im Stromsektor ist also unbedingt notwendig für das Erreichen der THG-Minderungsziele.

Für die Szenarien ergeben sich daraus die folgenden Ansätze:

Fahrzeugtechnik:

- Es findet eine umfassende Elektrifizierung der Pkw und leichten Nutzfahrzeuge statt. Bis 2020 wird ein Bestand von rund 500.000 Fahrzeugen, bis 2030 von rund drei Millionen Fahrzeugen erreicht. Bis 2050 sind es 25 Millionen Fahrzeuge. Im Jahr 2050 werden 37% der Fahrleistungen von Pkw und LNF elektrisch erbracht.
- Beim Straßengüterverkehr werden weiterhin vorwiegend dieselbetriebene Verbrennungsmotoren eingesetzt. Dies folgt der Einschätzung in [UBA, 2015], dass derzeit keine Aussage möglich ist, welche der in Frage kommenden Techniken aus Emissions- und Kostensicht und bezüglich der Umsetzungschancen eindeutige Vorteile gegenüber einer anderen Technik aufweist.
- Alle Fahrzeugkonzepte werden effizienter und realisieren bis 2050 das aus heutiger Sicht technisch begründbare Minderungspotenzial.
- In einer Zusatzvariante „Klimaschutz E+“ werden die Auswirkungen einer weitergehenden Elektrifizierung untersucht. Dabei wird angenommen, dass die Ziele der Bundesregierung, bis 2020 1 Mio. und bis 2030 6 Mio. Elektro-Kfz im Bestand zu haben, erreicht werden. Außerdem wird beim Straßengüterverkehr die Einführung des Oberleitungs-Hybrid-Lkw ab 2020 unterstellt.

Energiebereitstellung:

- Im Referenzszenario werden Kraftstoffe weiterhin überwiegend aus fossilen Quellen gewonnen; der Biokraftstoffanteil liegt bei Benzin und Diesel 2020 bis 2050 bei 10 %.
- Im Klimaschutzszenario erfolgt ab 2030 eine Umstellung von fossilen und Biokraftstoffen auf PtG/PtL-Kraftstoffe aus EE-Strom; die Umstellung ist 2050 abgeschlossen.
- Die Stromproduktion im Inland wird auf erneuerbare Energien umgestellt. Basis sind die Szenarien aus der Leitstudie 2011 (Szenario A (Referenzszenario) bzw. Szenario THG 95 (Klimaschutzszenario)) [DLR et al., 2012].

Vorgehen Maßnahmenmodellierung

Ein ambitioniert-realistisches Minderungsziel kann nur mit einer entsprechend ausgerichteten Politik erreicht werden. Diese sollte Maßnahmen enthalten, mit denen zum einen das Treibhausgasziel erreicht wird, zum anderen auch die für die Realisierbarkeit entscheidenden Nebenziele (z.B. geringe Kosten, gesellschaftliche Akzeptanz) möglichst gut erfüllen. Zur Ableitung dieses Maßnahmenbün-

dels ist in dem Projekt eine umfassende Literaturrecherche betrieben worden, um aus der damit erstellten Maßnahmensammlung eine Auswahl und Strukturierung aus den bekannten Maßnahmen treffen zu können. Der Fokus der Analyse liegt in der Betrachtung von Vermeidungs- und Verlagerungsoptionen.

Personenverkehr

In der Operationalisierung des Personenverkehrs wird zwischen Alltags- (bis 50 km) und Fernverkehr (über 50 km) unterschieden. Dabei steht im Alltagsverkehr eine Reihe von Maßnahmen zur Minderung der THG-Emissionen zur Verfügung, die teilweise schon seit Jahren bekannt sind. Wesentlich erscheinen daher Analysen, welche Hemmnisse eine umfassende Umsetzung dieser Maßnahmen verhindern. Ist eine Strategie der Verkehrsvermeidung verbunden mit einem Bewusstseinswandel sowie einer entsprechenden Änderung der Raumstruktur, kann diese einen relevanten Beitrag zur Minderung der Emissionen im Alltagsverkehr beitragen, ohne dass es zu einer Suffizienz im Sinne von weniger Mobilität kommt.

Im Fernverkehr konzentrieren sich die Maßnahmen zur Reduktion der MIV-Fahrleistung auf ökonomische Instrumente. Diese können effektiv zur Reduktion beitragen, sind jedoch auch auf ihre soziale Ausgewogenheit zu prüfen. Eine höhere Bepreisung des MIV sollte daher mit attraktiven Angeboten im öffentlichen Verkehr einhergehen, wobei dieses Angebot so zu gestalten ist, dass eine Induzierung von Neuverkehren möglichst unterbleibt.

Güterverkehr

Im Güterverkehr liegt der Fokus zur Auswahl der Maßnahmen auf der Verlagerung und Optimierung, da das reine Vermeidungspotenzial angesichts der strukturellen Rahmenbedingungen als nur sehr gering einzustufen ist. Die Maßnahmen generieren sich aus den Handlungsfeldern …

- Marktzugang und Marktregulierung,
- ökonomische Instrumente der Fiskalpolitik,
- Ordnungspolitik,
- finanzielle Förderungen und Subventionen,
- Infrastrukturpolitik,
- Instrumente der Raum- und Verkehrsplanung,
- Informationspolitik und Bewusstseinsbildung.

Zur Operationalisierung der Maßnahmenwirkungen wurde ein Wirkungsmodell erstellt, welches den Güterverkehrsmarkt in wichtige Teilsegmente unterscheidet. Insgesamt wurden aus der Kombination von vier Hauptverkehrsverbindungen (Binnenverkehr, Versand, Empfang, Durchgangsverkehr) und zehn Warengruppen 40 Teilsegmente differenziert. Für jedes Teilsegment wurde diskutiert, welche Wirkung die einzelnen Maßnahmen dort erzielen können. Dabei wurde gestuft vorgegangen, indem zuerst die gesamtmodale Nachfrageentwicklung geprüft, dann der nachfragebezogene Modal Split diskutiert, im Anschluss die modalen Verkehrsleistungsentwicklungen abgeleitet und zum Schluss die straßenbasierten Fahrleistungen ermittelt wurden. Als Indikatoren wurden u.a. produktionsbasierte Kostenveränderungen und entsprechende Nachfrageelastizitäten, Entfernungsverteilungen, mittlere Transportweiten sowie Auslastungen herangezogen. Dazu wurde ein verkehrliches Mengengerüst aufgestellt, mit dem umfangreiche Zeitreihenanalysen ab 1995 in der oben beschriebenen Segmentdifferenzierung möglich waren. Mit regressionsbasierten, funktionalen Zusammenhängen konnten so auch Trends fortgeschrieben, diskutiert und bei Bedarf verändert werden.

4. Ergebnisse der Szenarienrechnungen

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse für Verkehrsleistung, Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen der im vorigen Kapitel beschriebenen Szenarien (Referenz- und Klimaschutzszenario, sowie an relevanten Stellen die Variante „Klimaschutz E+“) dargestellt.

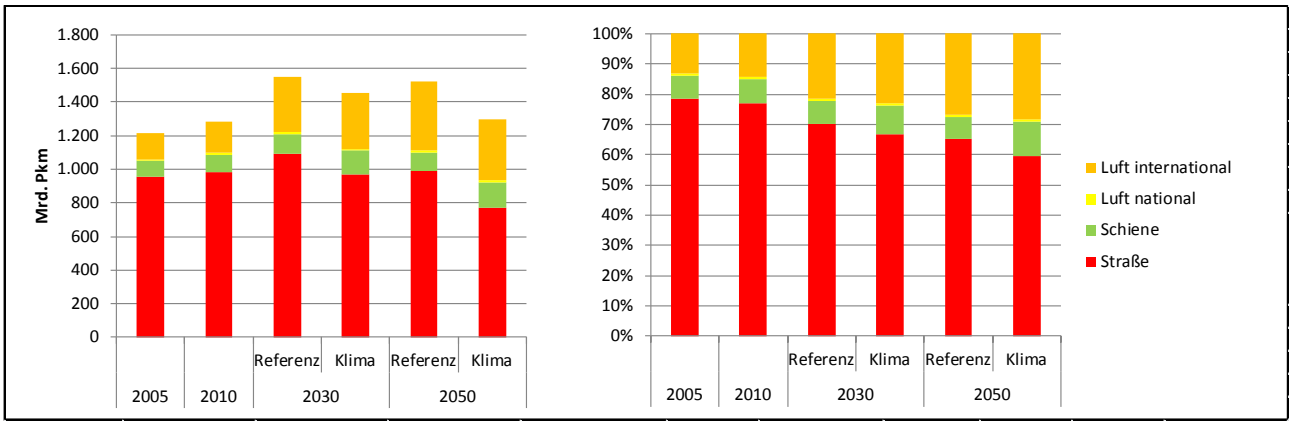
Verkehrsleistung und Endenergieverbrauch Personenverkehr

Im **Referenzszenario** steigen die **Verkehrsleistungen** des Personenverkehrs, einschließlich des internationalen Flugverkehrs, bis 2030 um 27 % gegenüber 2005 an und gehen dann von 2030 auf 2050, vor allem aufgrund des angenommenen Bevölkerungsrückgangs, um 2 % zurück. Treiber des Wachstums der Verkehrsleistungen gegenüber heute ist insbesondere der Flugverkehr, der bis 2050 um fast 150 % gegenüber 2005 zunimmt. Der Straßenverkehr nimmt bis 2030 um 14 % zu und geht danach von 2030 auf 2050 um 9 % zurück (Straßenverkehrsleistung 2050 gegenüber 2005: +4 %). Der Schienenverkehr erreicht im Jahr 2050 eine um 17 % höhere Verkehrsleistung als 2005. Damit kommt es im Szenario zu einer leichten Verschiebung des Modal Splits von der Straße auf die Schiene (siehe Kapitel 5.3.1).

Bei dieser Entwicklung sind, neben der rückläufigen Bevölkerung, als weitere Nachfrage dämpfende Effekte die Zunahme der Mobilitätskosten gemäß der Verkehrsverflechtungsprognose 2030 unterstellt, die sowohl die angenommenen Effizienzgewinne bei der Fahrzeugtechnik als auch Schwankungen in den Energiepreisen auffangen.

Im **Klimaschutzszenario** wird aufgrund der Umsetzung der nichttechnischen Maßnahmen (siehe Abschnitt 3 der Zusammenfassung) bis 2030 eine um 7 % und bis 2050 eine um 15 % geringere Zunahme der **Verkehrsleistung** als im Referenzszenario erreicht, bei einem Unterschied im Straßenverkehr von -22 % und im Luftverkehr von -10 % im Jahr 2050. Der Modal Split verschiebt sich deutlich von der Straße hin zum Eisenbahnverkehr (von 7,6 % im Jahr 2005 auf 11 % im Jahr 2050, siehe Kapitel 6.4.1).

Abbildung 1: Entwicklung der Personenverkehrsleistung und des Modal Splits im Referenz- und Klimaschutzszenario

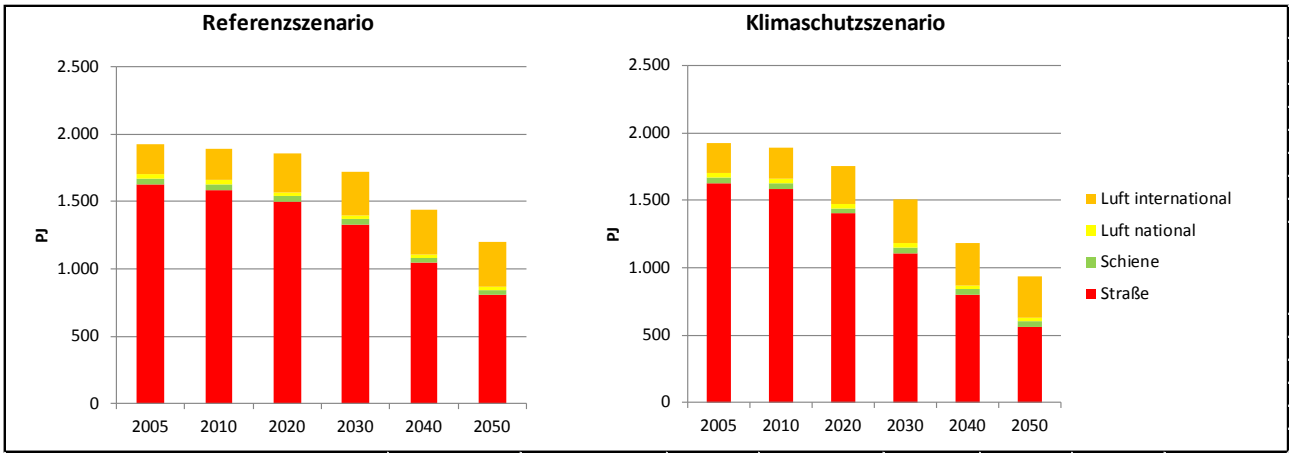


Der **Endenergieverbrauch** des nationalen und internationalen Personenverkehrs geht im **Referenzszenario** von 2005 bis 2030 leicht, ab 2030 stärker zurück und liegt im Jahr 2050 um 37 % unter dem Ausgangswert 2005. Treiber dieses Rückgangs ist der Straßenverkehr, dessen Energieverbrauch sich in diesem Zeitraum halbiert, wogegen der Endenergieverbrauch des **Flugverkehrs** um 45 % zunimmt. Der Rückgang des **nationalen Verkehrs** ist mit -49 % dem des Straßenverkehrs ähnlich (siehe Kapitel 5.3.2).

Die deutliche Abnahme des Endenergieverbrauchs gegenüber der Verkehrsleistungsentwicklung spiegelt die anspruchsvollen Annahmen zur **Effizienzentwicklung** an den Fahrzeugen sowie die Elektrifizierung im Straßenverkehr wieder. Allein im Straßenverkehr geht der Endenergieverbrauch **je Personenkilometer um 52 % zurück.** Dies erfordert eine Beschleunigung des bisherigen Trends, denn im **Zeitraum von 1990 bis 2005** nahm der Endenergieverbrauch je Personenkilometer im Straßenverkehr nach TREMOD-Berechnungen **um rund 15% zu**, jedoch dann bis 2013 um rund 22 % ab. Schreibt man diese Entwicklung unter der Annahme gleich hoher absoluter Minderungen pro Jahr fort, läge die Gesamtminderung in 2050 gegenüber 2005 bei 45 %. In der Elektrifizierung liegen jedoch auch darüber hinausgehende Minderungspotenziale.

Trotz identischer Effizienzentwicklung, wird im **Klimaschutzszenario** eine weitere Minderung des Endenergieverbrauchs gegenüber dem Referenzszenario im Jahr 2050 von 15 Prozentpunkten (nationaler und internationaler Personenverkehr, 14 Prozentpunkte nur nationaler Personenverkehr) erreicht. Dies bedeutet gegenüber dem Referenzszenario im Jahr 2050 22 % bzw. 27 % weniger (siehe Kapitel 6.4.2).

Abbildung 2: Entwicklung des Endenergieverbrauchs des Personenverkehrs im Referenz- und Klimaschutzszenario



Die Unterschiede in der Personenverkehrsleistung und dem Endenergieverbrauch gehen auf folgende Effekte zurück (im Jahr 2050 gegenüber dem Referenzszenario):

Vermeiden:

- Geringere Verkehrsleistung inländischer Landverkehr: -15 %
- Geringere Verkehrsleistung Flugverkehr -10 %

Verlagern:

- Die Modal Split-Verschiebung von MIV auf Fuß, Rad und ÖV führt zusammengefasst mit der Vermeidungswirkung zu einem Rückgang der Pkw-Fahrleistung um 28 % gegenüber der Referenz in 2050.

Verbessern:

- Pkw-Fahrleistung sinkt durch Auslastungsgrad-Erhöhung um weitere 10 %

Gesamteffekt:

- Rückgang der Pkw-Fahrleistung gegenüber Referenz 2050 um 35 %
- Rückgang des Endenergieverbrauchs gegenüber Referenz 2050 um 23 % (Gesamtverkehr) bzw. 27 % (nationaler Verkehr)

Verkehrsleistung und Endenergieverbrauch Güterverkehr

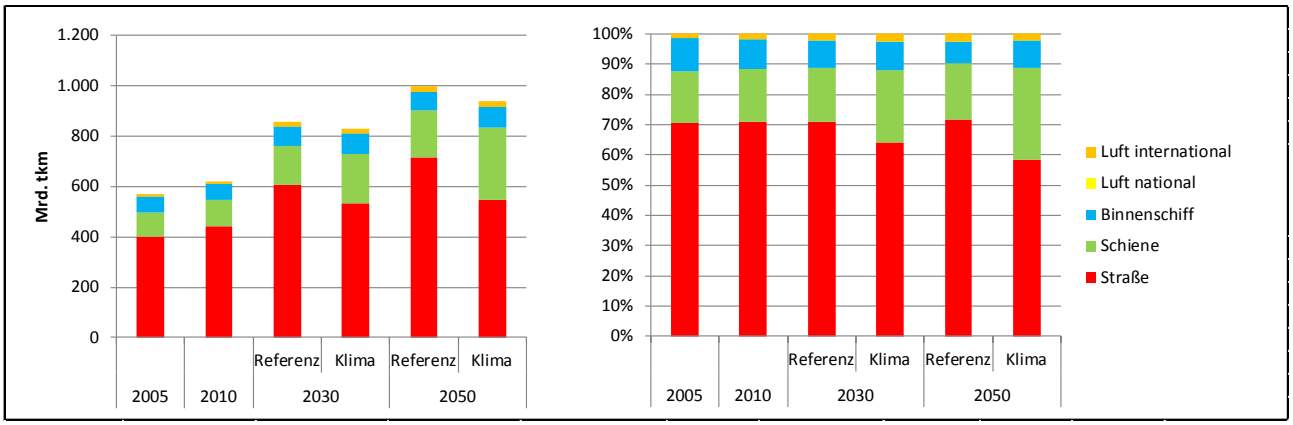
Im **Referenzszenario** nimmt die **Verkehrsleistung** im Güterverkehr von 2005 bis 2050 insgesamt um 75 % zu. Dabei verschiebt sich der Modal Split nur geringfügig vom Binnenschiff auf Schiene und Straße. Im gleichen Zeitraum verdreifacht sich die Verkehrsleistung des internationalen Luftverkehrs (siehe Kapitel 5.3.1).

Für den **internationalen Seeverkehr** wurden keine Verkehrsleistungen ermittelt. Dieser wird in den Ergebnissen für Energieverbrauch und Emissionen mit einem gegenüber 2010 unveränderten Energieverbrauch auf Basis der Schiffsbunkermengen nach Energiebilanz mit bilanziert.

Im **Klimaschutzszenario** liegt die Transportleistung **um 6 % niedriger als im Referenzszenario.** Im Klimaschutzszenario wird somit nur eine geringe Wirkung beim Vermeiden erzielt, da die Gesamtnachfrage abhängig ist von den Annahmen zur Bevölkerungsentwicklung und der weiteren Entwicklung der Wirtschaft sowie ihrer Einbindung in die globalen Produktionsprozesse. Diese sind als unverändert gegenüber dem Referenzszenario angenommen.

Der **Modal Split** verschiebt sich im Vergleich zum Referenzszenario **deutlich von der Straße hin zum Eisenbahnverkehr** (von 17 % im Jahr 2005 auf 30 % im Jahr 2050). Somit wird, trotz geringer Minderung der Gesamt-Transportleistung, im Straßenverkehr ein Rückgang der Transportleistung um 23 % gegenüber dem Referenzszenario erzielt. Diese Verlagerung stellt dabei eine maximale Ausschöpfung des Verlagerungspotenzials dar und ist ohne eine entsprechende Erweiterung der Kapazitäten (Trassen, Knoten, Umschlag) gegenüber dem heute bestehenden Netz nicht erreichbar. Mit dieser Verlagerung würde der bestehende Trend, dass Hinzugewinnen von gut zwei Prozentpunkten am aufkommensbezogenen Modal Split in der letzten Dekade, deutlich verstärkt.

Abbildung 3: Entwicklung der Güterverkehrsleistung und des Modal Splits im Referenz- und Klimaschutzszenario

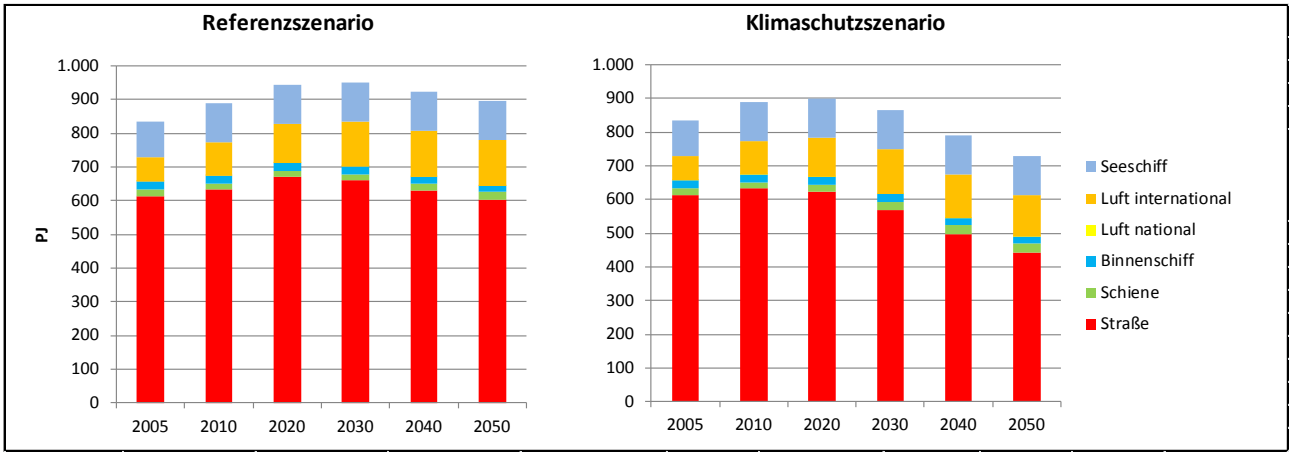


Der **Endenergieverbrauch** im **nationalen Güterverkehr** steigt im **Referenzszenario** von 2005 bis 2020 an, stagniert dann nahezu bis 2030 und geht dann bis 2050 zurück. **2050** liegt der Verbrauch um **2 %** unter dem Wert von 2005 (siehe Kapitel 5.3.2). Bei Einbezug des **internationalen Güterverkehrs** steigt der Energieverbrauch bis 2030 an, geht dann zurück und liegt **2050** um **8 %** über dem Wert von 2005. Damit werden beim Güterverkehr insgesamt verkehrsleistungsbezogene **Effizi-**

enzgewinne von knapp **40 %** erzielt, vor allem durch eine Erhöhung der Energieeffizienz und der Transportleistung je Fahrzeugkilometer.

Der **Endenergieverbrauch** des Güterverkehrs geht im **Klimaschutzszenario** im **nationalen Verkehr** um **25 % und einschließlich der internationalen Verkehre** um **12 %**, zurück (siehe Kapitel 6.4.2). Damit ist der Endenergieverbrauch des Güterverkehrs im Jahr 2050 im Klimaschutzszenario gegenüber dem Referenzszenario um 24 % (nationaler Verkehr) bzw. 19 % (Gesamtverkehr) niedriger. Wesentlicher Treiber ist dabei die Verlagerung auf den Eisenbahnverkehr.

Abbildung 4: Entwicklung des Endenergieverbrauchs des Güterverkehrs im Referenz- und Klimaschutzszenario



Die Unterschiede in der Güterverkehrsleistung und dem Endenergieverbrauch gehen auf folgende Effekte zurück (im Jahr 2050 gegenüber dem Referenzszenario):

Vermeiden:

- Geringere Verkehrsleistung inländischer Landverkehr: -6 %
- Geringere Verkehrsleistung Flugverkehr: -10 %

Verlagern:

- Modal Split-Verschiebung vom Straßengüterverkehr auf die Bahn führt zum Rückgang der Lkw-Verkehrsleistung um 23 % gegenüber Referenz 2050.

Verbessern:

- Lkw-Fahrleistung sinkt durch Auslastungsgrad-Erhöhung um weitere 5 %

Gesamteffekt:

- Rückgang der Lkw-Fahrleistung gegenüber Referenz 2050 um 27 %
- Rückgang des Endenergieverbrauchs gegenüber Referenz 2050 um 27 % (Straßengüterverkehr), 24 % (nationaler Güterverkehr) und 19% (gesamter Güterverkehr)

Bewertung des Klimaschutzszenarios im Güterverkehr

Die im Klimaschutzszenario quantifizierten Wirkungen der hier analysierten Maßnahmen schöpfen unter den dargestellten Randbedingungen das Potenzial von Vermeidung, Verlagerung und Verbesserung aus. Das Wirkungsmodell zur Quantifizierung der Maßnahmenwirkungen geht davon aus, dass die Gesamtnachfrage aus Produktion und Verbrauch mit verkehrlichen Maßnahmen nicht signifikant beeinflusst werden kann. Stattdessen sind strukturelle Entwicklungen (Bevölkerung, volkswirtschaftliche Verflechtungen) und Verhaltens-, Konsum- und Produktänderungen entscheidender. Deren – jedoch zumeist nur sehr langfristig abbildbaren – Implikationen bzw. die dahinter stehenden Maßnahmen waren nicht Gegenstand dieser Studie.

Verkehrliche Maßnahmen können jedoch insbesondere im Bereich Verkehrsmittelwahl (Modal Split) und der Transportabwicklung (Logistikprozesse bzw. Routing) Wirkungen im Sinne des Klimaschutzszenarios zeigen. Zur realistischen Abschätzung der Maßnahmenwirkung ist dabei eine detaillierte Modellierung des Güterverkehrsmarkts notwendig. So sind die Produktions- und Logistikprozesse der einzelnen Teilsegmente differenziert zu betrachten, da die Maßnahmenwirkungen auf diese sehr unterschiedlich ausfallen.

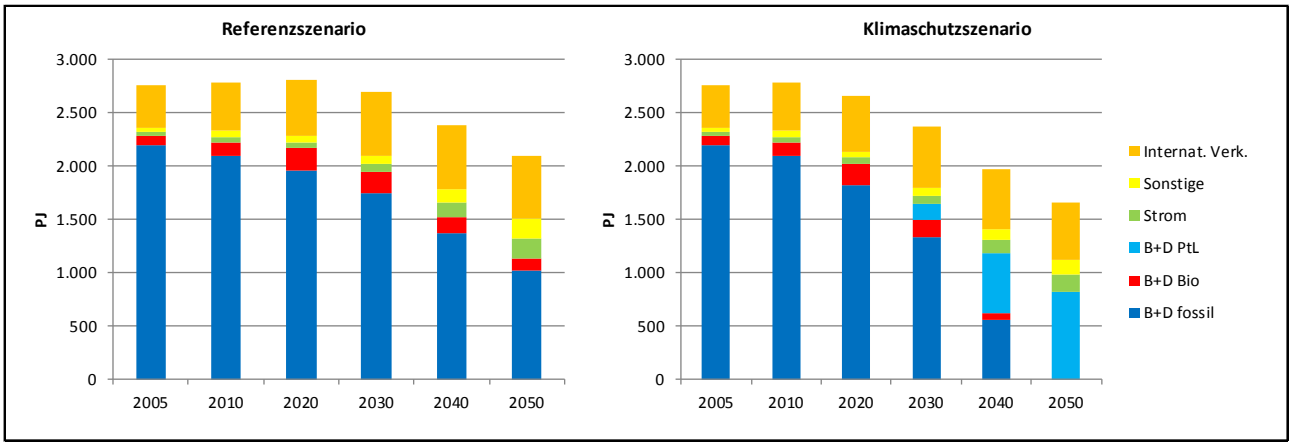
So sind beispielsweise Verlagerungsmaßnahmen bei langlaufenden Verkehren sehr wirkungsvoll, da hier die Bahn einerseits überhaupt erst entsprechende Produkte (u.a. in Bezug auf die Geschwindigkeit) anbieten kann und andererseits wirtschaftlich konkurrenzfähig wird. Damit rücken vor allem internationale Relationen in den Fokus von Verlagerungsstrategien. Aber auch auf längeren innerdeutschen Verbindungen können bei entsprechenden Rahmenbedingungen (Infrastrukturkapazitäten, differenzierte Kostensteuerung) Energie- und THG-Minderungen erzielt werden.

Endenergieverbrauch und direkte Treibhausgasemissionen Gesamtverkehr

Endenergieverbrauch (siehe Kapitel 6.4.2)

Beim **nationalen Verkehr** liegt der Rückgang des Energieverbrauchs von 2005 bis 2050 im **Referenzszenario bei 36 %** (**gesamter Verkehr: -24 %**) Beim **Klimaschutzszenario** liegen die Werte bei **-53 % (nationaler Verkehr)** bzw. **-40 % (gesamter Verkehr).** Durch die **nichttechnischen Maßnahmen** im Klimaschutzszenario wird damit gegenüber dem Referenzszenario im Jahr 2050 **eine zusätzliche Minderung von 26 % (nationaler Verkehr) bzw. 21 % (gesamter Verkehr) erreicht.**

Abbildung 5: Entwicklung des Endenergieverbrauchs des gesamten Verkehrs im Referenz- und Klimaschutzszenario



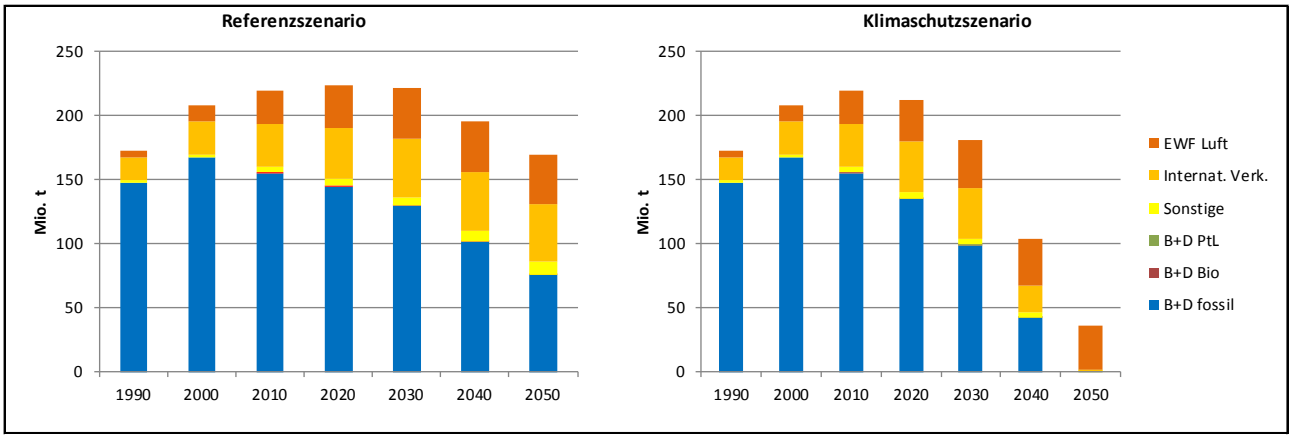
In der **Variante Klimaschutzszenario E+** mit einer schnelleren Einführung der Elektromobilität beim Pkw und der Umstellung eines großen Anteils des Straßengüterfernverkehrs auf Oberleitungs-Hybrid-Lkw wird gegenüber dem Klimaschutzszenario eine **zusätzliche Minderung des Energiebedarfs um 6 % für den nationalen Verkehr und 4 % für den Gesamtverkehr** erreicht. Hierbei ist der direkte Stromverbrauch doppelt so hoch und der Bedarf an PtG/PtL-Kraftstoffen um 19 % geringer als im Klimaschutzszenario.

THG-Emissionen (siehe Kapitel 6.4.4)

Im **Referenzszenario** nehmen die direkten THG-Emissionen des **Straßenverkehrs** bis 2050 um **42 %** gegenüber dem Ausgangsjahr 1990 ab. Bei Hinzunahme der internationalen Verkehre wird für den Gesamtverkehr nur eine Minderung um 22 % erzielt. Die zusätzliche Berücksichtigung des EWF (Emission-Weighting-Factor) für den Einbezug der erhöhten Klimawirkung von Flugzeugemissionen in großen Höhen führt nur zu einer Minderung der direkten THG-Emissionen um 1 %.

Im **Klimaschutzszenario** wird mit der Annahme einer vollständigen Umstellung auf THG-neutrale Energieträger (PtL, PtG) das Minderungsziel von 98,5 % sowohl für den nationalen als auch den gesamten Verkehr erreicht (Energiewende). Allerdings werden zu deren Erzeugung sehr hohe Mengen an EE-Strom benötigt. Im Jahr 2050 werden dann noch etwa 1,4 Mio. t THG-Emissionen direkt emittiert. Mit **EWF liegen die THG-Emissionen um nahezu 35 Mio. t** höher. Damit wäre das Minderungsziel unter Einbezug des EWF nicht zu erreichen. Auch wenn diese Emissionen nicht in den nationalen Zielen berücksichtigt werden, bleibt der Handlungsbedarf von deutscher Seite bei ähnlich anspruchsvollen Zielen auf internationaler Ebene bestehen.

Abbildung 6: Entwicklung der direkten THG-Emissionen im Referenz- und Klimaschutzszenario



Primärenergieverbrauch und gesamte Treibhausgasemissionen Gesamtverkehr

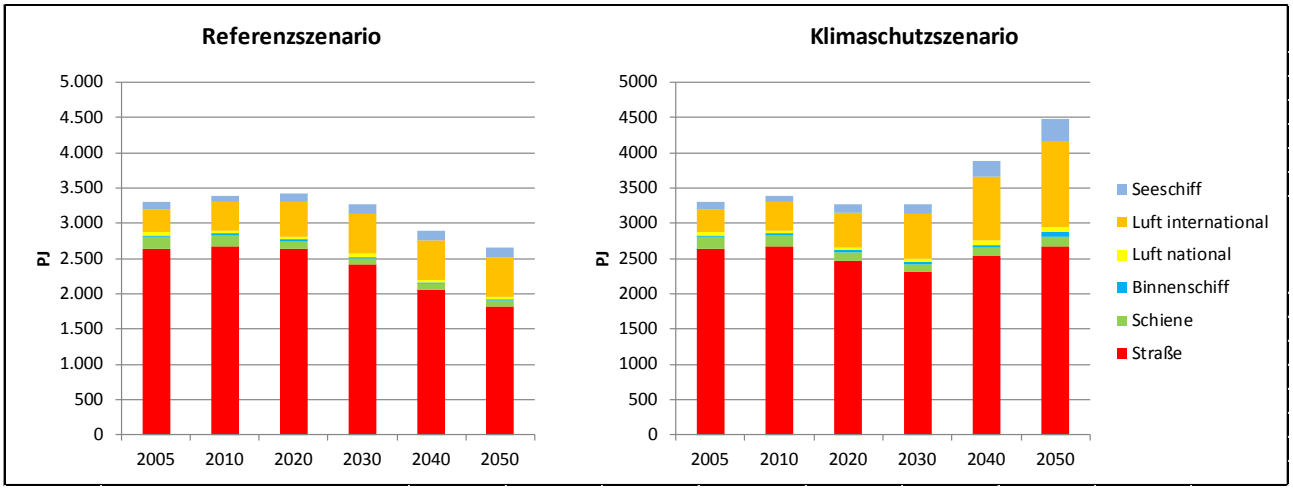
Primärenergieverbrauch (siehe Kapitel 6.4.3)

Der Energieverbrauch unter Einbezug der energetischen Aufwendungen für die Produktion der Endenergieträger ist nicht Bestandteil der sektoralen Zieldiskussion, gibt aber Aufschluss darüber, welche Energieträger zukünftig mit welchem Aufwand produziert und am Fahrzeug bereitgestellt werden müssen.

Beim **Referenzszenario** ergeben sich im Verlauf bis 2050 nur geringe Unterschiede zur Entwicklung des Endenergieverbrauchs, da dort lediglich die Stromproduktion bis 2050 überwiegend auf erneuerbare Energien umgestellt wird, während die dominierenden Kraftstoffe weiterhin überwiegend aus fossilen Quellen und zu einem geringen Teil aus biogenen Energieträgern stammen.

Im **Klimaschutzszenario** steigen die Aufwendungen für die Energieerzeugung ab 2030 deutlich an. Dadurch ist der Primärenergiebedarf im Jahr 2050 beim nationalen Verkehr um 2 % höher als im Jahr 2005. Beim Gesamtverkehr nimmt der Primärenergiebedarf um 36 % zu. Der Primärenergiebedarf liegt im Jahr 2050 im Klimaschutzszenario im nationalen Verkehr um 50 % (Gesamtverkehr 69 %) höher als im Referenzszenario.

Abbildung 7: Entwicklung des Primärenergieverbrauchs des gesamten Verkehrs in den Szenarien



Die Zunahme des Endenergiebedarfs wird verursacht durch den **steigenden Bedarf an EE-Strom** für die Produktion von treibhausgasneutralen PtG/PtL-Kraftstoffen. Insgesamt werden im **Klimaschutzszenario** für die **Erzeugung der PtG/PtL-Kraftstoffe** im Jahr 2050 4.230 PJ und für den direkten Strombedarf des Verkehrs 180 PJ benötigt, insgesamt also **4.410 PJ**. Da je vermiedener Energieeinheit PtG/PtL-Kraftstoff die zwei- bis dreifache Menge (energetisch) an EE-Strom eingespart wird, würden ohne die Maßnahmen des Klimaschutzszenarios 1.200 PJ zusätzlicher EE-Strom benötigt.

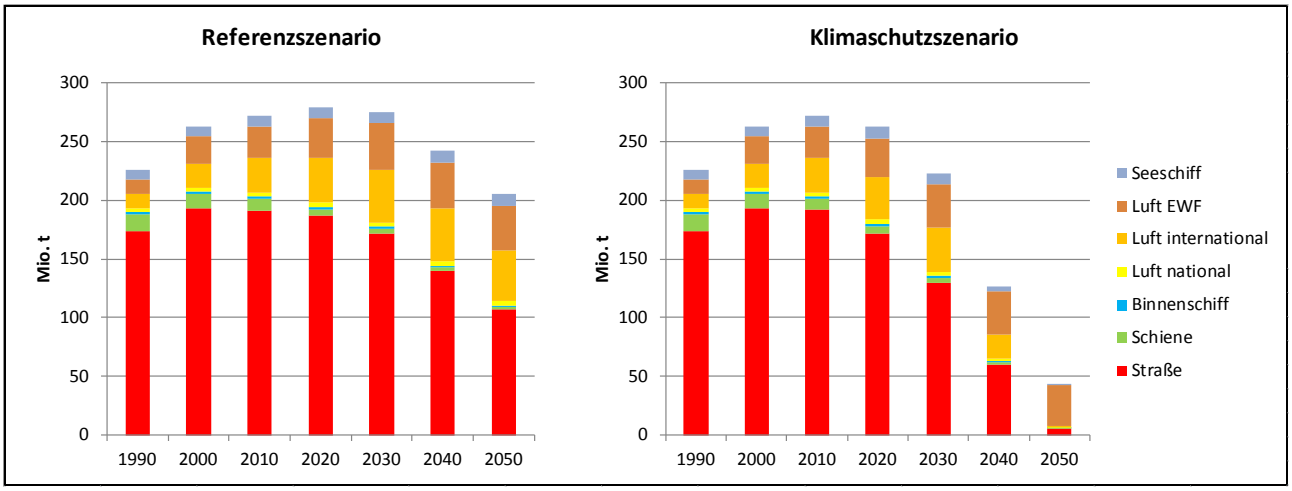
Das **inländische wirtschaftliche Potenzial** zur Erzeugung von erneuerbarem Strom ist dabei beschränkt. Aktuelle Studien geben als für den Verkehr in Deutschland verfügbare EE-Strommengen in 2050, d.h. das inländische wirtschaftliche Potenzial minus den Verbrauch der anderen Sektoren, mit 594 PJ [DLR et al., 2012] bis 1.574 PJ [DLR et al., 2014] an. Bei den so benötigten Mengen wird daher der größte Anteil der erneuerbaren Energien im Ausland bezogen werden müssen.

Gesamte (direkte und indirekte) Treibhausgasemissionen

Im **Referenzszenario** liegt der Rückgang der gesamten Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) von 1990 bis 2050 beim **gesamten Verkehr** ohne EWF **bei 22 %** (**nationaler Verkehr: -41 %**).

Beim **Klimaschutzszenario** sinken die THG-Emissionen ab 2030 deutlich ab. Dadurch bleiben im Jahr 2050 noch ca. 8 Mio. t THG-Emissionen übrig. Von diesen stammen, wie bereits bei den direkten THG-Emissionen dargestellt, ca. 1,4 Mio. t aus der direkten Verbrennung und ca. 1,8 Mio. t aus der Stromerzeugung, die 2050 noch nicht zu 100 % regenerativ angenommen wurde, der Rest aus anderen, noch nicht THG-neutralen Prozessen. Hierbei ist zu beachten, dass auf dem erreichten niedrigen Niveau jede verbliebene Emissionsquelle zu einer großen relativen Veränderung führen kann (siehe Kapitel 6.4.5).

Abbildung 8: Entwicklung der WtW-THG-Emissionen des gesamten Verkehrs in den Szenarien mit EWF



Den mit Abstand höchsten Beitrag zu den THG-Emissionen leistet auch in der Betrachtung der Gesamt THG-Emissionen der Flugverkehr in großen Flughöhen (EWF). Wird dieser einbezogen, liegt die Minderung der THG-Emissionen des Gesamtverkehrs in 2050 gegenüber 1990 nur bei 81 %.

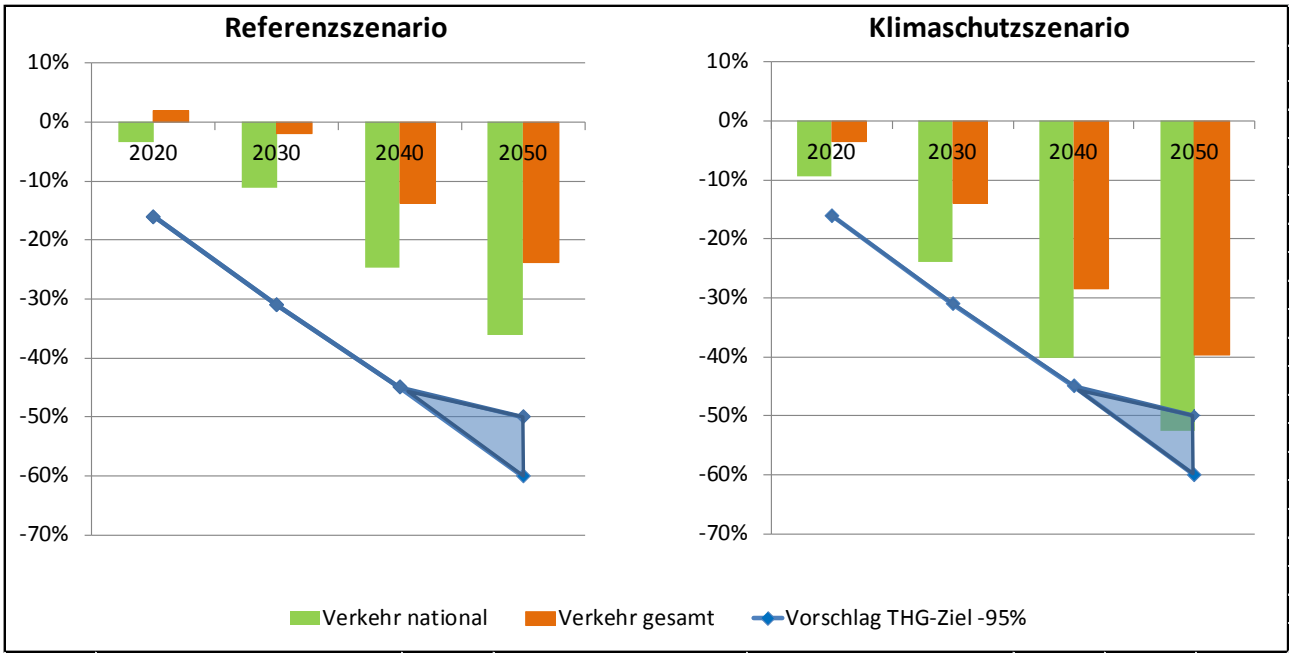
5. Gegenüberstellung der Szenarienergebnisse und der Vorschläge für sektorale Minderungsziele

In dieser Studie wurden Vorschläge für sektorale Minderungsziele für den Endenergieverbrauch und die Treibhausgase aus sektorübergreifenden Überlegungen abgeleitet. Diese Vorschläge wurden mit den Ergebnissen der Verkehrsszenarien verglichen, überprüft und entsprechend angepasst. Zentral ist dabei die Analyse, inwieweit die explizit festgelegten Ziele für den Endenergieverbrauch und die direkten THG-Emissionen mit heute vorstellbaren Maßnahmen erreicht werden können. Sie wird zudem erweitert um eine Bewertung der Ergebnisse für den Primärenergieverbrauch und die indirekten THG-Emissionen. Damit werden auch die möglichen Wirkungen in anderen Sektoren und anderen Ländern in die Betrachtung mit einbezogen.

Endenergieverbrauch

Der Endenergieverbrauch ist eine wichtige Zielgröße bei der sektoralen Zieldiskussion. Die folgende Abbildung stellt die im Referenz- und Klimaschutzszenario erreichten Minderungen des Endenergieverbrauchs, jeweils für den nationalen Verkehr und den Gesamtverkehr, dem vorgeschlagenen Ziel von 50 % bis 60 % Endenergieminderung (2050 gegenüber 2005) gegenüber.

Abbildung 9: Vergleich der Minderungsraten für den Endenergieverbrauch mit den Werten aus der Zielwertdiskussion für ein THG-Ziel von -95 %



Bezüglich der Vorschläge für die Endenergieziele ergeben sich aus den Szenarien folgende Schlussfolgerungen:

- Das Klimaschutzszenario erreicht -53 % Endenergieverbrauch für den nationalen Verkehr in 2050. Das anspruchsvollere Klimaschutzszenario E+ mit höherer Elektrifizierung bei Pkw und die Einführung des Oberleitungs-Hybrid-Lkw im Straßengüterfernverkehr erreicht -55 %[2].
- Eine höhere Minderung bis 60 % des Endenergiebedarfs kann mit weiteren anspruchsvollen Avoid-Shift-Improve (ASI)-Maßnahmen und einer stärkere Elektrifizierung der Fahrzeugflotte (auch nach 2050) erreicht werden.

Bereits das im Energiekonzept der Bundesregierung festgelegte Endenergieziel von -40 % erfordert eine konsequente Minderungsstrategie. Das Klimaschutzszenario zeigt dabei, dass mit ambitioniert-realistischen Maßnahmen über 50 % Endenergieverbrauchsminderung möglich sind. Sollen -60 % bis 2050 erreicht werden, sind noch höhere Anstrengungen zur Vermeidung und Verlagerung von Verkehr sowie zur Verbesserung der verkehrlichen und technischen Effizienz notwendig.

Das notwendige Endenergieziel ist jedoch in hohem Maße davon abhängig, welche Mengen an THG-neutralen Kraftstoffen zu welchen Kosten im Jahr 2050 oder danach zur Verfügung stehen. Dazu kann diese Studie keine Einschätzung liefern. Daher wird empfohlen, das Endenergieziel für das –95 % THG-Ziel mit einer Bandbreite -50 % bis -60 % für 2050 ambitioniert anzusetzen und dieses

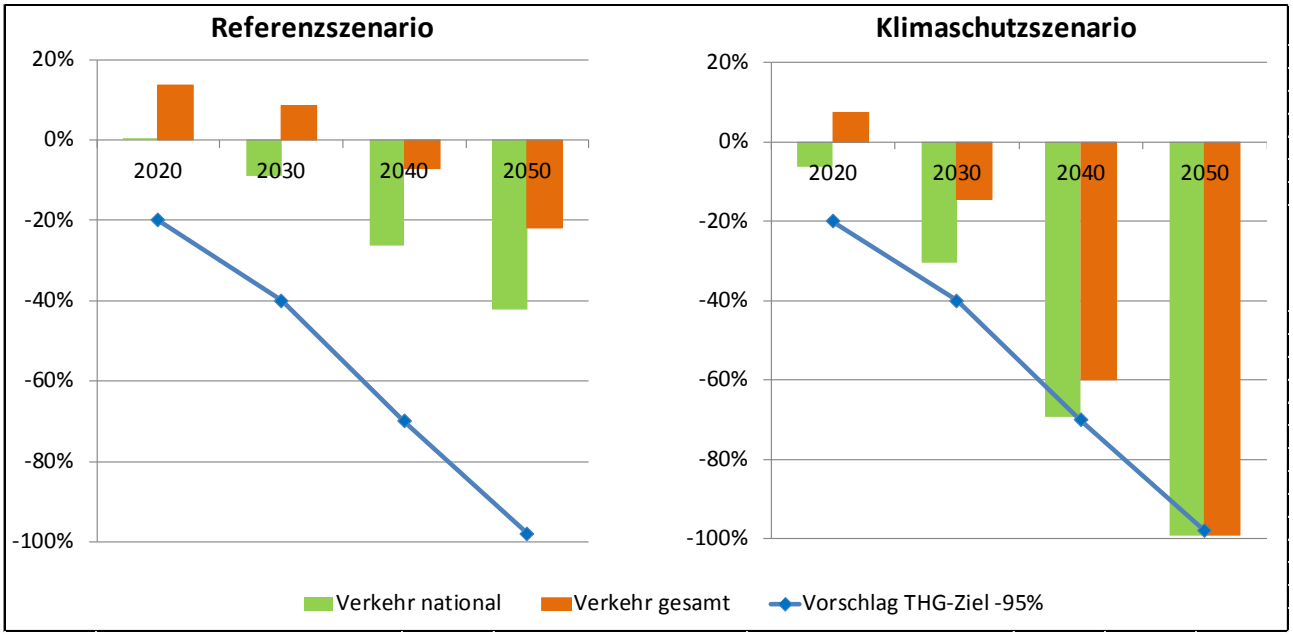
[2] Hier ist darauf hinzuweisen, dass die in den Szenarien ab 2013 angenommene hohe Flottendurchdringung mit Elektro-Pkw in der Realität bis Anfang 2016 nicht erreicht wurde und derzeit auch nicht absehbar ist. Die bis heute ausgebliebene signifikante Steigerung der Durchdringung der Flotte mit Elektro-Pkw bedeutet zudem, dass entweder die für die Jahre 2016 bis 2030 unterstellten Entwicklungen später und dann deutlich schneller umgesetzt werden müssten oder dass sich die Minderungseffekte zeitlich weiter in die Zukunft verschieben.

regelmäßig dem aktuellen Kenntnisstand entsprechend zu überprüfen. Notwendige Randbedingung ist hierbei, dass das -95 %-THG-Ziel erreicht werden kann.

THG-Emissionen

Die folgende Abbildung stellt die im Referenz- und Klimaschutzszenario erreichten Minderungen der direkten THG-Emissionen – jeweils für den nationalen Verkehr und den Gesamtverkehr – den vorgeschlagenen Zielen gegenüber.

Abbildung 10: Vergleich der Minderungsraten für die direkten THG-Emissionen (TtW) mit den Werten aus der Zielwertdiskussion (ohne EWF)



Die Ergebnisse für die direkten THG-Emissionen lauten wie folgt:

- Während die THG-Minderungen beim Referenzszenario erwartungsgemäß eine ähnliche Größenordnung aufweisen wie beim Endenergieverbrauch und damit keines der Ziele erreichen, werden im Klimaschutzszenario die vorgeschlagenen sektoralen Zielwerte für die THG-Emissionen bis 2050 erreicht.
- Die Zwischenziele des -95 %-THG-Ziels können für den nationalen Verkehr nach 2030 erreicht werden. Die verkehrlichen Maßnahmen, die Einführung von Elektrofahrzeugen und die Verbesserung der Energieeffizienz an den Fahrzeugen reichen jedoch nicht, um die Zwischenziele bis 2030 zu realisieren. Es wird dennoch empfohlen, die Zwischenziele in der vorgeschlagenen Größenordnung beizubehalten, denn die voreilige Anpassung von Zwischenzielen an eine absehbare Realität birgt auch die Gefahr, dass die Anstrengungen in Hinblick auf das 2050er Ziel nicht so konsequent wie notwendig verfolgt werden.
- Bezieht man den internationalen Verkehr (ohne EWF) mit ein, werden die Ziele der -95 %-THG-Zielkurve erst im Jahr 2050 erreicht, wenn eine vollständige Umstellung der Kraftstoffe auf PtG/PtL aus EE-Strom realisiert ist.

Bei einer Erweiterung der Zielfestlegung um die indirekten Emissionen bzw. um die zusätzlichen THG-Emissionen des Flugverkehrs ist folgendes zu beachten:

- Um die Ziele auch unter Einbezug von indirekten **THG-Emissionen** zu erreichen, muss die Produktion der PtG/PtL-Kraftstoffe treibhausgasneutral erfolgen. Bereits geringe Anteile nicht

THG-neutraler Energieträger oder Erzeugungsprozesse können zu THG-Emissionen führen, welche die Zielerreichung gefährden.

- Bezieht man die **höhere THG-Wirkung des Luftverkehrs** von nicht CO_2-Emissionen in großen Höhen mit ein, verbleibt auch im Jahr 2050 ein Sockel von über 35 Mio. t CO_2-Äquivalente, das entspricht einer THG-Minderung gegenüber 2005 von 79 %. Damit kann ein -95 %-Ziel über alle Sektoren nicht erreicht werden.

Die Erreichung des THG-Zieles im Klimaschutzszenario (ohne die höhere THG-Wirkung des Luftverkehrs) ergibt sich durch die vorgegebenen Annahmen, dass die im Verkehr verbrauchten Energieträger im Jahr 2050 nahezu THG-neutral sind. Die Realisierbarkeit ist dann abhängig von den dazu benötigten Mengen an Energie und es stellt sich die Frage: Steht insbesondere die Menge an EE-Kraftstoffen im Jahr 2050 zu vertretbaren Kosten zur Verfügung? Diese Frage kann mit dieser Studie nicht beantwortet werden. Doch ist die Wahrscheinlichkeit dafür umso größer, je weniger EE-Kraftstoffe benötigt werden (Erreichung des Endenergiezieles). Andererseits bedeuten höhere Kraftstoff- bzw. Fahrzeugkosten nicht nur eine Absicherung zur Vermeidung sogenannter „Rebound-Effekte“ sondern darüber hinaus auch finanzielle Anreize für Modal Shift und Verkehrsvermeidung. Rückwirkungen dieser Art auf den Modal Split und resultierende Verkehrsnachfragen waren jedoch ebenfalls nicht Gegenstand dieser Studie.

6. Zusammenfassende Bewertung

Soll bis 2050 in Deutschland sektorübergreifend eine THG-Minderung von 95 % gegenüber 1990 erreicht werden, dann muss der Verkehr nahezu treibhausgasneutral sein. Die Szenarienergebnisse zeigen, dass der Weg zu einem nahezu THG-neutralen Verkehr möglich ist. Sie zeigen aber auch, dass dazu sowohl eine Verkehrswende als auch eine umfassende Energiewende notwendig sind.

Verkehrs- und Energiewende sind notwendige Bausteine eines THG-neutralen Verkehrs

Maßnahmen zur Vermeidung, Verlagerung und Verbesserung der Effizienz können den Endenergieverbrauch des Verkehrs (ohne internationale Verkehre) zwischen 50 und 60 % reduzieren (Klimaschutzszenario: -53 %; Klimaschutzszenario E+: -55 %); dies entspricht auch einer Minderung der THG-Emissionen in ähnlicher Größenordnung. Dies setzt aber voraus, dass Elektromobilität (das schließt Plug-in-Hybride und Elektrofahrzeuge mit Range-Extender ein) – wo immer möglich – zum Einsatz kommt. Eine THG-Neutralität des Verkehrs ist aber nur zu erreichen, wenn darüber hinaus eine konsequente Energiewende im Verkehr stattfindet. Kernelemente einer Energiewende sind zusätzlich zur Elektromobilität der Einsatz von aus regenerativem Strom hergestellten PtG-/PtL-Kraftstoffen für die Verkehrsträger, die nicht direkt elektrifiziert werden können.

Die Analysen in dieser Studie zeigen aber auch klar, dass der Einsatz von erneuerbaren PtG-CH_4-und PtL-Kraftstoffen den Bedarf an EE-Strom für den Verkehr stark ansteigen lassen (insgesamt 4.400 PJ im Jahr 2050 im Klimaschutzszenario). Da diese Kraftstoffe teurer sein werden als konventionelle Kraftstoffe ist die Senkung des Endenergieverbrauchs des Verkehrs zentral. Ohne die zusätzlichen Maßnahmen des Klimaschutzszenarios würde der EE-Strombedarf sogar rund 1.200 PJ höher liegen.

Für anspruchsvolle Klimaschutzziele ist somit ein enges Zusammenspiel von einer Verkehrswende und einer Energiewende im Verkehr entscheidend, denn eine Energiewende wird umso teurer und schwieriger, je mehr Endenergie der Transportsektor benötigt. Eine Verkehrswende mit Verkehrsvermeidung und -verlagerung sowie Effizienzsteigerungen könnte den Endenergieverbrauch hingegen deutlich senken und ermöglicht so erst die Energiewende im Verkehr.

In dieser Studie standen Klimaschutzmaßnahmen zur THG-Minderung im Vordergrund. Eine Verkehrswende und Energiewende im Verkehr haben bei entsprechender Gestaltung aber auch positive

Auswirkungen beispielsweise auf Luftqualität, Flächenverbrauch oder städtische Lebensqualität. Die Umsetzung der Klimaschutzmaßnahmen kann daher nicht nur positive Zusatznutzen in den angrenzenden Umweltbereichen generieren, sondern sichert darüber hinaus auch einmal getroffene Entscheidungen vor wechselnden Prioritäten in künftigen Umweltdiskussionen ab.

Aus dem THG-Minderungsziel entsteht ein unmittelbarer Handlungsbedarf

Die Analyse zeigen des Weiteren, dass bei der Erreichung von ambitionierten Zielen – wie es das 95 prozentige THG-Minderungsziele über alle Sektoren darstellt – bereits heute absehbare Schwierigkeiten auftreten, notwendige Zwischenziele für Endenergieverbrauch und THG-Emissionen, wie sie in dieser Studie formuliert wurden, für das Jahr 2030 zu erreichen. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass Deutschland derzeit hinter den notwendigen Schritten für eine Verkehrswende und Energiewende im Verkehr hinterherhinkt. Die im Klimaschutzszenario angestrebten Verkehrsverlagerungen insbesondere im Güterverkehr zur Schiene sind beispielsweise nur erreichbar, wenn die entsprechenden Kapazitäten im Schienennetz vorhanden sind. Hierzu muss aber in den nächsten Jahren massiv in das deutsche Schienennetz investiert werden.

Gleiches gilt auch für eine Energiewende. Ohne dass in den nächsten Jahren die von der Bundesregierung gesetzten Ziele für den Ausbau der Elektromobilität und der erneuerbaren Energieträger konsequent umgesetzt werden, wird langfristig keine THG-Neutralität im Verkehr möglich sein. Auch hier ist ein Handeln jetzt und heute erforderlich. Aufgrund der langsamen Durchdringung des Marktes mit neuen, alternativen Fahrzeugkonzepten und des Zeitbedarfs für den Aufbau neuer Infrastrukturen (z.B. Ladeinfrastrukturen) sind lange Vorlaufzeiten einzuplanen.

Auch ein weniger ambitioniertes Minderungsziel für das Jahr 2050 bedeutet lediglich, dass ein 95%-THG-Minderungsziel ein oder zwei Jahrzehnte später erreicht werden muss. Eine 95-prozentige THG-Minderung für alle Sektoren und damit eine THG-Neutralität des Verkehrs ist in Deutschland zwingend notwendig, soll das 2015 auf dem G7-Gipfel in Schloss Elmau beschlossene Ziel erreicht werden, bis zum Jahr 2100 die Weltwirtschaft zu dekarbonisieren. Langfristig sind die in dieser Studie beschriebenen Maßnahmen des Klimaschutzszenarios daher unumgänglich, lediglich der unmittelbare Handlungsbedarf würde etwas verringert.

Der Güterverkehr ist eine besondere Herausforderung auf dem Weg zum THG-neutralen Verkehr

Diese Studie fokussiert – anders als viele Verkehrsszenarien für das Jahr 2050 – auf den Güterverkehr. Es wurde detailliert untersucht, inwieweit Verkehrsaufkommen und -leistung im Güterverkehr reduziert oder von Lkw auf die klimafreundlichere Bahn verlagert werden können. Das Ergebnis ist ernüchternd. Trotz sehr weitreichender Maßnahmen steigt die Verkehrsleistung im Güterverkehr selbst im Klimaschutzszenario bis 2050 um rund 50 % gegenüber 2010 (Referenzszenario: rund 60 %). Der Straßengüterverkehr nimmt im gleichen Zeitraum um rund 25 % (Referenzszenario: +63 %), der Schienengüterverkehr um rund 164 % zu (Referenzszenario: +73 %). Dies deutet bereits an, dass der Schienengüterverkehr im Klimaschutzszenario zugewinnt. Der Modal Split-Anteil des Schienengüterverkehrs im Jahr 2050 wird danach rund 31 % betragen, im Referenzszenario liegt er bei 19 %.

Obwohl die für den Güterverkehr im Klimaschutzszenario unterstellten Maßnahmen als ambitioniert anzusehen sind und daher am oberen Rand des Machbaren liegen dürften, sinken der Endenergieverbrauch und damit die THG-Emissionen des nationalen Güterverkehrs (ohne Luft- und Seeverkehr) im Klimaschutzszenario bis 2050 lediglich um 25 % gegenüber 2010. Dies verdeutlicht, dass Verkehrsvermeidung und -verlagerung zwar wichtige Schritte für eine THG-Neutralität im Güterverkehr sind. Es sind aber weitere Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz und zur Einführung von THG-neutralen Antriebs- und Treibstoffoptionen unabdingbar, soll eine THG-Neutralität des Güterverkehrs und damit des Verkehrs insgesamt erreicht werden. Dies gilt umso mehr, da im Jahr 2050

rund 50 % des Endenergieverbrauchs des nationalen Verkehrs (ohne Flug- und Seeverkehr) auf den Güterverkehr entfällt. Damit gilt im Güterverkehr noch mehr als im Personenverkehr: Maßnahmen einer Verkehrswende und einer Energiewende im Verkehr müssen zur Erreichung ambitionierter Klimaschutzziele Hand in Hand gehen.

Das Erreichen der THG-Ziele erfordert einen klaren politischen Rahmen

Die mit dem Klimaschutzszenario skizzierte Verkehrs- und Energiewende erfordert demnach eine konsequente Klimaschutzpolitik. Zentrale Elemente sind:

- Anreize zur Steigerung der Energieeffizienz (z.B. CO_2-Flottenwerte für Pkw, LNF und SNF),
- Anreize zur Umschichtung des Fahrzeugbestands zu strombasierten Antriebssystemen sowie zur Schaffung der entsprechenden Ladeinfrastruktur,
- Maßnahmen zur Vermeidung, Verlagerung und zur effizienteren Verkehrsabwicklung einschließlich des Ausbaus der notwendigen Verkehrsinfrastruktur,
- Umbau des Energiesystems auf erneuerbaren Strom und erneuerbare Kraftstoffe.

Notwendiger Rahmen zur Umsetzung dieser Schritte ist die Festlegung von sektorspezifischen Zielen für Endenergieverbrauch und THG-Emissionen, sowohl für das Jahr 2050 als auch für Zwischenjahre.

Die Produktion von EE-Kraftstoffen, internationale Verkehre und die höhere THG-Wirkung des Luftverkehrs sind weitere zentrale Herausforderungen eines effektiven Klimaschutzes

Selbst wenn national die gesteckten Ziele für Endenergie und THG-Emissionen erreicht werden können, bleiben eine Reihe von Herausforderungen, die darüber hinaus zu beachten sind:

- Das inländische Potenzial für die Erzeugung an erneuerbarem Strom ist groß, aber keinesfalls unbegrenzt – speziell mit Blick auf gesellschaftliche Akzeptanz. Heutige fossile Kraftstoffe stammen fast ausnahmslos aus Importen. In Zukunft könnten insbesondere strombasierte Flüssigkraftstoffe in geeigneten Regionen außerhalb Deutschlands kostengünstiger[3] als in Deutschland produziert und nach Deutschland importiert werden. Hohe Nachhaltigkeitsstandards erfordern einen internationalen Ordnungsrahmen, der garantiert, dass die importierten Kraftstoffe zu 100 % EE-basiert, ökologisch nachhaltig und sozial verträglich produziert sind.
- Beim internationalen Flug- und Seeverkehr sind allein national definierte Minderungsziele nicht ausreichend. Es spricht daher viel dafür, deren Wirkung in die nationalen Klimaziele des Verkehrs zunächst informatorisch einzubeziehen und in einem international ausgerichteten Rahmen zu adressieren. Aktivitäten hierzu sind beispielsweise die Verhandlungen im Rahmen der Internationalen Zivilluftfahrtorganisation (ICAO) und der Internationalen Schifffahrtsorganisation (IMO), in denen Minderungsziele und globale marktbasierte Reduktionsmaßnahmen entwickelt werden. Global ausgehandelte Ziele und Maßnahmen sind Voraussetzung für eine wettbewerbsneutrale Rahmensetzung. Nationale Maßnahmen können jedoch flankierend wirken, z.B. durch verstärkte Anstrengungen bei der Entwicklung und Einführung von Effizienztechniken und alternativen Antriebssystemen. Letztlich können aber auch

[3] In [LBST, 2016] wird für die Produktion von PtL im Ausland ein Kostenvorteil von bis zu 20 % gegenüber der inländischen Produktion in 2050 gesehen (S.158). Wesentliche Faktoren für den Kostenvorteil sind dabei geringe Stromkosten und eine höhere Auslastung der PtL-Anlage. Betrachtete Technologie ist dabei eine PtL-Produktion vor Ort mit erneuerbaren Strom aus Solarwärmekraftwerken (Volllaststunden mit thermischen Speicher von 6500 h und Stromgestehungskosten von 5,5 ct/kWh) [LBST, 2016]. Im Vergleich werden mittlere Stromgestehungskosten von erneuerbaren Strom in Deutschland im Jahr 2050 mit 6,5 ct/kWh angenommen.

internationale Ziele nur durch hohe Beiträge der einzelnen Länder oder Ländergemeinschaften wie die EU erreicht werden.

- Die zusätzliche THG-Wirkung des Flugverkehrs aus Nicht-CO_2-Emissionen in großen Flughöhen bleibt bei konventioneller Technik (Verbrennung von Kraftstoffen in Turbinen) bestehen, selbst bei der Verwendung von 100 % EE-basierten Kraftstoffen. Bei Einbezug der Wirkung dieser Emissionen kann daher selbst bei den angenommenen ambitionierten Maßnahmen einer Verkehrs- und Energiewende im Luftverkehr keine THG-Neutralität erreicht werden. Dies zeigt, dass für einen anspruchsvollen Klimaschutz im Luftverkehr neben technischen und operativen Maßnahmen, wie z.B. die Entwicklung klimaoptimierter Flugrouten oder hybrider Antriebkonzepte, insbesondere eine weitere Vermeidung und Verlagerung dieser Verkehre notwendig ist. Die entsprechenden Veränderungen in den Mobilitäts- und Konsummustern erfordern dabei ein deutliches gesellschaftliches Umdenken sowie einen signifikant veränderten politischen Rahmen.

Summary

1. Goals and scope of the study

Status quo

The German Federal Government aims for a 40 % reduction of greenhouse gas (GHG) emissions across all sectors by 2020, a 55 % reduction by 2030, a 70 % reduction by 2040 and a 80-95 % reduction by 2050 (in reference to 1990, respectively). To achieve these goals, the transport sector has to contribute in a major way. However, the required extent of the contribution, the specific measures and the opportunities for action derived from the overall agenda have not been investigated in sufficient detail. This is particularly relevant for the perspective up to the year 2050.

Project focus

Among the key points of the project was the identification of an ambitious-realistic reduction target for GHG emissions from the transport sector up to the year 2050 in accordance with reduction targets stipulated for all sectors. To evaluate the feasibility of these targets for the transport sector, a climate protection scenario for projected transport development up to 2050 was created. In this scenario, the impact of measures that avoid and shift transport was prioritised. Additional reductions from these measures were modelled in comparison with a reference scenario with a key focus on efficiency improvement.

The development of the climate protection scenario focused on the following key points:

- Analysis of the effectiveness of avoidance, reduction and improvement measures with a focus on freight transport (‘**transport transition**’).
- Discussion of technology options for the use of renewable energy carriers available for the compliance with GHG reduction targets with a focus of road freight transport (‘**energy transition**’).
- Impact of the transport transition in case of a defined technology requirement for the energy transition (focus on Power-to-Liquid from renewable electricity (RE-PtL)).

In addition to the climate protection scenario, a separate **climate protection scenario E+** assuming near-complete electrification of road transport was included to model the sensitivity for the influence of additional technology potentials. In this scenario, the passenger car targets of the German Federal Government are taken into consideration (i.e. one million electric vehicles (EVs) by 2020, six million by 2030) and the introduction of catenary hybrid trucks in road freight transport is assumed for 2020.

Finally, the results of the climate protection scenario are evaluated in light of the proposed sector-specific targets considering

- the contribution of the avoidance, reduction and improvement measures (transport transition),
- the contribution of the measures promoting the use of renewable energy carriers (energy transition) and
- the contribution of transport to the GHG emissions outside of the transport sector.

Boundaries of the study

The **‘transport’ sector** includes the following sub-sectors modelled in the target value discussion and the scenario calculations:

- **Domestic transport:** road (motorised two-wheelers, passenger cars, light-duty commercial vehicles, heavy-duty commercial vehicles, road trains and semi-trailer trucks, buses and other motor vehicles), rail (tram, subway and railway transport) and inland navigation on inland waterways as well as air transport between domestic airports.
- **International transport:** international air transport originating from German airports (total distance to the first destination outside Germany) and international maritime navigation (in this study modelling was based on vessel bunker volumes and energy balance).

The **environmental indicators** under consideration according to the climate protection goals are:

- **Final energy consumption** of the vehicles (Tank-to-Wheel, TtW).
- Direct GHG emissions of the vehicles (TtW, reported as CO_2 equivalents (CO_2e) after [IPCC 2007]); for renewable energy carriers (biofuels, fuels from RE electricity), direct CO_2 emissions are considered nil. In consequence, the only emissions included in the model are additional non-CO_2 greenhouse gases (N_2O, CH_4).
- Moreover, the relevant emissions and energy consumption from **energy supply** (Well-to-Tank, WtT) arising in other sectors or potentially outside Germany are calculated in the scenarios. Thus, possible ramifications of activities in the transport sector for other sectors and countries may be identified.
- In an additional scenario, the climate impact of air transport in altitudes above the tropopause is captured via the **emission weighting factor (EWF)** and included in the assessment.

The requirements for **production, maintenance and disposal of vehicles and infrastructure** were **excluded**. Assessment of these may be found, for instance, in [UBA 2013a].

Finally, please note that both the sector-specific inventory and the target value discussion according to national reporting is based on the marketing-oriented **energy balance**, which does not have to equal the national energy consumption of the transport sector in a calendar year. Thus, the input data for the energy consumption deviate between the scenario calculation based on domestic transport performance and the energy balance data derived from national reporting. In consequence, a comparison between targets and scenario results is carried out for the relative projected development between reference year and target year.

2. Sector-specific reduction targets for transport

The present study investigated potential GHG reduction targets for the transport sector. It was assumed that other sectors were very likely to exploit their full reduction potentials due to the fact that the associated costs of GHG reduction are generally much lower. The current final energy consumption reduction target for the transport sector calls for a 10 % reduction by 2020 and a 40 % reduction by 2050 in reference to 2005 [Bundesregierung 2010]. The study recommends the coordination of target values for the reduction of GHG emissions with those for final energy consumption in transport. A coordinated stipulation of **energy consumption targets** is associated with two advantages:

- There is incentive for continuously reduced energy consumption. Thus, supply of the transport sector with renewable, low-GHG or GHG-free energy carriers is facilitated. Supply of renewable energy for transport purposes is paramount for the achievement of substantial GHG reductions in the transport sector.
- The coordinated stipulation of energy consumption targets and GHG reduction targets allows GHG reduction efforts in next 10-20 years to primarily focus on ambitious energy consump-

tion targets. In the subsequent period up to 2050, efforts could shift to ambitious GHG reduction targets.

Thus, the most efficient use of available renewable energies is ensured, i.e. the initial application of available renewable energies primarily in those sectors where they can maximise GHG reductions in the coming years due to their superior overall efficiency, particularly in comparison with RE-PtG-CH_4 and RE-PtL used in combustion engines. Simultaneously, the share of renewable energies in the transport energy mix can be increased more easily in the case of reduced final energy consumption.[4]

For this purpose, the stipulation of target values not only for the year 2050 is essential. There is a critical requirement for intermediate targets for the interim years 2020, 2030 and 2040 to make optimal use of the advantages of the coordinated control mechanisms of attuned GHG and final energy targets. Stakeholders can be presented with reliable and robust guidance for investment security.

The extent of the sector-specific reduction of GHG emissions and final energy consumption depends on climate protection targets across all sectors as well as the actual reductions of the other sectors. The Federal Government has committed to an 80-95 % reduction of GHG emissions across all sectors by 2050 (in reference to 1990). Thus, the minimum requirement for the transport sector is defined by the 'permitted' emission total those emissions from other sectors deemed inevitable (primarily agriculture and industrial processes). Given a 95 % GHG reduction target across all sectors by the year 2050 in reference to 1990, it follows that the **transport sector is required to reduce GHG emissions by about 98 %** to compensate for inevitable GHG emissions from other sectors. In essence, the transport sector is required to be effectively GHG-neutral by the year 2050. The margin for the transport sector could only be increased in the case of more moderate targets across all sectors.

Targets could be achieved with the reduction of the final energy consumption as well as the use of low-GHG or GHG-free energy carriers. Due to cost and resource efficiency matters, the realisation of the 53 % final energy consumption reduction calculated in the climate protection scenario is expected to serve as a standard for the minimum target. The 53 % reduction distinctly exceeds the 40 % reduction target stipulated in the energy concept of the Federal Government [Bundesregierung 2010]. Due to uncertainties associated with the implementation of the measures proposed in the climate protection scenario as well as the availability of RE fuels, a reduction target between 50 % and 60 % final energy consumption by 2050 is proposed. In the process, the intermediate reduction targets for the years 2020-2040 should aim for reduction pathways around 60 %. In the case of easy availability of renewable energies, the targets may be adapted as appropriate.

Table 2 illustrates the targets for the reduction of both final energy consumption and GHG emissions for the year 2050 as well as the interim years 2020, 2030 and 2040. The final energy consumption in the interim years is linked to the 2050 target in a linear fashion. Up to the year 2030, GHG emissions are strongly correlated with final energy consumption reductions. In the subsequent period, higher relative reductions are assumed in reference to the final energy consumption due to the expectation that renewable fuels are likely to be available for use in the transport sector then.

[4] In this context, the industrial-scale availability of the technologies required for the achievement of climate protection targets (e.g. RE-PtG-CH_4 and RE-PtL) is essential. Depending on the timeline of the market launch of these technologies, temporary increases in GHG emissions during the establishment period may be acceptable. Market launch trajectories of electricity-based fuels are discussed in Chapter 5.2.4.

Table 1: Proposed reduction targets for energy consumption and GHG emissions from transport in Germany assuming a 95 % GHG reduction target across all sectors

	2020	2030	2040	2050
Energy consumption in transport (in reference to 2005)	-16 %	-31 %	-45 %	-50 to -60 %
GHG emissions from transport (in reference to 1990)	-20 %	-40 %	-70 %	-98.5 %

In principle, **transport targets were derived excluding international transport and EWF**. However, data show that similar relative reductions may be applied when international transport is included in the model. Nonetheless, the achievement of stipulated targets is considered difficult due to the expected considerable increase of air and maritime transport. Although international transport is not considered to be part of national reduction targets due to the fact that international transport negotiations are the subject of international bodies, Germany will in all likelihood face demands at an international level that are similar to the ambitious targets of a national initiative. Thus, the achievability of targets including international transport was likewise investigated in the scenarios.

All targets should be understood as suggestions. However, it is essential to note that ambitious climate protection targets across all sectors with GHG reductions exceeding 90 % can only be achieved with a near-GHG-neutral transport sector. This conclusion is independent of international transport being taken into account in the calculations. 3. Framework of the scenario models

Technology development constraints

The widespread use of alternative vehicle technology is a pivotal element for the achievement of ambitious climate protection targets and efficient energy use. The key technology in this context is the **electrification of road transport**. Battery-electric and plug-in hybrid electric vehicles (BEV/ PHEV) are already available on the market, primarily in the segment of **passenger cars and light-duty vehicles**. The Federal Government aims to introduce one million of electric vehicles by the year 2020 with the intention to further increase the number to six million by 2030.

In the case of **road freight transport**, the electrification of the strongly expanding segment of long-distance transport in particular is currently perceived as a major challenge. The most economic and technologically most efficient option for long-distance transport are catenary hybrid trucks, even in light of the complex infrastructure required. However, a switch to this technology is associated with major changes and high rates of use in the heavy-duty vehicle stock are paramount. Further options for larger vehicles in road freight transport are fuel cells supplying electricity from hydrogen and concepts that continue to rely on combustion engines. In addition to the established diesel engine that will be operated with PtL diesel as well as a CNG/LNG plus diesel mix are discussed in the context of CNG/LNG-powered petrol engines in the present study. Smaller vehicles (up to 12t gross vehicle weight) may benefit from the technologies developed for passenger cars and light-duty vehicles.

Rail transport routinely employs catenary electric traction as standard technology with the prospect of future expanse so that only a small fraction of non-catenary transport is expected to remain. The outlook for ship and air transport is fundamentally different. With the exception of a small number of applications (e.g. short-distance ferry transport, sailing energy), essential options for **transport by ship** include operation with liquid- or gas-powered propulsion technologies, **air transport** is expected to remain reliant on liquid fuel propulsion in the foreseeable future as well.

The implementation of ambitious GHG reduction targets presents **all propulsion energies** with the challenge of near-neutral GHG emission production. In consequence, the supply of electricity from

renewable energies (domestic and international) is imperative. In the case that biofuels are excluded from use for transport purposes, following approaches developed by the German Federal Environmental Agency in 'Treibhausgasneutrales Deutschland 2050' [UBA 2013a] or the Research Association for Combustion Engines in 'Renewables in Transport 2050' [FVV 2016], the required fuel (hydrogen, CNG, LNG, petrol, diesel, fuel oils for air and ship transport) must be supplied via PtG/PtL methodology from renewable electricity. The systematic and consistent implementation of the energy transition is thus paramount and without alternative for the achievement of GHG reduction targets.

In consequence, the following approaches apply for the scenarios:

Vehicle technology:

- Comprehensive electrification of passenger cars and light-duty vehicles is essential. An existing vehicle stock of about 500,000 vehicles is established by 2020, to be expanded to three million vehicles by 2030. In the 2050, 25 million vehicles are on the road, i.e. 37 % of mileage is powered by electricity in 2050.
- Road freight transport is primarily operated with diesel-powered combustion engines. Following the assumptions in [INFRAS 2015], there currently is no common consensus on the question which of the available technologies is likely to emerge as the most obviously favourable and definitive option considering emission and cost benefits as well as ease of implementation.
- All vehicle concepts improve in efficiency and duly realise the currently projected technological reduction potentials.
- The ramifications of near-complete electrification are explored in an additional scenario 'climate protection E+'. The scenario is based on the assumption that the Federal Government targets of one million EVs by 2020 and six millions EVs by 2030 as part of the existing vehicle stock will be met. Likewise, the introduction of catenary hybrid trucks from 2020 is an essential prerequisite.

Energy supply:

- In the reference scenario, fuel is produced predominantly from fossil sources; the share of biofuels for petrol and diesel between 2020 and 2050 does not exceed 10 %.
- In the climate protection scenario, the switch from fossil and biofuels to PtG/PtL fuels derived from RE electricity is initiated in 2030 and concluded by 2050.
- Domestic electricity production is converted to renewable energies. The model follows scenarios adopted from the pilot study 2011 [BMU 2012], i.e. Scenario A (reference scenario) and Scenario GHG (climate protection scenario).

Approaches for the modelling of measures

An ambitious yet realistic reduction target can only be achieved with dedicated political support. Political measures should focus on the achievement of GHG targets, yet remain alert and aware of the importance and feasibility of associated secondary objectives (e.g. limited cost, public acceptance). The set of measures proposed here was developed based on a thorough literature search assessing published measures, thus allowing an informed selection and structuring from all available measures. The key focus of the analysis was on strategies for avoidance and shift.

Passenger transport

The operationalisation of passenger transport is divided in routine daily (up to 50 km) and long-distance (50+ km) travel. A number of measures are readily available for the reduction of GHG emissions from routine daily travel, some have been known for years. In this context, an analysis of the factors preventing the successful implementation of these measures is essential. In the case that a

strategy for transport avoidance is linked with both a change of public attitude and a necessary change of spatial design, its implementation may be associated with relevant contributions to reduce emissions from routine daily travel without any drawbacks in the form of insufficient mobility.

The reduction measures for motorised individual long-distance transport focus on economic instruments. These may be used effectively for the reduction of transport performance, however, their social acceptability and balance requires careful consideration. Increased pricing of motorised individual long-distance transport should therefore be coordinated with attractive offers for the use public transport as a viable alternative. However, incentives should be offered in a way that avoids the induction of additional transport wherever possible.

Freight transport

In light of existing structural constraints, the potential for outright avoidance of freight transport is very slight. In consequence, the focus for the selection of measures in freight transport is on concepts promoting shift and improvement. The measures are drawn from the following areas of activity:

- market access and regulation,
- economical instruments from fiscal policy,
- regulatory policy,
- financial support and subsidies,
- infrastructural policy,
- instruments of spatial design and transport planning,
- information policy and raising awareness.

The operationalisation of measure impacts was modelled with an impact model dividing the freight transport market in major sub-segments. A total of 40 sub-segments were derived from the combination of four types of transport (national, outgoing, incoming, transit) and ten commodity groups. The impacts of individual measures were discussed for each sub-segment. A tiered approach was used, i.e. firstly, the demand trajectory per total was analysed. Next, the modal split was discussed and then the modal transport performance. Finally, road-based mileage was calculated. Among the indicators were production-based cost variation and associated variation in demand, distance distributions, average transport distances as well as occupancy rate. Thus, a transport quantity structure was derived that allowed an in-depth time series analysis from 1995 for the sub-segments specified above. Moreover, the use of regression-based functional correlations allowed the future projection of existing trends including discussion an adaptations where appropriate.

4. Results of the scenario calculations

The following paragraph illustrates the results for transport performance, energy consumption and GHG emissions applied in the scenarios introduced above (reference and climate protection scenario, as well as the additional scenario ‘climate protection E+’ where applicable).

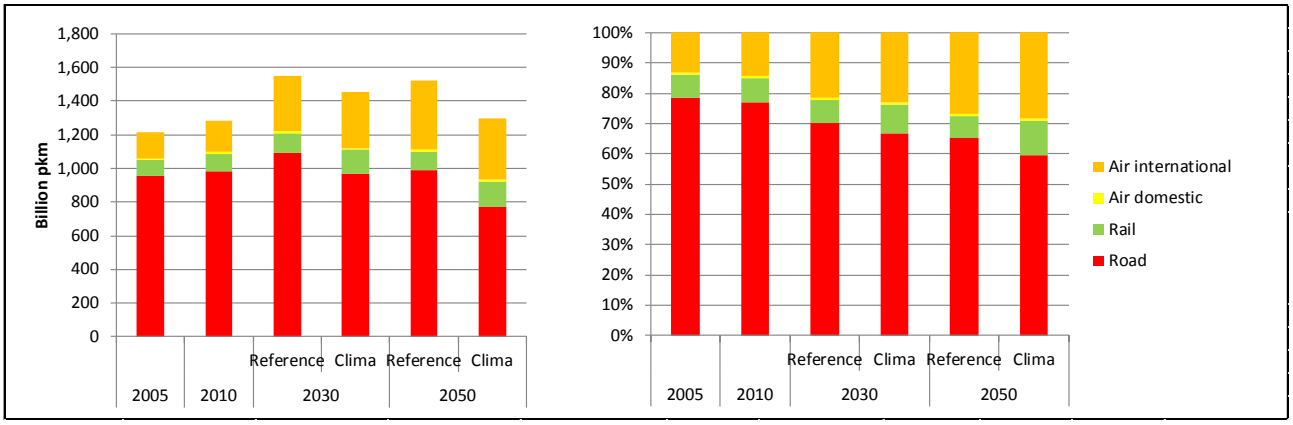
Transport performance and final energy consumption in passenger transport

The **reference scenario** assumes an increase in **passenger transport performance** including international air travel of 27 % in reference to 2005. In the years between 2030 and 2050, a slight decrease is expected due to the expected population decline. With an expected increase of 150 % in reference to 2005, air travel is the key driver of increasing transport performance. A 14 % increase in road transport is expected up to 2030, with a subsequent 9 % decrease between 2030 and 2050 (road transport performance 2050 in reference to 2005: +4 %). Rail transport is likely to see a 17 % increase by 2050 in reference to 2005. In this scenario, a slight shift in modal split from road to rail is assumed (see Chapter 5.3.1).

In addition to the expected declines in population growth, the projection includes assumptions on the increase of mobility costs as a factor likely to curb demand following the transport integration projection 2030. These effects essentially balance assumed efficiency increases as well as variation in energy pricing.

In the **climate protection scenario**, the implementation of non-technological measures is associated with a reduced increase of **transport performance**, 7 % less by 2030 and 15 % less by 2050 compared with the reference scenario. These assumptions result in a total difference of -22 % in road transport and -10 % in air transport in 2050. There is a distinct shift in modal split from road to rail (from 7.6 % in 2005 to 11 % in 2050, see Chapter 6.4.1).

Figure 1: Projection of passenger transport performance and modal split as modelled in the reference and the climate protection scenario

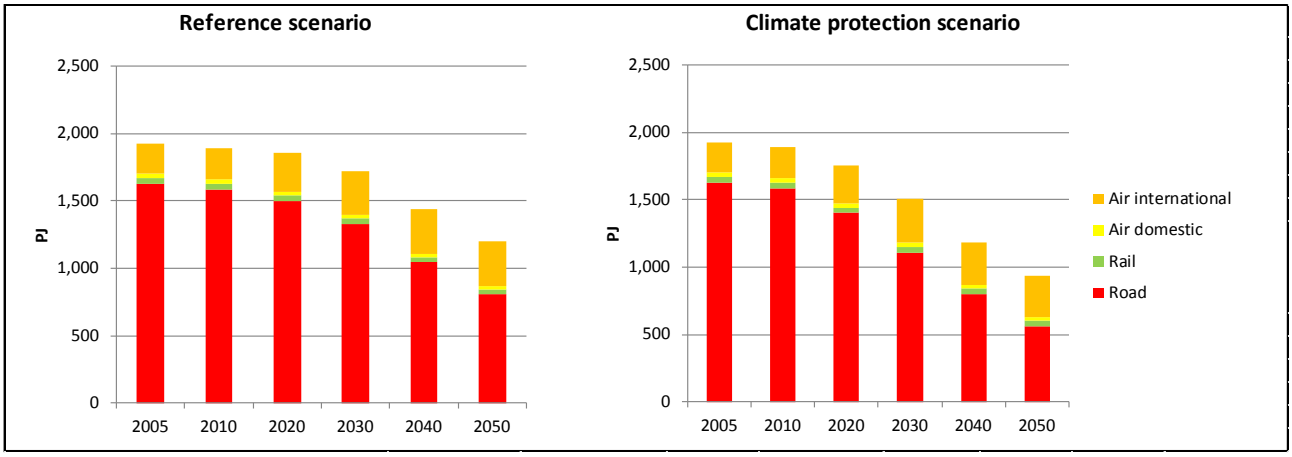


The **final energy consumption** of domestic and international passenger transport in the **reference scenario** decreases slightly between 2005 and 2030 then continues to decrease more sharply until it arrives at a 37 % reduction in 2050 in reference to 2005. The main driver of this process may be found in the decreasing energy consumption of road transport, which is expected to halve during the investigation period, whereas the energy consumption of air transport is likely to increase by 45 %. With a 49 % decrease, the decline of **domestic transport** is similar to the road transport trajectory (see Chapter 5.3.2).

The distinct decline of the final energy consumption in comparison with the trajectory of transport performance reflects the ambitious assumptions on **efficiency improvement** of vehicles as well as the impacts of the electrification of road transport. The final energy consumption **per passenger kilometre decreases by 52 %** in road transport alone. An acceleration of the current trend is required for the realisation of this projection. According to TREMOD calculations, the final energy consumption per passenger kilometre first **increased by about 15 %** in the period **between 1990 and 2005** with a subsequent reverse, i.e. a decrease of 22 % from 2005 to 2013. In the case that the current trend is continued under the assumption of constant absolute annual reductions, the total reduction would amount to 45 % by the year 2050 in reference to 2005. However, the reduction potentials associated with electrification are even higher.

