

**Kosten-Nutzen-Analyse von politischen Instrumenten zur Förderung alternativer  
Kraftstoffe im deutschen Straßengüterverkehr**

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades  
an der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät  
der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

Eingereicht von  
**Michelle Küsters**

Betreuer/in: apl. Prof. Dr. Ulrich Heimeshoff, Düsseldorf Institute for Competition Economics (DICE)

03.11.2022

## I. Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	1
2.	Der deutsche Straßengüterverkehr.....	6
2.1	Marktsegmentierung des Straßengüterverkehrs .....	6
2.2	Ausgangslage des deutschen Straßengüterverkehrs .....	9
2.3	Entwicklungsprognosen für den deutschen Straßengüterverkehr .....	24
3.	Stand der Technik: traditionelle und alternative Kraftstoffe .....	28
3.1	Überblick über die Ressourcen und die resultierenden Kraftstoffe.....	28
3.2	Produktionsrouten und Herstellungsverfahren der Kraftstoffe .....	29
3.3	Energie- und THG-Bilanz der finalen Kraftstoffe.....	37
4.	Methodik der Analyse.....	46
4.1	Die Kosten-Nutzen-Analyse in der Theorie .....	46
4.2	Gewähltes Vorgehen bei der Kosten-Nutzen-Analyse.....	50
4.3	Analyse makroökonomischer Wirkungen .....	53
5.	Politische Instrumente für die Energiewende im Straßengüterverkehr .....	54
5.1	Politische Instrumente und Regulierung im Einsatz .....	54
5.2	Überblick über mögliche zukünftige Instrumente.....	65
5.3	Auswahl des zu untersuchenden Instrumenten-Mix.....	68
6.	Qualitative Bewertung der Effektivität und Effizienz der politischen Instrumente	69
6.1	Beschreibung des CEPiR-Modells .....	69
6.2	Maßnahme 1: Flächendeckendes Dieserverbot in Deutschland .....	103
6.3	Maßnahme 2: Dieserverbot im Innenstadtring – am Beispiel von Kiel, Düsseldorf und München .....	116
6.4	Maßnahme 3: Dieserverbot im gesamten Stadtbereich von München inkl. Errichtung von Mikrodepots .....	126
6.5	Maßnahme 4: Dieserverbot im gesamten Straßennetz, ausgenommen Autobahnen .....	133
6.6	Maßnahme 5: Einführung einer Umweltspur auf allen zweispurigen Bundesstraßen für alternative Antriebe in München.....	141
6.7	Maßnahme 6: Überholverbot für fossile Antriebe auf Autobahnen/mittlere Spur wird Umweltspur .....	153
6.8	Maßnahme 7: Einführung einer Umweltzone in Kiel .....	161
6.9	Maßnahme 8: Bonus-Malus-System .....	167
6.10	Maßnahme 9: Einführung der CO <sub>2</sub> -Maut.....	172
6.11	Maßnahme 10: Einführung der CO <sub>2</sub> -Steuer in Deutschland.....	177
6.12	Maßnahme 11: Einführung einer City-Maut für München .....	181
6.13	Maßnahme 12: Ausweis der CO <sub>2</sub> -Belastung.....	185
6.14	Übersicht über die Maßnahmenwirkungen .....	190
6.16	Sensitivitätsanalyse .....	198
6.17	Synergieeffekte und Maßnahmenkombinationen.....	220

7. Volkswirtschaftliche Effekte der politischen Instrumente.....	221
7.1 Datenbasis und Aufbereitung .....	222
7.2 Ergebnisse der Analyse .....	230
8. Priorisierung der Maßnahmen .....	254
9. Zusammenfassung und Ausblick.....	258
10. Literaturverzeichnis .....	269
11. Anhang.....	292

## II. Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr
Abb	Abbildung
BEHG	Brennstoffemissionshandelsgesetz
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BtL	Biomass-to-Liquid
BVerwG	Bundesverwaltungsgericht
CBG	Bioerdgas
CCS	CO <sub>2</sub> -Capture and Storage
CEPIR	Cost-Effectiveness of Political Instruments in Road freight transport
CH <sub>4</sub>	Methan
CNG	Erdgas
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
CO <sub>2</sub> -Äq.	CO <sub>2</sub> -Äq.
ct	Cent
CtL	Coal-to-liquid
Destatis	Statistisches Bundesamt
DL	Dienstleistung
DME	Dimethylether
DV	Dieserverbot
Edir	direkte Erwerbstätige
Eind	indirekte Erwerbstätige
EnergieStG	Energiesteuergesetz
EU	Europäische Union
Ew	Einwohner*innen
EWG	Energiewirtschaftsgesetz
FT	Fischer-Tropsch
FZkm	Fahrzeugkilometer
g	Gramm
GtL	Gas-to-liquid
GuD	Gas- und Dampfkraftwerk
h	Stunde
HBEFA	Handbuch für Emissionsfaktoren
HVO	Biodiesel