Despite identical efficiency improvements, the climate protection scenario achieves an additional reduction of 15 % compared with the reference scenario (domestic and international passenger transport, -14 % for domestic passenger transport alone). In comparison with the reference scenario, this amounts to a reduction of 22 % or 27 %, respectively by the year 2050 (see Chapter 6.4.2).

Figure 2: Projection of the final energy consumption in passenger transport as modelled in the reference and the climate protection scenario



The differences in passenger transport performance and final energy consumption may be explained with the following effects (for the year 2050 in comparison with the reference scenario):

Avoidance:

- Decrease in transport performance domestic land transport: -15 %
- Decrease in transport performance air transport: -10 %

Shift:

- Modal split shift from motorised individual transport to transport on foot, by bicycle or public transport results in a decrease in passenger car transport of -28 % in comparison with the reference 2050.

Improvement:

- Passenger car transport performance further decreases through optimised occupancy rate: -10 %

Total impact:

- Decrease of passenger car transport performance in comparison with reference 2050: -35 %
- Decrease of final energy consumption in comparison with reference 2050: -23 % (all transport) or -27 % (domestic transport)

Transport performance and final energy consumption in freight transport

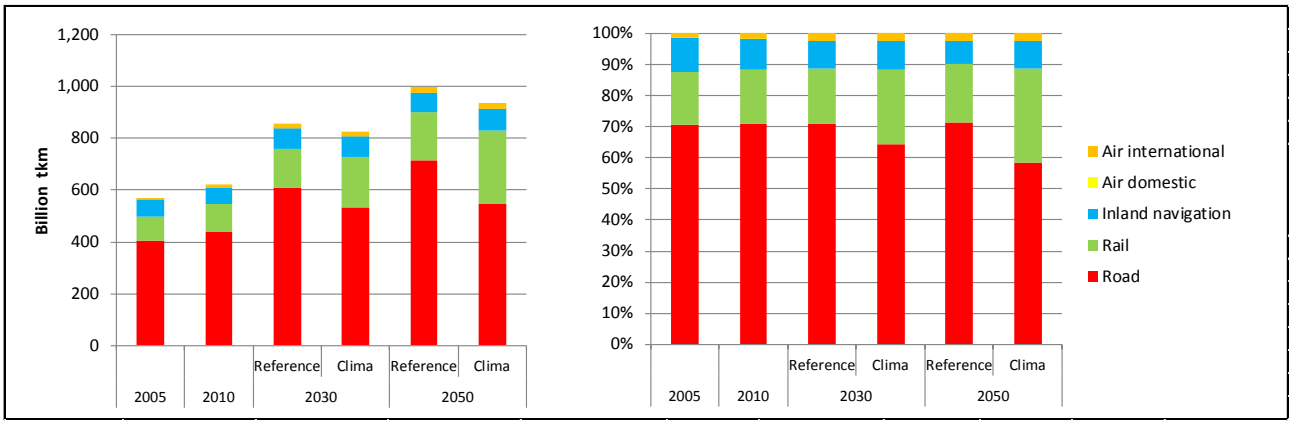
The **transport performance** in freight transport increases by 75 % between 2005 and 2050 in the **reference scenario**. There is a slight shift in modal split from inland navigation to rail and road. The transport performance of international air transport triples during the same period (see Chapter 5.3.1).

No transport performance was calculated for **international maritime navigation**. In the results for energy consumption and emissions, data for this mode of transport are assumed to be constant at the level of 2010 and modelled based on vessel bunker volumes and energy balance.

In the **climate protection scenario**, a **6 % transport performance decrease** is expected in comparison with the reference scenario. Thus, the impact of avoidance measures in the climate protection scenario is minor due to the fact that the total demand depends on assumptions of population growth and future trends in economy, as well as the integration into global production processes. These are all assumed constant in comparison with the reference scenario.

In comparison with the reference scenario, there is a **distinct shift in modal split from road to rail transport** (from 17 % in 2005 to 30 % in 2050). Thus, a 23 % decrease of road transport performance is achieved in comparison with the reference scenario despite a decreased reduction of the total transport performance. This shift represents the realisation of the maximum shift potential and cannot be implemented without considerable expansion of capacities (lines, hubs, terminals) in comparison with current facilities. The existing trend, i.e. an increase of about 2 % of the modal split in reference to total performance across the past decade, could be considerably boosted with this shift.

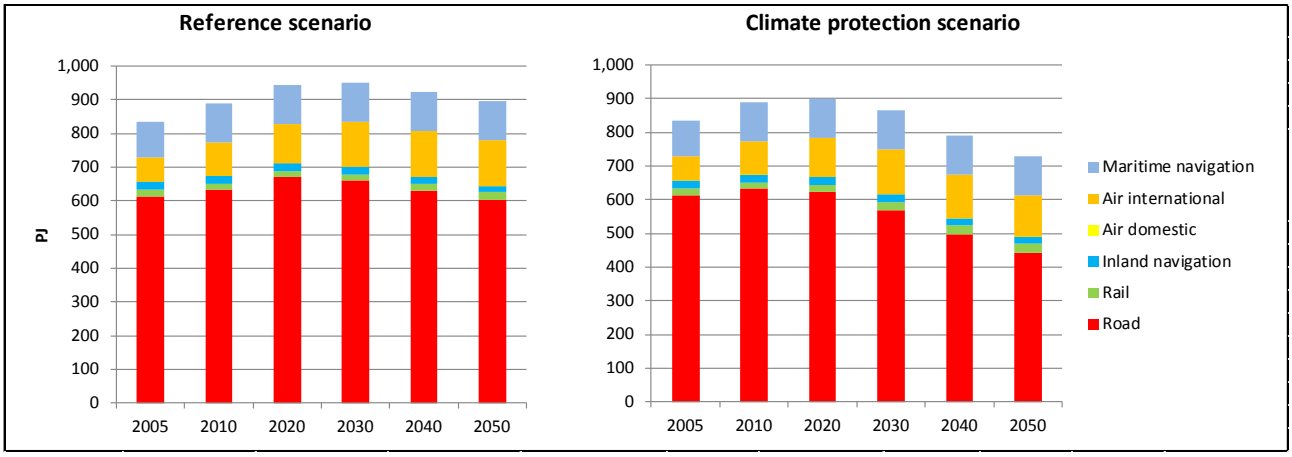
Figure 3: Projection of freight transport performance and modal split as modelled in the reference and the climate protection scenario



In the **reference scenario**, the **final energy consumption in domestic freight transport** increases between 2005 and 2020, plateaus in the following decade and finally declines between 2030 and 2050. In **2050**, consumption is expected to be **2 %** lower than in 2005 (see Chapter 5.3.2). Including **international freight transport**, the final energy consumption increases until 2030, then goes into decline, so that energy consumption in **2050** is expected to be **8 %** higher in reference to 2005. Thus, **efficiency improvements** in freight transport are likely to amount to close to **40 %**, primarily due to optimised energy efficiency and improved transport performance per vehicle kilometre.

The **final energy consumption** of freight transport in the **climate protection scenario** decreases by **25 % for domestic transport**, resulting in **12 % decline including international transport** (see Chapter 6.4.2). Thus, the final energy consumption of freight transport in the 2050 shows a 24 % decrease in comparison with the reference scenario (domestic transport), or -19 % (all transport). The key driver here is the shift to rail transport.

Figure 4: Projection of the final energy consumption in freight transport as modelled in the reference and the climate protection scenario



The differences in freight transport performance and final energy consumption may be explained with the following effects (for the year 2050 in comparison with the reference scenario):

Avoidance:

- Decrease in transport performance domestic land transport: -6 %
- Decrease in transport performance air transport: -10 %

Shift:

- Modal split shift from road freight transport to rail leads to a decline in heavy-duty vehicle transport performance of -23 % in comparison with reference 2050.

Improvement:

- Heavy-duty vehicle transport performance further decreases through optimised occupancy rate: -5 %

Total impact:

- Decrease of heavy-duty vehicle transport performance in comparison with reference 2050: -27 %
- Decrease of final energy consumption in comparison with reference 2050: -27 % (road freight transport), -27 % (domestic freight transport) or -19 % (all freight transport)

Evaluation of the climate protection scenario in freight transport

Under the assumed constraints, the impacts of the measures quantified and analysed in the climate protection scenario fully exploit the potentials of avoidance, shift and improvement. The impact model for the quantification of impacts of measures assumes that there is no substantial influence of transport measures on the total demand from production and consumption. In contrast, the importance of structural development (e.g. population growth, economic links) as well as changes in

behaviour, consumption levels and products are revealed. However, an analysis of these mostly long-term effects and the implied underlying measures was outside the scope of this study.

In the pursuit of climate protection scenario goals, transport measures influencing the choice of means of transport (modal split) and transport processing (logistics or routing) emerge as very effective. However, for a realistic assessment of impacts of measures, detailed modelling of the freight transport market is essential. Production and logistic processes should be modelled separately in sub-segments due to the fact that measures may have very different impacts depending on the sub-segment under investigation.

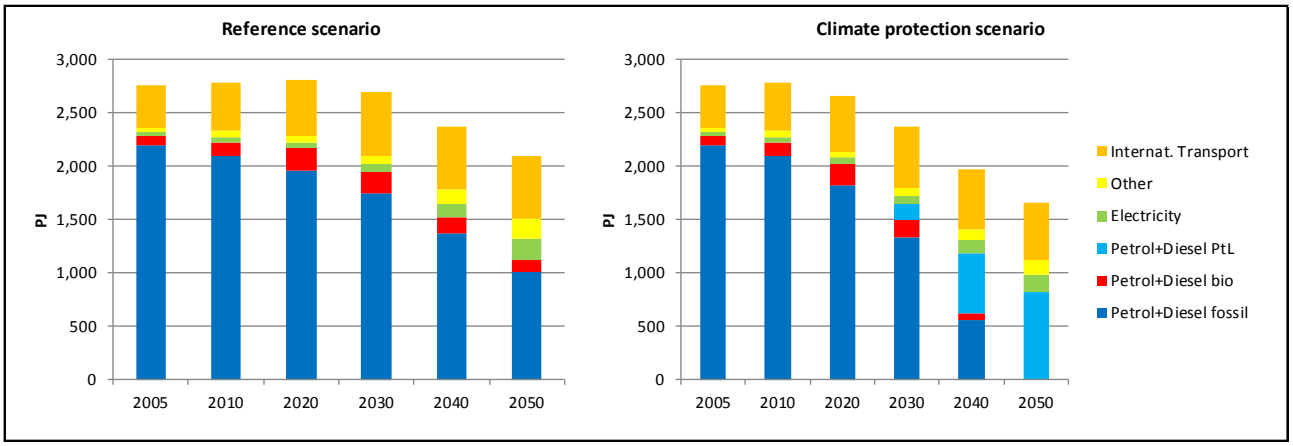
For instance, shift measures for long-distance transport may be very effective due to the fact that rail transport is not only enabled to offer relevant products (i.e. the required speed of delivery), but also to compete economically with other options. Thus, the focus for shift strategies turns to all international relationships. A similar rationale applies to long-distance domestic connections. Energy and GHG reductions may be achieved here with appropriate framework conditions.

Final energy consumption and direct greenhouse gas emissions from all transport

Final energy consumption (see Chapter 6.4.2)

The decline in **domestic transport** final energy consumption between 2005 and 2050 amounts to **36 % in the reference scenario** (**all transport -24 %**). The **climate protection scenario** assumes a **53 % decline** (**domestic transport**) or **40 %** (**all transport**). The implementation of **non-technological measures** in the climate protection scenario allows an **additional reduction of 26 % (domestic transport) or 21 % (all transport)** in comparison with the reference scenario in 2050.

Figure 5: Projection of the total final energy consumption of the transport sector as modelled in the reference and the climate protection scenario



In the additional scenario **climate protection E+** assuming an accelerated introduction of electric mobility for passenger cars and the switch of a major share of road freight transport to catenary hybrid trucks, there is an **additional energy demand reduction of -6 % for domestic transport and -4 % for all transport**. In this scenario, the direct electricity consumption doubles whereas the demand for PtG/PtL decreases by -19 % in reference to the climate protection scenario.

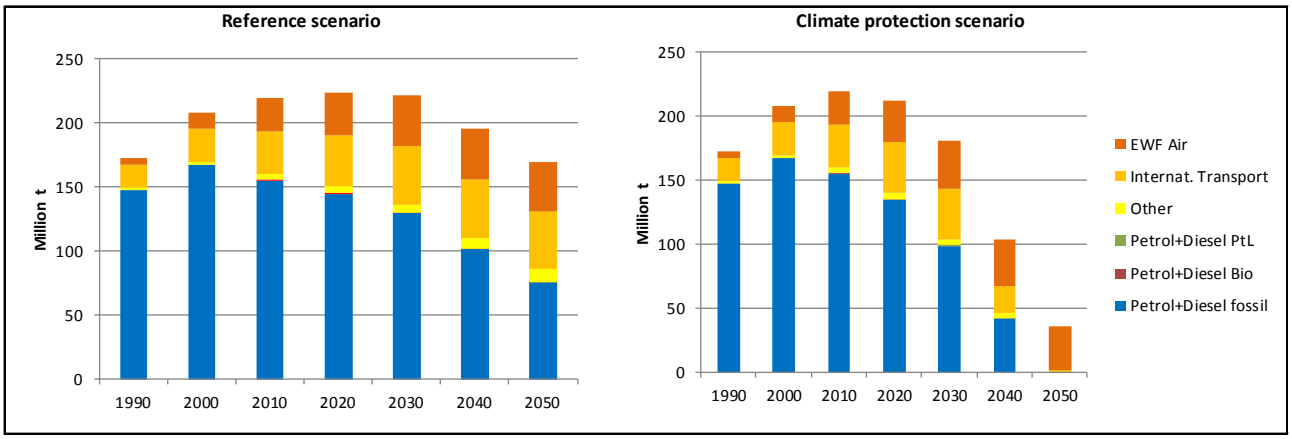
GHG emissions (see Chapter 6.4.4)

In the **reference scenario**, direct GHG emissions from **road transport** decrease by **42 %** in reference to the base year 1990. Including international transport, the reduction for all transport decreases to 22 %. Additional consideration of the EWF (emissions weighting factor) to factor in increased climate

impacts of air transport emissions at high altitudes is associated with a direct GHG emission reduction of merely 1 %.

In the *climate protection scenario*, the achievement of the -98.5 % reduction target is feasible considering both domestic transport and all transport under assumption of a complete shift (energy transition) to GHG-neutral energy carriers (PtL, PtG). However, the production of these energy carriers requires considerable amounts of renewable electricity. The direct GHG emissions still emitted in the year 2050 amount to about 1.4 million t. This amount **increases by almost 35 million t factoring in the EWF**. In consequence, the reduction target cannot be met under consideration of the EWF. Despite the fact that these emissions are not included in national strategies and targets, the need for action in Germany remains acute given international efforts towards targets of similar ambition.

Figure 6: Projection of direct GHG emissions in the reference and the climate protection scenario



Primary energy consumption and total greenhouse gas emissions from all transport

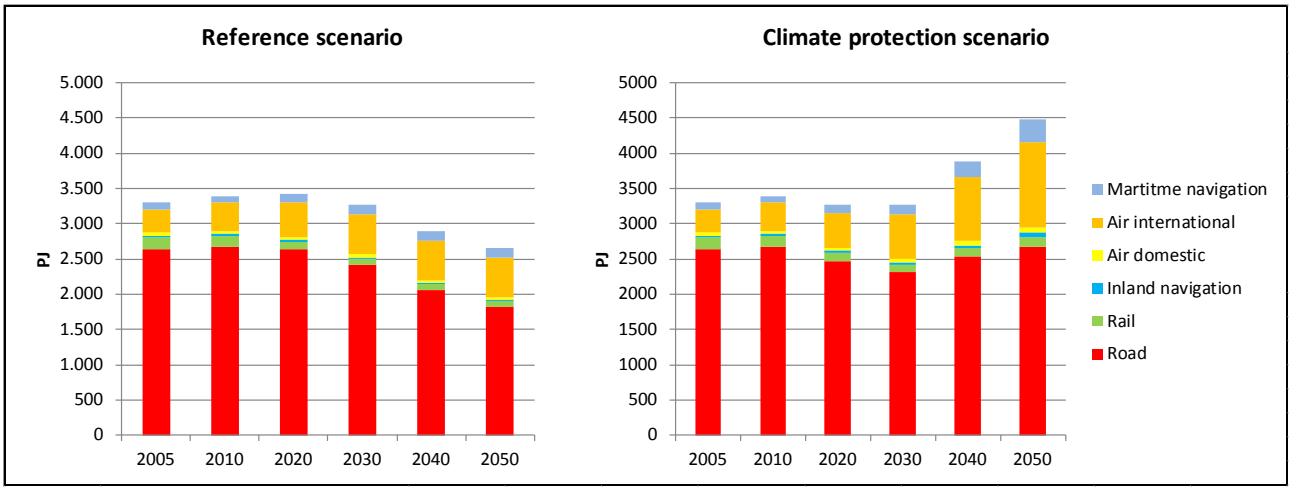
Primary energy consumption (see Chapter 6.4.3)

The energy consumption based on energetic costs for the production of final energy carriers is not part of the sector-specific target discussion per se. However, it does provide some indication which energy carriers have to be produced and at what cost for the supply at the vehicle.

In the **reference scenario**, the projection up to 2050 reveals minor differences for the trajectory of the expected final energy consumption due to the fact that electricity production will mostly switch to renewable energies, yet prevailing fuels will continue to be produced from fossil sources. Biogenic energy carriers are in the minority.

In the **climate protection scenario**, the costs of energy production show a distinct increase from 2030. In consequence, the primary energy demand from domestic transport in 2050 will exceed the demand of 2005 by 2 %. Including all transport, the primary energy is expected to increase by 36 %. The primary energy demand in 2050 in the climate protection scenario thus amounts to +50 % for domestic transport (+68 % all transport) in comparison with the reference scenario.

Figure 7: Projection of the total primary energy consumption of the transport sector in the scenarios



The increase of the final energy demand is caused by a **rising demand for RE electricity** for the production of GHG-neutral PtG/PtG fuels. The total energy required for the **production of PtG/PtL fuels** in the **climate protection scenario** in 2050 amounts to 4230 PJ. Further considering the direct electricity demand from transport of 180 PJ, the total amounts to **4410 PJ**. Due to the fact that each PtG/PtL energy unit saved (energetically) equals the two- to threefold amount of RE electricity savings, additional 1200 PJ of RE electricity would be required without the measures proposed in the climate protection scenario.

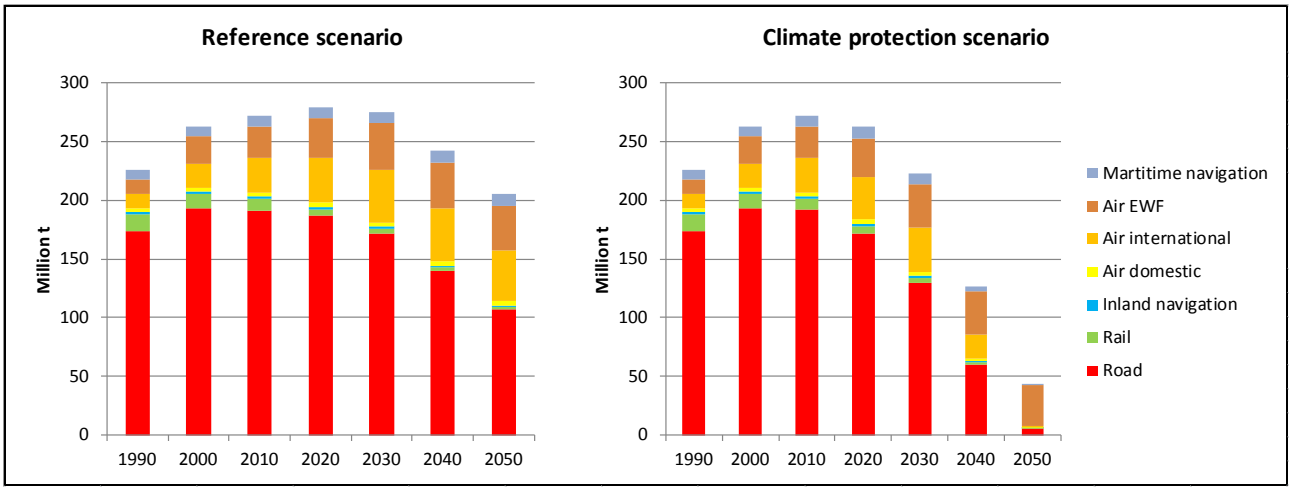
However, the **domestic economic potential** for the production of renewable energy production is limited. Current studies report the amount of RE electricity available for transport purposes in German, i.e. the domestic economic potential the demand from other sectors, in a range between 594 PJ [BMU 2012] and 1574 PJ [MKS 2015]. Thus, in consideration of the quantities required, most of the renewable energies would have to be imported from abroad.

Total (direct and indirect) greenhouse gas emissions

In the **reference scenario**, the total decrease of GHG emissions between 1990 and 2050 from all transport excluding EWF amounts to **22 %** (**domestic transport: -41 %**).

In the climate protection scenario, GHG emissions show a distinct decrease from 2030. In consequence, the residual amount in 2050 is expected to be approx. 8 million t of GHG emissions. As illustrated for the direct GHG emissions, approx. 1.4 million t of the total arise from direct combustion, whereas 1.8 million t originate from electricity generation, which is not expected to have concluded the switch to 100 % regenerative production by 2050. The remainder is caused by additional non-GHG-neutral processes. Please note that any remaining emission source may have a considerable relative impact on the extremely low emission level achieved (see 6.4.5).

Figure 8: Projection of WtW GHG emissions from the transport sector in the scenarios including EWF



By far the highest contribution to GHG emissions, including the assessment of total GHG emissions, arises from air transport at high altitudes. Under consideration of these emissions (EWF), the total GHG emissions reduction for all transport in 2050 in reference to 1990 is reduced to 81 %.

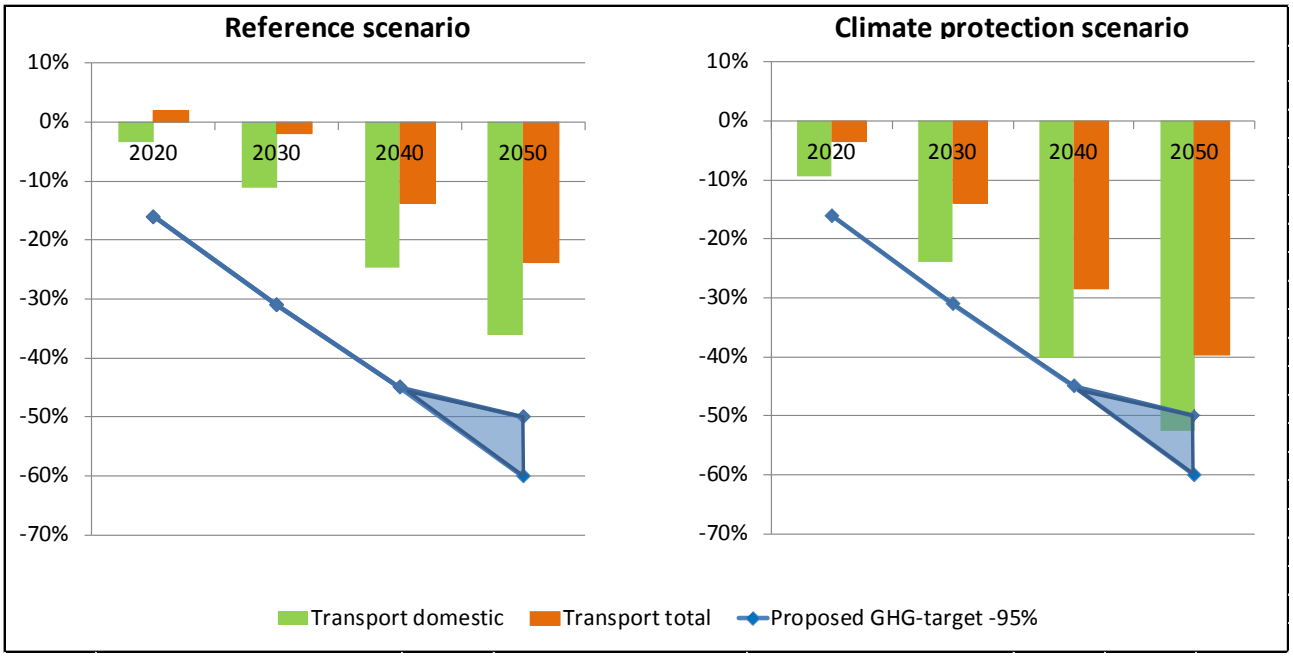
5. Comparison of scenario results and recommendations for sector-specific reduction targets

In the present study, recommendations for sector-specific reduction targets for both final energy consumption and greenhouse gases were derived from reflections considering all sectors. These recommendations were reviewed, validated and adapted in comparison with transport scenario results. The pivotal point of the analysis is the feasibility of the explicitly defined targets for final energy consumption and direct GHG emissions with measures available for application today. The analysis is further extended to include an evaluation of the results for primary energy consumption and indirect GHG emissions. Potential impacts affecting other sectors and countries are included in the considerations.

Final energy consumption

The final energy consumption represents a crucial target figure for the sector-specific target discussion. The following figure illustrates the final energy consumption reductions achieved in the reference and climate protection scenarios, for domestic and all transport, respectively, under consideration of the proposed target of 50 % to 60 % final energy reduction (2050 in reference to 2005).

Figure 9: Comparison between final energy consumption reduction rates and data from the target value discussion for a GHG emission target of -95 %



Considering the proposed final energy targets, the following conclusions may be drawn from the scenarios:

- The climate protection scenario achieves -53 % final energy consumption for domestic transport by 2050. In the more ambitious climate protection scenario E+ assuming a higher degree of electrification among passenger cars and the introduction of catenary hybrid trucks in road freight transport, the reduction rises to 55 %[5].
- An increased reduction up to 60 % of final energy consumption may be promoted with further ambitious avoid-shift-improve (ASI) measures as well as a greater electrification of the vehicle fleet (past 2050).

The final energy target of -40 % stipulated in the energy concept of the Federal Government already requires a systematic and consistent reduction strategy. The climate protection scenario illustrates that ambitious-realistic measures may achieve a final energy consumption reduction exceeding 50 %. For a target of 60 % reduction by 2050, greater efforts promoting avoidance and shift of transport and improvements of transport and technology efficiency are required.

However, the required final energy consumption target strongly depends on the quantities of GHG-neutral fuels available in 2050 and thereafter, and at what cost. An estimate is outside the scope of the present study. In consequence, the recommendation for an ambitious final energy target associated with a 95 % GHG reduction target is a reduction range between 50 % and 60 % in 2050. The

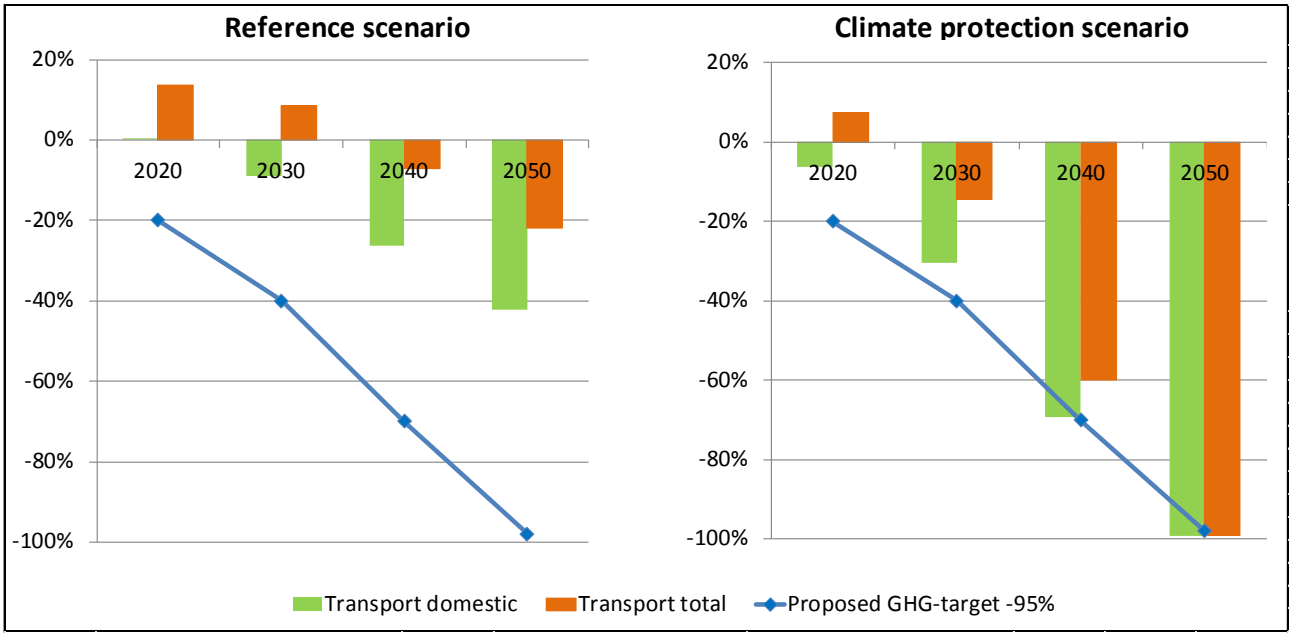
[5] Please note that the high level of vehicle fleet penetration with electric passenger cars assumed in scenarios from 2013 could not be realised by early 2016, and does not appear likely in the foreseeable future. Moreover, the lack of a distinct increase of electric vehicle shares in the fleet implies that the projected development between 2016 and 2030 are postponed. However, late implementation requires accelerated development. Alternatively, the reduction effects will be postponed to a date in the more distant future.

target should be periodically reviewed to reflect state-of-the-art knowledge and technology. The ultimate constraint remains the achievability of the 95 % GHG reduction target.

GHG emissions

The following figure illustrates the direct GHG emission reductions achieved in the reference and climate protection scenarios, for domestic and all transport, respectively, under consideration of the proposed targets.

Figure 10: Comparison between direct GHG emission reduction rates and data from the target value discussion (excl. EWF)



The results for direct GHG emissions may be found below:

- Although the GHG emissions reductions in the reference scenario are similar to those reported for final energy consumption, and thus fail to meet any of the targets, the climate protection scenario allows the achievement of the proposed sector-specific targets for GHG emissions up to the year 2050.
- In domestic transport, the intermediate targets en route to the -95 % GHG target can be met after 2030. Transport measures such as the introduction of electric vehicles and the improvement of vehicle energy efficiency are insufficient to realise intermediate targets in the period up to 2030. Nonetheless, the recommendation is to maintain current intermediate targets. Otherwise, there is a danger that efforts towards a long-term goal could slacken if the targets were prematurely downgraded to reflect the near future.
- In the case that international transport (excl. EWF) is included in the model, the -95 % GHG emissions target will not be met until 2050, when the complete switch to PtG/PtL fuels from RE electricity is fully realised.

An extension of the target to include indirect emissions, or rather to factor in additional GHG emissions from air transport, should consider the following:

- Stipulated targets including indirect **GHG emissions** may only be met in case of GHG-neutral production of PtG/PtL fuels. Even minor shares of non-GHG-neutral energy carriers or produc-

tion processes may result in GHG emissions that upset the calculations and endanger the achievement of targets.

- In the case that the **exacerbation of GHG impacts from air transport** considering non-CO_2 emissions at high altitudes is factored in, a residual 35 million t CO_2 equivalents remain extant in the year 2050, representing a -79 % reduction in reference to 2005. In consequence, the -95 % target cannot be met across all sectors.

The achievement of GHG targets in the climate protection scenario (excluding the exacerbated GHG impacts from air transport) is caused by the underlying assumption that energy carriers in transport will be near-GHG-neutral by the year 2050. In that case, the feasibility depends on the required energy quantities. The question arises whether these required quantities are likely to be available at acceptable costs. The present study was unable to answer that question. However, the likelihood increases with a decreasing demand for RE fuels (achievement of the final energy target). In contrast, higher fuel or vehicle costs could help to avoid so-called rebound effects as well as provide financial incentive for modal shifts and transport avoidance. However, repercussions for modal split resulting in changes in transport demand were outside the scope of the present study.

6. Concluding evaluation

In the case that the -95 % GHG reduction target is adopted as a defined goal across all sectors by the year 2050 in reference to 1990, there is no alternative to virtually GHG-neutral transport. The results of the scenarios illustrate that a walkable path to GHG-neutral transport exists. However, the results also identify both the transport and energy transition as essential elements in the pursuit of this goal.

Transport and energy transition are pivotal elements of GHG-neutral transport

Measures to avoid, shift and improve efficiency are able to reduce transport final energy consumption (excluding international transport) between 50 and 60 % (climate protection scenario -53 %; climate protection scenario E+ -55 %). The corresponding reduction of GHG emissions falls into the same order of magnitude. However, the prerequisite for these achievements is the application of electric mobility (including plug-in hybrid vehicles and electric vehicles fitted with range-extenders) wherever possible. Greenhouse gas-neutral transport further depends on a systematic energy transition in the transport sector. Thus, key elements of the energy transition are electric mobility and the application of PtG/PtL fuels derived from renewable electricity for those transport carriers that cannot be converted via electrification.

However, the analyses in the present study clearly illustrate that a switch to renewable PtG-CH_4 and PtL fuels will considerably increase the demand for RE electricity in the transport sector (to a total of 4400 PJ in the year 2050 according to the climate protection scenario). Due to the fact that the novel fuels are more expensive than conventional fuels, the overall decrease of final energy consumption for transport purposes is crucial. Without the additional measures applied in the climate protection scenario, the demand for RE electricity would exceed the figure above by 1200 PJ.

In consequence, the close coordination of transport transition and energy transition in transport is central to the pursuit of ambitious climate protection targets. In all likelihood, an energy transition will prove to be increasingly difficult and expensive with increasing final energy demand from the transport sector. A transport transition including transport avoidance and shift as well as efficiency improvements may be able to distinctly decrease finale energy consumption, thus enabling the initial energy transition in transport.

The present study primarily focused on climate protection measures for the reduction of GHG emissions. However, a fundamental transition in both transport and energy would be beneficial for air

quality, land use or quality of life in inner-city areas. Thus, the implementation of climate protection measures is not only likely to be associated with positive impacts on common environmental matters, it also reinforces the decisions given priority today in the potentially changing views of future environmental debate.

The GHG reduction target creates immediate need for action

Furthermore, the analysis reveals that the stipulation of ambitious targets, i.e. the -95 % GHG reduction across all sectors, is already fraught with obstacles and behind schedule in the achievement of key intermediate targets for final energy consumption and GHG emissions in the period up to 2030, as detailed in the present study. As a matter of fact, Germany is currently lagging behind in the implementation of necessary steps for the initiation of both transport transition and energy transition in transport. The transport shifts aimed for in the climate protection scenario, particularly the shift of freight transport to rail, may only be achieved with the required network capacities. However, major investment into the German railway network is essential for this purpose in the coming years.

The energy transition faces similar challenges. In the long-term, GHG neutrality in transport can only be achieved if the Federal Government commits to systematically work towards the defined goals for the expansion of electric mobility and renewable energy carriers. Again, there is no alternative to immediate action in the here and now. Due to the slow market penetration of novel, alternative vehicle concepts and time requirements for infrastructure development (e.g. charging infrastructure), planning should allow for considerable lead time.

Even a less ambitious reduction target for the year 2050 essentially amounts to the crossing of the -95 % reduction threshold a decade or two later. The goal to phase out fossil fuels, effectively decarbonising the global economy by the year 2100 as adopted at the G7 summit in Schloss Elmau in 2015, crucially depends on a -95 % GHG reduction across all sectors in Germany, and thus in turn on GHG-neutral transport. In the long-term, the measures proposed in the climate protection scenarios of the present study are inevitable, there is merely scope to alleviate the immediate need for action by slightly relaxing the schedule.

Freight transport poses a particular challenge on the road to GHG-neutral transport

In contrast to other recent work on transport scenarios for the year 2050, the present study places a major focus on freight transport. Potentials for reduction of freight transport volume and transport performance or shifts to climate-friendly rail transport were investigated in considerable detail. The results may be called sobering. Despite far-reaching and extensive measures, the freight transport performance in 2050 is expected to increase by approx. 50 % in reference to 2010 even in the climate protection scenario (with an increase of approx. 60 % in the reference scenario). Whereas road freight transport increases by approx. 25 % during the same period (reference scenario 63 %), rail freight transport experiences an increase of about 164 % (reference scenario 73 %) The modal split share of road freight transport in 2050 is likely to be approx. 31 %, in comparison with a 19 % rail share in the reference scenario.

Despite that fact the measures proposed for freight transport in the climate protection scenario may be considered ambitious, i.e. potentially pushing the envelope of the achievable, the effective decrease of final energy consumption and thus GHG emissions from domestic freight transport (excluding air and maritime transport) in the climate protection scenario up to 2050 amounts to a mere 25 % in reference to 2010. This illustrates that avoiding and shifting transport are indeed key elements of GHG neutrality in freight transport. However, additional measures for the improvement of energy efficiency and for the introduction of GHG-neutral propulsion and fuel options are imperative for the achievement of GHG neutrality in freight transport and across the entire transport sector. These details are even more relevant in context of the prediction that by 2050, approx. 50 % of the final energy consumption in domestic transport (excluding air and maritime transport) arises from freight

transport. Thus, the finding that measures promoting a transport transition have to be coordinated with measures for an energy transition in transport is even more pertinent in freight transport than in passenger transport in pursuit of ambitious climate protection targets.

The achievement of GHG targets requires a clear policy framework

The transport and energy transition outlined in the climate protection scenario thus requires a systematic and consistent climate protection policy. Among the key elements are:

- Incentives for energy efficiency improvement (e.g. CO_2 fleet targets for passenger cars, light- and heavy-duty vehicles),
- Incentives for the switch of the existing vehicle stock to electricity-powered propulsion systems as well as for the establishment of the required charging infrastructure,
- Measures for avoidance, shift and improved efficiency of transport management including necessary infrastructure development,
- Switch of the energy system to renewable electricity and fuels.

The framework required for the implementation of these steps includes the stipulation of sector-specific targets for final energy consumption and GHG emissions, both for the year 2050 and for the intermediate years.

The production of RE fuels, international transport and the exacerbated GHG impacts of air transport present additional key challenges for effective climate protection

Even in the case that the defined targets for final energy and GHG emissions are met, a number of additional challenges remain:

- The domestic potential for the production of renewable electricity is considerable, but by no means infinite, particularly in light of lack of public acceptance. Current fossil fuels are almost exclusively imported. In the future, particularly electricity-based liquid fuel production carried out in appropriate regions outside of Germany and subsequent import may be considerably more cost-effective[6] than production in Germany. High sustainability standards require an international regulatory framework safeguarding that the imported fuels are 100 % RE-based, ecologically sustainable and produced in a socially acceptable manner.
- In the case of international air and maritime transport, reduction targets adopted at the national level are insufficient. In consequence, it may be beneficial to initially include these transport modes in the national climate targets for the transport sector for information purposes and seek to address them at an international level. Activities advancing this issue include negotiations involving the International Civil Aviation Organisation (ICAO) and the International Maritime Organisation (IMO) with a focus on the development of reduction targets and global market-based reduction measures. Targets and measures that have been negotiated and adopted at the global level are preferable to national solutions and solo efforts. However, national measures may advance and lend support, e.g. through intensified research efforts for the development of efficiency technologies or alternative propulsion systems. Final-

[6] In [FVV 2016] the cost advantage of PtL production abroad is estimated to be up to 20 % in comparison with domestic products in 2050 (p.158). Key factors for the cost advantage include lower electricity costs and a high occupancy rate of the PtL plant. The technology under investigation is an onsite PtL production with a cogeneration unit in the best case scenario (Full capacity including a thermal storage of 6500 h and electricity generation costs of 5.5 ct/kWh) [FVV 2016, p. 51]. In contrast, the average electricity generation costs for renewable energy in Germany in 2050 are estimated to be 6.5 ct/kWh.

ly, the achievement of international targets is equally unlikely without strong contributions and dedicated commitments from individual countries or country unions such as the EU.

- The severe GHG impacts of air transport from non-CO2 emissions at high cruising altitudes remain constant as long as conventional technology (combustion of fuels in turbines) is in use, even with 100 % RE-based fuels. Thus, the achievement of GHG neutrality is out of reach when considering the impacts of these emissions, even assuming the implementation of all ambitious measures for a transport and energy transition in air transport proposed here. As a logical consequence, ambitious climate protection in air transport clearly entails an ongoing reduction of demand. The necessary changes in mobility patterns and consumer behaviour call for a distinct shift in society as well as essential modifications of the policy framework.

1 Hintergrund

Ausgangslage

Es ist Ziel der Bundesregierung, die Treibhausgasemissionen über alle Sektoren bis 2020 um 40 Prozent, bis 2030 um 55 Prozent, bis 2040 um 70 Prozent und bis 2050 um 80-95 Prozent (jeweils gegenüber 1990) zu senken. Um dieses Ziel zu erreichen, muss der Verkehrssektor einen angemessenen Beitrag leisten. Wie hoch dieser Beitrag sein muss, wie er konkret aussehen kann und welche Handlungsoptionen sich daraus ableiten, ist bisher nicht ausreichend untersucht worden. Dies gilt in besonderem Maß hinsichtlich der Zeitperspektive 2050.

Projektschwerpunkte

Eine wichtige Aufgabe dieses Projektes ist es, ein ambitioniert, realisierbares Minderungsziel der Treibhausgasemissionen bis 2050 für den Verkehrsbereich abzuleiten. Um die Umsetzbarkeit des Zieles abzuschätzen, wird ein Klimaschutzszenario für den Verkehr bis zum Jahr 2050 entwickelt, bei dem insbesondere die Wirkung von Vermeidungs-, Verlagerungs- und Verbesserungsmaßnahmen untersucht und die zusätzliche Minderung gegenüber einem Referenzszenario ermittelt werden soll.

Die Entwicklung des Klimaschutzszenarios hat folgende Schwerpunkte:

- Analyse der Wirksamkeit von Vermeidungs-, Verminderungs- und Verbesserungsmaßnahmen mit Schwerpunkt auf den Güterverkehr („**Verkehrswende**“).
- Diskussion der Technikoptionen zum Einsatz erneuerbarer Energieträger zur Erreichung der THG-Minderungsziele mit Schwerpunkt auf den Straßengüterverkehr („**Energiewende**“).
- Wirkung der Verkehrswende bei vorgegebener Technikoption in der Energiewende mit-Schwerpunkt auf aus erneuerbarem Strom hergestelltem Power-to-Liquid (EE-PtL).

Zusätzlich zum Klimaschutzszenario wird eine Variante **Klimaschutzszenario E+** mit zusätzlicher Elektrifizierung im Straßenverkehr als Sensitivität für den Einfluss zusätzlicher technischer Potenziale berechnet, bei der im Pkw-Verkehr die Ziele der Bundesregierung bis 2030 (1 Mio. Elektrofahrzeuge bis 2020, 6 Mio. bis 2030) berücksichtigt werden und ab 2020 im Straßengüterfernverkehr der Oberleitungs-Hybrid-Lkw eingeführt wird.

Schließlich werden die Ergebnisse des Klimaschutzszenarios in Hinblick auf die vorgeschlagene sektorspezifischen Ziele bewertet bezüglich

- des Beitrags der Vermeidungs-, Verminderungs- und Verbesserungsmaßnahmen (Verkehrswende),
- des Beitrags der Maßnahmen zum Einsatz von erneuerbaren Energieträgern (Energiewende) und
- des Beitrags des Verkehrs zu den THG-Emissionen außerhalb des Verkehrssektors.

2 Grundlagen Ziele – Maßnahmen – Szenarien

2.1 Abgrenzung des Verkehrssektors

Zur Bearbeitung der Thematik in dieser Studie sind geeignete Abgrenzungsprinzipien für den Verkehrsbereich zu definieren. Die Abgrenzungen sollen zum einen kompatibel zu den bisher aufgestellten Umweltzielen im Verkehrsbereich (national, EU) und den Szenarienstudien, die sich auf diese Ziele beziehen, sein. Zum anderen sollen sie erlauben, die verschiedenen Fragestellungen sachgerecht zu bewerten und die im Kontext richtigen Antworten zu geben. Dabei können sich für verschiedene Zielgrößen (Energieverbrauch, THG-Emissionen, Verkehrsmengen) unterschiedliche Abgrenzungsprinzipien als geeignet herausstellen. Die wichtigsten werden in den folgenden Absätzen diskutiert.

2.1.1 Sektorale Abgrenzung

Wichtigstes Abgrenzungsprinzip für die Bilanzierung des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen ist die sektorale Abgrenzung, die auf dem Energieverbrauch der einzelnen Sektoren gemäß der Statistik der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (Energiebilanz) [AG Energiebilanzen, n.d.] beruht und die auch Basis der Emissionsberichterstattung im nationalen Inventarbericht ist [UBA, 2014b]. Erfasst wird dabei im Verkehrssektor die im Inland von Verkehrsmitteln aufgenommene Energie. Dabei ist zu beachten, dass lediglich bei oberleitungsgeführten Verkehrssystemen Ort und Zeitpunkt von Energieaufnahme und Nutzung identisch sind.

Der Sektor „Verkehr“ ist in der Energiebilanz neben den Sektoren

- Industrie,
- Haushalte und
- Gewerbe, Handel, Dienstleistungen

im Bereich „Endenergieverbrauch“ erfasst und wird weiter unterteilt nach

- Straßenverkehr,
- Schienenverkehr,
- Luftverkehr und
- Küsten- und Binnenschifffahrt.

Die für die Seeschifffahrt gebunkerten Mengen an Dieselkraftstoff und Schweröl werden beim Inlandsaufkommen ausgewiesen und sind somit weder im Primärenergie- noch im Endenergieverbrauch enthalten.

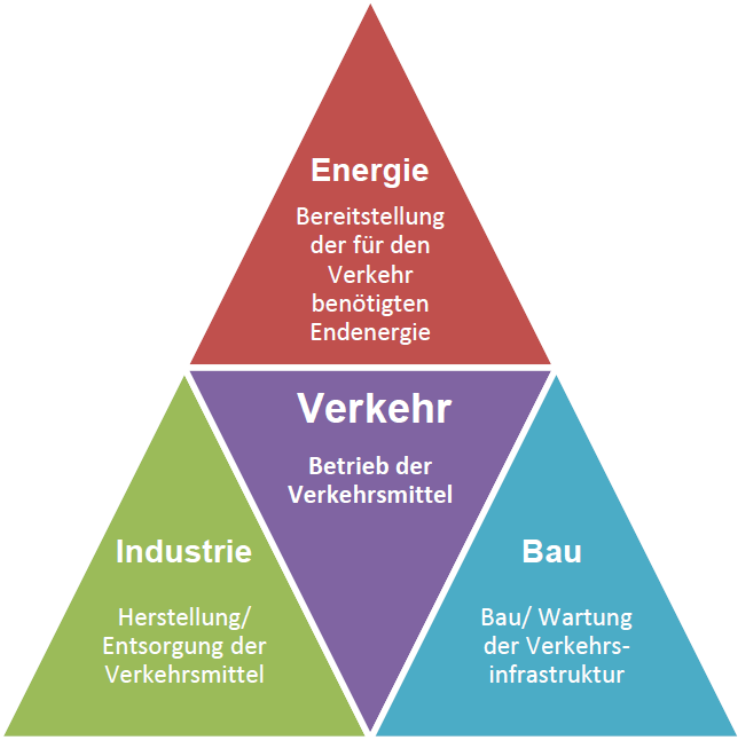
2.1.2 Verkehrliche Abgrenzungen

Verkehrsmengen werden üblicherweise für die Verursacher (z.B. Inländer), eine räumliche Einheit (z.B. Inland) oder Standorte (z.B. Flughäfen) erfasst. Beispiel für eine solche Erfassung nach dem Inländerprinzip ist die Fahrleistungsberechnung des DIW, die in der offiziellen Statistik „Verkehr in Zahlen“ des BMVI verwendet wird [BMVI, 2014], sowie verschiedene regelmäßig durchgeführte Untersuchungen wie Mobilität in Deutschland [Follmer/Lenz, 2010], die Güterverkehrsstatistik des Bundesamtes für Güterkraftverkehr [BAG, n.d.] und die Fahrleistungserhebungen [IVT, 2004]. Verkehrsleistungen (Personen- und Tonnenkilometer) nach dem Inlandsprinzip werden vom Statistischen Bundesamt für die verschiedenen Verkehrsträger ermittelt [BMVI, 2014]. Nach dem Standortprinzip erfasst das Statistische Bundesamt den Flugverkehr.

2.1.3 Ökobilanzielle Abgrenzung

Bei der Bewertung von Umweltwirkungen des Verkehrs ist die ökobilanzielle Betrachtungsweise von großer Relevanz. Zur Erfassung der Umweltwirkungen werden hierbei alle relevanten Stoffströme einbezogen, die für die Erbringung von Verkehrsdienstleistungen benötigt werden. Die dem Verkehr zugerechneten Emissionen fallen dabei anteilsmäßig auch in anderen Sektoren sowohl innerhalb als auch außerhalb Deutschlands an (siehe folgende Abbildung).

Abbildung 11: Verkehrsbedingte Emissionen nach Sektoren



2.1.4 Abgrenzung der Treibhauswirkung

Es werden alle im Nationalen Inventarbericht erfassten Treibhausgase berücksichtigt (CO_2, N_2O, CH_4). Die Berechnungen der Treibhausgaswirkung erfolgt über das Global Warming Potential (GWP). Dieses beschreibt einen Faktor, der multipliziert mit einer gegebenen Menge eines Gases der Treibhausgaswirkung einer äquivalenten Menge an CO_2 entspricht. Der GWP berücksichtigt dabei die Treibhausgaswirkung der Gase (von CO_2 und anderen Treibhausgasen) für einen Zeitraum von 100 Jahren (GWP100) nach der Emitierung. Die Treibhausgaswirkung eines Gases wird in CO_2-Äquivalenten ($CO2_e$) ausgedrückt. Folgende GWPs wurden nach [IPCC, 2007] in dieser Studie verwendet:

Tabelle 2: Treibhausgaswirkung ausgewählter Treibhausgase für den Zeithorizont 100 Jahre (GWP100)

Treibhausgas	GWP-Faktor (g CO_2e/g)
CO_2	1
CH_4	25
N_2O	298

Quelle: [IPCC, 2007]

Der GWP eignet sich dabei für die Berechnung der Treibhausgaswirkung von langlebigen Treibhausgasen.

Beim **Flugverkehr** kommt noch ein weiterer Effekt dazu, da bei der Verbrennung von Kraftstoffen in großer Höhe viele kurzlebige, Nicht-CO_2-Effekte eine hohe Strahlungswirkung aufweisen. Beispiele hierfür sind die Ozon- und die Wolkenbildung. Für den Luftverkehr werden dabei der Emission Weighting Factor (EWF) oder der Radiative Forcing Index (RFI) verwendet, um die Auswirkungen der Emission von CO_2 in großer Höhe mit der Emission von CO_2 am Boden vergleichen [Grassl, Brockhagen, 2007].

In dieser Studie wird der EWF verwendet. Dieser gibt die Strahlungswirkung einer Emission für die ersten 100 Jahre nach dem Zeitpunkt der Emission an. Im Unterschied zum RFI[7] ist er damit mit dem GWP vergleichbar, allerdings werden nicht die Klimawirkung verschiedener Gase verglichen, sondern die aus der Verbrennung der Kraftstoffe in großer Höhe entstehenden CO_2- und nicht CO_2-Effekte mit dem THG-Effekt von CO_2 am Boden. Der EWF wird bei Flughöhen größer 9 km angewendet und wird mit 1,2 – 2,7 angegeben. In dieser Studie wird, aufbauend auf [ifeu/Öko-Institut, 2012] ein EWF von 2,4 für alle Flüge oberhalb 9 km verwendet. Das ergibt im Mittel einen EWF von etwa 2,0 für den gesamten Flugverkehr [ifeu/Öko-Institut, 2012].

2.1.5 Auswahl geeigneter Abgrenzungsprinzipien

Die Analyse der vorliegenden Minderungsziele, Szenarienrechnungen und Maßnahmen zeigt, dass verschiedene Abgrenzungsprinzipien verwendet werden. Dies ergibt sich schon daraus, dass unterschiedliche Zielgrößen, Teilsektoren und Akteure betroffen sind. Im Rahmen dieser Studie werden daher je nach Verkehrsträger und Fragestellung verschiedene Abgrenzungsprinzipien verwendet. Dabei muss darauf geachtet werden, dass die Unterschiede zwischen den Prinzipien deutlich gemacht und insbesondere Doppelerfassungen vermieden oder explizit dargelegt werden.

Zur Formulierung der sektorspezifischen Minderungsziele werden, wie in Kapitel 3 ausführlich erläutert wird, ausschließlich die direkten Treibhausgasemissionen und der Endenergieverbrauch des Verkehrssektors in Übereinstimmung mit der Emissionsberichterstattung betrachtet. Die zugrunde liegenden Emissionsbilanzen beziehen sich damit auf die Energiebilanz.

Anders ist es bei den Szenarien für den Verkehr: Eine wichtige Voraussetzung für die deutliche Minderung der Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor ist die Umstellung der Energieversorgung auf CO_2-arme bzw. -freie Energieträger. Zur Bewertung der Treibhausgasemissionen der Energieträger ist

[7] Der RFI wird aus der verstärkten Strahlungswirkung der Luftfahrt seit 1950 bis heute errechnet. Er enthält somit implizit einen Zeitbezug der Strahlungswirkung der Emission, sollte also nicht mit dem zeit-unabhängigen GWP verglichen werden. Der RFI wird auf Flughöhen größer 9 km angewendet und wird als „beste Schätzung“ mit 2,7 [Penner, 1999] angegeben (bei einem Unsicherheitsbereich von 1,9 bis 4,7) [Grassl /Brockhagen, 2007].

der Einbezug der Emissionen der Energiebereitstellungskette (WtT) unverzichtbar. Die Emissionen der Energiebereitstellung werden daher in dieser Studie in den Szenarien zusätzlich berücksichtigt und getrennt von den direkten Emissionen angegeben. Hierbei werden auch die durch die Energiebereitstellung im Inland verursachten Emissionen in anderen Sektoren und im Transportsektor separat ausgewiesen.

Nicht berücksichtigt werden in diesem Vorhaben die Aufwendungen für die Herstellung, Wartung und Entsorgung der Fahrzeuge sowie der verkehrlichen Infrastruktur. Diese werden in [Öko, 2013b] betrachtet.

Für die einzelnen Verkehrsträger werden in den Szenarienrechnungen folgende Abgrenzungen gewählt:

Straßen-, Schienen-, Binnenschiffsverkehr: Die Fahr- und Verkehrsleistungen werden nach dem Inlandsprinzip erfasst. Der Energieverbrauch und die THG-Emissionen werden auf Basis dieser Verkehrsleistungen berechnet.

Luftverkehr: Die Verkehrsleistungen werden nach dem Standortprinzip ermittelt und in nationalen und internationalen Verkehr unterschieden. Damit wird grundsätzlich der abgehende Verkehr bis zur ersten Zwischenlandung erfasst. Die Berechnung des Energieverbrauchs und der Emissionen erfolgt ebenfalls nach dem Standortprinzip.

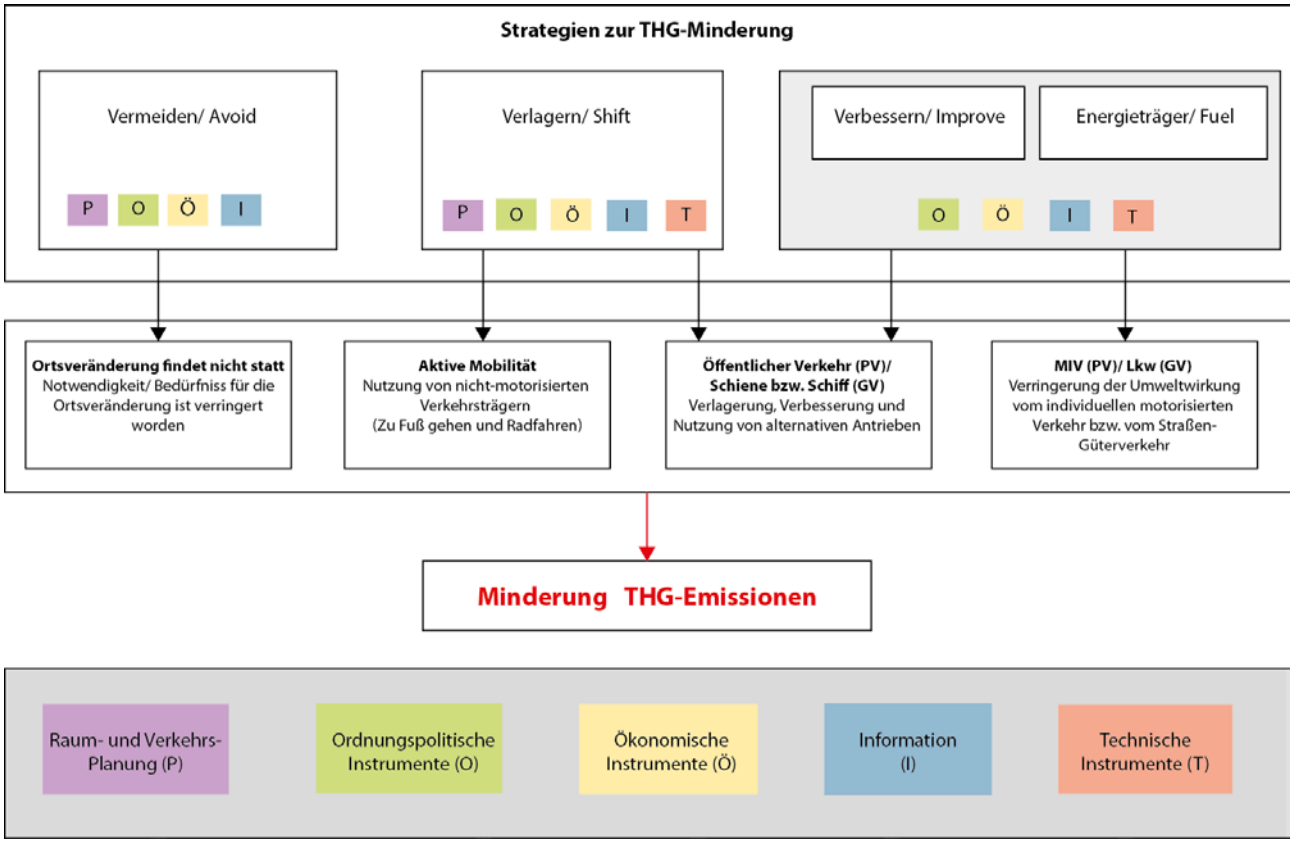
Seeverkehr: Beim Seeverkehr werden die THG-Emissionen auf Basis der Energiebilanz berechnet (Hochseebunkerungen in Deutschland).

Energiebereitstellung: Die THG-Emissionen der Energiebereitstellung werden anteilig bezogen auf den Endenergieverbrauch je Energieträger berechnet. Zusätzlich werden, zur besseren Abgrenzung im Gesamtsystem, die Emissionsanteile, die auf die Bereitstellung im Inland entfallen sowie die Anteil des Transports innerhalb der Energiebereitstellung separat angegeben.

2.2 Strategien zur Minderung der THG-Emissionen des Verkehrs

In diesem Kapitel werden Strategien und Instrumente zur THG-Minderung im Verkehr dargestellt. Strategien stellen dabei grundlegende Möglichkeiten der Emissionsminderung dar. Instrumente sind politische Handlungsoptionen, diese Strategien umzusetzen (siehe Abbildung 12). Die Strategien sind Vermeiden, Verlagern, Verbessern und – davon abgehoben – die Kraftstoffstrategie, auch bezeichnet als „ASIF“ (Avoid, Shift, Improve, Fuel).

Abbildung 12: Strategien und Instrumente zur THG-Minderung im Verkehr



Aufbauend auf [GTZ, 2007]

„ASIF“ meint einen integrierten Ansatz, in dem alle Strategien zur Minderung der THG-Emissionen genutzt werden. Er ist abgeleitet vom aus der Nachhaltigkeitsforschung stammenden Ansatz „Vermeiden, Vermindern, Verbessern“.

Vermeiden/ Avoid: Vermeidung von (motorisierten) Fahrten oder eine Verringerung der Fahrtweiten. Dabei ist insbesondere anzustreben, die Notwendigkeiten bzw. die Bedürfnisse für Ortsveränderungen von Personen und Gütern so zu beeinflussen, dass diese mit möglichst wenig Verkehr zu befriedigen sind (weniger Verkehr bei gleicher Mobilität). Werden Instrumente zur Vermeidung erfolgreich eingesetzt, entstehen für die vermiedene Fahrt keine, oder für die verkürzte Fahrt weniger Emissionen.

Der Erfolg einer „Avoid“-Strategie kann über Verringerung der Verkehrsleistung bzw. über die Dämpfung des Wachstums der Verkehrsleistung gemessen werden. Wesentliche Aspekte sind dabei die Entkoppelung des Verkehrsleistungswachstums von den Treibern „Wirtschaftswachstum“ und „höhere Reisegeschwindigkeiten“.

Verlagern/ Shift: Verlagerung von Fahrten auf Verkehrsträger mit geringeren THG-Emissionen. Wesentlicher Indikator ist der Modal Split.

Im Personenverkehr steht der Fokus der Verlagerungs-Strategie auf der Verringerung der Verkehrsleistung des motorisierten Individualverkehrs (MIV). Werden die Fahrten auf Fußwege oder das Fahrrad (Aktive Mobilität bzw. Nicht-motorisierter Verkehr) verlagert, fallen wie bei der Vermeidung-Strategie keine Emissionen an. Werden die Fahrten auf den Öffentlichen Verkehr (ÖV) verlagert, können die Emissionen im Allgemeinen deutlich gesenkt werden. Gleiches gilt im (nationalen) Güterverkehr wo das Ziel der Verlagerungs-Strategie ist, Transporte von der Straße auf die Schiene bzw. auf das Binnenschiff zu verlagern. Um den Vorteil der geringeren THG-Emissionen zu erhalten, ist es

dabei auch in den Ziel-Verkehrsträgern (ÖV bzw. Schiene/Binnenschiff) notwendig, die Verbessern-Strategie (siehe unten) zu verfolgen.

Verbessern/ Improve: Verbesserung von Fahrzeugen, so dass diese weniger Energie verbrauchen. Dies ist insbesondere bei Fahrzeugen mit einem hohen Energieverbrauch je Verkehrsleistung relevant. Neben rein technischen Fahrzeugverbesserungen kann auch eine Optimierung des Fahrverhaltens zur Minderung des Verbrauchs beitragen. Sollen sich Verbesserungen positiv auf die gesamten THG-Emissionen auswirken, sind Rebound-Effekte zu vermeiden. Diese entstehen insbesondere durch die geringeren Fahrtkosten bei niedrigeren Verbräuchen und führen insgesamt zu einer höheren Verkehrsleistung. Fahrzeugverbesserungen erfordern im Allgemeinen keine Änderung des Verkehrsverhaltens.

Energieträger/ Fuel: Wechsel auf Kraftstoffe bzw. Energieträger mit niedrigeren spezifischen THG-Emissionen. Im Fokus stehen dabei alle Verkehrsträger, die heute mit fossilen Kraftstoffen bzw. fossil erzeugten Energieträgern betrieben werden. Diese sind durch erneuerbare Energieträger zu ersetzten. Wesentliche Optionen sind dabei die direkte Verwendung von EE-Strom, stromerzeugte Kraftstoffe sowie Biokraftstoffe. Je nachdem, auf welchen Energieträger gewechselt wird, sind dabei mehr oder minder große Änderungen in der Fahrzeugtechnik und der Energiebereitstellungsinfrastruktur notwendig.

Die Minderung der THG-Emissionen durch alternative Energieträger ist von den Bedingungen in der Herstellung der Energieträger abhängig. Dabei sind neben den direkten Emissionen der Herstellung auch indirekte Effekte zu beachten:

- So ist bei Strom oder strombasierten Kraftstoffen sicherzustellen, dass für die Verkehrsanwendungen zusätzlicher EE-Strom genutzt wird (d.h. insbesondere, dass neue Verbraucher im Verkehrsbereich nicht dazu führen sollten, dass konventionelle Kraftwerke im Stromsektor länger laufen).
- Bei der Herstellung von Biokraftstoffen sind insbesondere Mehremissionen durch Landnutzungsänderungen zu vermeiden.

2.3 Minderungsziele verschiedener Akteure

In diesem Abschnitt werden bestehende Zielsetzungen beschrieben und ihre Bedeutung für ein Treibhausgasminderungsziel im Verkehr analysiert. Wesentlich ist dabei,

- welche Leitlinien sie für die Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Verkehr aufstellen und
- welche politische Relevanz die Ziele haben.

Je nach Fragestellung oder dem Urheber des Ziels beziehen sich die Ziele auf unterschiedliche, die Klimawirkung des Verkehrs beeinflussenden Parameter.

Die politische Relevanz eines Ziels erschließt sich zum einen aus der Bedeutung der Institution, die sich dieses gesetzt hat, zum anderen aus der Deutlichkeit der Kommunikation dieses Ziels bzw. der Verankerung in institutionellen Prozessen. Eine eindeutige Rangfolge lässt sich dabei naturgemäß nicht festlegen, jedoch können am oberen Ende der Bedeutung gesetzlich verankerte Ziele gesehen werden, deren Verfehlen festgelegte Konsequenzen bedeuten. Demgegenüber sind Ziele aus strategischen Plänen oder von Akteuren, die nicht mit Gesetzgebungskompetenz ausgestattet sind, als weniger relevant einzuschätzen.

Die Zielgrößen der in den folgenden Tabellen aufgeführten Ziele sind

- die Treibhausgasemissionen,
- der Endenergieverbrauch,

- der Einsatz regenerativer Energien,
- die Verkehrsleistung,
- der Modal Split und
- die Antriebstechnik.

Daneben kann zwischen absoluten und spezifischen Zielen unterschieden werden. Spezifische Ziele beziehen sind dabei entweder auf die Effizienz (etwa weniger Energieverbrauch je Fahrzeugkilometer oder weniger Verkehrsleistung je wirtschaftliche Leistung) oder auf Marktanteile umweltfreundlicher Techniken (etwa Anteil erneuerbarer Energien am gesamten Energieverbrauch).

Tabelle 3: Sektorübergreifende THG-Minderungsziele in Deutschland und in der EU (jeweils in Bezug zu 1990)

	Abgrenzung	2020	2030	2040	2050	Bedeutung	Quelle
EU	Inkl. internationalem Luft- und Seeverkehr	-20 % bis -30 % (-14 % gegenüber 2005 für D)				gesetzlich verankert	[EU, 2009a]
	Nur interne Emissionen (ohne Zertifikatshandel)	-25 %	-40 %	-60 %	-80 %	Strategiepapier	[EU, 2011a]
D		-40 %				Koalitionsvertrag (Bundesregierung 2009-2013)	Energiekonzept [Bundesregierung, 2010]
			-55 %		-80 % bis -95 %	Strategiepapier (Bundesregierung 2009-2013)	Energiekonzept [Bundesregierung, 2010]

Tabelle 4: THG-Minderungsziele für den Verkehrssektor in der EU (jeweils in Bezug zu 1990)

Abgrenzung	2030	2050	Bedeutung	Quelle
	-20 %	-60 %	Strategiepapier	Weißbuch Verkehr [Europäische Kommission, 2011]
Interne Emissionen (ohne Zertifikatshandel); inkl. Luftverkehr, exkl. Seeverkehr	+ 20 % bis -9 %	-54 % bis -67 %	Strategiepapier	[EU, 2011a]
Nur Seeverkehr		-40 %	Strategiepapier	Weißbuch Verkehr [Europäische Kommission, 2011]

Tabelle 5: Spezifische THG-Minderungsziele für den Verkehrssektor in der EU

	Bezug	Abgrenzung	2020	Bedeutung	Quelle
EU	je Fahrleistung im Straßenverkehr	Durchschnittliche NEFZ-Flottenemissionen der im Bezugsjahr verkauften Fahrzeuge, abgegrenzt nach Hersteller	Pkw: 95 g/km CO_2 LNF: 147 g/km CO_2	gesetzlich verankert	[EU, 2009b]
	je genutzte Endenergie im Verkehrssektor	Vorkettenemissionen werden mit einbezogen	-6 % verpflichtend, zusätzlich bis zu -4 % durch THG-Zertifikatshandel/ CCS/ EE für Offroad	gesetzlich verankert	[EU, 2009c]
D	je genutzte Endenergie an Otto-/ Dieselkraftstoff	Im Inland verkaufte Otto-/Dieselkraftstoffe; Vorkettenemissionen der Biokraftstoffe werden mit einbezogen	- 6 %	gesetzlich verankert	[D, 2014]

Tabelle 6: Ziele zur Senkung des Endenergieverbrauchs in der EU und in Deutschland

	Sektor	Basisjahr	2020	2050	Bedeutung	Quelle
EU	Alle Sektoren	1990	-20 %		gesetzlich verankert	[EU, 2009a]
D	Verkehr	2005	„rund 10 %“	„rund -40 %“	Koalitionsvertrag (Bundesregierung 2009-2013)	Energiekonzept [Bundesregierung, 2010]

Tabelle 7: Ziele zur Effizienzsteigerung bei verschiedenen Verkehrsträgern

	Sektor/ Bezug	Basis-jahr	2020	2030	Bedeutung	Quelle
Welt	je Transportleistung in der Seeschifffahrt bei Neubauten	2013	0 bis -20 %	0 bis -30 %	Richtlinie der UN (Völker-rechtlich bin-dend)	MARPOL Annex VI energy efficiency amendments
EU	je Verkehrsleistung im städtischen Straßen-verkehr	2010		-44 %	Strategiepa-pier von ER-TRAC[8]	[ERTRAC et al., 2012]
	je Transportleistung im Langstrecken-Straßengüterverkehr	2010		-29 %	Strategiepa-pier von ER-TRAC	ERTRAC et al., 2012]

Tabelle 8: Ziele zum Anteil regenerativer Energie am Endenergieverbrauch in der EU und in Deutschland

	Sektor/ Bezug	Abgrenzung/ Berechnung	2020	2050	Bedeutung	Quelle
EU	Alle Sektoren		20 % (18 % für D)		gesetzlich verankert	[EU, 2009d]
	Verkehrssektor (exkl. Kerosin/ Schweröl)	Es werden alle im Verkehr genutzten EE in die Quote eingerechnet (auch im Luftverkehr)	10 %		gesetzlich verankert	[EU, 2009d]
	Luftverkehr	Nutzung „CO_2-emissionsarmer nachhaltiger Flugkraftstoffe“		40 %	Strategiepa-pier der EU-Kommission	Weißbuch Verkehr [Europäische Kommission, 2011]
D	Verkehrssektor (exkl. Kerosin/ Schweröl)	Es werden alle im Verkehr genutzten EE in die Quote eingerechnet (auch im Luftverkehr)	13,2 %[9]		Koalitionsvertrag (Bundesregierung 2009-2013)	NAPE [BMU, 2009]

[8] ERTRAC (European Road Transport Research Advisory Council**)** ist eine gemeinsame Plattform von verschiedenen Regierungsebenen (sowohl auf EU und nationaler Ebene) und der Industrie (http://www.ertrac.org/, zuletzt aufgerufen am 13.1.2016)

[9] hierbei „handelt es sich um die mit den vorgeschlagenen Maßnahmen „erwartbare Entwicklung, […] „nicht um ein nationales Ziel der Bundesregierung“

Tabelle 9: Ziele zur Reduktion der Verkehrsleistung in Deutschland

Verkehrs-sektor	Zielgröße	Berechnung/ Abgrenzung	Basis-jahr	2020	Bedeutung	Quelle
Personen-verkehr	Personen-transport-intensität	Personenkilometer in Relation zum BIP	1999	-20 %	Ziel der Bundesregierung 2009 - 2013	[Bundesregierung, 2012]
Güter-verkehr	Güter-transport-intensität	Tonnenkilometer in Relation zum BIP	1999	-5 %	Ziel der Bundesregierung 2009 - 2013	[Bundesregierung, 2012]

Tabelle 10: Modal Split Ziele für den Güterverkehr in der EU und in Deutschland

	Zielgröße	Berechnung/ Abgrenzung	2020	2030	2050	Bedeutung	Quelle
EU	Verlagerung von Lkw-Verkehren auf Schiene/ Binnenschiff	Anteil des Straßengüterverkehrs, der auf Schiene/Binnenschiff verlagert werden soll, bezogen auf den Güterverkehr >300km		30 %	50 %	Strategiepapier der EU-Kommission	Weißbuch Verkehr [Europäische Kommission, 2011]
D	Anteil Schiene an der Güterverkehrsleistung	Inlandsverkehrsleistung, ohne Nahverkehr (bis 50km)	25 %			Ziel der Bundesregierung 2009 - 2013	[Bundesregierung, 2012]
	Anteil Binnenschiff an der Güterverkehrsleistung	Inlandsverkehrsleistung, ohne Nahverkehr (bis 50km)	14 %			Ziel der Bundesregierung 2009 - 2013	[Bundesregierung, 2012]

Zudem wird in Bezug zur Antriebstechnik im Weißbuch Verkehr [Europäische Kommission, 2011] das Ziel gesetzt, Pkw mit Verbrennungsmotor bis 2050 aus den Innenstädten zu verbannen.

2.4 Minderungsziele und -pfade in Szenarienstudien mit Zieljahr 2050

2.4.1 Szenarienstudien in Deutschland

In diesem Kapitel werden Studien mit Verkehrsszenarien bis 2050 analysiert. In den untersuchten Studien wurden zunächst bestimmte Ziele definiert. Ausgehend von diesen Vorgaben, werden möglichst konsistente Pfade der Zielerfüllung gesucht (normative Zielszenarien). Das Wesen der Szenarien ist, „Wenn-Dann-Aussagen“ aufzustellen. Damit sind die Ergebnisse im Zusammenhang mit der untersuchten Fragestellung und den gewählten Randbedingungen zu interpretieren. Ein Vergleich der Ergebnisse muss dies berücksichtigen und macht eine direkte vergleichende Analyse schwierig.

Ausgewählt für die Untersuchung sind Studien mit Szenariohorizont 2050 und Bezugsraum Deutschland. Diese sind:

- das „Modell Deutschland“ (Modell D) vom WWF [Öko-Institut/ Prognos, 2009],
- die „Energieszenarien zum Energiekonzept der Bundesregierung“ (Energieszenarien) [EWI et al. 2010],

- die „Leitstudie 2011“ des BMU [DLR et al., 2012] und
- die verkehrsspezifische Studie „Treibhausgasneutraler Verkehr“ [Öko-Institut, 2013b] bzw. die darauf aufbauende sektorübergreifende Studie „Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050“ (THGND) des UBA [UBA, 2014a].

Tabelle 11: Studien mit sektorübergreifenden Zielen in Deutschland

	Modell D	Energieszenarien	Leitstudie 2011	THGND
Verkehrsmittel	Motorisierter bodengebundener Verkehr, Flugverkehr (national + international)	Motorisierter bodengebundener Verkehr, Flugverkehr (o.A.)	Motorisierter bodengebundener Verkehr, Flugverkehr (o.A.)	Motorisierter bodengebundener Verkehr, Flug- und Seeverkehr (national + international)
Abgrenzungen	Energieverbrauch & Emissionen: Nationale Energiebilanz bzw. Emissionsinventar Verkehrsmengen: Inlandsprinzip	Energieverbrauch & Emissionen: Nationale Energiebilanz bzw. Emissionsinventar Verkehrsmengen: Inlandsprinzip	Energieverbrauch & Emissionen: Nationale Energiebilanz bzw. Emissionsinventar Verkehrsmengen: Inlandsprinzip	Energieverbrauch & Emissionen: Nationale Energiebilanz bzw. Emissionsinventar Verkehrsmengen: Inlandsprinzip, Luftverkehr Standortprinzip
Maßnahmenszenarien	1 Zielszenario („Innovationsszenario“) mit sektorbezogenen ausgewählten „strategischen Setzungen“	4 Zielszenarien mit Fokus auf dem Energieerzeugungssektor	3 Zielszenarien mit szenariospez. Technikpfade (H2, EE-CH4, Elektro), Variante mit Minderung THG-Emissionen 95 %	1 Zielszenario („Hauptszenario“) mit Schwerpunkt auf PtL- Nutzung
Maßnahmenanalyse	Beschreibung eines Maßnahmenprogramms (IKEP 2030), 8 Maßnahmen im Verkehr. Kein direkter Bezug zur Modellierung ersichtlich	Schlagwortartige Auflistung von Maßnahmen, aber kein direkter Einfluss auf die Modellierung ersichtlich	Erläuterung grundsätzlicher Entwicklungsstrategien zur Förderung alternativer Antriebstechnik, ohne Bezug zur Modellierung	Beschreibung der Minderungsoptionen ASIF und Maßnahmenbeispiele, kein Bezug zur Modellierung
Zielorientierung	Keine	Energiekonzept der Bundesregierung (2010/2011)	Energiekonzept der Bundesregierung (2010/2011)	Energiekonzept der Bundesregierung (2010/2011)
Sektorübergreifende normative Ziele	THG-Reduktion um 95 % ggü. 1990	Emissionsreduktion energiebedingter THG um 85 % ggü. 1990	Emissionsreduktion energiebedingter THG um 85 % ggü. 1990; EEV im Verkehr -40 % ggü. 2005	THG-Reduktion um 95 % ggü. 1990

Wesentliche Unterschiede in der Abgrenzung ergeben sich dabei insbesondere bei den internationalen Verkehren:

In THGND sind sowohl der internationale Luft- als auch der Seeverkehr enthalten. Der internationale Luftverkehr wird dabei nach dem Standortprinzip bilanziert. Beim internationalen Seeverkehr werden die Verkehrsleistung und die Emissionen anteilsmäßig nach dem deutschen Anteil an der globalen Wirtschaftsleistung Deutschland zugerechnet.

In den Studien Modell D, Energieszenarien und Leitstudie 2011 entspricht der Energieverbrauch des Luftverkehrs dem Verbrauch der Energiebilanz[10], der dem Verkehr nach dem Standortprinzip zugeordnet wird. Die Werte zur heutigen und auch zur prognostizierten Verkehrsleistung entsprechen jedoch der Inlandsverkehrsleistung[11]. Dabei werden beim internationalen Luftverkehr deutliche abweichende Entwicklungen in der Verkehrsleistung nach Inlands- oder Standortprinzip erwartet, wie in Tabelle 12 am Beispiel der „Verkehrsprognose 2025“ dargestellt.

Tabelle 12: Nach Abgrenzungsprinzip differenzierte Entwicklung der Verkehrsleistung im Luftverkehr zwischen 2004 und 2025

	Personenverkehr Mrd. Pkm 2004	Zunahme bis 2025	Luftfracht Mrd. tkm 2004	Zunahme bis 2025
Inlandsprinzip	9,3	+ 56 %	0,03	+ 12 %
Standortprinzip	158,4	+ 122 %	6,48	+ 159 %

Quelle: [BMVBS, 2007]

Der internationale Seeverkehr wird in Modell D, Energieszenarien und in der Leitstudie 2011 nicht berücksichtigt.

Die zu Grunde gelegten Ziele und damit erreichten Emissionsminderungen in den Szenarien nach den beschriebenen Abgrenzungen sind in Tabelle 13 zusammengefasst.

[10] Dies ist für Energieszenarien und Leitstudie 2011 nicht dokumentiert, leitet sich aber beim Vergleich der Werte des Basisjahres mit der Statistik der AG Energiebilanz ab.

[11] Dies ist für Modell D, Energieszenarien und Leitstudie 2011 nicht dokumentiert, leitet sich aber beim Vergleich der Werte des Basisjahres mit der Statistik von Verkehr in Zahlen ab.

Tabelle 13: Vergleich der Reduktion der Emissionen in den Szenarien

Studie	Energie-szenarien	Modell D	THGND	Leitstudie 2011	Leitstudie 2011
Szenariobezeichnung	Ziel	Innovation (ohne CCS)	Haupt	Szenario A	THG95
Zieljahr	2050	2050	2050	2050	2060
Minderungsziel THG*	85 %	95 %	95 %	80 %	95 %
Minderungsziel CO_2*				85 %	99 %
Abgrenzung	THG [Mt CO_2e]	THG [Mt CO_2e]	THG [Mt CO_2e]	CO_2 [Mt]	CO_2 [Mt]
Szenarioemissionen 2050, Gesamt	145	157	60	154	10
Szenarioemissionen 2050, Verkehr*	15	30	0	50	5

*Die relativen Minderungen beziehen sich auf 1990

Allen Szenarien ist gemein, dass Maßnahmen in den Bereichen Vermeidung, Verlagerung und Effizienzsteigerung einen flankierenden Beitrag zur Erreichung der Emissionsminderung im Verkehr leisten, Schlüsselelement jedoch der Wechsel auf CO_2-arme Energieträger ist. Die in den Szenarien verwendeten Mengen sind in Tabelle 14 zusammengefasst.

Tabelle 14: Endenergieverbrauch und Einsatz erneuerbarer Energieträger im Verkehr in den Szenarien [PJ]

Studie	Energie-szenarien	Modell D	THGND	Leitstudie 2011	Leitstudie 2011
Szenariobezeichnung	Ziel	Innovation (ohne CCS)	Haupt	Szenario A	THG95
Zieljahr	2050	2050	2050	2050	2060
Strom	234	187	328	217	352
Biokraftstoffe	772	927	0	300	300
Wasserstoff	15	10	0	242	485
PtL	0	0	1920	0	0
Anteil regenerativer Energieträger	67 %	72 %	100 %	50 %	91 %
Minderung Endenergieverbrauch*	-47 %	-45 %	-41 %	-48 %	-60 %

*Basis 2005

Die verwendeten Energieträger spiegeln dabei die zentralen Unterschiede in den Szenarien wieder. Diese werden von den folgenden Randbedingungen bestimmt:

Verfügbarkeit von Biomasse für den Verkehr

Die Studien Modell D, Energieszenarien und Leitstudie 2011 leiten sektorübergreifend die eingesetzte Biomasse von den verfügbaren Biomassepotenzialen ab. Alle knüpfen die Produktion von Biomasse an nicht näher definierte Nachhaltigkeitskriterien. Das Gesamtpotenzial ergibt sich durch das inländische Potenzial und durch Importe. Von diesem Gesamtpotenzial müssen die Verbräuche der anderen Sektoren abgezogen werden, um das für den Verkehr zur Verfügung stehende Potenzial zu erhalten. Die Zuordnung der Biomasse zu den Sektoren ist dabei szenarienabhängig und wird

- von der Einsetzbarkeit des aus der Biomasse erzeugen Energieträgers,
- von der spezifischen THG-Minderung gegenüber dem substituierten fossilen Energieträger,
- den spezifischen THG-Minderungskosten des Einsatzes der Biomasse und
- von der Verfügbarkeit und Kosten alternativer Minderungsoptionen bestimmt.

Tabelle 15: Biomassepotenziale in den Szenarien

	Modell D Innovation	Energieszenarien	Leitstudie 2011
Inländisch verfügbares Primärenergiepotenzial	1200 PJ/a	1700 PJ/a	1550 PJ/a
Import	500 PJ/a	500 PJ/a	-
Gesamt	1700 PJ/a	2200 PJ/a	1550 PJ/a
Anteil Verkehr	~81 %	~53 %	~29 %

Aufbauend auf [DLR et al., 2012], S.83, S.140; 1: Annahme: spezifischer kumulierter Energieaufwand zur Biokraftstofferzeugung in 2050 ist ca. 1,5 $MJ_{Primärenergieaufwand}/MJ_{Endenergieaufwand}$

Aufgrund des ambitionierten THG-Minderungsziels und der aktuellen Diskussion über die Treibhausgasbewertung von Biokraftstoffen verwendet THGND keine Biokraftstoffe im Hauptszenario [UBA, 2014a].

Verfügbarkeit von strombasierten EE-Kraftstoffen

Die verfügbaren Mengen von auf EE-Strom basierenden Kraftstoffen sind zunächst analog zur Biomasse aus dem verfügbaren EE-Strompotenzial, dem Import und dem (Strom-) Bedarf der anderen Sektoren abzuleiten.

Zudem werden die verfügbaren Mengen strombasierter Kraftstoffe von der Menge des direkt verwendeten Stroms und den unterschiedlichen Wirkungsgraden in der Bereitstellung der Kraftstoffe beeinflusst. Dabei werden in den Studien folgende Kraftstoffoptionen berücksichtigt:

- Im Modell D und in den Energieszenarien wird Wasserstoff betrachtet,
- in der Leitstudie werden die Kraftstoffoptionen Wasserstoff und Methan in jeweils getrennten Szenarien untersucht und
- in THGND werden strombasierte Flüssigkraftstoffe eingesetzt.

In der Leitstudie 2011 sind die dem Verkehr zur Verfügung stehenden EE-Strompotenziale nicht direkt angegeben. In dem Szenario THG95, welches der Beschreibung nach eine „sehr ehrgeizige Zielvorgabe“ [DLR et al., 2012], S. 149, für den EE-Zubau anstrebt, werden für den Verkehr im Jahr 2050 etwa 670 PJ Strom verwendet, davon ca. 320 PJ zur Kraftstoffherstellung. Die Importquote für EE-Strom beträgt dabei 3 %, strombasierte Kraftstoffe werden nicht importiert.

Im Gegensatz dazu wird im THGND ein Großteil der strombasierten Kraftstoffe importiert. Dazu ist angemerkt: „Die technischen Potenziale den gesamten Strombedarf (rund 3.000 TWh/Jahr) national

zu erzeugen, sind zwar vorhanden, da aber zum Beispiel aus ökologischen oder ökonomischen Gründen nur ein Teil dieser Potenziale sinnvoll genutzt werden kann, gehen wir davon aus, dass ein größerer Teil des in Deutschland benötigten Stroms im Ausland erzeugt werden würde.“ [UBA, 2014a], S.12. Für die Herstellung der EE-Kraftstoffe ist dabei eine EE-Strommenge von etwa 4.000 PJ bereitzustellen.

Neben der Verfügbarkeit von strombasierten EE-Kraftstoffen beeinflusst auch der in den Szenarien ermittelte Bedarf an Kraftstoffen die eingesetzte Menge. In den Energieszenarien und Modell D ist dabei nur ein geringer Bedarf an strombasierten Kraftstoffen vorhanden, da große Mengen Biokraftstoffe verfügbar sind und diese bevorzugt eingesetzt werden.

2.4.2 Szenarienstudien für Europa

Im Zusammenhang mit den im Weißbuch Verkehr formulierten sektorspezifischen Zieles für den Verkehr existieren mit EU-Bezug auch reine Verkehrsstudien mit normativen Zielszenarien. Einen Szenarienhorizont bis 2050 betrachten dabei die Studien

- Routes to 2050 II [Hill et al. 2012] und
- die im Rahmen der politischen Bewertung des Weißbuchs gerechneten Szenarien mit PRIMES-TREMOVE [Capros/Siskos, 2011]

Tabelle 16: Studien mit normativen Zielszenarien in der EU

	PRIMES-TREMOVE	Routes to 2050 II
Region	EU	EU
Verkehrsmittel	Motorisierter bodengebundener Verkehr, Flugverkehr und Schiffverkehr sind im Weißbuch enthalten, der Bezug zur Modellierung u. Zielerreichung ist jedoch nicht ersichtlich	Motorisierter bodengebundener Verkehr, Flugverkehr (EU + „international“), Schiffsverkehr (Binnen + See)
Abgrenzungen	Energieverbrauch & Emissionen: Emissionsinventar	Energieverbrauch und Verkehrsmengen: Inlandsprinzip, k.A. zum Internationaler Flug- und Seeschiffverkehr
Maßnahmenszenarien	3 Zielszenarien für ausgewählte Instrumentensets („Preise“, „Technik“, „Mittel (Preise + Technik)“)	Zielszenario + 4 Szenarien mit Sensitivitätsrechnungen (bzgl. Potenzial Biomasse, Elektrifizierung, Vermeidung)
Maßnahmenanalyse	Beschreibung von Instrumenten (und deren Bedeutung nach Szenario) als Basis für grundsätzliche Entwicklungsstrategien. Zielerreichung der Szenarien wird über endogene (vom Modell bestimmte) Variablen	Analyse unterschiedlicher Instrumente in den Bereichen THG-Sekundäreffekte, Risikoabschätzung, Nicht-THG-Wirkungen, Kosteneffizienz
Maßnahmenart	Enforcement, Economy, Engineering	Enforcement, Economy, Education, Engineering
Zielorientierung	Weißbuch Verkehr	Weißbuch Verkehr
Zieljahr	2050	2050
Normative Ziele	THG-Emissionsreduktion im Verkehr um 60 % ggü. 1990	THG-Emissionsreduktion im Verkehr um 60 % ggü. 1990

Die Studien stellen dabei Maßnahmenbündel vor, mit denen das Ziel erreicht werden soll. In [Hill et al., 2012] werden darüber hinaus Sensitivitäten in den Wirkungen der Maßnahmen betrachtet und daraus das Risiko der Zielverfehlung bei unterschiedlichen Strategien abgeleitet. In den Szenarien werden außerdem die „co-benefits“ berechnet und eine Analyse der Durchführbarkeit der Maßnahmen durchgeführt. Die Studie sieht ein hohes Risiko der Zielverfehlung, sollten sich die Politikmaßnahmen auf rein technische Optionen beschränken [Hill et al., 2012].