i.d.R.	In der Regel
IEA	International Energy Agency
IGCC	Kombi-Prozess mit integrierter Vergasung
inkl	Inklusive
insb	Insbesondere
I-O	Input-Output
IOA	Input-Output-Analyse
IuK	Information und Kommunikation
KBA	Kraftfahrtbundesamtes
Kfz	Kraftfahrzeug
kg	Kilogramm
kg	Kilogramm
km	km
km/h	km pro Stunde
km <sup>2</sup>	Quadratkilometer
KNA	Kosten-Nutzen-Analyse
KNV	Keine Nachfrageverschiebung
KraftStG	Kraftfahrzeugsteuergesetz
kWh	Kilowattstunde
Lkw	Lastkraftwagen
LNF	Leichte Nutzfahrzeuge
LNG	Flüssigerdgas
LPG	Autogas
m <sup>3</sup>	Kubikmeter
MCC	Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change
MDK	München, Düsseldorf, Kiel
mg	Milligramm
Mio	Millionen
MJ	Megajoule
Mrd	Milliarden
MRIO	Multiregionale Input-Output-Tabelle
MWh	Megawattstunde
N <sub>2</sub> O	Distickstoffmonoxid
nEHS	Nationales Emissionshandelssystem
NGO	Nichtregierungsorganisation
Nox	Stickoxide
NPM	Nationale Plattform Zukunft der Mobilität
NV	Nachfrageverschiebung
PHEV	Plug-in Diesel-Hybrid
PJ	Personenjahre
Pkw	Personenkraftwagen
PtX	Power-to-X
RoW	Rest of World
SNF	Schwere Nutzfahrzeuge
SNG	Synthetisches Erdgas
StVO	Straßenverkehrsordnung
t	t
TCO	Total Cost of Ownership
THG	Treibhausgas

Tkm	Tonnenkilometer
Tsd	Tausend
TTW	Tank-to-Wheel
US	Umweltspur
VGR	Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen
WIOD	World Input Output Database
WIOT	World-Input-Output-Tabelle
WTT	Well-to-Tank
WTW	Well-to-Wheel
µg	Mikrogramm

### III. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Einsatz der verschiedenen Lkw-Fahrzeugklassen und -typen .....	8
Abbildung 2: Transportmenge deutscher Lastkraftfahrzeuge von 2008 bis 2018 (in Tsd. t) .....	11
Abbildung 3: Transportmenge im deutschen Binnenverkehr von 2008 bis 2018 (in Tsd. t) .....	12
Abbildung 4: Beförderungsleistung deutscher Lastkraftwagen von 2008 bis 2018 (in Mio. tkm) .....	12
Abbildung 5: Beförderungsleistung im deutschen Binnenverkehr von 2008 bis 2018 (in Mio. tkm) .....	13
Abbildung 6: Bestand deutscher Lastkraftwagen von 1960 bis 2018.....	14
Abbildung 7: Neuzulassungen je Kraftstoff von 2006 bis 2018 .....	15
Abbildung 8: Neuzulassungen je Kraftstoff (ohne Diesel) von 2006 bis 2018 .....	16
Abbildung 9: Bestand an Lastkraftwagen nach Schadstoffklassen von 2010 bis 2017..	17
Abbildung 10: Bestandsveränderung nach Emissionsklassen von 2010 bis 2017 (in %) .....	18
Abbildung 11: Bestandsveränderung von Diesel-Lkw je Größenklasse (in %) .....	19
Abbildung 12: Bestandsveränderung von Benzin-Lkw je Größenklasse (in %) .....	19
Abbildung 13: Bestandsveränderung von Erdgas-Lkw je Größenklasse (in %) .....	20
Abbildung 14: Bestandsveränderung von LPG-Lkw je Größenklasse (in %) .....	20
Abbildung 15: Bestandsveränderung von Elektro-Lkw je Größenklasse (in %).....	21
Abbildung 16: Bestandsveränderung von Hybrid-Lkw je Größenklasse (in %) .....	21
Abbildung 17: Bestandsveränderung von Lkw der Gruppe „Sonstige“ je Größenklasse (in %).....	22