3 Sektorspezifische Klimaschutzziele für den Verkehr

3.1 Vorbemerkungen

Schwerpunkt in diesem Kapitel ist die Ableitung und Diskussion wesentlicher Randbedingungen für eine Zielformulierung aus Sicht des Verkehrs. Dazu wird insbesondere aufgezeigt, welche Minderungen an Treibhausgasemissionen im Verkehr erbracht werden sollten, damit sektorübergreifende Klimaschutzziele erreicht werden können. Damit wird eine Grundlage dafür geschaffen, um sektorspezifische Klimaschutzziele für den Verkehr in Deutschland festzulegen. Ob diese aber tatsächlich verbindlich festgelegt werden sollen, ist eine politische Entscheidung und nicht Gegenstand der Studie.

Die unter dieser Prämisse vorgeschlagenen Klimaschutzziele des Verkehrs orientieren sich an den bestehenden, meist sektorübergreifenden Klimaschutzzielen (siehe Kapitel 2.3) sowie den Ergebnissen bereits vorliegender Szenarienstudien (siehe Kapitel 2.4), die in dieser Studie vertieft diskutiert und evaluiert werden. Konkret muss beispielsweise die Erreichbarkeit der vorgestellten Zielwerte mit Hilfe der Szenarien, die im Rahmen dieses Projektes entwickelt und analysiert werden, überprüft werden. Das Ziel sollte ambitioniert, aber auch mit den zur Verfügungen stehenden Instrumenten erreichbar sein. Dabei sollte es neben den Auswirkungen auf den Verkehrssektor auch berücksichtigen, dass es nicht zu großen negativen Nebenwirkungen in andere Sektoren führt. Somit soll ein Ziel „ambitioniert-realistisch“ sein und dazu führen, dass der Verkehrssektor einen adäquaten Anteil an den Minderungsverpflichtungen in Deutschland beiträgt.

Zusammenspiel von sektorübergreifenden und sektorspezifischen Zielen

Die deutsche Bundesregierung hat sich zum Ziel gesetzt, die Treibhausgasemissionen über alle Sektoren hinweg bis zum Jahr 2050 um 80 bis 95 Prozent gegenüber 1990 zu senken. Ob letztendlich der Zielwert 80 Prozent oder 95 Prozent erreicht werden muss, wurde bisher noch nicht abschließend entschieden. Dies hat aber starke Auswirkungen auf die notwendigen Minderungsanstrengungen, die die einzelnen Sektoren erbringen müssen. Mögliche sektorspezifische Klimaschutzziele hängen direkt davon ab, wie streng das sektorübergreifende Klimaschutzziel ausfällt. Sektorspezifische Klimaschutzziele für den Verkehr müssen daher für ein 80 %iges Gesamt-Klimaschutzziel anders formuliert werden als für ein 95 %iges Gesamtziel.

Die Festlegung von sektorspezifischen Klimaschutzzielen ist in erster Linie dann sinnvoll, wenn sichergestellt werden soll, dass jeder Sektor (Stromerzeugung, Industrie, Verkehr etc.) verbindlich einen nennenswerten Beitrag zur Zielerreichung beisteuert. Ob allerdings jeder Sektor die gleichen prozentualen Minderungen entsprechend des sektorübergreifenden Ziels erbringen sollte, hängt vom zugrunde liegenden Bewertungsschema ab, z.B. ob die Minderungen in den einzelnen Bereichen gleich kosteneffizient und damit mit minimalen Einsatz der verfügbaren Mittel erbracht werden können.

Analysen für Deutschland (z.B. [BDI, 2009], [Öko-Institut/Prognos, 2009]), wie auch auf internationaler Ebene (z.B.[OECD, 2007], [Lutsey, 2008]; [Anable, 2008]; [Europäische Komission, 2011]) zeigen aber klar, dass die Minderung der Treibhausgasemissionen im Verkehr im Durchschnitt mit vergleichsweise hohen Kosten verbunden ist. So kommt beispielsweise die Europäische Kommission bei Ihrem „Fahrplan für den Übergang zu einer wettbewerbsfähigen CO_2-armen Wirtschaft bis 2050“ zu dem Ergebnis [Europäische Komission, 2011], dass zur Erreichung einer 80 %igen CO_2-Reduktion in Europa für den Verkehr ein Minderungsziel zwischen 54 und 67 % kostenoptimal wäre (siehe Tabelle

17). Lediglich die Landwirtschaft müsste unter Berücksichtigung der Kosteneffizienz mit 42 bis 49 % geringere Beiträge zur Zielerreichung erbringen.[12]

Tabelle 17: Emissionsminderungen einzelner Sektoren in der EU zur kostenoptimalen Erreichung eines sektorübergreifenden Treibhausgasminderungsziels von rund 80%

THG-Emissionsverringerung gegenüber 1990	2005	2030	2050
Insgesamt	**-7 %**	**-40 % bis -44 %**	**-79 % bis -82 %**
Sektoren			
Stromerzeugung (CO_2)	-7 %	-54 % bis -68 %	-93 % bis -99 %
Industrie (CO_2)	-20 %	-34 % bis-40 %	-83 % bis -87 %
Verkehr (einschl. CO_2 aus der Luftfahrt, ohne Seeverkehr)	+30 %	+20 % bis -9 %	-54 % bis -67 %
Wohnen und Dienstleistungen (CO_2)	-12 %	-37 % bis -53 %	-88 % bis -91 %
Landwirtschaft (Nicht-CO_2)	-20 %	-36 % bis -37 %	-42 % bis -49 %
Andere Nicht-CO_2-Emissionen	-30 %	-72 % bis -73 %	-70 % bis -78 %

Quelle: [Europäische Komission, 2011]

Allerdings ist hierbei zu beachten, dass die durchschnittlich hohen Kosten von CO_2-Minderungen im Verkehrsbereich nicht für alle Maßnahmen zutreffen. Gerade Maßnahmen zur Veränderung des Fahrverhaltens (z.B. Sprit-Spar-Training) oder verändertes Kaufverhalten (z.B. Kauf von kleineren und damit sparsameren Autos) sind nicht zwangsläufig mit Mehrkosten verbunden. Eine Ex-Post-analyse für die Niederlande zeigte beispielsweise, dass im Zeitraum 1993 bis 2003 der Verkehrsbereich der einzige war, bei dem CO_2-Minderungen mit Kosteneinsparungen einhergingen. In allen anderen Sektoren waren CO_2-Minderungen nur durch Mehrausgaben möglich [CE Delft, 2006].

Nichtsdestotrotz dürften langfristig im Mittel Treibhausgasminderungen in den anderen Sektoren kostengünstiger erreichbar sein. **Daher wird für die Diskussionen von Minderungszielen im Verkehr in dieser Studie angenommen, dass alle anderen Sektoren ihre Treibhausgasemissionen so weit wie möglich reduzieren.**

Die untere Grenze für die Reduktion lässt sich wie folgt festlegen: Die Studie „Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050“ des UBA [UBA, 2014a] zeigt auf, dass die Emissionen der Landwirtschaft und bestimmter Industrieprozessen trotz der Verwendung treibhausgasneutraler Energieträger nicht vollständig vermieden werden können. Daher wird zur Ableitung der Mindestanforderungen des Verkehrs davon ausgegangen, dass bis auf diese nicht vermeidbaren Treibhausgasemissionen eine Treibhausgasneutralität in den anderen Bereichen erreicht wird.

In Abhängigkeit des übergreifenden Klimaschutzziels ergibt sich dann das Treibhausgasbudget des Verkehrs als Differenz zwischen den zulässigen Gesamtemissionen für alle Sektoren und dem nicht-vermeidbaren Anteil der anderen Sektoren. Da die Gesamtemissionen davon abhängen, ob das sektorübergreifende Ziel 80 oder 95 % beträgt, ergeben sich auch für den Verkehr unterschiedliche Anforderungen an eine Treibhausgasminderung.

[12] Die Ergebnisse dieser Analyse stellten auch die Grundlage zur Ableitung des 60 %-CO2-Minderungsziels des EU-Weißbuches zum europäischen Verkehrsraum dar.

Ob die Klimaschutzziele im Verkehr über die so abgeleiteten Mindestanforderungen hinausgehen sollten, wird diskutiert, ist aber letztendlich eine politische Entscheidung, die im Rahmen dieses Gutachtens nicht geklärt werden kann.

Die Ableitung der Minderungsziele erfolgt systematisch in der folgenden Abfolge:

- Zunächst werden im Kapitel 3.2 die Parameter, für welche die Zielgrößen ermittelt werden sollen, sowie die Jahre, für die Ziele festgelegt werden sollten, abgeleitet.
- In Kapitel 3.3 wird anschließend die Abgrenzung des Verkehrssektors für die Zielfestlegung diskutiert.
- In Kapitel 3.4 werden konkrete Ziele für das Jahr 2050 formuliert.
- Darauf aufbauend werden mögliche Minderungspfade von 2020 bis 2050 in Kapitel 3.5 abgeleitet.
- Schließlich werden die Minderungsziele in Kapitel 3.6 unter der Annahme, dass internationale Verkehre einbezogen werden, überprüft.
- In Kapitel 3.7 werden die Vorschläge nochmals zusammengefasst.

3.2 Zielgrößen und Zeitpunkte

Zielgrößen

Sollen Klimaschutzziele im Verkehr festgelegt werden, gibt es prinzipiell verschiedene Möglichkeiten: Es ist naheliegend, Minderungsziele direkt für die Treibhausgasemissionen festzulegen. Eine Minderung der Treibhausgasemissionen kann aber auch erreicht werden, indem Ziele für wichtige Einflussfaktoren auf die Emissionen wie beispielsweise Endenergieverbrauch, Verkehrsleistung, Modal Split oder Anteil regenerativer Energieträger definiert werden. Der Nachteil dieser indirekten Ziele ist, dass unklar ist, ob das Klimaschutzziel wirklich erreicht wird. Der Vorteil kann aber sein, dass durch solche ergänzenden Zielfestlegungen die Prozesse, die zu einer Minderung führen, angestoßen, gesteuert und verstärkt werden können.

Im Rahmen der nationalen Strategie für nachhaltige Entwicklung [Bundesregierung, 2002] wurden bereits erste Ziele für die Personen- und Gütertransportintensität (Tabelle 9) und zum Modal Split bis 2020 festgelegt. Darüber hinaus hat sich die Bundesregierung darauf verständigt, den Endenergieverbrauch des Verkehrs bis 2050 um 40 % gegenüber 2005 zu senken (siehe Kapitel 2.3).

Werden diese Ziele bezüglich Ihrem Beitrag zur Erreichung der Klimaschutzziele bewertet, hat das Endenergieziel den unmittelbarsten Einfluss auf die Treibhausgasminderung. Verkehrsvermeidung, Verkehrsverlagerung und Effizienzsteigerungen (Maßnahmen in den Bereichen Avoid, Shift und Improve) und hierfür festgelegte Ziele münden letztendlich alle in einem geringeren Endenergieverbrauch des Verkehrs, der in der Regel wiederum zu niedrigeren THG-Emissionen führt. Statt Einzelziele für Verkehrsvermeidung, Verkehrsverlagerung oder Effizienz festzulegen, kann mit einem Endenergieziel die Festlegung einer Vielzahl von einzelnen Zielen umgangen werden.

Grundsätzlich könnten die Treibhausgasemissionen des Verkehrs allein dadurch gesenkt werden, indem treibhausgasarme bzw. -freie Energieträger oder erneuerbar erzeugter Strom im Verkehr eingesetzt werden, ohne den Endenergieverbrauch des Verkehrs zu reduzieren. Allerdings stehen hierfür – global gesehen – nicht ausreichend alternative, treibhausgasarme bzw. -freie Kraftstoffe und erneuerbarer Strom zur Verfügung, wenn nicht gleichzeitig auch der Energieverbrauch über alle Anwendungen und im Verkehrs, durch Avoid-, Shift- und Improve-Maßnahmen, massiv gesenkt wird. Oder in anderen Worten: Eine „**Energiewende** im Verkehr“ wird nur dann möglich sein, wenn gleichzeitig auch der Endenergieverbrauch über eine „**Verkehrswende**“ drastisch gesenkt wird. Die Verkehrswende ist damit eine notwendige, wenn auch nicht hinreichende Bedingung für die Errei-

chung von Klimaschutzzielen im Verkehr. Werden Treibhausgasminderungsziele festgelegt, sollten damit gleichzeitig auch Ziele zur Senkung des Energieverbrauchs festgelegt werden. Ob das in Deutschland vereinbarte Minderungsziel von 40 % bis zum Jahr 2050 ausreichend ist, wird in den folgenden Kapiteln näher analysiert.

Die Festlegung eines Endenergieziels zusätzlich zu einem Minderungsziel für Treibhausgasmissionen hätte aber noch weitergehende Vorteile. Vergleicht man verschiedene Maßnahmen zur Minderung der Treibhausgasemissionen im Verkehr, ist die Umstellung der Energieversorgung des Verkehrs auf treibhausgasarme bzw. -freie Energieträger zwar eine effektive, aber vergleichsweise teure Maßnahme. Die Erklärung hierfür ist einfach: Die Gesamtwirkungsgrade von der Erzeugung über die Umwandlung der Energieträger bis hin zur Nutzung sind in anderen Sektoren oftmals höher als im Verkehr. Verbunden sind damit höhere Kosten und geringere Umweltentastungswirkungen. Konsequent wäre daher, treibhausgasarme bzw. -freie Energieträger vorrangig in anderen Sektoren mit höheren Gesamtwirkungsgraden einzusetzen, da mehr Treibhausgasemissionen zu gleichen Kosten eingespart werden können. Dies gilt grundsätzlich für alle alternative Energieversorgungsoptionen, die für den Verkehr in Frage kommen, von erneuerbarem Strom über Biokraftstoffe bis hin zu aus EE-Strom erzeugten Kraftstoffstoffen (EE-Wasserstoff, EE-Methan oder EE-PtL).

Klimaschutzziele für den Verkehr sollten daher anfangs überwiegend durch Energieeffizienzsteigerungen und weniger durch die Umstellung auf treibhausgasarme oder -freie Energieträger erreicht werden, so lange in anderen Sektoren entsprechende Energieträger besser eingesetzt werden könnten. Andererseits muss bereits zu diesem Zeitpunkt der Endenergieverbrauch des Verkehrs kontinuierlich gesenkt werden, um zu einem späteren Zeitpunkt möglichst wenig an treibhausgasarmen bzw. –freien Energieträgern zu benötigen.

Aus diesen Überlegungen lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- Es sind kurz- und mittelfristige Ziele zur Senkung des Energieverbrauchs notwendig, um langfristige Klimaschutzziele zu erreichen.
- Sektorspezifische Klimaschutzziele für den Verkehr sollten daher in den Anfangsjahren nicht anspruchsvoller definiert werden als die durch eine steigende Energieeffizienz induzierte Minderung. Werden die Ziele in den Anfangsjahren zu ambitioniert gesetzt, kann es zu Fehlallokationen der verfügbaren treibhausgasarmen bzw. -freien Energieträger kommen.
- Unabhängig von formulierten Zielen müssen frühzeitig mögliche Verfahren zu Herstellung und Produktionskapazitäten entsprechender treibhausgasarmen bzw. -freien Energieträger entwickelt werden.
- Es ist zu prüfen, ob ergänzende Ziele (z.B. Beimischungsquoten) hierzu notwendig sind.
- Zusammenfassend kann also festgestellt werden, dass anspruchsvolle Klimaschutzziele im Verkehr nur erreicht werden können, wenn sie für folgende Zielgrößen aufgestellt werden:
    - Treibhausgasemissionen des Verkehrs
    - Endenergieverbrauch des Verkehrs

Die Kombination eines Treibhausgasminderungsziels mit einem Endenergieziel hat viele Vorteile. Allerdings müssen auch mögliche nachteilige Wirkungen bei der Einführung eines Endenergieziels beachtet werden, die allerdings weniger schwer wiegen. Die folgende Tabelle 18 zeigt eine Übersicht der Vor- und Nachteile eines Endenergieziels für den Verkehr.

Tabelle 18: Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile eines verkehrsspezifischen Ziels zur Reduktion des Endenergieverbrauchs

Vorteile	Nachteile
▸ Es werden gleichzeitig Maßnahmen zur Verkehrsvermeidung, Verkehrsverlagerung und zur Effizienzverbesserung (Avoid, Shift und Improve) initiiert. ▸ Es führt zu einer Senkung des Endenergieverbrauchs des Verkehrs, der dringend benötigt wird, um eine Energiewende im Verkehr überhaupt oder besser möglich zu machen. ▸ Es geht kein Druck auf die Umstellung der Energieversorgung des Verkehrs auf THG-arme bzw. -freien Energieträger aus, so dass dieses Ziel zur Senkung der THG-Emissionen des Verkehrs eingesetzt werden kann, solange die sauberen Energieträger effizienter in anderen Sektoren eingesetzt werden kann. ▸ Bei konventionellen Antrieben besteht zudem lineare Korrelation zwischen Energieverbrauch und THG-Emissionen, d.h. Energieeinsparungen führen in gleichem Maß zu einer Reduktion der THG-Emissionen. ▸ Effiziente Techniken werden positiver bewertet als ineffiziente (bspw. BEV vs. PtG/PtL), dadurch implizite Berücksichtigung der Knappheit erneuerbarer Energien.	▸ Es wirkt nur indirekt auf die Treibhausgasemissionen. Insbesondere werden positive Effekte effizienter alternative Antriebstechniken (Elektroantrieb) überbewertet, wenn Graustrom eingesetzt wird. ▸ Es findet keine rechtzeitige Förderung des Aufbaus von Produktionskapazitäten von THG-armen bzw. -freien Energieträger für den Verkehr statt.

Weitere Ziele wie z.B. zur Entwicklung des Modal Splits oder Beimischungsquoten werden als weniger relevant gesehen. Grundsätzlich sollten ergänzende Ziele aber nur dann eingeführt werden, wenn sie zur Erreichung der übergeordneten Ziele (Senkung der Treibhausgasemissionen und des Endenergieverbrauchs) notwendig sind, rechtzeitig notwendige Entwicklungen anstoßen sollen (z.B. Aufbau von Produktionskapazitäten) oder Fehlentwicklungen verhindern sollen.

Zeithorizont

Die sektorübergreifenden Langfristziele zum Klimaschutz der deutschen Bundesregierung fokussieren auf das Jahr 2050 und greifen damit internationale Forderungen beispielsweise des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) auf, dass Industrieländer ihre Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2050 um mindestens 80 % senken müssen, damit ein durch die klimaschädlichen Emissionen verursachter globaler Temperaturanstieg auf zwei Grad beschränkt werden kann. Aus diesen Gründen sollten sektorspezifische Klimaschutzziele des Verkehrs ebenfalls für das Jahr 2050 formuliert werden.

Das Energiekonzept der Bundesregierung formuliert, neben dem sektorübergreifenden THG-Minderungsziel bis 2050 auch Zwischenziele für die Jahre 2020, 2030 und 2040. Zwischenziele soll-

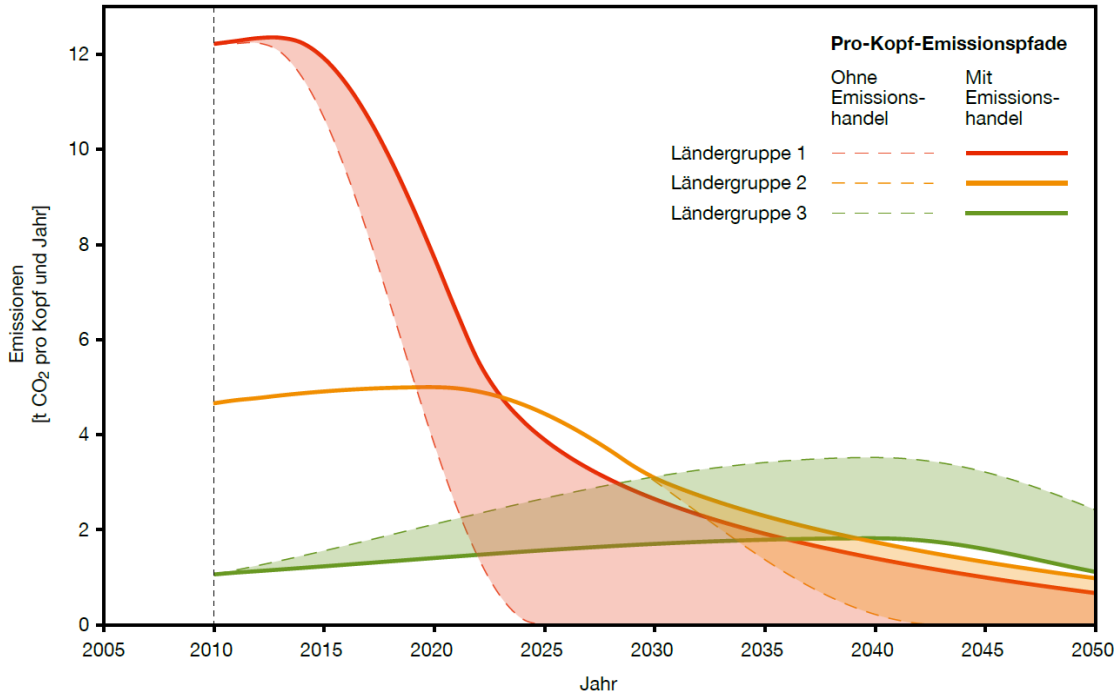
ten daher auch für mögliche sektorspezifische Ziele im Verkehrsbereich festgelegt werden. Diese können dann so gewählt werden, dass Treibhausgasminderungen sich zu Beginn verstärkt an der Minderung des Energieverbrauchs orientieren und erst später so anspruchsvoll werden, dass sie den Einsatz von treibhausgasarmen bzw. -freien Energieversorgungsoptionen im Verkehr erfordern (siehe Ausführungen im vorigen Abschnitt „Zielgrößen“). Die Zwischenziele können daher nicht nur zur Erreichung des Langfristziels dienen, sondern zu bewussten Steuerung der Treibhausgasminderungsmaßnahmen im Verkehr. Mit den Zwischenzielen kann die für eine Energiewende notwendige Verkehrswende gefördert werden.

Zwischenziele können noch weitere Funktionen erfüllen. Beispielswiese können die Treibhausgasemissionen schon mittelfristig auf ein geringeres Niveau zurückgeführt werden. Dies ist dringend nötig, wenn man dem vom Wissenschaftlichen Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) erarbeiteten Budgetansatz folgt [WBGU, 2009]. Der WBGU macht bei diesem Ansatz nochmals deutlich, dass es nicht nur um die Zielerreichung im Jahr 2050 geht, um eine globale Klimaerwärmung auf 2 Grad zu beschränken. Vielmehr dürfte die Weltbevölkerung für den Gesamtzeitraum von 2010 bis 2050 nur lediglich 750 Mrd. t CO2 emittieren. Verteilt man dieses Budget über den Bevölkerungsanteil auf die Länder, so stünde Deutschland ein Gesamtbudget bis zum Jahr 2050 von 9 Mrd. t CO_2 zur Verfügung. Die heutigen Emissionen unterstellt, wäre – so der WBGU – die Reichweite des deutschen Budgets rund 10 Jahre [WBGU, 2009]. Es besteht als nicht nur langfristig ein Handlungsdruck, die Treibhausgasemissionen Deutschlands zu reduzieren, sondern kurzfristig.

Die folgende Abbildung zeigt für verschiedene Ländergruppen die nach dem Budgetansatz möglichen CO_2-Emissionen pro Kopf und Jahr. Unterstellt man die Möglichkeit des Emissionshandels bedeutet dies dennoch, dass die Emissionen der Industrieländer bis zum Jahr 2020 bereits um rund 40 %, bis Jahr 2030 um rund 75-80 % und bis zum Jahr 2040 um nahezu 90 % gegenüber 2010 gesenkt werden müssen. Aufgrund des geringeren Ausgangsniveaus Deutschlands im Vergleich zu den anderen Industriestaaten könnten die Minderungsraten allerdings etwas geringer ausfallen. Dennoch gehen die nach dem Budgetansatz geforderten Zwischenziele weit über die bisherigen Zielfestlegungen hinaus, wonach die Bundesregierung die Treibhausgasemissionen gegenüber 1990 um 55 % bis zum Jahr 2030 und um 70 % bis zum Jahr 2040 senken will.

Da der Budgetansatz bei der sektorübergreifenden Zieldiskussion bisher keine Berücksichtigung fand, würde es falsche Impulse setzen, wenn nun für den Verkehr der Budgetansatz zur Anwendung käme. Eine entsprechende Diskussion sollte in Deutschland zunächst sektorübergreifend erfolgen. Dennoch zeigt der Budgetansatz deutlich, dass sektorspezifische Ziele für den Verkehr für die Zwischenjahre dringend benötigt werden und es nicht ausreichend ist, nur Klimaschutzziele für den Verkehr für das Jahr 2050 zu formulieren. Außerdem wird deutlich, dass Ziele für die Zwischenjahre so anspruchsvoll wie möglich definiert werden sollten, damit der globale Temperaturanstieg auf ein vertretbares Ausmaß begrenzt werden kann.

Abbildung 13: Zulässige Pro-Kopf-CO_2-Emissionen nach dem WGBU-Budgetansatz für verschiedene Ländergruppen (Industrieländer (1): ›5.4 t CO_2/Kopf, Schwellenländer (2): 2.7-5.4 t CO_2/Kopf, Entwicklungsländer (3): ‹2.7 CO_2/Kopf) [WBGU, 2009]



Zusammenfassend lässt sich feststellen:

Bei der Aufstellung **sektorspezifischer Klimaschutzziele für den Verkehr** sollten nicht nur Vorgaben zu den **Treibhausgasemissionen** und dem **Endenergieverbrauch** des Jahres **2050** festgelegt werden, sondern auch für die **Zwischenjahre 2020, 2030 und 2040**.

3.3 Abgrenzung des Verkehrssektors für Zielfestlegung

Direkte verkehrsbedingte THG-Emissionen

Die Ziele der Bundesregierung für das Jahr 2050 – unabhängig ob das sektorübergreifende Ziel zur Senkung der Treibhausgasemissionen um 80-95 % gegenüber 1990 oder die Reduktion des Endenergieverbrauchs des Verkehrs um 40 % gegenüber 2005gemeint ist – beziehen sich auf die Angaben des nationalen Treibhausgasinventars [UBA, 2014b]. Für den Verkehr bedeutet dies, dass sich die **Minderungsziele** für Treibhausgasemissionen und Energieverbrauch auf die **Energiebilanz** und damit auf die in Deutschland getankten Kraftstoffmengen beziehen [ifeu, 2014a]. Der internationale zivile Luftverkehr und Seeverkehr bleiben bei den Zielfestlegungen unberücksichtigt.

Da also die deutschen Klimaschutz- und Energieziele derzeit ohne internationale Verkehre definiert sind, ist es zunächst wenig sinnvoll, für den Verkehr eine sektorspezifische Zieldiskussion unter Einbezug der internationalen Verkehre zu führen. Die in den folgenden Unterkapiteln erarbeiteten Vorschläge für Klimaschutzziele im Verkehr berücksichtigen daher im ersten Schritt nicht den internationalen Luft- und Seeverkehr. In einem zweiten Schritt wird dann in einer Sensitivitätsbetrachtung untersucht, welche Anforderungen sich ergeben, wenn diese internationalen Verkehre bei der Zielfestlegung mit betrachtet würden.

Treibhausgasemissionen der internationalen Verkehre

Im Jahr 2010 wurden 943,8 Mio. t CO_2-Äquivalente in Deutschland emittiert (ohne LULUCF). Auf den Verkehr entfielen dabei rund 154,7 Mio. t CO_2-Äquivalente (rund 16 % der gesamten deutschen Emissionen). Die nicht in diesem Betrag enthaltenen internationalen Verkehre verursachen zusammen rund 33,8 Mio. t CO_2-Äquivalent-Emissionen, wovon allein rund 24.8 Mio. t auf den internationalen Luftverkehr entfallen (basierend auf den in Deutschland getankten Kerosinmengen). Inklusive EWF betragen die Emissionen aus dem internationalen sogar 51,2 Mio. t CO_2-Äquivalente. Welche Relevanz die Treibhausgasemissionen der internationalen Verkehre zukünftig haben, zeigt ein Vergleich mit den Zielen: Werden die Ziele der Bundesregierung erreicht und im Jahr 2050 die Treibhausgasemissionen um 80 bis 95 % gegenüber 1990 gesenkt, dürfte Deutschland nur noch zwischen 62,5 und 250 Mio. t CO_2-Äquivalente emittieren. Bei konstanten Treibhausgasemissionen der internationalen Verkehre würden Emissionen unberücksichtigt bleiben, die rund ein Fünftel bis beinahe den kompletten noch erlaubten nationalen Emissionsbudget entsprächen (siehe folgende Tabelle). Je anspruchsvoller ein Klimaschutzziel ist (z.B. 95 % Treibhausgasminderung), desto weniger sinnvoll ist damit, die internationalen Verkehre bei einer Zielfestlegung nicht zu berücksichtigen. Dies gilt umso mehr, als dass gerade für diese Verkehre starke Zunahmen der Treibhausgasemissionen erwartet werden (siehe Kapitel 5).

	THG-Emissionen (Mio. t CO2e)		Sektorübergreifende Minderungsziele	
Alle Sektoren	**1990**	**2010**	**80 %**	**95 %**
ohne internationalen Verkehr	1.250,5	943,8	250,1	62,5
mit internationalem Verkehr	1.270,7	977,6	254,1	63,5
Verkehr (ohne EWF)				
nationaler Verkehr	164,7	154,7		
internationaler Verkehr	20,1	33,8		

Indirekte verkehrsbedingte THG-Emissionen

Im Rahmen der nationalen Klimaberichterstattung werden die direkten verbrennungsbedingten Treibhausgasemissionen berücksichtigt. Emissionen durch die **Herstellung des verwendeten Stroms** oder der **Kraftstoffe** gehen ebenso wie die Emissionen durch die **Fahrzeugherstellung** nicht in die Treibhausgasbilanz des Verkehrs, sondern in die der anderen Sektoren (sowohl im Inland als auch in anderen Ländern) ein.

Da für Deutschland bereits sektorübergreifende Klimaschutzziele bestehen, sind die produktionsbedingten Emissionen über die Gesamtziele oder möglichen Sektorziele in anderen Bereichen[13] begrenzt. Eine Verlagerung der herstellungsbedingten Treibhausgasemissionen des Verkehrs in andere Sektoren im Inland (z.B. durch Nutzung von Strom oder Herstellung von Biokraftstoffen) bliebe damit für das Klima ohne Wirkung.

Werden hingegen Kraftstoffe und andere Energieträger importiert, ist dies nicht mehr zwangsläufig gegeben. Problematisch ist dies für vom Verkehr genutzte Energieträger, die in der Treibhausgasbi-

[13] Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass bei der Festlegung anderer Sektorziele die mögliche Nachfrage nach den jeweiligen Energieträgern (z.B. Strom, Biokraftstoffe) mit berücksichtigt werden müssen.

lanzierung des Verkehrs unberücksichtigt bleiben. Dies wären aus heutiger Sicht Strom und Biokraftstoffe, zukünftig ggf. auch stromgenerierte Kraftstoffe (PtG und PtL). Es muss daher sichergestellt werden, dass die Produktion dieser importierten Energieträger dann tatsächlich treibhausgasfrei erfolgen, sollen sie in der Klimabilanz des Verkehrs als emissionsfrei angerechnet werden.

Zur Absicherung dieser Forderung wird im Rahmen der Projektergebnisse diskutiert, ob zusätzliche Zielfestlegungen nötig sind. Ohne weitere Anforderungen wäre es sonst möglich, anspruchsvolle deutsche Klimaschutzziele dadurch einzuhalten, dass die dem Verkehr vorgelagerten Herstellungsprozesse ins Ausland verlagert würden. Eine besondere Herausforderung stellen dabei die importierten Biokraftstoffe dar, da diese in der nationalen Inventarberichten unberücksichtigt bleiben [UBA, 2014b], diese aber, anders als Strom oder stromgenerierte Kraftstoffe, auch zukünftig nicht treibhausgasneutral hergestellt werden können.

Für die Zielfestlegung ist der Einbezug der herstellungsbedingten Emissionen nur bedingt möglich, da derzeitige, bestehende Ziele dann nicht mehr anwendbar wären. Zudem müssten bei der Zielüberprüfung in den anderen Sektoren die zusätzlich, durch die Kraftstoffherstellung bedingten Emissionen (z.B. Zusatzbedarf erneuerbarer Strom oder Biokraftstoffe), ebenso wie die möglicherweise eingesparten Emissionen (z.B. Minderbedarf von fossilen Kraftstoffen und damit Raffineriekapazitäten) heraus gerechnet werden. Dies ist im Rahmen einer Zielüberprüfung nicht praktikabel.

Im Rahmen des Ergebnisdiskussion dieses Projekts wird daher erörtert, ob weitere Ziele notwendig sind, damit verhindert wird, dass die herstellungsbedingten Emissionen des Verkehrs ins Ausland oder bei nicht entsprechenden Klimazielen in andere Sektoren in Deutschland verlagert werden.

Vorschlag zur Abgrenzung des Verkehrssektors für die Zielfestlegung

Zusammenfassend ergeben sich folgende Abgrenzungen des Verkehrssektors für die Festlegung von Minderungszielen für den Verkehrssektor:

- **Internationale Luft- und Seeverkehre bleiben zunächst unberücksichtigt**. In **Sensitivitätsbetrachtungen** zur Zielfestlegungen werden dann die internationalen Verkehre ebenso wie eine höhere Klimawirksamkeit des Luftverkehrs (über EWF) berücksichtigt.
- Der Bereich Verkehr wird im Sinne der nationalen Klimainventare nach der sektoralen Sichtweise abgegrenzt, das heißt:
    - die **Treibhausgasemissionen durch die Herstellung der Stroms, der Kraftstoffe oder der Fahrzeuge bleiben** bei der Zieldiskussion **unberücksichtigt**.
    - Es wird nur der **Endenergieverbrauch des Verkehrs** einbezogen.

Da diese Abgrenzung für eine Bewertung der Auswirkungen von Klimaschutzmaßnahmen nur bedingt aussagekräftig ist, werden in den Szenarien auch die Emissionen durch die Stromherstellung und die Kraftstoffherstellung mit berücksichtigt. Auch der internationale Luft- und Seeverkehr wird – wie in Kapitel 2.1 beschrieben – bei der Szenarioanalyse berücksichtigt.

3.4 Diskussion möglicher Ziele für das Jahr 2050

Um anspruchsvolle sektorspezifische Klimaschutzziele im Verkehr zu erreichen, sollten idealerweise – wie bereits ausgeführt – Minderungsziele für Treibhausgasemissionen und Endenergieverbrauch für das Jahr 2050 festgelegt werden. Im Folgenden werden Vorschläge für beide Zielgrößen zur Diskussion gestellt.

3.4.1 Treibhausgasemissionen

Wie stark der Verkehr seine Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2050 mindern muss, hängt davon ab, wie anspruchsvoll das sektorübergreifende Ziel ausgestaltet ist. Da das Ziel der Bundesregierung

eine sektorübergreifende Minderung der Treibhausgasemissionen von 80 % bis 95 % bis zum Jahr 2050 gegenüber 1990 vorsieht, werden die möglichen verkehrsspezifischen Treibhausgasminderungsziele im Folgenden für den Zielbereich diskutiert. Wie die Auswertungen in diesem Unterkapitel zeigen werden, ist es sehr gravierend für die Zielfestlegung des Verkehrs, ob das übergeordnete Ziel eine 80 %ige oder 95 %ige Treibhausgasminderung vorschreibt.

Um die **Mindestanforderungen** zu ermitteln, welche Treibhausgasminderung der Verkehr zur Erreichung des übergeordneten, sektorübergreifenden Ziels erbringen muss, wird wie folgt vorgegangen: Ausgehend von den Gesamttreibhausgasemissionen Deutschlands im Jahr 1990 von rund 1.250 Mio. t CO_2-Äquivalente wird im ersten Schritt ermittelt, welche Treibhausgasmenge alle Sektoren im Jahr 2050 in Abhängigkeit eines Gesamtminderungszieles einhalten müssen (bei 80 %: rund 250,1 Mio. t; bei 95 %: rund 62,5 Mio. t).

Für die Ableitung der Mindestanforderungen des Verkehrs wird davon ausgegangen, dass alle anderen Sektoren ihre Treibhausgasemissionen soweit wie möglich vermeiden. Die Studie „Treibhausgasneutrales Deutschland“ des Umweltbundesamtes zeigt, dass in der Landwirtschaft und bei bestimmten Industrieprozessen insgesamt rund 60 Mio. t CO_2-Äquivalente nicht vermeidbar sind [UBA, 2014a]. Die Mindestanforderung an den Verkehr ergibt sich dann dadurch, dass von der Gesamttreibhausgasmenge, die im Jahr 2050 zur Verfügung steht, der nicht vermeidbare Sockelbetrag der anderen Sektoren abgezogen wird (z.B. bei einem 95 %-Ziel: 62,5 Mio. t - 60,0 Mio. t = 2.5 Mio. t). Der Differenzbetrag steht damit dem Verkehr zur Verfügung. Oder anders ausgedrückt: Der Verkehr darf nicht mehr als diese Treibhausgasmenge emittieren, sonst kann das sektorübergreifende Klimaschutzziel nicht eingehalten werden[14]. Bezieht man diese Treibhausgasmenge auf die Verkehrsemissionen im Jahr 1990 (164,7 Mio. t CO_2-Äquivalente; ohne internationale Verkehre), ergibt sich die minimale prozentuale Minderung, die der Verkehr erbringen muss, um das sektorübergreifende Klimaschutzziel einzuhalten. Mit diesem Gedankenexperiment zeigt sich klar, wie stark die Minderungsanforderungen zur Treibhausgasminderung des Verkehrs von den sektorübergreifenden Zielen abhängen. Bei einem **Gesamtminderungsziel von 95 % müsste der Verkehr 98,5 % mindern**. Sollen die Treibhausgasemissionen Deutschlands um 95 % gegenüber 1990 gesenkt werden, muss also der Verkehr nahezu treibhausgasneutral sein.

Insbesondere beim 95 %-Ziel sind zwei Aspekte besonders wichtig: Zum einen sind in dieser Betrachtung noch nicht internationale Verkehr enthalten. Zum anderen sind in dieser sektorspezifischen Sichtweise nicht die Emissionen durch die Herstellung des für den Verkehr benötigen Stroms, der Kraftstoffe und der Fahrzeuge enthalten. Da alle anderen Sektoren bis auf nichtvermeidbare Emissionen der Landwirtschaft und einiger industrieller Prozesse ebenfalls treibhausgasneutral sind, muss die Herstellung von Strom, Kraftstoffen oder Fahrzeugen ebenfalls treibhausgasneutral sein – vorausgesetzt, sie werden in Deutschland produziert. Werden hingegen auch Restemissionen in den anderen Sektoren akzeptiert (z.B. aufgrund eines geringeren sektorübergreifenden Klimaschutzzieles) oder Strom, stromgenerierte Kraftstoffe oder Biokraftstoffe importiert, ist dies nicht mehr der Fall. Wie bereits in Kapitel 3.3 ausgeführt, wird bei der Ergebnisdiskussion geprüft, ob über die Treibhausgasemissionsziele hinausgehende Ziele diese für das Klima negativen Effekte vermeiden können.

Bei einem **Gesamtminderungsziel von weniger als 95 %** werden die Mindestanforderungen an den Verkehr schnell deutlich weniger anspruchsvoll. Erbringen alle anderen Sektoren die maximal mög-

[14] Der mögliche Einsatz von Carbon Capture and Storage (CCS) wird in dieser Studie aufgrund der geringen gesellschaftlichen Akzeptanz und den hohen technologischen Risiken sowie Kosten nicht betrachtet. Würde diese Technologie eingesetzt, kann diese Schlussfolgerung nicht gezogen werden.

liche Minderung, müsste für ein 80 %-Gesamtziel der Verkehr „nur“ seine Treibhausgasemissionen konstant auf dem Niveau von 2010 halten. Selbst ein 85 %iges Minderungsziel für alle Sektoren könnte bereits erreicht werden, wenn der Verkehr lediglich 23 % seiner Emissionen gegenüber 1990 senkt – vorausgesetzt, alle anderen Sektoren erbringen maximal mögliche Emissionsminderung. Diese Annahme sollte jedoch für eine Zielfestlegung im Verkehr nicht verwendet werden, da:

- Nicht alle Minderungsmaßnahmen im Verkehr teurer als in anderen Sektoren sind. Daraus folgert beispielweise das Weißbuch der EU zum europäischen Verkehrsraum bei einem 80 %igen, sektorübergreifenden Gesamtziel eine Reduktion der Treibhausgasemissionen des Verkehrs um 60 % gegenüber 1990 (siehe Kapitel 2.3).
- Selbst ökonomisch günstige Maßnahmen in anderen Bereichen werden bis zum Jahr 2050 aufgrund von Umsetzungshemmnissen nicht zwangsläufig umgesetzt werden (z.B. Wärmedämmung des Gebäudebestandes).

Daher sollte für den Verkehr ein sektorspezifisches Treibhausgasminderungsziel höher ausfallen als lediglich eine Stabilisierung des heutigen Emissionsniveaus, wenn ein sektorübergreifendes Gesamtziel von 80 % angestrebt wird. Dies ist beispielsweise in der BMU-Leitstudie 2011 (siehe Kapitel 2.4) berücksichtigt, bei der eine rund 70 %ige Minderung der verkehrsbedingten Treibhausgasemissionen bei einem 80 %igen-Gesamtziel aus den Szenarioannahmen abgeleitet ist (Szenario A). Basierend auf diesen Analysen und Festlegungen, insbesondere der volkswirtschaftlichen Analyse im Rahmen des EU Weißbuchprozesses, sollte bei einem sektorübergreifenden Gesamtziel von 80 % das Treibhausgasminderungsziel für den Verkehr mindestens 60 % betragen. Im Rahmen der Ergebnisdiskussion der Szenariorechnungen werden, diese Vorschläge nochmals diskutiert.

Damit ergeben sich zusammenfassend im Jahr 2050 folgende Treibhausgasminderungs-Ziele für den Verkehr: 60 % gegenüber 1990 bei einem sektorübergreifenden Ziel von 80 % sowie 98,5 % gegenüber 1990 bei einem sektorübergreifenden Ziel von 95 %.

Es sei an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen, dass es sich um die **Zielwerte ohne Einbezug der internationalen Verkehre** handelt. Zudem sei nochmals auch auf die mögliche **Problematik der Verlagerung von herstellungsbedingten Emissionen ins Ausland** hingewiesen, was mit möglichen Zusatzzielen verhindert werden müsste. Diese Darstellung macht zudem nochmals sehr deutlich, dass mögliche Zielwerte für den Verkehr in extrem starker Weise von dem Gesamtzielwert abhängen. Gesamtziele von 95 % sind nur mit einem nahezu treibhausgasneutralen Verkehr erreichbar. In diesem Zusammenhang ist es umso wichtiger, dass Emissionen durch die Herstellung der Energieträger nicht dieses Ziel konterkarieren.

3.4.2 Endenergieverbrauch

Während bei der Verwendung von konventionellen, fossilen Energieträgern ein direkter linearer Zusammenhang zwischen Minderung des Energieverbrauchs und der Treibhausgasminderung besteht, ist dies bei alternativen Energieträgern nicht zwangsläufig der Fall. Im Extremfall könnte ein treibhausgasneutraler Verkehr erreicht werden, in dem ausschließlich treibhausgasneutrale Energieträger eingesetzt werden – unabhängig von der Höhe des Energieverbrauchs des Verkehrs. Allerdings ist es aus verschiedenen Gründen unwahrscheinlich – wie bereits ausgeführt – dass ausreichende Mengen treibhausgasarmer oder -freier Energieträger zu akzeptablen Preisen für den Verkehr zur Verfügung stehen, so dass zur Realisierung einer Energiewende im Verkehr der Energieverbrauch des Verkehrs drastisch gesenkt werden sollte. Aufgrund der fehlenden Korrelation können aber Endenergieverbrauchsziele nicht direkt aus den im vorangegangen Unterkapitel vorgestellten Treibhausgasminderungszielen abgeleitet werden. Es kann lediglich überprüft werden, ob das in Deutschland bestehende Endenergieziel für den Verkehr für 2050 von -40 % gegenüber 2005 ausreichend ist, um die oben stehende Treibhausgasminderungsziele einzuhalten [Prognos et al., 2010].

Für diese Überprüfung wird vereinfachend abgeschätzt, welche Treibhausgasemissionen sich ergeben, wenn nur das im Jahr 2050 in Deutschland für den Verkehr zur Verfügung stehende erneuerbare Potenzial (regenerativer Strom und Biokraftstoffe) genutzt würde und zur Deckung des restlichen Endenergiebedarfs des Verkehrs konventionelle, fossile Kraftstoffe importiert würden. Diese Vorgehensweise zeigt auf, wie stark der Endenergieverbrauch des Verkehrs gesenkt werden müsste, um die Treibhausgasminderungsziele für den Verkehr zu erreichen, ohne treibhausgasarme oder -freie Energieträger zu importieren.

Nach Analysen der BMU-Leitstudie stehen ohne Importe im Jahr 2050 im günstigsten Fall rund **700 PJ erneuerbarer Strom** und **300 PJ Biokraftstoffe** für den Verkehr zur Verfügung [DLR et al., 2012]. Wird der erneuerbar erzeugte Strom ausschließlich für Elektrofahrzeuge genutzt, könnte damit ein Endenergieverbrauch des Verkehrs von rund 920 PJ (**620 PJ Strom und 300 PJ Biokraftstoffe**) gedeckt werden. Diese Abschätzung basiert auf der Annahme, dass der Wirkungsgrad bis zur Nutzung des Stroms in den Elektrofahrzeugen rund 89 % beträgt. Würde hingegen der erneuerbar erzeugte Strom ausschließlich zur PtL-Herstellung genutzt, könnte aufgrund des niedrigen Gesamtwirkungsgrades des Herstellungsprozesses von rund 50 %[15] lediglich 650 PJ treibhausgasneutrale Endenergie für den Verkehr bereitgestellt werden (**350 PJ PtL und 300 PJ Biokraftstoffe**). Die Nutzung des erneuerbare Stroms zur Erzeugung von PtL bzw. die Nutzung in Elektrofahrzeugen stellen damit die Unter- und die Obergrenze der verfügbaren Endenergien dar, die dem Verkehr ohne Importe erneuerbar im Jahr 2050 zur Verfügung stehen[16]. Bei der Erzeugung anderer strombasierter Kraftstoffe (z.B. Wasserstoff, EE-Methan) würden sich aufgrund der höheren Herstellungswirkungsgrade im Vergleich zu PtL Endenergiewerte ergeben, die zwischen dieser Unter- und Obergrenze liegen.

Durch die Herstellung der rund **300 PJ Biokraftstoffe** entstehen bei der Herstellung rund **10. Mio. t CO_2-Äquivalente**. Aufgrund der sektorspezifischen Betrachtungsweise in diesem vereinfachten Beispiel bleiben diese jedoch unberücksichtigt. Definitionsgemäß werden Biokraftstoffe im Sektor Verkehr als emissionsfreie Kraftstoffe verbucht. Damit könnten ohne Importe von treibhausgasarmen oder -freien Energieträgern zwischen 650 und 930 PJ Endenergie ohne direkte Treibhausgasemissionen zur Verfügung gestellt werden. Erst über diesen Werten entstehen pro weitere 100 PJ benötigte Endenergie rund 7,2 Mio. t CO_2-Äquivalent-Emissionen, da für dieses vereinfachende Beispiel davon ausgegangen wird, dass dieser zusätzliche Endenergiebedarf über konventionelle, fossile Energieträger gedeckt wird.

Abbildung 14 zeigt das Ergebnis dieser vereinfachenden Betrachtung grafisch. Die rote Linie zeigt die Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Abhängigkeit von der Höhe des Endenergieverbrauchs für den Fall, dass der regenerativ zur Verfügung stehende Strom ausschließlich direkt für Elektrofahrzeuge genutzt wird. Die orange Linie beschreibt die gleiche Abhängigkeit für die Herstellung von PtL aus dem regenerativen Strom. Wird nun der Endenergieverbrauch des Verkehrs, wie im Energiekonzept festgeschrieben, bis zum Jahr 2050 um 40 % gegenüber 2005 reduziert (siehe senkrecht gestrichelte Linie in Abbildung 14), ergäben sich in dieser vereinfachten Betrachtungsweise ohne Importe von treibhausgasneutralen Energieträgern im ungünstigsten Fall Treibhausgasemissionen in Höhe von rund 51 Mio. t CO_2-Äquivalente (Schnittpunkt orange Linie mit der gestrichelten Linie). Bezogen auf das Jahr 1990 ergäbe das eine Minderung von 69 %. Selbst bei Berücksichtigung der 10 Mio. t CO_2-Äquivalente durch die Herstellung der Biokraftstoffe in Deutschland würde noch eine Minderung der verkehrsbedingten Treibhausgasemissionen um 63 % bezogen auf 1990 bedeuten.

---

15 In den Szenarien werden davon abweichend die Wirkungsgrade gemäß Kapitel 5.2.3 verwendet

16 Unberücksichtigt bleibt bei dieser Überlegung zunächst, dass der Wirkungsgrad der Nutzung der Energieträger bei Elektrofahrzeugen höher ist als bei Verbrennungsmotoren. Das bedeutet: Wird gleich viel Endenergie zur Verfügung gestellt, können im Falle der Elektromobilität mehr Fahrzeugkilometer erbracht werden als im Fall von PtL.

Das im vorangegangenen Unterkapitel aufgestellte Treibhausgasminderungsziel von 60 % für den Verkehr im Falle eines **sektorübergreifenden Ziels von 80 %** Treibhausgasminderung wäre damit mit dem derzeit bestehenden Endenergieziel von -40 % sicher erreichbar. Würden statt fossiler Kraftstoffe gar treibhausgasarme oder -freie Energieträger importiert, würde das Ziel klar übertroffen.

Sollen die Treibhausgasemissionen des Verkehrs aber um 98,5 % gesenkt werden (auf rund 2,5 Mio. t CO2-Aquivalente), wie dies zur Einhaltung eines **sektorübergreifenden Ziels von 95 %** notwendig ist (siehe vorangegangenes Unterkapitel), ist die Senkung des Endenergieverbrauchs um 40 % gegenüber 2005 nicht ausreichend, will man nicht im großen Stile treibhausgasarme- oder freie Energieträger importieren. Wie Abbildung 14 ebenfalls zeigt, müsste der Endenergiebedarf um mindestens 60 % gesenkt werden, wenn Importe vermieden werden sollten. Die in Kapitel 2.4 vorgestellten Szenariostudien sowie die in dieser Studie erstellten Szenarien errechnen einen Endenergieverbrauch für den Verkehr (ohne internationale Verkehre) für die untersuchten Maßnahmenszenarien in Höhe von rund 1.050 bis 1.350 PJ im Jahr 2050. Dies entspricht einer Minderung des Endenergieverbrauchs des Verkehrs gegenüber 2005 um rund 40 % bis 55 % bis zum Jahr 2050.

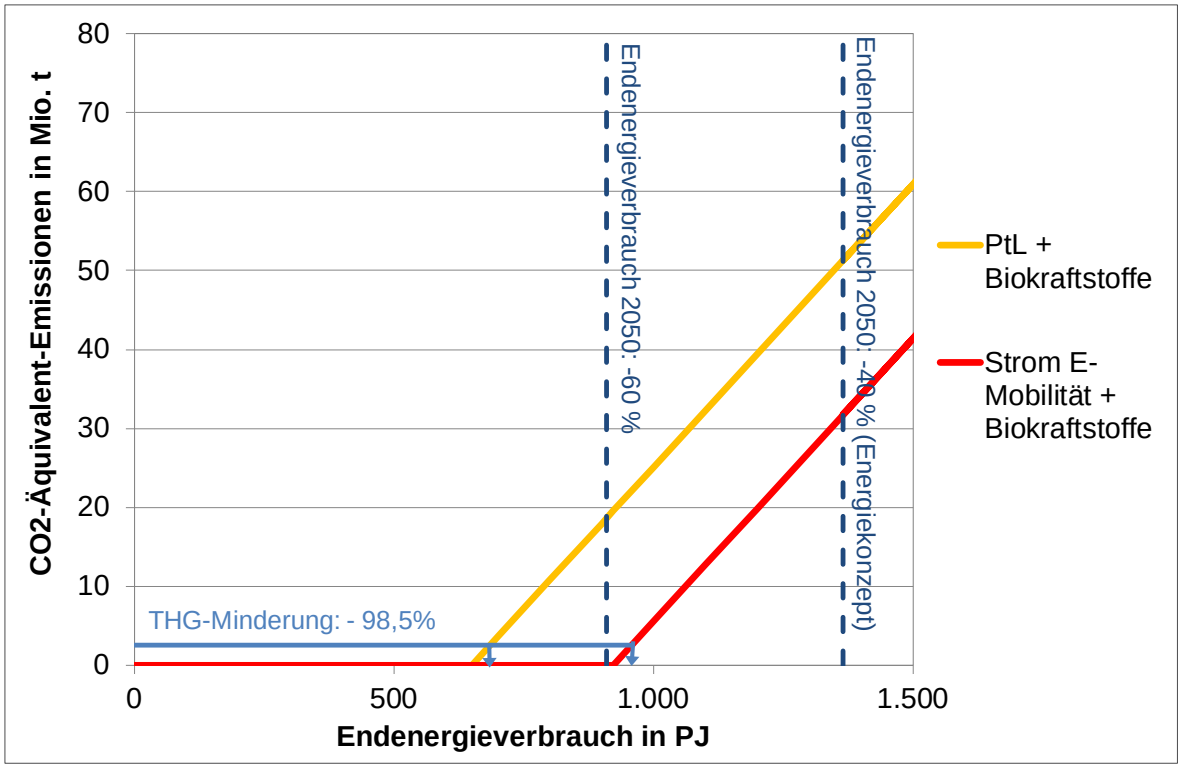
Es wird hier angenommen, dass aufgrund von Kosten- und Ressourceneffizienz die Realisierung der im Klimaschutzszenario errechneten Endenergieverbrauchsminderung von 53 % (gegenüber 2005) ein Maßstab für das Mindestziel sein soll. Diese geht deutlich über das Ziel von 40 % im Energiekonzept der Bundesregierung hinaus [Bundesregierung, 2010]. Aufgrund der Unsicherheiten bezüglich der Umsetzung der im Klimaschutzszenario vorgeschlagenen Maßnahmen sowie der Verfügbarkeit von EE-Kraftstoffen wird dabei ein Ziel von -50 bis -60 % Endenergieverbrauchsminderung für 2050 vorgeschlagen. Dabei sollte bei den Zwischenzielen für die Jahre 2020-2040 zunächst ein Minderungspfad in Richtung 60 % gesetzt werden, der bei sich abzeichnender hoher Verfügbarkeit von erneuerbaren Energien entsprechend angepasst werden kann.

Damit werden folgende Zielwerte für die Senkung des Endenergieverbrauchs des Verkehrs für das Jahr 2050 vorgeschlagen (ohne internationale Verkehre):

- Bei einem **sektorübergreifenden Treibhausgasminderungsziel von 80 %** und einem sektorspezifischen Treibhausgasminderungsziel von 60 % sollte ein **Endenergieziel** für das Jahr 2050 in Höhe von **-40 %** angestrebt werden. Das entspricht dem heutigen Ziel der Bundesregierung [Prognos et al., 2010].
- Bei einem **sektorübergreifenden Treibhausgasminderungsziel von 95 %** und einem sektorspezifischen Treibhausgasminderungsziel von 98,5 % wird für das Jahr 2050 ein **Endenergieziel** in Höhe von **-50-60 %** vorgeschlagen.

Das Endenergieziel von -50-60 % für den nationalen Verkehr ist als ambitioniert anzusehen. Wie die Ergebnisse des Klimaschutzszenarios in dieser Studie sowie Ergebnisse anderer Studien zeigen, sind Minderungen in diesem Korridor durch ambitionierte aber realistische Maßnahmen erreichbar. Für sektorübergreifende Treibhausgasminderungsziele von 85 und 90 % sollte zwischen den vorgestellten Zielwerten für übergreifende Ziele von 80 und 95 % linear interpoliert werden.

Abbildung 14: Treibhausgasemissionen des Verkehrs (ohne internationale Verkehre) im Jahr 2050 in Abhängigkeit des Endenergieverbrauchs mit Nutzung des inländischen Potenzials erneuerbarer Energien und Import konventioneller Kraftstoffe



3.5 Diskussion möglicher Minderungspfade 2020 bis 2050

Der in Kapitel 3.2 vorgestellte Budgetansatz des WBGU zeigt, dass möglichst frühzeitig ambitionierte Klimaschutzziele und damit Treibhausgasminderungsziele für den Verkehr festgelegt werden sollten. Die Analysen zur Festlegung des Endenergieziels zeigen aber auch, dass die Einhaltung ambitionierte Klimaschutzziele nicht allein durch Energieeffizienzverbesserungen, sondern nur durch eine gleichzeitige Umstellung der Energieversorgung des Verkehrs auf treibhausgasarme oder –freie Energieträger möglich ist. Aufgrund der Tatsache, dass treibhausgasarme oder -freie Energieträger aufgrund der besseren Gesamtwirkungsgrade in anderen Sektoren – zumindest so lange dort der Bedarf besteht – höhere Treibhausgasminderungen erbringen und damit dort kosteneffizienter eingesetzt werden können, sollten die Treibhausgasminderungen im Verkehr in den nächsten 10 bis 20 Jahren vorrangig durch eine gesteigerte Energieeffizienz erbracht werden.

Dies hat zwei Vorteile:

- Zum einen wird so der Energieverbrauch des Verkehrs reduziert, so dass eine Energiewende im Verkehr erst möglich wird.
- Zum anderen können treibhausgasarme und -freie Energieträger somit vorrangig in anderen Sektoren eingesetzt werden.

Es wird daher vorgeschlagen, dass sich das prozentuale Treibhausgasminderungsziel für den Zeitraum von 2010 bis 2020 direkt an der prozentualen Minderung des Endenergieverbrauchs orientiert. Für das Jahr 2030 sollte dann erstmals das Treibhausgasziel anspruchsvoller sein, als das Endenergieziel. Es wird vorgeschlagen, dass dann die noch zwischen 2020 und 2050 erforderliche Treibhausgasminderung zur Erreichung des langfristigen Treibhausgasziels des Verkehrs im Jahr 2050 zu einem Viertel im Zeitraum 2020 bis 2030 erreicht wird (statt einem Drittel bei einer linearen Vertei-

lung). Die restliche, noch erforderliche Treibhausgasminderung zur Erreichung des 2050-Ziels wird dann auf die Zeiträume 2030-2040 und 2040-2050 gleich verteilt.

Die Zwischenziele für die Treibhausgasminderung sind somit in den Anfangsjahren an die Zwischenziele für die Minderung des Endenergieverbrauchs des Verkehrs gekoppelt. Analog zu den Treibhausgasemissionen wäre daher eine überproportionale Minderung des Endenergieverbrauchs in diesem Zeitraum wünschenswert. Da aber effiziente Techniken sich aufgrund der Lebensdauern von Fahrzeugen nur langsam am Markt durchsetzen, ist eine überproportionale Minderung des Endenergieverbrauchs in den Anfangsjahren wenig realistisch. Es wird daher vorgeschlagen, dass der Energieverbrauch linear ausgehend vom 2010er Niveau auf die Endenergiezielwerte des Jahres 2050 zurückgeführt werden (-40 % bei einem sektorübergreifenden Klimaschutzziel von 80 % bzw. -60 % bei einem sektorübergreifenden Klimaschutzziel von 95 %). Unabhängig von den so festgelegten Zielen in den Zwischenjahren wird für das Jahr 2050, wie in Kapitel 3.4.2 dargelegt, ein Korridor für die Minderung des Endenergieverbrauchs von 50 bis 60 % festgelegt.

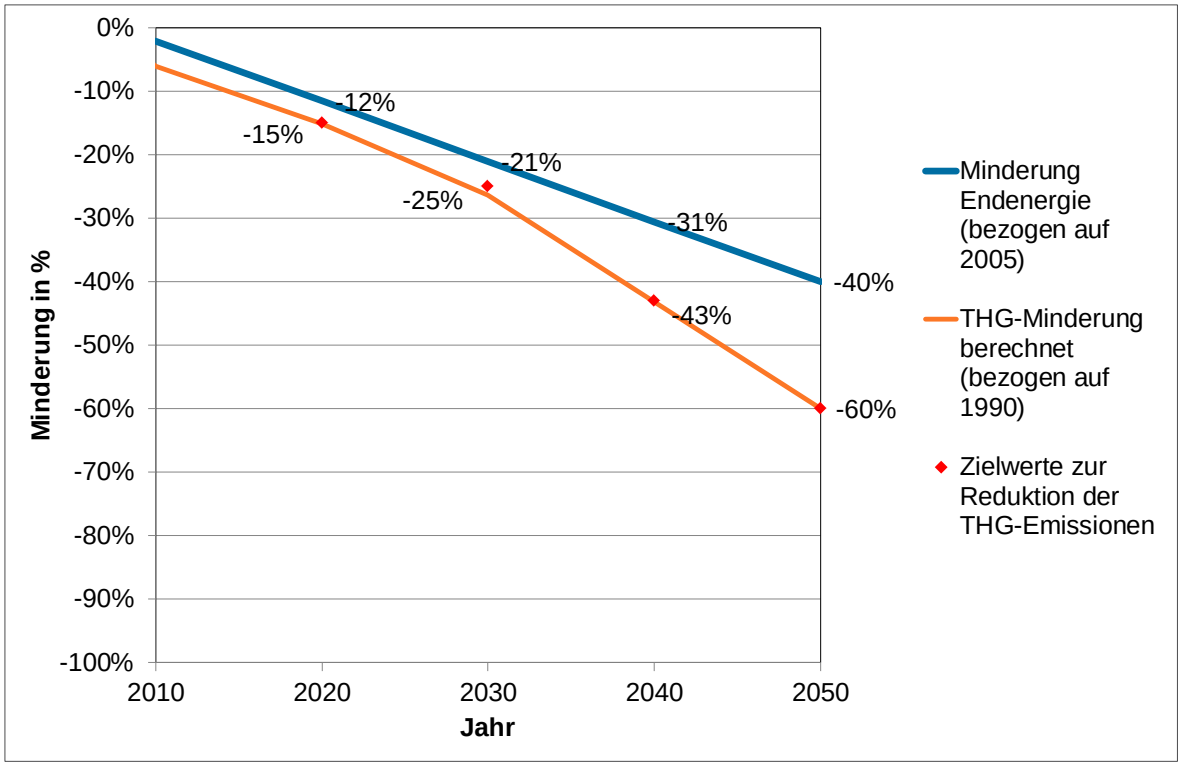
Abbildung 15 zeigt die sich daraus ergebenden Zwischenziele für die Treibhausgasemissionen (rote Kurve, bezogen auf 1990) sowie den Endenergieverbrauchs des Verkehrs (blaue Kurve, bezogen auf 2005) für den Fall, dass das übergeordnete, sektorübergreifende Klimaschutzziel eine Minderung der Treibhausgasemissionen von 80 % vorsieht. Zur einfacheren Kommunikation der Zwischenziele bietet es sich zumindest für die Treibhausgasziele an, möglichst die Zielwerte auf einprägsame Zahlenwerte auf- oder abzurunden. Demnach würden sich **bei einem sektorübergreifenden Treibhausgasminderungsziel von 80 %** für die **Treibhausgasminderung des Verkehrs gegenüber 1990** folgende (Zwischen-)Zielwerte ergeben:

- -15 % bis 2020;
- -25 % bis 2030;
- -43 % bis 2040;
- -60 % bis 2050.

Für den **Endenergieverbrauch** würden sich **gegenüber 2005** folgende Zielwerte ergeben:

- -12 % bis 2020;
- -21 % bis 2030;
- -31 % bis 2040;
- -40 % bis 2050.

Abbildung 15: Zielwerte für die Minderung der Treibhausgase sowie des Endenergieverbrauchs des Verkehrs (ohne internationale Verkehre) für die Jahre 2020, 2030, 2040 und 2050 bei einem sektorübergreifenden Treibhausgasminderungsziel von 80 %



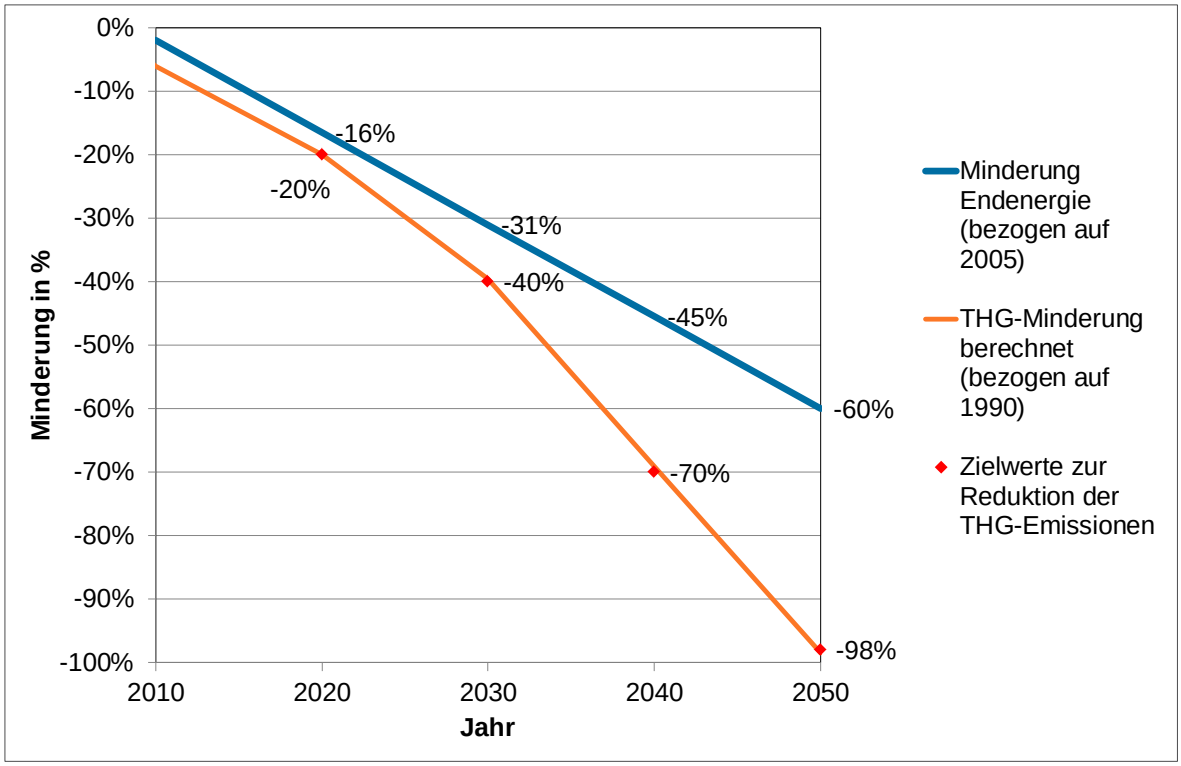
Wird bei einem **sektorübergreifenden Treibhausgasminderungsziel von 95 %** analog vorgegangen, ergeben sich folgende **Zielwerte für die Treibhausgasemissionen des Verkehrs gegenüber 1990** (siehe Abbildung 16, ohne internationale Verkehre):

- -20 % bis 2020;
- -40 % bis 2030;
- -70 % bis 2040;
- -98,5 % bis 2050.

Für den **Endenergieverbrauch** würden sich dann entsprechend **gegenüber 2005** folgende Zielwerte ergeben (siehe Abbildung 16):

- -16 % bis 2020;
- -31 % bis 2030;
- -45 % bis 2040;
- -50-60 % bis 2050.

Abbildung 16: Zielwerte für die Minderung der Treibhausgase sowie des Endenergieverbrauchs des Verkehrs (ohne internationale Verkehre) für die Jahre 2020, 2030, 2040 und 2050 bei einem sektorübergreifenden Treibhausgasminderungsziel von 95 %



3.6 Mögliche Minderungsziele mit Einbezug internationaler Verkehre

Die in den vorangegangenen Unterkapiteln vorgestellten Vorschläge für Klimaschutzziele für den Verkehr berücksichtigen noch nicht internationale Verkehre analog zu den derzeit bestehenden Zielen der Bundesregierung. Grundsätzlich ist der Ausschluss der internationalen Verkehre bei der Festlegung von sektorspezifischen Zielen im Verkehr nicht sinnvoll, da gerade mit dem Luft- und Seeverkehr Verkehrsmittel ausgeschlossen werden, bei denen bis zum Jahr 2050 mit hohen Wachstumsraten bei der Verkehrsleistung und damit den Treibhausgasemissionen gerechnet wird. Es ist auch nicht sinnvoll, Ziele für den internationalen Verkehr nur auf nationaler Ebene festzulegen.

Es wird daher in diesem Unterkapitel untersucht, welche Auswirkungen der Einbezug der internationalen Verkehre auf die Zielfestlegung hätte. Wie bereits ausgeführt, werden im nationalen Treibhausgasinventar die internationalen Verkehre nur nachrichtlich aufgeführt [UBA, 2014b]. Für die Ermittlung der Treibhausemissionen dieser Verkehre werden nur die in Deutschland getankten Mengen berücksichtigt. Beim Luftverkehr entspricht dies grob dem Kerosinverbrauch des abgehenden Verkehrs bis zu ersten Zwischenlandung [ifeu, 2014a].

Treibhausgasemissionen

Im Jahr 1990, dem Bezugsjahr der Klimaschutzziele, verursachten die internationalen Verkehre in dieser Abgrenzung 20,1 Mio. t CO_2-Äquivalent-Emissionen. Unter Einbezug dieser Verkehre ergeben sich dann im Jahr 1990 Gesamttreibhausgasemissionen in Deutschland in Höhe von 1.270,7 Mio. t CO_2-Äquivalenten. Geht man nun davon aus, dass das sektorübergreifende Treibhausgasminderungsziel von 80-95 % gegenüber 1990 auch für diese Gesamtsumme inkl. internationalem Verkehr gilt, dürften alle Sektoren im Jahr 2050 lediglich Treibhausgasemissionen in Höhe von 254,1 Mio. t

CO_2-Äquivalente im Falle eines sektorübergreifenden Minderungsziel von 80 % emittieren. Bei einem 95 %-Ziel dürften die Treibhausgasemissionen lediglich bei 63,5 Mio. t CO_2-Äquivalente liegen. Zieht man von diesen Beträgen wieder die nichtvermeidbaren Emissionen der Landwirtschaft und der Industrie in Höhe von 60 Mio. t ab, dürfte der Verkehr im Jahr 2050 maximal zwischen 3,5 Mio. t (bei einem 95 %-Ziel) und 194,1 Mio. t CO_2-Äquivalente (bei einem 80 %-Ziel) emittieren. Der Vergleich der prozentualen Minderungen mit den Werten ohne internationale Verkehre zeigt, dass sich die Zahlenwerte nur geringfügig unterscheiden. Die Mindestanforderungen sind für die sektorübergreifenden Treibhausgasminderungsziele von 85 und 95 % etwas anspruchsvoller, falls die internationalen Verkehre einbezogen werden. Für ein 80 %iges und 95 %iges Gesamtziel wären die Anforderungen etwas weniger anspruchsvoll. Aufgrund der geringen Unterschiede würde es sich daher anbieten, die Ziele, die ohne internationale Verkehre vorgeschlagen wurden, auch für den Gesamtverkehr inklusive internationale Verkehre zu übernehmen – allerdings mit einem höheren Startwert im Jahr 1990 für die Treibhausgasemissionen.

Zu beachten ist bei dieser Vorgehensweise, dass aufgrund der erwarteten, zukünftigen Zunahme der Emissionen aus Luft- und Seeverkehr die Einhaltung der Ziele deutlich schwieriger zu erreichen sein wird als ohne internationale Verkehre. Grundsätzlich sollte sich allerdings die Zielfestlegung nicht allein davon leiten lassen, wie schwer die Ziele zu erreichen sind. Entscheidend ist, ob die Ziele theoretisch erreichbar sind: Dabei ist eine 95 %ige sektorübergreifende Treibhausgasminderung nur dann erreichbar, wenn der Verkehr seine Emissionen um rund 98 % senkt – das gilt sowohl mit als auch ohne internationale Verkehre. Lediglich die dem Verkehr zur Verfügung stehende Gesamtmenge ist mit 3,5 Mio. t CO_2-Äquivalente aufgrund des höheren Startwertes 1990 etwas grösser (statt 2,5 Mio. t ohne internationale Verkehre). Daher ergibt sich, dass der Verkehr sowohl mit als auch ohne internationale Verkehre im Jahr 2050 nahezu treibhausgasneutral sein muss, um eine 95 %iges sektorübergreifendes Gesamtziel zu erreichen.

Einbezug des EWF beim Flugverkehr

Wird zusätzlich über einen durchschnittlichen EWF-Faktor von 2,4 (siehe Kapitel 3.3) für Flüge ab einer Reiseflughöhe über 9 km die höhere Klimawirksamkeit beim internationalen Luftverkehr berücksichtigt, lägen die Treibhausgasemissionen der internationalen Verkehre im Jahr 1990 statt bei 20,1 Mio. t bei rund 33,5 Mio. t CO_2-Äquivalente. Bei einem analogen Vorgehen wie ohne EWF-Faktor und einem sektorübergreifenden Treibhausgasminderungsziel von 80-95 % würden die maximal zulässigen Treibhausgasemissionen des Verkehrs dann zwischen 4,2 und 196,8 Mio. t CO_2-Äquivalente liegen. Die notwendigen Treibhausgasminderungen zur Erreichung der sektorübergreifenden Klimaschutzziele etwas anspruchsvoller sind als ohne Berücksichtigung des EWF-Faktors. Grundsätzlich wären aber die für den Verkehr ohne Berücksichtigung der internationalen Verkehre vorgeschlagenen Treibhausgasziele anspruchsvoller als diese Mindestziele und könnten daher auch für den Fall mit internationalen Verkehren und EWF-Faktor übernommen werden.

Allerdings besteht dabei ein grundsätzliches Problem der Zielerreichung. Im Jahr 1990 verursachten Wasserdampf und Luftschadstoffemissionen des Luftverkehrs eine zusätzliche Treibhausgaswirkung von 13,4 Mio. t CO_2-Aquivalente (Differenz von 33,5 und 20,1 Mio. t), die zusätzlich zu den Emissionen der klassischen Treibhausgase (z.B. CO_2) auftritt. Diese zusätzliche Treibhausgaswirkung kann lediglich reduziert werden,

- wenn die Wasserdampf- oder Luftschadstoffemissionen der Flugzeuge reduziert werden,
- so geflogen wird, dass keine Zirruswolken durch den Wasserdampf entstehen oder
- indem die Verkehrsnachfrage gesenkt wird.

Der Einsatz von treibhausgasneutralen Kraftstoffen (z. B. PtL) kann hingegen nach derzeitigen Wissensstand nur begrenzt dazu beitragen, diese zusätzliche Treibhausgaswirkung des Luftverkehrs zu reduzieren, da unabhängig vom eingesetzten Kraftstoff Wassersdampf und Luftschad-

stoffemissionen entstehen können. Aufgrund der erwarteten weiteren Steigerung der Luftverkehrsnachfrage bis 2050 [Öko-Institut, 2013b] und den nur bedingten technischen Möglichkeiten zur Senkung der Wasserdampf- und Luftschadstoffemissionen des Luftverkehrs ist davon auszugehen, dass diese zusätzlichen Treibhausgasemissionen kaum vermieden werden können. Nimmt man trotz Steigerung des Luftverkehrs die Halbierung dieses zusätzlichen Emissionsbeitrages des Jahres 1990 von 13 Mio. t an, würden Restemissionen in Höhe von rund 6,5 Mio. t CO_2-Äquivalente trotz treibhausgasneutraler Produktion des Kerosins übrig bleiben. Dieser Betrag wäre damit schon höher als die Emissionen, die dem gesamten Verkehr im Jahr 2050 bei einem sektorübergreifenden Gesamtziel von -95 % zur Verfügung stünden – das wären lediglich 4,2 Mio. t CO_2-Äquivalente.

Dies bedeutet: Soll **ein sektorübergreifendes Treibhausgasminderungsziel von 95 % eingehalten** und **gleichzeitig die höhere Klimawirksamkeit des Luftverkehrs** über den EWF-Faktor **berücksichtigt werden**, würde dies ohne technische Quantensprünge bei der Luftschadstoffemissionsminderung nur möglich sein, wenn die Verkehrsnachfrage des Luftverkehrs deutlich sinkt und nicht wie derzeit prognostiziert zukünftig stark wächst. Dies gilt aber als unwahrscheinlich. Unabhängig davon wird zunächst vorgeschlagen, mit den gleichen Treibhausgasminderungszielen zu arbeiten – unabhängig davon, ob die höhere Klimawirksamkeit berücksichtigt wird oder nicht. Andernfalls müsste man klarstellen, dass ein sektorübergreifendes Treibhausgasminderungsziel von 95 % nicht realisierbar wäre, da der Sockelbetrag des Luftverkehrs bereits über den anzustrebenden Zielwerten des Verkehrs läge.

Endenergieverbrauch

Der Endenergieverbrauch der internationalen Verkehre im Jahr 2005 betrug rund 419 PJ, so dass der gesamte Verkehr einen Endenergieverbrauch von 2.695 PJ hat. Wird auf diesen Endenergieverbrauch das 40 %ige Minderungsziel der Bundesregierung angewandt, ergäbe sich ein Zielwert von 1.617 PJ für den Verkehr. Wie Abbildung 14 zeigt, würde sich bei Einhaltung dieses Endenergieverbrauchs ohne Importe von treibhausgasarmen oder -freien Kraftstoffen Treibhausgasemissionen von maximal 70 Mio. t CO_2-Äquivalente ergeben. Bei einem sektorübergreifenden Treibhausgasminderungsziel von 80 % und einem verkehrsspezifischen Treibhausgasminderungsziel von 60 % wären maximal 74 Mio. t CO_2-Äquivalente zulässig. Wird das Endenergieziel von 40 % auf die internationalen Verkehre erweitert, könnte also ohne Importe von treibhausgasarmen oder -freien Kraftstoffen das Treibhausgasminderungsziel im Verkehr erreicht werden.

Ist das Ziel, sektorübergreifend die Treibhausgasemissionen um 95 % und damit im Verkehr um 98,1 % zu senken, wäre hingegen selbst ein 60 %iges Minderungsziel für den Endenergieverbrauch nicht ausreichend, die gewünschte Treibhausgasminderung zu erzielen. Dies wird nur möglich, wenn treibhausgasarme oder -freie Kraftstoffe importiert werden oder der Endenergieverbrauch noch weiter gesenkt wird. Letzteres ist wenig wahrscheinlich, da eine Steigerung der Energieeffizienz im Luftverkehr deutlich schwieriger darstellbar ist als bei Pkw oder Lkw (aufgrund fehlender Möglichkeit des Einsatzes von Elektromotoren und Brennstoffzellen). Eine über die 60 %ige Minderung des Endergieverbrauchs hinausgehende Minderung des Gesamtverkehrs einschließlich internationaler Verkehre ist daher wenig zielführend. Es bietet sich aber an, das 50-60 %ige Minderungsziel beizubehalten, auch wenn die internationalen Verkehre einbezogen werden.

Daher wird vorgeschlagen, dass auch für den Verkehr einschließlich der internationalen Verkehre die gleichen Zielwerte für die Treibhausgasminderung und Reduktion des Endenergieverbrauchs verwendet werden wie ohne internationale Verkehre. Im weiteren Projektverlauf muss dann im Rahmen der eigenen Szenarienberechnungen die Einhaltbarkeit dieser Ziele überprüft werden.

3.7 Zusammenfassung möglicher Klimaschutzziele für den Verkehr

Klimaschutzziele im Verkehr erfordern sowohl die Festlegung von Zielwerten zur Minderung der Treibhausgasemissionen als auch des Endenergieverbrauchs des Verkehrs. Die zusätzliche Festlegung von **Energieverbrauchszielen** hat zwei Vorteile:

- Es wird sichergestellt, dass der Energieverbrauch so weit zurückgeht, dass eine Versorgung des Verkehrs mit erneuerbaren, treibhausgasarmen bzw. -freien Energieträgern überhaupt ermöglicht wird. Eine erneuerbare Energieversorgung für den Verkehr wird auf jeden Fall benötigt, um hohe Treibhausgasminderungen beim Verkehr zu erreichen.
- Die kombinierte Festlegung von Energieverbrauchszielwerten und Treibhausgasminderungszielen erlaubt es, dass die Treibhausgasminderung in den nächsten 10-20 Jahren vorrangig über anspruchsvolle Energieziele, im darauf folgenden Zeitraum bis 2050 durch anspruchsvolle Treibhausgasminderungsziele erfolgen kann.

So wird sichergestellt, dass die verfügbaren erneuerbaren, treibhausgasarmen bzw. -freien Energieträger zunächst in den Sektoren zum Einsatz kommen können, wo sie höhere Treibhausgasminderungen erzielen.

Um diesen Steuerungsmechanismus von Treibhausgas- und Endenergiezielen ausnutzen zu können, ist es notwendig, nicht nur Zielwerte für das Jahr 2050 festzulegen. Es bedarf ganz gezielt der **Festlegung von Zielen für die Zwischenjahre** 2020, 2030 und 2040.

Wie hoch die prozentuale Minderung von Treibhausgasemissionen und Endenergieverbrauch ausfallen muss, hängt entscheidend vom sektorübergreifenden Klimaschutzziel ab. Die Bundesregierung hat sich bereits verpflichtet, die Treibhausgasemissionen aller Sektoren bis zum Jahr 2050 um 80-95 % zu senken. Geht man davon aus, dass in anderen Sektoren kostengünstiger die Emissionen gesenkt werden können als im Verkehr, ergibt sich die Mindestanforderung an den Verkehr dadurch, dass von den insgesamt erlaubten Treibhausgasemissionen die nicht vermeidbaren Treibhausgasemissionen der anderen Sektoren (v.a. Landwirtschaft und industrielle Prozesse) abgezogen werden.

Soll ein sektorübergreifendes Ziel von 95 % Treibhausgasminderung im Jahr 2050 gegenüber 1990 erreicht werden, bedeutet dies, dass der **Verkehr seine Treibhausgasemissionen um rund 98 % senken muss** – der Verkehr im Jahr 2050 muss dann nahezu treibhausgasneutral sein. Lediglich bei geringeren sektorübergreifenden Zielen ergibt sich mehr Spielraum für den Verkehr. Die Analysen zeigen aber, dass bei einem übergreifenden Ziel von 80 % ein Treibhausgasminderung im Verkehr von 60 % anzustreben ist.

Erreicht werden können diese Ziele durch treibhausgasarme oder -freie Kraftstoffe sowie durch Senkung des Endenergieverbrauchs. Hier zeigen die Analysen, dass im Jahr 2050

- bei einem 80 %igen Gesamttreibhausgasminderungsziel für alle Sektoren eine 40 %ige Minderung des Endenergieverbrauchs des Verkehrs gegenüber 2005 anzustreben ist, entsprechend dem bestehenden Ziel der Bundesregierung;
- bei einem 95 %igen Gesamtziel wäre das anzustrebende Endenergieziel für den Verkehr -50 % bis -60 %.

Tabelle 19 zeigt die Zielwerte für die Endenergieverbrauchs- wie auch für die Treibhausgasminderung für das Jahr 2050 und für die Zwischenjahre 2020, 2030 und 2040. Der Endenergieverbrauch wird in den Zwischenjahren linear auf den Zielwert 2050 zurückgeführt. Die Treibhausgasemissionen orientieren sich bis 2030 stark an den Minderungen des Endenergieverbrauchs. Im Zeitraum danach werden im Vergleich zum Endenergieverbrauch stärkere prozentuale Minderungen unterstellt.

Tabelle 19: Vorschläge für Minderungsziele des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen des Verkehrs in Abhängigkeit der Gesamt-Klimaschutzziele in Deutschland mit und ohne internationale Verkehre

	2020	2030	2040	2050
Energieverbrauch Verkehr (bezogen auf 2005)				
Gesamt-THG-Minderung 80 %	-12 %	-21 %	-31 %	-40 %
Gesamt-THG-Minderung 95 %	-16 %	-31 %	-45 %	-50 bis -60 %
THG-Emissionen Verkehr (bezogen auf 1990)				
Gesamt-THG-Minderung 80 %	-15 %	-25 %	-43 %	-60 %
Gesamt-THG-Minderung 95 %	-20 %	-40 %	-70 %	-98,5 %

Grundsätzlich sind die Zielwerte für den Verkehr ohne internationale Verkehre abgeleitet worden. Die Ausführungen zeigen aber, dass die gleichen Zielwerte auch dann zugrunde gelegt werden können, wenn die internationalen Verkehre einbezogen werden. Bei der Diskussion der Szenarienergebnisse wird dann überprüft, ob die Zielwerte auch erreicht werden können, trotz der erwarteten starken Zunahmen des Luft- und Seeverkehrs. Alle Zielwerte sind zudem als Vorschläge zu verstehen. Unabhängig davon muss aber klar festgestellt werden, dass ambitionierte sektorübergreifende Klimaschutzziele mit Treibhausgasminderungen über 90 % nur mit einem nahezu treibhausgasneutralen Verkehr möglich ist – unabhängig davon, ob der internationale Verkehr einbezogen wird oder nicht. Je höher damit der sekttorübergreifende Zielwert ist, desto zwingender ist es, auch für den Verkehr ein sektorspezifisches Ziel festzulegen.

4 Methodischer und inhaltlicher Rahmen der Szenarienerstellung

4.1 Fahrzeugtechniken und Energieträger

4.1.1 Beschreibung und Diskussion der Optionen

4.1.1.1 Pkw und leichte Nutzfahrzeuge

Bei den Pkw und leichten Nutzfahrzeugen stehen verschiedene technischen Optionen für zukünftige Antriebe zur Verfügung. Die Fahrzeugkonzepte lassen sich unterteilen in Fahrzeuge mit

- reinem Verbrennungsmotor (ICE)
- Fahrzeuge mit reinem Elektromotor (E-Kfz)
- Kombination aus Verbrennungs- und Elektromotor (Hybride)

Zusätzlich lassen sich die Fahrzeugkonzepte über die verwendbaren Energieträger und den Grad der Elektrifizierung bei Hybridfahrzeugen unterscheiden.

Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor

Verbrennungsmotoren nutzen als Basis chemische Energieträger, deren Energie über einen Wärmekraft-Prozess in Vortrieb und Energie für die Nebenverbraucher umgewandelt wird. Für Pkw-Antriebe haben sich die Bauformen Otto- und Dieselmotor durchgesetzt. Wesentliches Unterscheidungsmerkmal dieser beiden Antriebe ist die Art der Zündung. Bei Dieselmotoren entzündet sich das Treibstoff-Luft-Gemisch im Brennraum selbständig durch eine entsprechend hohe Verdichtung. Bei Ottomotoren wird das Gemisch extern gezündet, da die maximale Klopffestigkeit des Energieträgers eine entsprechende Verdichtung verhindert. Sie weisen im Allgemeinen einen niedrigeren Wirkungsgrad als Dieselmotoren auf.

Ottomotoren können neben dem Betrieb mit Benzin auch für den Betrieb mit Flüssiggas (LPG) oder mit Erdgas (CNG) ausgelegt werden. Aufgrund des im Verhältnis zum Heizwert geringeren Kohlenstoff-Anteils von Erdgas im Verhältnis zu Benzin, können mit CNG betriebene Fahrzeuge theoretisch günstigere Werte in den Treibhausgasemissionen und bei den Luftschadstoffen als Benzinfahrzeuge erreichen. Inwieweit dieses Potenzial realisiert wird, hängt dabei unter anderem von der Auslegung des Fahrzeugs und dem Entwicklungsstand des Motors ab.

Verbrennungsmotoren können über den Lebenszyklus des Kraftstoffes quasi THG-neutral betrieben werden, wenn die Kraftstoffe aus EE-Strom produziert werden und CO_2 über die Atmosphäre im Kreis geführt wird.