Abbildung 18: Neuzulassungen der Größenklasse <1 t von 2006 bis 2018 nach Kraftstoffen .....	23
Abbildung 19: Biokraftstoffprognose im ambitionierten „Modern Truck Scenario“ .....	25
Abbildung 20: Fahrzeugbestand und Technologieanteile im „Modern Truck Scenario“, 2015–2050.....	26
Abbildung 21: Die betrachtete Auswahl an Kombinationen von Herstellungsprozessen .....	29
Abbildung 22: Umfang des Well-to-Wheel-Gesamtsystems.....	30
Abbildung 23: Die fünf generischen Prozessschritte eines WTT-Pfades .....	30
Abbildung 24: Übersicht über die Well-to-Wheel-Emissionen der betrachteten Kraftstoffe (in gCO <sub>2</sub> /km) .....	37
Abbildung 25: Energie- und THG-Bilanz von Benzin gegenüber Diesel.....	38
Abbildung 26: Energie- und THG-Bilanz von Biodiesel gegenüber Diesel.....	39
Abbildung 27: Energie- und THG-Bilanz von Syndiesel gegenüber Diesel .....	41
Abbildung 28: Energie- und THG-Bilanz von LPG gegenüber Diesel .....	41
Abbildung 29: Energie- und THG-Bilanz von CNG/LNG/SNG/CBG gegenüber Diesel .....	43
Abbildung 30: Energie- und THG-Bilanz von Elektrizität gegenüber Diesel .....	44
Abbildung 31: Energie- und THG-Bilanz von Wasserstoff gegenüber Diesel.....	45
Abbildung 32: Wohlfahrt bei perfektem Wettbewerb .....	48
Abbildung 33: Wohlfahrt bei staatlichem Eingriff (Angebotsverknappung) .....	49
Abbildung 34: Umweltzonen in Deutschland .....	62
Abbildung 35: Umgesetzte und geplante Fahrverbote für Diesel-Pkw in Deutschland .	63
Abbildung 36: Zusammenfassung der Effekte im Standardmodell .....	71
Abbildung 37: Herstellungsemissionen eines Lkw-Fahrzeugs (in gCO <sub>2</sub> -Äq./km).....	77
Abbildung 38: S-förmige Diffusionskurve .....	96
Abbildung 39: Markthochlauf alternativer Kraftstoffe bei LNF.....	98
Abbildung 40: Markthochlauf alternativer Kraftstoffe bei SNF .....	98
Abbildung 41: Beispielhaftes Vorgehen bei der Berechnung der zukünftigen Käufe mit der Nachfrageverschiebung.....	100
Abbildung 42: Treibhausgaseinsparungen aufgrund von Maßnahme 1 über die Lebensdauer .....	105
Abbildung 43: Emissionseinsparung durch Altfahrzeuge aufgrund von Maßnahme 1	106
Abbildung 44: Emissionsanstieg durch Neufahrzeuge resultierend aus Maßnahme 1 .	107

Abbildung 45: Emissionsvergleich mit und ohne Maßnahme 1 in Tsd. t CO <sub>2</sub> -Äq.....	108
Abbildung 46: Anstieg der THG-Emissionen aufgrund der Herstellung von Neufahrzeugen aufgrund von Maßnahme 1 .....	108
Abbildung 47: THG-Reduktion und -Anstiege, verursacht von ausländischen Akteuren .....	109
Abbildung 48: Kosten aufgrund von Maßnahme 1 über die Lebensdauer .....	110
Abbildung 49: Gesamter Wertgewinn durch Abwrackprämien je Schadstoffklasse aufgrund von Maßnahme 1 .....	110
Abbildung 50: Gesamte Einsparung von Betriebskosten mit Maßnahme 1 im Vergleich zum Status quo .....	111
Abbildung 51: Veränderung des Kraftstoffumsatzes durch die Veränderung des Verbrauchs aufgrund von Maßnahme 1 .....	112
Abbildung 52: Gegenüberstellung von Umsatzeinnahmen und Fertigungskosten von deutschen Herstellern aufgrund von Maßnahme 1 .....	112
Abbildung 53: Notwendiger Ausbau von Tankstelleninfrastruktur aufgrund von Maßnahme 1 .....	113
Abbildung 54: Gegenüberstellung von Umsatzeinnahmen und Fertigungskosten von deutschen Herstellern aufgrund von Maßnahme 1 .....	114
Abbildung 55: Veränderung der jährlichen Staatseinnahmen aufgrund von Maßnahme 1 .....	114
Abbildung 56: Einmalige Einnahmen und Ausgaben des Staates (in Mio. Euro) aufgrund von Maßnahme 1 .....	115
Abbildung 57: Geografischer Bereich der Maßnahme in München (Umweltzone) ....	118
Abbildung 58: Geografischer Bereich der Maßnahme in Düsseldorf (Umweltzone)...	119
Abbildung 59: Geografischer Bereich der Maßnahme in Kiel (mögliche Umweltzone) .....	121
Abbildung 60: Treibhausgaseinsparungen aufgrund von Maßnahme 2 über die Lebensdauer .....	124
Abbildung 61: THG-Anstiege verursacht von ausländischen Akteuren aufgrund von Maßnahme 2 am Beispiel München.....	125
Abbildung 62: Kosten aufgrund von Maßnahme 2 über die Lebensdauer .....	126
Abbildung 63: Treibhausgaseinsparungen aufgrund von Maßnahme 3 über die Lebensdauer .....	129

Abbildung 64: Emissionseinsparung durch Altfahrzeuge (in Tsd. t CO <sub>2</sub> -Äq./a) aufgrund von Maßnahme 3.....	130
Abbildung 65: THG-Anstiege verursacht von ausländischen Akteuren aufgrund von Maßnahme 3.....	130
Abbildung 66: Kosten aufgrund von Maßnahme 3 über die Lebensdauer .....	131
Abbildung 67: Veränderung der jährlichen Staatseinnahmen aufgrund von Maßnahme 3 .....	132
Abbildung 68: Vergleich des Autobahn- und Bundesfernstraßennetzes in Deutschland .....	135
Abbildung 69: In Deutschland kürzlich von Amazon geplante bzw. gebaute Verteilzentren.....	136
Abbildung 70: Treibhausgaseinsparungen aufgrund von Maßnahme 4 über die Lebensdauer .....	138
Abbildung 71: Kosten aufgrund von Maßnahme 4 über die Lebensdauer .....	139
Abbildung 72: Veränderung der jährlichen Staatseinnahmen aufgrund von Maßnahme 4 .....	140
Abbildung 73: Straßenkarte München, insb. Bundesautobahnen und Bundesstraßen..	142
Abbildung 74: Berechnung der Länge der Bundesstraßen im Stadtgebiet München ...	142
Abbildung 75: Treibhausgaseinsparungen aufgrund von Maßnahme 5 über die Lebensdauer .....	148
Abbildung 76: Emissionsanstieg durch Neufahrzeuge (in Tsd. t CO <sub>2</sub> -Äq./a), resultierend aus Maßnahme 5 .....	148
Abbildung 77: Anstieg der Herstellungsemissionen aufgrund von Maßnahme 5 .....	149
Abbildung 78: THG-Anstiege verursacht von ausländischen Akteuren aufgrund von Maßnahme 5.....	150
Abbildung 79: Kosten aufgrund von Maßnahme 5 über die Lebensdauer .....	151
Abbildung 80: Veränderung des Kraftstoffumsatzes aufgrund von Maßnahme 5 im Vergleich zum Status quo .....	152
Abbildung 81: Einmalige Einnahmen/Ausgaben des Staates aufgrund von Maßnahme 5 .....	152
Abbildung 82: Treibhausgaseinsparungen aufgrund von Maßnahme 6 über die Lebensdauer .....	158
Abbildung 83: Emissionsvergleich mit und ohne Maßnahme 6 (in Tsd. t CO <sub>2</sub> -Äq.) ...	159