Fahrzeuge mit Elektromotor

Der Elektromotor besitzt gegenüber dem Verbrennungsmotor folgende Vorteile:

- höherer Wirkungsgrad
- (lokal) emissionsfreier und geräuscharmer Betrieb
- Energierückspeisung beim Bremsen möglich
- geringer Wartungsaufwand
- gleichmäßige Drehmoment- und Kraftverläufe [Hering et al., 2012]

Den Vorteilen steht die Problematik entgegen, elektrischen Strom in mobilen Anwendungen zur Verfügung zu stellen. Lösungsansätze sind dazu bei Pkw die Verwendung von Batterien und die „on-board“ Erzeugung von Strom mittels Brennstoffzelle aus einem synthetischen Energieträger.

Im **Batteriefahrzeug (BEV)** wird der für den Betrieb der Traktionsmotoren benötigte elektrische Strom in Batterien gespeichert. Wesentliche Vorteile sind der hohe Wirkungsgrad des Antriebskonzeptes und der einfache und nahezu wartungsfreie Systemaufbau, welcher im wesentlichem aus den Komponenten Energiespeicher, Elektromotor und Steuergeräten besteht [Wallentowitz, Freialdenhoven, 2010].

Im Vergleich zu chemischen Energieträgern besitzen Batterien nur eine sehr geringe Energiedichte und sind im Verhältnis zur mitgeführten Energie aktuell deutlich teurer. Wesentlich für den Erfolg von BEV werden daher die Fortschritte in der Batterietechnologie, sowohl die Kosten, als auch die Energiedichte betreffend, sein [Kleine-Möllhoff et al., 2012]. Daneben ist die Minimierung des Energieverbrauchs, sowohl durch die Minderung der Fahrwiderstände als auch durch effizientere Nebenverbraucher für den Erfolg der BEV relevant.

Zum 1. Januar 2015 waren in Deutschland 18.948 BEV zugelassen[17]. Der Anteil an der gesamten Fahrzeugflotte von 44,4 Millionen Pkw liegt damit bei 0,04 %.

Brennstoffzellen-Fahrzeuge (FCEV) werden ebenso wie BEV rein von Elektromotoren angetrieben. Die Energie wird dabei in Form von Wasserstoff in Drucktanks gespeichert, und mittels einer Brennstoffzelle in elektrischen Strom umgewandelt. Neben der Brennstoffzelle werden zudem Batterien oder hochkapazitive Kondensatoren (Supercaps) zur Überbrückung von kurzfristigen Spitzenlastanforderungen und zur Aufnahme von Rekuperationsenergie eingesetzt.

Gegenüber einem reinen Batteriefahrzeug ergeben sich dadurch die Vorteile der deutlich höheren Energiedichte des komprimierten Wasserstoffs im Vergleich zur Li-Ionen-Batterie und des schnellen Tankvorgangs. Nachteilig sind der Effizienzverlust durch den zusätzlichen Umwandlungsschritt der Energie, der komplexere Systemaufbau und die bisher nicht verfügbare Wasserstoff-Infrastruktur. Wesentlich für eine erfolgreiche Marktdurchdringung werden daher der Aufbau der Wasserstoff-Infrastruktur und die Preisentwicklung der Brennstoffzelle sein.

Hybrid-Konzepte

Die Idee hinter Elektro-Hybriden ist es die Vorteile von Verbrennungsmotorkonzepten und Konzepten mit Elektromotor zu verbinden. Hybridkonzepte im Pkw werden zudem als schrittweise Strategie hin zum reinen Elektrofahrzeug verstanden.

Ein Hybridfahrzeug besitzt per Definition mindestens zwei Energiespeicher und zwei Energiewandler. Dabei sind die Energiewandler der Verbrennungsmotor und der Elektromotor und die Energiespeicher der Tank und die Batterie. Unterschiede zwischen den Hybridkonzepten liegen dabei insbesondere in

- der Motorauslegung, insb. dem Verhältnis der Leistung zwischen Verbrennungs- und E-Motor
- der Anordnung der Antriebskomponenten
- der rein elektrisch fahrbaren Reichweite (falls möglich) und
- der Möglichkeit extern elektrischen Strom zu laden

Voll-Hybride Fahrzeugkonzepte (HEV) zielen darauf ab, die Nachteile des Verbrennungsmotors im Teillastbetrieb zu kompensieren, der Verbrennungsmotor hat dabei eine deutlich höhere Spitzenleistung als der E-Motor. Beide Motoren sind mechanisch über das Getriebe mit den Rädern verbunden

[17] Jährliche Statistik zum Pkw-Bestand nach Antriebsarten auf der Website des Kraftfahrbundesamtes verfügbar (http://www.kba.de/DE/Home/home_node.html) (aufgerufen am 18.9.2015)

(Parallel-Hybrid), es ist dabei nicht vorgesehen, größere Strecken rein elektrisch zu fahren. Wesentliches Differenzierungsmerkmal zu den Hybridvarianten mit höheren Elektrifizierungsgrad (PHEV, REEV) ist, dass keine Möglichkeit besteht, externen Strom zu laden.

Plug-in Hybrid-Fahrzeuge (PHEV) und Range-Extender-elektrische Fahrzeuge (REEV) können mit elektrischem Strom aus dem Netz betankt werden und erlauben eine gewisse Strecke im rein elektrischen Betrieb zurück zu legen. Dies wird neben einem leistungsfähigeren E-Motor insbesondere durch eine Batterie mit höherer Kapazität gegenüber den HEV erreicht. Die große Batterie und der komplexe Systemaufbau führen zu einem Mehrgewicht, dass die Effizienzvorteile durch die Kombination der Motorentypen teilweise kompensieren. Der Hauptvorteil der Fahrzeuge liegt daher in der Möglichkeit des rein elektrischen Betriebs.

4.1.1.2 Lkw

Beim Straßengüterverkehr sind je nach Einsatzart und Fahrzeuggröße unterschiedliche Techniken sinnvoll verwendbar.

Bei kleinen Lkw (insbesondere kleiner 12 t zulässiges Gesamtgewicht) und Fahrzeugen für den Nahbereich sind prinzipiell die gleichen Techniken wie bei Pkw und LNF einsetzbar. Große Lkw im Fernverkehr benötigen dagegen Antriebskonzepte, die eine hohe Leistung über einen langen Zeitraum ohne Halt erbringen können. Dabei stehen folgende technologische Optionen für einen THG-armen Straßengüterfernverkehr zur Verfügung:

- mit PtL-Kraftstoffen betriebene Diesel-Lkw,
- mit PtG-Kraftstoffen betriebene CNG/LNG bzw. als Dual-Fuel-Fahrzeuge ausgelegte Lkw,
- mit PtG-Wasserstoff betriebene Brennstoffzelle-Elektro-Lkw
- mit Strom/PtL betriebene Oberleitungs-Hybrid-Lkw

Im Folgenden werden die verschiedenen Konzepte mit ihren spezifischen Eigenschaften dargestellt. Soll eine wesentliche Reduktion der THG-Reduktionen erreicht werden, ist dabei die Verwendung von aus erneuerbarem Strom erzeugten Energieträgern notwendig. Da für die THG-Wirkung die Summe der Emissionen im Zeitverlauf entscheidend ist, sind neben der THG-Reduktion in einem System mit **sehr hohem Anteil EE-Strom** (Gesamtenergiesystem inklusive Kraftstoffe) auch die Emissionen auf dem Pfad dorthin entscheidend für die Begrenzung des Klimawandels (siehe Kapitel 3.2). Dabei ist der **Transformationspfad** insbesondere aufgrund der folgenden Punkte relevant für die Beurteilung der technischen Optionen:

- Im Sinne der Minimierung der Summe der THG-Emissionen ist zunächst der vorhandene EE-Strom möglichst dort einzusetzen, wo mit seinem Einsatz eine hohe marginale Minderung der THG-Emissionen erreicht werden kann. Hier sollte der Fokus auf Anwendung mit hoher Effizienz (z.B. direkte Stromnutzung) liegen.
- Andererseits sind technologische Pfade rechtzeitig anzustoßen, bis sie eine hohe Marktdurchdringung und damit die für das Zielsystem notwendige THG-Minderung ermöglichen können.

Nachfolgend werden die zentralen Eigenschaften der Antriebstechniken sowohl im Zielsystem als auch während des Transformationspfades dargestellt. Wesentliche Punkte sind dabei:

- die Energieeffizienz, sowohl bei der Herstellung und Verteilung der Energieträger (WtT), als auch bei der Erbringung der Transportleistung (TtW)
- die Kosten der Fahrzeuge und der Aufwand bzw. die Kosten der Energieträgerbereitstellung, z.B. für notwendige Infrastrukturinvestitionen oder den Transport der Energieträger
- Direkte Emissionen von Luftschadstoffen und Lärm

- Synergien mit weiteren Technologien/Verkehrssektoren, z.B. die Übertragbarkeit von F&E auf weitere Anwendungen, Kostensenkungspotenziale durch anwendungsübergreifende Skaleneffekte oder die Mitbenutzung von Infrastruktur durch andere Nutzer (z.B. Pkw, Busse)
- Beitrag zur Sektorkopplung, insbesondere die Fähigkeit durch flexible Steuerung des Verbrauchs bzw. Zwischenspeicherung von Strom zur Integration des fluktuierenden EE-Strom in das Gesamtenergiesystem beizutragen

Diesel-Lkw

Der Dieselmotor ist heute der am weitesten verbreitete und kostengünstigste Antrieb bei den SNF. Durch die hohe Energiedichte des Dieselkraftstoffes sind sehr hohe Reichweiten möglich. Potenziale zur Steigerung der Energieeffizienz der Fahrzeuge sind in [ifeu/TU Graz, 2015] diskutiert.

Tabelle 20: Allgemeine Eigenschaften Diesel-Lkw

Aspekt	Zentrale Eigenschaften
Tank-to-Wheel (TtW)-Energieeffizienz	▸ Verbrennungsmotor (Selbstzünder) Wirkungsgrad (ARTEMIS-Zyklus): 40 % (Stand 2010) – 45 % (Potenzial) [TU Wien, 2011]; Komplexere Kraftübertragung (Getriebe und Differential) zum Rad als bei Elektromotoren bedeutet zusätzlicher Übertragungsverlust ▸ Mit Hybridisierung signifikante Verbrauchsverbesserungen gegenüber heutigem technischen Stand möglich [TU Wien, 2011]
Kosten Fahrzeuge	▸ strengere Abgasgrenzwerte führen zu höherer Systemkomplexität und steigenden Kosten ▸ Vergleichsweise geringe F&E-Kosten für Fahrzeuge (ausgereifte Technik, aber Hybridisierung zur Effizienzsteigerung notwendig)
Luftschadstoffe/ Lärm	▸ Emissionen von Luftschadstoffen problematisch, Trade-off der Nachbehandlungssysteme zwischen Emissionsreduktion und Verbrauch
Synergien mit weiteren Techniken/ Verkehrssektoren	▸ Höchste volumetrische Energiedichte der betrachteten Energieträgeroptionen erlaubt universelle Verwendung (einfache Adaption auf PtL auch im Luftverkehr/ Seeschifffahrt)

Der Vorteil in der Weiterverwendung der Diesel-Lkw auch in einem THG-armen Energiesystem liegt insbesondere darin, dass auf eine weltweit vorhandene Infrastruktur und Fahrzeugtechnik zurückgegriffen werden kann. Demgegenüber steht ein hoher EE-Bedarf durch die im Verhältnis zu anderen Optionen niedrige WtW-Effizienz bei der Verwendung strombasierter Kraftstoffe. Die obere Grenze der angegebenen WtT-Wirkungsgrade wird dabei bei der Nutzung von Kohlenstoff aus konzentrierten Quellen zur Kraftstoffherstellung erreicht, welche in einem THG-armen System nur begrenzt zur Verfügung stehen [Öko-Institut, 2013c].

Tabelle 21: Eigenschaften Diesel-Lkw in einem THG-armen Energiesystem

Aspekt	Zentrale Eigenschaften
Well-to-Tank (WtT)-Energieeffizienz	▸ Aktuelle Wirkungsgrade [DLR et al., 2014]: 35-45 % ▸ Perspektivische Wirkungsgrade [Öko-Institut, 2014a]: 38-48 %
Aufwand/ Kosten Energieträgerbereitstellung	▸ Höchster Herstellungsaufwand aller stromgenerierter Kraftstoffe ▸ Beste Eignung zum Transport auch über weite Distanzen
Systemdienliche Eigenschaften	▸ Hohe Lastflexibilität bei Niedertemperatur-Elektrolyse

Aufgrund des hohen EE-Bedarfs werden voraussichtlich erst langfristig (nach 2035) große Mengen EE-PtL verfügbar sein, so dass bis dahin die Effizienzsteigerung die zentrale technische Strategie zur THG-Minderung in diesem Technikpfad ist. Werden bis zur Substitution von Diesel durch PtL größere Mengen von unkonventionellen Ölen zur Herstellung von Diesel verwendet, können in der Transformationsphase deutliche THG-Mehremissionen gegenüber dem Status Quo auftreten.

Tabelle 22: Eigenschaften Diesel-Lkw im Transformationspfad

Aspekt	Zentrale Eigenschaften
Aufwand/ Kosten Energieträgerbereitstellung	▸ kein Aufbau neuer Infrastruktur notwendig ▸ geringe Transportkosten
THG-Emissionen	▸ Unkonventionelle Öle können zu steigenden spezifischen THG-Emissionen führen
Weitere Chancen und Hemmnisse	▸ Drop-In-Fähigkeit von EE-Kraftstoffen in das heutige System, keine Änderungen bei Anwendern (z.B. Spediteuren) nötig

CNG/LNG- bzw. Dual-Fuel-Lkw

CNG/LNG-Lkw werden heute bereits eingesetzt, im großen Umfang vor allem in den USA und China. Der Vorteil von LNG gegenüber CNG liegt dabei in der höheren Energiedichte, so dass bei geringeren Tankvolumen eine höhere Reichweite realisiert werden kann. Der Nachteil liegt in höheren Kosten für den zur Speicherung des verflüssigten Gases notwendigen Kyrotank sowie in der langsamen (im Bereich von mehreren Tagen) Verdunstung des Gases bei Stillstand des Fahrzeuges.

Im Gegensatz zum Dieselmotor haben die für die Verbrennung des Gases notwendigen Ottomotoren einen etwas niedrigeren Wirkungsgrad. Diesen Nachteil umgeht das Konzept des Dual-Fuel-Motors: Hier wird zusätzlich zum Gas ein Anteil Dieselkraftstoff in die Verbrennungskammer eingespritzt, so dass eine Selbstzündung erfolgen kann. Entsprechende HPDI-Motoren erreichen mit dieser Technik den Wirkungsgrad von Diesel-Motoren, es bestehen aber Herausforderungen in der Abgasnachbehandlung. Diese Motoren sind zudem zwingend auf den Betrieb mit einem Gas/Diesel-Gemisch angewiesen.

Tabelle 23: Allgemeine Eigenschaften CNG/LNG- bzw. Dual-Fuel-Lkw

Aspekt	Zentrale Eigenschaften
Tank-to-Wheel (TtW)-Energieeffizienz	▸ Reiner Gasmotor derzeit ca. 20 % Mehrverbrauch gegenüber Diesel [ifeu, TU Graz, 2015] ▸ Perspektivisch wird eine Reduzierung dieses Mehrverbrauchs auf 10 % angenommen[18] ▸ Dual-Fuel Motoren etwa gleiche Effizienz wie Diesel-Lkw ▸ Potenzial bei Kraftübertragung und Hybridisierung analog Diesel-Lkw
Kosten Fahrzeuge	▸ Kosten für Tank höher als bei Diesel-Lkw ▸ Zwei Tanksysteme und aufwendige Abgasnachbehandlung führen zu Mehrkosten bei Dual-Fuel-Lkw ▸ Vergleichsweise geringe F&E-Kosten für Fahrzeuge (ausgereifte Technik, aber Hybridisierung zur Effizienzsteigerung notwendig)
Luftschadstoffe/ Lärm	▸ Reine Gasmotoren: Emission von Luftschadstoffen und Verbrennungsgeräusche niedriger als bei Dieselmotoren ▸ Dual-Fuel-Motoren: Abgasnachbehandlung zur NO_x und PM-Reduktion ähnlich Diesel-Lkw, zusätzlich sind Maßnahmen gegen Methanschlupf notwendig
Synergien mit weiteren Techniken/ Verkehrssektoren	▸ Wird in der Schifffahrt bereits angewendet ▸ Hohe volumetrische Energiedichte und Nutzung von Verbrennungsmotoren erlauben universelle Verwendung

Die Wirkungsgrade in der Herstellung von synthetischen Gas (EE-Methan) sind dabei etwas höher als die Herstellung von PtL. Ob im Gesamtenergiesystem der EE-Bedarf niedriger als bei der Verwendung von PtL im Dieselmotor ausfällt, ist daher insbesondere von der Minderung des Mehrverbrauchs des Gasmotors bzw. von der Verwendung von Dual-Fuel-Technik abhängig.

[18] persönliche Mitteilung M. Schuckert, Mai 2015 im Rahmen der Studie Identifizierung von Hemmnissen der Nutzung von LNG und CNG im schweren Lkw-Verkehr sowie Möglichkeiten zu deren Überwindung für die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung im Auftrag des BMVI

Tabelle 24: Eigenschaften CNG/LNG- bzw. Dual-Fuel-Lkw in einem THG-armen Energiesystem

Aspekt	Zentrale Eigenschaften
Well-to-Tank (WtT)-Energieeffizienz	▸ Aktuelle Wirkungsgrade: 40-50 % (Methan) [DLR et al., 2014] ▸ Perspektivische Wirkungsgrade: 44-53 % (Methan) [Öko-Institut, 2013c]
Aufwand/ Kosten Energieträgerbereitstellung	▸ Mittlerer Herstellungs- und Verteilaufwand zwischen EE-Diesel und EE-H2 ▸ Nationales Verteilnetz besteht in weiten Teilen ▸ Bei Dual-Fuel-Technik parallele Tankstellen- und Verteilinfrastruktur für PtG und PtL nötig
Systemdienliche Eigenschaften	▸ Hohe Lastflexibilität bei Niedertemperatur-Elektrolyse

Weltweit gesehen sind zentrale Treiber für die Verwendung von CNG/LNG-Lkw derzeit günstige Preise für CNG, die Diversifizierung der Energiebasis für den Straßengüterverkehr und die Verwendung von inländische Ressourcen (insbesondere USA, China). Bezüglich der THG-Minderungen ist das Potenzial bei der Verwendung von fossilen Quellen begrenzt [ifeu/TU Graz, 2015], eine Umstellung auf strombasierte Kraftstoffe ist aber ebenso wie bei der Verwendung von Diesel-Lkw als Drop-In-Lösung ohne zusätzliche Änderungen bei den Fahrzeug- und der Energiebereitstellunginfrastruktur möglich.

Tabelle 25: Eigenschaften CNG/LNG- bzw. Dual-Fuel-Lkw im Transformationspfad

Aspekt	Zentrale Eigenschaften
Aufwand/ Kosten Energieträgerbereitstellung	▸ Für fossiles Erdgas werden mittelfristig deutlich niedrigere Preise als für Diesel erwartet (Öko-Institut & FH ISI, 2014, S.64) ▸ Treiber für aktuelle Aufmerksamkeit, v.a. in USA/China ▸ Tankstellennetz (zumindest an Autobahnen, Betriebshöfe) muss neu aufgebaut werden
THG-Emissionen	▸ Bei Verwendung von konventionellen Erdgas vergleichbare (perspektivisch leicht bessere) THG-Emissionen im Vergleich mit Diesel-Lkw ▸ Methanschlupf kann THG-Bilanz signifikant verschlechtern
Weitere Chancen und Hemmnisse	▸ Dual-Fuel benötigt noch relevanten Dieselanteil im Kraftstoffgemisch (je nach Lastzyklus und Technik ca. 5-40 %) ▸ Einführung nur im Verbund mit angrenzenden Ländern sinnvoll (ansonsten fehlende Flexibilität hohes Hemmnis für Spediteure)

Wasserstoff/ Brennstoffzelle (BZ)-Lkw

Fern-Lkw werden sowohl mit komprimierten als auch mit verflüssigtem Wasserstoff diskutiert. BZ-Lkw existieren derzeit nur in Form von Prototypen. Die Energiedichte des gespeicherten Wasserstoffs erlaubt zwar, insbesondere in flüssiger Form, eine ausreichende Reichweite für die Anwendung im Fern-Lkw, Herausforderungen bestehen aber in den Kosten, der Verwendung von seltenen Materia-

lien und in der Haltbarkeit der Brennstoffzellen. Wesentlich im Vergleich zu den Verbrennungsmotorkonzepten sind die höhere Effizienz sowie die Vermeidung direkter Emissionen.

Tabelle 26: Allgemeine Eigenschaften Brennstoffzellen-Lkw

Aspekt	Zentrale Eigenschaften
Tank-to-Wheel (TtW)-Energieeffizienz	▸ Wirkungsgrad bei etwa 50-60 % [CE Delft, 2013]
Kosten Fahrzeuge	▸ Kosten für die Brennstoffzelle bei heutigem Stand führen zu deutlich höheren Fahrzeugkosten als bei Diesel-Lkw ▸ Begrenzte Lebensdauer der Brennstoffzelle kann Austausch notwendig machen ▸ signifikante Kostendegression durch Massenfertigung erwartet (z.B. [CE Delft, 2013], [McKinsey, 2010])
Luftschadstoffe/ Lärm	▸ Keine Luftschadstoff-Emissionen im Abgas ▸ signifikant geringerer Lärm bei Beschleunigungsvorgängen und Fahrten bis ca. 50 km/h
Synergien mit weiteren Techniken/ Verkehrssektoren	▸ Ko-Nutzung der Infrastruktur mit wasserstoffbetriebenen Bussen und (in Teilen) auch Pkw möglich ▸ Entwicklungssynergien mit Elektrofahrzeugen, z.B. Hybridisierung, BZ-Range Extender

Durch die sowohl bei WtT- als auch TtW-Betrachtung höhere Effizienz des Wasserstoff-Brennstoffzellen-Pfades wird über die gesamte Wirkungskette gegenüber den Verbrennungsmotorkonzepten eine Minderung des EE-Bedarfes um etwa den Faktor zwei erreicht.

Tabelle 27: Eigenschaften Brennstoffzellen-Lkw in einem THG-armen System

Aspekt	Zentrale Eigenschaften
Well-to-Tank (WtT)-Energieeffizienz	▸ Aktuelle Wirkungsgrade: 58 % (H_2 als CGH_2) [DLR et al., 2014] ▸ Perspektivische Wirkungsgerade: 59-61 % [Öko-Institut, 2013c]
Aufwand/ Kosten Energieträgerbereitstellung	▸ Höhere Energieeffizienz in der Herstellung und weniger Prozessstufen lassen die geringsten Herstellungskosten aller PtG/PtL-Optionen erwarten ▸ höchster Transportaufwand, da niedrigste Energiedichte, der betrachteten PtG/PtL-Optionen
systemdienliche Eigenschaften	▸ Hohe Lastflexibilität bei Niedertemperatur-Elektrolyse

Wesentlicher Unterschied im Transformationspfad zu den Verbrennungsmotorkonzepten ist, dass die Konversion nicht von vorhandenen fossilen Kraftstoffen aus starten kann. Eine eigene Infrastruktur für mit Wasserstoff betriebene Fahrzeuge muss aufgebaut werden (z.B. Tankstellen). Für eine erfolg-

reiche Etablierung der Technik auf Antriebsseite, ist aber kurzfristig ein Rückgriff auf zumindest teilweise fossil hergestellten Wasserstoff (z.B. aus Erdgasdampfreformierung) kaum zu vermeiden.

Tabelle 28: Eigenschaften Brennstoffzellen-Lkw im Transformationspfad

Aspekt	Zentrale Eigenschaften
Aufwand/ Kosten Energieträgerbereitstellung	▸ Herstellungskapazitäten für Energieträger muss (auch bei der Verwendung von fossilen Quellen) neu aufgebaut werden ▸ Tankstellennetz (zumindest an Autobahnen, Betriebshöfe) muss neu aufgebaut werden, geringere Reichweiten erfordern zudem ein dichteres Tankstellennetz als bei den Vergleichsoptionen ▸ Bei Verwendung von fossilen Quellen höherer Herstellungsaufwand als bei der direkten Verwendung der fossilen Kraftstoffe ▸ niedrigere Energiedichte als fossile Kraftstoffe führt zu höheren Transportaufwänden
THG-Emissionen	▸ Bei der Verwendung von CNG als fossile Primärenergiequelle etwas schlechtere THG-Bilanz als Diesel-Lkw
Weitere Chancen und Hemmnisse	▸ BZ-Lkw sind unter den verkehrlichen BZ-Anwendungen am wenigsten entwickelt ▸ Weitere F&E-Aufwendungen notwendig in Verbindung mit Massenfertigung (z.B. Lebensdauer Brennstoffzelle, verwendete Materialien) ▸ Einführung nur im Verbund mit angrenzenden Ländern sinnvoll (ansonsten fehlende Flexibilität hohes Hemmnis für Spediteure)

Oberleitungs-Hybrid (OH)-Lkw

Die Nutzung von Oberleitungssystemen zur direkten Versorgung von Fahrzeugen mit hohem Energiebedarf, ohne die Notwendigkeit von Batterien, ist eine im Stadtverkehr bei Bussen erprobte Technik und wird beispielsweise in Solingen seit den 1950er Jahren eingesetzt. Diese Technik könnte auf SNF im Fernverkehr übertragen werden. Im Fokus steht dabei die Autobahnfahrleistung von schweren Fernverkehrs-Nutzfahrzeugen, insbesondere Sattelzügen. Dazu sind infrastrukturseitig Oberleitungen, zumindest auf besonders stark von der Nutzergruppe frequentierten Autobahnabschnitten, und fahrzeugseitig Pantographen (Stromabnehmer) zu installieren. Die Fahrzeuge sollen dabei, entsprechend der Diskussion in ENUBA [Siemens/TU Dresden]bzw. der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie (MKS)[19], als Diesel/elektrische Hybrid-Oberleitungsfahrzeuge ausgeführt werden. Es wird aber auch die Kombination von Oberleitungsfahrzeugen mit Batterieversorgung für die nicht-elektrifizierten Strecken diskutiert. Diese werden z.B. in [CE Delft, 2013] untersucht. Ebenso wie BZ-Lkw befinden sich OH -Lkw momentan in der Entwicklungs-bzw. Forschungsphase.

[19] Siehe http://www.bmvi.de/DE/VerkehrUndMobilitaet/DigitalUndMobil/MKStrategie/mobilitaets-und-kraftstoffstrategie_node.html (aufgerufen am 20.1.2016)

Tabelle 29: Allgemeine Eigenschaften von OH-Lkw

Aspekt	Zentrale Eigenschaften
Tank-to-Wheel (TtW)-Energieeffizienz	▸ Elektromotor ca. 85 % [TU Wien, 2011]
Kosten Fahrzeuge	▸ Kosten für Pantograph werden langfristig auf 10.000 € geschätzt [CE Delft, 2013] ▸ strengere Abgasgrenzwerte führen zu höherer Systemkomplexität und steigenden Kosten bei OH-Diesel-Lkw ▸ Batterien führen zu höheren Kosten bei OH-Batterie-Lkw, aber (teilweise) Kompensation durch den wegfallenden Verbrennungsmotor
Luftschadstoffe/ Lärm	▸ Emissionen von Luftschadstoffen im Dieselbetrieb problematisch
Synergien mit weiteren Techniken/ Verkehrssektoren	▸ Einsatz abhängig von spezifischer Infrastruktur, daher beschränkte Nutzergruppe ▸ Mitbenutzung der Infrastruktur durch (Fernlinien-)Busse denkbar

Aufgrund der direkten Stromverwendung ist bei der Verwendung von EE-Strom der Wirkungsgrad von der Primär- zur Nutzenergie im Vergleich mit dem Einsatz von strombasierten EE-Kraftstoffen in Verbrennungsmotorkonzepten um etwa den Faktor vier höher. Dies führt zu einem entsprechend geringeren Bedarf an EE-Kapazitäten. Der OH-Lkw bietet dabei weniger Flexibilität für das Stromsystem als Elektrolyseure zur Herstellung von PtG/PtL (falls diese Elektrolyseure im inländischen bzw. europäischen Stromsystem integriert sind). Daher ist ein höherer Bedarf an sonstigen Speichern bzw. eine höhere Flexibilität von weiteren Verbrauchern zur Integration des fluktuierenden EE-Stroms notwendig [Fraunhofer IWES et al., 2015].

Tabelle 30: Eigenschaften von OH-Lkw in einem THG-armen System

Aspekt	Zentrale Eigenschaften
Well-to-Tank (WtT)-Energieeffizienz	▸ Umspannung und Übertragung über Oberleitungen 70-80 %
Aufwand/ Kosten Energieträgerbereitstellung	▸ Evtl. Stärkung von Übertragungsnetzen an Autobahnen notwendig
systemdienliche Eigenschaften	▸ In der Regel keine Flexibilität ▸ Bei OH-Diesel-Hybrid ist ein Lastabwurf und Verwendung des Verbrennungsmotors denkbar

Wesentliches Hemmnis zur Einführung des OH-Lkw ist der Aufbau der Infrastruktur, da erst bei einer hohen Abdeckung des (europäischen) Autobahnnetzes die Flexibilität in der Nutzung für die Spediteure gegeben ist.

Tabelle 31: Eigenschaften von OH-Lkw im Transformationspfade

Aspekt	Zentrale Eigenschaften
Aufwand/ Kosten Energieträgerbereitstellung	▸ Oberleitungsinfrastruktur muss neu aufgebaut werden
THG-Emissionen	▸ Durch hohe Effizienz in der Stromverwendung bereits kurz- bis mittelfristig bessere THG-Bilanz als Diesel-Lkw (trotz Strommix)
Weitere Chancen und Hemmnisse	▸ Weitere F&E-Aufwendungen notwendig ▸ Hohe Infrastrukturkosten hemmen Einführung ▸ Einführung nur im Verbund mit angrenzenden Ländern sinnvoll (ansonsten fehlende Flexibilität hohes Hemmnis für Spediteure)

4.1.1.3 Auswahl der Techniken und Energieträger in den Szenarien

Antriebstechniken

In dieser Studie steht die Bewertung der Antriebstechniken nicht im Mittelpunkt der Betrachtung. Daher muss für die Szenarien eine Vorauswahl getroffen werden. Für die Technologieauswahl in den Szenarien werden, auf Grundlage der Studie [UBA, 2015] folgende Annahmen getroffen:

Pkw, LNF und kleine Lkw:

- **Alle Szenarien:** Bevorzugte Technologie der Zukunft sind batterieelektrische (BEV) und Plug-in-Hybrid-(PHEV) Fahrzeuge. Diese kommen nach 2015 verstärkt in den Markt und dominieren nach 2050 die Zulassungen[20]. Daneben werden Nischen für Brennstoffzellenfahrzeuge berücksichtigt. Es dominieren weiterhin Verbrennungsmotoren mit Flüssigkraftstoffen. Gasfahrzeuge (CNG und LPG) bleiben eine Nische.

Schwere Nutzfahrzeuge und Busse:

- **Referenz und Klimaschutzszenario:** Es werden weiterhin Fahrzeuge mit Dieselmotor eingesetzt. Eine Entscheidung für eine bestimmte Technik kann nach den Erkenntnissen der Studie [UBA, 2015] derzeit nicht getroffen werden. Nischenflotten mit Brennstoffzelle und LNG-Antrieb werden zusätzlich berücksichtigt.
- **Variante Klimaschutz E+:** Es wird angenommen, dass der Fernverkehr mit Lkw zu großen Teilen auf OH-Lkw umgestellt wird.

Die Umsetzung der Annahmen im Modell ist in Kapitel 4.1.2.2 beschrieben.

Energieträger

- **Referenzszenario:** Im Referenzszenario werden weiterhin konventionelle Kraftstoffe aus fossilen Quellen und aus Bioenergieträgern verwendet. Die Stromerzeugung wird bis zum Jahr 2050 nahezu vollständig auf erneuerbare Energien umgestellt.

[20] Im Szenario Klimaschutz E+ wird eine gegenüber den anderen Szenarien nochmals verstärkte Einführung von Elektro-Pkw bis 2030 angenommen.

- **Klimaschutzszenario und Variante Klimaschutz E+:** Im Klimaschutzszenario wird ab 2030 eine zunehmend THG-arme Energieversorgung im Verkehr realisiert, die durch eine Umstellung auf EE-PtG/PtL-Kraftstoffe realisiert wird.

Eine detailliertere Beschreibung der Annahmen sowie deren Umsetzung erfolgt in Kapitel 4.2.

4.1.1.4 Übrige Verkehrsträger

Bei den übrigen Verkehrsträgern werden in den Szenarien keine alternativen Techniken angenommen. Die geforderte THG-Neutralität wird hier durch Umstellung auf EE-PtG/PtL-Kraftstoffe erreicht. Ob diese EE-PtG/PtL-Kraftstoffe für den Betrieb von Binnenschiffen und nicht-elektrischen Bahnen zukünftig auch mehr Anteile an LNG, CNG oder Wasserstoff enthalten werden, ist für die Ergebnisse der Szenarienrechnung aufgrund ihres geringen Anteils an der Verkehrsleistung nicht relevant.

Beim Flugverkehr wird weiterhin die Nutzung von Kerosin als Kraftstoff angenommen. Der internationale Seeverkehr wird nachrichtlich mitgeführt. Obwohl eine Umstellung von den bisher genutzten Schwerölen auf andere Kraftstoffe wahrscheinlich ist, werden hier keine konkreten Annahmen getroffen. Eine THG-Neutralität wird ebenfalls durch Umstellung auf PtL-Kraftstoffe angenommen.

4.1.2 Umsetzung der Technikannahmen in den Szenarien

In der Szenarienmodellierung müssen für die betrachteten Techniken für die Energie- und Emissionsberechnung verschiedene Eigenschaften und Aktivitätsdaten festgelegt werden. Dies sind vor allem:

- Annahmen zu den Neuzulassungen
- Annahmen zu den Fahrzeugaktivitäten (Fahrleistungen, Fahrprofile)
- Annahmen zum spezifischen Energieverbrauch und den Emissionsfaktoren je Fahrprofil.

Diese grundsätzlichen Annahmen und ihre Umsetzung im Modell werden in den folgenden Unterkapiteln beschrieben.

4.1.2.1 Modellierung in TREMOD

Am ifeu wird seit 1993 das **Tr**ansport-**Em**issions-**Mod**ell TREMOD im Auftrag des Umweltbundesamtes entwickelt, welches auch für die offiziellen Berichtspflichten der Bundesregierung eingesetzt wird. Das Modell ist umfänglich in [ifeu, 2014a] dokumentiert.

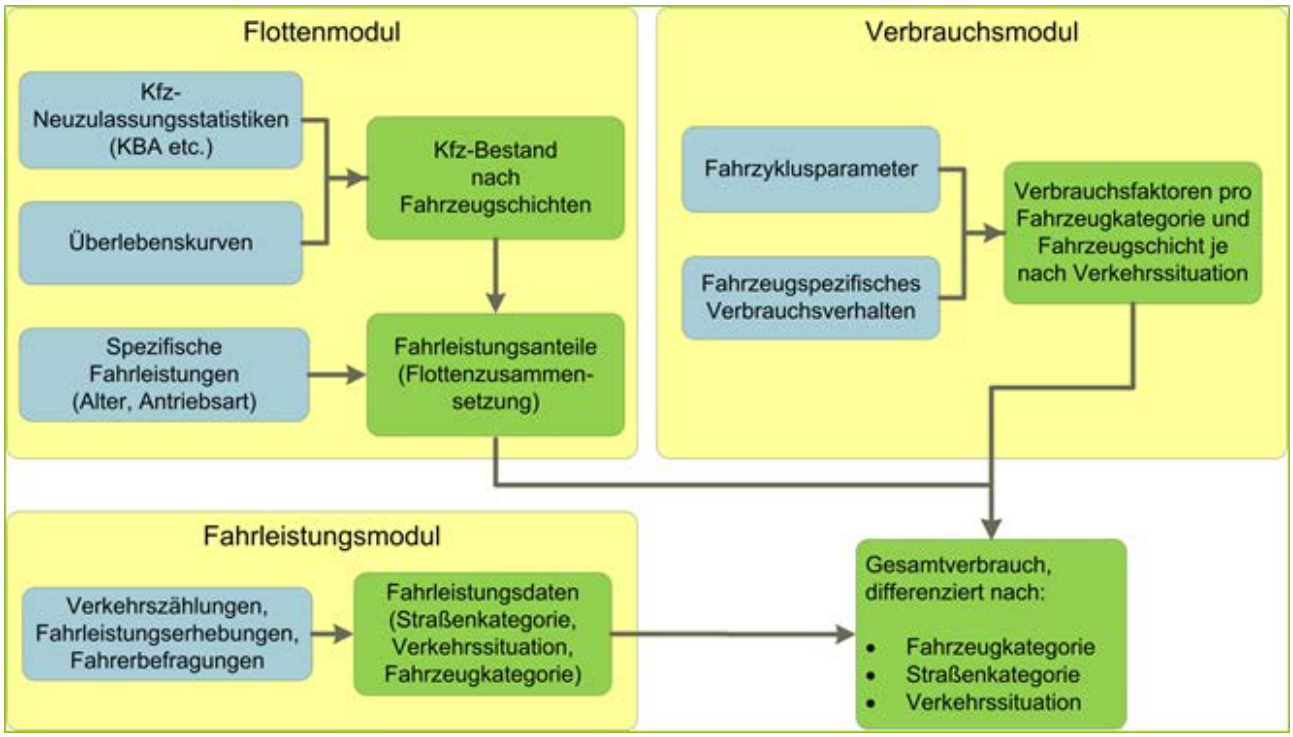
In TREMOD wird der Energieverbrauch aller in Deutschland betriebenen Personenverkehrsträger (Pkw, motorisierte Zweiräder, Busse, Bahnen, Schiffe, Flugzeuge) und Güterverkehrsträger (Lkw und Zugmaschinen, Bahnen, Schiffe, Flugzeuge) sowie der sonstige Kfz-Verkehr seit dem Basisjahr 1960 erfasst. Der Verbrauch und die Emissionen im Straßenverkehr werden dabei für jedes Bezugsjahr in folgenden Teilschritten berechnet:

a) Aufbereitung des Fahrzeugbestands und dessen Fahrleistungsverteilung nach verbrauchs- und emissionsrelevanten Fahrzeugschichten und Fahrzeugalter für jede Fahrzeugkategorie.
b) Aufteilung der Jahresfahrleistung auf die Straßenkategorien und Verkehrssituationen je Fahrzeugkategorie.
c) Aufbereitung der Verbrauchs- und Emissionsfaktoren für jede relevante Fahrzeugschicht und Verkehrssituation.

Abschließend werden die Teilergebnisse verknüpft und der jährliche Energieverbrauch sowie die Emissionen sowohl für den Straßenverkehr insgesamt als auch für alle gewünschten Aufteilungen und Aggregationen berechnet.

Die folgende Abbildung gibt einen Überblick über den Ablauf der Berechnung. Nachfolgend sind die wichtigsten Zwischenschritte sowie die zur Berechnung benötigten Eingangsdaten näher erläutert.

Abbildung 17: Berechnungsablauf von Verbrauch und Emissionen des Straßenverkehrs in TREMOD



Fahrzeugbestand und Flottenzusammensetzung

Bei der Aufbereitung des Fahrzeugbestands wird zwischen zwei Modi unterschieden:

- **Realdaten:** Der statistisch erfasste Fahrzeugbestand wird direkt aus einer vom KBA bereitgestellten Datenbank in die TREMOD-Struktur überführt.
- **Szenarien:** Für die Szenarienrechnung wird der zukünftige Fahrzeugbestand in der TREMOD-Struktur auf Basis von Annahmen zur Anzahl der Neuzulassungen, jeweils unterteilt nach den relevanten Fahrzeugschichten, sowie geeigneten Überlebenskurven in einem Umschichtungsmodell berechnet.

Für die Berechnung der Szenarien werden folgende Informationen je Fahrzeugkategorie und Zulassungsjahr benötigt:

- Anzahl Neuzulassungen
- Anteil der Fahrzeugsegmente (Antriebsart und Größenklasse) an den Neuzulassungen
- Anteil der Emissionsstandards an den Neuzulassungen je Fahrzeugsegment
- Überlebenskurve je Segment[21]

[21] Die Überlebenskurve gibt an, welcher Anteil der Neuzulassungen nach 1, 2 bis 30 Jahren noch im Bestand enthalten ist. Der Jahrgang 30 beinhaltet dabei auch alle älteren Fahrzeuge.

Für die TREMOD-Berechnung wird nicht der absolute Bestand verwendet, sondern die Bestandsverteilung nach Antrieb, Größenklasse, Emissionsstandard und Alter. Da für die Emissionen bzw. den Verbrauch nicht der Fahrzeugbestand, sondern dessen Fahrleistungen entscheidend sind, werden die differenzierten Bestandsanteile in Fahrleistungsanteile umgerechnet. Dabei werden verschiedene Gewichtungsfaktoren und -funktionen verwendet. Diese berücksichtigen, dass Fahrzeuge verschiedener Antriebsart, Größe und Alter unterschiedliche Jahresfahrleistungen sowohl insgesamt, als auch auf verschiedenen Straßenkategorien haben. Die resultierende Fahrleistungsverteilung wird als Flottenzusammensetzung bezeichnet.

Bei Fahrzeugkonzepten mit mehreren Antriebssträngen müssen die Fahrleistungsanteile nach Antriebsenergie angegeben werden, z.B. – bei den PHEV-Konzepten – der Fahrleistungsanteil des konventionellen und im Elektrobetrieb. Die Angabe erfolgt differenziert nach Straßenkategorien.

Gesamte Jahresfahrleistung

Die gesamte Jahresfahrleistung wird je Fahrzeugkategorie und Bezugsjahr in TREMOD vorgegeben. Zur Verknüpfung mit den Fahrleistungsanteilen (siehe voriger Abschnitt) und den Verbrauchs- und Emissionsfaktoren (siehe nachfolgenden Abschnitt) wird die Gesamtfahrleistung weiter auf Straßenkategorien (Innerorts, Außerorts, Autobahn) und innerhalb jeder Straßenkategorie auf Verkehrssituationen (z.B. freier Verkehr, Stop-and-go) sowie Längsneigungsklassen aufgeteilt. Dieser Berechnungsteil verwendet demnach je Fahrzeugkategorie und Bezugsjahr

- die Gesamtfahrleistung,
- die Anteile der Straßenkategorien an der Gesamtfahrleistung,
- die Anteile der Verkehrssituationen und Längsneigungsklassen an der Fahrleistung je Straßenkategorie.

Die Gesamtfahrleistung je Fahrzeugkategorie ist im Modell unabhängig vom Fahrzeugbestand. Die Plausibilität der sich aus der Gesamtfahrleistung und dem Bestand ergebenden mittleren Jahresfahrleistung je Fahrzeugkategorie muss im Nachgang geprüft und ggf. eine Korrektur durchgeführt werden. Eine exakte Anpassung des Fahrzeugbestands bzw. der mittleren Fahrleistung an eine gewünschte Vorgabe ist dabei nicht erforderlich, da die Verbrauchsergebnisse allein von der Höhe der Gesamtfahrleistung abhängen.

Bilanzierungsansätze in TREMOD

Verkehr im Inland

Ausgangspunkt der Bilanzierung in TREMOD ist der Verkehr innerhalb der Landesgrenzen Deutschlands. Damit werden die Emissionen bilanziert, die durch die im Inland erbrachten Fahr- und Verkehrsleistungen entstehen.

Der Verkehr im Inland ist zu unterscheiden vom Verkehr der Inländer. Dieser unterscheidet sich z. T. deutlich von der Inlandsfahrleistung, wie sie in TREMOD verwendet wird.

Energiebilanz

Für die sektorale Betrachtungsweise, die für die Berechnung des Emissionsinventars im National Inventory Report (siehe z.B. [UBA, 2014b]) verwendet wird, ist die Energiebilanz die relevante Bezugsgröße. Dieser Bilanzierungsansatz ist auch die Grundlage für die Ermittlung des verkehrlichen Energieverbrauchs in diesem Projekt.

Da eine wesentliche Aufgabe von TREMOD die Bereitstellung der Emissionskennzahlen für den National Inventory Report ist, werden hier die Inlandsergebnisse von TREMOD mit Hilfe von jährlichen

Anpassungsfaktoren so aufbereitet, dass sie mit der Energiebilanz nach [AG Energiebilanzen] übereinstimmen. Differenzen zwischen Inlandsverbrauch und Energiebilanz entstehen vor allem durch Betankungsdifferenzen („Tanktourismus“ bzw. „graue Importe“), zeitlichen Differenzen zwischen Betankung und Verbrauch und weitere Unsicherheiten auf Seiten der Modellierung (Fahrleistungen, spezifische Energieverbräuche) und der Energiebilanz (sektorale Aufteilung).

Bilanzierung in dieser Studie

In dieser Studie werden sektorübergreifende Minderungsziele diskutiert. Soweit in diesem Kontext Absolutzahlen verwendet werden, beziehen sich diese konsequenterweise auf die offiziellen Basisdaten, denen die Energiebilanz zugrunde liegt.

Die TREMOD-**Berechnungen der Szenarien** bis 2050 basieren dagegen **ausschließlich auf der Inlandsbilanz**, eine Korrektur auf die Energiebilanz findet nicht statt. Dies würde zu Inkonsistenzen in der Darstellung führen, da sich Endenergieziele und Treibhausgasziele auf verschiedene Bezugsjahre beziehen (2005 bzw. 1990), mit jeweils unterschiedlichen Anpassungsfaktoren an die Energiebilanz.[22]

4.1.2.2 Entwicklung der Fahrzeugflotten

Die Fortschreibung der Fahrzeugflotten wird in TREMOD mit Hilfe eines Umschichtungsmodells berechnet. Damit wird der zukünftige Bestand mit Hilfe von Annahmen zur Anzahl der jährlichen Neuzulassungen und Überlebenswahrscheinlichkeiten berechnet. Die Überlebenswahrscheinlichkeiten werden aus der aktuellen Fahrzeugstatistik abgeleitet.

Es muss betont werden, dass die Ergebnisse des TREMOD-Umschichtungsmodells keine Bestandsprognosen sind. Dies ist auch nicht notwendig, da in TREMOD nicht die absolute zukünftige Höhe des Fahrzeugbestands für die Ergebnisse relevant sind sondern allein die Struktur des Bestands nach verbrauchs- und emissionsrelevanten Schichten.

Bei den Pkw wird angenommen, dass die Anzahl der jährlichen Neuzulassungen in etwa dem Durchschnitt der Jahre 2000 bis 2013 entspricht, das sind 3,2 Mio. Fahrzeuge. Der Dieselanteil lag 2012 bei 48,3 %, der Benzinanteil bei 50,4 %. Alle anderen Antriebsarten zusammen hatten nur einen Anteil von 1,3 %, davon 0,6 % Hybrid-Benzin-Fahrzeuge, also Fahrzeuge ohne externe Stromversorgung.

Im Trendszenario wird unterstellt, dass der Anteil der Hybrid-Pkw, batterie-elektrischen Fahrzeugen (BEV) und Plug-in-elektrischen Fahrzeugen (PHEV) an den Neuzulassungen kontinuierlich zunehmen wird. Bis zum Jahr 2030 haben so Fahrzeuge mit externer Stromversorgung (BEV und PHEV) einen Anteil von 19 % an den Neuzulassungen, während der Anteil der konventionellen Fahrzeuge mit Benzin- und Dieselantrieb auf 52 % zurückgeht. Die restlichen Fahrzeuge sind im wesentlichen Hybride (HEV).

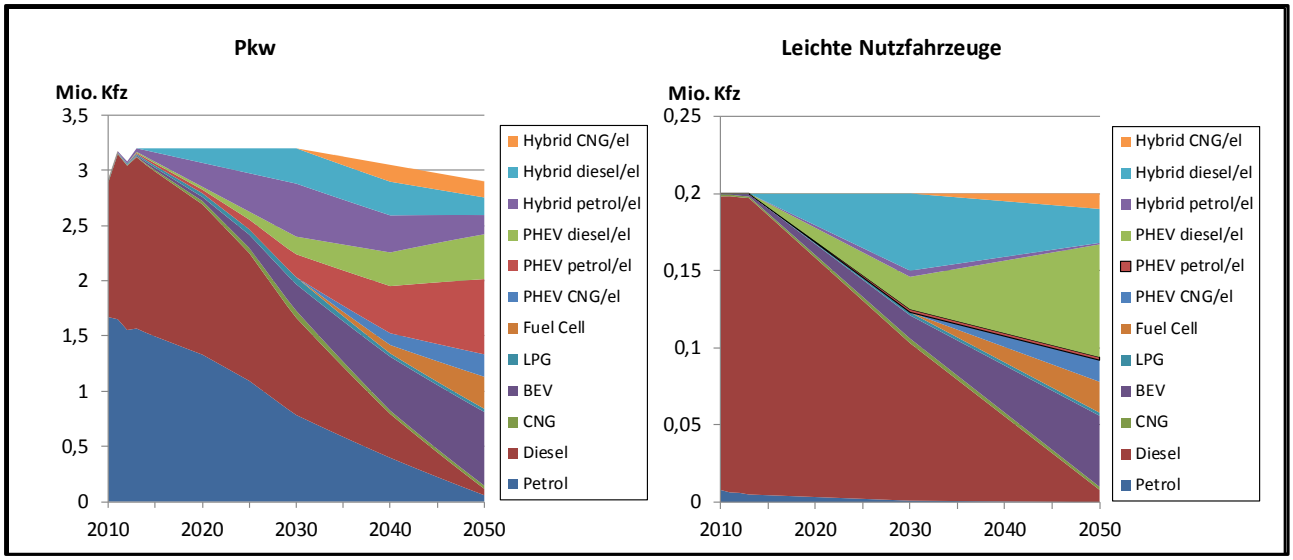
Von 2030 bis 2050 steigt der Anteil der BEV und PHEV-Fahrzeuge weiter an, so dass im Jahr 2050 nur noch sehr wenige reine Diesel- und Benzinfahrzeuge (insgesamt 15,5 % Anteil, wobei 11,5 % einen Hybridantrieb haben) zugelassen werden.

Für die Fortschreibung der Bestände der Lkw <3,5 t wird ab 2013 eine jährliche Anzahl der Neuzulassungen von 200.000 Fahrzeugen unterstellt. Wie bei den Pkw wird angenommen, dass der Anteil neuer Fahrzeugkonzepte kontinuierlich zunimmt.

---

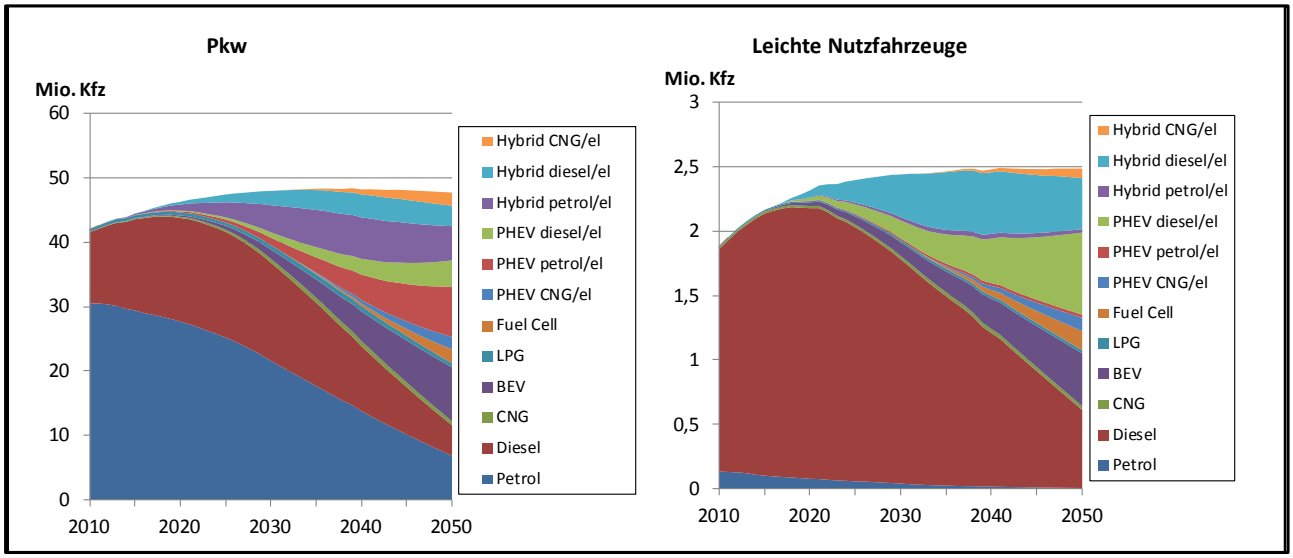
[22] 1990 war Dieselabsatz des Verkehrs nach Energiebilanz um 2 % höher als die TREMOD-Ergebnisse der Inlandsberechnung (Benzin: 5 % höher). 2005 war der Dieselabsatz nach Energiebilanz um 9 % niedriger als die Ergebnisse der Inlandsberechnung (Benzin: 7 % niedriger)

Abbildung 18: Entwicklung der Neuzulassungen bei Pkw und leichten Nutzfahrzeugen nach Antriebstechnik in den Szenarien



In der folgenden Abbildung ist die Entwicklung der Fahrzeugbestände dargestellt, die mit dem Umschichtungsmodell in TREMOD berechnet wird.

Abbildung 19: Entwicklung des Fahrzeugbestands bei Pkw und leichten Nutzfahrzeugen nach Antriebstechnik in den Szenarien

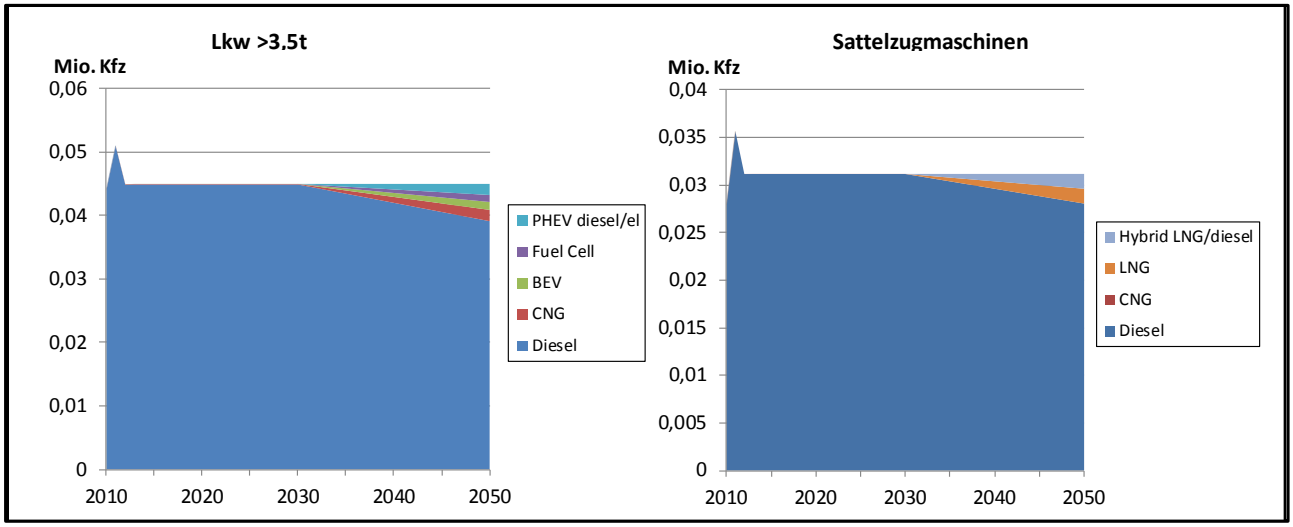


Zur Fortschreibung der Lkw-Bestände > 3,5 t wird angenommen, dass die Anzahl der Neuzulassungen ab 2013 konstant bei 45.000 Fahrzeugen liegt. Die Aufteilung nach Größenklassen und die Zuordnung auf Solo-Lkw und Lastzüge werden entsprechend dem aktuellen Trend angenommen. Bei den Sattelzugmaschinen unterstellen wir ab 2013 eine jährliche Zulassung von 31.700 Fahrzeugen.

Alternative Antriebstechniken kommen ab 2030 in zunehmenden, aber insgesamt noch in geringen Anteilen in den Markt. Bei den kleineren Lkw sind das vor allem BEV, PHEV, Brennstoffzelle und

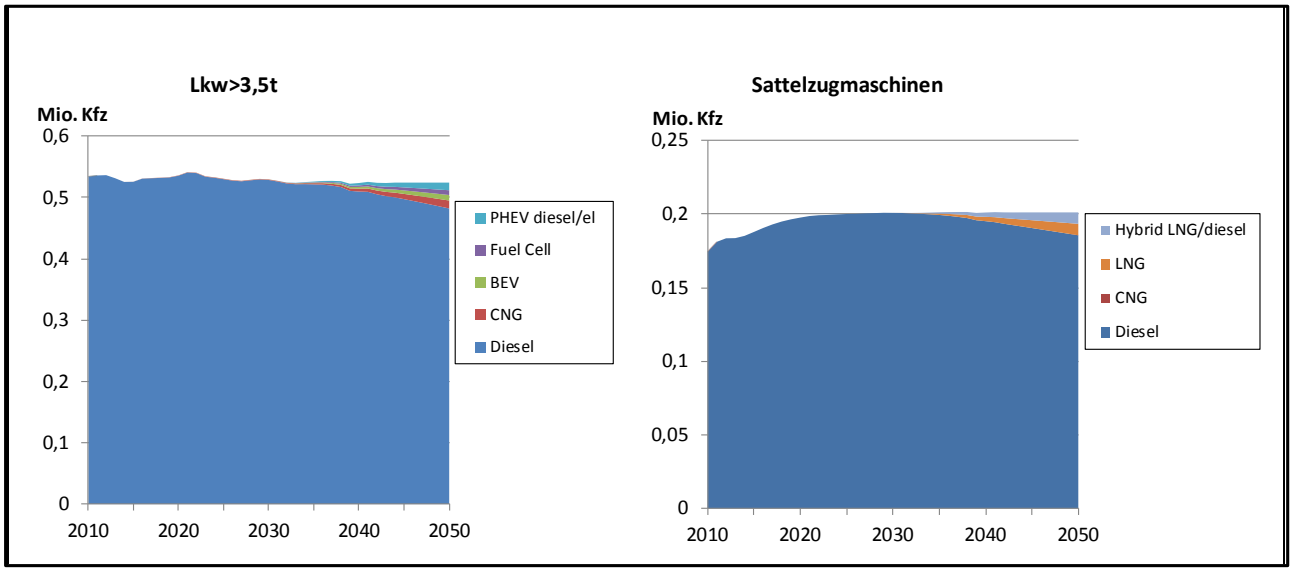
CNG, bei den größeren Fahrzeugen LNG und Dual-Fuel (Hybrid LNG/Diesel). Ansonsten dominiert weiterhin der Dieselmotor.

Abbildung 20: Entwicklung der Neuzulassungen bei Lkw und Sattelzugmaschinen nach Antriebstechnik in den Szenarien



In der folgenden Abbildung ist die Entwicklung der Fahrzeugbestände dargestellt, die mit dem Umschichtungsmodell in TREMOD berechnet wird.

Abbildung 21: Entwicklung des Fahrzeugbestands bei Lkw und Sattelzugmaschinen nach Antriebstechnik in den Szenarien



4.1.2.3 Annahmen zu den Fahrleistungsanteilen

Wie in Kapitel 4.1.2.1 beschrieben wird die Gesamtfahrleistung in TREMOD auf die Straßenkategorien aufgeteilt. Außerdem wird die Gesamtfahrleistung jeder Fahrzeugkategorie aufgeteilt auf die einzelnen Subsegmente, die durch Antriebstechnik, Größenklasse, Emissionsstandard und Fahrzeugalter bzw. -baujahr charakterisiert sind.

Zur Aufteilung der Gesamtfahrleistung auf die Subsegmente wird auf Ergebnisse verschiedener Fahrleistungsuntersuchungen zurückgegriffen (siehe [ifeu, 2014a]) Aus diesen Untersuchungen ist be-

kannt, dass Fahrzeuge einer Fahrzeugkategorie je nach Merkmal (Antrieb, Größenklasse, Alter) unterschiedliche Jahresfahrleistungen und auch unterschiedliche Fahrleistungsanteile auf den verschiedenen Straßenkategorien haben. Diese Unterschiede werden in TREMOD als sogenannte Flottenzusammensetzungen berücksichtigt. Sie ergeben sich im Modell aus der Zusammensetzung des Fahrzeugbestands, die mit Gewichtungsfaktoren verknüpft werden. Als Ergebnis erhält man für jede Fahrzeugkategorie und jedes Bezugsjahr die Flottenzusammensetzung je Straßenkategorie als Verteilung der Fahrleistung nach Antrieb, Größenklasse und Fahrzeugalter.

Die mittlere Fahrleistung der neuen Fahrzeugkonzepte beruht auf Annahmen, da empirische Werte noch nicht vorliegen.

Bei den Pkw und LNF wurden die folgenden Annahmen getroffen:

- Batterieelektrische Fahrzeuge werden eher im Nahbereich eingesetzt. Aufgrund der hohen Fahrzeugkosten wird davon ausgegangen, dass sie in Bereichen mit eher hoher Fahrzeugnutzung eingesetzt werden, so dass die mittlere Jahresfahrleistung insgesamt höher ist als bei Benzin-Pkw der gleichen Größenklasse
- Für alle Hybridkonzepte wird das gleiche Nutzungsverhalten wie für die konventionellen Fahrzeuge der gleichen Antriebsart und Größenklasse angenommen. Entsprechend wird beispielsweise für den Benzin-HEV ein Nutzungsverhalten analog zum rein verbrennungsmotorisch angetriebenen Benziner angenommen.

Tabelle 32: Anpassung der Fahrleistungsrelationen für neue Fahrzeugkonzepte bei Pkw und LNF anhand der vorhandenen konventionellen Konzepte

Konzept neu	Konzept Bezug	Autobahn	Außerorts	Innerorts
CNG	Diesel	gleich	Gleich	Gleich
LPG	Diesel	gleich	Gleich	Gleich
BEV	Benzin	-30 %	+50 %	+100 %
HEV	Diesel / Benzin / CNG	gleich	Gleich	Gleich
PHEV	Diesel / Benzin /CNG	gleich	Gleich	Gleich

Anmerkungen: HEV, PHEV jeweils Diesel, Benzin oder CNG

4.1.2.4 Fahrleistungsanteile nach Energieträger

PHEV-Fahrzeuge können sowohl im Elektro- als auch im Verbrennungsbetrieb gefahren werden. Zur Abschätzung des elektrischen Fahranteils werden Analysen von ISI-FHG verwendet [Kley, 2011], die auch im Vorhaben [ifeu, 2014a] für die Pkw unterstellt wurden.

Es wird davon ausgegangen dass der elektrische Fahranteil hoch sein muss, damit die PHEV wirtschaftlich sind. Wegen der noch hohen Anschaffungskosten zu Beginn der Markteinführung werden nur solche Nutzer einen PHEV kaufen, die sehr günstige Fahrprofile und damit hohe elektrische Fahranteile realisieren können. Wenn die Anschaffungskosten später sinken, werden auch vermehrt Nutzer mit anderen Fahrprofilen dazu kommen. Es wird angenommen, dass die Nutzer der ersten Stunde besonders viele Strecken im elektrischen Betrieb zurücklegen. Nach einer verstärkten Marktdurchdringung ist davon auszugehen, dass sich die mittlere Fahrzeugnutzung dem Durchschnitt annähert. Dies bedeutet also, dass anfangs der Anteil im Elektrobetrieb höher ist als in späteren Jahren. Damit wird angenommen, dass der mittlere Anteil der Fahrleistung im Elektrobetrieb anfangs bei 80 % liegt und bis 2050 auf 60 % absinkt. Für die Modellierung in TREMOD werden diese Annahmen

weiter nach Straßenkategorien aufgesplittet, dabei ist der Anteil auf Innerortsstraßen am höchsten, auf Autobahnen am niedrigsten. Diese Anteile werden für alle Größenklassen und Antriebsarten (d.h. PHEV Benzin und Diesel) angenommen. Die verwendeten Anteile, die diesen Annahmen entsprechen, sind in Tabelle 33 zusammengefasst.

Tabelle 33: Elektrischer Fahrleistungsanteil für PHEV (Pkw und LNF)

Jahr	Autobahn	Außerorts	Innerorts
2010	70 %	75 %	95 %
2020	65 %	70 %	90 %
2030	60 %	65 %	87 %
2040	55 %	60 %	84 %
2050	50 %	55 %	80 %

Quellen: [Kley, 2011], eigene Annahmen

4.1.2.5 Fahrzeugflotten und Fahrleistungen im Klimaschutzszenario E+

Im Szenario Klimaschutz E+ wird eine verstärkte Einführung von Elektro-Pkw bis 2030 angenommen, bei der die Ziele der Bundesregierung (1 Mio. E-Fahrzeuge in 2020, 6 Mio. in 2030) erreicht werden. Dies bedeutet, dass sich die Zulassungsrate dieser Fahrzeugkonzepte zwischen 2014 und 2030 verdoppelt. Nach 2030 gleichen sich die Zulassungen bis 2050 wieder an den ursprünglichen Trend an.

Bei den Lkw und Sattelzugmaschinen wird ab 2020 ein konsequenter Übergang des Fernverkehrs auf OH-Fahrzeuge angenommen. Dies bedeutet, dass bei den im Fernverkehr genutzten schweren Lkw, Last- und Sattelzügen ein deutlicher Markthochlauf stattfindet (2030: 5 %, 2040: 80 %, 2050: 85 %).

Realisiert wird diese Zunahme bei den Sattelzügen. Bei den Lkw >3,5t ergeben sich im Mittel deutlich geringere Zulassungszahlen, da nur ein Teil dieser Fahrzeuge im reinen Güterfernverkehr eingesetzt wird.

Die aus den Annahmen resultierenden Bestände, Fahr- und Verkehrsleistungen für die OH-Lkw und –Sattelzüge sind in der folgenden Tabelle für das Jahr 2050 dargestellt.

Tabelle 34: Bestand, Fahrleistung und Verkehrsleistung der OH-Lkw im Jahr 2050 im Klimaschutzszenario E+

	Diesel,	OH Elektrisch	OH Diesel	Anteil OH	Anteil OH elektrisch an OH	Anteil OH elektrisch an gesamt
Bestand (Anzahl)						
Sattelzug	38.389	173.332		82%		
Lastzug	132.773	47.100		26%		
Lkw	241.766	32.356		12%		
Gesamt	**412.928**	**252.788**		**38%**		
Fahrleistung (Mrd. km)						
Sattelzug	4,8	14,2	7,4	82 %	66 %	54 %
Lastzug	6,0	2,3	1,2	37 %	65 %	24 %
Lkw	12,6	1,0	2,1	20 %	33 %	6 %
Gesamt	**23,4**	**17,6**	**10,7**	**55 %**	**62 %**	**34 %**
Verkehrsleistung (Mrd. tkm)						
Sattelzug	71,2	211,1	110,2	82 %	66 %	54 %
Lastzug	65,2	34,3	18,1	45 %	65 %	29 %
Lkw	25,8	4,1	8,2	32 %	33 %	11 %
Gesamt	**162,1**	**249,5**	**136,5**	**70 %**	**65 %**	**46 %**
Fahrleistung auf Autobahn (Mrd. km)						
Sattelzug	3,5	14,18	1,58	82 %	90 %	74 %
Lastzug	3,9	2,4	0,3	40 %	90 %	36 %
Lkw	4,7	1,0	0,1	19 %	90 %	18 %
Gesamt	**12,1**	**17,6**	**2,0**	**62 %**	**90 %**	**56 %**
Verkehrsleistung auf Autobahn (Mrd. tkm)						
Sattelzug	51,94	211,07	23,45	82 %	90 %	74 %
Lastzug	45,3	34,3	3,8	46 %	90 %	41 %
Lkw	9,5	4,1	0,5	32 %	90 %	29 %
Gesamt	**106,762**	**249,491**	**27,715**	**72 %**	**90 %**	**65 %**

4.1.2.6 Entwicklung der Energieeffizienz

Die Verbesserung der Energieeffizienz der Fahrzeuge ist eine wichtige Randbedingung zur Reduzierung der verkehrsbedingten Kohlendioxidemissionen. Initiativen der europäischen Automobilindustrie (Selbstverpflichtungserklärung zur Absenkung der spezifischen CO_2-Emissionen der Pkw bis 2009) brachten nicht den gewünschten Erfolg. Die EU beschloss daraufhin gesetzliche Regelungen für neu zugelassene Pkw [EU, 2009b] und leichte Nutzfahrzeuge [EU, 2011b]. Eine Fortschreibung wurde im Februar 2014 vom EU-Parlament verabschiedet [EU, 2014].

Für die übrigen Fahrzeugkategorien und die anderen Verkehrsträger gibt es bisher keine gesetzlichen Bestimmungen zur Reduzierung des fahrzeugseitigen Energieverbrauchs. Es gibt allerdings Minderungsziele großer Unternehmen, z.B. der DB AG, die sich zu bestimmten Minderungszielen verpflichtet haben. Diese beinhalten in der Regel nicht nur reine fahrzeugtechnische Maßnahmen.

4.1.2.7 Pkw und leichte Nutzfahrzeuge – Entwicklung bis 2030

Am 25.02.2014 hat das EU-Parlament die Vorlage für die Einführung der CO_2-Grenzwerte für Pkw verabschiedet. Diese Verordnung [EU, 2014] legt im Wesentlichen die Modalitäten, unter denen, die Ziele 2020 der Verordnung [EU, 2009b] zu erreichen sind, fest.

Die Verordnungen sehen vor, dass zwischen 2012 und 2015 schrittweise ein Grenzwert von 130 g CO_2/km eingeführt wird („Phase-in“). Im Jahr 2020 ist ein Grenzwert von 95 g CO_2/km einzuhalten. Die Grenzwerte werden gestuft nach Fahrzeugmasse, wobei die oben genannten Werte von den Herstellern im Mittel eingehalten werden müssen. Bei Überschreiten der Grenzwerte sind von den Herstellern Strafzahlungen zu leisten. Weitere Randbedingungen sind:

a) Die Vorschrift gilt für die gesamte Flotte in Europa, d.h. Hersteller können Fahrzeuge mit hohem Verbrauch durch die Zulassung von sparsameren Autos ausgleichen.
b) Hersteller, die weniger als 1.000 neue Pkw pro Jahr in der EU zulassen (Nischenhersteller), sind von der Regel ausgenommen (außerdem soll es vereinfacht werden weitere Ausnahmen für diese Hersteller zu verabschieden); trotzdem soll ab 2020 ein Zielwert gelten, der 45 % niedriger ist als die durchschnittliche Emissionen der Nischenhersteller im Jahr 2007.
c) Der NEFZ soll überarbeitet werden, um die tatsächlichen CO_2-Emissionen von Neuwagen zu erhalten; danach wird das Ziel von 95 g/km angepasst werden.
d) In gewissen Jahren wird nur ein bestimmter Prozentsatz der Flotte von neuen Pkw eines Herstellers zur Bestimmung der durchschnittlichen CO_2-Emissionen herangezogen (sogenanntes „Phase-In“).
e) Neue Pkw mit einem Verbrauch von weniger als 50 g CO_2/km haben ein größeres Gewicht bei der Berechnung der durchschnittlichen CO_2-Emissionen; dabei kann der Grenzwert jedoch maximal um 7,5g $C0_2$/km je Hersteller und Jahr überschritten werden.
f) CO_2-Einsparungen durch innovative Techniken (sog. Ökotechnologien) werden auf Anfrage des Herstellers berücksichtigt wodurch, unabhängig von Punkt 4, bis zu 7 g CO_2 auf die Zielvorgabe dazugerechnet werden können.

In Abstimmung mit dem Umweltbundesamt wurde eine Abschätzung für die Entwicklung des Flottenverbrauchs der Pkw-Neuzulassungen erarbeitet, die von folgenden Grundsätzen ausgeht:

- Die Verordnungen 443/2009 und 333/2014 werden vollständig umgesetzt.
- Die Emissionen der in Deutschland zugelassenen Pkw liegen wie bisher über dem EU-Durchschnitt (+ 10 g CO_2/km).
- Die Unterschiede zwischen NEFZ und Realverbrauch haben im Wesentlichen die folgenden Ursachen:
    1. Reales Fahrverhalten wird nicht korrekt abgebildet
    2. Nebenverbraucher sind nur unzureichend erfasst
    3. Bei Typprüfung wird das Fahrzeug auf den Zyklus hin optimiert
- Diese Einflüsse haben bis 2013 zur zunehmenden Diskrepanz zwischen Realverbrauch und NEFZ geführt.
- Für die weitere Entwicklung wird jedoch davon ausgegangen, dass die durch diese Einflüsse hervorgerufene Differenz nicht weiter zunimmt, die absolute Differenz aber bestehen bleibt.

Auf Basis dieser Annahmen wird folgender Vorschlag abgeleitet:

- Der Zielwert von 95 g CO_2/km wird aufgrund der Ausnahmen 2020 und des Ausgangswertes für die deutsche Fahrzeugflotte 2013 auf 115 g CO_2/km erhöht. Diese Erhöhung besteht aus
  1. 10 g CO_2/km als Differenz der deutschen Flotte gegenüber der mittleren EU-Flotte,
  2. 7 g CO_2/km als Abschätzung für die Inanspruchnahme von Supercredits und Ökoinnovationen,
  3. 3 g CO_2/km als Zuschlag für den 2020 noch nicht erfassten Flottenanteil (5 % der Gesamtflotte).
- Die Differenz "Realverbrauch" zu NEFZ liegt im Jahr 2013 nach der aktuellen TREMOD-Berechnung bei rund 27 g CO_2/km. Dieser Wert wird auch für die Jahre 2020 und folgende angenommen. Der 2020 erreichte Zielwert für den Realverbrauch der Neuzulassung liegt dann bei 142 g/km (inkl. Elektromobilität).
- Für 2021 wird der "Realverbrauch" um 4,3 g CO_2/km niedriger angenommen (100 % Flotte und Reduktion Mehrfachanrechnung).
- Bis 2023 läuft die Mehrfachanrechnung der Supercredits aus. Die daraus resultierende jährliche Reduktion 2022 und 2023 wird jeweils mit 1,33 g/km angenommen.
- Schließlich werden die sehr unterschiedlichen jährlichen Minderungen im Verlauf 2020-2023 verstetigt.
- Ab 2023 wird für Verbrennerfahrzeuge bis 2030 eine weitere jährliche Reduktionsrate von 1 % angenommen.

Tabelle 35: Entwicklung der spezifischen CO_2-Emissionen der Pkw im Referenzszenario bis 2030

	2012	2013	2014	2015	2016-19	2020	2021	2022	2023	2024-30	2030
Randbedingungen Gesetzgebung											
% der Flotte, die einbezogen wird	65%	75%	80%	100%	100%	95%	100%	100%	100%		
Wirkung Super-Credits	3,5x[1]	3,5x[1]	2,5x[1]	1,5x[1]	1x[1]	2x	1,67x	1,33x	1x		
CO_2-Emissionen (NEFZ) in g/km	132,2[3]			130[2]	130[2]	95	95	95	95		
Super Credits (SC) Zuschlag (max) in g/km						7,5	7,5	7,5			
Ökoinnovationen (Öl) Zuschlag (max) in g/km						7	7	7	7		
Annahmen NEFZ-Zuschläge											
Anrechnung SC und Öl t in g/km						7	5,67	4,33	3		
Länderzuschlag Deutschland in g/km	9,4[3]					10	10	10	10		
Anteil berücksichtigte Flotte (95%) in g/km						3	0	0	0		
"NEFZ D mod" in g/km	141,6	136,4				115[4]	110,7	109,3	108		
Annahmen Realverbrauch											
Zuschlag "Realverbrauch" (aus 2013) in g/km	25	27				27	27	27	27		
"Realverbrauch" TREMOD in g/km (soll)						142	137,7	136,3	135		
"Realverbrauch" TREMOD in g/km (Ist)	166	163				143	140	137	134		113
"Realverbrauch Verbrenner" TREMOD in g/km	166	163				146	145	142	140	-1%/a	130

[1] http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/cars/index_en.htm

[2] http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?pubRef=-//EP//TEXT+IM-PRESS+20081208BRI43933+ITEM-002-DE+DOC+XML+V0//DE&language=DE

[3] http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/co2-cars-emission-5

[4] Annahme 2020: Basis 95 g + Länderzuschlag Deutschland 10 g + Supercredits/Ecoinnovations 7g + Restflotte zu 95%: 3g = 115 g/km

Für die leichten Nutzfahrzeuge wurden ebenfalls CO_2-Grenzwerte festgelegt: Ab 2017 gilt ein Grenzwert von 175 g CO_2/km, ab 2020 von 147 g CO_2/km. Der Wert für die mittlere europäische Flotte lag 2013 bei 173,3 g CO_2/km, der Wert für Deutschland lag mit 192,9 g CO_2/km um knapp 20 g (11 Pro-

zent) höher. Die mittlere europäische Flotte hat demnach den ab 2017 geltenden Grenzwert bereits erreicht. Bis 2020 ist demnach eine weitere Minderung von 15 % zu realisieren. Es wird angenommen, dass die deutsche Flotte ebenfalls diese 15 % Minderung erreichen muss.

4.1.2.8 Pkw und leichte Nutzfahrzeuge – Entwicklung 2030 bis 2050

Die Entwicklung des spezifischen Energieverbrauchs der Pkw und LNF je Antriebskonzept nach 2030 orientiert sich an dem in [JEC, 2013] abgeleiteten Effizienzpotenzial für Pkw. Dabei werden in [JEC, 2013] heutige Fahrzeuge (differenziert nach Antriebskonzept) mit zukünftigen, also inklusive der aus heutiger Sicht denkbaren Effizienztechniken, verglichen. Diese Fahrzeuggruppen werden mit „2010“ und „2020+“ bezeichnet.

In den Szenarien in dieser Studie wird die in [JEC, 2013] zwischen den Fahrzeuggruppen „2010“ und „2020+“ berechnete Minderung bis 2050 umgesetzt. Dies bedeutet, dass zwischen 2030 und 2050 noch ein Drittel der Gesamtminderung von 2010 bis 2050 realisiert wird. Für in 2050 neu zugelassenen Verbrenner ergeben sich dann Emissionen von 100 g CO_2/km, im Vergleich mit 130 g CO_2/km in 2030 (Tabelle 35, letzte Zeile und Spalte).

4.1.2.9 Schwere Nutzfahrzeuge

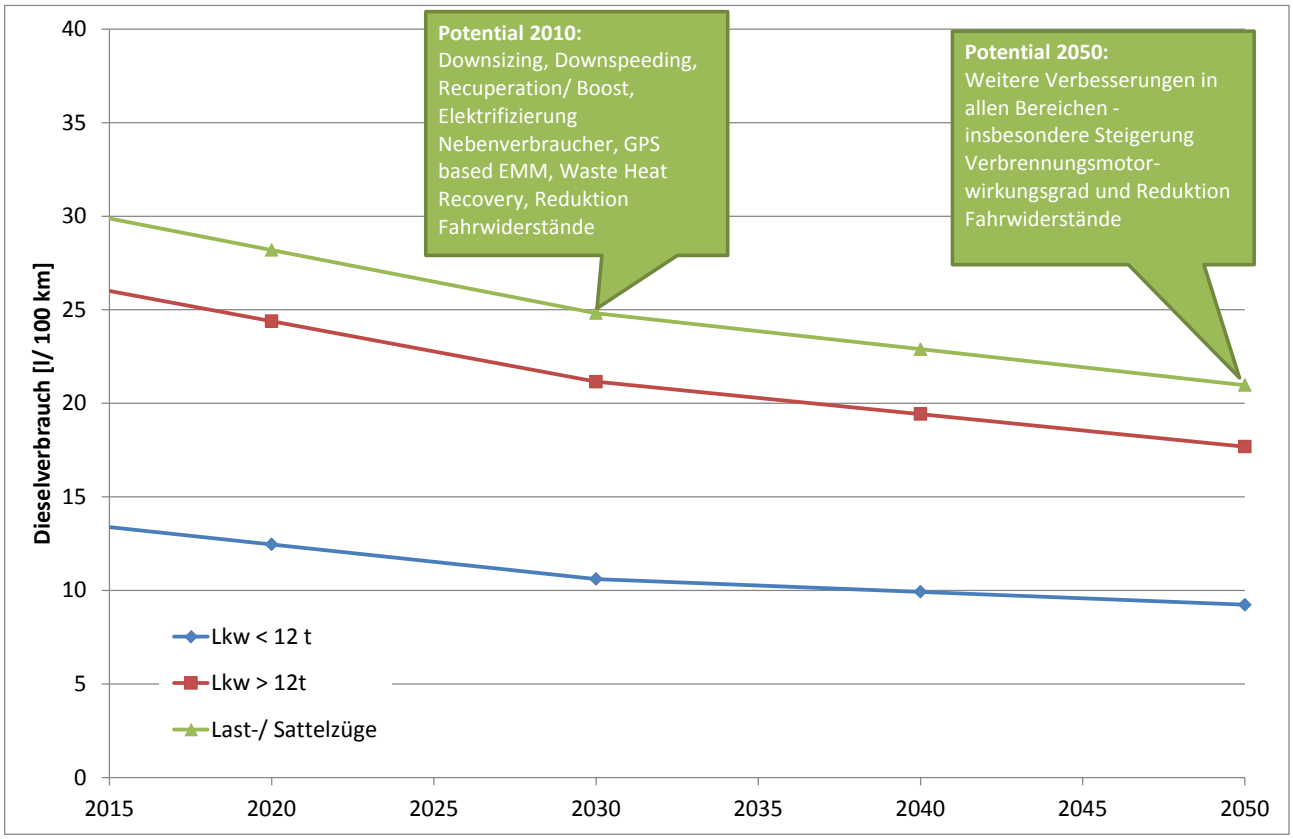
Für schwere Nutzfahrzeuge gibt es bisher keine gesetzlichen Regelungen zur Absenkung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs. Daher wird analog dem in [ifeu, 2014a] beschriebenen TREMOD 5.53 Trendszenario ab 2014 bis 2020 eine Minderung von im Mittel 8 %, bis 2030 von insgesamt rund 20 % angenommen. Dabei unterscheidet sich die Minderung der Diesel-SNF nach Größenklassen bis 2030:

- Lkw bis 12t zulässiges GG: -23 %
- Lkw über 12t zulässiges GG: -21 %
- Last-/Sattelzüge: -19 %

Die im TREMOD 5.53 Trendszenario angenommene Minderung bis 2030 deckt sich gut mit den Ergebnissen von [TU Wien, 2011]. In der Studie sind die technischen Minderungspotenziale der schweren Nutzfahrzeuge detailliert untersucht wurden.

Die Fortschreibung bis 2050 erfolgt für die Verbrennerfahrzeuge ebenfalls auf Basis der Ergebnisse von [TU Wien, 2011]. In der Studie wird das aus heutiger Sicht abschätzbare, technische Potenzial bis 2050 untersucht. Dabei wird die Effizienzentwicklung mit konkreten Techniken hinterlegt (siehe Abbildung 22) und im ARTEMIS-Zyklus berechnet. Für die Elektrofahrzeuge werden die in [CE Delft, 2013] angenommenen Verbräuche dieser im Verhältnis zu den Diesel-SNF übernommen, ebenso die Effizienzentwicklung bis 2030. Für den Zeitraum von 2030 bis 2050 sind die in [TU Wien, 2011] angenommenen Wirkungsgradsteigerung E-Motor und sowie die angenommene Verringerung der Fahrwiderstände auf die elektrischen Antriebskonzepte übertragen worden.

Abbildung 22: Ableitung der Effizienzentwicklung bei schweren Nutzfahrzeugen



Die in [ifeu, TU Graz, 2015] ermittelten Potenziale zur Emissionsminderung konnten im Rahmen dieser Studie noch nicht berücksichtigt werden.

4.2 Energetische Vorketten

4.2.1 Aufgabenstellung und Abgrenzungen

Im Rahmen der Szenarienrechnungen werden die Emissionen aus der Energiebereitstellungskette mit betrachtet. Diese Emissionen fallen fast ausschließlich außerhalb des Verkehrssektors an. Damit hat die Auswahl der im Sektor Verkehr verwendeten Energieträger einem unmittelbaren Einfluss auf die Emissionen in den anderen Sektoren. Deren Berücksichtigung wird besonders wichtig, wenn ein anspruchsvolles THG-Minderungsziel über alle Sektoren festgelegt wird, siehe hierzu ausführlich die Diskussionen in Kapitel 3.

Da sich die Minderungsziele Deutschlands auf die Emissionen in Deutschland beziehen, wird zusätzlich eine **regionale Unterscheidung nach Inland und Ausland** vorgenommen. Hierbei werden folgende Festlegungen getroffen:

Energie: Geographische Differenzierung der kumulierten Energieaufwände nach Primärenergie-Herkunft.

- Beispiele:
  - GtL-Produktion in Deutschland mit russischem Erdgas: 100 % Import
  - PtL-Produktion in Deutschland mit Desertec-Strom: 100 % Import

Die geographische Differenzierung der Primärenergie-Bezüge gibt im Ergebnis einen Aufschluss darüber, welche Auswirkungen eine Energiewende im Verkehr auf die sehr hohe Energieimportquote von aktuell mehr als 95 % [MWV, 2015] haben könnte.

Emissionen: Geographische Differenzierung nach dem Emissionsort.

Beispiele:

- THG-Emissionen von Strom aus Importkohle (ab Schornstein): Allokation auf Deutschland
- THG-Emissionen beim Anbau von nachwachsenden Rohstoffen: Allokation auf Anbauort

4.2.2 Sachbilanzen

Im Rahmen der Sachbilanz in dieser Studie werden die folgenden Komponenten betrachtet.

- Treibhausgase (CO_2, CH_4, N_2O)
- Schadstoffe (CO, NMVOC, NO_x, SO_2, Staub/Partikel)
- Energieaufwand (fossil, nuklear, erneuerbar)

4.2.3 Technikpfade Energieträger „Well-to-Tank“

Technikpfade werden für alle wesentlichen und aus heutiger Sicht bis 2050 aussichtsreichen Energieträger abgebildet. Zur Auswahl der Pfade für die einzelnen Energieträger erfolgt eine Festlegung auf definierte Produktionsverfahren, die aus heutiger Sicht realistisch erscheinen. Bei Strom und den strombasierten Kraftstoffen werden Lerneffekte und evolutionäre technologische Verbesserungen, wie z.B. bei den Energieaufwänden für die Kraftstoffproduktion, angenommen, jedoch keine grundsätzlichen Durchbrüche in der Kraftstoffherstellung unterstellt. Die resultierenden kumulierten Energieaufwände liegen daher eher auf der konservativen Seite. Die Pfade werden schließlich für die verschiedenen Szenarien je Bezugsjahr mit unterschiedlichen Anteilen angenommen („Kraftstoffmischer“). Die Annahmen für das Referenz- und Klimaschutzszenario sind in Kapitel 4.2.4 dargestellt.

Benzin, Kerosin und Diesel

- Konventionell aus Rohöl
- Unkonventionell aus Teersand, Ölschiefer, Kohle (CtL), Erdgas (GtL)
- Erneuerbar via „Power-to-Liquid“ (PtL) mit CO_2 aus der Luft

Hinsichtlich der Nicht-CO_2-Klimawirkung bei der Verbrennung von Kerosin in großen Höhen wird in dieser Studie für PtL-Kerosin der gleiche Emissionsfaktor angenommen wie bei fossilem Kerosin. Erste Analysen deuten zwar auf geringere Klimawirkungen in großen Höhen bei Verwendung von Synthesekraftstoffen hin, siehe Präsentationen [Zschocke, 2015], [Lobo, 2014], [Penanhoat, 2014], [Zarzalis, 2014], weitere Emissions- und Wirkungsanalysen sind für eine robuste quantitative Abschätzung der Minderungspotenziale jedoch nötigt. Eine Determinante für die Rußbildung – und dadurch mit Einfluss auf die Klimawirkung in großen Höhen – ist der Aromatengehalt im Kraftstoff. Synthesekraftstoffe enthalten typischerweise keine Aromaten. Der Mindestaromatengehalt für den sicheren Betrieb des Kraftstoffsystems und der Antriebsturbinen ist weiter zu untersuchen [Zschocke, 2015], insbesondere mit Blick auf Kraftstoffkompatibilität älterer Flugzeuggenerationen, die über nitrilhaltigen Dichtungen verfügen.

LPG

- Rohölverarbeitung (Raffinerie)
- Erdgasverarbeitung

CNG

- Erdgas über Pipeline (2500 km, 4000 km, 7000 km)
- Erneuerbar via „Power-to-Gas“ (PtG-CH_4) mit Niedertemperatur-Elektrolyse und CO_2 aus der Luft

LNG

- LNG-Import aus Katar
- Erdgas-Import über Gas-Pipeline 4000 km und Verflüssigung vor Ort
- Erneuerbar via „Power-to-Gas“ (PtG-LNG) mit Niedertemperatur-Elektrolyse, CO_2 aus der Luft und einer Verflüssigung vor Ort

CGH2 (Druckwasserstoff)

- Erdgas-Dampfreformierung vor Ort und Kompression auf 35 MPa für Busse sowie 70 MPa für Pkw
- Erneuerbar via „Power-to-Gas“ (PtG-H_2) mit Niedertemperatur-Elektrolyse vor Ort und Kompression auf 35 MPa für Busse sowie 70 MPa für Pkw

Für die strombasierten Kraftstoffe wurden die in Tabelle 36 dargestellten Wirkungsgrade zugrunde gelegt.

Tabelle 36: Bereitstellungswirkungsgrade (gerundet) für PtG-H_2, PtG-CH_4 und PtL-Pfade, mit CO_2 aus Luft, inklusive Stromnetz Mittelspannungsebene

	2010	2020	2030	2040	2050
CGH_2 via Elektrolyse und Kompression	53 %	53 %	58 %	59 %	59 %
CNG via Methanisierung und Kompression	38 %	38 %	40 %	41 %	41 %
LNG via Methanisierung und Verflüssigung	38 %	38 %	40 %	41 %	41 %
Benzin, Kerosin, Diesel via Methanol-Route	30 %	33 %	34 %	35 %	35 %

Die in Tabelle 36 genannten Wirkungsgrade basieren auf konservativen Abschätzungen von PtG/PtL-Verfahren[23] auf Basis etablierter Verfahrenstechniken und deren Fortschreibung. Für die Synthese von Kohlenwasserstoffen (PtG-CH_4, PtL) wird konservativ die Nutzung von CO_2 aus der Luft angenommen da hier keine limitierenden Potenziale oder notwendige Standortbedingungen (wie z.B. die Nähe zu Biogasaufbereitungsanlagen, etc.) vorausgesetzt werden müssen. Die Demonstration einer CO_2-Extraktionsanlage aus der Luft in den hierfür benötigten Anlagengrößen steht noch aus.

Strom aus Strommix Deutschland und erneuerbarer Strom

- Langsamladen
- Schnellladen („Super Charger“)
- Oberleitung

[23] Anmerkung zur Taxonomie: PtG und PtL werden gerne auch als „Power-to-Anything“ (PtX) zusammengefasst. PtX kann auch Verfahren wie „Power-to-Heat“ beinhalten.

Für die verschiedenen untersuchten, verkehrlichen Direktstromnachfrager (Oberleitung, Batterieautos) werden folgende Annahmen für die Strombereitstellungswirkungsgrade ab der Mittelspannungsebene getroffen:

- Langsamladung 94 %
- Schnellladung 87 % (0,94 x 0,93)
- Oberleitung 94 %

Bei Verwendung von (fluktuierendem) EE-Strom für BEV-Schnellladung und Oberleitung zzgl. Stromspeicher für gesicherte Leistung (Vermeidung Netzausbau, EE-Integration):

- Zykluswirkungsgrad stationäre Stromspeicher 75 %
- Anteil über stationäre Stromspeicher 50 %

Der angenommene Zykluswirkungsgrad der stationären Stromspeicher von 75 % steht stellvertretend für eine nicht näher spezifizierte Mischung aus Kurz- und Langzeitstromspeicherung, wie z.B. Stationärbatterien an den Lade-/Oberleitungseinspeise-Punkten in Verbindung mit z.B. Gasspeichern und Rückverstromung im vorgelagerten Netz. Eine Berücksichtigung von stationären Stromspeichern stellt eine konservative Annahme gegenüber einschlägigen Studien dar. Mit Blick auf die Integration sehr hoher Anteile an fluktuierenden erneuerbaren Energien (Wind, Solar) sowie auch netzverträglichen Integration dieser verkehrlichen Stromnachfrage liegen die Höhe des angenommenen Zykluswirkungsgrades und der Anteil via Stromspeicher eher auf der optimistischen Seite. So geht [Fraunhofer IWES, 2011] beispielsweise von einem Direktstromnutzungsanteil von Wind- und Solarstrom von maximal ca. 40 % beim Bahnstrom aus; [Empa, 2015] stellte jüngst einen Lithium-Ionen-Batteriespeicher zur Pufferung von BEV-Schnellladevorgängen an der Niederspannungsebene vor, bei dem mehr als 90 % des BEV-Ladestroms aus dem Pufferspeicher erfolgt.

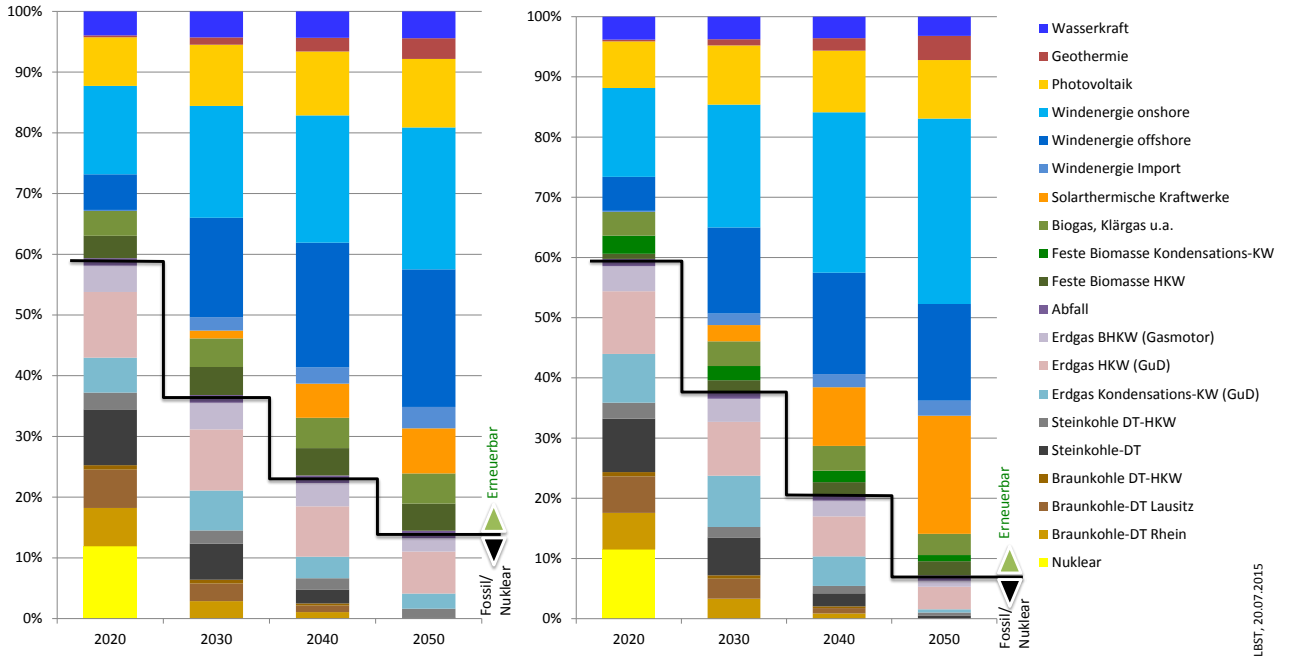
4.2.4 Auswahl Strom- und Kraftstoffszenarien

Zur Erreichung der THG-Minderungsziele im Klimaschutzsektor müssen alle verkehrlich genutzten Kraftstoffe sowie der Strom für Oberleitung und Batteriefahrzeuge quasi THG-neutral sein.

Im Referenzszenario wird die anteilige Entwicklung des Strommixes entsprechend Szenario A der BMU Leitstudie 2011 mit einem Anteil von 86 % EE-Strom im Jahr 2050 angenommen.

Im Klimaschutzszenario wird aufgrund der höheren Emissionsminderungsziele von 98,5 % (siehe Kapitel 3) die anteilige Entwicklung des Strommixes nach Szenario THG95 aus der Leitstudie 2011 [DLR et al., 2012] angenommen. Das Leitstudien-Szenario THG95 sieht für das Jahr 2050 einen Anteil von 93 % erneuerbaren Energien im Stromsystem vor.

Abbildung 23: Strommixe im Referenzszenario nach Leitstudie 2011, Szenario A (linke Grafik) und im Klimaschutzszenario nach Leitstudie 2011, Szenario THG95 (rechte Grafik) [DLR et al., 2012]



Die Umwälzung von einer fossilen hin zu einer erneuerbaren Kraftstoffbasis erfolgte in Anlehnung an typische Wachstums-/Marktdurchdringungskurven (S-Kurve). Die dieser Studie zugrunde gelegten Entwicklungen der Kraftstoffmixe sind in Abbildung 24 für das Referenzszenario und in Abbildung 25 für das Klimaschutzszenario dargestellt. Die fossile Kraftstoffausgangsbasis wird je nach Szenario sukzessive um erneuerbare Kraftstoffoptionen ergänzt.

Abbildung 24: Auswahl Kraftstoffmix im Referenzszenario

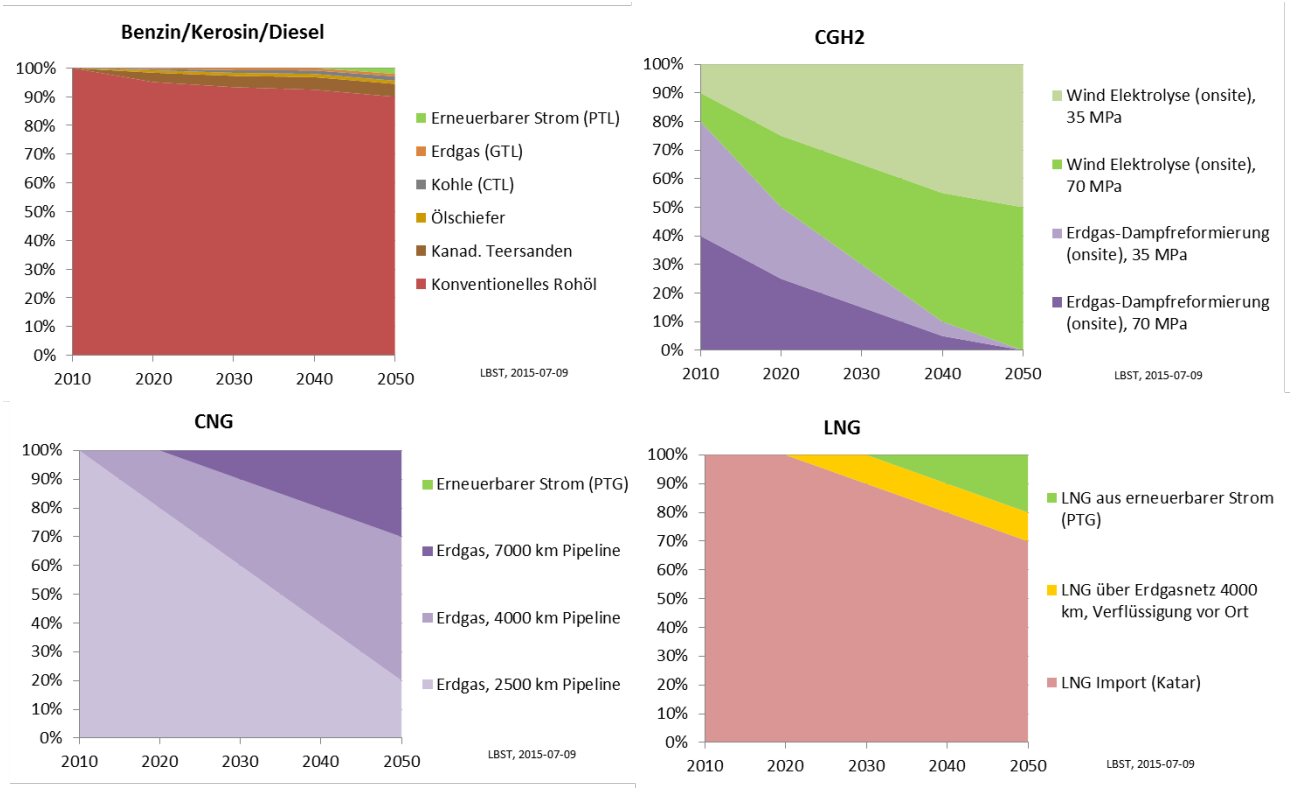
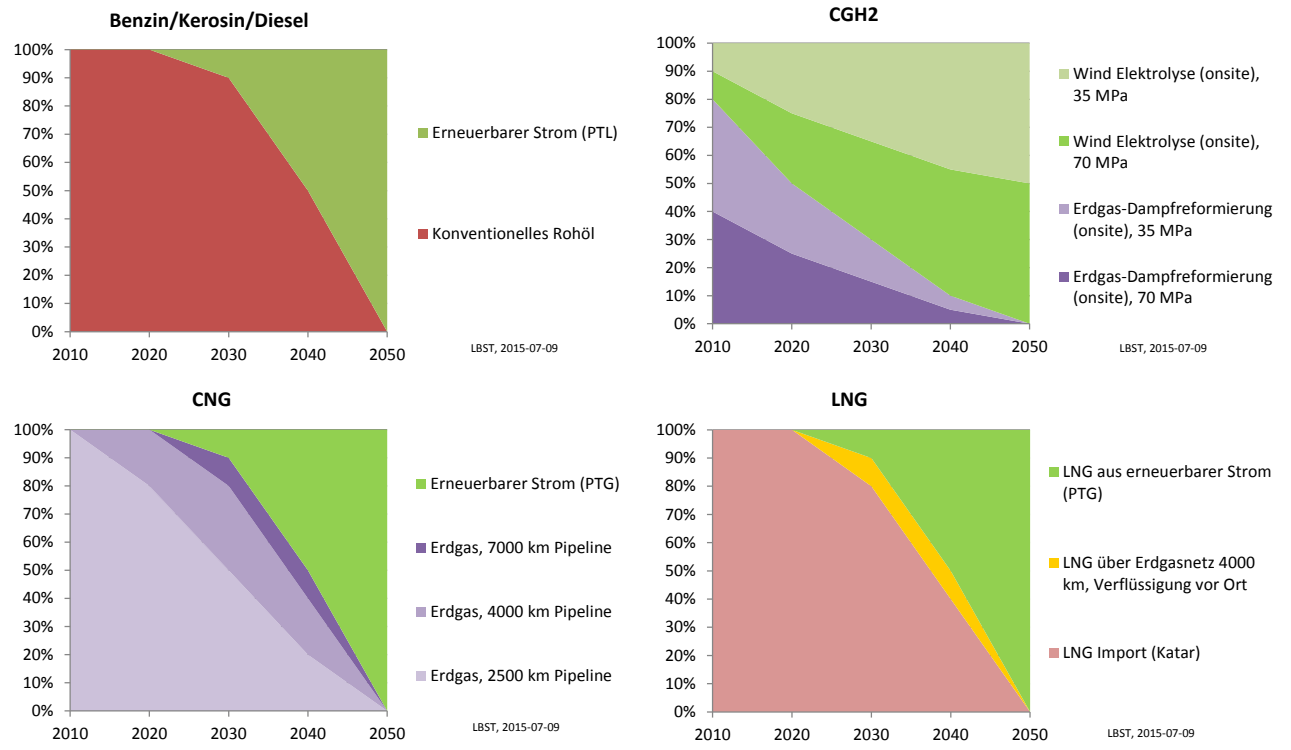


Abbildung 25: Auswahl Kraftstoffmix im Klimaschutzszenario



4.2.5 Abschätzung der Kosten von PtG/PtL-Kraftstoffen

Im Rahmen dieser Studie wurden keine Analysen zu den Kosten der zukünftigen Kraftstoffe vorgenommen. Als Anhaltspunkt für die Bewertung der Ergebnisse in Kapitel 6.4 werden daher folgende Bandbreiten angenommen:

- In [LBST, 2016] wurden für PtG-H_2 Kraftstoffgestehungskosten von 120 €/GJ und für PtG-CH_4 von etwa 140 €/GJ ermittelt, die bis 2050 auf etwa 60 €/GJ für PtG-H_2 und 70 €/GJ für PtG-CH_4 sinken könnten. Für PtL wurden Kraftstoffkosten von 150 bis 160 € pro GJ ermittelt, die bis 2050 auf 50 bis 80 € pro GJ sinken könnten. In [LBST, 2016] wurde angenommen, dass das CO_2 für PtG-CH_4 und PtL aus der Luft abgetrennt wird.
- In [Fraunhofer IWES et al., 2015] wurden im kostenoptimalen Szenario für das Jahr 2050 Kraftstoffpreise inkl. CO_2-Vermeidungskosten für PtG-CH_4 in Höhe von 91 €/MWh ermittelt, das sind rund 25 €/GJ. Dabei ist zu berücksichtigen, dass in diesem Szenario, das sich auf ein -80 %-THG-Minderungsziel über alle Sektoren bezieht, im Jahr 2050 nur 30 PJ PtG-CH_4-Kraftststoffe aus EE-Strom und keine weiteren PtG/PtL-Kraftstoffe in Deutschland benötigt werden. Bei höherem Bedarf würde der Preis ansteigen.

4.3 Sozio-ökonomische Rahmenbedingungen in den Szenarien

Die Szenarien basieren auf Rahmendaten der Verkehrsverflechtungsprognose 2030 [BVU et al., 2014]. Die Verkehrsleistung aus der Verflechtungsprognose ist Basis des Referenzszenarios. Bis 2050 werden die Verkehrsleistungen in dieser Studie aufgrund verschiedener Annahmen fortgeschrieben, die in Kapitel 5.2.1 (Personenverkehr) und Kapitel 5.2.2 (Güterverkehr) erläutert sind.

Die sozio-ökonomischen Rahmenbedingungen der Verflechtungsprognose gehen nicht direkt in die TREMOD-Berechnung ein. Sie sind allerdings Bestandteil der zugrunde liegenden „Verkehrsprognose 2030“ und haben einen relevanten Einfluss auf die Verkehrsentwicklung.

In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Annahmen der Verkehrsprognose 2030 dargestellt.

Tabelle 37: Annahmen zu den sozio-ökonomischen Rahmenbedingungen in der Verflechtungsprognose 2030

Kenngröße	Entwicklung 2010-2030
Demografische Entwicklung	2030: 79,7 Mio. Einwohner davon 31 % 65 Jahre und älter
Wirtschaftsentwicklung (BIP)	Durchschnittliche Wachstumsrate real +1,14 % p.a.
Mobilitätskosten	Pkw: +0,5 % p.a. ÖSPV: +1 % p.a. SPNV: +0,5 % p.a. SPFV: +0,5 % p.a.
Kosten im Güterverkehr	Straße: Keine Kostenänderung Schiene: -0,5 % p.a. Binnenschiff: -0,6 % p.a.
Kraftstoffpreise	Rohölpreis 2030 real 120 US$2010/bbl (Anstieg 2,1 % p.a.)

Quelle: Verflechtungsprognose 2030 [BVU et al., 2014]

4.4 Maßnahmen im Referenzszenario

Die in Tabelle 37 dargestellten Rahmendaten für die Kostenentwicklung in der Verflechtungsprognose 2030 enthalten bereits umweltpolitische Maßnahmen. Die Autoren weisen darauf hin, dass die unterstellten verkehrspolitischen Randbedingungen und die Kostenentwicklung einen „umweltpolitisch ambitionierten Gestaltungswillen“ voraussetzen [BVU et al., 2014], S.184.

Explizit wird unterstellt, dass die Kraftstoffpreise für den Endverbraucher, unabhängig vom Rohölpreis, um 2,0 % pro Jahr ansteigen. Das bedeutet, dass bei einem geringeren Anstieg des Rohölpreises der Mineralölsteuersatz entsprechend erhöht werden muss. Hierbei werden sowohl beim Pkw als auch beim Straßengüterverkehr die Effizienzgewinne durch Kraftstoffeinsparung und Produktivitätssteigerungen überkompensiert. Nicht enthalten sind beim Straßengüterverkehr eine Erhöhung der Mautsätze und die Einführung des Lang-Lkw. Beim öffentlichen Straßenpersonenverkehr und beim Schienenverkehr wird ein umweltpolitisch motivierter Rahmen angenommen, so dass die Kostensteigerungen im Vergleich mit der Kraftstoffpreisentwicklung moderat ausfallen (siehe Tabelle 37). Zudem findet eine Ausweitung des Angebots im Rahmen der unterstellten Infrastrukturmaßnahmen bis 2030 statt [BVU et al., 2014].

Aus diesen Annahmen resultiert, dass die Verkehrsleistungsentwicklung der Verflechtungsprognose keine Trendentwicklung abbildet. Vielmehr setzen die in dieser Studie abgeleiteten und im Klimaschutzszenario umgesetzten Maßnahmen bereits auf einer Entwicklung auf, die von den Autoren der Verflechtungsprognose als „umweltpolitisch ambitioniert“ bezeichnet wird.

4.5 Maßnahmenmodellierung im Klimaschutzszenario

4.5.1 Auswahl von Maßnahmen und Maßnahmenbündel

Ein ambitioniert-realistisches Minderungsziel kann nur mit einer geeigneten Politik erreicht werden. Diese sollte Maßnahmen enthalten, mit denen zum einen das Treibhausgasziel erreicht wird, zum anderen auch die für die Realisierbarkeit entscheidenden Nebenziele (z.B. geringe Kosten, gesellschaftliche Akzeptanz) möglichst gut erfüllen.

Zur Ableitung dieses Maßnahmenbündels ist in dem Projekt eine umfassende Literaturrecherche betrieben worden, um aus dem damit erstellten Maßnahmen-Fundus eine Auswahl und Strukturierung aus den bekannten Maßnahmen treffen zu können. Um den Raum möglicher Maßnahmen auszuschöpfen, bietet sich die Strukturierung nach den Wirkungsansätzen (ASIF: Avoid, Shift, Improve, Fuel, siehe Kapitel 2.2) an. Da in anderen Szenarienstudien (z.B. in [DLR et al., 2012]) die Wirkungen von Änderungen im Bereich der Effizienz bereits umfassend untersucht wurde, liegt der Fokus der hier ausgewählten Maßnahmen in der Betrachtung von Vermeidungs- und Verlagerungsoptionen. Zudem ist bei der Auswahl darauf geachtet worden, Maßnahmen mit hoher Relevanz bezüglich der Klimawirkung zu erfassen sowie Maßnahmen aus verschiedenen Handlungsfeldern (z.B. ordnungsrechtlich, ökonomische Instrumente) und politischen Umsetzungsebenen zu berücksichtigen.

4.5.1.1 Personenverkehr

Neben dem Wirkungsansatz ist die vorrangig von der Wirkung der Maßnahme betroffene Verkehrsart ein nützliches Differenzierungsmerkmal. Für die Strukturierung ist dabei die Unterteilung nach Alltags- und Fernverkehr getroffen worden.

- **Alltagsverkehre** beziehen sich dabei auf die Wege, die man üblicherweise in seinem näheren Umfeld zurücklegt, wie beispielsweise Arbeitswege, Ausbildung, private Erledigungen und Freizeit. Diese sind im Allgemeinen von Untersuchungen zum Verkehrsverhalten, wie Mobilität in Deutschland (MiD) oder Mobilität in Städten (SrV), gut abgedeckt.

- Wege über 50 km werden in dieser Studie dem **Fernverkehr** zugeordnet, Überschneidungen mit langen Alltagswegen sind dabei aufgrund der ohnehin nicht trennscharf darstellbaren Maßnahmenwirkung für den Studienzweck zu vernachlässigen. Fernreisen beinhalten dabei insbesondere Geschäftswege, private Tages- und Übernachtungsreisen sowie (Kurz-)Urlaube.

Ein weiteres wesentliches Differenzierungsmerkmal ist die Unterscheidung von Maßnahmen zur Verlagerung in solche, die primär auf Angebotsverbesserungen von umweltverträglicheren Verkehrsmitteln setzen (Pull) und solche, die das Angebot von weniger umweltverträglichen Verkehrsmitteln, insbesondere den MIV, einschränken (Push). Dies ist insofern relevant, dass eine alleinige Verbesserung der Angebote im Umweltverbund (Pull) nicht ausreicht, um in dem im Klimaschutzszenario angenommenen Umfang Verkehrsverlagerungen vom MIV auf den Umweltverbund zu erreichen und damit entsprechend die MIV-Fahrleistung zu verringern. Vielmehr wird durch eine reine Förderpolitik letztlich zusätzlicher Verkehr induziert (z.B. [Cerwenka, 1996], [FGSV, 2003], [Vrtic, 2001]). Wichtig ist daher für die Zielerreichung eine Kombination von Push- und Pull-Maßnahmen.

Damit ergeben sich im Personenverkehr die folgenden Handlungsfelder:

- Motorisierten Verkehr (insbesondere MIV) vermeiden
- Alltags- bzw. Fernverkehr ökologisch sinnvoll verlagern
    - Angebotsverbesserung Fahrrad/zu Fuß/beim ÖPV
    - Verknüpfung der Verkehrsmittel
    - Einschränkungen beim MIV
- MIV/ ÖV effizienter gestalten

Handlungsfeld motorisierten Verkehr (insbesondere MIV) vermeiden

In diesem Handlungsfeld sind Maßnahmen zusammengefasst, die auf eine Reduzierung von motorisiertem Verkehr abzielen. Wesentlich ist dabei die Unterscheidung zwischen Verkehr und Mobilität, also zwischen der Verkehrsleistung und den Maß der über Ortsveränderungen realisierten Bedürfnisbefriedigungen (bzw. der Optionen zu diesen). Dabei wird im Idealfall angestrebt, trotz einer Reduzierung von Verkehrsleistung die Mobilität zu erhöhen bzw. konstant zu halten. Zentral sind dabei zwei Gedanken:

- Zum einen die aus der Realisierung des Leitbilds der „Autogerechten Stadt“ gewonnene Erkenntnis, dass Funktionstrennung sowie eine Erhöhung der Reisegeschwindigkeit zwar zu mehr Verkehrsleistung geführt hat, dass aber weder die Anzahl der täglich zurückgelegten Wege zugenommen, noch die im Alltag im Verkehr verbrachte Zeit deutlich abgenommen haben. Als Gegenentwurf ist daher seit den 1980er Jahren das Leitbild der „Stadt und Region der kurzen Wege“ [UBA, 2011] entstanden, welches neben einer Verkehrsvermeidung insbesondere auch auf eine Erhöhung der Lebensqualität abzielt.
- Der zweite Gedankenansatz zur Verkehrsvermeidung liegt darin, die realen Kosten des Verkehrs, also inklusive der durch den Nutzer nicht abgedeckten Kosten z.B. für Umweltbelastung oder Krankheit, dem Nutzer anzulasten (Internalisierung). Durch diese „Kostenwahrheit“ wird eine Verschiebung zu weniger verkehrsintensiven Konsum- und Lebensgewohnheiten angestrebt. Der erste Schritt hin zu mehr „Kostenwahrheit“ im Verkehr ist dabei der Abbau von staatlichen Subventionen für verkehrsintensive Strukturen. Dies hat zudem den Vorteil das freigewordene Finanzmittel zur Förderung verkehrsarmer Strukturen genutzt werden können.

Maßnahme	Ausgestaltung und Umsetzungsebene
Verankerung von Klimaschutz in der Verkehrs- und Siedlungsplanung und Verkehrs- und Klimaauswirkungsprüfung für alle Vorhaben	Bund: • Festlegung eines sektorspezifischen Klimaschutzzieles • Einbezug des sektorspezifischen Klimaschutzzieles als übergeordnetes Ziel in die Grundkonzeption der Bundesverkehrswegeplanung (BVWP) sowie Einbezug von Verkehrsvermeidungsstrategien in diese Länder/Kommune: • Verstärkte Ausrichtung der Zielhierarchie in den Verkehrsentwicklungs- und Siedlungsplanung an den Klimaschutzzielen • Bilanzierung der Klimaauswirkungen von Projekten in der Planungsphase
Reduzierung/ Abschaffung Pendlerpauschale	Bund: • Ersatzlose Streichung der Pendlerpauschale (von vorher 30 Cent je Kilometer)

Handlungsfeld Alltagsverkehr ökologisch sinnvoll verlagern

Teil A) Angebotsverbesserung Fahrrad- und Fußverkehr

Insbesondere in Ballungsräumen, wo 50 % aller Pkw-Fahrten kürzer als 5 km sind [Bundesregierung, 2007] besteht großes Potenzial, um Alltagsverkehr vom Auto auf Fuß- oder Fahrradverkehr zu verlagern [SRU, 2012]. Auch in den Niederlanden oder Kopenhagen, die heute als internationale Vorreiter beim Radverkehr gelten, initiierten bzw. unterstützten große Förderprogramme den Wandel [SRU, 2012]. Vor diesem Hintergrund werden im Folgenden Maßnahmen zusammengefasst, die den Fuß- und Fahrradverkehr attraktiver machen. Das umfasst insbesondere die Förderung bzw. das Aufstellen von Fuß- und Radverkehrskonzepten sowie den Auf- und Ausbau von Wegen, die Installation von Abstellanlagen und Wegweisungen.

Maßnahme	Ausgestaltung und Umsetzungsebene
Auf- und Ausbau Radverkehrsinfrastruktur	Bund: • Ausbau der Radverkehrsinfrastruktur an Bundesstraßen (als verantwortlicher Baulastträger) • Über die im NRVP beschriebenen Maßnahmen hinausgehend, stellt der Bund Fördermittel bereit, um Kommunen bei der Erstellung von Radverkehrskonzepten und bei Investitionen in die Infrastruktur zu unterstützen [Prenzel et al., 2014] • Schaffung von Richtlinien mit Berücksichtigung der Bedürfnisse von Pedelecs sowie Vereinheitlichung von Ladesysteme [BMVBS, 2012] Länder: • Ausbau der Radverkehrsinfrastruktur an Landesstraßen (als verantwortlicher Baulastträger) • Erstellung von Netzkonzepten für den Radverkehr bzw. von Landesradverkehrsplänen inklusive Radschnellwegen und Anknüpfungspunkten zum ÖPNV [ifeu, 2014b] • Definition von Standards für die Ausgestaltung von Wegweisungen [BMVBS, 2012] • Einführung landesweiter Vorgaben für die Anzahl und die Qualitätsstandards von Fahrradabstellanlagen in den Landesbauordnungen [BMVBS, 2012; Prenzel et al., 2014]. Kommunen: • Entwicklung von Radverkehrskonzepte • Verbesserung der Radverkehrsinfrastruktur (Wege, Abstellanlagen, Verleihsysteme, u.a.) [BMVBS, 2012; DStGB/ADFC, 2014] • Einführung von Qualitätsmanangementsystemen zur Radverkehrsförderung, z.B. BYPAD [Timpe et al., 2004]
Ausbau Fußverkehrsinfrastruktur	Bund: • Vereinfachte Errichtung von qualitativ hochwertigen Fußgängerüberwegen ermöglichen (Anpassung StVO, Richtline-Fußgängerüberwege • Förderung von Fußverkehrskonzepten sowie bei Infrastrukturinvestitionen • Einrichtung einer „Fußverkehrsakademie“ • Entwicklung eines Qualitätsmanagementsystem zur Fußverkehrsförderung Kommunen: • Aufstellen von Fußverkehrskonzepten und Berücksichtigung des Fußverkehrs als gleichwertigen Verkehrsträger • Verbesserung der Fußverkehrsinfrastruktur

Teil B) Angebotsverbesserung ÖPNV

Eine Angebotsausweitung im ÖPNV kann durch eine verbesserte Abdeckung des Bedienungsgebietes (mehr Linien, beispielsweise zur besseren regionalen Vernetzung, mehr Haltestellen, Einführung von „Ruftaxis“ im ländlichen Raum), eine höhere Reisegeschwindigkeit (mehr Direktverbindungen, Expresslinien, optimierte Umsteigezeiten, verbesserte Busbeschleunigung) sowie mehr Fahrten je Linie (z.B. eine höhere Bedienrate (Taktung) der Linien oder eine Ausweitung der Bedienzeiten) erfolgen. Des Weiteren kann die Qualität des ÖPNVs durch moderne Fahrzeuge, durch ein auch in Spitzenstunden ausreichendes Platzangebot, durch attraktivere Tarife und die Möglichkeit des Ticketing sowie durch den Abbau von Nutzungshemmnissen wie Barrierefreiheit, dynamischen Haltestelleninformationen, etc. gesteigert werden. Die aufgeführten Arten der Angebotsverbesserung haben gemein, dass sie zumeist nicht durch steigende Fahrgeldeinnahmen amortisierbar sind. Daher sind für eine Angebotsverbesserung des ÖPNVs zusätzliche Finanzierungen für die Aufgabenträger notwendig. Die im Folgenden aufgeführten Maßnahmen konzentrieren sich daher auf die Erschließung von zusätzlichen Einnahmequellen für den ÖPNV.

Maßnahme	Ausgestaltung und Umsetzungsebene
Fortführung und Steigerung der Förderung des ÖPNVs	Bund: • Fortführung des Bundes-GVFG (Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz) über 2019 hinaus zur Schaffung von Planungssicherheit bei Infrastrukturvorhaben [Bundesrat, 2015; VDV, 2014] • Ausweitung der Verwendung der GVFG-Mittel auf den Betrieb des ÖPNV • Reformierung und Erhöhung der Regionalisierungsmittel zur Förderung des SPNVs
Einbeziehung indirekter Nutzer	Bund: • Der Bund schafft den rechtlichen Rahmen zur Einbeziehung von indirekten Nutzern (auch „Drittnutzer“) in die Aufteilung der Kosten des ÖPNVs, beispielsweise in Form von ÖPNV-Erschließungsbeiträgen [Lieb, 2014; Maaß et al., 2015].

Teil C) Verkehr intelligent vernetzen

Eine bessere intermodale Vernetzung der unterschiedlichen Verkehrsmittel setzt Anreize zur ökologisch sinnvollen Verlagerung von Alltagsverkehr. Die Umsetzung umfasst die bauliche Optimierung bzw. Installierung von intermodalen Schnittstellen, die Optimierung des Angebots und der Infrastruktur. Eine wesentliche Rolle zur Erzeugung einer ökologisch sinnvollen Intermodalität besitzt dabei das Car-Sharing, da es den Nutzen des Autos (Flexibilität, Abdeckung) in intermodale Verkehrsketten bringt. Zudem eröffnet dies den Nutzern die gleichen Mobilitätsoptionen wie Autobesitzern, ohne zu der oft mit dem Autobesitz einhergehenden Auto-Monomodalität zu führen. Dabei ist noch zu prüfen, inwiefern diese Aussagen für das klassische (stationsgebundene) Car-Sharing auch auf das stationsungebundene Car-Sharing zutreffen.

Maßnahme	Ausgestaltung und Umsetzungsebene
Förderung Car-Sharing	Bund: • Parkplatzprivilegierung von Car-Sharing-Fahrzeugen zulassen • Steuerreduzierung Car-Sharing-Organisationen (Umsatzsteuer, Kfz-Steuer für Car-Sharing-Fahrzeuge) [Scholl et al., 2013] Länder/Kommunen: • Erstellung von Car-Sharing-Entwicklungsplänen [Sonnberger, / Gallego Carrera, 2012] • Aus- bzw. Aufbau der notwendigen Infrastruktur für eine bessere Vernetzung des Umweltverbunds, z.B. über Mobilpunkte [Glotz-Richter, 2013], Car-Sharing-Parkplätze (sobald vom Bund erlaubt) • Förderung ländliches Car-Sharing
Einfacher Zugang für kombinierte Nutzung verschiedener Verkehrsmittel des Umweltverbundes	Länder/Kommunen: • Entwicklung von Mobilitätskarten als benutzerfreundliches integriertes Entgeltsystem für den gesamten Umweltverbund (z.B. über Verkehrsverbünde) • Einrichtung von Mobilitätszentralen an zentralen Schnittpunkten des Umweltverbunds

Teil D) Restriktionen für MIV

Auf allen politischen Umsetzungsebenen bestehen Potenziale, die ausgeschöpft werden sollten, um den Anteil des MIV insbesondere am innerstädtischen Verkehrsaufkommen zu reduzieren. Zentraler Ansatzpunkt ist dabei gerade im innerstädtischen Bereich die Nutzungskonkurrenz um den vorhandenen Raum. Da der MIV (inklusive dem ruhenden Verkehr) im Vergleich mit dem ÖPNV sowie dem nicht motorisierten Verkehrsträgern flächenintensiver ist, kann über eine Umverteilung des Raumes hin zu Fahrrad-, Fuß- und öffentlichen Verkehr eine Verbesserung der Mobilität erreicht werden. Um mit dieser Umverteilung die gewünschten Effekte zu erzielen, ist diese mit geeigneten Maßnahmen zu begleiten: So kann ein flächendeckendes Parkraummanagement, welches zudem höhere Preise als heute üblich vom Nutzer abruft, einen starken Anreiz setzen, nicht mit dem eigenen Auto in die Stadt zu fahren, aber auch zur Vermeidung von Parksuchverkehr beitragen. Neben dem ruhenden MIV ist aber auch der fahrende MIV zu adressieren. Dabei sind neben dem Klimaschutz die Verkehrssicherheit sowie die Aufenthaltsqualität in den Städten wichtige Gründe für eine entsprechende Politik. Dazu ist einerseits das MIV-Aufkommen aktiv zu begrenzen, z.B. Zugangsbeschränkungen für sensible Stadtbereiche. Andererseits sollte der verbleibende MIV umgestaltet werden, beispielsweise durch die Einführung von Tempo 30 als Regelgeschwindigkeit und andere Maßnahmen zur Verkehrsberuhigung, beispielsweise in Form von „Shared Space“ oder „Begegnungszonen“.

Maßnahme	Ausgestaltung und Umsetzungsebene
Verteuerung/ Verknappung innerstädtischer Parkraum	Bund: • Erhöhung der Höchstsätze für Gebühren für Parkausweise in Bewohnerparkgebieten • Erhöhung der Höchstbeträge für Bußgelder bei ordnungswidrigem Parken Länder: • Abschaffung der Stellplatzpflicht in der Landesbauordnung • Erhebung von entsprechenden Parkgebühren, wenn Land Eigentümer von Parkflächen Kommunen: • Flächendeckende Bepreisung von Parkflächen • Anhebung der Gebühr für eine Stunde Parken über den Preis für eine Einzelfahrt im ÖPNV • Verknappung von Parkflächen im öffentlichen Raum • Installation von Quartiersgaragen anstatt Parkmöglichkeiten direkt vor den Wohneinheiten • Intensivierung der Kontrollen und entsprechenden Sanktionen, um die Implementierung der initiierten Änderungen zu gewährleisten
Stadtverträglicher MIV	Bund: • Einführung von Tempo 30 als Regelgeschwindigkeit in geschlossenen Ortschaften Kommunen: • Verfügung von Zugangsbeschränkungen für den MIV zu bestimmten Stadtgebieten (Innenstädte, besondere Wohnquartiere) • Reduktion der Straßenkapazität für den MIV • Ausweisung von verkehrsberuhigten Bereichen

Handlungsfeld Fernverkehr ökologisch sinnvoll verlagern

Teil A) Angebotsverbesserung ÖPFV

Im Fernverkehr ist der Ausbau des öffentlichen Personenverkehrs, also im Wesentlichen der Schienenpersonenfernverkehr (SPFV) und der Linienverkehr mit Fernbussen, ein zentraler Baustein für eine Verlagerung auf umweltverträglichere Verkehrsmittel. Dabei befinden sich die beiden öffentlichen Verkehrsmittel in unterschiedlichen Marktsituationen:

- Der SPFV ist seit dem Einstellen wesentlicher Interregio-Verbindungen Anfang der 2000er geprägt von der Konzentration auf Hochgeschwindigkeitsverbindungen und einem Rückzug aus der Fläche. Dieser Vorgang war bzw. ist verbunden mit einer deutlichen Steigerung der Ticketpreise (bezogen auf den Normalpreis). Das Angebot im SPFV wird derzeit nahezu komplett von der im Staatseigentum befindlichen DB AG eigenwirtschaftlich erbracht.
- Das Angebot im Linienverkehr mit Fernbussen ist seit der Liberalisierung Anfang 2013 stark auf 249 Linien bei 28 Betreibern bis Ende 2014 expandiert. Die Ticketpreise liegen mit 8,6 ct/km deutlich unter denen der Bahn, es wird aber mittelfristig von einer Marktkonsolidierung verbunden mit steigenden Ticketpreisen ausgegangen. [IGES, 2014]

Die DB AG hat auf die neu hinzu gekommene Konkurrenz mit der Ankündigung reagiert, ihr Fernverkehrsangebot bis 2030 um 25 % auszubauen[24]. Wesentlich aus Sicht des Bundes ist es daher,

- als Eigentümer der DB AG dahin zu wirken, dass diese ihre Ankündigungen entsprechend umsetzt,
- die für die Angebotsausweitungen als Voraussetzung genannten Infrastrukturmaßnahmen planmäßig fertig gestellt werden sowie
- den regulatorischen Rahmen entsprechend zu setzen, dass die Angebotsverbesserungen im SPFV auch zu einer Verlagerung vom MIV und vom Flugzeug führen, und nicht nur zulasten des Fernbusverkehrs gehen. Einen Beitrag dazu könnte z.B. eine Novellierung des Bundesreisekostengesetzes leisten.

Maßnahme	Ausgestaltung und Umsetzungsebene
Angebotsverbesserung ÖPFV	Bund: • Ausbau des Fernverkehrsangebotes auf der Schiene durch bessere Abdeckung der Fläche, mehr Direktverbindungen, niedrigerer Takt, günstige Preise für Basisangebote • Verbesserung der Reisequalität, beispielsweise durch verbesserte Fahrradmitnahme oder kostenlosen Internetzugang. • Erweiterung des Service, beispielsweise durch ein transparenteres und integriertes Preissystem inkl. E-Ticketing und geringeren Hürden beim Erwerb internationaler Fahrkarten oder kostenlose Leihfahrräder [Bracher et al., 2014; Öko-Institut, 2013d]
Novelle Bundesreisekostengesetz (BRKG)	Bund: • Der Bund etabliert im BRKG Anreize für umweltfreundliches Reisen [Bracher et al., 2003]. Beispielsweise könnte die Kilometerpauschale auf 15 ct/km gesenkt werden und unabhängig vom Verkehrsmittel gelten. Die Fahrtkosten für öffentliche Verkehrsmittel sollten in jedem Fall abgerechnet werden dürfen. [Öko-Institut, 2014b]

Teil B) Restriktionen für MIV

Der Pkw-Verkehr ist heute vor allem durch Abgaben in Form von Steuern (Mineralölsteuer und Kraftfahrzeugsteuer) belastet. Diese Steuern unterliegen zwar keiner Zweckbindung, aus dem Saldo aller von Verkehr bezahlten Steuern und Gebühren, sowie der verursachten Kosten (inklusive der externer Kosten), lässt sich jedoch eine im volkswirtschaftlichen Sinne angemessene Abgabenhöhe ableiten. Inklusive der externen Kosten besteht heute eine Unterdeckung der Kosten des Pkw-Verkehrs in Deutschland um rund 47 Mrd. € (2005) [UBA, 2010a]. Die mittelfristig sinkenden Steuereinnahmen durch die Effizienzentwicklung der Fahrzeuge und geringe Möglichkeiten zur Erhöhung der spezifischen Energiesteuersätze (wegen „Tanktourismus“, siehe [ifeu, 2014a]) könnten durch eine Umstel-

[24] Pressemittelung vom 18. März 2015 http://www.deutschebahn.com/de/presse/presseinformationen/pi_p/9074114/p20150318.html?start=0&itemsPerPage=20 (aufgerufen am 21.9.2015)

lung von einer Finanzierung über Steuern auf eine nutzerbasierte Finanzierung, d. h. über von den Nutzern erhobenen Gebühren, ausgeglichen werden. Eine Möglichkeit der Nutzerfinanzierung ist dabei das Erheben einer Pkw-Maut, also eine Gebühr für die Nutzung des Straßennetzes. Aufgrund der gegenüber flächenbezogenen (City-Maut) oder zeitbezogenen (Vignette) besseren Möglichkeiten, die Höhe der Gebühr an die Kosten bzw. an die Umweltwirkung zu koppeln, wird dabei eine fahrleistungsabhängige Maut vorgeschlagen. Eine weitere Möglichkeit die Unterdeckung des MIV bezüglich seiner gesellschaftlichen Kosten zu vermindern, liegt in dem Abbau von Subventionen. Eine wesentliche Subvention des MIV ist dabei die steuerliche Behandlung von sowohl dienstlich als auch privat genutzten Pkw, die insbesondere für Besserverdienende Steuervorteile bei überdurchschnittlicher Fahrleistung und der Nutzung von verbrauchsintensiven Fahrzeugen bietet.

Maßnahme	Ausgestaltung und Umsetzungsebene
Dienstwagenbesteuerung und Änderung Dienstwagenprivileg für Privatnutzung	Bund: • Steuerliche Absetzbarkeit an CO_2-Emissionen (laut CO_2-Monitoring) des Fahrzeuges koppeln [Bündnis 90/DIE GRÜNEN, 2012; FÖS, 2012] • Einführung einer absolute Obergrenze für die Absetzbarkeit von Betriebskosten, sodass die Anreize zur intensiven privaten Nutzung des Fahrzeugs begrenzt werden [Kunert/Radke, 2011; Werland, 2013]
Fahrleistungsabhängige Pkw-Maut	Bund: • Einführung einer fahrleistungsabhängigen Pkw-Maut unter den Aspekten geringer Erhebungskosten, Datenschutz sowie einer angemessen differenzierten Erfassung der Nutzungsweise (zur Ableitung der Höhe der externen Kosten und Internalisierung dieser für den jeweiligen Nutzer)

Handlungsfeld MIV effizienter gestalten

Neben der Vermeidung und Verlagerung von MIV stellt die ökologische Umgestaltung des MIV in Richtung Effizienz ein weiteres wesentliches Maßnahmenbündel dar. Im Folgenden wird insbesondere auf regulatorisch-technische Maßnahmen eingegangen. Ein Hauptziel besteht in der Förderung umweltfreundlicher Antriebstechniken. Zur Erreichung dieses Ziels sollte u.a. die CO_2-Nfz-Regulierung weiterentwickelt werden. Um die Diskrepanz zwischen ausgewiesenen und realen Emissionen und die Möglichkeiten, den Normverbrauch durch spezielle Maßnahmen positiv zu beeinflussen, zu minimieren, sollte NEFZ durch WLTP ersetzt werden, ohne den Grenzwert von 95 g CO_2/km im Jahr 2021 anzupassen. Der Flottenemissionsgrenzwert sollte über 2021 hinaus ambitioniert weitergeführt werden, beispielsweise auf 60 g CO_2/km im Jahr 2030 [BUND, 2014; Ika, 2014]. Außerdem sollte eine Bonus-Malus-Regelung für den Kauf von Fahrzeugen etabliert werden. An das Beispiel Frankreichs angelehnt werden Fahrzeuge, deren CO_2-Emissionen unterhalb gestaffelter Grenzwerte liegen (beispielsweise 20 bzw. 60 g CO_2/km) mit mehreren Tausend Euro bezuschusst, während nachteilige Fahrzeuge mit einem Malus von bis zu 8.000 € belegt werden, sodass das System kostenneutral gestaltet werden kann. Sowohl bei der CO_2-Nfz-Regulierung als auch bei der Bonus-Malus-Regelung sollte langfristig die gesamte Energieeffizienz inkl. aller Vorketten berücksichtigt werden [Mahler/Runkel, 2015; UBA, 2013b]. Diese Maßnahmen sollten von weiteren Maßnahmen flankiert werden, beispielsweise der Einführung restriktiverer Tempolimits auf Bundesautobahnen und Landstraßen. Die Senkung der Durchschnittsgeschwindigkeit führt zu geringeren Treibhausgasemissionen und erhöht dabei auch die Reichweite batteriebetriebener Fahrzeuge.

Maßnahme	Ausgestaltung und Umsetzungsebene
CO_2-Nfz-Regulierung weiter entwickeln	Bund/EU: • (Unterstützung der europaweiten) Umstellung auf WLTP (World Light Duty Test Procedure) als Standardverfahren zur CO_2-Emissionsermittlung • (Unterstützung zur europaweiten) Beibehaltung des Flottengrenzwerts von 95 g CO_2/km im Jahr 2021 trotz Umstellung auf WLTP • Fortschreibung des Flottenemissionsgrenzwerts mit 82 g CO_2/km im Jahr 2025 und 65 g CO_2/km im Jahr 2030
Bonus-Malus-Regelung	Bund: • Gestaffelte Bezuschussung des Kaufs von besonders effizienten Kfz, beispielsweise mit CO_2-Emissionen von weniger als 20 bzw. 60 g CO_2/km bei gleichzeitiger Belegung von ineffizienten Kfz mit einem Malus von jeweils bis zu mehreren Tausend Euro.
Tempolimits	Bund: • Einführung restriktiverer Tempolimits auf Bundesautobahnen (120 km/h) und Landstraßen (80 km/h) [UBA, 2010a]
Ausbau Ladeinfrastruktur und Privilegien für Elektrofahrzeuge	Bund: • Anpassung der Stellplatzverordnung Kommunen: • Ausnutzung der rechtlichen Möglichkeiten zur Privilegierung von Elektroautos im Rahmen des Elektromobilitätsgesetzes, beispielsweise durch Ausweisung von Stellplätzen für Elektroautos oder das Aufheben von Durchfahrverboten • Bereitstellung von Ladeinfrastruktur [Grausam et al., 2014; Zimmer et al., 2014]
Beschaffungsrichtlinien öffentliche Einrichtungen	Bund/Länder/Kommunen: • Bevorzugte Beschaffung von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben anhand des Leitfadens „Beschaffung von Elektro- und Hybridfahrzeugen“ [Grausam et al., 2014; KNB, 2015]

Handlungsfeld öffentlicher Verkehr effizienter gestalten

Analog zum MIV steht die Förderung alternativer Antriebe im ÖV im Vordergrund. Bei Linienbussen sind elektrische Antriebe besonders vorteilhaft, da die Bremsenergie beim häufigen An- und Abfahren genutzt werden kann und die Reduktion von lokalen Luftschadstoff- und Lärmemissionen in besonders sensiblen Innenstädten zum Tragen kommt. Die in den letzten Jahren bereits durchgeführte Förderung von Modellregionen und Einzelprojekten [BMVI/BMUB, 2014; Deutscher Bundestag, 2012] sollte in den kommenden Jahren durch attraktive Markthochlaufprogramme ergänzt werden. Um die Umsetzung von Effizienztechniken bei Fernlinien- und Reisebussen zu fördern, sollte für diese eine entfernungs- und emissionsabhängig Maut eingeführt werden. Dazu ist zunächst ein geeignetes Testverfahren zu etablieren [ifeu/TU Graz, 2015; SRU, 2012].

Maßnahme	Ausgestaltung und Umsetzungsebene
Förderung innovativer Antriebe und Techniken	Bund: • Fortführung von Forschungs-, Marktanreiz- und –hochlauf-Programmen für Busse mit alternativen Antrieben Kommunen: • Modernisierung der Busflotte mit alternativen Antrieben und weiteren Effizienzmaßnahmen, z.B. in den Bereichen Nebenaggregate, Leichtbau [ifeu/TU Graz, 2015] • Investition in moderne Straßen- und U-Bahnen mit Rekuperationstechnik [Kossina et al., 2014]
Maut für Reise-/Fernbusse und Differenzierung nach Effizienz	Bund: • Fahrleistungsabhängige Maut mit nach Effizienz und Emissionen differenzierten Beiträgen (dazu Entwicklung eines standardisierten CO_2-Testverfahrens notwendig)

4.5.1.2 Güterverkehr

Die Auswahl der Maßnahmen orientiert sich am Ziel des Vorhabens, klimaschutzrelevante Indikationen mit Blick auf den Güterverkehr außerhalb der technologischen und energetischen Bereiche erreichen zu können. Analog zum Personenverkehr zielen die Maßnahmenwirkungen auf das Vermeiden, Verlagern und Optimieren der Transportströme ab.

Der Fokus liegt dabei auf der Verlagerung und Optimierung, da im Gegensatz zum Personenverkehr das Vermeidungspotenzial im Güterverkehr als eher gering einzustufen ist. Der Begriff der Vermeidung wird hierbei eng gefasst im Sinne eines tatsächlichen Unterlassens von Transporten, was i.d.R. mit einer Vermeidung der hinter solchen Transporten stehenden Nachfrage verbunden ist.[25] Da der Güterverkehr jedoch nur als logistische Verknüpfung von Produktions- und Verbrauchsvorgängen agiert, müssten zur Vermeidung volkswirtschaftliche Vorgänge beeinflusst und verändert werden. Bereits die Hälfte des Güterverkehrsaufkommens ist als nicht substituierbar einzustufen: ca. 15 % der Nachfragemenge sind Konsumgüter zum kurzfristigen Verbrauch (insb. Nahrungsmittel), ca. 25 % sind Erze, Steine und Erden (insb. Baustellenaushub) und ca. 10 % sind sonstige Baustoffe. Auch künftig wird die Bevölkerung Nahrungsmittel benötigen, ebenso wie Wohnungen und Infrastrukturen. Bereits mit diesem simplen Beispiel lässt sich erahnen, wie gering das Potenzial zur eigentlichen Vermeidung ausfällt. Tatsächliche Nachfragevermeidung ist mit der Veränderung von Lebensstilen und Wertvorstellungen verbunden. Solche Überlegungen aber sind nicht Gegenstand des Klimaschutzszenarios Verkehr.

Der Fundus an Maßnahmen generiert sich aus bereits bekannten Instrumenten. Diese lassen sich den folgenden Handlungsfeldern zuordnen:

- Marktzugang und Marktregulierung,
- ökonomische Instrumente der Fiskalpolitik,
- Ordnungspolitik,

[25] Die vielfach weiter gefasste Begriffsdefinition des Vermeidens wird hier der Optimierung zugeordnet, indem bspw. die Veränderung der Zielwahl infolge Umlagerung von Produktionsprozessen sich auf die Transportweite niederschlägt.

- finanzielle Förderungen und Subventionen,
- Infrastrukturpolitik,
- Instrumente der Raum-und Verkehrsplanung,
- Informationspolitik und Bewusstseinsbildung.

Nachfolgend werden die im Rahmen des Klimaschutzszenarios berücksichtigten **nichttechnischen** Maßnahmen im Bereich Güterverkehr nach den oben aufgeführten Handlungsfeldern kurz erörtert – insb. hinsichtlich ihrer Ausgestaltung – und die wichtigsten verkehrlichen Wirkungen skizziert.

Die Auswahl der Maßnahmen ist i.Ü. mit dem UBA-Vorhaben „Finanzierung einer nachhaltigen Güterverkehrsinfrastruktur“ abgestimmt.

Handlungsfeld Marktzugang und Marktregulierung

Beim Marktzugang und der Marktregulierung steht – unter dem Vorzeichen der weiteren Liberalisierung des Güterverkehrsmarktes – der Schienengüterverkehr im Fokus. Allerdings sind auch Maßnahmen zum Straßengüterverkehr zu beachten, deren Umsetzung aus heutiger Sicht absehbar ist und wohlmöglich Auswirkungen auf den Modal Split besitzt.

Maßnahme	Erörterung und Ausgestaltung	Verkehrliche Wirkungen
Interoperabilität	• weitergehende Interoperabilität im internationalen, netzübergreifenden Schienengüterverkehr • Vereinheitlichung von Vorschriften zu Betriebsabläufen insb. bei Netzwechsel resp. Wechsel der Zuständigkeitsbereiche • Vereinfachungen der Zulassungen	• moderater Modal Shift im grenzüberschreitenden Verkehr infolge Produktivitätseffekten bei der Bahn
Trassenzuteilung	• neutrale Zuteilung der vorhandenen Trassen im Schienengüterverkehr, insb. zwischen (bestelltem) Regionalverkehr und dem Güterverkehr (andere Maßnahme als Trennung der Netze) • bis hin zu priorisierter Trassenzuteilung für den Güterverkehr auf ausgewählten Strecken (bspw. TEN-Korridore)	• höhere Kapazitäten führen zu erhöhter Planbarkeit und mehr Flexibilität im Schienengüterverkehr • hohes Potenzial zum Modal Shift infolge Produktivitätseffekten und Angebotssteigerungen
Lang-Lkw	• Zulassung von Lang-Lkw bis 25m • Fahrtberechtigungen nur auf dem dafür ausgewiesenen Positivnetz • damit sind keine Veränderungen der bestehenden Gewichtslimite verbunden	• Modal Shift-Wirkung Segment sehr unterschiedlich, jedoch insgesamt eher begrenzt • d.h. es braucht flankierende Maßnahmen, so dass der Modal Split sich nicht signifikant verändert (bspw. Lkw-Maut nach Fahrtlänge) • Annahme hier: nur minimale Rückverlagerung • stattdessen Ziel der Maßnahme: Verringerung der Fahrleistungen durch Optimierung der Fahrten (Auslastung, Bündelung)
Liberalisierung Kabotage	• weitere Liberalisierung der bestehenden Kabotage-Regelungen im Straßengüterverkehr	• Optimierung der Fahrten durch höhere Auslastungen und Verminderung des Leerfahrtenanteils

Handlungsfeld ökonomische Instrumente der Fiskalpolitik

Mit den fiskalpolitischen Maßnahmen wird die Besteuerung und weitere Abgabenpolitik fokussiert. Dabei steht die Lkw-Maut im Vordergrund aller Überlegungen. Anzumerken ist jedoch, dass die möglichen Ausweitungen der Lkw-Maut zu keiner Überinternalisierung führen dürften.

Maßnahme	Erörterung und Ausgestaltung	Verkehrliche Wirkungen
Lkw-Maut: Ausweitung auf weitere Netzelemente	• Großflächiger Einbezug weiterer Straßen des Bundesfernstraßennetzes • Einbezug weiterer Straßenkategorien über das Bundesfernstraßennetz hinaus (Landes-, Staats-, Kreis- und/oder Gemeindestraßen)	• moderater Modal Shift infolge Kostensteigerung im Straßengüterverkehr, wobei jedoch die Streckenanteile des noch nicht bemauteten Netzes bei den verlagerbaren Verkehren eher gering ausfallen • für Verkehre ohne Auswahlmöglichkeit kann die Maßnahme zu Optimierungen bei der Transportabwicklung führen (Einsparung von Kilometern, höhere Auslastung)
Lkw-Maut: Einbezug weiterer Fahrzeugkategorien	• Einbezug von Fahrzeugen unter 7,5 t zGG	• Optimierungen bei der Transportabwicklung in diesem Segment • aber: aufkommensbezogen wenig relevant, daher kein Modal Shift, zumal wenig Verlagerungspotenzial besteht
Lkw-Maut: Berücksichtigung von Verbrauchskategorien	• weitergehende Differenzierung der Mautsätze nach Normverbrauch der Fahrzeuge bzw. Fahrzeugkombinationen	• moderater Modal Shift infolge Kostensteigerung im Straßengüterverkehr
Lkw-Maut: Berücksichtigung von Fahrtlängen und/oder Auslastungen	• weitergehende Differenzierung der Mautsätze nach Fahrtlängen und/oder dem Auslastungsgrad • gegebenenfalls progressiv gestaffelt	• hohes Potenzial zum Modal Shift, insbesondere bei Einbezug der Fahrtlängen • Wirkung der Berücksichtigung der Auslastung eher gering, da vielfach die Volumenbegrenzung die Beladung determiniert
Energiesteuer	• Erhöhung der Steuersätze auf fossile Treibstoffe • Einbezug eines THG-Zuschlags	• geringfügiger Modal Shift infolge Kostensteigerungen, wobei analog Verbrauchskategorien die schnellere Flottenerneuerung kostentreibender sein dürfte • zu beachten: Erhöhung der Energiesteuersätze bereits im Referenzszenario enthalten

Handlungsfeld Ordnungspolitik

Mit der Ordnungspolitik sind bestimmte Regelungen der einzelnen Transportmärkte verbunden, welche über die zuvor dargestellten Bereiche der Marktzugangs und dezidierter fiskalpolitischer Maß-

nahmen hinausgehen. In erster Linie handelt es sich um Gebote und Verbote bezüglich der Abwicklung von Transporten.

Maßnahme	Erörterung und Ausgestaltung	Verkehrliche Wirkungen
Umweltzonen	• Einführung von Zero-Emission-Zones in städtischen Bereichen	• wirkt v.a. bei der Abwicklung der Straßengütertransporte infolge Fahrtenoptimierung (Kilometer, Auslastung) • ansonsten: zwar kostentreibend durch Zwänge zur technologischen Anpassung, jedoch mangels Alternativen nicht verlagerungswirksam
Benutzervorteile für alternative Antriebe	• vergleichbar der Umweltzonen, jedoch differenzierter • Differenzierung kann in der Art des Antriebs, der Höhe der Emissionen oder auch in der zeitlichen Zugänglichkeit liegen	• analog Umweltzonen, d.h. Wirkungen v.a. bei der Abwicklung der Straßengütertransporte infolge Fahrtenoptimierung (Kilometer, Auslastung)

Handlungsfeld finanzielle Förderungen und Subventionen

Die nichttechnischen Maßnahmen im Bereich der finanziellen Förderung fokussieren auf den Schienengüterverkehr. Sie haben zum Ziel, die Produktivität des Bahntransports zu erhöhen und damit einen Kostenvorteil gegenüber der Straße zu generieren. Wichtig ist jedoch, dass die Maßnahmen nachhaltig wirken, so dass diese im Sinne einer „Anschubfinanzierung“ langfristig gesehen wieder reduziert werden könnten.

Maßnahme	Erörterung und Ausgestaltung	Verkehrliche Wirkungen
Investitionszuschüsse für Umschlagsanlagen	• Ziel ist die Beseitigung des Flaschenhalses beim kombinierten Verkehr – den intermodalen Terminals	• sehr hohes Potenzial zum Modal Shift im KV-relevanten Segmenten infolge Produktivitätseffekten und Angebotssteigerungen für die Bahnunternehmungen und Operateure
Förderung innovativer Umschlagssysteme	• soll den Anteil des kombinierten Verkehrs erhöhen, indem Segmente angesprochen werden, die heute (vielfach technologisch bedingt) wenig Potenzial für intermodale Transporte besitzen • Grenzen werden jedoch durch die Gefahr von (wenig produktiven) Nischenlösungen gesetzt	• moderates Potenzial v.a. zur Verladung von (unbegleiteten) Straßengüterfahrzeugen (nicht kranbare Trailer) im langlaufenden Verkehr
Subventionierung des kombinierten Verkehrs	• Beiträge an die Operateure im kombinierten Verkehr • gegebenenfalls gestaffelt resp. differenziert nach Relationen oder Segmenten • auch durch Zweckbindung eines Teils der Mauteinnahmen denkbar	• anfänglich sehr hohes Potenzial zum Modal Shift im KV-relevanten Segmenten infolge Produktivitätseffekten und Angebotssteigerungen für die Bahnunternehmungen und Operateure • die Nachhaltigkeit des Modal Shifts muss aber durch andere Maßnahmen gesichert werden

Handlungsfelder der Infrastrukturpolitik

Mit der Infrastrukturpolitik sind v.a. Maßnahmen mit kapazitätssteigernden Effekten im Schienengüterverkehr verbunden. Die Verbindung zu den Finanzierungsinstrumenten ist hier offensichtlich.

Maßnahme	Erörterung und Ausgestaltung	Verkehrliche Wirkungen
Konzentration auf die Güterkorridore	• Mittelpriorisierung durch Fokussierung auf die Güterverkehrs-relevanten Korridore (i.d.R. die TEN-Korridore)	• Modal Shift infolge Produktivitätseffekten (Kapazitäten, Flexibilität) und Angebotssteigerungen
Elektrifizierung	• Elektrifizierung größerer Strecken mit Dieselbetrieb	• Produktivitätseffekte durch Betriebsvereinfachung, wobei die betroffenen Segmente bzw. Relationen begrenzt sind
Einführung Taktverkehr	• Taktbetrieb auch im Güterverkehr, d.h. Angebote mit festem Fahrplan und regelmäßigen Verbindungen • wichtig ist, dass die Zuverlässigkeit der Verbindungen gewährleistet ist	• einerseits hohes Potenzial zur Hebung von Produktivitätseffekten durch Optimierung der Betriebsabläufe • andererseits hohes Potenzial zur Erschließung neuer Nachfragemengen (Modal Shift) durch zuverlässiges, für die Verlader leicht verständliches Angebot
höhere Geschwindigkeiten im Bahnnetz	• schnellere Verbindungen durch den Einsatz entsprechender Wagen • ermöglicht v.a. die Erhöhung der Streckenkapazitäten durch höhere Kompatibilität mit dem schnellen Personenfernverkehr • allerdings: vielfach wird dann der (priorisierte) Regionalverkehr mit seinen Halten zum Kapazitätsengpass	• erhöht die Zuverlässigkeit der Verbindungen und damit die Planbarkeit • moderater Modal Shift möglich
längere Züge	• durchgehender Einsatz von 750m-Zügen durch gezielten Ausbau der Infrastruktur (Überholgleise, aber v.a. Umschlagsanlagen) – dort, wo noch nicht möglich • gegebenenfalls auf ausgewählten Relationen bzw. Segmenten Einsatz noch deutlich längerer Züge	• optimiert die Betriebsläufe und kann damit zu höheren Produktivitäten führen • allerdings eingeschränktes Marktpotenzial, allenfalls auf wichtigen Shuttle-Strecken im Seehafenhinterlandverkehr

Handlungsfeld mit Instrumenten der Raum-und Verkehrsplanung

Mit den Instrumenten der Raum- und Verkehrsplanung soll in erster Linie punktuell Einfluss auf die Abwicklung der Transportströme genommen werden.

Maßnahme	Erörterung und Ausgestaltung	Verkehrliche Wirkungen
Urbane Logistik	• Planungsinstrumente zur Förderung kooperativer City-Logistik-Vorhaben bzw. entsprechender Einrichtungen (Güterverkehrszentren o.ä.) • benötigt v.a. regulativen Druck, da die Optimierungspotenziale aus betriebswirtschaftlicher Sicht eher gering sind	• wirkt v.a. bei der Abwicklung der Straßengütertransporte infolge Fahrtenoptimierung (Kilometer, Auslastung) • verlagerungswirksam nur, wenn intermodale Transportprozesse resultieren bzw. eingebunden werden
Verkehrsauswirkungsprüfungen	• Auflagen für güterverkehrsintensive Einrichtungen	• moderater Modal Shift je nach Segment und Verlagerungspotenzial • zielt eher auf die Abwicklung der Straßengütertransporte mit Fahrtenoptimierung ab (Kilometer, Auslastung)
Förderung Regionalökonomie	• wirtschaftspolitisches Instrument zur Beeinflussung der Produktions- und Versorgungsprozesse	• kann zu Zielwahlveränderungen führen und damit v.a. die modalen Transportweiten verringern
Förderung regionaler Netzwerke und Cluster	• analog Förderung Regionalökonomie	• kann zu Zielwahlveränderungen führen und damit v.a. die modalen Transportweiten verringern

Handlungsfeld der Informationspolitik und Bewusstseinsbildung

Das Handlungsfeld der Informationspolitik und Bewusstseinsbildung zielt v.a. auf das Image von Unternehmen hinsichtlich der Umweltverträglichkeit ihrer Produktions- und Logistikprozesse ab. Zwingend sind jedoch Maßnahmen aus den anderen Handlungsfeldern, damit überhaupt entsprechende Angebote umgesetzt werden können.

Maßnahme	Erörterung und Ausgestaltung	Verkehrliche Wirkungen
Energielabel	• Einführung eines Labels analog Pkw für schwere und leichte Nutzfahrzeuge	• beschränkt • gibt möglicherweise Anstoß für Verlagerungsüberlegungen bei den Verladern
Zertifizierung	• Zertifizierung der Umweltauswirkungen der Transporte bzw. der produktspezifischen Logistikprozesse	• setzt Anreize zu Verlagerungen infolge entsprechender Einkaufsvorschriften der Verlader oder öffentlichem Wertewandel

4.5.1.3 Infrastrukturausbau Schiene als verkehrssektorübergreifendes Handlungsfeld

Zentrales Element für die Verlagerung von mehr Verkehr auf die Schiene ist über den Ausbau von Infrastruktur die Voraussetzungen für ein entsprechendes Angebot zu schaffen. Hier können entsprechende Instrumente, die auch eine langfristige Finanzierung sicherstellen hilfreich sein (siehe auch [UBA, 2010b]).

Maßnahme	Erörterung und Ausgestaltung	Verkehrliche Wirkungen
Priorisierung Bahnausbau	• Veränderung der Prioritätensetzung beim Infrastrukturausbau • stärkere Gewichtung der Belange des Schienengüterverkehrs	• je nach Relevanz der Strecken oder Knoten besteht Potenzial zum Modal Shift
Fondslösungen zur Infrastrukturfinanzierung	• neues Instrument zur Finanzierung (größerer) Infrastrukturvorhaben; hier v.a. für das Schienennetz • wird jedoch nur dann verkehrlich gesehen wirksam, wenn damit zusätzliche Mittel erschlossen werden; in Minimum werden die Finanzströme stabilisiert (Planungssicherheit)	• Kapazitätserhöhungen führen zu erhöhter Planbarkeit und mehr Flexibilität im Schienengüterverkehr • hohes Potenzial zum Modal Shift infolge Produktivitätseffekten und Angebotssteigerungen

4.5.1.4 Zwischenfazit zu den verkehrlichen Wirkungen

Personenverkehr

Im Personenverkehr steht eine Reihe von Maßnahmen zur Minderung der THG-Emissionen zur Verfügung, die vielfach schon seit Jahren bekannt sind. Wesentlich erscheinen daher Analysen, welche Hemmnisse eine umfassende Umsetzung dieser Maßnahmen verhindern. Zentral erscheint dabei, dass auf allen Umsetzungsebenen die Planungen an den Klimaschutzzielen ausgerichtet werden. Ist eine Strategie der Verkehrsvermeidung verbunden mit einem Bewusstseinswandel sowie einer entsprechenden Änderung der Raumstruktur, kann diese einen relevanten Beitrag zur Minderung der

Emissionen im Alltagsverkehr beitragen, ohne dass es zu einer Suffizienz im Sinne von weniger Mobilität kommt.

Im Fernverkehr konzentrieren sich die Maßnahmen zur Reduktion der MIV-Fahrleistung auf ökonomische Instrumente. Diese können effektiv zur Reduktion beitragen, wie die im Kapitel 4.5.2.1 dargestellten Elastizitäten zeigen, sind jedoch auch auf ihre soziale Ausgewogenheit zu prüfen. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund einer zunehmenden Spezialisierung in der Wirtschaft und damit tendenziell weiteren Pendelwegen bzw. verstreuteren sozialen Bezugspunkten zu sehen. Eine höhere Bepreisung des MIV sollte daher mit attraktiven Angeboten im öffentlichen Verkehr einhergehen, wobei dieses Angebot so zu gestalten ist, dass eine Induzierung von Neuverkehren im großen Stil unterbleibt (siehe Diskussion „Mobility Pricing“ in der Schweiz).

Güterverkehr

Die Wirkungsrichtungen zu den einzelnen Maßnahmen konzentrieren sich einerseits auf mögliche Verlagerungen von der Straße zur Schiene (modale Nachfrage) und andererseits auf die Optimierung des (verbleibenden) Straßengüterverkehrs (Verkehrs- und Fahrleistungen). Zur Verlagerung sind sowohl Push- wie auch Pull-Maßnahmen wirksam. Wichtigstes Instrument auf der Straßenseite ist die Lkw-Maut und ihre mögliche weitere Ausweitung und Ausdifferenzierung. Bahnseitig sind es diverse Infrastrukturmaßnahmen zur Erhöhung der Kapazitäten von Strecken, Knoten und Umschlagsanlagen, ggf. gezielt gefördert (Fördermaßnahmen, Subventionen) oder mit ökonomischen Instrumenten unterstützt. Die Optimierung des Straßengüterverkehrs mit fiskalpolitischen und ordnungsrechtlichen Instrumenten zielt i.d.R. auf die bereits durch den Wettbewerb geförderte Effizienzsteigerung.

Die Wirkungshöhe ist immer Segment-spezifisch zu betrachten. Dieser Anforderung entsprechend wurde das Wirkungsmodell zur Operationalisierung der nichttechnischen Maßnahmen im Güterverkehr konzipiert.

4.5.2 Vorgehen zur Operationalisierung der Maßnahmen

4.5.2.1 Personenverkehr

Für die Abschätzung der Maßnahmenwirkung im Personenverkehr ist eine detaillierte Segmentierung der Verkehrsleistung nach Altersgruppe, Verkehrsmittel und Entfernung im Zeitverlauf erstellt worden, die auch Basis für die Entwicklung der Verkehrsleistung im Referenzszenario nach 2050 ist (siehe Kapitel 5.2.1). Aufbauend auf einer Literaturanalyse sind die Segmente für die Maßnahmenwirkung wieder zu den Gruppen

- Alltagsmobilität (alle Wege < 50 km)
- Fernmobilität (alle Wege > 50 km)

aggregiert worden. Für eine Abschätzung der Plausibilität der Maßnahmenwirkung ist wiederum die größtmögliche Segmentierung gewählt worden. Dieses Vorgehen kann dabei nur eine grobe Abschätzung der Wirkungen der vorgeschlagenen Maßnahmen darstellen, die jedoch aufgrund der Schwerpunktsetzung des Projektes auf den Güterverkehr für den Personenverkehr vertretbar ist. Zudem existieren zwei zentrale Probleme für mögliche komplexere Modellansätze (z.B. klassische Verkehrsmodelle, Mikrosimulationsmodelle, Agenten-Basierte-Modelle, System-Dynamics-Modelle), die bei deutlich höheren Aufwand nur zu begrenzten Nutzengewinn führen: Zum einen der tendenziell höhere Bedarf an differenzierten Eingangsdaten, bei gleichzeitig hoher Unsicherheit dieser Daten in der Abschätzung bis 2050. Zum anderen fehlendes Wissen über die quantitative Maßnahmenwirkung der ausgewählten Maßnahmen.

4.5.2.2 Güterverkehr

Zur Operationalisierung der Maßnahmen im Güterverkehr wurde ein makroökonomisch orientiertes Wirkungsmodell eingesetzt Dieses Wirkungsmodell wurde auch im parallel durchgeführten UBA-Vorhaben „Finanzierung einer nachhaltigen Güterverkehrsinfrastruktur“ (INFRAS, Fraunhofer-ISI 2016) angewandt. Die Verwendung eines klassischen Verkehrsmodells war im vorliegenden Vorhaben aufgrund der finanziellen und zeitlichen Projektressourcen nicht möglich. Allerdings spricht auch inhaltlich einiges für den Einsatz eines makroökonomischen Wirkungsmodells. Denn: Klassische Verkehrsmodelle stoßen bei der Abbildung des Güterverkehrs und entsprechender Maßnahmen an methodisch bedingte Grenzen.[26] Der makroökonomische Ansatz stellt eine Zeitreihen-basierte Sichtweise in den Vordergrund (im Gegensatz zu Verkehrsmodellen, welche i.d.R. mit Zeitausschnitten agieren). Der Vorteil des Einbezugs von Zeitreihen liegt insbesondere bei Langfristbetrachtungen darin, dass die Vergangenheitsentwicklungen einbezogen und eventuelle Trendbrüche erkannt werden können.[27]

Das Wirkungsmodell differenziert den Güterverkehr in Teilsegmente (vgl. Abbildung 26). Der Grad der Differenzierung orientiert sich einerseits an der Datenverfügbarkeit und andererseits an der inhaltlichen Sinnhaftigkeit einer solchen Segmentierung. Für die Modellierung kommt folgende Segmentierung zur Anwendung:

- 4 Hauptverkehrsverbindungen (HVV): Binnenverkehr, Empfang (Import), Versand (Export), Durchgangsverkehr (Transit),
- 10 Warengruppen[28] in Anlehnung an die Güterklassifikation nach NST 2007[29],
- 3 Modi (Landverkehrsträger Schiene, Straße und Binnenwasserstraße mit den Verkehrsmitteln Bahn, Lkw und Binnenschiff).

---

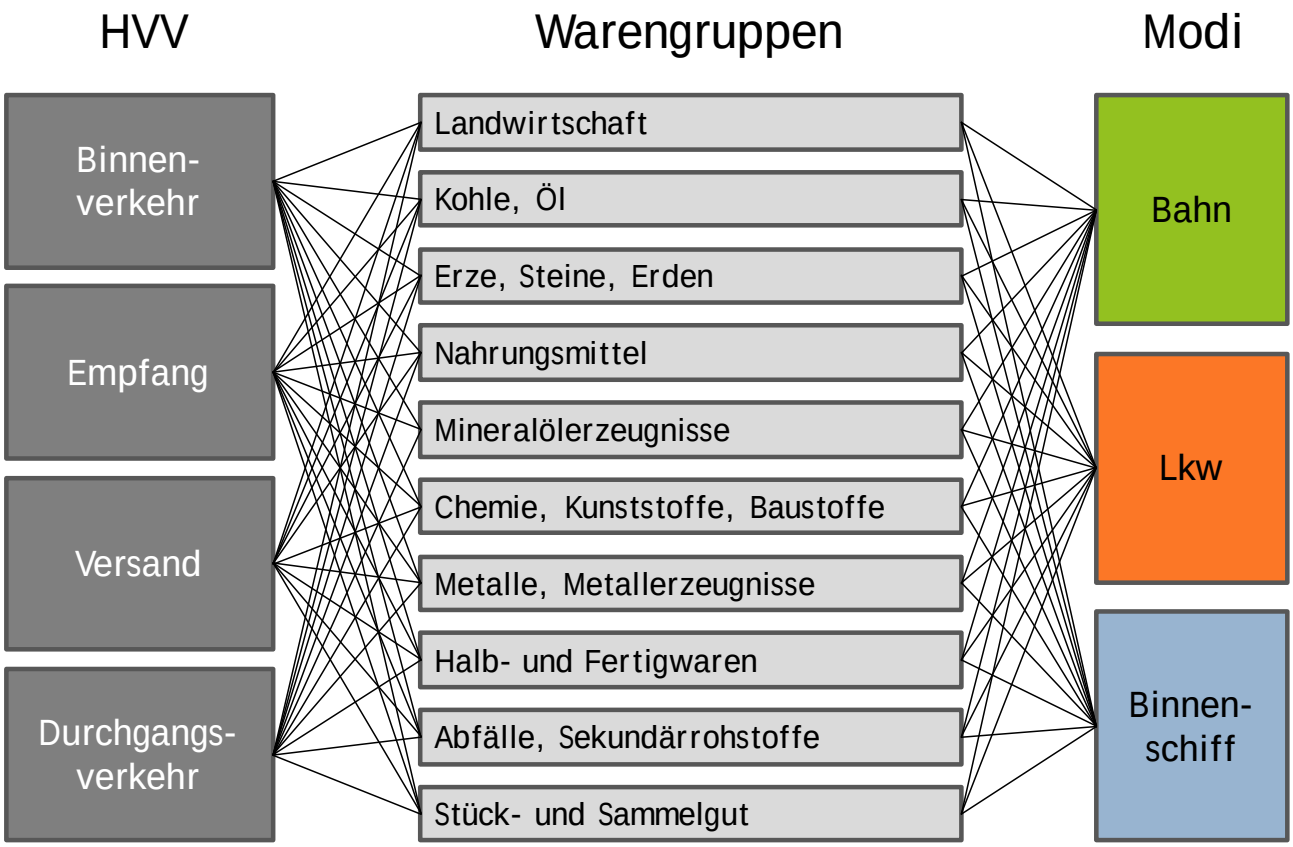
[26] V.a. im Rahmen der Verkehrsmittelwahl, die in klassischen Modellen mit einer nachfragebezogenen Kostenelastizität operieren. Abgesehen von der Fragwürdigkeit der in solchen Kostenfunktionen eingehenden Kenngrößen und Parameter (Woher stammen die Kosten? Sind die Kosten eigentlich wahlentscheidend insbesondere im Vergleich zu den Preisen? etc.) sind die realen Entscheidungsvorgänge im Güterverkehr komplexer als im Personenverkehr, da die Anzahl an Variablen deutlich höher ist. Hier kommen nicht nur kosten- oder preisgetriebene Faktoren in die Auswahl, sondern auch Fragen der Verfügbarkeit, der Qualität und Lieferfähigkeit bis hin zu gewachsenen Beziehungen zwischen Verladern, Transporteuren und Empfängern.
s.a. ARE 2014: Evaluierung der nationalen Güterverkehrsmodellierung, Bundesamt für Raumentwicklung im Eidgenössischen Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, Bern 2014.

[27] Im Gegensatz dazu konzentriert sich bspw. der Bericht zur VVP 2030 mit 2010 und 2030 [BVU et al. 2014] immer nur auf die zwei Zeitscheiben der „Mikroprognose“ (Zitat VVP 2030) mittels klassischer Verkehrsmodellierung. Im Bericht zur VVP 2030 wird nicht auf retrospektive Entwicklungen oder Trends eingegangen, obwohl laut Methodenbeschrieb eine Makroprognose erstellt worden ist. . Im vorliegenden Vorhaben wurden alle Segmente in entsprechende Zeitreihen eingepasst. Dabei zeigten sich in der VVP 2030 bei einigen Segmenten Brüche bzw. Umkehrungen der retrospektiven Entwicklungen, deren Hintergründe sich zumindest mit der Berichterstattung zur VVP 2030 nicht erschließen lassen.

[28] Die 10 Warengruppen stellen Aggregate der 20 Abteilungen nach NST 2007 dar, wobei sich die Aggregation an der Verfügbarkeit entsprechender Zeitreihen orientiert; diese wird durch die Statistik zum Güterkraftverkehr des KBA vorgegeben, welche keine weitere Disaggregation zulässt.

[29] Nomenclature Uniforme de Marchandises pour les Statistiques de Transport (Einheitliches Verzeichnis der Güterverkehrsstatistik): Erfasst werden 20 Abteilungen von Gütertransporten.

Abbildung 26 Segmentierung des Güterverkehrs im Wirkungsmodell



Eigene Darstellung.
HVV: Hauptverkehrsverbindungen entsprechend der Destatis-Güterverkehrsstatistik mit Binnenverkehr, Empfang (Import), Versand (Export), Durchgangsverkehr (Transit).

Mit dieser Segmentierung werden 40 Teilmärkte gebildet (4 HVV x 10 Warengruppen), in denen jeweils drei Verkehrsmittel zur Anwendung kommen. In dieser bottom up-Sicht liegen die Vorteile des Wirkungsmodells:

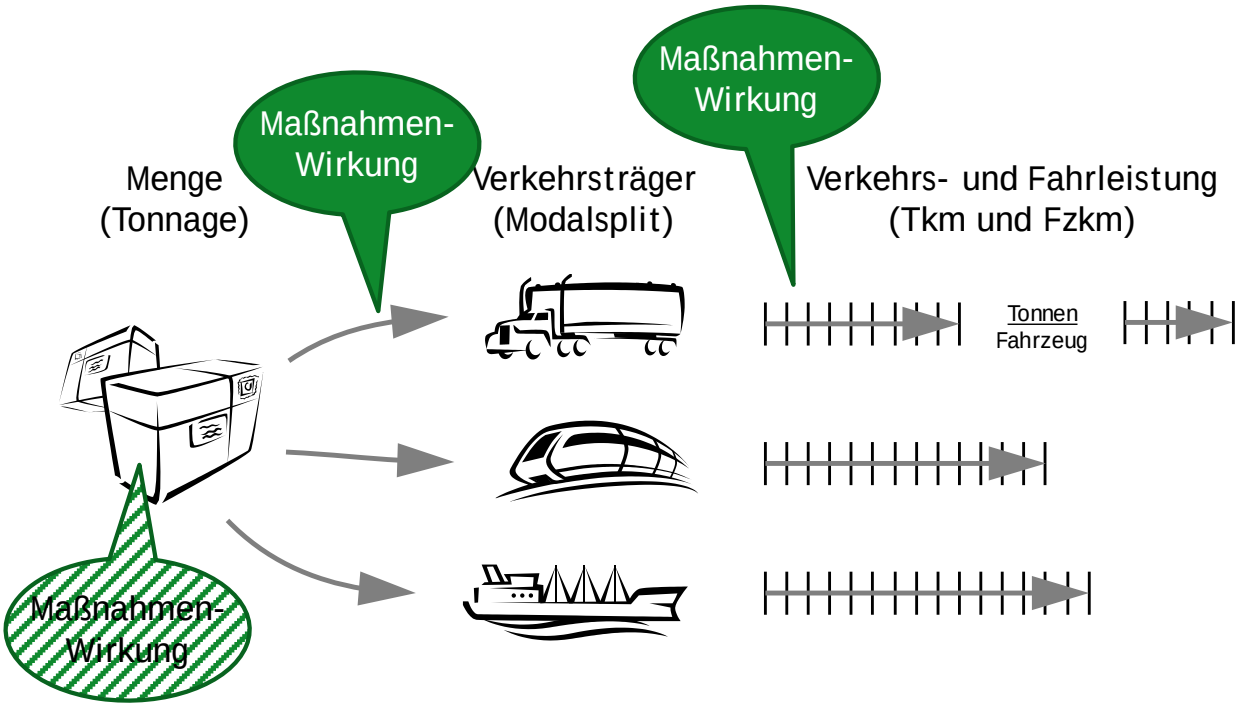
- Möglichkeit der differenzierten Abbildung der Maßnahmenwirkungen je nach Teilsegment und der darin geltenden, marktbedingten Zusammenhänge und Logistikprozesse,
- durchgehende Vergleichbarkeit der einzelnen Maßnahmenhebel und -wirkungen zwischen den einzelnen Teilsegmenten, so dass die wichtigsten Einflüsse auf die resultierende Gesamtentwicklung (inhaltlich) erklärt werden können.

Das Wirkungsmodell selbst ist vierstufig aufgebaut (siehe Abbildung 27). Es betrachtet – in genau dieser Reihenfolge – das Aufkommen insgesamt, den Modal Split sowie die Verkehrs- und die Fahrleistung. Dieser Ansatz geht davon aus, dass Güterverkehr nur das Resultat wirtschaftlicher Vorgänge ist. Die Nachfrage – in Form des Güterverkehrsaufkommens in Tonnen – entsteht beim industriellen oder privaten Verbraucher[30]. Die Bewältigung der Nachfrage wird durch die Verknüpfungen zwi-

[30] Verbraucher im Sinne des Endverbrauchs oder zur Weiterverarbeitung. Inkludiert sind aber auch sekundäre Nachfragemengen, die im Rahmen der Produktion entstehen, ohne eigentlicher Bestandteil des Produkts zu sein (bspw. Abfälle).

schen Produzenten und Verbrauchern determiniert. Dabei stehen dann Verkehrsmittelwahl (resultierend: Modal Split) sowie Verkehrs- und Fahrleistungen im Vordergrund. Die oben benannten Maßnahmen fokussieren auf diese drei letzteren Stufen des Wirkungsmodells (s.a. nachfolgender Exkurs).

Abbildung 27: Wirkungsmodell Güterverkehr



EXKURS: Gesamtmodale Nachfragewirkungen (Stufe 1 des Wirkungsmodells)

Unter dem Stichwort des „Vermeidens“ sind theoretisch auch Veränderungen der (gesamtmodalen) Nachfragemenge denkbar. Praktisch bedeutet dies jedoch, dass sich Verbraucherverhalten oder Produktstrukturen verändern müssen. Die Wirkungsabschätzung entsprechender Maßnahmen übersteigt jedoch die Möglichkeiten des hier behandelten Vorhabens bei weitem. Daher fokussieren die Maßnahmen wie oben beschrieben auf die Bereiche Modal Split sowie Verkehrs- und Fahrleistungen. Die vielfach ebenfalls unter dem Begriff der „Vermeidung“ subsummierte Zielwahl, d.h. die Vermeidung von „unnötigen“ Transportvorgängen innerhalb der Wertschöpfungskette wird im Wirkungsmodell mit der Stufe der Verkehrsleistung und der darin diskutierten modalen Transportweite unter dem Stichwort der „Optimierung“ erfasst.

Dennoch wurde im Rahmen des Klimaschutzszenarios auch eine Anwendung der ersten Stufe des Wirkungsmodells vorgenommen. Dies, um mögliche Alternativpfade der gesamtmodalen Nachfrageentwicklung gegenüber dem Trendpfad auszuloten. Dabei konnten Warengruppen identifiziert werden, in denen tatsächlich abweichende Entwicklungen denkbar wären. Jedoch hat sich auch gezeigt, dass diese abweichenden Entwicklungen in beide Richtungen – mehr oder weniger Nachfrage – möglich sind und in Summe sich diese alternativen Entwicklungen in etwa ausgleichen würden.

Modal Split (Stufe 2 des Wirkungsmodells)

Zur Ableitung der Entwicklungen hinsichtlich der Aufteilung der gesamtmodalen Nachfragemenge auf die drei Verkehrsmittel Bahn, Lkw und Binnenschiff kommen quantitativ und qualitativ orientierte Verfahren zur Anwendung. Zentraler Punkt ist jedoch immer der Vergleich der Prognoseentwicklung mit der Entwicklung in der Vergangenheit und mit der des Trendpfades. Schlussendlich mündet die Diskussion aller zur Anwendung gelangenden Verfahren in eine von Experten vorgenommene Einschätzung.