Abbildung 84: THG-Reduktion und -Anstiege, verursacht von ausländischen Akteuren aufgrund von Maßnahme 6 .....	159
Abbildung 85: Kosten aufgrund von Maßnahme 6 über die Lebensdauer .....	160
Abbildung 86: Gesamte Kosteneinsparung von Betriebskosten mit Maßnahme 6 im Vergleich zum Status quo .....	161
Abbildung 87: Treibhausgaseinsparungen aufgrund von Maßnahme 7 über die Lebensdauer .....	164
Abbildung 88: Emissionsvergleich mit und ohne Maßnahme 7 .....	164
Abbildung 89: Kosten aufgrund von Maßnahme 7 über die Lebensdauer .....	165
Abbildung 90: Veränderung des Kraftstoffumsatzes aufgrund von Maßnahme 7 im Vergleich zum Status quo .....	166
Abbildung 91: Veränderung der jährlichen Staatseinnahmen aufgrund von Maßnahme 7 .....	166
Abbildung 92: Treibhausgaseinsparungen aufgrund von Maßnahme 8 über die Lebensdauer .....	171
Abbildung 93: Kosten aufgrund von Maßnahme 8 über die Lebensdauer .....	172
Abbildung 94: Jährliche Mautzahlungen eines Lkw der entsprechenden Größen- und Schadstoffklasse und Antriebsform im Jahr 2021 .....	174
Abbildung 95: Treibhausgaseinsparungen aufgrund von Maßnahme 9 über die Lebensdauer .....	175
Abbildung 96: Kosten aufgrund von Maßnahme 9 über die Lebensdauer .....	176
Abbildung 97: Treibhausgaseinsparungen aufgrund von Maßnahme 10 über die Lebensdauer .....	179
Abbildung 98: Kosten aufgrund von Maßnahme 10 über die Lebensdauer .....	180
Abbildung 99: Mautkosten und Staukostenersparnis in € pro Jahr für ein Durchschnittsfahrzeug.....	182
Abbildung 100: Treibhausgaseinsparungen aufgrund von Maßnahme 11 über die Lebensdauer .....	184
Abbildung 101: Kosten aufgrund von Maßnahme 11 über die Lebensdauer .....	184
Abbildung 102: Treibhausgaseinsparungen aufgrund von Maßnahme 12 über die Lebensdauer .....	189
Abbildung 103: Kosten aufgrund von Maßnahme 12 über die Lebensdauer .....	190
Abbildung 104: THG-Reduktion kumuliert von 2021 bis 2030 je Maßnahme in Tsd. t CO <sub>2</sub> -Äq.....	191

Abbildung 105: THG-Reduktion kumuliert von 2021 bis 2030 je Akteur in Tsd. t CO <sub>2</sub> -Äq.....	192
Abbildung 106: THG-Reduktion kumuliert von 2021 bis 2030 je Akteur in Tsd. t CO <sub>2</sub> -Äq.....	193
Abbildung 107: Kosten kumuliert von 2021 bis 2030 je Maßnahme in Mio. € .....	194
Abbildung 108: Kosten kumuliert von 2021 bis 2030 je Akteur in Mio. € – Gesamtdeutschland .....	195
Abbildung 109: Kosten kumuliert von 2021 bis 2030 je Akteur in Mio. € – regionenspezifisch.....	196
Abbildung 110: Effizienz der Maßnahmen über die Lebensdauer in Kosten in Tsd. € pro eingesparter t CO <sub>2</sub> -Äq. ....	197
Abbildung 111: Drei-Felder-Matrix Maßnahmenvergleich hinsichtlich Effektivität und Effizienz .....	198
Abbildung 112: Prozentuale Veränderung der THG-Einsparung bei Variation des Produktionsstandortes .....	200
Abbildung 113: Absolute Veränderung der Kosten bei Variation des Produktionsstandortes (in Mio. €).....	201
Abbildung 114: Vergleich prozentuale Abweichung THG-Reduktion mit Kosten für Produktion im Ausland .....	201
Abbildung 115: THG-Effekte der verschiedenen Sensitivitätsszenarien über die Lebensdauer pro Maßnahme im Vergleich (in Tsd. t CO <sub>2</sub> -Äq.).....	203
Abbildung 116: Vergleich der Szenarien hinsichtlich ihrer Gesamtreduktion über die Lebensdauer von 2021 bis 2030 je Maßnahme in Tsd. t CO <sub>2</sub> -Äq. ....	204
Abbildung 117: Effizienzunterschiede in den unterschiedlichen Sensitivitätsszenarien (in Tsd. €/t CO <sub>2</sub> -Äq.).....	205
Abbildung 118: Veränderung der THG-Reduktion bei Variation der Fahrleistung (in Tsd. t CO <sub>2</sub> -Äq.).....	206
Abbildung 119: Veränderung der Kosten bei Variation der Fahrleistung (in Mio. €)..	207
Abbildung 120: Veränderung der THG-Reduktion bei Variation der Lebensdauer (in Tsd. t CO <sub>2</sub> -Äq.).....	208
Abbildung 121: Veränderung der Kosten bei Variation der Lebensdauer (in Mio. €) .	208
Abbildung 122: Veränderung der Kosten bei Variation des Diskontierungsfaktors (in Mio. €).....	209

Abbildung 123: Veränderung der THG-Einsparung bei Variation der Herstellungsemissionen (in Tsd. t CO <sub>2</sub> -Äq.) .....	210
Abbildung 124: Variation der Mikrodepot-Reichweite bzw. Anzahl der benötigten Mikrodepots in Maßnahme 3 .....	212
Abbildung 125: Variation der Anzahl an benötigten Verteilzentren in Maßnahme 4 ..	213
Abbildung 126: Variation des Zeitverlustes pro km Umweltspur in Maßnahme 5 .....	214
Abbildung 127: Variation der Länge des Überholverbotes in Maßnahme 6 .....	215
Abbildung 128: Variation der Kosten der Umweltzone in Maßnahme 7 .....	216
Abbildung 129: Variation der Höhe der Bonus-Malus-Zahlungen in Maßnahme 8 ...	216
Abbildung 130: Variation der Höhe des CO <sub>2</sub> -Abschlags in Maßnahme 9 .....	217
Abbildung 131: Variation der Höhe der CO <sub>2</sub> -Steuer in Maßnahme 10 .....	218
Abbildung 132: Variation der Staukostensparnis in Maßnahme 11 .....	218
Abbildung 133: Variation der Neukaufquote in Maßnahme 12.....	219
Abbildung 134: Schematische Darstellung einer MRIO-Tabelle .....	223
Abbildung 135: Ergebnisdimensionen des I-O-Modells.....	230
Abbildung 136: Indirekte Output-Wirkung der Maßnahmen in Deutschland je Jahr...	231
Abbildung 137: Indirekter Output in Deutschland je Maßnahme über die Lebensdauer .....	232
Abbildung 138: Indirekte Effekte auf den Produktionsoutput je Sektor über die Lebensdauer in Deutschland .....	233
Abbildung 139: Indirekte Effekte auf den Produktionsoutput je Sektor über die Lebensdauer im Ausland.....	238
Abbildung 140: Beschäftigungseffekte in Tsd. PJ .....	239
Abbildung 141: Beschäftigungseffekte pro Maßnahme je Jahr .....	240
Abbildung 142: Direkter und indirekter Beschäftigungseffekt der Maßnahme 1 für beide Regionen im Vergleich .....	241
Abbildung 143: Direkter und indirekter Beschäftigungseffekt der Maßnahmen 2, 3, 4 und 7 für beide Regionen im Vergleich .....	242
Abbildung 144: Direkter und indirekter Beschäftigungseffekt der Maßnahme 5 für beide Regionen im Vergleich .....	243
Abbildung 145: Direkter und indirekter Beschäftigungseffekt der Maßnahmen 6, 8, 9, 10, 11 und 12 für beide Regionen im Vergleich .....	244
Abbildung 146: Beschäftigungseffekte nach Geschlecht .....	246

Abbildung 147: Übersicht der gesamten Bruttowertschöpfung über die Lebensdauer je Maßnahme.....	247
Abbildung 148: Jahresscharfe direkte und indirekte Bruttowertschöpfung in Deutschland bzw. im Ausland aufgrund der Maßnahmen .....	248
Abbildung 149: Direkte und indirekte Bruttowertschöpfung über die Lebensdauer je Maßnahme und je Sektor .....	249
Abbildung 150: Direkter und indirekter Bruttowertschöpfungseffekt der Maßnahme 1 für beide Regionen im Vergleich .....	250
Abbildung 151: Direkter und indirekter Bruttowertschöpfungseffekt der Maßnahmen 2, 3, 4 und 7 für beide Regionen im Vergleich .....	250
Abbildung 152: Direkter und indirekter Bruttowertschöpfungseffekt der Maßnahme 5 für beide Regionen im Vergleich .....	251
Abbildung 153: Direkter und indirekter Bruttowertschöpfungseffekt der Maßnahmen 6, 8, 9, 10, 11 und 12 für beide Regionen im Vergleich .....	252
Abbildung 154: Steigerung des Bruttoinlandsproduktes je Maßnahme .....	253
Abbildung 155: Gesamterhöhung des BIP über die Lebensdauer je Maßnahme (in %) .....	253
Abbildung 156: Rangfolge der Maßnahmen hinsichtlich der fünf Dimensionen – Gesamtbetrachtung.....	254
Abbildung 157: Rangfolge der Maßnahmen hinsichtlich der fünf Dimensionen – Einzelbetrachtung.....	257

#### **IV. Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Segmentierungskriterien zur Identifikation von Teilmärkten.....	7
Tabelle 2: Allgemeine Gruppierung der beteiligten Akteure.....	51
Tabelle 3: Definition der Kostengrößen.....	52
Tabelle 4: Übersicht der am meisten betroffenen Städte von NO <sub>2</sub> -Grenzwertüberschreitungen im Jahr 2019 .....	61
Tabelle 5: Auswahl von politischen Instrumenten für die Analyse .....	68
Tabelle 6: Bestand an Fahrzeugen (Gesamtdeutschland) nach Größen- und Schadstoffklasse .....	71
Tabelle 7: Bestand an Fahrzeugen (regional) nach Größenklasse .....	72