Zur quantitativ gestützten Orientierung kommen folgende Verfahren zur Anwendung:

- *Nachfrageelastizität infolge Kostenveränderungen*
  Jede Modal Split-relevante Maßnahme wird hinsichtlich ihrer Folgen auf die modalen Transportkosten[31] eingeschätzt. Die relative Veränderung der Kosten wird mit einer (modal- und ggf. segmentspezifischen) Elastizität[32] verrechnet, welche die Implikationen auf die modale Nachfrage wiedergeben. Die Höhe der maßnahmenspezifischen Kostenveränderung wird über das Produktivitätspotenzial der jeweiligen Maßnahme abgeschätzt, d.h. es wird diskutiert, wie sich die Kostenstrukturen des jeweils betroffenen Verkehrsmittels bezogen auf einen typischen Transportvorgang verändern (in Euro je Tonnenkilometer mit der Differenzierung nach Personal-, Betriebs-, Energie- und Infrastrukturbenutzungskosten).
- *Zusammenhang zwischen modaler und gesamtmodaler Nachfrageentwicklung*
  Die retrospektive modale Nachfrageentwicklung wird in jedem Segment auf einen Zusammenhang zur jeweils gesamtmodalen Nachfrageentwicklung getestet. I.d.R. zeigen sich hier gut abgestützte Zusammenhänge, so dass die teilmodalen Nachfragemengen aus den gesamtmodalen Prognoseentwicklungen funktional abgestützt abgeleitet werden können. Die daraus resultierenden Modal Split-Pfade nehmen i.d.R. den (langfristigen) Trend des in die Funktion eingehenden Retrospektivzeitraums auf. Mit Blick auf die Maßnahmen ist dann abzuschätzen, ob diese bereits Bestandteil der Vergangenheitsentwicklungen waren oder erst künftig wirken werden, so dass daraus Hinweise auf mögliche, über den Trend hinausgehende Verschiebungen gewonnen werden können.

Zur qualitativ gestützten Diskussion sind folgende Punkte relevant:

- *Diskussion der Vergangenheitsentwicklung*
  Der Verlauf der modalen Anteilspfade in der Vergangenheit wird genauestens analysiert. Ziel ist es, mögliche Trendbrüche resp. Wendepunkte oder Verlaufsmuster zu erkennen (bspw. Anteilsanstieg in Phasen der Hochkonjunktur und Einbrüche in wirtschaftlich schwierigen Jahren). Daraus lässt sich im Modell ein Spektrum an möglichen künftigen Entwicklungen ableiten. Die infrage kommenden Maßnahmen sind dann darauf zu prüfen, inwiefern sie diese jeweiligen Pfade stützen oder gar akzentuieren – dies immer im Vergleich zum Trendpfad und den darin implizier-

---

[31] Die Transportkosten stehen stellvertretend für die eigentlich zur Modalwahl relevanten Transportpreise. Informationen zu Transportpreisen – erst recht modal- und segmentspezifisch – sind jedoch nur sehr spärlich, auf jeden Fall nicht durchgehend verfügbar. Daher werden– wie in klassischen Verkehrsmodellen auch – die Kosten als Annäherung an die Preise verwendet. Da die Nachfrageelastizitäten auf Veränderungen der Kosten abstellen, ist die Annäherung vertretbar, da Kostenveränderungen i.d.R. auch entsprechende Preisveränderungen mit sich bringen.

[32] Die Elastizitäten sind der Literatur entnommen. Hauptquelle ist dabei die VVP 2030, in welchem die Modalsplit-Modelle ebenfalls mit entsprechenden Nachfrageelastizitäten auf Kostenveränderungen operieren. Bestimmt werden solche Elastizitäten mit sogenannten stated-preference-Befragungen, in denen die entscheidenden Personen auf eine fiktive Entscheidungssituation hinsichtlich ihrer Präferenz abgefragt werden.

ten Maßnahmenwirkungen. Das Ergebnis ist in Prozentpunkte einer möglichen (zusätzlichen) Verlagerung festzuhalten.

- *Diskussion der Entfernungsbereiche*
  Für jedes Segment wurden die modalspezifischen Entfernungsverteilungen ermittelt (Anteile der Tonnagen nach Entfernungsbereichen). Wurden bei der Maßnahmendiskussion Wirkungen identifiziert, welche Veränderungen in den Entfernungsverteilungen beinhalten, so wurde abgeschätzt, welche Anteile der in diesen Bereichen bislang tätigen Verkehrsmittel eventuell verlagert werden können. Hintergrund dieser Diskussion ist u.a. die Annahme im Weißbuch Verkehr, dass die Bahn auch auf kürzeren Distanzen, d.h. ab ca. 300 km, bei entsprechenden Mindestmengen und gegebenenfalls flankierenden Maßnahmen wirtschaftlich produzieren kann; diese Entfernungsgrenze kann branchenspezifisch unterschiedlich hoch ausfallen.

Hintergrund der Verwendung von verschiedenen Verfahren zur Ableitung des Modal Splits ist die Tatsache, dass es nicht einen allein entscheidenden Faktor zur Modalwahl gibt. Stattdessen kommen erfahrungsgemäß unterschiedlichste Determinanten ins Spiel, welche eine mathematisch einwandfrei abbildbare Modalwahl nicht zulassen.

Im Gegensatz zum Referenzszenario aus der VP 2030 kommen beim Klimaschutzszenario keine kapazitiven (infrastrukturbedingten) Beschränkungen zur Anwendung. Das heißt, die Wirkungen der nichttechnischen Maßnahmen werden aus einer rein nachfragebezogenen Sichtweise betrachtet. Damit zeigt das Klimaschutzszenario das Potenzial möglicher Maßnahmen auf, ohne von vornherein durch infrastrukturelle Engpässe beeinflusst zu werden, deren Beseitigung erst eine Folge der hier quantifizierten Entwicklungen darstellen kann.

Verkehrsleistung (Stufe 3 des Wirkungsmodells)

Die Veränderung der Verkehrsleistung im Anschluss an die Ableitung der modalen Nachfragemengen ermittelt. Zur Operationalisierung werden die segmentspezifischen modalen mittleren Transportweiten diskutiert. . Für die Retrospektive lässt sich die Entwicklung dieser Transportweiten ermitteln und in entsprechenden Diagrammen veranschaulichen. Die Fortführung dieser Transportweiten (in km) ergibt in Verbindung mit den oben ermittelten Nachfragemengen (in t) die jeweils segmentspezifische Verkehrsleistung (in tkm)Auch hier wird aus methodischen Gründen ein quantitatives Verfahren mit qualitativen Diskussionen verknüpft:

- *Quantitativ: Zusammenhang Verkehrsleistung und Aufkommensentwicklung*
  Die retrospektive modale Verkehrsleistungsentwicklung wird in jedem Segment auf einen Zusammenhang zur jeweils modalen Nachfrageentwicklung getestet. Dabei zeigen sich auch hier i.d.R. gut abgestützte Zusammenhänge zwischen Aufkommen in Tonnen (unabhängige Variable) und Verkehrsleistung in tkm (abhängige Variable). Die daraus mit der Nachfrageprognose ableitbare Leistungsentwicklung gibt dann zumindest einen funktional abgestützten Ausblick auf die weitere Entwicklung der mittleren Transportweite. Damit gilt es dann abzuschätzen, inwieweit die Implikationen auf die Transportweite aus den Maßnahmen darin bereits berücksichtigt sind oder nicht. Dabei hilft dann auch die qualitative Diskussion.
- *Qualitativ: Diskussion der Vergangenheitsentwicklung*
  Der Verlauf der Transportweitenentwicklungen in der Vergangenheit wird analog der Modal Split-Diskussion genauestens analysiert. Ziel ist es, mögliche Trendbrüche resp. Wendepunkte oder Verlaufsmuster zu erkennen und mögliche Zusammenhänge zu dahinter stehenden Veränderungen in den Logistikprozessen herzustellen. Die infrage kommenden Maßnahmen sind darauf zu prüfen, inwiefern sie diese jeweiligen Veränderungen stützen oder gar akzentuieren – dies immer im Vergleich zum Trendpfad und den darin implizierten Maßnahmenwirkungen. Das Ergebnis ist in Zu- oder Abnahmen von Kilometern festzuhalten.

- *Diskussion der Entfernungsbereiche*
  Die Argumentation zur Modal Split-Diskussion mit Blick auf die modalspezifischen Entfernungsverteilungen ist hier aufzunehmen. Wurden bei der Maßnahmendiskussion Wirkungen identifiziert, welche Veränderungen in den Entfernungsverteilungen beinhalten, so ist die entsprechende Wirkung in Form von Zu- oder Abnahmen in Kilometern abzuschätzen.

Fahrleistung (Stufe 4 des Wirkungsmodells)

Zur nachgelagerten Quantifizierung der Umweltwirkungen benötigen die entsprechenden Modelle im Bereich des Straßengüterverkehrs die Fahrleistungsentwicklungen (in Fahrzeugkilometer). Dazu wurde im Wirkungsmodell der Zusammenhang zwischen Verkehrs- und Fahrleistung mit der Transmissionsgröße der mittleren Beladung in Tonnen je Fahrzeug betrachtet. Aus Gründen der Datenverfügbarkeit ist es nicht möglich, diese Beladungsdiskussion in den 40 Teilsegmenten zu führen. Stattdessen wird die gesamte Fahrleistung des Straßengüterverkehrs nach Fahrzeugklassen differenziert. Entsprechend wird auch die Verkehrsleistung aufgeteilt. Dabei werden die Fahrzeugklassen den für sie wichtigsten Teilsegmenten zugeordnet, so dass die fahrzeugklassenspezifischen Verkehrsleistungen von den jeweiligen Verkehrsleistungsentwicklungen der einzelnen Segmente abgeleitet werden können.

Die Diskussion der Beladung der einzelnen Fahrzeugklassen erfolgt entlang der Analyse der retrospektiven Entwicklungen. Diese Entwicklungen werden wie bei der Modal Split- und der Transportweitendiskussion genauestens analysiert und auf mögliche Implikationen der einzelnen Maßnahmen diskutiert. Eventuelle Veränderungen der mittleren Beladungen werden als Zu- oder Abnahmen in Tonnen je Fahrzeug hinterlegt und mit der Verkehrsleistungsprognose verrechnet.

Umsetzung des Wirkungsmodells

Umgesetzt wurde das Wirkungsmodell in einem eigens für das Vorhaben aufgebauten Anwendungstool (basierend auf dem Tabellenkalkulationsprogramm Excel der Firma Microsoft). Darin sind alle notwendigen verkehrlichen und sozioökonomischen sowie angebotsbeschreibenden Inputdaten erfasst – inklusive des VVP 2030-Mengengerüsts und des Trendszenarios bis 2050.

Die quantitativ gestützten Verfahren werden mit entsprechenden Funktionen ausgeführt, während für die qualitative Diskussion entsprechende Eingabemöglichkeiten vorgesehen sind. Die Analyse und Prognose wird im Tool mit vielfältigen Abbildungen unterstützt. Im Gegensatz zu klassischen Verkehrsmodellen gestattet dieses einfache Handling eine rasche Analyse und Anwendung des makroökonomischen Wirkungsmodells, so dass bei Bedarf auch weitere Sensitivitäten oder Szenarien mit vergleichbar geringem Aufwand diskutiert und quantifiziert werden können.

5 Referenzszenario

5.1 Entwicklung bis 2030

Zur Abschätzung der möglichen zukünftigen Entwicklung des verkehrsbedingten Energieverbrauchs und der Emissionen wurde in TREMOD ein Trendszenario bis zum Jahr 2030 definiert. Das Trendszenario soll auf aktuellen Verkehrsleistungsprognosen aufbauen und alle umweltrelevanten politischen Vorgaben, deren Umsetzung beschlossen ist, abbilden. Es sind alle wichtigen Beschlüsse berücksichtigt, die bis Mitte 2014 in Kraft getreten sind.

Das Szenario basiert auf der Verkehrsleistungsentwicklung der Verkehrsverflechtungsprognose 2030 (VVP 2030) [BVU et al., 2014], die seit Juni 2014 vorliegt.

Die vorgegebenen Verkehrsleistungen wurden in TREMOD umgelegt auf Fahrleistungen und Betriebsleistungen mit den entsprechenden Anteilen der verschiedenen Fahrzeugkategorien und Traktionsarten.

Alle Annahmen zur Entwicklung der Fahrzeugflotten und -techniken sowie der Effizienzentwicklung sind in dieser Untersuchung Grundlage des Referenz- und Klimaschutzszenarios und wurden bereits im Kapitel 4.1 beschrieben.

5.1.1 Entwicklung der Verkehrsleistungen

Personenverkehr

Die Verkehrsprognose 2030 geht beim motorisierten Individualverkehr zwischen 2010 und 2030 von einer Zunahme von knapp 10 % aus. Beim Öffentlichen Straßenpersonenverkehr (Busse, kommunaler Schienenverkehr) sind die Tendenzen ähnlich, doch ist der Anstieg bis 2030 geringer als beim MIV.

Der Luftverkehr nimmt noch um knapp 79 % zu (bezogen auf den gesamten abgehenden Verkehr gemäß Standortprinzip). Die Zunahme im innerdeutschen Luftverkehr ist mit +15 % deutlich geringer.

Tabelle 38: Entwicklung der Personenverkehrsleistung 2010-2030 in der „Verkehrsverflechtungsprognose 2030“

In Mrd. Pkm	MIV	ÖSPV	Eisenbahn	Luftverkehr
2010	902,4	78,1	84,0	192,9
2030	991,8	82,8	100,1	344,7
2010-2030	+9,9 %	+6,0 %	+19,2 %	+78,7 %

Anmerkungen: Luftverkehr nach Standortprinzip
Quelle: Verkehrsverflechtungsprognose 2030 [BVU et al., 2014]

Güterverkehr

Die Entwicklung der Güterverkehrsleistung 2010 bis 2030 wird für Straße, Schiene und Binnenschifffahrt direkt aus der Verkehrsprognose 2030 übernommen. Für den Flugverkehr wird von der VVP 2030 keine Verkehrsleistung prognostiziert. Es werden daher die Änderungsraten des Personenverkehrs übernommen.

Tabelle 39: Entwicklung der Transportleistung 2010-2030 in der „Verkehrsverflechtungsprognose 2030“

in Mrd. tkm	Straße	Schiene	Binnenschiff	Luftverkehr
2010	437,3	107,6	62,3	10,8
2030	607,4	153,7	76,5	19,2
2010-2030	+38,9 %	+42,9 %	+9,1 %	+78,7 %

Anmerkung: Annahme Verkehrsleistung Luftverkehr 2030: gleiche Zunahme wie Personenverkehr
Quelle: Verkehrsprognose 2030 [BVU et al., 2014] (Straße, Schiene, Binnenschiff; eigene Annahme (Luftverkehr)

5.1.2 Annahmen zur Fahrleistungsentwicklung im Straßenverkehr

Die Fahrleistungsentwicklung orientiert sich an der Verkehrsleistungsentwicklung. Für die einzelnen Fahrzeugkategorien werden folgende Annahmen getroffen:

Pkw: Bei unveränderter Auslastung verläuft die Fahrleistungsentwicklung der Pkw parallel zur Verkehrsleistungsentwicklung.

Güterverkehr:

Die Verkehrsverflechtungsprognose macht Angaben zur Fahrleistungsentwicklung der im Inland zugelassen Lkw und Sattelzugmaschinen, unterteilt nach schweren und leichten Nutzfahrzeugen (größer bzw. kleiner oder gleich 3,5t Nutzlast; in TREMOD liegt die Grenze bei 3,5t zulässigem Gesamtgewicht). Diese Angabe ist nicht gleichzusetzen mit der in TREMOD benötigten Inlandsfahrleistung. Aus der Verflechtungsprognose wird daher die relative Fahrleistungsentwicklung übernommen und auf die TREMOD-Kategorien übertragen.

LNF:. Der Fahrleistungsanstieg der LNF wird entsprechend der relativen Entwicklung der leichten Nutzfahrzeuge der VVP 2030 angenommen (+32 % von 2010 bis 2030).

SNF: Die Zunahme orientiert sich an der Entwicklung der schweren Nutzfahrzeuge der VVP 2030. Dabei werden die bisherigen Grundannahmen beibehalten, d.h. die Auslastung der Fahrzeuge steigt bis 2030 um 10 % und die Verkehrsleistungszunahme wird stärker von den größeren Fahrzeugen erbracht. Dadurch steigt die Fahrleistung der schweren Lkw von 2010 bis 2030 um insgesamt 24 % bei einem Verkehrsleistungsanstieg von 39 %.

Tabelle 40: Entwicklung der Fahrleistungen 2010-2030

Jahr	FL gesamt (Mrd. km)	PKW	MZR	BUS	LNF	SNF	Sonstige
2010	710,0	595,5	15,8	3,7	37,6	53,9	3,5
2011	722,3	605,2	16,2	3,6	38,2	55,6	3,5
2012	722,8	606,5	16,2	3,6	38,7	54,3	3,5
2013	730,0	613,2	16,2	3,6	39,0	54,6	3,5
2020	760,1	633,2	16,3	3,8	43,7	60,3	2,8
2030	797,4	657,6	16,3	3,8	49,8	66,7	3,3

Anmerkungen: bis 2013 real, 2020 und 2030 Annahmen Trendszenario

5.2 Referenzentwicklung bis 2050

5.2.1 Entwicklung Personenverkehr

Für die Abschätzung der Entwicklung der Verkehrsleistung im Personenverkehr zwischen 2030 und 2050 ist auf die für die Maßnahmenwirkung entwickelte Differenzierung nach Altersklassen auf Basis von MiD2008 [Follmer/Lenz, 2010] zurückgegriffen worden. Das differenzierte Verkehrsverhalten ist für 2030 auf die Verkehrsleistung der VVP2030 normiert worden.

Nach 2030 wird angenommen, dass sich eine Sättigung im Verkehrsverhalten der Altersgruppen einstellt. Demzufolge ist die zentrale Ursache für Änderungen in der Verkehrsleistung die demografische Entwicklung bis 2050. Diese wird der 13. Bevölkerungsvorausberechnung, „Variante 2: Kontinuität bei stärkerer Zuwanderung G1-L1-W2: langfristiges Wanderungssaldo 200 000“ [Statistisches Bundesamt, 2015], entnommen. Die Entwicklung der Verkehrsleistung im internationalen Flugverkehr baut auf dem Szenario der Studie [Europäische Kommission, 2013] auf. Die resultierende Verkehrsleistungsentwicklung bis 2050 ist in Kapitel 5.3.1 dargestellt.

Die Auslastungsgrade im Referenzszenario werden nach 2030 konstant gehalten.

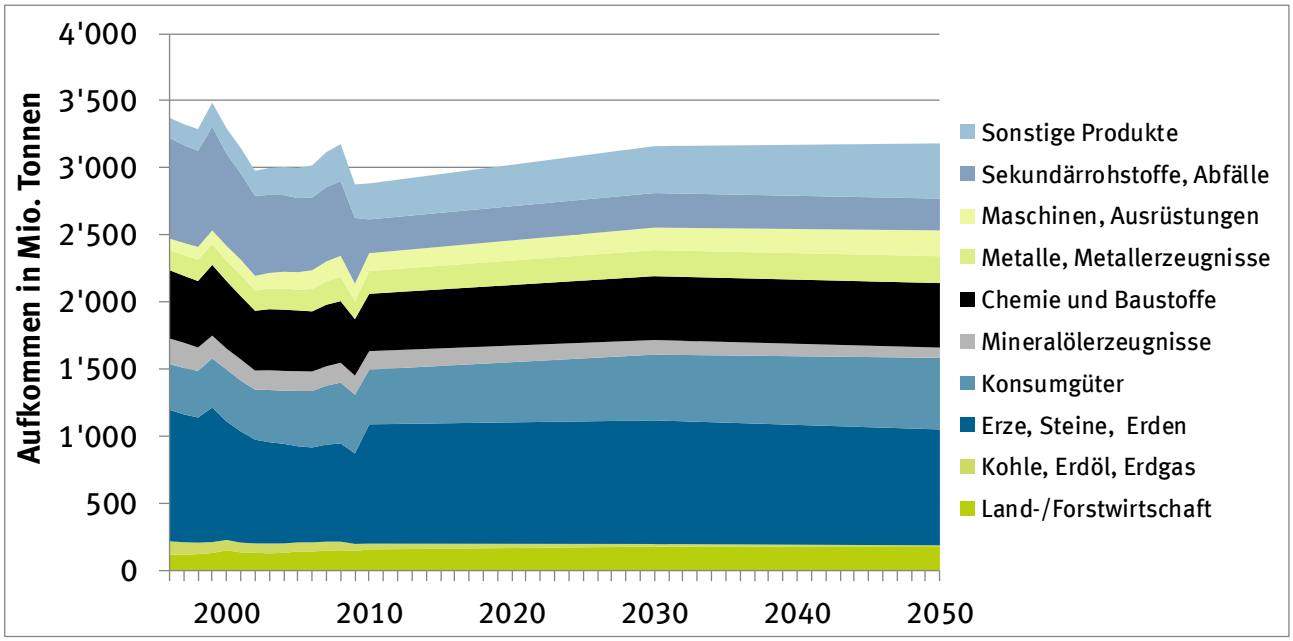
5.2.2 Entwicklung Güterverkehr

Zur Quantifizierung der Güterverkehrsentwicklungen im Referenzszenario wird das weiter oben beschriebene Wirkungsmodell eingesetzt, mit dem auch die nichttechnischen Wirkungen zum Klimaschutzszenario operationalisiert werden. Der Unterschied zwischen den beiden Szenarien besteht darin, dass für das Referenzszenario die VVP 2030-Entwicklungen 2010-2030 bis 2050 übernommen und fortgeschrieben werden. Die Fortschreibung bestand jedoch nicht aus einem simplen Festhalten der Zustände in 2030, sondern in einer dynamischen Weiterentwicklung der Vergangenheits- und Prognoseentwicklungen gemäß VVP 2030. Im Anschluss wurden die resultierenden Pfade kritisch überprüft und bei Bedarf, d.h. vor allem bei allzu hohen Wachstumsraten (nach unten) modifiziert. Zur Überprüfung wurden die wichtigsten Kenngrößenentwicklungen in allen 40 Teilsegmenten (d.h. nach 4 Hauptverkehrsverbindungen und je 10 Warengruppen) begutachtet und diskutiert. Für die gesamtmodale Nachfrage wurde dazu die Transportintensitäten mit Bezug auf das BIP bzw. auf Importe und Exporte (in Tonnen je Euro) und mit Bezug auf die Bevölkerung (in Tonnen pro Kopf) betrachtet. Dazu kamen weitere Kenngrößen wie Modal Split-Anteile und modale Transportweiten.

Gesamtmodale Aufkommensentwicklungen

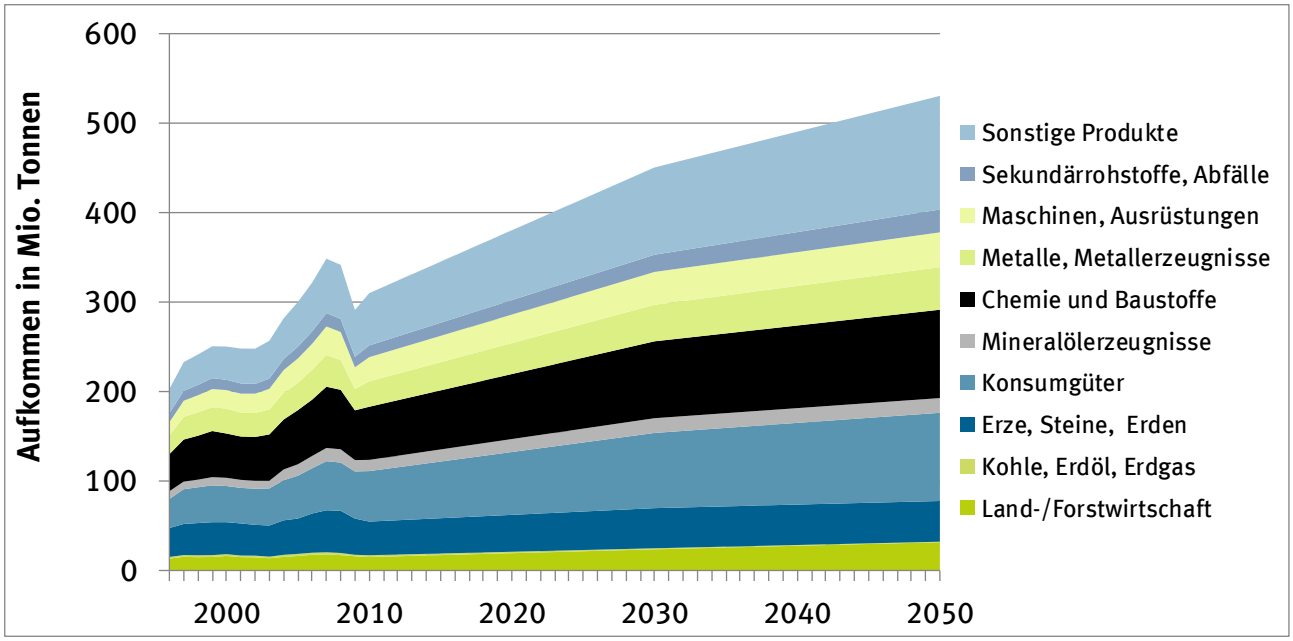
Der **Binnenverkehrsmarkt** wird sich in seiner Größe – gemessen am Aufkommen – wenig verändern. Während im Pfad bis 2030 gemäß VVP 2030 noch geringfügige Zuwächse unterstellt sind, machen sich ab 2030 die Bevölkerungsrückgänge bemerkbar. Insgesamt verharrt das Aufkommen im Binnenverkehr zwischen 2030 und 2050 bei rund 3,2 Mrd. Tonnen. Die Struktur des Binnenverkehrsmarktes verändert sich jedoch – auch infolge der Bevölkerungsentwicklungen. Da beispielsweise der Bedarf an Bautätigkeiten zurückgeht, sinkt auch der Anteil des marktbestimmenden Teilsegments der Erze, Steine und Erden sowie auch des Teilsegments mit den Baustoffen.

Abbildung 28: Aufkommensbezogene Teilmarktentwicklungen im gesamtmodalen Binnenverkehr für das Referenzszenario



Bereits deutlich anders sieht die Entwicklung im **grenzüberschreitenden Versand** aus. Hier nimmt der Gesamtmarkt bereits bis 2030 gemäß VVP 2030 um gut 45 % zu. In Verbindung mit den Außenhandelserwartungen bis 2050 sind weitere Aufkommenszuwächse in Höhe von circa 18 % möglich; dass die Wachstumsdynamik des VVP 2030-Pfades nicht ungebremst fortgesetzt wird, ist das Resultat der weiter sinkenden Transportintensitäten gerade auf den grenzüberschreitenden Teilsegmenten. Es sind vor allem die hochwertigen Produkte der exportorientierten Industrie, deren spezifischen Warengewichte durch Materialsubstitution optimiert werden und die gleichzeitig (real) an Wert gewinnen. Dies umfasst insbesondere Nahrungsmittel (Konsumgüter) sowie chemische Erzeugnisse und Kunststoffe, wobei ein großer Teil dieser Güter als nicht weiter spezifizierbare Waren im Stück- und Sammelgutsegment der Sonstigen Produkte (u.a. dort im stark wachsenden kombinierten Verkehr) transportiert werden.

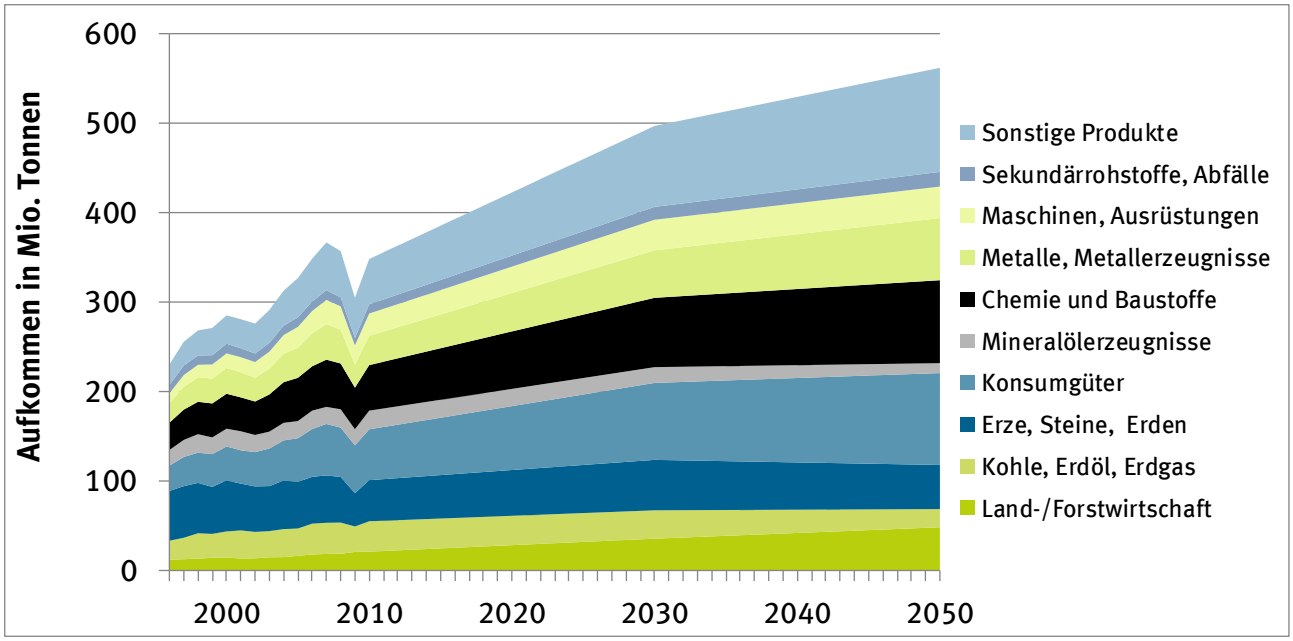
Abbildung 29: Aufkommensbezogene Teilmarktentwicklungen im gesamtmodalen grenzüberschreitenden Versand für das Referenzszenario



Hinweis: Die Skalierung unterscheidet sich von der vorigen Abbildung zum Binnenverkehrsmarkt!

Ähnlich dynamisch wie der Versand verhält sich auch der grenzüberschreitende Empfang. Nach Zunahmen von knapp 43 % bis 2030 wird für die Periode bis 2050 ein weiteres Aufkommenswachstum in Höhe von 13 % erwartet. Hier sind ähnliche Marktmechanismen wirksam wie beim Versand, d.h. die Transportintensitäten nehmen weiter ab. Auch die Marktstruktur ist vergleichbar, indem vor allem Nahrungsmittel (Konsumgüter) sowie chemische Erzeugnisse und Kunststoffe sowie die sonstigen (d.h. nicht näher spezifizierten) Produkte überwiegen. Es ist jedoch eine etwas größere Homogenität zwischen den Teilsegmenten festzustellen als noch beim Versand. Der Hintergrund liegt im Bedarf an gewichtsintensiven Vorprodukten (teilweise auch als Massengüter), deren Herstellung in Deutschland nicht mehr rentabel ist und daher importiert werden muss.

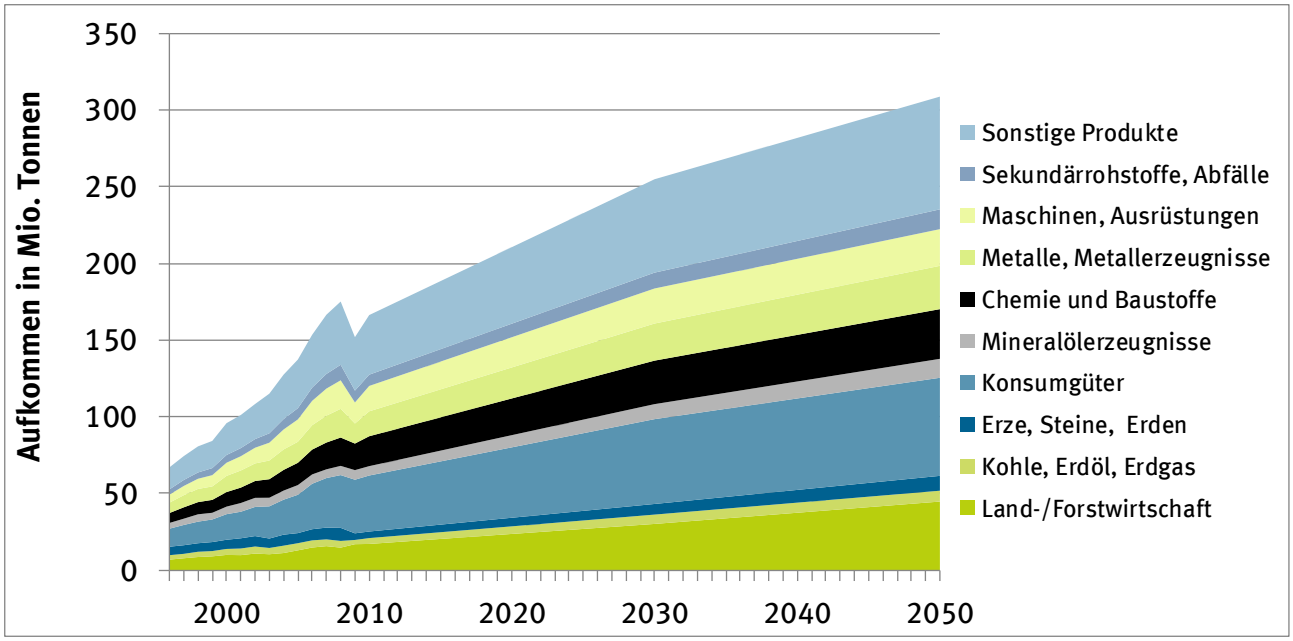
Abbildung 30: Aufkommensbezogene Teilmarktentwicklungen im gesamtmodalen grenzüberschreitenden Empfang für das Referenzszenario



Hinweis: Die Skalierung unterscheidet sich von der weiter oben stehenden Abb. zum Binnenverkehrsmarkt!

Der dynamischste Teilmarkt wird vom **Durchgangsverkehr** gebildet. Nach Zunahmen von 53 % bis 2030 werden bis 2050 noch weitere 21 % erwartet. Absolut besehen ist jedoch dieser Teilmarkt der kleinste von allen vier Hauptverkehrsverbindungen. Für den Gesamtzeitraum 2010 bis 2050 kann das Aufkommensverhältnis der absoluten Nachfragezunahmen zwischen den vier Hauptverkehrsverbindungen Binnenverkehr, Versand, Empfang, Durchgangsverkehr mit 3 zu 2 zu 2 zu 1 angegeben werden.

Abbildung 31: Aufkommensbezogene Teilmarktentwicklungen im gesamtmodalen Durchgangsverkehr für das Referenzszenario



Hinweis: Die Skalierung unterscheidet sich von allen drei oben stehenden Abbildungen zu den Teilmärkten im Binnenverkehr und den grenzüberschreitenden Relationen.

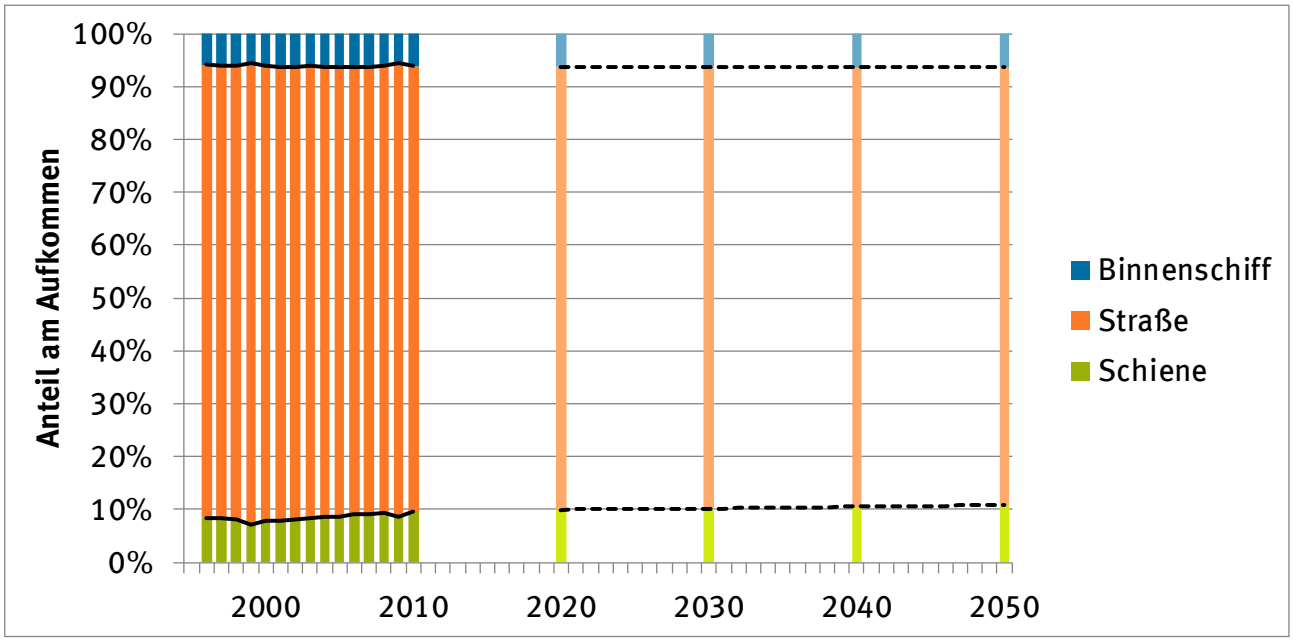
Insgesamt nimmt damit die gesamtmodale Aufkommensmenge im landverkehrsgestützten Güterverkehr auf deutschen Infrastrukturen zwischen 2010 und 2050 im Referenzszenario um 22,8 % auf dann 4.6 Mrd. t zu. Das Hauptwachstum wird mit knapp +0.7 Mrd. t bis 2030 erwartet. Ab 2030 steigt die Nachfrage noch um weitere +0.2 Mrd. t.

Modal Split

Die Modal Split-Entwicklung des Referenzszenarios wurde für den Zeitraum bis 2030 vom VVP 2030-Trendszenario übernommen und für die nachfolgende Periode bis 2050 extrapoliert. Das heißt, beide Zeiträume weisen theoretisch Verschiebungen in der gleichen relativen Größenordnung auf; die dahinter stehenden absoluten Mengen unterscheiden sich in Abhängigkeit der jeweiligen Gesamtmarktentwicklungen. Praktisch wurde dieses Prinzip für alle 40 Teilmarktsegmente autonom angewendet. Durch die teilsegmentspezifischen Marktentwicklungen können sich dennoch im Gesamtmarkt unterschiedliche Modal Split-Entwicklungen zwischen beiden Perioden ergeben. So gewinnt die Bahn im Referenzszenario zwischen 2010 und 2030 einen halben Prozentpunkt (0,5) am Aufkommensbezogenen Modal Split dazu. Für den Zeitraum ab 2030 steigt diese Verlagerung auf 0,6 Prozentpunkte, weil die bahnaffineren Teilsegmente wie bspw. die Sonstigen Produkte (mit dem darin subsummierten kombinierten Verkehr) bereits gesamtmodal stärker zunehmen.

Insgesamt werden im Schienengüterverkehr bis 2030 Aufkommenszunahmen in Höhe von 23,6 % erwartet. Bis 2050 kommen nochmals 11,6 % dazu. Damit beläuft sich die über das deutsche Schienennetz zu transportierende Menge auf 495 Mio. t. Der Straßengüterverkehr wird gemäß Referenzszenario 3 793 Mio. t zu transportieren haben. Dahinter stehen relative Zunahmen von 16,8 % (bis 2030) und 4,1 % (weiter bis 2050).

Abbildung 32: Entwicklung des aufkommensbezogenen Modal Split im Gesamtverkehr des Referenzszenarios

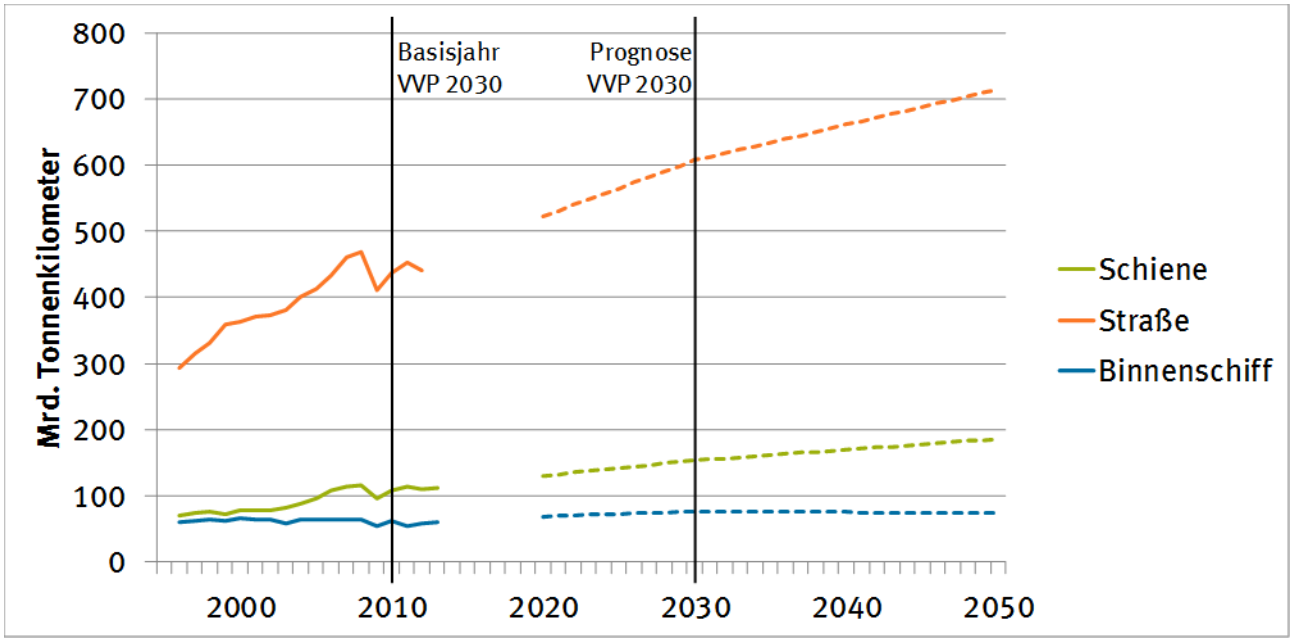


Verkehrsleistungsentwicklungen

Die Verbindung der modalen Aufkommensmengen mit den jeweiligen mittleren Transportweiten führt zur modalen Verkehrsleistung der einzelnen Teilsegmente. Vergleichbar mit der Ableitung der Modal Split-Entwicklungen wurden für das Referenzszenario die Transportweitenveränderungen aus der VVP 2030 für den Zeitraum bis 2030 auf den hier relevanten Zeitraum bis 2050 übertragen; punktuelle Modifikationen sind dabei nicht ausgeschlossen, vor allem, damit die Leistungsentwicklungen nicht unplausibel hohe Zunahmen aufweisen.

Dennoch ergeben sich am Ende durchaus markante weitere Zunahmen der Gesamtverkehrsleistungen im deutschen Transportmarkt. Die im Straßengüterverkehr erbrachten Tonnenkilometer (tkm) wachsen bis 2030 um 38,9 %, für den Zeitraum ab 2030 werden im Referenzszenario weitere 17,6 % erwartet. Dies entspricht einer Verkehrsleistung von 714 Mrd. tkm – gegenüber 437 Mrd. tkm in 2010. Im Schienengüterverkehr steigt die Verkehrsleistung bis 2030 um 42,9 % und ab 2030 um weitere 21,1 %, so dass dann in 2050 circa 186 Mrd. tkm auf deutschen Bahnstrecken abzuwickeln sein werden.

Abbildung 33: Entwicklung der Verkehrsleistungen im Gesamtverkehr nach Modi im Referenzszenario



5.3 Ergebnisse

5.3.1 Entwicklung der Verkehrsleistungen

In diesem Abschnitt werden die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Annahmen zur Verkehrsleistungsentwicklung so zusammengefasst, dass ein unmittelbarer Vergleich mit den Szenarienergebnissen in den darauffolgenden Kapiteln möglich ist. Es wird unterschieden nach den Verkehrsträgern:

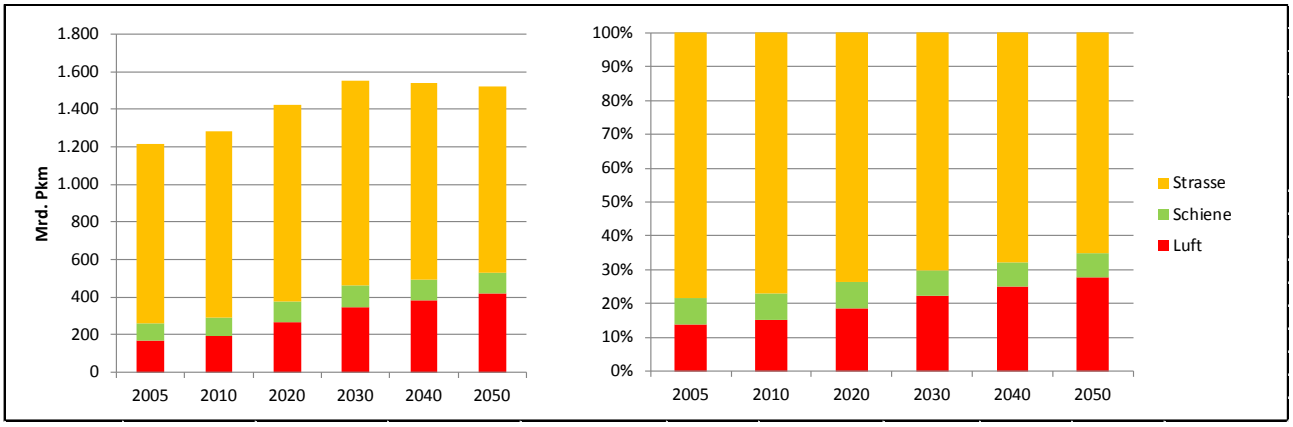
- **Straße:** Inländischer Verkehr mit motorisierten Zweirädern, Pkw, leichten Nutzfahrzeugen, Lkw, Last- und Sattelzügen, Bussen sowie sonstigen Kfz
- **Schiene:** Inländischer Verkehr mit Straßen- , Stadt und U-Bahnen sowie Eisenbahnverkehr
- **Binnenschiff:** Verkehr auf inländischen Wasserstraßen
- **Luftverkehr national:** Flüge zwischen inländischen Flughäfen
- **Luftverkehr international:** Gesamtstrecke des von deutschen Flughäfen abgehenden Flugverkehrs in andere Länder.

Für den **internationalen Seeverkehr** wurden keine Verkehrsleistungen ermittelt. Dieser wird in den Ergebnissen für Energieverbrauch und Emissionen mit einem gegenüber 2010 unveränderten Energieverbrauch auf Basis der Schiffsbunkermengen nach Energiebilanz mit bilanziert.

Personenverkehr

Die folgende Abbildung zeigt die angenommene Entwicklung der Verkehrsleistungen im Personenverkehr.

Abbildung 34: Entwicklung der Personenverkehrsleistung und Modal Split im Referenzszenario



Die wesentlichen Entwicklungstendenzen sind wie folgt:

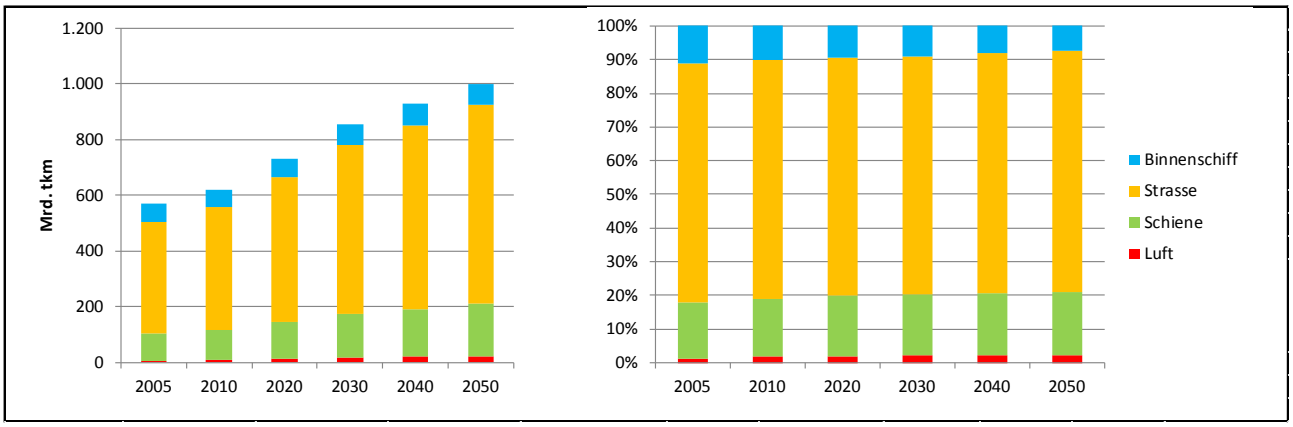
- Im **Referenzszenario** steigen die **Verkehrsleistungen** des Personenverkehrs einschließlich des internationalen Flugverkehrs, bis 2030 noch um 27 % gegenüber 2005 an und gehen dann bis 2050 vor allem aufgrund des angenommenen Bevölkerungsrückgangs, um 2 % zurück.
- Treiber ist der Flugverkehr, der insgesamt um fast 150 % zunimmt.
- Der Straßenverkehr nimmt bis 2030 um 14 % zu und geht danach bis 2050 um 9 % zurück.
- Die Verkehrsleistung im Straßenverkehr liegt damit 2050 um knapp 4% über den 2005er Werten, während im Schienenverkehr im Jahr 2050 eine um 17 % höhere Verkehrsleistung angenommen wird.
- Es kommt also zu einer leichten Verschiebung des Modal Splits von der Straße auf die Schiene.

Bei dieser Entwicklung sind, neben der rückläufigen Bevölkerung, als weitere die Nachfrage dämpfende Effekte die Zunahme der Mobilitätskosten gemäß der Verkehrsverflechtungsprognose 2030 unterstellt, die sowohl die angenommenen Effizienzgewinne bei der Fahrzeugtechnik als auch Schwankungen in den Energiepreisen auffangen.

Güterverkehr

Die folgende Abbildung zeigt die angenommene Entwicklung der Verkehrsleistungen im Güterverkehr.

Abbildung 35: Entwicklung der Güterverkehrsleistung und Modal Split im Referenzszenario



Die wesentlichen Entwicklungstendenzen sind wie folgt:

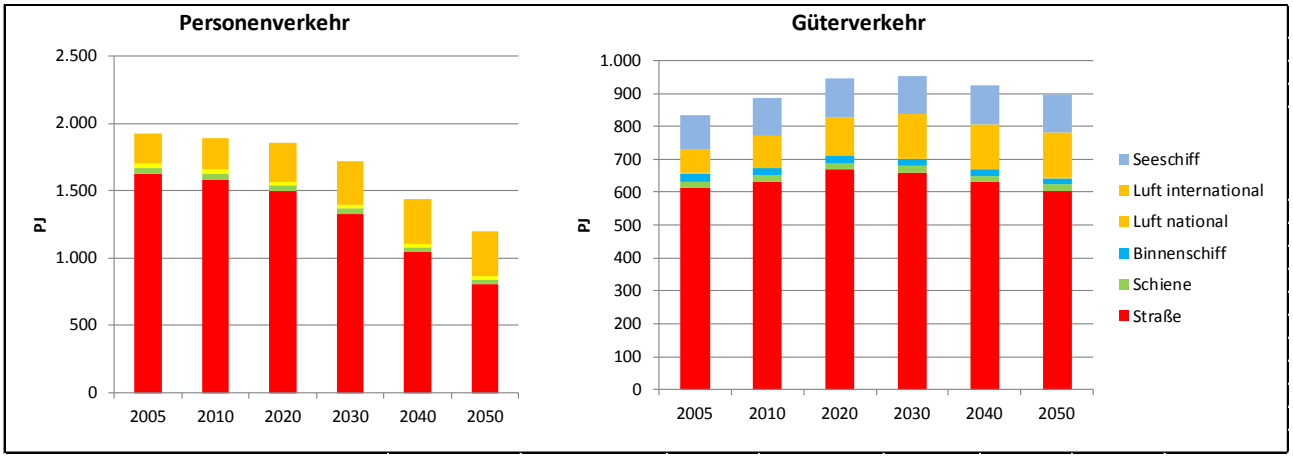
- Der Güterverkehr nimmt von 2005 bis 2050 insgesamt um 75 % zu.
- Der Schienenverkehr kann seinen Anteil am Modal Split bis 2050 nur geringfügig vergrößern.
- Die Binnenschifffahrt nimmt nur geringfügig zu.
- Im gleichen Zeitraum verdreifacht sich die Verkehrsleistung des internationalen Luftverkehrs.

Auch beim Güterverkehr sind wie beim Personenverkehr umweltpolitische Maßnahmen gemäß der Verkehrsverflechtungsprognose 2030 unterstellt.

5.3.2 Entwicklung des Endenergieverbrauchs

Der Endenergieverbrauch ist im Kontext der in dieser Studie behandelten Fragestellungen die wichtigste Ergebnisgröße. Die folgenden Abbildungen zeigen daher eine Übersicht über die Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Referenzszenario. Eine ausführliche Diskussion der Ergebnisse erfolgt im Rahmen einer vergleichenden Ergebnisbewertung aller Szenarien in Kapitel 6.4.

Abbildung 36: Endenergieverbrauch Personen- und Güterverkehr im Referenzszenario



Die wesentlichen Entwicklungstendenzen sind wie folgt:

- Beim **nationalen Personenverkehr** geht der Energieverbrauch bis 2050 insgesamt um **49 %** gegenüber 2005 zurück.
- Der Rückgang beim **gesamten Personenverkehr** (national und international) beträgt **37 %.** Hier wird der Rückgang beim nationalen Verkehr durch die Zunahme beim internationalen Flugverkehr (+56 %) kompensiert
- Der Energieverbrauch im **nationalen Güterverkehr** steigt von 2005 bis 2020 an, stagniert dann nahezu bis 2030 und geht dann bis 2050 zurück. 2050 liegt der Verbrauch um **2 %** unter dem Wert von 2005.
- Bei Einbezug des **internationalen Güterverkehrs** steigt der Energieverbrauch bis 2030 an, geht dann zurück und liegt 2050 um **8 %** über dem Wert von 2005.
- Für den **Personen- und Güterverkehr zusammen** ergibt sich daraus eine Abnahme im betrachteten Zeitraum von **36 % für den nationalen Verkehr** und **24 % für den gesamten Verkehr** inkl. der internationalen Verkehre.
- Der **Anteil des Güterverkehrs** am Endenergieverbrauch steigt deutlich an: bezogen auf den nationalen Verkehr lag der Anteil des Güterverkehrs im Jahr **2005 bei 28 %.** Bis **2050** könnte der Anteil auf **43 %** steigen.

6 Klimaschutzszenario

6.1 Vorgehen

Der Schwerpunkt des Klimaschutzszenarios liegt im Rahmen dieser Studie auf der Untersuchung, in welchem Umfang **nichttechnische Maßnahmen zur Verkehrsvermeidung, Verlagerung und Verbesserung** und damit zur weiteren Verminderung des Energiebedarfs aus dem Sektor Verkehr beitragen kann. Hierbei wird insbesondere der **Güterverkehr** detaillierter untersucht.

Die zur Erreichung eines THG-neutralen Verkehrs notwendige Umstellung auf eine THG-neutrale Energieversorgung wird nicht näher betrachtet. Für das Klimaschutzszenario wird unterstellt, dass ab 2030 eine Umstellung der Energieversorgung im Verkehr auf PtG/PtL-Kraftstoffe durchgeführt wird. Damit bleiben die im Referenzszenario getroffen Annahmen zu den Fahrzeugflotten mit Schwerpunkt auf batterieelektrische und Plug-in-Hybrid Fahrzeuge sowie Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor auch im Klimaschutzszenario unverändert.

Um dennoch gezielte Aussagen zum Einfluss weiterer technologischer Änderungen treffen zu können, wurde zusätzlich zum Klimaschutzszenario eine Variante **„Klimaschutzszenario E+“** gerechnet, bei der im Pkw-Bereich eine schneller Umsetzung der Elektromobilität in den Anfangsjahren, entsprechend den Zielen der Bundesregierung (1 Mio. E-Kfz in 2020, 6 Mio. E-Kfz in 2030) und im Straßengüterverkehr die Einführung des OH-Lkw berücksichtigt wurde.

Das Vorgehen ist wie folgt:

- Ausgangspunkt ist das Referenzszenario.
- Im Klimaschutzszenario werden alle ausgewählten Maßnahmen mit vorwiegender Wirkung im Bereich ASI („Avoid, Shift, Improve“) durchgeführt, um den Endenergieverbrauch abzusenken.
- Die Modellierungen der Maßnahmenwirkungen werden getrennt für den Personen- und Güterverkehr durchgeführt. Schwerpunkt liegt auf der Modellierung im Güterverkehr mit einem neuen differenzierten Ansatz (siehe Kapitel 4.5.2.2).
- Mit den geänderten Annahmen zur Verkehrs- und Fahrleistungsentwicklung wurde das Klimaschutzszenario gerechnet.
- Anschließend erfolgte die Variantenrechnung mit der beschleunigten Umsetzung der Elektromobilität beim Pkw und der Einführung des OH-Lkw im Straßengüterverkehr.

6.2 Verkehrliche Wirkungen der Maßnahmen im Personenverkehr

Die angenommenen Maßnahmenwirkungen in der **Alltagsmobilität** entstammen der UBA-Studie „Potenziale des Radverkehrs für den Klimaschutz“ [UBA, 2013c]. In dieser wurde mittels eines klassischen Verkehrsmodells und einer Reihe von Sensitivitätsanalysen eine Bandbreite von möglichen Maßnahmenwirkungen aufgezeigt. Diese Bandbreite ergibt sich dabei aus verschiedenen Annahmen für die resultierende Verlagerung und Vermeidung, auf die dann in einem zweiten Schritt mögliche Maßnahmenszenarien abgeleitet wurden. Als Annahmen für die resultierenden Maßnahmenwirkungen wurden in [UBA, 2013c] gewählt:

- Kurze Wege mit dem Rad,
- Wahrnehmung des Rades als Option,
- Autonutzung statt Besitz,
- Orientierung an „Trendsettern“ [UBA, 2013c, S. 56].

Die letzteren beiden gehen dabei über die direkte Verlagerung von MIV-Wegen auf das Fahrrad hinaus und kombinieren eine Strategie der Verkehrsverlagerung mit der Verkehrsvermeidung, entspre-

chen der Zielstellung des Klimaschutzszenarios, einen ambitioniert-realistischen Entwicklungspfad mit Ausschöpfung aller Strategiefelder (ASIF) darzustellen.

Für die Studie wurden die Mittelwerte des Szenarios „Autonutzung statt Besitz - optimistisch" ausgewählt [UBA, 2013c]. Die zentrale Annahme dieses Szenarios ist, dass alle Personen, die bestimmte Mindestvoraussetzungen erfüllen (ÖV-Haltestelle im Umkreis von 500 m und Mindestsiedlungsdichte von 150 EW/km²) sich so verhalten, wie Personen ohne Zugang zum eigenen Pkw.

Ausgehend von [UBA, 2013c] (siehe Kapitel 4.5.2.1) sind die in Tabelle 41 dargestellte Veränderung der Verkehrsleistung über alle Altersgruppen für alle Wege <50 km angenommen:

Tabelle 41: Änderung der Verkehrsleistung im Klimaschutzszenario gegenüber dem Referenzszenario (Alltagsmobilität)

Fuß	Rad	MIV	ÖV
+18 %	+22 %	-38 %	+38 %

Zusätzlich wurde im Alltagsverkehr für den Pkw-Verkehr eine Erhöhung der Auslastung um 10 % angenommen, was zu einer entsprechenden weiteren Verringerung der Pkw-Fahrleistung führt.

Für die Abschätzung der Maßnahmenwirkungen in der **Fernmobilität** liegen keine geeigneten Literaturquellen vor. Da im Rahmen dieses Vorhabens jedoch kein konsistentes Wirkungsmodell erstellt werden kann, wird in der Fernmobilität die Sensitivität der Ergebnisgrößen (Emissionen und den Energieverbrauch) gegenüber einer ambitionierten Änderungen in der Verkehrs- und Fahrleistung sowie dem Modal Split dargestellt. Für das Klimaschutzszenario wird angenommen, dass eine

- Minderung der Verkehrsleistung um 10 % (inklusive Luftverkehr),
- eine Verlagerung von 10 % des restlichen MIV auf den ÖV,
- sowie eine Erhöhung der Auslastung (Besetzungsgrad) um 10 % im MIV

stattfindet. Um die Plausibilität dieser Änderungen zu prüfen, ist nachfolgend eine Ableitung von möglichen Kostenänderungen im Verkehr dargestellt, die zu diesen Änderungen führen würden.

Werden die Änderungen im **MIV** auf bekannte Elastizitäten der Fahrleistung in Abhängigkeit von den Verkehrskosten[33] bezogen, entspräche dies einem zusätzlichen Anstieg der realen Kosten im MIV gegenüber dem Referenzszenario (0,5 % p.a., siehe Kapitel 4.3) von etwa 1,4 % p.a., welcher z.B. über eine fahrleistungsabhängige Pkw-Maut umgesetzt werden könnte. Im **Luftverkehr** werden aufbauend auf der Verteilung der Verkehrsleistung in Distanzklassen [ifeu, 2014a] und Wegezwecken [BMVI, 2014] sowie der Elastizitäten im Luftverkehr [INFRAS/IER/Uni Salzburg, 2013] die in Tabelle 42 dargestellten Annahmen für die Ableitung einer Gesamtelastizität gesetzt[34].

[33] In [Axhausen/Fröhlich, 2012] ist eine Metaanalyse internationaler Studien zur Ableitung von Landverkehrssensitivitäten durchgeführt worden. Als Ergebnis der Studie ist für die Schweiz der hier verwendete Wert von -0,35 für die langfristige Änderung der MIV-Verkehrsnachfrage im Verhältnis zu den Kosten beim Vorhandensein eines gut ausgebauten ÖV-Systems empfohlen worden.

[34] Vereinfachend sind dabei alle Verkehre <2000 km der Distanzklasse „Europa" zugeordnet, >2000 km der Klasse „Interkontinental"

Tabelle 42: Annahmen zur Berechnung der Preiselastizität im Luftverkehr

	Anteil an gesamter Luftverkehrsleistung in 2012		Preiselastizität	
	Europa	Interkontinental	Europa	Interkontinental
Freizeit+Urlaub	19 %	45 %	-1,5	-1
Beruf	11 %	25 %	-0,9	-0,2

Damit ergibt sich für den Luftverkehr eine Gesamtelastizität von -0,9. Für die dargestellt Änderung der Verkehrsleistung von -10 % gegenüber dem Referenzszenario bis 2050 ergibt sich damit eine zusätzliche Erhöhung der realen Kosten von 0,3 % je Jahr, die sich beispielsweise aus der Verwendung von PtL ergeben könnte. Die Kostenänderung ist dabei im Vergleich mit dem Landverkehr bewusst moderat angenommen, da nationale Regelungen nur begrenzten Einfluss auf den internationalen Luftverkehr haben.

6.3 Verkehrliche Wirkungen der Maßnahmen im Güterverkehr

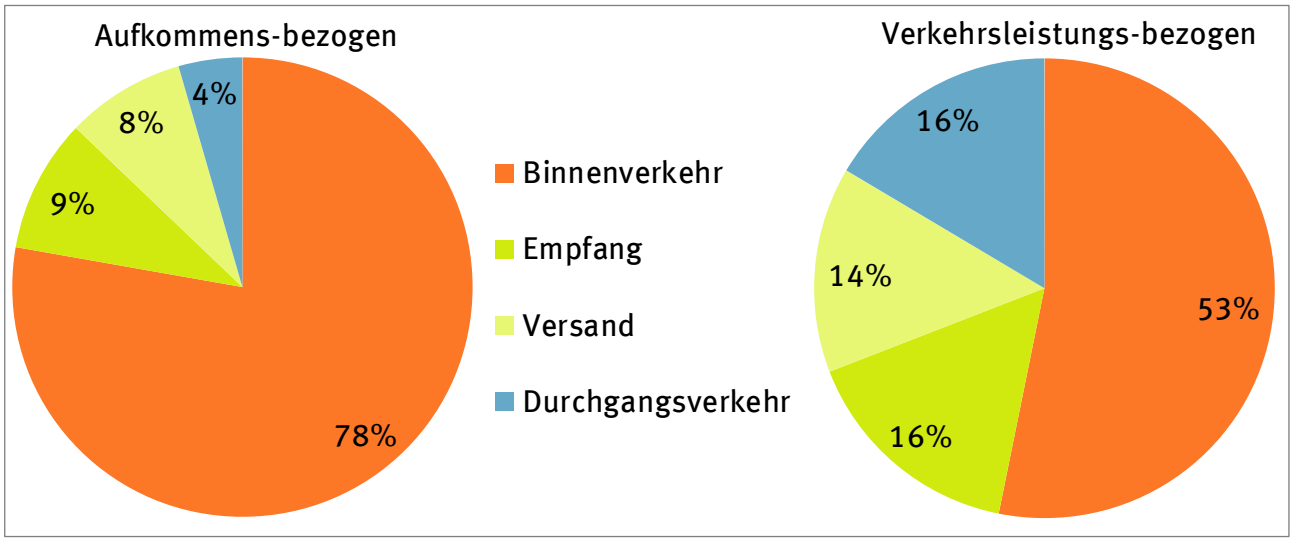
Die verkehrlichen Wirkungen der nichttechnischen Maßnahmen im Güterverkehr sind nachfolgend in der Logik des Wirkungsmodelles dokumentiert. Damit lässt sich insbesondere nachvollziehen, welche Segmente maßnahmensensitiv sind und warum mit Blick auf den Gesamtmarkt eventuell gewisse Maßnahmen weniger wirksam sind. Dementsprechend erfolgt zuerst die Darstellung nach Teilsegmenten, danach werden die Entwicklungen zum Modal Split dargestellt und im Abschluss gibt die Gesamtdarstellung eine Übersicht zu den wichtigsten Entwicklungen.

6.3.1 Wirkungen in den Teilsegmenten

Zum Einstieg in die Ergebnisdarstellung wird ein Überblick zur Bedeutung der Teilsegmente heute (Basisjahr 2010) gegeben. Die Messung der Bedeutung erfolgt dabei sowohl aus Nachfragesicht (in Tonnen) wie auch aus leistungsbezogener Sicht (in Tonnenkilometer).

Die Segmentierung nimmt zuerst die Unterteilung nach den vier Hauptverkehrsverbindungen auf. Mit Blick auf das Aufkommen (in Tonnen) dominiert im Jahr 2010 der Binnenverkehr das Geschehen: drei von vier Tonnen besitzen sowohl Quelle wie auch Ziel im Inland. Weniger als ein Fünftel des Aufkommens ist dem grenzüberschreitenden Verkehr des deutschen Außenhandels zuzuordnen, wobei die beiden Verkehrsrichtungen – Empfang und Versand – nahezu gleiche Anteile besitzen. Mit weniger als 5 % ist der Durchgangsverkehr am Gesamtaufkommen beteiligt. Unter Einbezug der Transportweite verschiebt sich das in Tonnenkilometer beschriebene, verkehrsleistungsbezogene Bild zugunsten der Hauptverkehrsverbindungen mit langlaufenden Transporten. Der Durchgangsverkehr bekommt dabei mit circa 15 % einen ähnlichen Bedeutungsanteil wie die grenzüberschreitenden Verbindungen bei Empfang und Versand, während der Binnenverkehr mit seinem hohen Anteil an Kurzstrecken nur etwas mehr als die Hälfte der auf deutschen Infrastrukturen erbrachten Verkehrsleistungen ausmacht.

Abbildung 37: Anteile der Hauptverkehrsverbindungen im Basisjahr 2010



Die Zuordnung der zehn Warengruppen zu den vier Hauptverkehrsverbindungen ermöglicht einen vergleichenden Blick auf die Bedeutungsanteile der dann insgesamt 40 Teilsegmente. Auch hier ist eine Unterscheidung nach aufkommens- und verkehrsleistungsbezogener Sichtweise möglich. Im Rahmen des Klimaschutzszenarios ist schlussendlich die verkehrsleistungsbezogene Sichtweise relevanter, da auf Basis dieser Kenngröße die klimarelevanten Implikationen ermittelt werden.

Das bei dieser Sichtweise wichtigste Teilsegment wird 2010 von den Konsumgütertransporten im Binnenverkehr gebildet. Dabei handelt es sich in erster Linie um Nahrungsmitteltransporte bzw. Konsumgüter zum kurzfristigen Verbrauch.[35] Circa 12 % der gesamten Verkehrsleistung wird durch dieses Teilsegment generiert; dessen Anteil am Gesamtaufkommen im Übrigen ähnlich hoch ausfällt.

An zweiter Stelle stehen die inländischen Transporte von sonstigen Produkten. Dabei handelt es sich um Transporte, bei deren statistischer Erfassung keine weitere Warenzuordnung möglich war. Die Ursache dieser fehlenden Zuordnungsmöglichkeit ist in der Abwicklung der Transportnachfrage bzw. der Struktur der an der Logistikkette beteiligten Akteure zu suchen. Während zur Erhebung der Güterverkehrsstatistik die Transporteure bzw. die Fahrzeughalter angeschrieben werden, kann die Logistikkette aus deutlich mehr Akteuren mit unterschiedlichsten Informationsständen bestehen. Ein typischer Transportvorgang beginnt bei einem Verlader, der seinen Transportwunsch an einen Spediteur richtet. Dieser übernimmt die Abwicklung, ohne jedoch zwingend selbst physisch in den Transportvorgang eingreifen zu müssen. Für diesen Fall beauftragt wiederum der Spediteur einen Transporteur oder einen Operateur, der dann selbst wiederum den Transportauftrag weitergibt oder selbst ausführt. Diese Art des Transportvorgangs kann dazu führen, dass der eigentliche Transporteur keine Information zur Art der Ware erhält; für ihn ist Start und Ziel sowie die zeitliche Anforderung relevant, möglicherweise noch die Art der Fracht (Stückgut oder Massengut oder Flüssigware etc.) und die Information darüber, ob es sich um Gefahrgut handelt. Die Optimierungsbestrebungen des Transportvorganges führen darüber hinaus vielfach dazu, dass verschiedene Nachfragen gebündelt transportiert werden (Sammelgut), so dass auch hier keine eindeutige Warenzuordnung erfolgen

[35] Konsumgüter zum kurzfristigen Verbrauch sind Güter des täglichen Bedarfs, zumeist Lebensmittel und einige wenige weitere Produkte im Alltagsverbrauch. Im Gegensatz dazu stehen die langlebigen Konsumgüter, welche aus Gütern des nicht-täglichen Bedarfs wie bspw. Elektrogroßgeräte bestehen.

kann. Geradezu prädestiniert für derart „verschachtelte“ Transportvorgänge ist der kombinierte Verkehr, für dessen Abwicklung in der Regel neben dem Gewicht nur die Art des Behälters relevant ist. Er stellt damit eine bedeutsame Teilmenge der Transporte in dem Teilsegment der sonstigen Produkte dar.[36] Insgesamt lässt sich feststellen, dass es sich bei den sonstigen Produkten in erster Linie um Nahrungsmittel (bzw. Konsumgüter zum kurzfristigen Verbrauch) sowie Maschinen und Ausrüstungen (inklusive langlebiger Konsumgüter) handelt.

Das drittwichtigste Teilsegment wird von einer Mischgruppe gebildet. Es handelt sich dabei einerseits um Transporte chemischer Erzeugnisse und Kunststoffe. Andererseits werden in dieser Gruppe so genannte Mineralerzeugnisse erfasst, wobei es sich zumeist um Baustoffe und Glaswaren handelt.[37] Circa 8 % der gesamten Verkehrsleistung werden durch diese Warengruppe erbracht; mit 12 % fällt ihr aufkommensbezogener Anteil noch höher aus – bedingt durch die gewichtsintensiven Baustoffe.

Knapp 5 % der Gesamtverkehrsleistung wird mit den inländischen Transporten von Erzen, Steinen und Erden sowie sonstigen Bergbauerzeugnissen erbracht. Dies fällt – im wahrsten Sinne des Wortes – umso mehr ins Gewicht als dass die leistungsrelevante mittlere Transportweite (über alle Modi) mit 38 Kilometern äußerst niedrig ausfällt. Entsprechend hoch ist der aufkommensbezogene Bedeutungsanteil dieser Warengruppe, der bei 24 % liegt und damit die mit Abstand aufkommensstärkste Warengruppe beschreibt.

Allein die bis hierhin erwähnten vier Teilsegmente verursachten im Jahr 2010 ein Drittel aller auf deutschen Infrastrukturen erbrachten Verkehrsleistungen. Die dahinter stehende Tonnage beläuft sich sogar auf mehr als die Hälfte des Gesamtaufkommens. Damit wird bereits deutlich, welche wenigen Warengruppen auf welchen Hauptverkehrsverbindungen die Ergebnisse eines Klimaschutzszenarios determinieren können.

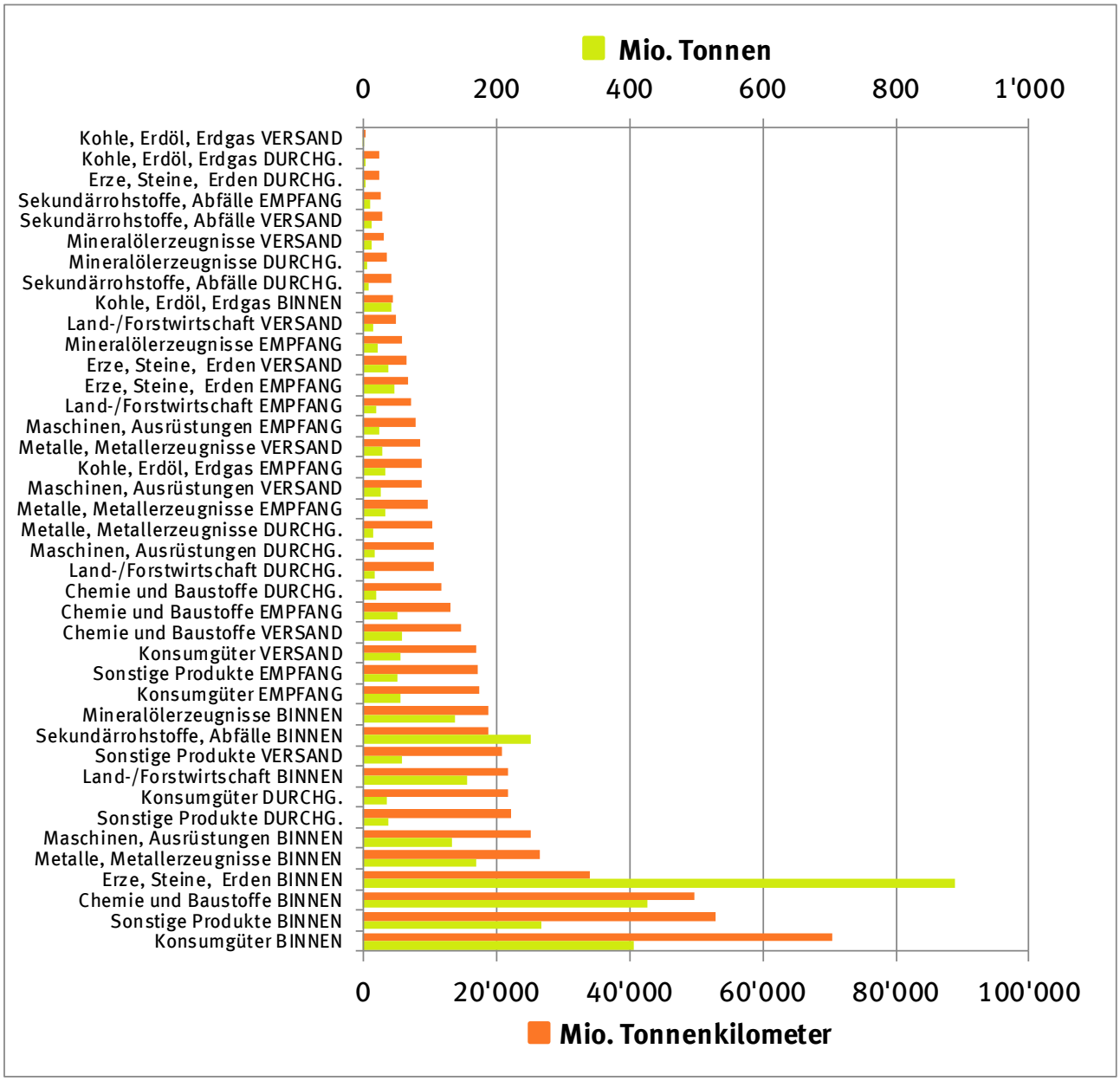
Die nachfolgende Grafik gibt eine Übersicht zur Relevanz jeder der insgesamt 40 Teilsegmente, wobei die Reihung anhand der Verkehrsleistung vorgenommen wurde. Mit Blick auf die Verkehrsleistung wird dabei deutlich, dass drei Viertel der Gesamtverkehrsleistung 2010 von 17 Teilsegmenten – also weniger als der Hälfte aller Teilsegmente – gebildet wird. Dies gibt einen Hinweis darauf, welche Teilsegmente einer Fokussierung bei der Ableitung der Wirkungen nichttechnischer Maßnahmen bedürfen und welche Teilsegmente zwar einzubeziehen sind, jedoch mit weniger Aufwand betrachtet werden können.

---

[36] Die hier zugrunde gelegte Güterverkehrsstatistik erfasst Transporte im kombinierten Verkehr ausschließlich in der Warengruppe der sonstigen Produkte. Die in den anderen Warengruppen ausgewiesenen Transporte können aus methodischen Gründen explizit nicht im kombinierten Verkehr transportiert worden sein. Damit ist kein Rückschluss zu den Anteilen des kombinierten Verkehrs in den anderen Warengruppen möglich; entsprechende Informationen im Rahmen der Berichterstattung zur VVP 2030 sind anderweitig generiert worden.

[37] Diese Vermengung von Waren mit an sich unterschiedlichen Nachfragehintergründen ist bedingt durch die entsprechende Statistikpublikation des Kraftfahrtbundesamtes (KBA) zum Straßengüterverkehr, welches eine weitere Differenzierung nicht zulässt.

Abbildung 38: Einordnung der 40 Teilsegmente des Güterverkehrs (gereiht nach Tonnenkilometer), Basis: 2010



Die nachfolgende Darstellung der Maßnahmenwirkungen und Ergebnisse in den Teilsegmenten nimmt die obenstehende, verkehrsleistungsbezogene Bedeutungsreihung auf. Dabei werden zuerst die Entwicklungen der bedeutsamsten Teilsegmente (entlang des Wirkungsmodells) dargestellt und im Anschluss wird auf weitere wichtige Entwicklungen in anderen Teilsegmenten eingegangen.

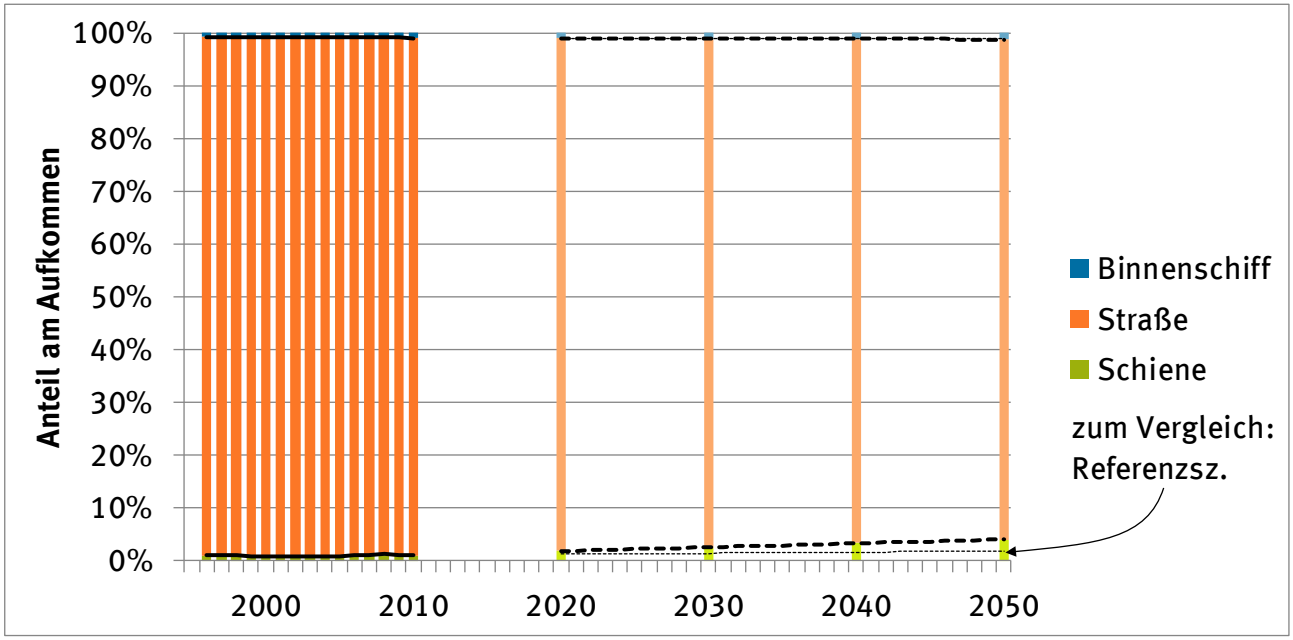
Teilsegment Konsumgüter zum kurzfristigen Verbrauch im Binnenverkehr

Zur Einordnung der nachfolgend dargestellten Entwicklungen ist vorab anzumerken, dass dieses Teilsegment sowohl leistungs- wie auch aufkommensbezogen ein Wachstumssegment darstellt und dabei sogar über dem Gesamtmarktdurchschnitt zunimmt.

Im Basisjahr (2010) war der Bahnanteil am Aufkommen mit 1,0 % verschwindend gering. Dies liegt v.a. an der Struktur der Transportprozesse, welche zu großen Teilen auf Versorgungsverkehre des Einzelhandels im Nahbereich besteht. Dennoch zeigt die Entfernungsverteilung der mittleren Trans-

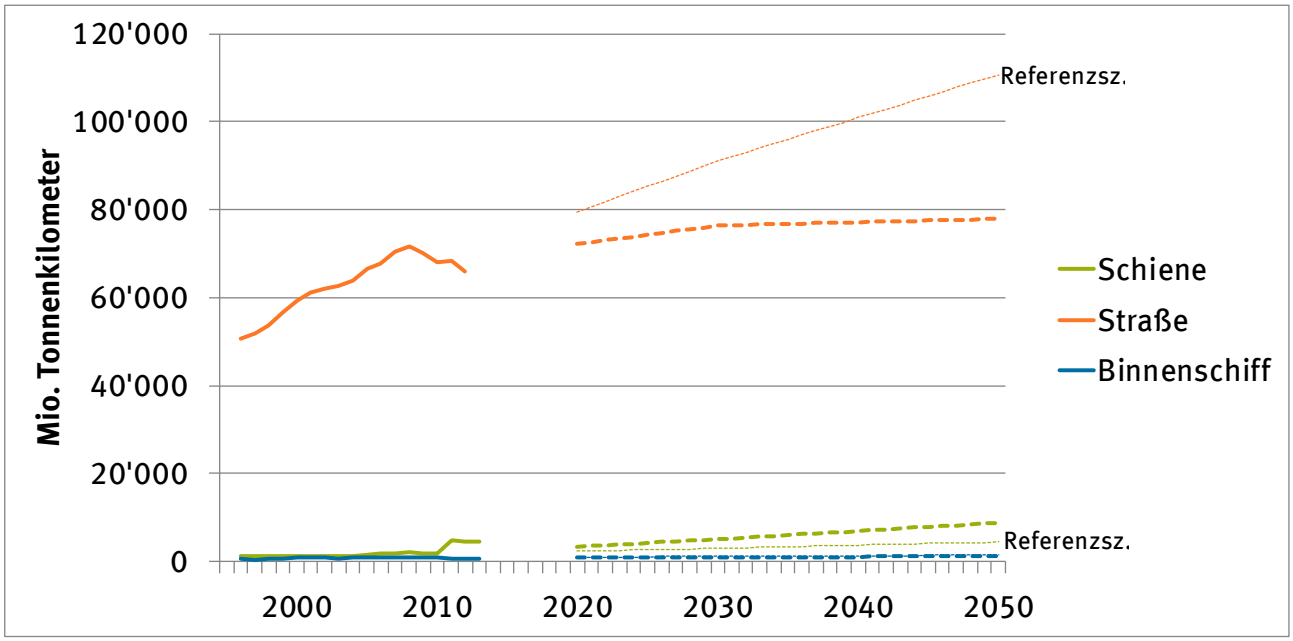
portweite auf der Straße, dass ca. 30 % des dortigen Aufkommens auf Strecken über 200 Kilometer transportiert wird; über 300 Kilometer sind es immer noch fast 20 %. Ein Teil dieser Langstreckentransporte sollte auf die Bahn verlagerbar sein. Dazu können insbesondere Maßnahmen im Rahmen der weiteren Differenzierung der Lkw-Maut wie beispielsweise der Staffelung nach Entfernungsbereichen beitragen. Aber auch der Ausbau von Umschlagsanlagen im kombinierten Verkehr sowie die Einrichtung bzw. Förderung entsprechender Belieferungskonzepte im städtischen Bereich können zu Verlagerungen beitragen. Im Ergebnis ist eine Erhöhung des Bahnanteils bis zum Jahr 2050 auf 4,0 % denkbar; gegenüber dem Referenzszenario entspricht das einer Zunahme um 2,2 Prozentpunkten. Dass diese Verlagerung eher gering ausfällt ist der oben erwähnten Grundstruktur der Transportprozesse geschuldet, welche keine markanteren Verschiebungen zulässt. Ebenfalls zu bedenken ist, dass die – hier durchaus möglichen – Verlagerungen zum Kombinierten Verkehr eine Verschiebung der damit verbundenen Aufkommensmenge in das Teilsegment der sonstigen Produkte nach sich zieht. Andererseits ist aber auch anzumerken, dass während der letzten konjunkturellen Wachstumsphase zwischen 2000 und 2008 die Bahn ihren aufkommensbezogenen Anteil in diesem Teilsegment um circa einen halben Prozentpunkt steigern konnte.

Abbildung 39: Entwicklung des aufkommensbezogenen Modal Split im Teilsegment der Konsumgüter zum kurzfristigen Verbrauch im Binnenverkehr



Infolge dieser Verlagerungen und durch weitere Optimierungen lässt sich die im Referenzszenario enthaltene Ausdehnung der mittleren Transportweite auf der Straße zumindest stoppen und geringfügig umkehren. Insgesamt kann die mittlere Transportweite auf 154 Kilometer in 2050 bzw. um 10 % gegenüber dem Basisjahr gesenkt werden, was im Vergleich zur Transportweite im Referenzszenario einer Minderung um 28 % gleichkommt. Im Übrigen hat die mittlere Transportweite auf der Straße im oben genannten Zeitraum der Aufkommenszugewinne bei der Bahn bereits stagniert, so dass die hier für das Klimaschutzszenario unterstellten Effekte offensichtlich bereits in der jüngsten Vergangenheit beobachtet werden konnten. Insgesamt nimmt dadurch und in Verbindung mit den nachfragebezogenen Verlagerungen die Verkehrsleistung in Tonnenkilometern auf der Straße nur um 15 % zu – anstatt um 63 % wie noch im Referenzszenario unterstellt.