Tabelle 8: Neuzulassungen im Jahr 2019 (Gesamtdeutschland) nach Größenklasse und Antriebsart.....	73
Tabelle 9: Energieverbrauch von Lkw nach Antriebsart, Schadstoffklasse und Größenklasse in kWh/km.....	75
Tabelle 10: Energiegehalt von Kraftstoffen.....	75
Tabelle 11: Well-to-Wheel-Emissionen pro Kraftstoff, Größenklasse und Schadstoffklasse.....	76
Tabelle 12: Kostenparameter Lastkraftwagen.....	78
Tabelle 13: Marktanteile deutscher/ausländischer Fahrzeuge in Deutschland.....	79
Tabelle 14: Kraftstoffpreise und Preisbestandteile.....	79
Tabelle 15: Margen für die Herstellung von Fahrzeugen und Infrastruktur.....	79
Tabelle 16: Notwendige Tankstellen und Infrastrukturkosten.....	80
Tabelle 17: Prozentuale Aufteilung der Neuzulassungen auf die verschiedenen Kraftstoffarten (Referenznachfrage).....	95
Tabelle 18: Anreizsystem der Maßnahmen zur Bewertung der Nachfrageverschiebung für LNF.....	96
Tabelle 19: Anreizsystem der Maßnahmen zur Bewertung der Nachfrageverschiebung für SNF.....	97
Tabelle 20: Markthochlauf alternativer Kraftstoffe bei LNF.....	99
Tabelle 21: Markthochlauf alternativer Kraftstoffe bei SNF (Referenzszenario).....	99
Tabelle 22: Hebel der Maßnahme 1.....	104
Tabelle 23: NO <sub>2</sub> -Messungen der drei ausgewählten Städte.....	116
Tabelle 24: Bevölkerungs- und Flächendaten der drei Städte.....	117
Tabelle 25: Jahresfahrleistung in Fahrzeugkilometer (FZkm) pro Jahr in Düsseldorf.....	120
Tabelle 26: Messdaten aus dem Verkehrsmodell der Stadt Kiel.....	122
Tabelle 27: Hebel der Maßnahme 2.....	123
Tabelle 28: Hebel der Maßnahme 3.....	128
Tabelle 29: Hebel der Maßnahme 4.....	136
Tabelle 30: Berechnung des Anreizsystems der Maßnahme.....	146
Tabelle 31: Hebel der Maßnahme 5.....	146
Tabelle 32: Zeitaufwand für Fahrzeuge mit und ohne Berechtigung zur Nutzung der Umweltspur.....	156
Tabelle 33: Hebel der Maßnahme 6.....	157
Tabelle 34: Hebel der Maßnahme 7.....	162

Tabelle 35: Bonus-/Malus-Zahlungen pro Größenklasse und Kraftstoff im Jahr 2021 und 2026.....	169
Tabelle 36: Hebel der Maßnahme 8 .....	169
Tabelle 37: CO <sub>2</sub> -Mautsätze in € pro t CO <sub>2</sub> -Emission über die Lebensdauer der Maßnahme.....	173
Tabelle 38: Hebel der Maßnahme 9 .....	174
Tabelle 39: Steuerzahlungen CO <sub>2</sub> -Steuer pro Jahr im Zeitverlauf bis 2030 in € pro t CO <sub>2</sub> .....	177
Tabelle 40: CO <sub>2</sub> -Steuersatz innerhalb der Energiesteuer in ct/kWh für die Jahre 2021 bis 2030 nach CO <sub>2</sub> -Ausstoß pro Kraftstoff.....	178
Tabelle 41: Hebel der Maßnahme 10 .....	178
Tabelle 42: City-Maut-Gebühr pro Einfahrt in das Mautgebiet und prozentuale Fahrtzeitreduktion im Zeitverlauf .....	181
Tabelle 43: Hebel der Maßnahme 11 .....	182
Tabelle 44: Hebel der Maßnahme 12 .....	187
Tabelle 45: Transaktionsmatrix.....	222
Tabelle 46: Überlieferung vom Destatis- zum WIOD-Format .....	224
Tabelle 47: Aufteilung der Kostenbestandteile auf die Gütergruppen.....	229

## 1. Einleitung

Der Klimawandel schreitet weiter voran. Von Menschen verursachte Treibhausgasemissionen spielen dabei eine maßgebliche Rolle. Bereits im Dezember 2014 hatte die Bundesregierung das Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 verabschiedet, um mit zusätzlichen Maßnahmen die absehbare Lücke in der Zielerreichung zu schließen (PwC, 2016). Seit 2015 werden die Umsetzung sowie nachfolgende Maßnahmenpakete in jährlichen Berichten überprüft (UBA, 2021c).