Abbildung 40: Entwicklung der modalen Verkehrsleistungen im Teilsegment der Konsumgüter zum kurzfristigen Verbrauch im Binnenverkehr



Teilsegment sonstige Produkte im Binnenverkehr

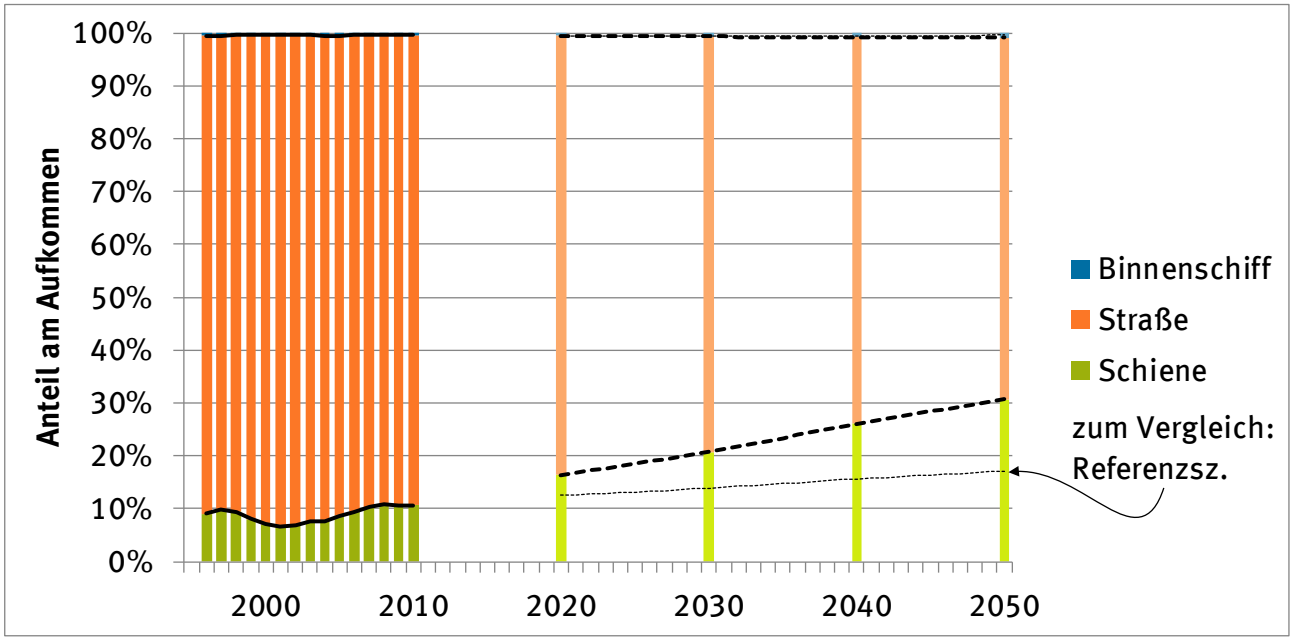
Das Teilsegment der sonstigen Produkte gehört mit einem gesamtmodalen Aufkommenswachstum von 54 % zu den wachstumsstärksten Segmenten und ist damit im Binnenverkehr das Teilsegment mit den höchsten Zuwachsraten zwischen 2010 und 2030 gemäß Referenz- und weiter bis 2050 gemäß Klimaschutzszenario. Neben der unmittelbaren Zunahme der Nachfrage bei den hier subsummierten Produkten (vor allem Nahrungsmittel sowie Maschinen und Ausrüstungen bzw. langlebige Konsumgüter) stehen dahinter vor allem logistische Effekte: Da in diesem Teilsegment die kombinierten Verkehre bzw. die Transporte von Stück- und Sammelgütern enthalten sind, profitiert dieses Segment von den logistisch bedingten Zunahmen in diesen Frachtarten. Oder anders ausgedrückt: Wenn Waren aus anderen Teilsegmenten in den kombinierten Verkehr gelangen, dann „verschwinden“ sie aus der dortigen Aufkommensmenge und sind neu Bestandteil des Teilsegments der sonstigen Produkte.

In der Konsequenz des hier subsummierten kombinierten Verkehrs fällt der heutige Bahnanteil mit 10,7 % verglichen mit anderen Teilsegmenten im Binnenverkehr bereits recht hoch aus.[38] Dennoch besteht hier großes Potenzial. So werden heute noch circa 20 % des Aufkommens des Straßengüterverkehrs dieses Teilsegments im Langstreckenbereich über 300 Kilometer transportiert. Dass selbst auf Relationen ab 100 Kilometer die Bahn im kombinierten Verkehr wirtschaftlich produzieren kann, zeigen entsprechende Beispiele; heute werden im Übrigen 30 % des Straßenaufkommens des

[38] Dies zählt umso mehr, wenn dabei beachtet wird, dass die intermodale Transportkette im kombinierten Verkehr in der Regel aus (mindestens) drei Teilwegen besteht: Einem straßenbasierten Vorlauf, dem bahnbasierten Hauptlauf und dann wiederum einem straßenbasierten Nachlauf. Dabei kommt es in der Verkehrsstatistik zu einer Doppelerfassung der gleichen Ware bei der Straße, während die Ware beim Bahntransport nur einmal erfasst wird. Das bedeutet, dass der aufkommensbezogene Modal Split durch Mehrfacherfassungen beeinflusst wird – zumeist zugunsten der Straße. Allerdings gibt es auch einen Erfassungseffekt zugunsten der Bahn, indem deren Aufkommensmenge auch die Gewichte der Ladungsträger (Container, Trailer, Wechselbehälter) enthält (sogenanntes Bruttogewicht), während dies im Straßengüterverkehr nicht der Fall ist (hier wird immer nur das Nettogewicht erfasst).

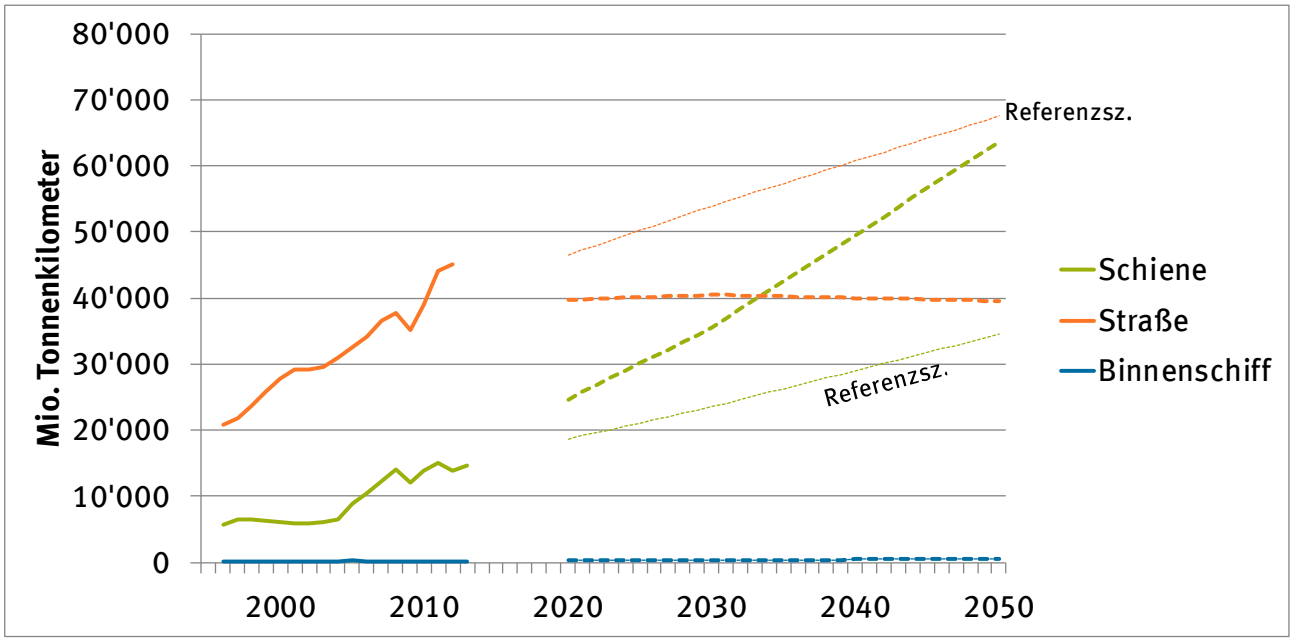
Teilsegments im Entfernungsbereich zwischen 100 und 300 Kilometer transportiert. Ein weiterer bahnfördernder Effekt ist der generelle Trend zum kombinierten Verkehr. Wie oben bereits ausgeführt, verschieben sich die entsprechenden Aufkommen aus anderen Teilsegmenten in das hier behandelte Teilsegment der sonstigen Produkte. Implizit betrifft dies dann auch die Bahn und ihren Aufkommensanteil. Für das Klimaschutzszenario wird daher erwartet, dass die Bahn hier ihren Anteil bis 2050 auf 30,7 % steigern kann. Allerdings nimmt bereits auch im Referenzszenario der Bahnanteil auf 17,1 % zu, so dass im Klimaschutzszenario zusätzliche 13,6 Prozentpunkte verlagert werden. Die dahinter stehenden Maßnahmen betreffen vor allem den kombinierten Verkehr (Umschlagsanlagen, aber auch die Erhöhung der Trassenkapazitäten auf der Schiene), begleitet von Maßnahmen im Straßengüterverkehr zur Verteuerung insbesondere der langlaufenden Transporte (z.B. nach Entfernung gestaffelte Maut).

Abbildung 41: Entwicklung des aufkommensbezogenen Modal Split im Teilsegment der sonstigen Produkte im Binnenverkehr



Mit der oben dargestellten Aufkommensverlagerung sind Implikationen im Straßengüterverkehr verbunden. Wenn dieser vermehrt im Vor- und Nachlauf des kombinierten Verkehrs tätig wird und langlaufende Transporte der Bahn überlässt, muss die mittlere Transportweite absinken. Dies ist mit -15 % im Klimaschutzszenario der Fall – hier geht die mittlere Transportweite von heute 164 Kilometer auf 140 Kilometer in 2050 zurück. Im Gegensatz dazu steigt die mittlere Transportweite im Referenzszenario im Straßengüterverkehr in diesem Teilsegment: Zwischen 2010 und 2030 ist dort eine Zunahme um 10 % enthalten, welche für den Zeitraum bis 2050 ebenfalls angenommen wurde. Dementsprechend unterscheiden sich die Verkehrsleistungsentwicklungen beider Szenarien deutlich voneinander: Während im Referenzszenario hier die Verkehrsleistung des Straßengüterverkehrs zwischen 2010 und 2050 um 73 % zunimmt, stagniert sie im Klimaschutzszenario. Oder anders gesprochen: Im Klimaschutzszenario wird das auch auf der Straße unterstellte Aufkommenswachstum durch eine Optimierung der Transportweite in der Verkehrsleistung aufgefangen.

Abbildung 42: Entwicklung der modalen Verkehrsleistungen im Teilsegment der sonstigen Produkte im Binnenverkehr

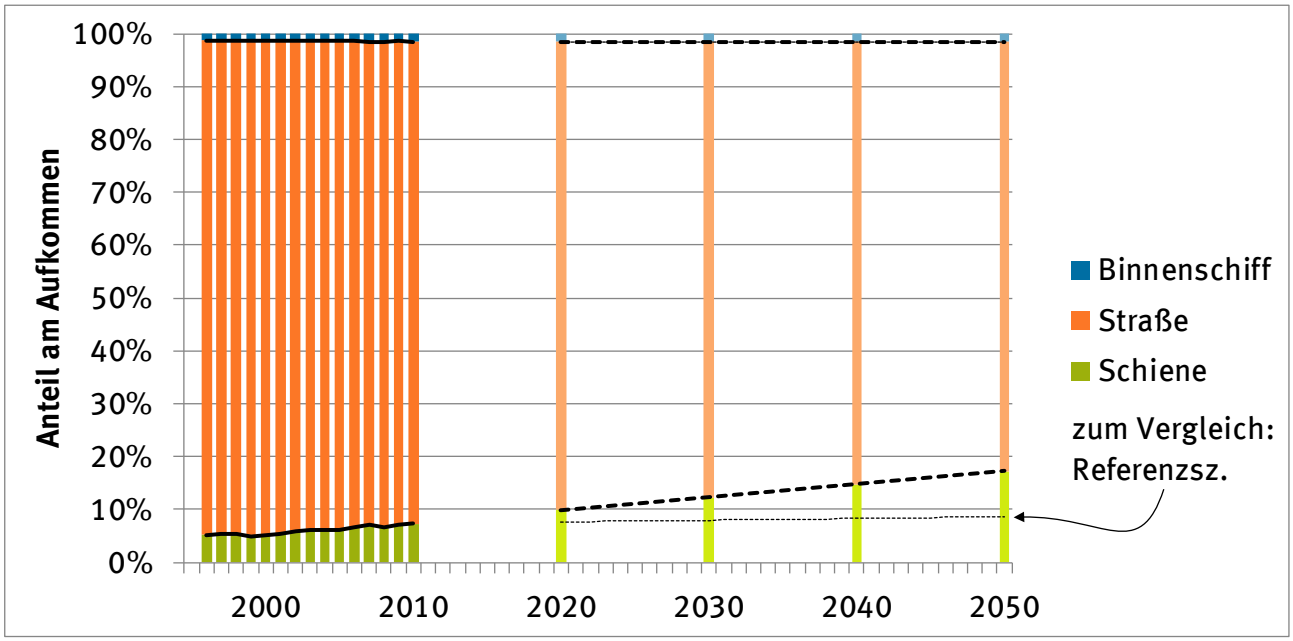


Teilsegment chemische Erzeugnisse und Kunststoffe sowie Baustoffe im Binnenverkehr

Dieses Teilsegment ist – wie bereits ausgeführt – ein Mischsegment mit drei sich deutlich voneinander unterscheidenden Warenarten: Zum ersten sind hier Vorprodukte oder Erzeugnisse aus der Chemie und Pharmazie enthalten. Zum zweiten sind Kunststoffe bzw. Halbwaren aus Kunststoffen Bestandteil dieses Teilsegments. Und drittens sind hier sogenannte Mineralerzeugnisse als Baustoffe und Glaswaren subsummiert. Für das Wirkungsmodell wäre eine weitere Aufsplittung dieser Produktgruppen hilfreich, jedoch ist dies aus statistischen Gründen nicht möglich. Es lässt sich jedoch abschätzen, dass die Baustoffe deutlich mehr als die Hälfte des Aufkommens in diesem Teilsegment stellen, während die mit einem niedrigen spezifischen Warengewicht versehenen Kunststoffe den geringsten Anteil besitzen. Insgesamt ist dieses Teilsegment vom Aufkommen her gesehen kein Wachstumssegment. Mit Blick auf die Verkehrsleistung aber werden – ausgehend vom Referenzszenario – überdurchschnittliche Steigerungen erwartet. Dahinter steht eine Aufkommensstagnation bei den vor allem im Nahbereich transportierten Baustoffen, während die Transportmengen mit chemischen Erzeugnissen und Kunststoffen deutlich zunehmen werden und in höheren Entfernungsbereichen unterwegs sind.

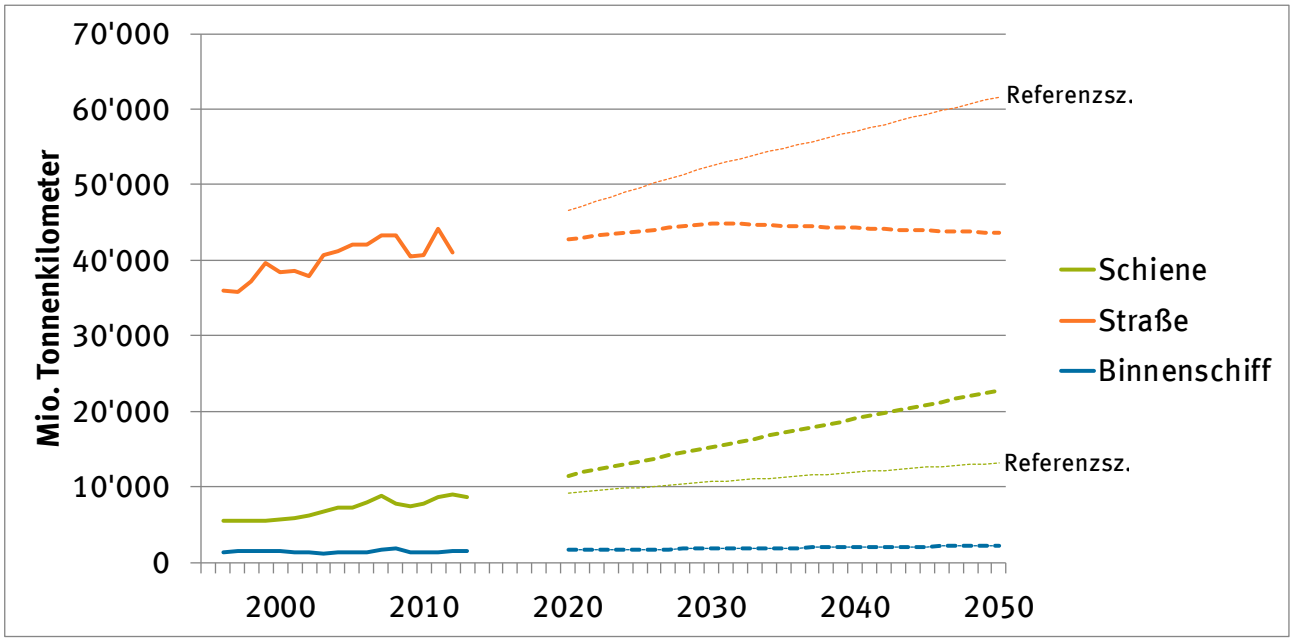
Beim aufkommensbezogenen Modal Split konnte die Bahn ihren Anteil in den letzten 10 Jahren markant und vor allem – im Gegensatz zu vielen anderen Teilsegmenten – stetig um 2,5 Prozentpunkte auf 7,3 % steigern. Dies in erster Linie bei den chemischen Erzeugnissen und Kunststoffen, während die Baustofftransporte im Großteil im Nahbereich zur Versorgung der Baustellen auf der Straße erfolgen. Wenn die Bahn diesen Trend „nur“ schon fortsetzt, so wären bis 2050 Verlagerungen im Modal Split um 10 Prozentpunkte auf dann 17,3 % möglich. Um diese Verlagerung zu erreichen, sind vor allem kapazitätssteigernde Maßnahmen im Bereich der Infrastruktur notwendig.

Abbildung 43: Entwicklung des aufkommensbezogenen Modal Split im Teilsegment der chemischen Erzeugnisse und Kunststoffe sowie Baustoffe im Binnenverkehr



Bei der Verkehrsleistung unterstellt das Referenzszenario im Straßengüterverkehr eine markante Ausdehnung der mittleren Transportweiten von heute 104 auf 140 Kilometer in 2050. Im Klimaschutzszenario bewirkt jedoch die vor allem bei den chemischen Erzeugnissen und den Kunststoffen unterstellte Verlagerung, dass der Anteil der Kurzstreckenverkehre im Bau deutlich ansteigt und somit die mittlere Transportweite auf nur 112 Kilometer deutlich schwächer zunimmt. Im Ergebnis steigt dann die Verkehrsleistung auf der Straße um nur noch moderate 7,2 %, während sie im Referenzszenario um mehr als die Hälfte der heutigen Verkehrsleistung zunimmt. Damit sind in diesem Teilsegment kaum straßenbezogene Maßnahmen relevant, stattdessen wirken die Verlagerungsmaßnahmen seitens Schiene auch auf die Leistungsentwicklung im Straßengüterverkehr.

Abbildung 44: Entwicklung der modalen Verkehrsleistungen im Teilsegment der chemischen Erzeugnisse und Kunststoffe sowie Baustoffe im Binnenverkehr

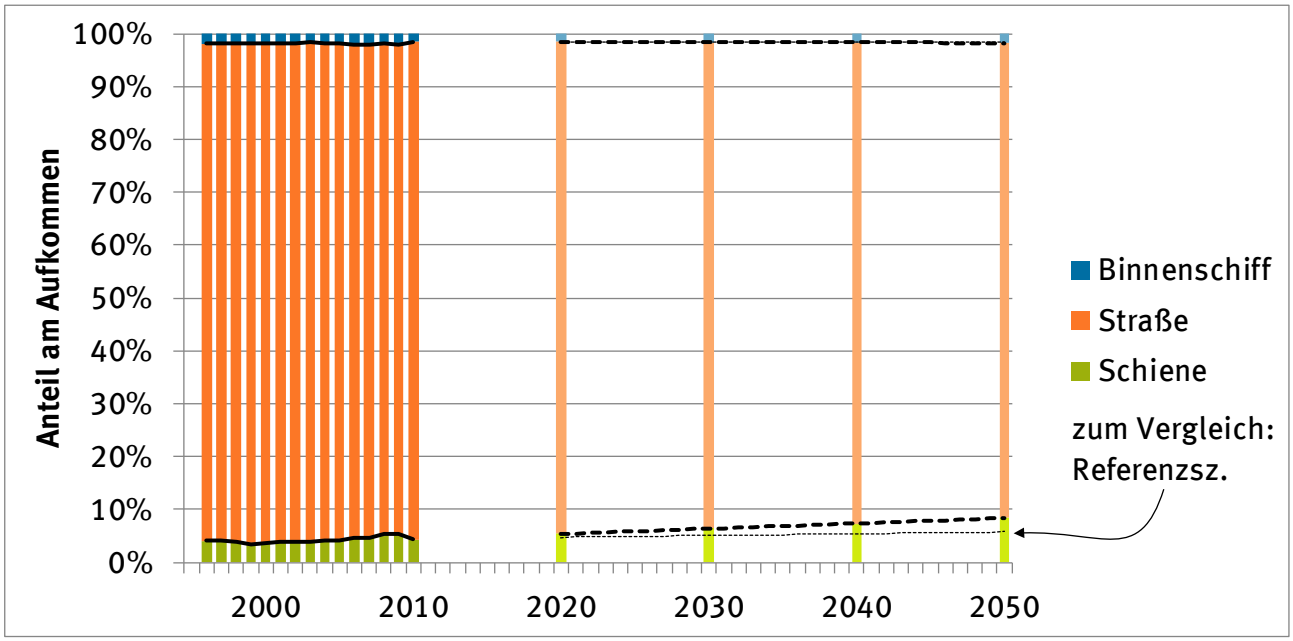


Teilsegment Erze, Steine und Erden sowie sonstige Bergbauerzeugnisse

Das Teilsegment zu Transporten von Erzen, Steinen und Erden sowie sonstigen Bergbauerzeugnissen steht in unmittelbarem Zusammenhang zur Bautätigkeit. Denn der größte Teil des hier transportierten Aufkommens generiert sich aus Aushub oder massengutartigen Baustoffen (wie bspw. Sand und Kies) , dazu kommen Rohstoffe zur Zement- und Betonherstellung. Durch die hohe Gewichtsintensität der Materialien ist der aufkommensbezogene Anteil dieses Teilsegments sehr hoch: Jede vierte Tonne im Gesamtgüterverkehr stammt aus diesem Teilsegment. Das Wachstumspotenzial ist abhängig von der künftigen Bautätigkeit. Da diese in etwa mit der Bevölkerungsentwicklung einher geht, sind die Wachstumsaussichten beschränkt. In Verbindung mit Materialsubstitutionen wird sogar ein leichter Rückgang im Aufkommen dieses Teilsegments erwartet.

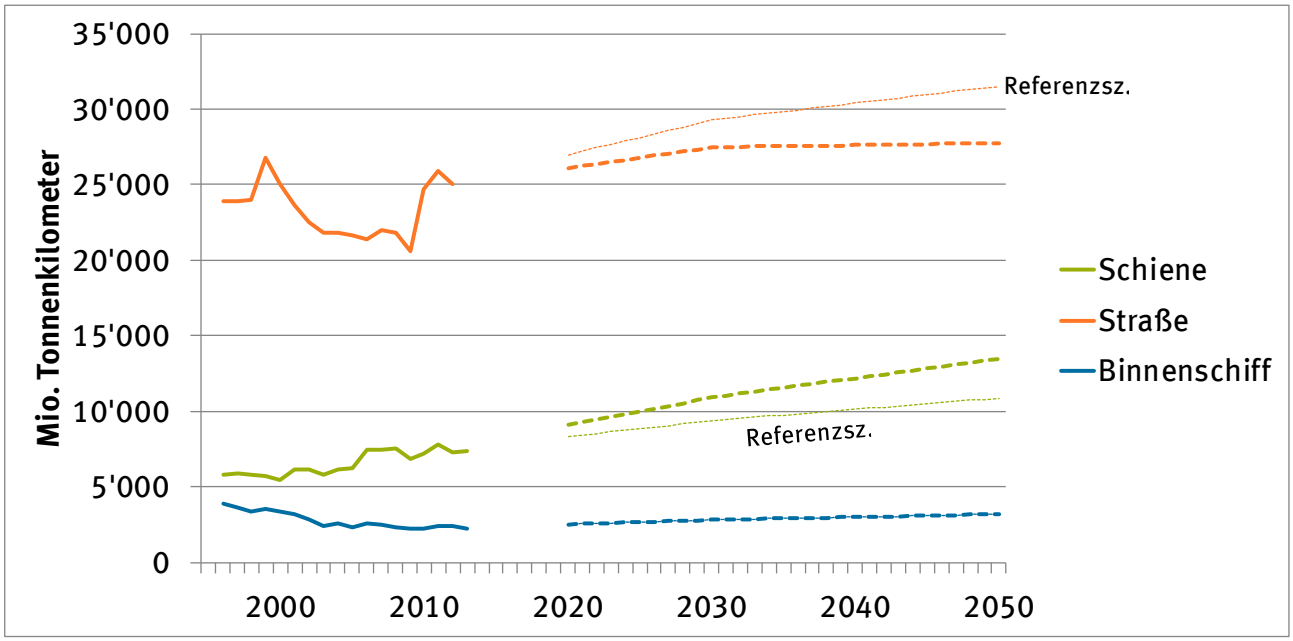
Das Potenzial zur Verlagerung von Straße auf die Schiene ist vergleichsweise niedrig. Die Baustellenversorgung besitzt bis auf wenige Ausnahmen im Bereich von Großvorhaben keine Bahnaffinität. Die möglicherweise zur Verlagerung zur Verfügung stehenden Straßentransporte in den langlaufenden Entfernungsbereichen besitzen nur sehr geringe Aufkommensanteile: Mehr als 90 % der Transporte auf der Straße sind heute kürzer als 100 Kilometer. Durch Verlagerungen in den langlaufenden Bereichen konnte jedoch die Bahn in der letzten Dekade in ihren Aufkommensanteil verdoppeln, so dass sie bereits heute (2010) einen Modal Split-Anteil von 5,4 % besitzt. Wenn dieses Potenzial weiter ausgeschöpft wird, dann wären im Klimaschutzszenario weitere 4 Prozentpunkte bis 2050 möglich. Unterstützt werden würde dies vor allem durch Maßnahmen der Raum- und Verkehrsplanung, beispielsweise mit Modal Split-Vorgaben für entsprechende Aufkommensschwerpunkte (Verkehrsauswirkungsprüfung).

Abbildung 45: Entwicklung des aufkommensbezogenen Modal Split im Teilsegment der Erze, Steine und Erden im Binnenverkehr



Zur Optimierung der Verkehrsleistung besteht auf der Straße bedingt durch die hier gegebenen Logistikprozesse wenig Spielraum. Allerdings zeigt die Entwicklung der mittleren Transportweite über die letzten 15 Jahre bis 2010 eine sehr stetige Ausweitung um circa 20 % auf heute 29 Kilometer. Im Referenzszenario erhöht sich diese Transportweite bis 2050 um circa 30%. Mit steuernden Maßnahmen könnten hier die Transportvorgänge noch ein wenig optimiert werden (insbesondere Lkw-Maut auf weiteren Netzkategorien und Lkw-Maut gestaffelt nach Gewichtsklassen), so dass im Klimaschutzszenario die mittlere Transportweite 10 % niedriger ausfällt als noch im Referenzszenario. Dennoch können diese Maßnahmen nicht verhindern, dass selbst im Klimaschutzszenario die mittlere Transportweite weiter zunimmt auf dann 36 Kilometer. Im Ergebnis steigt die Straßenverkehrsleistung in diesem Teilsegment um 13 %; im Referenzszenario sind es noch 28 %.

Abbildung 46: Entwicklung der modalen Verkehrsleistungen im Teilsegment der Erze, Steine und Erden im Binnenverkehr



Übersicht zu den Entwicklungen aller Teilsegmente

Gemessen an der aufkommensbezogenen Verlagerungswirkung sind die nichttechnischen Maßnahmen im Teilsegment der sonstigen Produkte im Durchgangsverkehr am wirksamsten. Dort erreicht das Klimaschutzszenario bis 2050 mit zusätzlichen 23 Prozentpunkten gegenüber dem Modal Shift im Referenzszenario die höchsten Wirkungen. Allerdings ist diese Verlagerungsdimension mit der Aufkommensmenge zu relativieren. Das Teilsegment der sonstigen Produkte im Durchgangsverkehr besitzt im Jahr 2050 nur einen Anteil von weniger als 2 % am Gesamtaufkommen, wobei jedoch der hier im Klimaschutzszenario überdurchschnittlich hohe Bahnanteil von 50 % einen höheren Segmentanteil am gesamten Schienengüterverkehrsaufkommen von fast 5 % impliziert.

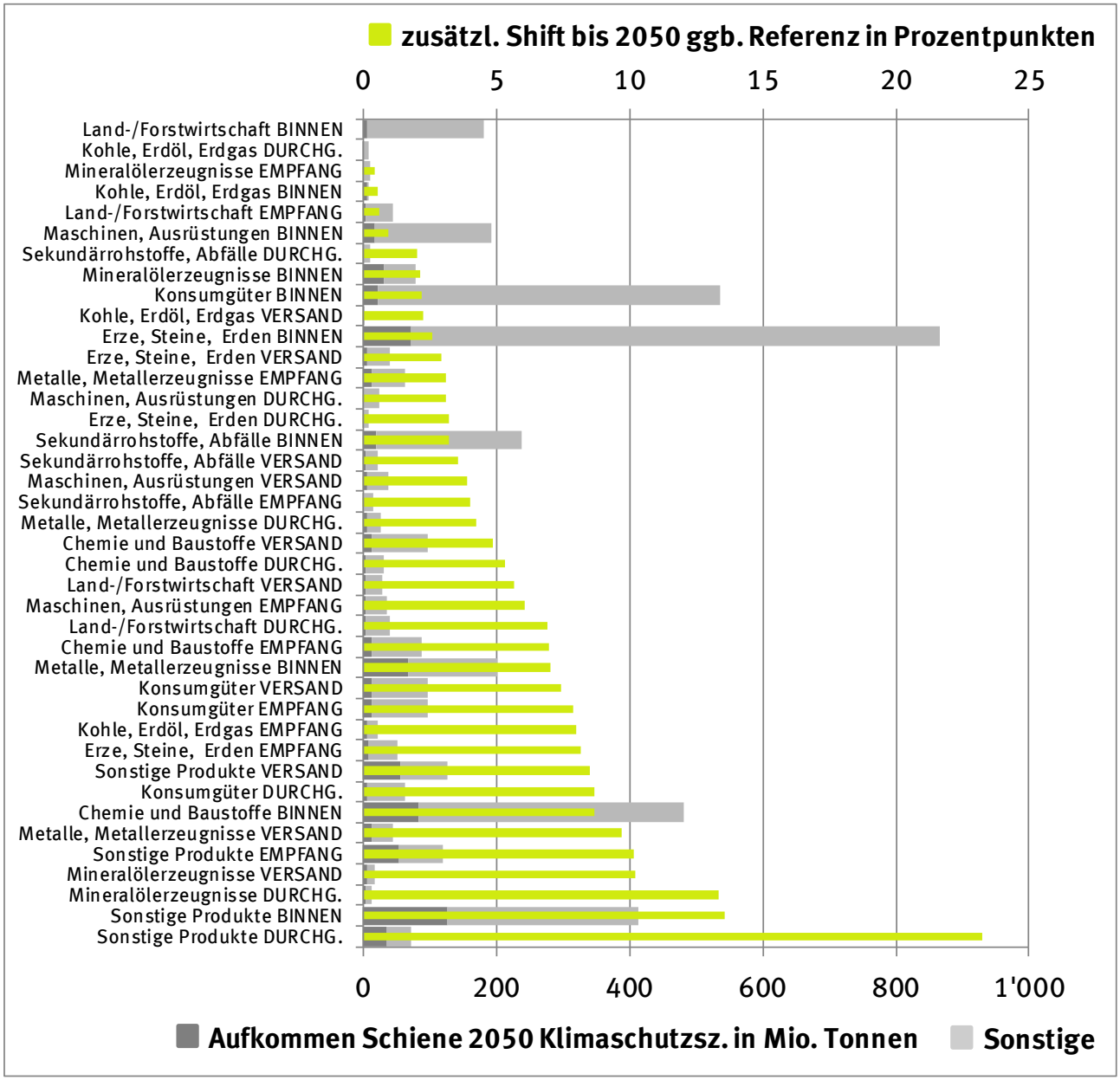
Unter Einbezug der jeweiligen Teilsegmentgröße (gemessen am Aufkommen) zeigen die folgenden Teilsegmente die größten Beiträge zu einer Verlagerung im Rahmen des Klimaschutzszenarios:

- sonstige Produkte im Binnenverkehr (Stück- und Sammelgüter aus Nahrungsmitteln, Maschinen und Ausrüstungen bzw. langlebigen Konsumgütern insbesondere im kombinierten Verkehr),
- chemische Erzeugnisse und Kunststoffe sowie Baustoffe im Binnenverkehr,
- Metalle und Metallerzeugnisse im Binnenverkehr,
- Abfälle und Sekundärrohstoffe im Binnenverkehr,
- nochmals sonstige Produkte, jedoch im grenzüberschreitenden Empfang und Versand,
- Konsumgüter zum kurzfristigen Verbrauch (in erster Linie Nahrungsmittel) im grenzüberschreitenden Empfang und Versand,
- nochmals chemische Erzeugnisse und Kunststoffe sowie Baustoffe, jedoch im grenzüberschreitenden Empfang und Versand.

Diese Auflistung gibt einen Hinweis auf mögliche Fokussierungen bei der Umsetzung nichttechnischer Maßnahmen, welche je nach Teilsegment bzw. dessen Logistikstrukturen unterschiedliche Wirkungen entfalten können. Einen Gesamtüberblick zu den Verlagerungswirkungen in allen 40 Teilsegmenten im Klimaschutzszenario im Vergleich zu denen des Referenzszenarios gibt die nach-

folgende Abbildung. Dabei wird neben der zusätzlichen Verlagerungswirkung (in Prozentpunkten) die dahinter stehende Segmentgröße (in Tonnen) dargestellt.

Abbildung 47: Aufkommensbezogene Verlagerungswirkung des Klimaschutzszenarios bis 2050 gegenüber dem Referenzszenario (gereiht nach Shift-Potenzial zur Schiene)

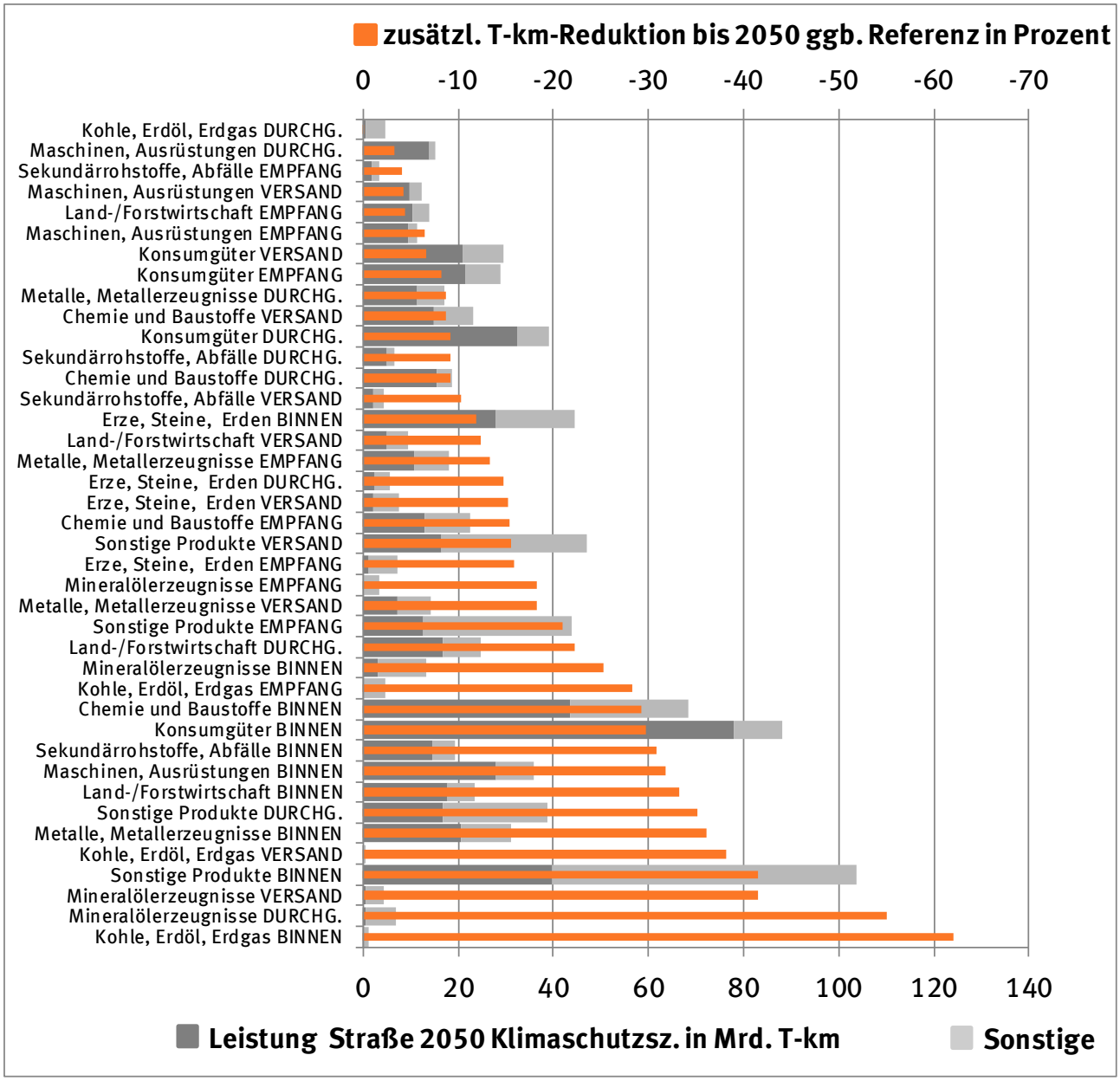


Betreffend der Maßnahmenwirkungen bei der Verkehrsleistung lässt sich eine ähnliche Auswertung über alle Teilsegmente vornehmen. Hier steht die Leistungsreduktion beim Straßengüterverkehr im Klimaschutzszenario gegenüber dem Referenzszenario im Vordergrund. Das dabei an erster Stelle stehende Teilsegment zeigt ein Minderungspotenzial um 62 %; es handelt sich dabei um Transporte von Kohle und Erdöl im Binnenverkehr. Allerdings ist die Bedeutung dieses Teilsegments hinsichtlich der Verkehrsleistung im Jahr 2050 mit einem Anteil von nur 0,1 % verschwindend gering. Daher ist auch hier eine Relativierung des Minderungspotenzials anhand der Segment-spezifischen Verkehrsleistung vorzunehmen.

Unter Einbezug der jeweiligen Teilsegmentgröße (gemessen an der Verkehrsleistung in Tonnenkilometer) zeigen die folgenden Teilsegmente die größten Beiträge zu einer Leistungsminderung beim Straßengüterverkehr im Rahmen des Klimaschutzszenarios:

- sonstige Produkte im Binnenverkehr (Stück- und Sammelgüter aus Nahrungsmitteln, Maschinen und Ausrüstungen bzw. langlebigen Konsumgütern insbesondere im Kombinierten Verkehr),
- Konsumgüter zum kurzfristigen Verbrauch (in erster Linie Nahrungsmittel) im Binnenverkehr,
- chemische Erzeugnisse und Kunststoffe sowie Baustoffe im Binnenverkehr,
- Maschinen und Ausrüstungen sowie langlebige Konsumgüter im Binnenverkehr,
- Metalle und Metallerzeugnisse im Binnenverkehr,
- nochmals sonstige Produkte, jedoch im Durchgangsverkehr,
- land- und forstwirtschaftliche Erzeugnisse im Binnenverkehr,
- Abfälle und Sekundärrohstoffe im Binnenverkehr.

Abbildung 48: Leistungsbezogene Minderungswirkung des Klimaschutzszenarios bis 2050 gegenüber dem Referenzszenario im Straßengüterverkehr (gereiht nach relativer Höhe der Leistungsreduktion)



6.3.2 Modale Entwicklungen

Mit dem Klimaschutzszenario wird ein markanter Anteil des Güterverkehrsaufkommens von der Straße auf die Schiene verlagert. Im Referenzszenario steigt das Schienengüterverkehrsaufkommen zwischen 2010 und 2050 um 136 Mio. t (+38 %). Mit weiteren, über das Referenzszenario hinausgehenden nichttechnischen Maßnahmen können im Klimaschutzszenario weitere 259 Mio. t zusätzlich verlagert werden, so dass in diesem Szenario die Nachfragemenge auf der Bahn um insgesamt 395 Mio. t zunimmt (+110 % gegenüber 2010 bzw. +52 % gegenüber dem Referenzszenario in 2050). Während im Referenzszenario der Bahnanteil am aufkommensbezogenen Modal Split von 9,7 % in 2010 um 1.1 Prozentpunkte auf 10,8 % in 2050 zunimmt, beträgt der Zuwachs im Klimaschutzszenario 6,9 Prozentpunkte auf dann 16,6 %.

Die Anteilszunahmen für den Schienengüterverkehr im Klimaschutzszenario sind sicher als ambitioniert einzustufen. Sie dürften am oberen Rand des Machbaren liegen. Der Vergleich zum Referenzszenario ist jedoch insofern einzuschränken als dass das Referenzszenario gemäß der Methodik der VVP 2030 eine Rückkopplung auf die infrastrukturbedingten Kapazitäten beinhaltet. Andererseits zeigt jedoch der Blick in die Vergangenheit, dass die Bahn durchaus in der Lage ist, Marktanteile hinzuzugewinnen. So konnte sie zwischen 2000 und 2010 ihren Anteil am aufkommensbezogenen Modal Split von 7,7 % um 2 Prozentpunkte auf 9,7 % steigern. Eine – zu simple – Extrapolation dieses Trends würde für 2050 einen Bahnanteil von 17,7 % ergeben. Selbst das Klimaschutzszenario erreicht diesen Wert nicht.

Die relativ gesehen größten Verlagerungswirkungen werden im Durchgangsverkehr erwartet. Dort könnten mit dem Klimaschutzszenario weitere 10,5 Prozentpunkte am Modal Split gegenüber dem Referenzszenario gewonnen werden, so dass sich der Bahnanteil auf dieser Hauptverkehrsverbindung bis 2050 auf 20,4 % erhöht. Dies im Gegensatz zum Referenzszenario, welches mit einer leichten Abnahme des Bahnanteils rechnet. Absolut gesehen besitzt jedoch der Binnenverkehrsmarkt die größeren Verlagerungshebel. Mit einer Zunahme des Bahnanteils um 5,0 Prozentpunkte gegenüber dem Referenzszenario auf dann 14,2 % sind in dieser Hauptverkehrsverbindung Aufkommenssteigerungen von 160 Mio. t gegenüber dem Referenzszenario verbunden; im Durchgangsverkehr beläuft sich die vergleichbare Zunahme auf 30 Mio. t.

Trotz dieser Verlagerungswirkungen wird der Straßengüterverkehr auch im Klimaschutzszenario eine weiter steigende Nachfragemenge bewältigen müssen. Gegenüber 2010 nimmt die entsprechende Tonnage um weitere 13 % zu. Die analoge Wachstumsrate zum Referenzszenario beläuft sich auf 22 %, so dass im Klimaschutzszenario immerhin eine Aufkommensminderung gegenüber dem Referenzszenario von 7 % erzielt wird. Die gesamthaften Zunahmen sind insbesondere den weiterhin dynamisch wachsenden grenzüberschreitenden Märkten zuzuschreiben. Selbst wenn dort – wie im Klimaschutzszenario unterstellt – die höchsten Verlagerungswirkungen erzielt werden, verbleiben immer noch entsprechend ansteigende Nachfragemengen auf der Straße. Und selbst der mit Abstand aufkommensstärkste Teilmarkt des Binnenverkehrs wird auch im Klimaschutzszenario um immer noch 4 % zunehmen (Referenzszenario: 10 %).

Abbildung 49: Entwicklung des aufkommensbezogenen Modal Split im Gesamtverkehr

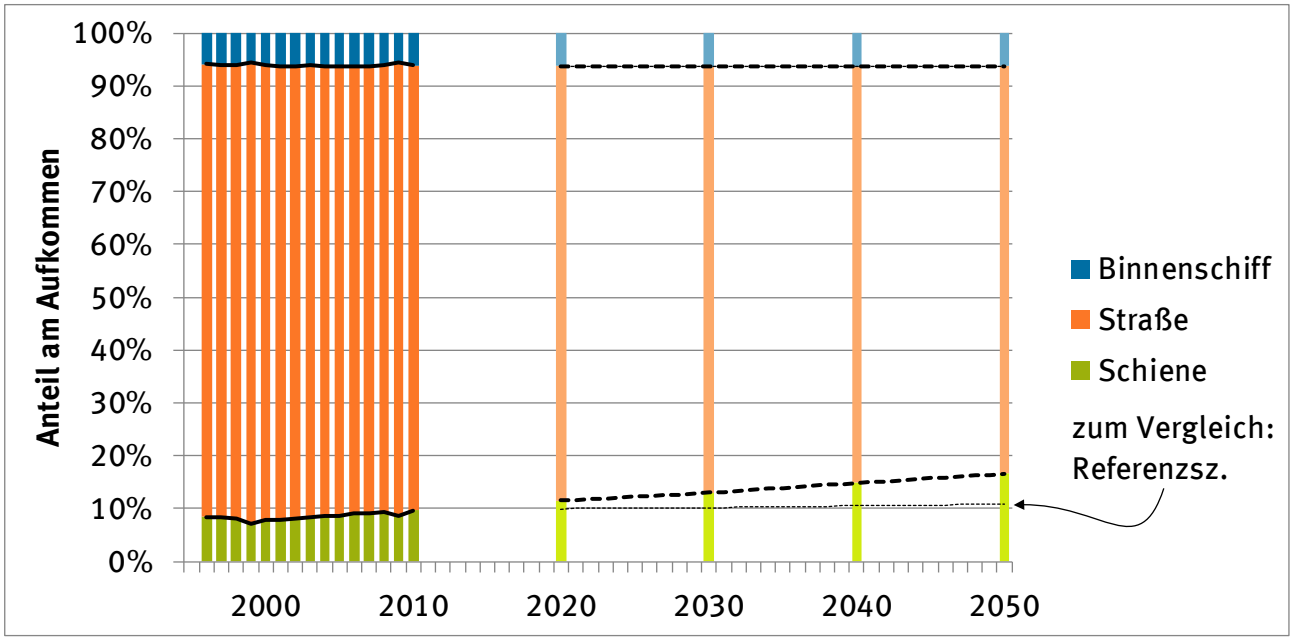


Tabelle 43: Entwicklungen des Güterverkehrsaufkommens nach Modi und Hauptverkehrsverbindungen zwischen 2010 und 2050 im Referenz- und Klimaschutzszenario

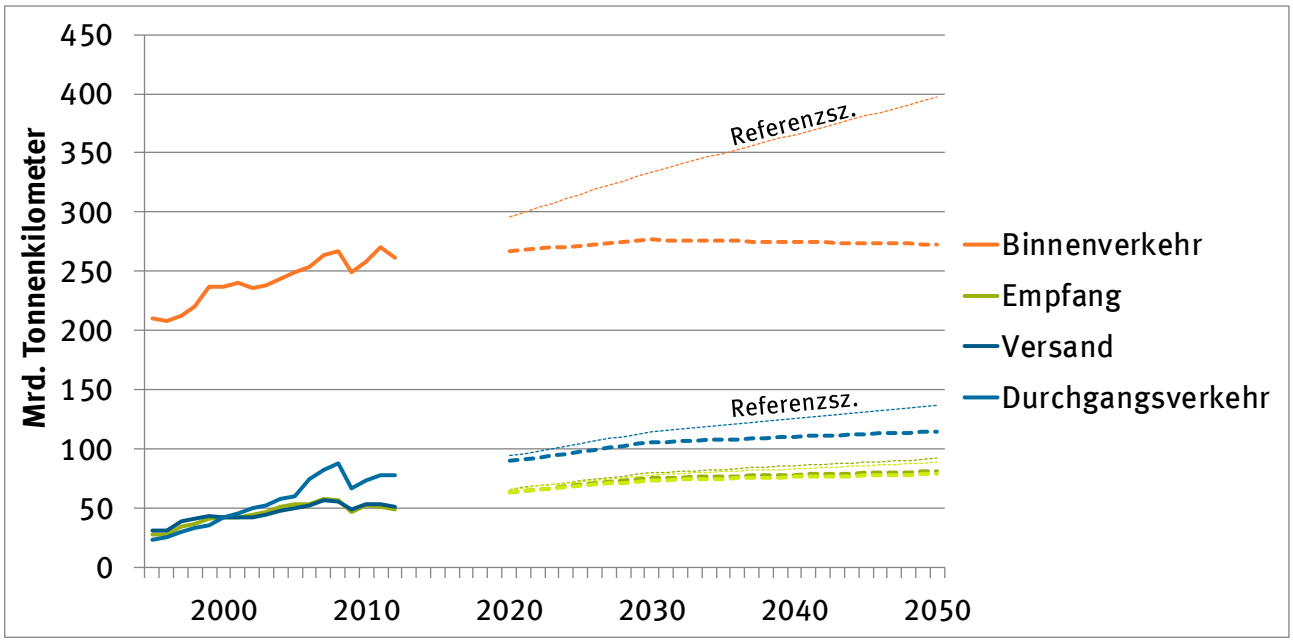
	2010	Ref 2050	zu 2010	Klima 2050	zu 2010	zu Ref
Schiene	1000 t	1000 t		1000 t		
Binnenverkehr	241'793	293'082	+21.2 %	453'676	+87.6 %	+54.8 %
Versand	45'682	88'126	+92.9 %	119'594	+161.8 %	+35.7 %
Empfang	52'680	83'439	+58.4 %	119'959	+127.7 %	+43.8 %
Durchgangsv.	18'790	30'473	+62.2 %	60'642	+222.7 %	+99.0 %
SUMME	358'946	495'120	+37.9 %	753'871	+110.0 %	+52.3 %
Straße	1000 t	1000 t		1000 t		
Binnenverkehr	2'588'890	2'841'332	+9.8 %	2'682'127	+3.6 %	-5.6 %
Versand	213'459	362'739	+69.9 %	322'601	+51.1 %	-11.1 %
Empfang	191'555	355'754	+85.7 %	312'482	+63.1 %	-12.2 %
Durchgangsv.	124'739	233'497	+87.2 %	196'068	+57.2 %	-16.0 %
SUMME	3'118'643	3'793'322	+21.6 %	3'513'278	+12.7 %	-7.4 %
Binnenschiff	1000 t	1000 t		1000 t		
Binnenverkehr	53'052	47'793	-9.9 %	60'569	+14.2 %	+26.7 %
Versand	50'375	79'052	+56.9 %	69'364	+37.7 %	-12.3 %
Empfang	103'438	122'054	+18.0 %	113'871	+10.1 %	-6.7 %
Durchgangsv.	22'742	44'677	+96.4 %	40'848	+79.6 %	-8.6 %
SUMME	229'608	293'576	+27.9 %	284'653	+24.0 %	-3.0 %
Gesamtverkehr	1000 t	1000 t		1000 t		
Binnenverkehr	2'883'735	3'182'207	+10.4 %	3'196'372	+10.8 %	+0.4 %
Versand	309'516	529'917	+71.2 %	511'559	+65.3 %	-3.5 %
Empfang	347'673	561'248	+61.4 %	546'312	+57.1 %	-2.7 %
Durchgangsv.	166'272	308'646	+85.6 %	297'558	+79.0 %	-3.6 %
SUMME	3'707'196	4'582'018	+23.6 %	4'551'802	+22.8 %	-0.7 %

Tabelle 44: Anteile der drei Landverkehrsträger am aufkommensbezogenen Modal Split im Gesamtverkehr zwischen 2010 und 2050 im Referenz- und Klimaschutzszenario

	2010	Ref 2050	zu 2010	Klima 2050	zu 2010	zu Ref
Schiene	9.7 %	10.8 %	+1.1 %-P	16.6 %	+6.9 %-P	+5.8 %-P
Straße	84.1 %	82.8 %	-1.3 %-P	77.2 %	-6.9 %-P	-5.6 %-P
Binnenschiff	6.2 %	6.4 %	+0.2 %-P	6.3 %	+0.1 %-P	-0.2 %-P

Die Wirkungen der nichttechnischen Maßnahmen sind im Bereich der Verkehrsleistungen mindestens ebenso bedeutsam für das Klimaschutzszenario wie bei der aufkommensbezogenen Verlagerung. Dies betrifft vor allem die Reduktion der Verkehrsleistungen im Straßengüterverkehr. Während im Referenzszenario die entsprechenden Tonnenkilometer zwischen 2010 und 2050 noch um 63 % zunehmen, kann dieses Wachstum im Klimaschutzszenario auf 25 % begrenzt werden. Damit liegt die Straßengüterverkehrsleistung im Klimaschutzszenario um 23 % unter der des Referenzszenarios. Mit -31 % können dabei die höchsten Reduktionen im Binnenverkehr erzielt werden, womit dann auch aufgrund seiner Marktgröße die höchsten absoluten Minderungen verbunden sind. Dies ist umso bemerkenswerter als dass gerade Binnenverkehr die leistungsrelevante mittlere Transportweite deutlich niedriger ausfällt als auf den grenzüberschreitenden Relationen. Neben der Aufkommensminderung infolge Verlagerungen sind hier vor allem Optimierungsmaßnahmen wirkungsvoll, welche die im Klimaschutzszenario unterstellten Verteuerungen der Lkw-Transporte auf Basis differenzierterer Mautsätze zu kompensieren suchen.

Abbildung 50: Entwicklung der Verkehrsleistungen des Straßengüterverkehrs nach Hauptverkehrsverbindungen im Referenz- und Klimaschutzszenario



Dass die Nachfrageverlagerungen von der Straße auf die Schiene nicht ohne Auswirkungen auf die Verkehrsleistung der Bahn erreicht werden können, ist selbstredend. Hinzu kommt, dass der markante Zuwachs im kombinierten Verkehr die mittleren Transportweiten auf der Schiene nach oben treibt, da Anzahl und Lage der Umschlagspunkte zu Umwegfahrten führen – genauso wie auch weitere Bestrebungen zur Effizienzsteigerung mit entsprechenden Optimierungen bei den Betriebspunkten und -abläufen. Im Ergebnis wird die Schienengüterverkehrsleistung im Klimaschutzszenario bis 2050 mit +163 % gegenüber heute auf dann 284 Mrd. tkm zunehmen. Gegenüber dem Referenzszenario ist damit eine Erhöhung um 52 % verbunden. Entsprechend fallen auch die leistungsbezogenen Modal Split-Verschiebungen aus: Der Schienengüterverkehr wird im Klimaschutzszenario mit 31 % einen gegenüber 2010 um 13 Prozentpunkte höheren Anteil an der Gesamtgüterverkehrsleistung besitzen; gegenüber dem Referenzszenario entspricht dies einer Zunahme um 12 Prozentpunkte.

Abbildung 51: Entwicklung des leistungsbezogenen Modal Split im Gesamtverkehr

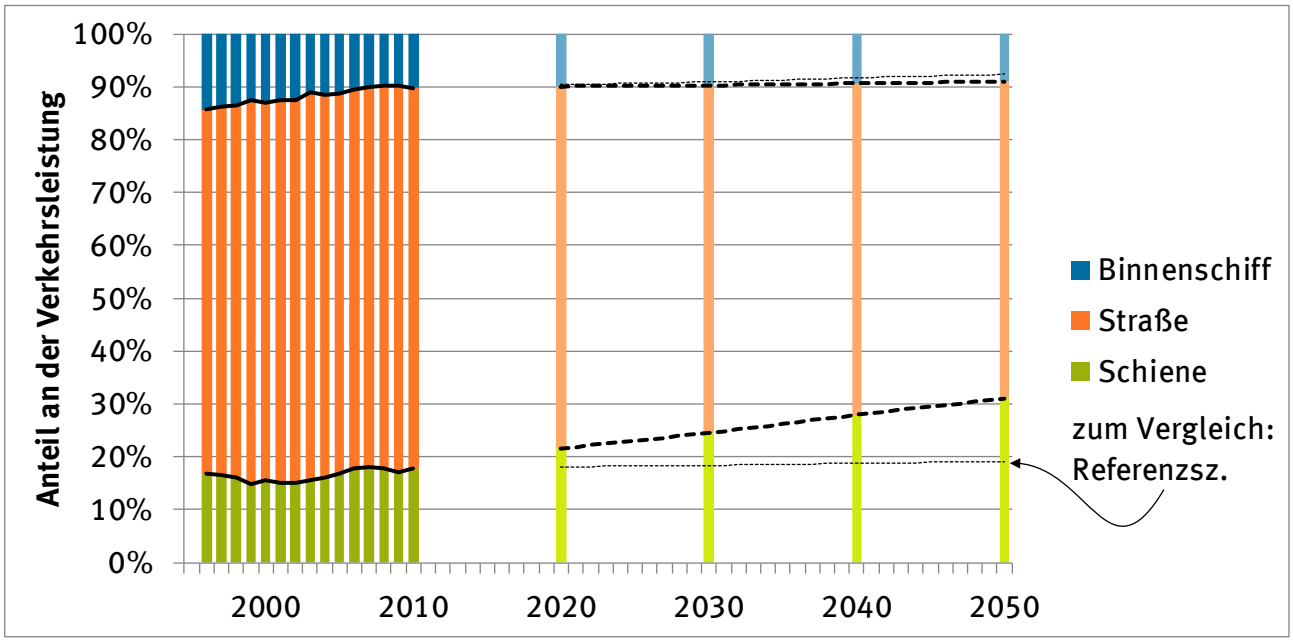


Tabelle 45: Entwicklungen der Güterverkehrsleistung nach Modi und Hauptverkehrsverbindungen zwischen 2010 und 2050 im Referenz- und Klimaschutzszenario

	2010	Ref 2050	zu 2010	Klima 2050	zu 2010	zu Ref
Schiene	Mio. tkm	Mio. tkm		Mio. tkm		
Binnenverkehr	54'389	96'835	+78.0 %	141'111	+159.4 %	+45.7 %
Versand	20'689	37'392	+80.7 %	55'261	+167.1 %	+47.8 %
Empfang	21'002	34'184	+62.8 %	52'243	+148.8 %	+52.8 %
Durchgangsv.	11'486	17'787	+54.8 %	35'230	+206.7 %	+98.1 %
SUMME	107'566	186'198	+73.1 %	283'845	+163.9 %	+52.4 %
Straße	Mio. tkm	Mio. tkm		Mio. tkm		
Binnenverkehr	257'701	396'770	+54.0 %	272'967	+5.9 %	-31.2 %
Versand	53'849	88'641	+64.6 %	78'981	+46.7 %	-10.9 %
Empfang	52'065	91'898	+76.5 %	81'138	+55.8 %	-11.7 %
Durchgangsv.	73'648	137'004	+86.0 %	115'032	+56.2 %	-16.0 %
SUMME	437'263	714'313	+63.4 %	548'117	+25.4 %	-23.3 %
Binnenschiff	Mio. tkm	Mio. tkm		Mio. tkm		
Binnenverkehr	10'810	15'367	+42.2 %	14'220	+31.5 %	-7.5 %
Versand	13'115	15'463	+17.9 %	18'207	+38.8 %	+17.7 %
Empfang	23'575	22'153	-6.0 %	23'871	+1.3 %	+7.8 %
Durchgangsv.	14'778	21'459	+45.2 %	26'475	+79.2 %	+23.4 %
SUMME	62'278	74'443	+19.5 %	82'772	+32.9 %	+11.2 %
Gesamtverkehr	Mio. tkm	Mio. tkm		Mio. tkm		
Binnenverkehr	322'900	508'972	+57.6 %	428'298	+32.6 %	-15.9 %
Versand	87'652	141'496	+61.4 %	152'449	+73.9 %	+7.7 %
Empfang	96'642	148'236	+53.4 %	157'251	+62.7 %	+6.1 %
Durchgangsv.	99'913	176'250	+76.4 %	176'737	+76.9 %	+0.3 %
SUMME	607'107	974'954	+60.6 %	914'734	+50.7 %	-6.2 %

Tabelle 46: Anteile der drei Landverkehrsträger am Leistungs-bezogenen Modal Split im Gesamtverkehr zwischen 2010 und 2050 im Referenz- und Klimaschutzszenario

	2010	Ref 2050	zu 2010	Klima 2050	zu 2010	zu Ref
Schiene	17.7 %	19.1 %	+1.4 %-P	31.0 %	+13.3 %-P	+11.9 %-P
Straße	72.0 %	73.3 %	+1.2 %-P	59.9 %	-12.1 %-P	-13.3 %-P
Binnenschiff	10.3 %	7.6 %	-2.6 %-P	9.0 %	-1.2 %-P	+1.4 %-P

Fahrleistungen im Straßengüterverkehr

Ein Sonderthema stellt die Ableitung von Fahrleistungen im Straßengüterverkehr aus den oben dargestellten Verkehrsleistungsentwicklungen dar. Mit Annahmen von mittleren Auslastungen der Lkw wurden die Fahrleistungen abgeschätzt. Dabei wurden die im TREMOD relevanten Fahrzeugklassen berücksichtigt, indem diese Klassen den Teilsegmenten bei den Verkehrsleistungen des Straßengüterverkehrs zugeordnet wurden. Je nach Fahrzeugklasse und Teilsegment wurden unterschiedliche Entwicklungen zur mittleren Auslastung unterstellt.

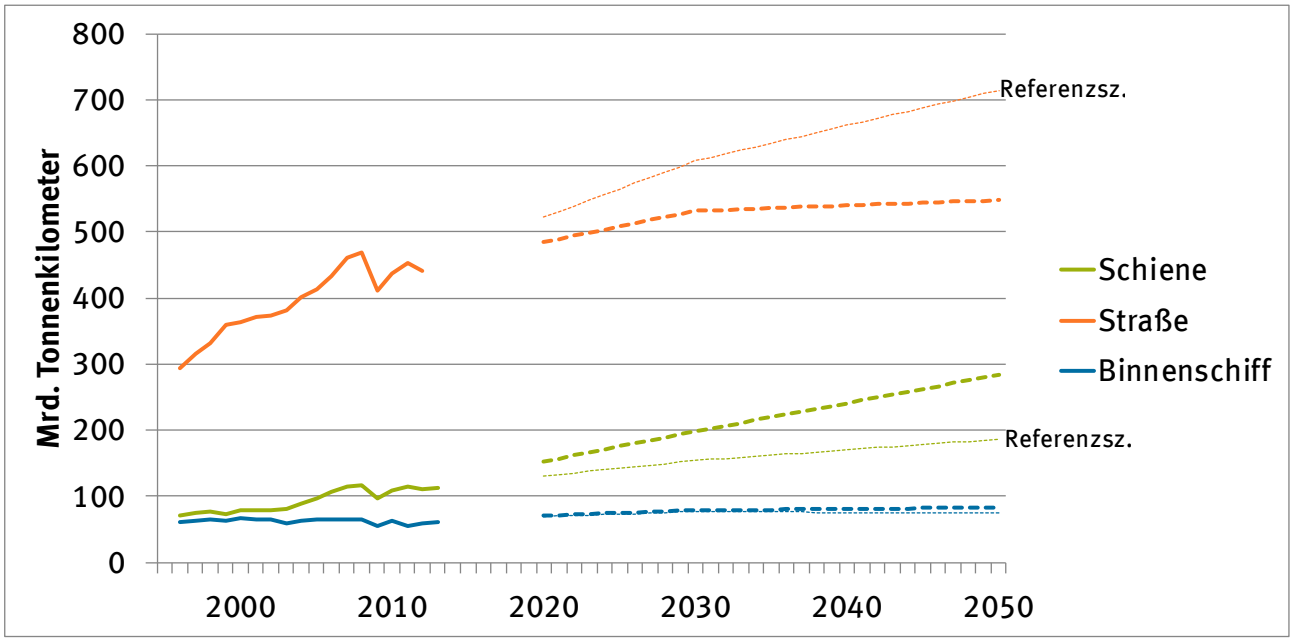
Insgesamt ergibt sich eine Fahrleistungsreduktion im Klimaschutzszenario gegenüber dem Referenzszenario von 27,4 %. Im Vergleich zur Verkehrsleistungsreduktion von 23,3 % wird damit deutlich, dass im Ergebnis aller Überlegungen zu den Auslastungen die Lkw im Durchschnitt um 6.7 % höher beladen werden. Dahinter stehen in der Regel die gleichen Optimierungsmaßnahmen, welche auch zur Transportweitenreduktion beitragen. Aber auch eine weitere Verschiebung hin zu größeren Lkw-Größenklassen (z.B. Lkw- und Sattelzüge mit 40 t zGG) sowie die Zulassung von Lang-Lkw wirkt hier entsprechend fahrleistungsmindernd.

6.3.3 Gesamtergebnis

Das wichtigste Gesamtergebnis zum Klimaschutzszenario aus Sicht der verkehrlichen Wirkungen der nichttechnischen Maßnahmen im Güterverkehr lautet, dass die Gesamtverkehrsleistung gegenüber dem Referenzszenario 2050 um 6,2 % reduziert werden kann. Dabei sind zwei Hebel relevant: Zum einen die Verlagerung von Nachfragemengen von der Straße zur Schiene. Zum anderen durch Optimierungen bei der Abwicklung des Straßengüterverkehrs mit entsprechenden Rückgängen der mittleren Transportweiten.

Mit Verlagerungsmaßnahmen würde bis zum Jahr 2050 ein zusätzliches Bahnpotenzial in Höhe von 259 Mio. t bzw. 52 % gegenüber dem Referenzszenario erschlossen werden. Abzüglich von Wechselwirkungen zwischen Schiene und Binnenschifffahrt vermindert sich das Aufkommen im Straßengüterverkehr gegenüber dem Referenzszenario um 280 Mio. t (-7,4 %). In Verbindung mit den Transportweiten-relevanten Optimierungsmaßnahmen beläuft sich das Minderungspotenzial bei der Verkehrsleistung auf der Straße gegenüber dem Referenzszenario auf -23,3 %. Gleichzeitig aber muss die Bahn die markante Mehrnachfrage bewältigen, womit im Jahr 2050 eine Verkehrsleistungszunahme auf dem Schienennetz um 52,4 % gegenüber dem Referenzszenario verbunden sein wird.

Abbildung 52: Entwicklung der Verkehrsleistungen im Gesamtverkehr nach Modi im Referenz- und Klimaschutzszenario



6.3.4 Fazit zu den Wirkungen nichttechnischer Maßnahmen im Güterverkehr

Die im Klimaschutzszenario quantifizierten Wirkungen der hier unterstellten nichttechnischen Maßnahmen geben ein Maximalpotenzial zur Reduktion der klimarelevanten verkehrlichen Kenngrößen wieder. Oder anders ausgedrückt: Die Umsetzung all dieser Maßnahmen stellt ein ambitioniertes Ziel dar.

Das Wirkungsmodell zur Quantifizierung der Maßnahmen im Klimaschutzszenario setzt die Schwerpunkte bei der Verkehrsmittelwahl (Modal Split) und der Transportabwicklung (Logistikprozesse bzw. Routing). Eventuelle Veränderungen bei der Zielwahl werden ebenfalls beachtet, sind jedoch nachgeordnet. Das Modell geht allerdings davon aus, dass die Gesamtnachfrage aus Produktion und Verbrauch mit verkehrlichen Maßnahmen nicht signifikant beeinflusst werden kann; stattdessen sind hier strukturelle Entwicklungen (Bevölkerung, volkswirtschaftliche Verflechtungen) und allenfalls Verhaltens-, Konsum- und Produktänderungen entscheidender. Deren – jedoch zumeist nur sehr langfristig abbildbaren – Implikationen bzw. die dahinter stehenden Maßnahmen (sofern es dazu überhaupt steuerbare Beeinflussungsmöglichkeiten gibt) waren nicht Gegenstand dieses Gutachtens und müssen ggf. an anderer Stelle beleuchtet werden.

Die nichttechnischen verkehrlichen Maßnahmen zeigen jedoch durchaus markante Wirkungen. Dabei zeigt sich einmal mehr, dass allzu pauschale Maßnahmen dem äußerst komplexen Güterverkehrsmarkt nicht gerecht werden würden. Stattdessen sind die Produktions- und Logistikprozesse in den einzelnen Teilsegmenten aufzunehmen und gezielt anzusprechen. Hier gilt es, die Stärken und Schwächen der einzelnen Verkehrsträger zu nutzen. Dementsprechend sind beispielsweise Maßnahmen auf langlaufende Verkehre sehr wirkungsvoll, da hier die Bahn a) überhaupt entsprechende Angebote unterbreiten kann und b) ihre Produktivität in wirtschaftlich sinnvolle Bereiche übergeht. Damit rücken vor allem internationale Relationen zur Verlagerung in den Fokus. Aber auch auf längeren innerdeutschen Verbindungen können bei entsprechenden Rahmenbedingungen (Infrastrukturkapazitäten, differenzierte Kostensteuerung) gute Wirkungen im Sinne des Klimaschutzszenarios erzielt werden.

6.4 Ergebnisse

6.4.1 Verkehrsleistungen

In diesem Abschnitt werden die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Annahmen zur Verkehrsleistungsentwicklung so zusammengefasst, dass ein unmittelbarer Vergleich mit den Szenarienergebnissen in den darauffolgenden Kapiteln möglich ist. Es wird unterschieden nach den Verkehrsträgern:

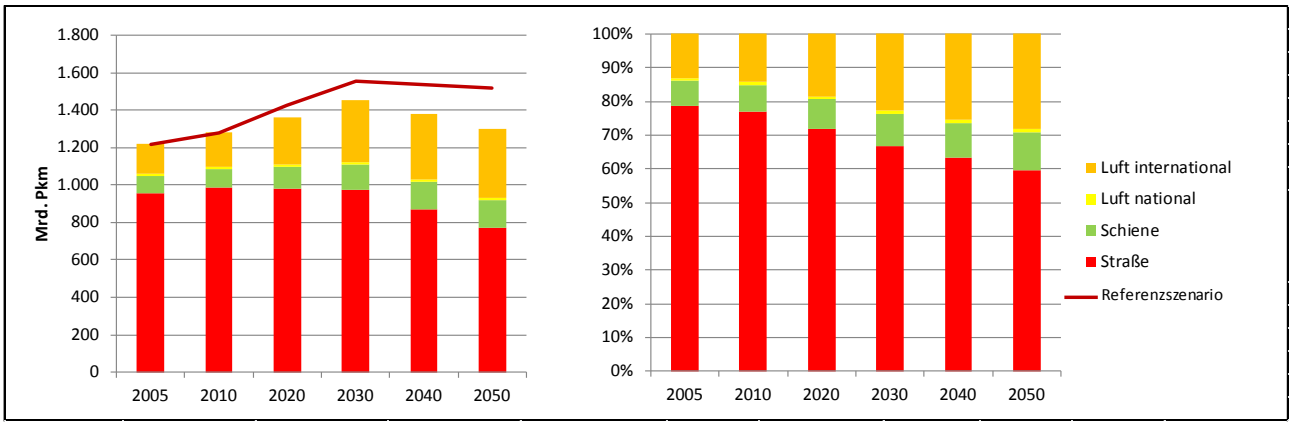
- **Straße:** Inländischer Verkehr mit motorisierten Zweirädern, Pkw, leichten Nutzfahrzeugen, Lkw, Last- und Sattelzügen, Bussen sowie sonstigen Kfz,
- **Schiene:** Inländischer Verkehr mit Straßen- , Stadt- und U-Bahnen sowie Eisenbahnverkehr,
- **Binnenschiff:** Verkehr auf inländischen Wasserstraßen,
- **Luftverkehr national:** Flüge zwischen inländischen Flughäfen,
- **Luftverkehr international:** Gesamtstrecke des von deutschen Flughäfen abgehenden Flugverkehrs in andere Länder.

Für den **internationalen Seeverkehr** wurden keine Verkehrsleistungen ermittelt. Dieser wird in den Ergebnissen für Energieverbrauch und Emissionen mit einem gegenüber 2010 unveränderten Energieverbrauch auf Basis der Schiffsbunkermengen nach Energiebilanz bilanziert.

Personenverkehr

Die Entwicklung der Verkehrsleistungen im Personenverkehr im Klimaschutzszenario ist in der folgenden Abbildung im Vergleich zur Referenzentwicklung (siehe auch Abbildung 34) dargestellt.

Abbildung 53: Entwicklung Personenverkehrsleistungen im Klimaschutzszenario



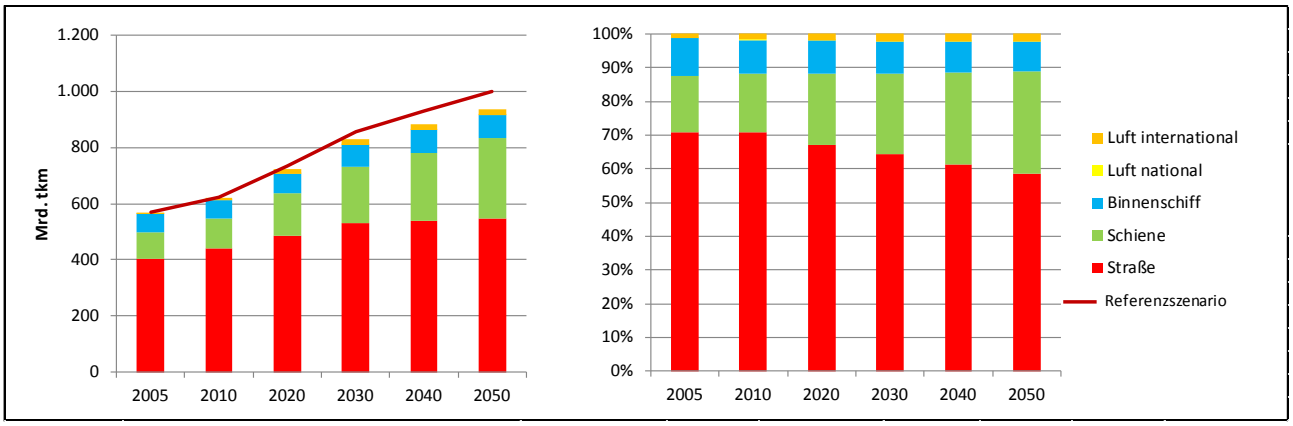
Die wesentlichen Merkmale des Klimaschutzszenarios im Vergleich zum Referenzszenario sind wie folgt:

- Die grundsätzliche Tendenz – zunehmende Verkehrsleistung bis 2030, danach Abnahme – bleibt auch im Klimaschutzszenario bestehen.
- Durch die **nichttechnischen Maßnahmen** im Personenverkehr liegt die Verkehrsleistung **im Klimaschutzszenario 2050 um 15 % niedriger als im Referenzszenario**, bei einem Rückgang im Straßenverkehr um22 % und im Luftverkehr um 10 %.
- Der **Modal Split verschiebt sich deutlich von der Straße hin zum Eisenbahnverkehr** (von **7,6 % im Jahr 2005** auf **11 % im Jahr 2050**).

Güterverkehr

Die Entwicklung der Verkehrsleistungen im Güterverkehr im Klimaschutzszenario sind in der folgenden Abbildung im Vergleich zur Referenzentwicklung (siehe auch Abbildung 35) dargestellt.

Abbildung 54: Entwicklung der Güterverkehrsleistungen im Klimaschutzszenario



Die wesentlichen Merkmale des Klimaschutzszenarios im Vergleich zum Referenzszenario sind wie folgt:

- Die grundsätzliche Tendenz – zunehmende Verkehrsleistung bis 2050 – bleibt auch im Klimaschutzszenario bestehen.
- Durch die **nichttechnischen Maßnahmen** im Güterverkehr liegt die Transportleistung **im Klimaschutzszenario um 6 % niedriger als im Referenzszenario,** bei einem Rückgang im Straßenverkehr um 23 %.
- Der **Modal Split verschiebt sich deutlich von der Straße hin zum Eisenbahnverkehr** (von 17% im Jahr 2005 auf 30 % im Jahr 2050).

6.4.2 Endenergieverbrauch (TtW)

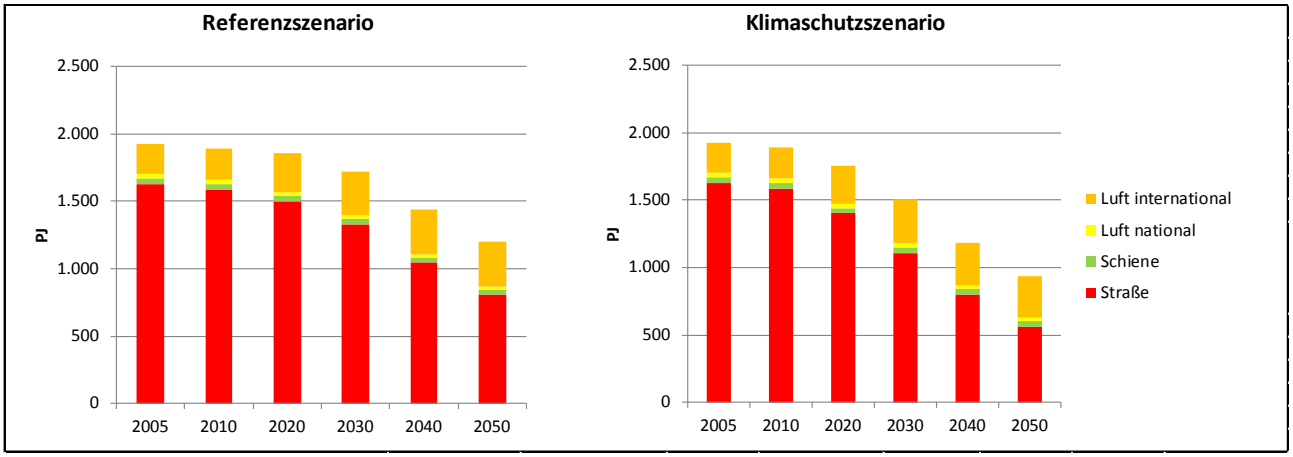
Die Entwicklung des Endenergieverbrauchs (TtW) ist eine wesentliche Ergebnisgröße zur Beurteilung der Zielerreichung und zur Bestimmung der THG-Emissionen. Hierbei spielen sowohl die unterschiedliche Entwicklung der Verkehrsmengen, der Energieeffizienz und der Effizienz der Verkehrsabwicklung (Fahrzeuggrößen, Auslastung) der einzelnen Verkehrsträger als auch die Durchdringung der Fahrzeugflotte mit neuen Techniken und Antriebsenergien eine entscheidende Rolle. Aus diesem Grund werden die Ergebnisse für die Entwicklung des Endenergieverbrauchs zunächst nach Verkehrsträgern (jeweils Personen-, Güter- und Gesamtverkehr national und einschließlich dem internationalen Verkehr) differenziert dargestellt und beschrieben.

Anschließend erfolgt eine Darstellung in der Differenzierung nach Energieträgern, jeweils in der Abstufung Straßengüterverkehr, Straßenverkehr insgesamt sowie Gesamtverkehr (national und einschließlich der internationalen Verkehre). Diese Abstufung wird gewählt, weil der Straßengüterverkehr als Schwerpunkt in dieser Studie betrachtet wird, da er eine besondere Herausforderung bezüglich der Erreichung anspruchsvoller THG-Minderungsziele darstellt.

6.4.2.1 Endenergieverbrauch nach Verkehrsträgern

Die folgende Abbildung zeigt die Entwicklung des Endenergieverbrauchs für den Personenverkehr.

Abbildung 55: Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Personenverkehr in den Szenarien

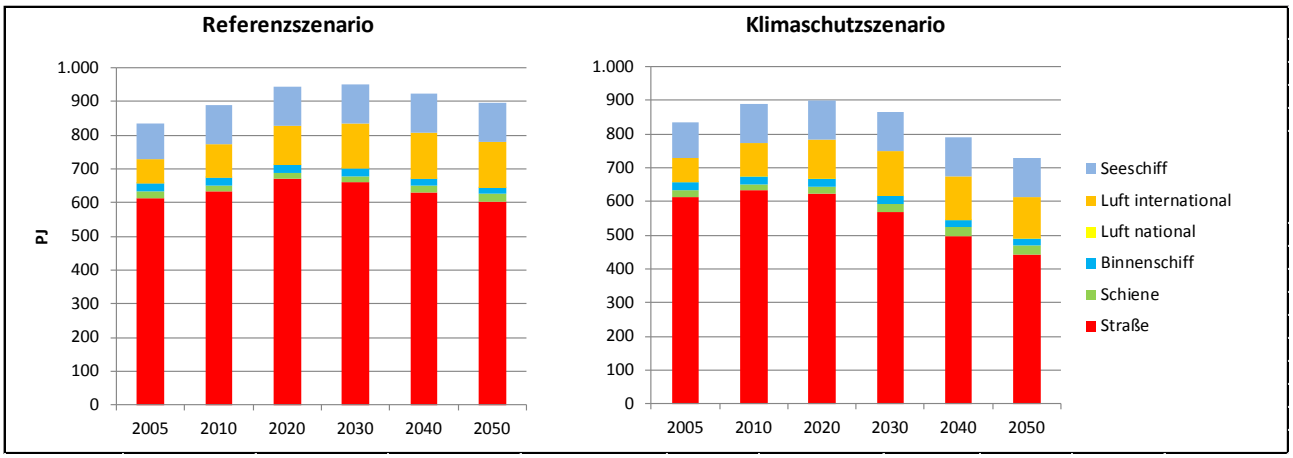


Die wesentlichen Merkmale des Klimaschutzszenarios im Vergleich zum Referenzszenario sind wie folgt:

- Der Endenergieverbrauch des **nationalen Personenverkehrs** geht von **2005 bis 2050 im Referenzszenario um 49 % und im Klimaschutzszenario um 63 % zurück**
- Beim **gesamten Verkehr** – also einschließlich internationaler Flugverkehr –liegt der Rückgang bei **37 % bzw. 52 %**
- Beim **Straßenverkehr** wird im Jahr **2050 im Klimaschutzszenario gegenüber der Referenz ein Rückgang um 30 %** erreicht. Hier addieren sich die Effekte
  - Verkehrsleistungsreduktion (-22 %)
  - Erhöhung der Pkw-Auslastung (+10 %) und
  - Modal Split-Verschiebung von Pkw zum Bus innerhalb des Straßenverkehrs.

Die folgende Abbildung zeigt die Entwicklung des Endenergieverbrauchs für den **Güterverkehr**.

Abbildung 56: Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Güterverkehr in den Szenarien



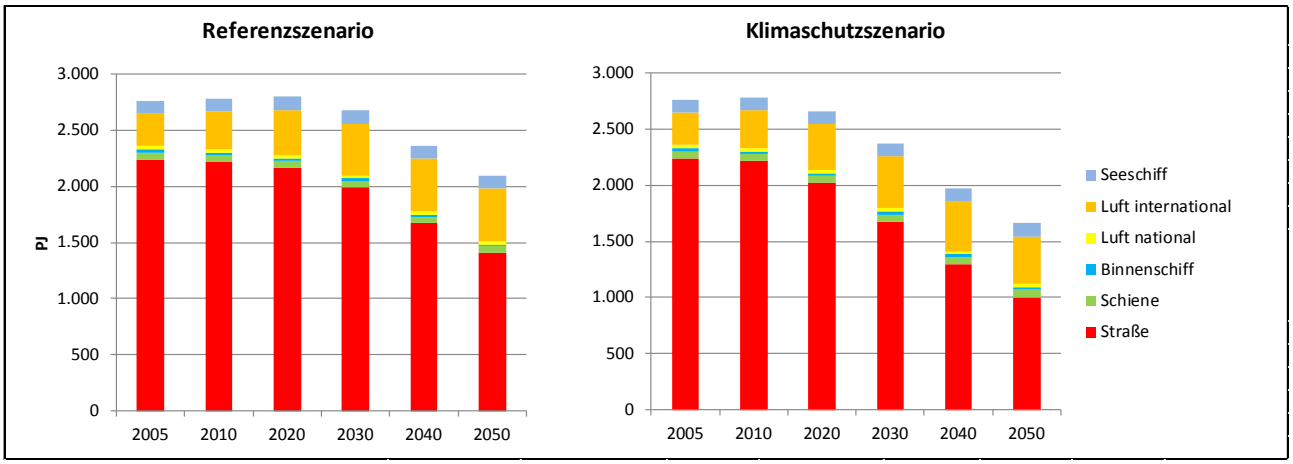
Die wesentlichen Merkmale des Klimaschutzszenarios im Vergleich zum Referenzszenario sind wie folgt:

- Der Endenergieverbrauch des nationalen Güterverkehrs geht **von 2005 bis 2050 im Referenzszenario um 7 %** und **im Klimaschutzszenario um 25 % zurück**.

- Beim **gesamten Verkehr** gibt es einen **Anstieg im Referenzszenario (+8 %)** und einen **Rückgang im Klimaschutzszenario (-12 %).**

Die folgende Abbildung zeigt die Entwicklung des Endenergieverbrauchs für den **gesamten Verkehr**.

Abbildung 57: Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Gesamtverkehr in den Szenarien



Die wesentlichen Merkmale des Klimaschutzszenarios im Vergleich zum Referenzszenario sind wie folgt:

- Beim **nationalen Verkehr** liegt der Rückgang des Energieverbrauchs von 2005 bis 2050 im **Referenzszenario bei 36 %** (**Gesamtverkehr : 24 %**)
- Beim **Klimaschutzszenario** liegen die Werte bei **-53 % (nationaler Verkehr)** bzw. **-40 % (Gesamtverkehr))**
- Durch die **nichttechnischen Maßnahmen** im Klimaschutzszenario wird damit gegenüber der Referenz **eine zusätzliche Minderung von 26 % (nationaler Verkehr) bzw. 21 % (gesamter Verkehr)** erzielt.

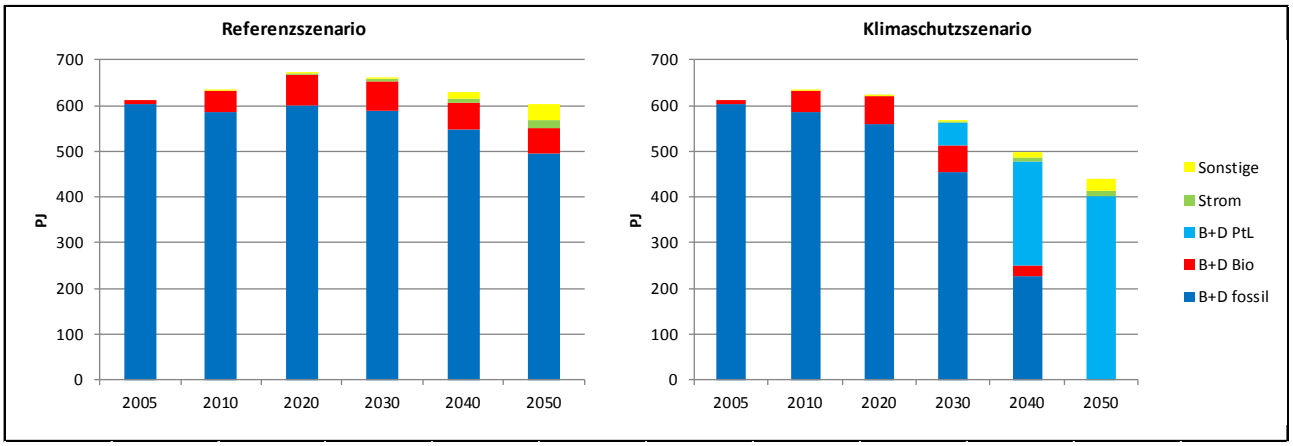
6.4.2.2 Endenergieverbrauch nach Energieträgern

Die Entwicklung des Energieverbrauchs nach Energieträgern zwischen 2005 und 2050 wird bei allen Verkehrsträgern von folgenden Entwicklungen bestimmt:

- Zunahme der Fahrzeuge mit direktem Verbrauch an Strom, insbesondere bei den Pkw und leichten Nutzfahrzeugen
- Einführung von weiteren alternativen Antrieben in geringen Anteilen nach 2030 (Pkw: Brennstoffzelle, Lkw: LNG-Fahrzeuge)
- Weiterhin Dominanz von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor im Straßenverkehr
- Im Referenzszenario: keine Änderung der Kraftstoffherkunft (überwiegend fossile Quellen, Bioanteil: 10 %)
- Im Klimaschutzszenario: ab 2030 Übergang von fossilen und Biokraftstoffen auf PtG/PtL-Kraftstoffe; keine Änderung der Fahrzeugflotten gegenüber dem Referenzszenario

Die folgende Abbildung zeigt die Entwicklung des Energieverbrauchs nach Energieträgern für den Straßengüterverkehr.

Abbildung 58: Entwicklung des Endenergieverbrauchs des Straßengüterverkehrs in den Szenarien



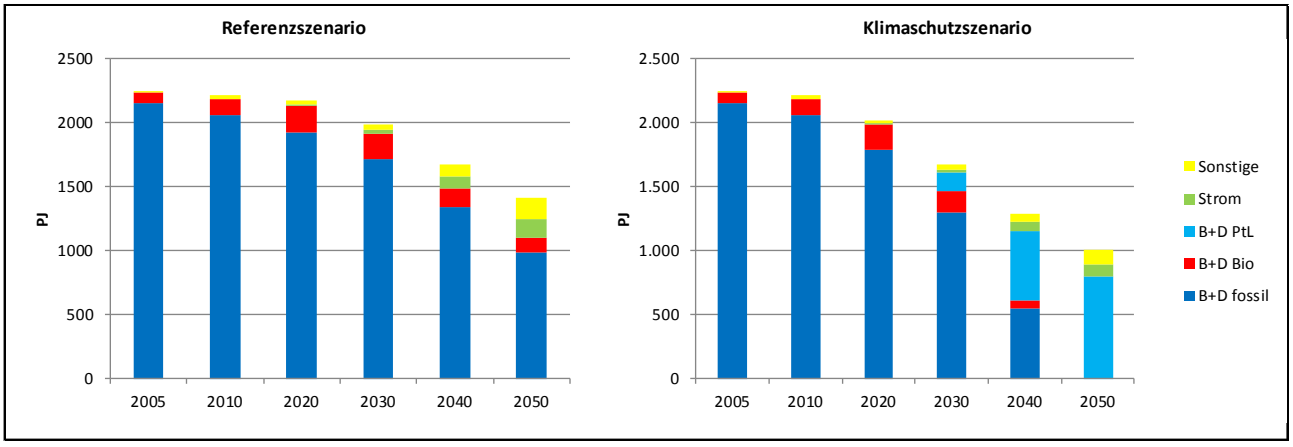
Sonstige: PtG, CNG, LPG und Flugkraftstoffe national

Für den Straßengüterverkehr lassen sich die folgenden Erkenntnisse festhalten:

- Schwerpunkt im Straßengüterverkehr sind weiterhin flüssige Kraftstoffe, ergänzt durch geringe Anteile an leichten Nutzfahrzeugen mit elektrischen Antrieben (BEV und PHEV) und Nischenflotten mit LNG-Antrieb bei den schweren Nutzfahrzeugen.
- Im Referenzszenario wird der Bedarf an Kraftstoffen weiterhin mit fossilen Energieträgern und Biokraftstoffen gedeckt.
- Im Klimaschutzszenario werden die fossilen und Biokraftstoffe ab 2030 bis 2050 vollständig durch PtG/PtL-Kraftstoffe ersetzt. Die Zusammensetzung der Fahrzeugflotten bleibt gegenüber den Referenzszenario unverändert-

Die folgende Abbildung zeigt die Entwicklung des Energieverbrauchs nach Energieträgern für den gesamten Straßenverkehr (Personen- und Güterverkehr).

Abbildung 59: Entwicklung des Endenergieverbrauchs des Straßenverkehrs in den Szenarien



Sonstige: PtG, CNG, LPG und Flugkraftstoffe national

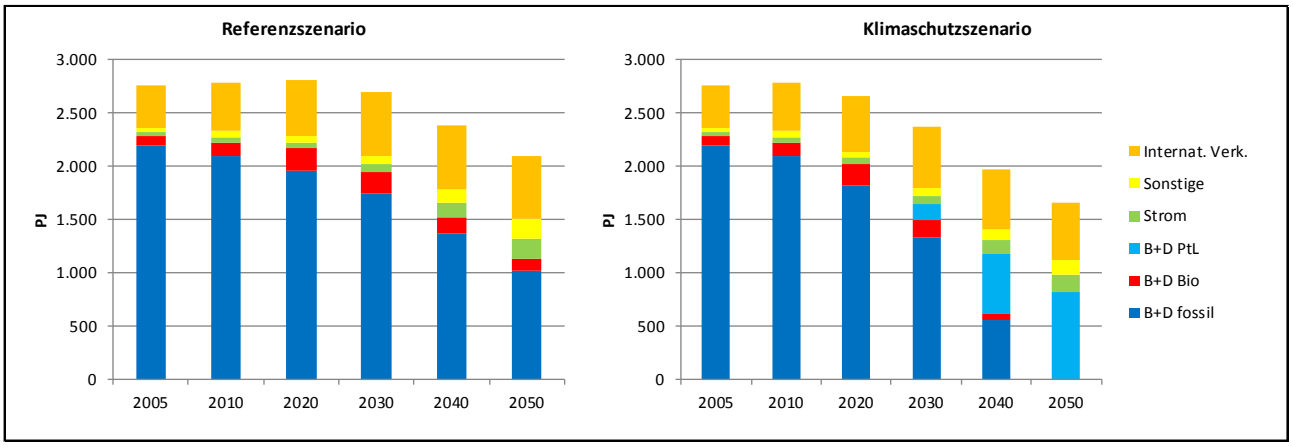
Für den Straßenverkehr lassen sich die folgenden Erkenntnisse festhalten:

- Aufgrund der hohen Durchdringung der Pkw-Flotte mit elektrisch betriebenen Fahrzeugen (BEV, PHEV) steigt der Anteil des Stromverbrauchs im Straßenverkehr in allen Szenarien insgesamt deutlich stärker als für den Straßengüterverkehr allein.

- Wie beim Straßengüterverkehr wird auch beim Personenverkehr und damit im gesamten Straßenverkehr im Referenzszenario der Bedarf an Kraftstoffen weiterhin mit fossilen Energieträgern und Biokraftstoffen gedeckt, während im Klimaschutzszenario die fossilen und Biokraftstoffe ab 2030 bis 2050 vollständig durch PtG/PtL-Kraftstoffe ersetzt werden. Ebenso bleibt die Zusammensetzung der Pkw- und Busflotten gegenüber dem Referenzszenario unverändert.

Die Entwicklung des Endenergieverbrauchs für den Gesamtverkehr ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

Abbildung 60: Entwicklung des Endenergieverbrauchs des gesamten Verkehrs in den Szenarien



Sonstige: PtG, CNG, LPG und Flugkraftstoffe national

Für den Gesamtverkehr ergeben sich die folgenden Entwicklungen:

- Da der Endenergieverbrauch des nationalen Verkehrs vom Straßenverkehr dominiert wird, erhöht sich dessen Energieverbrauch nur in geringem Umfang um den Dieselverbrauch der Binnenschifffahrt und der Bahnen, um den direkten Stromverbrauch der Bahnen sowie um den Flugkraftstoffverbrauch des nationalen Luftverkehrs.
- Der Endenergieverbrauch des internationalen Verkehrs, bestehend aus Flug- und Schiffskraftstoffen, nimmt weiter zu und hat damit einen deutlich zunehmenden Anteil am gesamten Energieverbrauch des Verkehrs.
- Wird der internationale Verkehr in die THG-Minderungsziele einbezogen, muss auch hier eine Umstellung auf PtG/PtL-Kraftstoffe erfolgen.

6.4.2.3 Endenergieverbrauch im Klimaschutzszenario E+

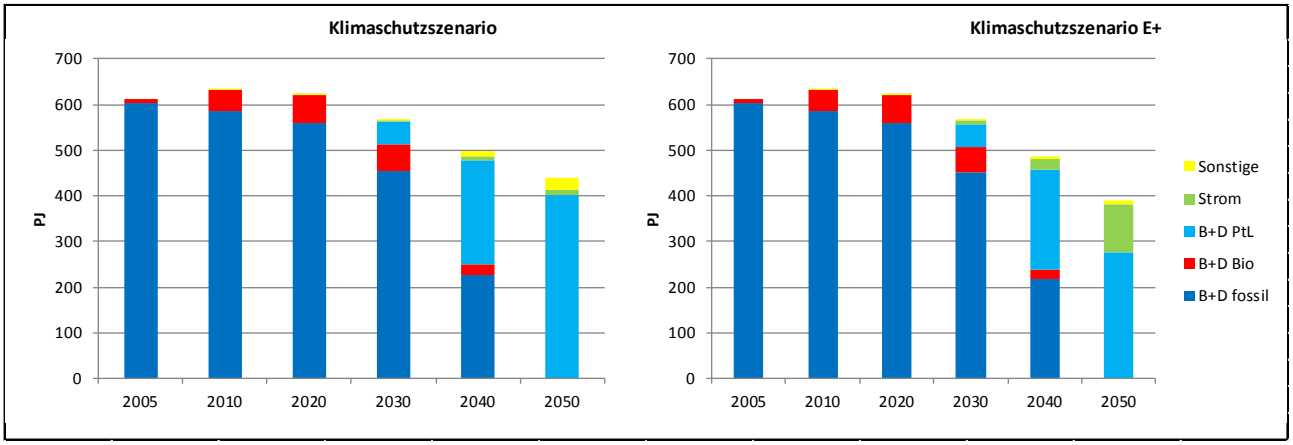
Die direkte Stromnutzung im Verkehr ist mit Abstand die effizienteste Möglichkeit zur Minderung des Energiebedarfs und gleichzeitig – aufgrund der hohen Potenziale zum Einsatz erneuerbarer Energien für die Stromerzeugung – zur deutlichen Absenkung der Treibhausgasemissionen. Aus diesem Grund wurde in dieser Studie eine Variante des Klimaschutzszenarios (E+) berechnet. Hierbei werden folgende Annahmen getroffen:

- Bei den Pkw wird eine deutlich höhere Markteinführungsquote bei Elektrofahrzeugen bis 2030 realisiert, so dass die Ziele der Bundesregierung (1 Mio. Elektrofahrzeuge in 2020, 6 Mio. in 2030) erreicht werden.
- Im Straßengüterfernverkehr wird verstärkt ab 2030 eine hohe Marktdurchdringung mit OH-Lkw realisiert (Anstieg des Anteils an den Neuzulassungen: bis 2030 auf 5 %, bis 2040 auf

80 % und bis auf 2050 85 %), so dass im Jahr 2050 etwa 80 % der ausschließlich im Fernverkehr eingesetzten Fahrzeuge OH-Lkw sind.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Straßengüterverkehr im Szenario E+ gegenüber dem Klimaschutzszenario.

Abbildung 61: Entwicklung des Endenergieverbrauchs des Straßengüterverkehrs in den Szenarien Klimaschutz und Klimaschutz E+



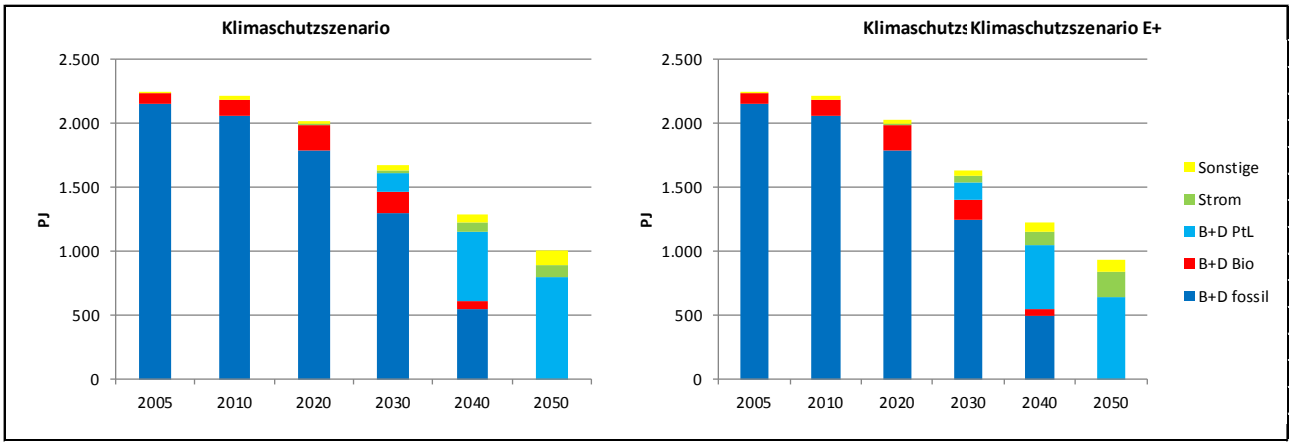
Sonstige: PtG, CNG, LPG und Flugkraftstoffe national

Für den Straßengüterverkehr sind folgende Ergebnisse hervorzuheben:

- Im Klimaschutzszenario E+ steigt der elektrische Fahrleistungsanteil des Straßengüterverkehrs bis zum Jahr 2050 auf 56 % (Autobahnen) und auf 34 % auf allen Straßen.
- Der Verkehrsleistungsanteil, der im Straßengüterverkehr elektrisch erbracht wird, liegt dann bei 46 %.
- Der Anteil des Stromverbrauchs am gesamten Endenergieverbrauch im Straßengüterverkehr steigt bis 2050 auf 31 %.
- Gegenüber dem Klimaschutzszenario sinkt der Endenergieverbrauch des Straßengüterverkehrs im Jahr 2050 um 12 %.

Die Unterschiede des Klimaschutzszenarios E+ gegenüber dem Klimaschutzszenario für den gesamten Straßenverkehr sind in folgender Abbildung dargestellt.

Abbildung 62: Entwicklung des Endenergieverbrauchs des Straßenverkehrs in den Szenarien Klimaschutz und Klimaschutz E+



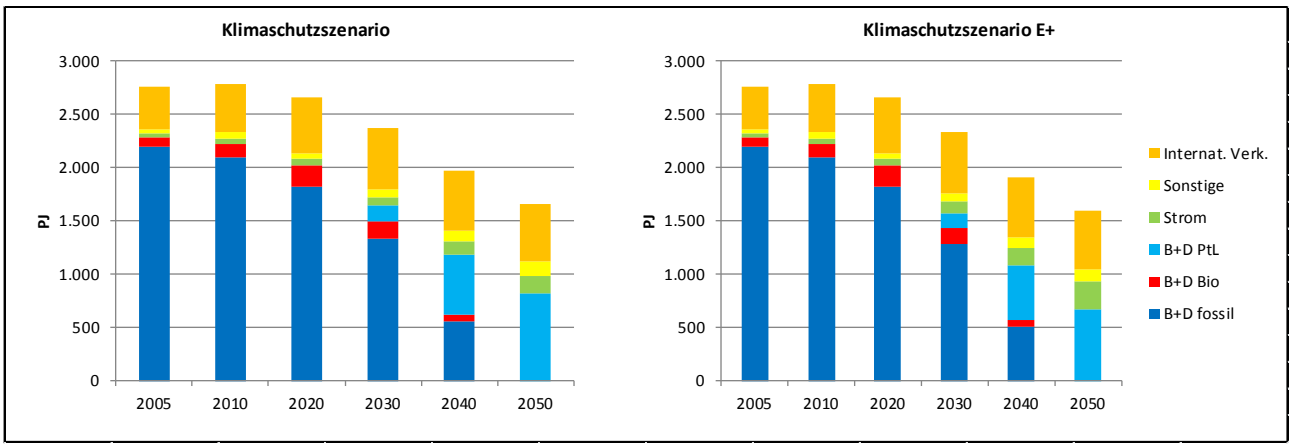
Sonstige: PtG, CNG, LPG und Flugkraftstoffe national

Folgende Ergebnisse sind für den gesamten Straßenverkehr hervorzuheben:

- Durch die höhere Marktdurchdringung mit Elektrofahrzeugen bei den Pkw bis 2030 wird bereits bis 2030 eine deutliche Erhöhung des Stromanteils bei gleichzeitiger Reduktion des Endenergiebedarfs erreicht.
- Bis 2050 erfolgt zusätzlich die Einführung des OH-Lkws im Güterfernverehr. Dadurch sinkt der Endenergiebedarf 2050 gegenüber dem Klimaschutzszenario um insgesamt 7 %.
- Die deutliche Zunahme des direkten Strombedarfs hat zur Folge, dass der Bedarf an PtG/PtL-Kraftstoffen deutlich abnimmt: während sich der direkte Stromverbrauch verdoppelt, sinkt der Bedarf an PtG/PtL-Kraftstoffen um 19 %.

Schließlich ist der Effekt des Klimaschutzszenarios E+ in folgender Abbildung für den **Gesamtverkehr** dargestellt.

Abbildung 63: Entwicklung des Endenergieverbrauchs des gesamten Verkehrs in den Szenarien Klimaschutz und Klimaschutz E+



Sonstige: PtG, CNG, LPG und Flugkraftstoffe national

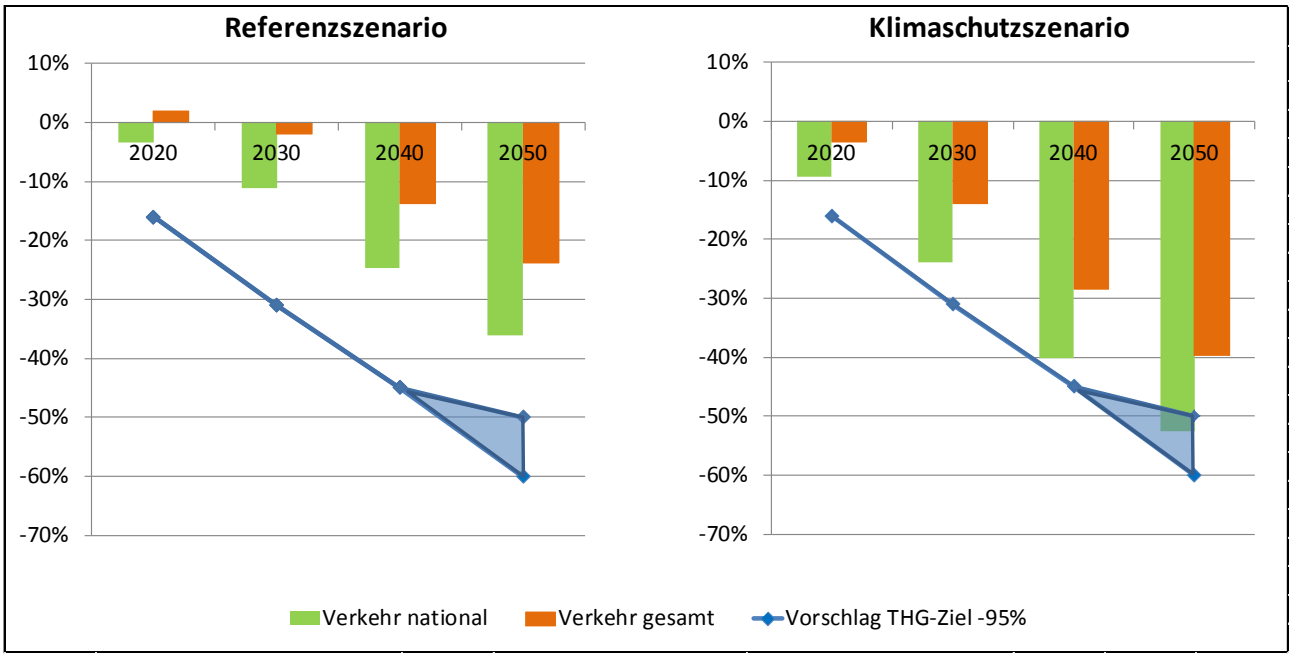
Der Einfluss der zusätzlichen Elektrifizierung im Straßenverkehr stellt sich beim Gesamtverkehr wie folgt dar:

- Die zusätzliche Minderung des Energiebedarfs im Klimaschutzszenario E+ liegt bei -6 % für den nationalen Verkehr und bei 4 % für den Gesamtverkehr.
- Die Minderungen des Energieverbrauchs von 2005 bis 2050 liegen dadurch beim Klimaschutzszenario E+ bei 55 % (nationaler Verkehr) bzw. 42 % (Gesamtverkehr).
- Der Einfluss auf die Entwicklung des Endenergieverbrauch ist damit gering, allerdings ist die beim Straßenverkehr beschriebene deutliche Verschiebung des Bedarfs an PtG/PtL-Kraftstoffen hin zur direkten Stromnutzung ein wichtiger Faktor zur Bewertung der Ergebnisse.

6.4.2.4 Bewertung der Ergebnisse für den Endenergieverbrauch und der Vorschläge für sektorale Minderungsziele

Der Endenergieverbrauch ist eine wichtige Zielgröße der vorgeschlagenen sektorspezifischen Minderungen. Die folgende Abbildung stellt die im Referenz- und Klimaschutzszenario erreichten Minderungen des Endenergieverbrauchs, jeweils für den nationalen Verkehr und den Gesamtverkehr, den in dieser Studie vorgeschlagenen sektorspezifischen Zielen für das Minderungsziel der THG-Emissionen von 95 % über alle Sektoren gegenüber.

Abbildung 64: Vergleich der Minderungsraten für den Endenergieverbrauch (TtW) mit den Werten aus der Zielwertdiskussion



Wichtige Erkenntnisse sind:

- Der maximale Zielwert im Jahr 2050 von -60 % für das sektorübergreifende -95 %-THG-Minderungsziel wird in keinem Szenario erreicht.
- Das Klimaschutzszenario erreicht eine Minderung von 53 % für den nationalen Verkehr in 2050, das anspruchsvollere Klimaschutzszenario E+ mit höherer Elektrifizierung bei Pkw und die Einführung des OH-Lkws im Straßengüterfernverkehr erreicht 55 %. Damit liegen die Ergebnisse im vorgeschlagenen Korridor von -50 % bis -60 %.
- Unter Einbezug des internationalen Verkehrs kann das Minderungsziel von 50 bis 60 % nicht erreicht werden, ohne die Mobilitäts- und Konsumbedürfnisse grundsätzlich zu hinterfragen.

Der vorgeschlagene Zielwert von -50 % bis -60 % im Endenergieverbrauch ist somit als sehr anspruchsvoll anzusehen. Bereits das bestehende Endenergieziel von -40 % erfordert eine konsequente Minderungsstrategie. Will man darüber hinaus den Endenergieverbrauch mindern, sind noch deutlich höhere Anstrengungen zur Vermeidung und Verlagerung von Verkehr sowie zur Verbesserung der verkehrlichen und technischen Effizienz notwendig.

Die großen Abstände zu den Zielwertvorschlägen 2020 und teilweise 2030 liegen vor allem darin begründet, dass aufgrund der Entwicklung der Fahrzeugflotten und der Verkehrsleistungen bis zum Jahr 2013 keine Trendwende beim Energieverbrauch stattgefunden hat. Diese wird in den Szenarien erst nach 2013 aufgrund der angenommenen Flottenentwicklung (Effizienzentwicklung und Einführung Elektromobilität) im Zusammenspiel mit der unterstellten Verkehrsentwicklung realisiert. Hier ist insbesondere darauf hinzuweisen, dass die angenommene hohe Flottendurchdringung mit Elektro-Pkw in der Realität bis Anfang 2016 noch nicht begonnen hatte und somit bisher keinen erkennbaren Trend darstellt. Dies bedeutet, dass die unterstellten Entwicklungen in den Jahren 2016-2030 inzwischen deutlich schneller umgesetzt werden müssten um den Rückstand aufzuholen oder dass sich die Minderungseffekte zeitlich weiter in die Zukunft verschieben.

Die folgende Tabelle fast nochmals die wichtigsten Ergebnisse zur Entwicklung des Endenergiebedarfs aus den drei Szenarien zusammen.

Tabelle 47: Zusammenfassung wichtiger Ergebnisse zur Entwicklung des Endenergieverbrauchs in den Szenarien

	Referenz	Klimaschutz	Klimaschutz E+
Rückgang Endenergieverbrauch 2005 bis 2050			
- Nationaler Verkehr	-36 %	-53 %	-55 %
- Gesamtverkehr (inkl. internationaler Verkehr)	-24 %	-40 %	-42 %
Anteil Verbrauch Strom direkt 2050 an Endenergie gesamt			
- Nationaler Verkehr	13 %	14 %	24 %
- Gesamtverkehr (inkl. internationaler Verkehr)	9 %	10 %	16 %
Beitrag der Verkehrsleistungs- und Modal Split-Änderung zur Verbrauchsänderung 2050		**gegenüber Referenz**	**gegenüber Klimaschutz**
- Nationaler Verkehr	-	-26 %	-
- Gesamtverkehr (inkl. internationaler Verkehr)	-	-21 %	-
Beitrag der höheren Flottendurchdringung E-Kfz zur Verbrauchsänderung 2050		**gegenüber Referenz**	**gegenüber Klimaschutz**
- Nationaler Verkehr	-	-	-6 %
- Gesamtverkehr (inkl. internationaler Verkehr)	-	-	-4 %

6.4.3 Primärenergieverbrauch

Der Energieverbrauch unter Einbezug der energetischen Aufwendungen für die Produktion der Endenergieträger (WtW) ist nicht Bestandteil der sektoralen Zieldiskussion, gibt aber wichtigen Aufschluss darüber, welche Energieträger zukünftig mit welchem Aufwand produziert und am Fahrzeug bereitgestellt werden können. Hierbei sind folgende Konventionen und physikalische Zusammenhänge zu berücksichtigen:

- Mit der Umstellung der Stromproduktion von fossilen auf regenerative Energieträger sinkt der Aufwand für die Bereitstellung von Primärenergie. Regenerativer Strom wird ab Ausgang Kraftwerk/Erzeugungsanlage als 100 % Primärenergie (ohne Aufwendungen für Bau und Wartung der Anlagen) angesetzt, so dass der erzeugte EE-Strom identisch ist mit dem Primärenergiebedarf. Hinzu kommen die Verluste durch Transport und Umwandlung bis zum Fahrzeug und in den Batterien. Der Primärenergiebedarf für die direkte Stromnutzung geht dadurch gegenüber dem heutigen Strommix deutlich zurück.
- Umgekehrt steigt der Aufwand für die Produktion von flüssigen und gasförmigen Kraftstoffen deutlich an, wenn diese aus Bioenergieträgern oder EE-Strom hergestellt werden.

Für die Szenarienberechnungen wurden für alle relevanten Prozesse Annahmen zu den Wirkungsgraden getroffen, die in Kapitel 4.2.3 dargestellt sind.

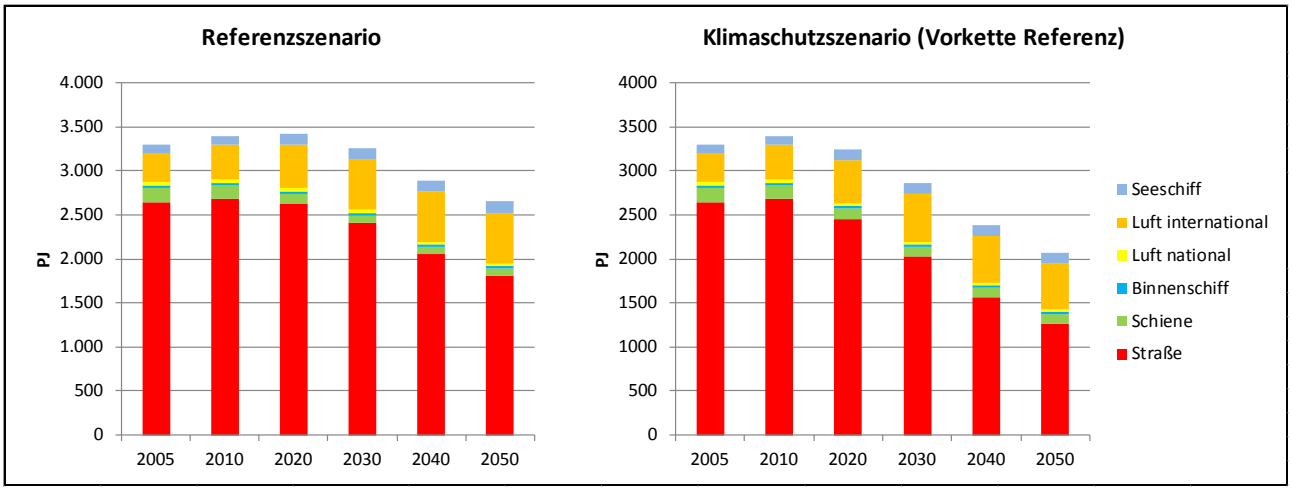
Um die Einflüsse der verschiedenen Modellierungsschritte (Verkehrsleistungsänderung aufgrund der nichttechnischen Maßnahmen, Änderung der Zusammensetzung der Primärenergieträger) zu verdeutlichen, erfolgt die Darstellung des Gesamtenergiebedarfs in zwei Schritten:

- Zunächst wird der Einfluss der Verkehrsleistungsänderungen des Klimaschutzszenarios bei einer gegenüber dem Referenzszenario unveränderten Energieträgerstruktur dargestellt.
- Anschließend wird die Umstellung der Energieträger auf PtG/PtL-Kraftstoffe des Klimaschutzszenarios hinzugenommen und der im Klimaschutzszenario berechnete Gesamteffekt dargestellt.

6.4.3.1 Umsetzung der Maßnahmen zur Verlagerung, Vermeidung und Verbesserung (ASI)

Die folgende Abbildung zeigt die Ergebnisse des Primärenergiebedarfs für das Referenzszenario sowie das Klimaschutzszenario mit der gleichen Struktur der Energiebereitstellung wie im Referenzszenario für den gesamten Verkehr. Der Unterschied zwischen Referenz- und Klimaschutzszenario bildet daher allein die Effekte durch die Verkehrsleistungs- und Modal Split-Änderungen ab.

Abbildung 65: Entwicklung des Primärenergieverbrauchs des gesamten Verkehrs in den Szenarien ohne Umstellung auf THG-neutrale Kraftstoffe



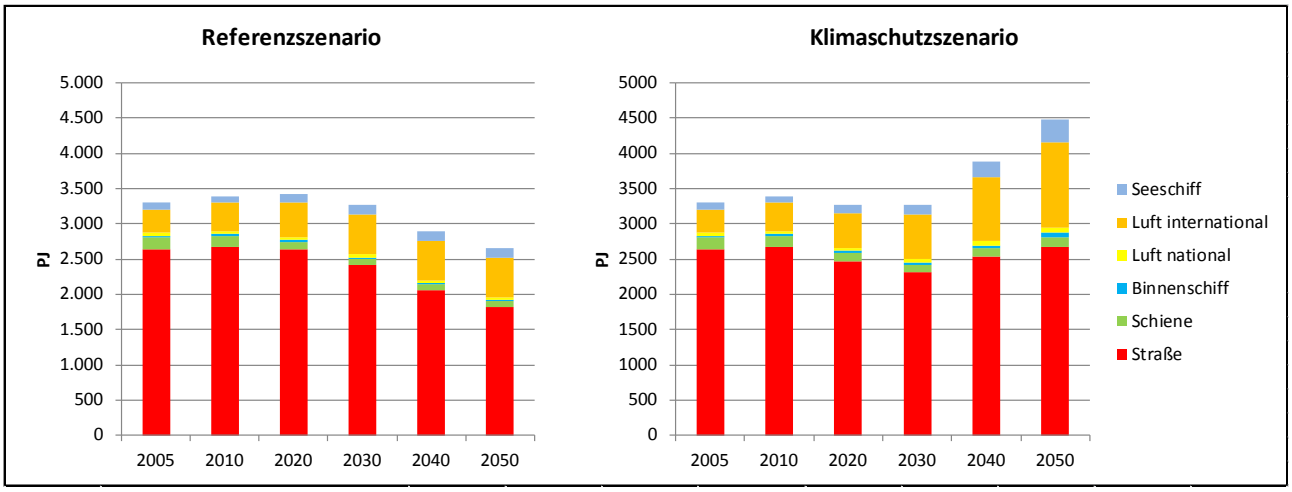
Die wesentlichen Merkmale des Klimaschutzszenarios mit Referenzvorkette im Vergleich zum Referenzszenario sind wie folgt:

- Beim **nationalen Verkehr** liegt der Rückgang des Energieverbrauchs von 2005 bis 2050 im **Referenzszenario bei 32 %** (**Gesamtverkehr: 20 %**).
- Beim **Klimaschutzszenario** liegen die Werte bei **-50 % (nationaler Verkehr)** bzw. **-37 % (Gesamtverkehr).**
- Durch die **ASI-Maßnahmen** im Klimaschutzszenario wird damit gegenüber der Referenz **eine zusätzliche Minderung von 27 % (nationaler Verkehr) bzw. 22 % (gesamter Verkehr)** erzielt.

6.4.3.2 Nichttechnische Maßnahmen und Umstellung auf THG-neutrale Kraftstoffe

Wird im Klimaschutzszenario die Umstellung auf PtG/PtL-Kraftstoffe von 2030 bis 2050 berücksichtigt, steigen im Klimaschutzszenario die energetischen Aufwendungen für die Produktion der Kraftstoffe. In der folgenden Abbildung sind die Ergebnisse des Primärenergieverbrauchs für das Referenz- und Klimaschutzszenario für den gesamten Verkehr dargestellt.

Abbildung 66: Entwicklung des Primärenergieverbrauchs des gesamten Verkehrs in den Szenarien mit Umstellung auf THG-neutrale Kraftstoffe



Die wesentlichen Merkmale des Klimaschutzszenarios mit Umstellung auf PtG/PtL-Kraftstoffe im Vergleich zum Referenzszenario sind wie folgt:

- Beim **Klimaschutzszenario** steigen die Aufwendungen für die Energieerzeugung ab 2030 deutlich an. Dadurch ist der WtW-Gesamtenergiebedarf im Jahr 2050 beim nationalen Verkehr um 2 % höher als im Jahr 2005. Beim Gesamtverkehr nimmt der Primärenergiebedarf um 36 % zu.
- Der Primärenergiebedarf liegt im Jahr 2050 im Klimaschutzszenario im nationalen Verkehr um 50 % (Gesamtverkehr 69 %) höher als im Referenzszenario.

Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass durch die Umstellung auf PtG/PtL-Kraftstoffe im Klimaschutzszenario der Bedarf an EE-Strom deutlich zunimmt. Dieser Bedarf an EE-Strom wird im folgenden Kapitel für das Jahr 2050 detaillierter dargestellt.

6.4.3.3 Bedarf an EE-Strom im Jahr 2050

In diesem Kapitel werden der Endenergieverbrauch des Verkehrs und die für den Verkehr benötigten Mengen an EE-Strom im Jahr 2050 aufgezeigt. Neben den Ergebnissen für das Referenzszenario, Klimaschutzszenario und Klimaschutzszenario E+ wird zusätzlich eine Variante des Referenzszenarios unter der Annahme einer Umstellung auf PtL- und PtG-Kraftstoffe wie im Klimaschutzszenario dargestellt, um den Bedarf an EE-Strom bei Verzicht auf die in den Klimaschutzszenarien angenommenen ASI-Maßnahmen zu ermitteln. Die nachfolgenden Tabellen enthalten die Ergebnisse für vier Varianten:

- **Referenz:** unverändertes Referenzszenario,
- **Referenz+PtG/PtL:** Modifiziertes Referenzszenario mit Ersatz der konventionellen und der Biokraftstoffe durch PtG/PtL-Kraftstoffe wie im Klimaschutzszenario,
- **Klimaschutzszenario:** unverändertes Klimaschutzszenario (nichttechnische Maßnahmen + PtG/PtL-Kraftstoffe),
- **Klimaschutzszenario E+:** unverändertes Klimaschutzszenario E+ (Klimaschutzszenario und zusätzlich Einführung des OH-Lkw sowie verstärkte E-Mobilität bei Pkw entsprechend den Zielen der der Bundesregierung).

In allen Varianten wird entweder Strom direkt oder andere Energieträger auf Basis von EE-Strom (PtL, PtG-CH_4 , PtG-H_2) verwendet.

Tabelle 48: Energiebedarf 2050 in den betrachteten Varianten

	Endenergieverbrauch 2050 (PJ)			
Straße	**Referenz**	**Referenz+PtL/PtG**	**Klima**	**Klima E+**
Benzin+Diesel fossil	990	0	0	0
Benzin+Diesel Bio	*110*	*0*	*0*	*0*
Benzin+Diesel PtL	0	1.100	795	646
Strom direkt	*149*	*149*	*98*	*191*
CNG+LNG+LPG fossil	*135*	*19*	12	11
PtG-CH_4	5	120	81	69
PtG-H_2	26	26	17	18
Summe Straße	**1.413**	**1.413**	**1.003**	**935**
übrige Verkehrsträger national				
Kraftstoffe fossil	51	0	0	0
Binnenschiff, Schiene (Diesel Bio)	3	0	0	0
Schiene (Strom)	43	43	61	61
Binnenschiff, Schiene (Diesel PtL)	0	27	31	31
Flugverkehr national (Flugbenzin+Kerosin PtL)	0	27	24	24
Summe Verkehr national	**1.510**	**1.510**	**1.119**	**1.051**
Internationale Verkehre				
Kraftstoffe fossil	589	0	0	0
Luft (Flugbenzin+Kerosin PtL)	0	473	426	426
Seeschiff (Schiffstreibstoff PtL)	0	116	116	116
Summe Verkehr gesamt	**2.099**	**2.099**	**1.661**	**1.593**
Energieträger Verkehr national				
Kraftstoffe fossil	1.175	19	12	11
Biokraftstoffe	113	0	0	0
PtL	0	1.153	850	701
PtG-CH_4	5	120	81	69
PtG-H_2	26	26	17	18
Strom direkt	192	192	159	252
Summe Verkehr national	**1.510**	**1.510**	**1.119**	**1.051**
Energieträger Verkehr gesamt				
Kraftstoffe fossil	1.764	19	12	11
Biokraftstoffe	113	0	0	0
PtL	0	1.742	1.392	1.243
PtG-CH_4	5	120	81	69
PtG-H_2	26	26	17	18
Strom direkt	192	192	159	252
Summe Verkehr gesamt	**2.099**	**2.099**	**1.661**	**1.593**

Zur Bestimmung des Bedarfs an EE-Strom werden folgende in Kapitel 4.2.3 beschriebenen Gesamtwirkungsgrade verwendet:

- PtL: 35 %
- PtG-CH_4: 41 %
- PtG-H_2: 59 %
- Strom Oberleitung/Batterie: 89 %

Für die verschiedenen Varianten ergibt sich damit der in der folgenden Tabelle dargestellte Gesamtbedarf an EE-Strom.

Tabelle 49: Bedarf an EE-Strom im Verkehr im Jahr 2050 in den betrachteten Varianten

	Strombedarf 2050 (PJ)			
Straße	**Referenz**	**Referenz+PtL/PtG**	**Klima**	**Klima E+**
Benzin+Diesel PtL	0	3.143	2.272	1.847
Strom direkt	167	167	110	215
PtG-CH_4	11	293	197	168
PtG-H_2	43	43	29	31
Summe Straße	**221**	**3.646**	**2.608**	**2.260**
übrige Verkehrsträger national				
Schiene (Strom)	49	49	69	69
Binnenschiff, Schiene (Diesel PtL)	0	76	87	87
Flugverkehr national (Flugbenzin+Kerosin PtL)	0	76	69	69
Summe Verkehr national	**270**	**3.847**	**2.833**	**2.486**
Internationale Verkehre				
Luft (Flugbenzin+Kerosin PtL)	0	1.351	1.216	1.216
Seeschiff (Schiffstreibstoff PtL)	0	331	331	331
Summe Verkehr gesamt	**270**	**5.530**	**4.380**	**4.033**
Energieträger Verkehr national				
PtL	0	3.295	2.428	2.003
PtG-CH_4	11	293	197	168
PtG-H_2	43	43	29	31
Strom direkt	216	216	179	284
Summe Verkehr national	**270**	**3.847**	**2.833**	**2.486**
Strom für PtL/PtG	**54**	**3.631**	**2.654**	**2.202**
Energieträger Verkehr gesamt				
PtL	0	4.978	3.976	3.551
PtG-CH_4	11	293	197	168
PtG-H_2	43	43	29	31
Strom direkt	216	216	179	284
Summe Verkehr gesamt	**270**	**5.530**	**4.380**	**4.033**
Strom für PtL/PtG	**54**	**5.314**	**4.201**	**3.749**

Folgende Ergebnisse lassen sich für den Gesamtverkehr inklusive internationale Verkehre festhalten:

- In allen Varianten gibt es einen sehr hohen Bedarf an EE-Strom. Dieser liegt im Referenzfall mit weitgehender Umstellung auf PtL- und PtG-Kraftstoffe bei 5.530 PJ.
- Der Bedarf an EE-Strom sinkt im Klimaschutzszenario um 21 % gegenüber einem Referenzfall mit Umstellung auf EE-Strom, im Klimaschutzszenario E+ um weitere 8 %.
- Im Klimaschutzszenario E+ werden somit gegenüber dem Referenzfall insgesamt mehr als 1.500 PJ eingespart.
- Aktuelle Studien geben als inländisch für den Verkehr zur Verfügung stehende Menge EE-Strom 594 PJ [DLR et al., 2012] bis 1.574 PJ [DLR et al., 2014] an (inländisches wirtschaftliches Potenzial für EE-Strom den für 2050 angenommenen Strombedarf der Verbraucher außerhalb des Verkehrs). Dies verdeutlicht, dass mit inländischem EE-Strom nur ein Teil des in den Szenarien berechneten Bedarfs abgedeckt werden kann, selbst wenn der internationale Verkehr ausgeblendet wird.
- Der EE-Strombedarf für den internationalen Verkehr ist in allen Varianten sehr hoch: Dessen Anteil am gesamten Strombedarf des Verkehrs liegt etwa im Klimaschutzszenario bei 35 % und im Klimaschutzszenario E+ bei 38 %.

Diese Betrachtung unterstreicht die hohe Bedeutung, die eine Reduktion des Endenergieverbrauchs, insbesondere von flüssigen und gasförmigen Kraftstoffen, auf die Höhe des EE-Strombedarfs hat.

6.4.4 Direkte Treibhausgasemissionen (TtW)

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse für die direkten THG-Emissionen (TtW, d.h. die Abgasemissionen durch Verbrennung im Motor) beschrieben. Die Bilanzierung erfolgt hierbei in Übereinstimmung mit der Emissionsberichterstattung, die auch der Zieldiskussion zugrunde liegt:

- Die direkten CO_2-Emissionen von erneuerbaren Energieträgern (Biokraftstoffe, PtG/PtL) werden mit Null bewertet.
- Die THG-Wirkung durch andere Abgasemissionen (CH_4, N_2O) wird berücksichtigt. Die zusätzliche direkte THG-Wirkung des Flugverkehrs in großen Höhen wird mit dem EWF abgebildet.
- Alle Emissionen werden als CO_2-Äquivalente dargestellt.

Zur Darstellung der direkten THG-Emissionen wird in den folgenden drei Abbildungen die Abgrenzung nach Energieträgern sowie – analog zum Endenergieverbrauch – für die Verkehrsbereiche Straßengüterverkehr, Straßenverkehr insgesamt, und Gesamtverkehr (inkl. internationalem Verkehr) verwendet. Es werden die zeitlichen Verläufe für das Referenz- und das Klimaschutzszenario dargestellt.

Abbildung 67: Direkte TtW-Treibhausgasemissionen des Straßengüterverkehrs in den Szenarien

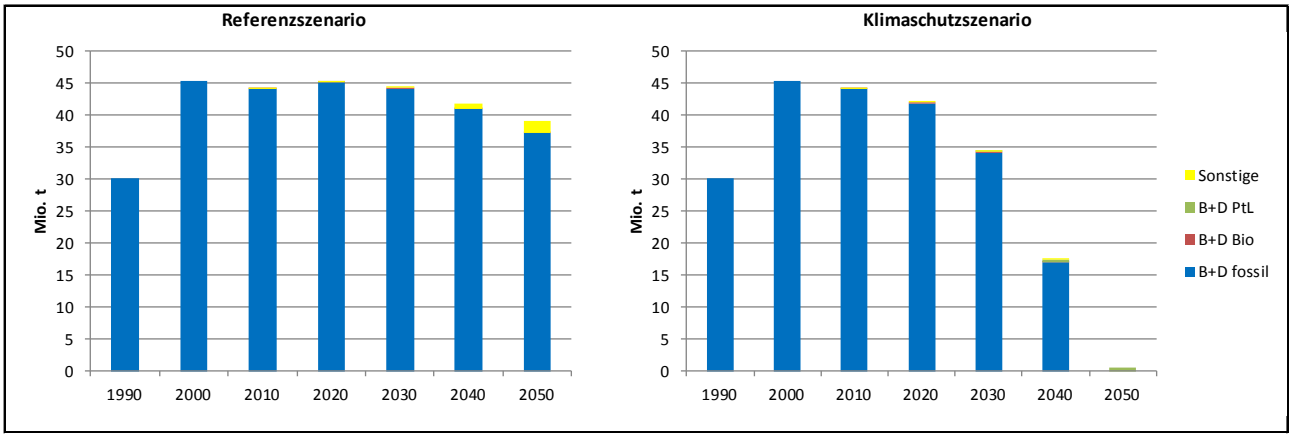


Abbildung 68: Direkte TtW-Treibhausgasemissionen des Straßenverkehrs in den Szenarien

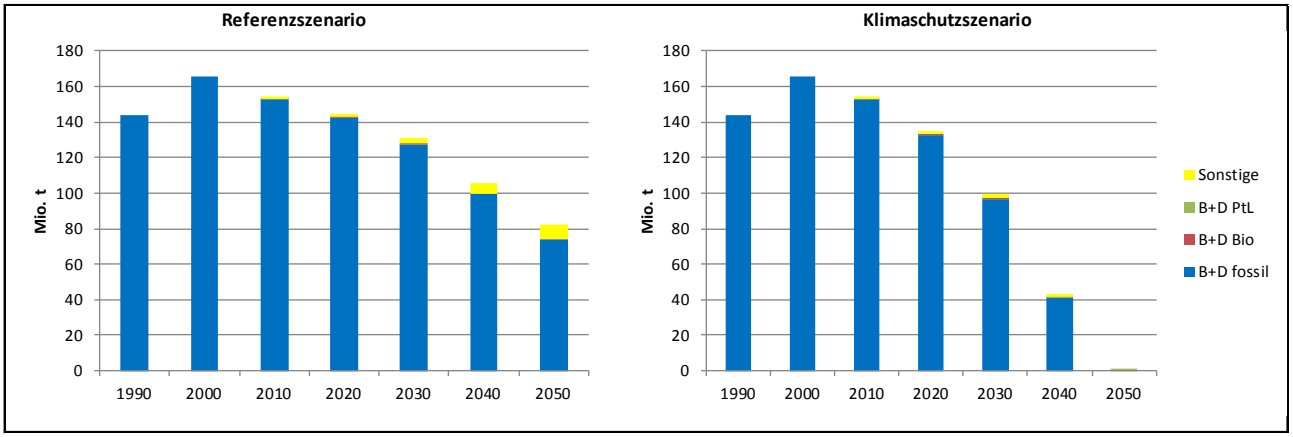
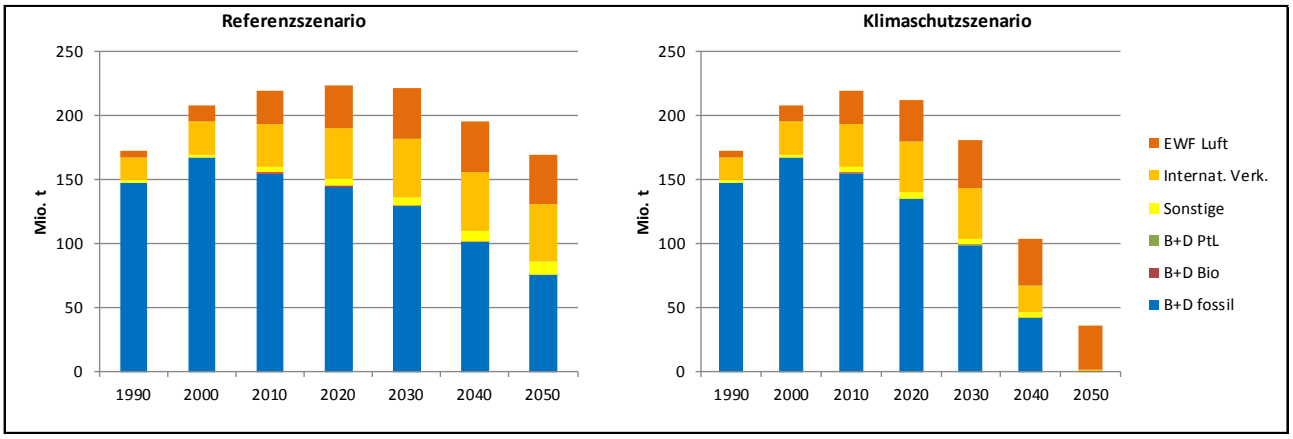


Abbildung 69: Direkte TtW-Treibhausgasemissionen des Gesamtverkehrs in den Szenarien



Insgesamt lassen sich beim **Referenzszenario** folgende Ergebnisse festhalten:

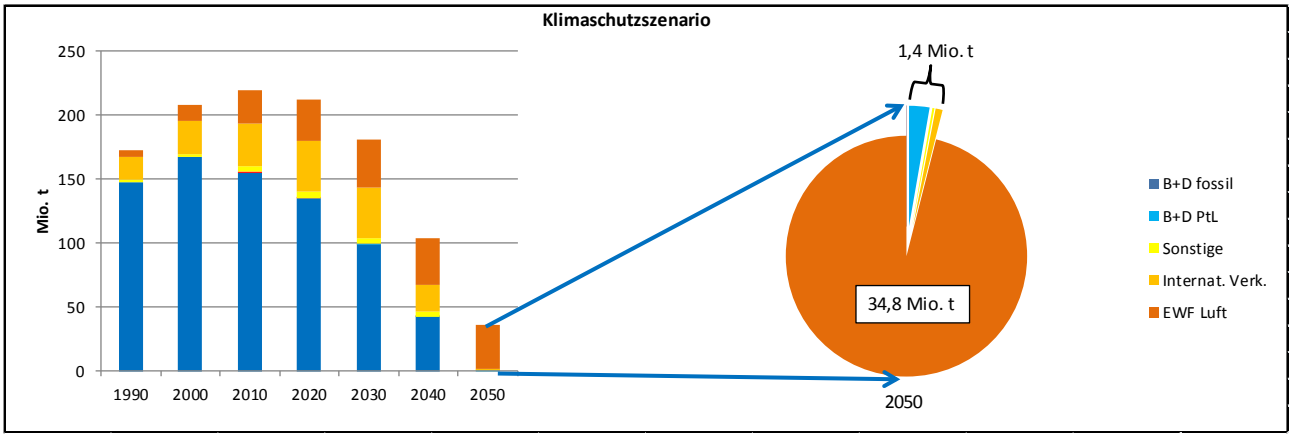
- Beim Straßengüterverkehr liegen die Emissionen in der Zeitreihe durchgehend deutlich über dem Ausgangswert von 1990 (2050: +30 %).
- Beim Straßenverkehr insgesamt wird gegenüber 1990 bis 2050 ein Rückgang um 42 % erreicht.
- Beim gesamten Verkehr (ohne EWF) wird bis 2050 gegenüber 1990 noch ein Rückgang von 22 % erreicht.
- Wird der EWF des Flugverkehrs mit berücksichtigt, sind die THG-Emissionen des gesamten Verkehrs im Jahr 2050 mit -1 % nahezu so hoch wie 1990. Der Zeitliche Verlauf ist hierbei geprägt von einem deutlichen Anstieg bis etwa 2020 und einem Rückgang ab 2030.

Für das **Klimaschutzszenario** ergeben sich erwartungsgemäß deutlich andere Verläufe:

- Die Umstellung auf PtG/PtL-Kraftstoffe nach 2030 führt zu einem deutlichen Rückgang der direkten THG-Emissionen um über 99 %.
- Wird die THG-Wirksamkeit des Flugverkehrs in großen Flughöhen berücksichtigt, bleibt auch im Jahr 2050 eine hohe Klimawirksamkeit des Verkehrs bestehen (entspricht etwa 35 Mio t. CO_2-Äquivalente).

Die im Jahr 2050 verbleibenden Emissionen werden in folgender Abbildung näher betrachtet.

Abbildung 70: Direkte TtW-Treibhausgasemissionen des Gesamtverkehrs in den Szenarien mit Detailbetrachtung der Emissionen 2050



Für die im Klimaschutzszenario verbleibenden direkten THG-Emissionen im Jahr 2050 ergibt sich folgendes Bild

- Die Klimagasemissionen des Verkehrs liegen im Jahr 2050 – ohne die direkten CO_2-Emissionen der erneuerbaren Energieträger und die EWF-Emissionen des Luftverkehrs – bei ca. 1,4 Mio. t. Eine THG-Neutralität des Verkehrs würde somit nahezu erreicht. Allerdings ergaben sich bei der Zielwertdiskussion (siehe Kapitel 3) bei Erreichung des -95 %-THG-Ziels über alle Sektoren auf Basis der Ergebnisse von [UBA, 2014a] zulässige Emissionen für den Verkehr im Jahr 2050 in Höhe von 2,5 Mio. t (nationaler Verkehr) bzw. 3,5 Mio. t (Gesamtverkehr). Diese Werte machen bei aller Unsicherheit deutlich, dass die sonstigen THG-Emissionen wie CH_4 und N_2O bei nahezu CO_2-freien Kraftstoffen zukünftig eine hohe Bedeutung für die gesamten THG-Emissionen des Verkehrs haben werden.
- Wird der EWF des Flugverkehrs einbezogen, lässt sich eine maximale Absenkung der THG-Emissionen um -79 % erreichen. Dies zeigt einerseits die Notwendigkeit, die Klimawirksamkeit der anderen Nicht-CO_2-Emissionen des Luftverkehrs weiter wissenschaftlich zu untersuchen. Andererseits macht dies auch deutlich, dass veränderte Mobilitäts- und Konsummuster notwendig sind, um das Nachfragewachstum des Luftverkehrs nachhaltig zu reduzieren.

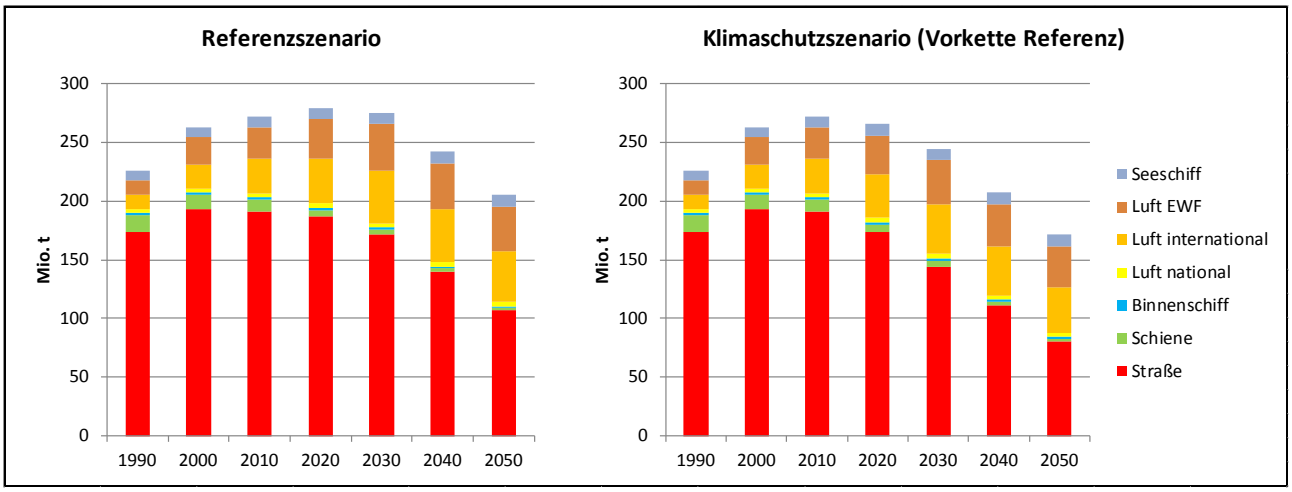
6.4.5 Gesamte Treibhausgasemissionen (WtW)

Für die Szenarien wurden schließlich die gesamten THG-Emissionen (WtW), also die direkten Abgasemissionen und zusätzlich die Emissionen, die bei der Bereitstellung der Endenergieträger entstehen. Die Ergebnisse werden analog der Darstellung des WtW-Gesamtenergieverbrauchs dargestellt.

6.4.5.1 Umsetzung der nichttechnischen Maßnahmen

Zunächst werden in der folgenden Abbildung die WtW-THG-Emissionen des Referenzszenarios dem Klimaschutzszenario mit der Energieträgerbereitstellung des Referenzszenarios gegenüber gestellt.

Abbildung 71: Entwicklung der WtW-THG-Emissionen des gesamten Verkehrs in den Szenarien ohne Umstellung auf THG-neutrale Kraftstoffe



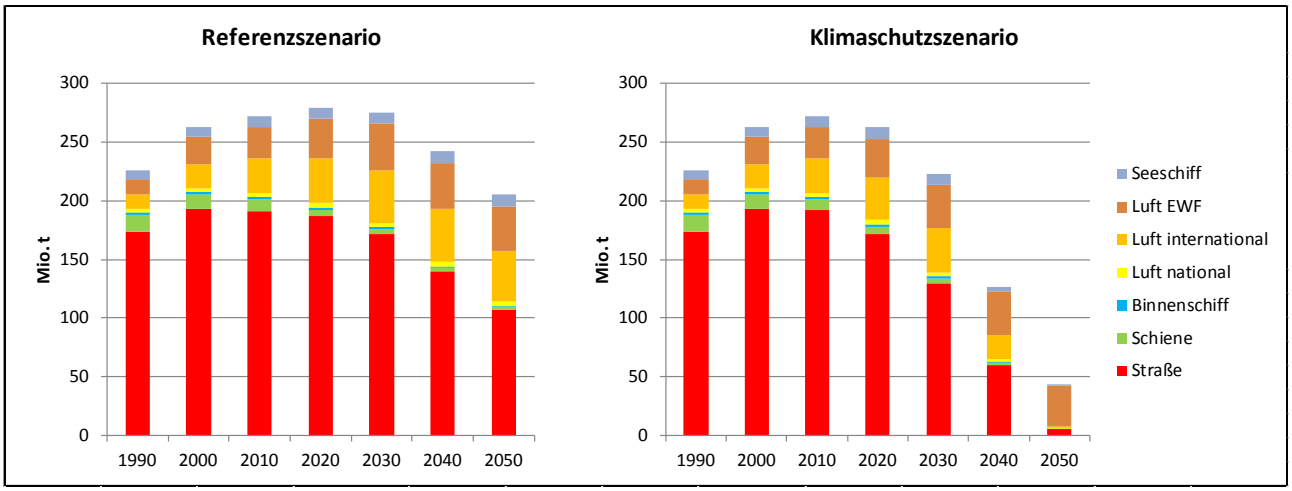
Die wesentlichen Merkmale des Klimaschutzszenarios mit Referenzvorkette im Vergleich zum Referenzszenario sind wie folgt:

- Beim **nationalen Verkehr** liegt der Rückgang der WtW-THG-Emissionen von 1990 bis 2050 im **Referenzszenario** ohne EWF **bei 41 %** (**Gesamtverkehr: 22 %**).
- Beim **Klimaschutzszenario** liegen die Werte bei **-54 % (nationaler Verkehr)** bzw. **-36 % (Gesamtverkehr) .**
- Durch die **ASI-Maßnahmen** im Klimaschutzszenario wird damit gegenüber der Referenz **eine zusätzliche Minderung von 23 % (nationaler Verkehr) bzw. 18 % (gesamter Verkehr)** erzielt.

6.4.5.2 ASI-Maßnahmen und Umstellung auf THG-neutrale Kraftstoffe

Wird im Klimaschutzszenario die Umstellung auf PtG/PtL-Kraftstoffe von 2030 bis 2050 berücksichtigt, sinken die gesamten WtW-THG-Emissionen deutlich ab. In den folgenden Abbildungen sind die Ergebnisse der WtW-THG-Emissionen für das Referenz- und Klimaschutzszenario für den gesamten Verkehr dargestellt.

Abbildung 72: Entwicklung der WtW-THG-Emissionen des gesamten Verkehrs in den Szenarien mit Umstellung auf THG-neutrale Kraftstoffe



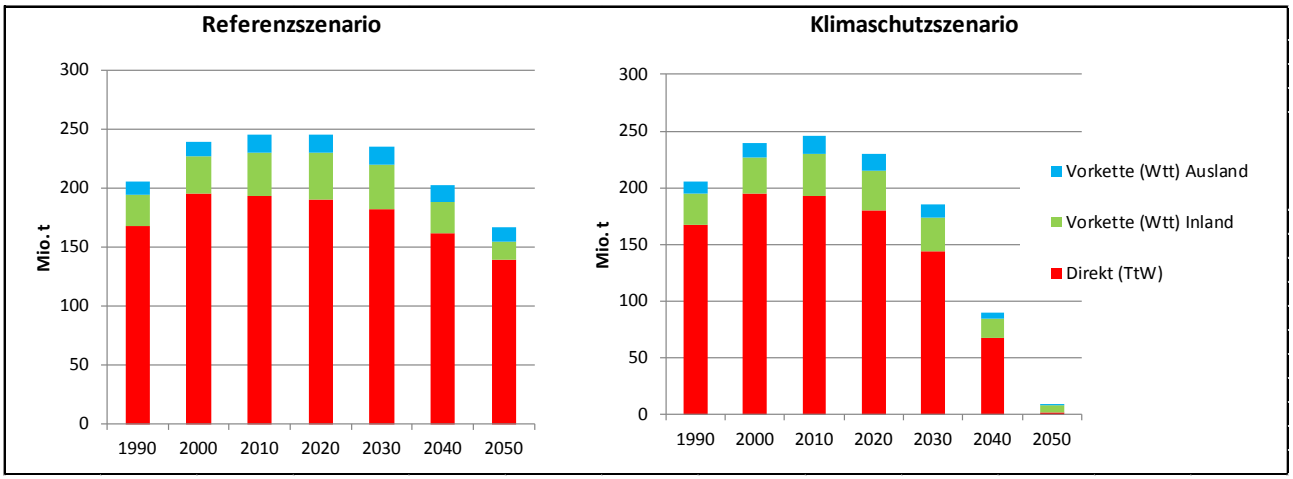
Die wesentlichen Merkmale des Klimaschutzszenarios mit Umstellung auf PtG/PtL-Kraftstoffe im Vergleich zum Referenzszenario sind wie folgt:

- Beim **Klimaschutzszenario** sinken die WtW-THG-Emissionen ab 2030 deutlich ab. Dadurch bleiben im Jahr 2050 noch ca. 8 Mio. t WtW-THG-Emissionen übrig. Von diesen stammen, wie in Kapitel 6.4.4 dargestellt, ca. 1,4 Mio. t aus der direkten Verbrennung und ca. 1,8 Mio. t aus der Stromerzeugung, die in dieser Studie 2050 noch nicht zu 100 % regenerativ angenommen wurde. Die restlichen Emissionen stammen aus anderen Prozessen, die ebenfalls noch nicht zu 100 % regenerativ erbracht werden. Hier besteht aber eine große Unsicherheit, weil auf dem erreichten niedrigen Niveau jede auch kleine Emissionsquelle zu einer großen relativen Veränderung führt.
- Den mit Abstand höchsten Beitrag zu den THG-Emissionen leistet auch in der WtW-Betrachtung der Flugverkehr in großen Flughöhen. Wird diese zusätzliche Klimawirksamkeit der Flugzeugemissionen einbezogen, liegt die Minderung der THG-Emissionen des Gesamtverkehrs 2050 gegenüber 1990 bei 81 %.

6.4.5.3 Herkunft der WtW-THG-Emissionen

Im Rahmen dieser Studie wurde auch eine Unterscheidung der WtT-THG-Emissionen in inländische und ausländische Quellen vorgenommen. Die Zuordnung erfolgte aufgrund des Emissionsortes. Die Ergebnisse dieser Betrachtung sind in der folgenden Abbildung dargestellt.

Abbildung 73: Entwicklung der WtW-THG-Emissionen des gesamten Verkehrs in den Szenarien mit Unterscheidung des Emissionsortes nach Inland und Ausland



Anmerkungen: mit internationalem Verkehr, ohne EWF Flugverkehr

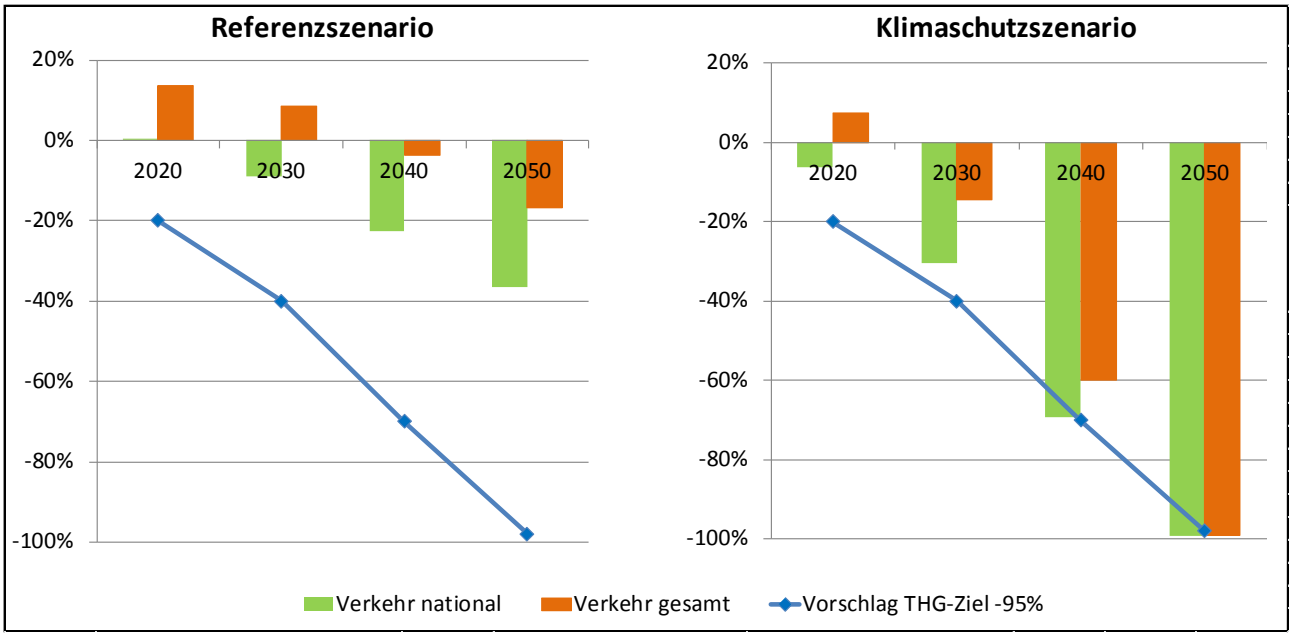
Die Ergebnisse dieser Betrachtung sind wie folgt:

- Obwohl in Deutschland der weitaus größte Teil der Primärenergieträger für den Verkehr importiert wird, entfallen auf die WtT-Bereitstellungskette im Ausland im **Referenzszenario**, wie auch in den Basisjahren 1990-2010, nur rund 30 % der WtT-THG-Emissionen, das sind etwa 7 % der gesamten WtW-THG-Emissionen des Verkehrs.
- Die Umstellung der Energieversorgung auf erneuerbare Energieträger im **Klimaschutzszenario** führt zu einer deutlichen Absenkung in der gesamten Bereitstellungskette im In- und Ausland, wenn sichergestellt ist, dass die Energieerzeugung in den Herkunftsländern gemäß den festgelegten Minderungszielen erfolgt.

6.4.5.4 Bewertung der Ergebnisse THG-Emissionen anhand der Zielwertdiskussion

Die diskutierten Zielwerte gelten für die sektorale Betrachtung, d.h. für die direkten THG-Emissionen des Verkehrs. Die folgende Abbildung stellt die im Referenz- und Klimaschutzszenario erreichten Minderungen der direkten TtW-THG-Emissionen, jeweils für den nationalen Verkehr und den Gesamtverkehr, den vorgeschlagenen Zielen gegenüber.

Abbildung 74: Vergleich der Minderungsraten für die THG-Emissionen (TtW) mit den Werten aus der Zielwertdiskussion



Die Ergebnisse sind wie folgt:

- Während die THG-Minderungen beim Referenzszenario erwartungsgemäß eine ähnliche Größenordnung aufweisen wie beim Endenergieverbrauch und damit keines der Ziele erreichen, werden im Klimaschutzszenario die vorgeschlagenen sektoralen Zielwerte für die THG-Emissionen bis 2050 erreicht.
- Die Zwischenziele des -95 %-THG-Ziels können für den nationalen Verkehr nach 2030 erreicht werden. Die verkehrlichen Maßnahmen, die Einführung von Elektrofahrzeugen und die Verbesserung der Energieeffizienz an den Fahrzeugen reichen jedoch nicht, um die Zwischenziele bis 2030 zu realisieren. Es wird dennoch empfohlen, die Zwischenziele in der vorgeschlagenen Größenordnung beizubehalten, denn die voreilige Anpassung von Zwischenzielen an eine absehbare Realität birgt auch die Gefahr, dass die Anstrengungen in Hinblick auf das 2050er Ziel nicht so konsequent wie notwendig verfolgt werden.
- Bezieht man den internationalen Verkehr mit ein, werden die Ziele der -95 %-THG-Zielkurve erst im Jahr 2050 erreicht, wenn eine vollständige Umstellung der Kraftstoffe auf PtG/PtL aus EE-Strom realisiert ist.

Fazit

Die Zielerreichung im Klimaschutzszenario ist nur möglich wenn die im Verkehr verbrauchten Kraftstoffe nahezu THG-neutral sind. Damit ist eine zentrale Frage: Steht diese Menge an EE-Kraftstoffen im Jahr 2050 zu vertretbaren Kosten zur Verfügung? Diese Frage kann mit dieser Studie nicht beantwortet werden. Doch die Wahrscheinlichkeit für eine positive Antwort ist umso größer, je weniger EE-Kraftstoffe insgesamt benötigt werden. Gleichzeitig bedeuten höhere Kraftstoff- bzw. Fahrzeugkosten nicht nur eine Absicherung zur Vermeidung sogenannter „Rebound-Effekte“ sondern können darüber hinaus auch finanzielle Anreize für Modal Shift und Verkehrsvermeidung bedeuten. Rückwirkungen dieser Art auf den Modal Split und resultierende Verkehrsnachfragen wurden jedoch nicht in dieser Studie untersucht.

Eine Reduktion des Endenergiebedarfs so weit wie möglich ist auf jeden Fall anzustreben: Wie schon aufgezeigt, liegt der Bedarf an EE-Strom für den Gesamtverkehr im Klimaschutzszenario im Jahr 2050 für die Erzeugung von PtG/PtL-Kraftstoffen bei 4.200 PJ. Für den direkten Strombedarf des Verkehrs werden 180 PJ benötigt. Insgesamt beträgt der **EE-Stromverbrauch** demnach **4.380 PJ**. Mit der Reduktion des Verbrauchs an PtG/PtL-Kraftstoffen lassen sich deutliche Minderungen des EE-Strombedarfs erzielen, da je vermiedener Energieeinheit PtG/PtL-Kraftstoff die 2-3fache Menge (energetisch) an EE-Strom eingespart wird. Geringere Endenergieverbräuche bedeuten zudem, dass die Importabhängigkeit Deutschlands von PtG-/PtL-Kraftstoffen reduziert werden kann, da mit dem inländischen EE-Stromangebot größere Anteile der benötigten Kraftstoffe hergestellt werden könnten.

Bei einer Erweiterung der Zielfestlegung um die WtW-Emissionen bzw. um die zusätzlichen THG-Emissionen des Flugverkehrs ist folgendes zu beachten:

- Um die Ziele auch unter Einbezug der **WtW-THG-Emissionen** zu erreichen, muss die Produktion der PtG/PtL-Kraftstoffe treibhausgasneutral erfolgen. Bereits geringe Anteile nicht THG-neutraler Energieträger oder Erzeugungsprozesse können zu THG-Emissionen führen, die deutlich über denen aus der direkten Verbrennung liegen.
- Bezieht man die **THG-Wirkung des Luftverkehrs** in großen Höhen mit ein, verbleibt auch im Jahr 2050 ein Sockel von über 35 Mio. t CO_2-Äquivalente, das entspricht einer THG-Minderung gegenüber 2005 von -81 %. Damit kann ein -95 %-Ziel über alle Sektoren nicht erreicht werden. Werden diese zusätzlichen Klimawirkungen des Luftverkehrs berücksichtigt, sind anspruchsvoller Klimaschutzziele nur mit zusätzlichen Maßnahmen zur Dämpfung der Verkehrsnachfrage möglich.

7 Quellenverzeichnis

AG Energiebilanzen (n.d.): Energiebilanzen der Bundesrepublik Deutschland. Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen.

Anable, J. (2008): The cost-effectiveness of carbon abatement in the transport sector. In: Project report, London.

Axhausen, K. W. / Fröhlich, P. (2012): Übersicht zu Stated Preference- Studien in der Schweiz und Abschätzung von Gesamtelastizitäten Statusbericht 2012.

BAG (n.d.): Güterverkehrsstatistik. https://www.bag.bund.de/DE/Navigation/Service/Publikationen/Statistik.html.

BDI (2009): Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland: Aktualisierte Energieszenarien und -sensitivitäten. Berlin.

BMU (2009): Nationaler Aktionsplan für erneuerbare Energie gemäß der Richtlinie 2009 / 28 / EG zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen.

BMVBS (2007): Prognose der bundesweiten Verkehrsverflechtungen 2025. ITP/BVU; im Auftrag des BMVBS; FE-Nr. 96.0857/2005, München, Freiburg.

BMVBS (2012): Nationaler Radverkehrsplan 2020. Den Radverkehr gemeinsam weiterentwickeln.

BMVI (2014): Verkehr in Zahlen 2014/2015.

BMVI / BMUB (2014): Hybrid- und Elektrobus-Projekte in Deutschland.

Bracher, T. / Gies, J. / Thiemann-Linden, J. / Beckmann, K. J. (2014): Umweltverträglicher Verkehr 2050: Argumente für eine Mobilitätsstrategie für Deutschland. Umweltbundesamt.

Bracher, T. / Handke, G. / Lehmbrock, M. / Tomerius, S. (2003): Klimaschutz und Dienstreisekosten – Wege zur Umweltentlastung und Kostenersparnis.

BUND (2014): Fahrzyklus und Verbrauchsermittlung. Infos zur Ermittlung der offiziellen Verbrauchsangaben von Pkw. Im Vergleich: NEFZ und WLTP.

Bundesrat (2015): Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 der Bundesregierung. Beschluss des Bundesrats. Drucksache 607/14.

Bundesregierung (2002): Perspektiven für Deutschland Unsere Strategie für eine nachhaltige Entwicklung.

Bundesregierung (2007): Zweiter Bericht der Bundesregierung über die Situation des Fahrradverkehrs in der Bundesrepublik Deutschland.

Bundesregierung (2010): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. Bundesminsterium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) und Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Berlin.

Bundesregierung (2012): Nationale Nachhaltigkeitsstrategie: Fortschrittsbericht 2012.

Bündnis 90/DIE GRÜNEN (2012): Antrag: Dienstwagenprivileg abbauen und Besteuerung CO2-effizient ausrichten.

BVU et al. (2014): Verkehrsverflechtungsprognose 2030. Freiburg, München, Aachen, Essen.

Capros, P. / Siskos, P. (2011): PRIMES-TREMOVE transport model v3.

CE Delft (2006): Cost effectiveness of CO_2 mitigation in transport.

CE Delft (2013): Zero emissions trucks An overview of state-of-the-art technologies and their potential.

Cerwenka, P. (1996): Zuckerbrot und/oder Peitsche zum Umsteigen auf den ÖPNV? In: Internationales Verkehrswesen. Band 48, Heft 6.

D (2011): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz - BImSchG).

Deutscher Bundestag (2012): Förderung der Elektromobilität im öffentlichen Personennahverkehr.

DLR / ifeu / LBST / DBFZ (2014): Erneuerbare Energien im Verkehr - Potenziale und Entwicklungsperspektiven verschiedener erneuerbarer Energieträger und Energieverbrauch der Verkehrsträger. Studie im Rahmen der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie (MKS) der Bundesregierung.

DLR / IWES / IFNE (2012): Leitstudie 2011 - Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global.

DStGB / ADFC (2014): Förderung des Radverkehrs in Städten und Gemeinden.

Penner, J.E. (1999): Aviation and the global atmosphere: A special report of the IPCC.

Empa (2015): Die ultraschnelle Stromtankstelle. In: Empa News. Band 13, Heft 48.

ERTRAC / EPoSS / SmartGrids (2012): European Roadmap Electrification of Road Transport - 2nd Edition.

EU (2009a): Entscheidung Nr. 406/2009/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 über die Anstrengungen der Mitgliedstaaten zur Reduktion ihrer Treibhausgasemissionen mit Blick auf die Erfüllung der Verpflichtungen der Gemeinschaft zur Reduktion . In: Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, Nr.140.

EU (2009b): Verordnung 443/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO2-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeu. In: Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften. Europäische Union.

EU (2009c): RICHTLINIE 2009/30/EG Spezifikationen für Otto-, Diesel- und Gasölkraftstoffe und die Einführung eines Systems zur Überwachung und Verringerung der Treibhausgasemissionen, Nr.8.

EU (2009d): Richtline 2009/28/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien 2001/77/EG und 2003/30/EG. In: Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, Nr.140.

EU (2011a): Klimawandel: Fragen und Antworten zu dem Fahrplan für den Übergang zu einer CO 2-armen Wirtschaft bis 2050.

EU (2011b): Verordnung (EU) Nr. 510/2011 des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 11. Mai 2011 zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue leichte Nutzfahrzeuge im Rahmen des Gesamtkonzepts der Union zur Verringerung der CO2-Emissionen von Personenkraftwagen u. Vom 11. Mai 2011 zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue leichte Nutzfahrzeuge im Rahmen des Gesamtkonzepts der Union zur Verringerung der CO2-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen. Europäische Union.

EU (2014): Verordnung 333/2014 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. März 2014

zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 443/2009 hinsichtlich der Festlegung der Modalitäten für das Erreichen des Ziels für 2020 zur Verringerung der CO_2-Emissionen neuer Person. Vom 11. März 2014 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 443/2009 hinsichtlich der Festlegung der Modalitäten für das Erreichen des Ziels für 2020 zur Verringerung der CO_2 -Emissionen neuer Personenkraftwagen. Europäische Union.

Europäische Kommission (2011): Fahrplan für den Übergang zu einer wettbewerbsfähigen CO_2-armen Wirtschaft bis 2050.

Europäische Kommission (2011): Weißbuch - Fahrplan zu einem einheitlichen europäischen Verkehrsraum – Hin zu einem wettbewerbsorientierten und ressourcenschonenden Verkehrssystem.

Europäische Kommission (2013): Trends to 2050 - Reference Scenario 2013. Europäische Kommission.

FGSV (2003): Nachhaltige Verkehrsentwicklung. Arbeitspapier des Arbeitskreis 1.1.21. Berlin.

Follmer, R. / Lenz, B. (2010): MiD 2008 Mobilität in Deutschland 2008. Berlin.

FÖS (2012): Steuerliche Behandlung von Dienst- und Firmenwagen. FÖS-Themenpapier. Berlin.

Fraunhofer IWES (2011): Bahnstrom Regenerativ - Analyse und Konzepte zur Erhöhung des Anteils der Regenerativen Energie des Bahnstroms.

Fraunhofer IWES / Fraunhofer IBP / ifeu / Stiftung Umweltenergierecht (2015): Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr - Analyse der Interaktion zwischen den Sektoren Strom, Wärme/Kälte und Verkehr in Deutschland in Hinblick auf steigende Anteile fluktuierender Erneuerbarer Energien im Ableitung von optimalen strukturellen Entwick. Gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. September 2015.

Glotz-Richter, M. (2013): 10 Jahre “mobil.punkt” in Bremen. Freie Hansestadt Bremen. Der Senator für Umwelt, Bau und Verkehr, Bremen.

Grassl, H. / Brockhagen, D. (2007): Climate forcing of aviation emissions in high altitudes and comparison of metrics.

Grausam, M. / Müller, U. / Rid, W. / Sperling, C. (2014): Elektromobilität in Kommunen: Handlungsleitfaden. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur.

GTZ (2007): Transport and Climate Change Challenges Global.

Hering, E. / Martin, R. / Gutekunst, J. / Kempkes, J. (2012): Elektrotechnik und Elektronik für Maschinenbauer - Kap. Elektrische Maschinen. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.

Hill, N. / Brannigan, C. / Smokers, R. / Skinner, I. (2012): EU Transport GHG: Routes to 2050 II.

ifeu (2014a): Aktualisierung „Daten - und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960- 2030“ (TREMOD) für die Emissionsberichterstattung. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg. Im Auftrag des Umweltbundesamtes, Heidelberg.

ifeu (2014b): Konzept für den Masterplan 100 % Klimaschutz für die Stadt Heidelberg. Heidelberg.

ifeu / Öko-Institut (2012): Entwicklung eines Modells zur Berechnung der Energieeinsätze und Emissionen des zivilen Flugverkehrs (TREMOD-AV). In: UBA-Texte 48/2012; Berlin.

ifeu / TU Graz (2015): Zukünftige Maßnahmen zur Kraftstoffeinsparung und Treibhausgasminderung bei schweren Nutzfahrzeugen. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (ifeu) und Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, Technische Universität Graz. Im

Auftag des Umweltbundesamtes; Dessau-Roßlau.

IGES (2014): Zwei-Jahres-Bilanz : Fernbusanbieter liefern sich starken Konkurrenzkampf – Bis zu 20 Millionen Fahrgäste erwartet. Vol. 2014.

Ika (2014): CO_2-Emissionsreduktion bei Pkw und leichten Nutzfahrzeugen nach 2020 - Management Summary.

INFRAS/IER/Uni Salzburg (2013): Strategien zur wirksamen Minderung der zukünftigen Fluglärmbelastung an Flughäfen: Erarbeitung eines ganzheitlichen, effektiven und praxisbezogenen Fluglärmminderungskonzepts, im Auftrag des Umweltbundesamtes.

IPCC (2007): Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. Intergovernmental Panel on Climate Change, Genf.

IVT (2004): Fahrleistungserhebung 2002, Teil Begleitung und Auswertung, Band 1: Inländerfahrleistung 2002. Untersuchung im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heilbronn, Mannheim.

JEC (2013): TANK-TO-WHEELS Report Version 4. Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context.

Kleine-Möllhoff, P. / Benad, H. / Beilard, FrankEsmail, M. / Knöll, M. / Holger, P. K. / Frank, B. / Esmail, M. / Ausblick, H. P. (2012): Die Batterie als Schlüsseltechnologie für die Elektromobilität der Zukunft Herausforderungen – Potenziale – Ausblick. In: Reutlinger Diskussionsbeiträge zu Marketing & Management; Band 3.

Kley, F. (2011): Ladeinfrastrukturen für Elektrofahrzeuge.

KNB (2015): Leitfaden Elektromobilität - Beschaffung von Elektro- und Hybridfahrzeugen.

Kossina, I. / Frey, H. / Schopf, J. M. / Winder, M. (2014): Energieeffiziente neue Mobilität in Wien. Wiener Stadtwerke Holding AG.

Kunert, U. / Radke, S. (2011): Kraftfahrzeugverkehr 2010 : Weiteres Wachstum und hohe Bedeutung von Firmenwagen. In: DIW Wochenbericht, Nr. 48.

LBST (2016): Renewables in Transport 2050.

Lieb, S. (2014): Fahrscheinfrei, umlagefinanziert, Bürgerticket oder Nulltarif? In: mobilogisch!, Nr. 2.

Lobo, P. (2014): PM Emissions Reductions with Alternative Fuels; Sustainable Aviation Fuels Forum – FORUM-AE Workshop.

Lutsey, N. (2008): Prioritizing Climate Change Mitigation Alternatives: Comparing Transportation Technologies to Options in Other Sectors.

Maaß, C. / Waluga, G. / Weyland, R. (2015): Fahrscheinlos - Grundlagen- und Machbarkeitsstudie Fahrscheinloser ÖPNV in Berlin.

Mahler, A. / Runkel, M. (2015): Schaffung von Kaufanreizen für besonders emissionsarme Pkw.

McKinsey (2010): A portfolio of power-trains for Europe: a fact-based analysis - The role of Battery Electric Vehicles, Plug-in Hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles. In: Fuel Cell.

MWV (2015): Jahresbericht 2015.

OECD (2007): Cutting Transport CO2-Emissions - What Progress?

Öko-Institut (2013a): Treibhausgas-Emissionen durch Infrastruktur und Fahrzeuge des Straßen-, Schienen- und Luftverkehrs sowie der Binnenschifffahrt in Deutschland. Moritz Mottschall, Thomas Bergmann, Berlin. https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/treibhausgas-

emissionen-durch- infrastruktur.

Öko-Institut (2013b): Treibhausgasneutraler Verkehr 2050: Ein Szenario zur zunehmenden Elektrifizierung und dem Einsatz stromerzeugter Kraftstoffe im Verkehr. Im Auftrag des Umweltbundesamtes, Berlin.

Öko-Institut (2013c): Strombasierte Kraftstoffe im Vergleich – Stand heute und die Langfristperspektive.

Öko-Institut (2013d): Politikszenarien für den Klimaschutz VI.

Öko-Institut (2014a): eMobil 2050 Szenarien zum möglichen Beitrag des elektrischen Verkehrs zum langfristigen Klimaschutz.

Öko-Institut (2014b): Wissenschaftliche Analysen zu klimapolitischen Fragestellungen. Quantifizierung der Maßnahmen für das Aktionsprogramm Klimaschutz 2020.

Öko-Institut / Prognos (2009): Modell Deutschland.

Penanhoat, O. (2014): Emission measurements and combustion modelling in CAER project; Sustainable Aviation Fuels Forum – FORUM-AE Workshop.

Prenzel, T. / Gussfeld, K.-P. / Glinka, S. / Schlegel, M. / Frank, N. (2014): Radverkehr fördern! BUND (Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V.), Berlin.

Prognos / EWI / GWS (2010): Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung.

Scholl, G. / Gossen, M. / Grubbe, M. / Brumbauer, T. (2013): Alternative Nutzungskonzepte – Sharing, Leasing und Wiederverwendung. Vertiefungsanalyse 1 im Projekt Ressourcenpolitik: Analyse der ressourcenbedingten Debatte und Entwicklung von Politikoptionen (PolRess).

Siemens / TU Dresden (n.d.): Enuba 2.

Sonnberger, M. / Gallego Carrera, D. (2012): Literaturbericht : Konzepte des Kollektivierten Individualverkehrs. Stuttgart.

SRU (2012): Umweltgutachten 2012 –Verantwortung in einer begrenzten Welt.

Statistisches Bundesamt (2015): Bevölkerung Deutschlands Bis 2060.

Timpe, C. / Brohmann, B. / Bürger, V. / Loose, W. / Mohr, M. (2004): Kommunale Strategien zur Reduktion der CO_2-Emissionen um 50 % am Beispiel der Stadt München.

TU Wien (2011): Potenziale effizienter Nutzfahrzeugantriebe für einen nachhaltigen Straßengüterverkehr bis 2050. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien.

UBA (2010a): CO_2-Emissionsminderung im Verkehr in Deutschland: Mögliche Maßnahmen und ihre Minderungspotenziale. In: UBA-Texte 05/2010.

UBA (2010b): Schienennetz 2025/2030. In: UBA-Texte 42/2010.

UBA (2011): Leitkonzept - Stadt und Region der kurzen Wege. In: UBA-Texte 48/2011.

UBA (2013a): Treibhausgasemissionen durch Infrastruktur und Fahrzeuge des Straßen-, Schienen- und Luftverkehrs sowie der Binnenschifffahrt in Deutschland. In: UBA-Texte 96/2013.

UBA (2013b): Konzept zur zukünftigen Beurteilung der Effizienz von Kraftfahrzeugen. In: UBA-Texte 95/2013.

UBA (2013c): Potenziale des Radverkehrs für den Klimaschutz. In: UBA-Texte 19/2013.

UBA (2014a): Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. In: Climate Change. 07/2014.

UBA (2014b): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2014 | Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 - 2012. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau, Juli 2014.

UBA (2015): Postfossile Energieversorgungsoptionen für einen treibhausgasneutralen Verkehr im Jahr 2050: Eine verkehrsträgerübergreifende Bewertung. In: UBA-Texte 30/2015.

VDV (2014): Finanzierung mit vielen offenen Baustellen. Presseinformation.

Vrtic, M. (2001): Schweiz: Elastizitäten der Personenverkehrsnachfrage : Neuschätzung von Elastizitäten der Personenverkehrsnachfrage in Abhängigkeit von Angebotscharakteristika und Preis. In: Internationales Verkehrswesen. Band 53, Heft 4, Hamburg.

Wallentowitz, H. / Freialdenhoven, A. (2010): Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges. Vieweg+Teubner, Wiesbaden.

WBGU (2009): Kassensturz für den Weltklimavertrag: Der Budgetansatz (Sondergutachten).

Werland, S. (2013): Kurzanalyse 3: Abbau von Subventionen als Instrument zur Steigerung der Ressourceneffizienz. PolRess AP 2 - Politikansätze und -instrumente.

Zarzalis, N. (2014): Comparison of the Emissions of Jet A-1 and Synthetic Jet Fuels; Sustainable Aviation Fuels Forum – FORUM-AE Workshop.

Zimmer, W. / Hülsmann, F. / Havers, K. (2014): Stadt der Zukunft. Lebenswerte Innenstädte durch emissionsfreien Verkehr. Working Paper. Berlin.

Zschocke, A. (2015): HBBA Study: Conclusions; HBBA Study and BioJetMap Workshop.