Die Bundesregierung hat in Ergänzung zum Klimaschutzplan 2050 im September 2019 das Klimaschutzprogramm 2030 mit sektorspezifischen und übergreifenden Maßnahmen zur Erreichung der Klimaschutzziele 2030 vorgelegt (UBA, 2021c). Darin ist festgeschrieben, dass sich im Vergleich zu 1990 die Emissionen im Verkehr bis 2030 um 55 % verringern müssen (Bundesregierung, 2019). Während vermehrt konkretere Maßnahmen in Bezug auf alternative Kraftstoffe bei Personenkraftwagen Anwendung finden, bleibt die Logistik- und Transportbranche weiterhin verschont.

Im Zuge der aktuellen Klimaschutzdiskussionen sowie -initiativen wird das Bewusstsein für nachhaltige Kraftstoffe weiter zunehmen. Neben der globalen Erwärmung sind jedoch auch die Luftverschmutzung sowie der Verkehrslärm in den Städten ausschlaggebend für den anstehenden Wandel (BVL, 2017). Das Wissen über die Umweltverschmutzung von fossilen Kraftstoffen existiert bereits lange, jedoch war der Druck zur Veränderung bisher nicht ausreichend vorhanden. Die Initiative „Fridays for Future“ hat es geschafft, bei vielen Bürger\*innen der Bundesrepublik Deutschland den Wunsch nach Nachhaltigkeit zu stärken. Fossile Brennstoffe werden zum einen aus endlichen Rohstoffen gewonnen, was langfristig zu Ressourcenknappheit führen wird. Zum anderen haben diese Brennstoffe einige negative Umwelteffekte, sodass die Kritik weiterhin zunehmen wird. Die öffentliche Akzeptanz hinsichtlich fossiler Kraftstoffe von Personenkraftwagen (Pkw) lässt langsam nach, sodass an dieser Stelle bereits zahlreiche Alternativen getestet und genutzt werden. Die Elektromobilität ist bei Pkw der Vorreiter. Eine valide Alternative für den Diesel im Bereich Logistik zu Straße existiert, soweit die Forschung es zurzeit beurteilen kann, noch nicht – zumindest keine, die auf dem aktuellen Stand technisch sowie wirtschaftlich sinnvoll erscheint (UBA, 2020d).

Die Bedeutung des Straßengüterverkehrs wird weiterhin zunehmen. Gründe dafür sind beispielsweise die Globalisierung und der rasant wachsende Online-Handel. Die Logistikbranche hat im Jahr 2019 in Deutschland rund 4,7 Mrd. Tonnen Güter und Waren

abgewickelt (Statista, 2020). Insgesamt wurde im Jahr 2013 mit den 2,89 Mio. Beschäftigten des Logistiksektors ein Marktvolumen von 230 Mrd. Euro erwirtschaftet (Bernecker et al., 2016). Anteilig fallen davon 44 % des Marktvolumens auf die Transportlogistik, welche somit den größten Anteil am Gesamtumsatz ausmacht. Mit einem Anteil von 26 % ist sie darüber hinaus der zweitgrößte Arbeitgeber. Die enorme Dynamik des gesamten Logistiksektors wird auch daran sichtbar, dass sich das Gesamtmarktvolumen des Logistiksektors allein zwischen 1995 und 2013 um ca. 87 % erhöhte (Bernecker et al., 2016).

Die Relevanz des Straßengüterverkehrs wird auch in Zukunft nicht abnehmen, wodurch der hohe Anteil an Dieselfahrzeugen in Zukunft weiterhin für viel Kritik sorgen wird. Die Forschung hinsichtlich annehmbarer Alternativen ist daher unerlässlich. Die Frage, welche der aktuellen Technologien sich letztlich durchsetzen wird, hat einen hohen Stellenwert in Führungsetagen. Dies ist jedoch maßgeblich von der Politik abhängig. Die Wirtschaftlichkeit einer Innovation steht in starker Abhängigkeit von der staatlichen Förderung. Die eigentliche Frage ist nun, welche Kraftstoffe von der deutschen Politik als besonders vielversprechend angesehen werden und welche nicht. Dazu müssen die in Frage kommenden Technologien hinsichtlich verschiedener ökologischer und ökonomischer Parameter untersucht werden, insbesondere ihre Erzeugung, Verarbeitung sowie die Lieferkette. Darüber hinaus muss das Marktpotential der Technologien für die kommenden Jahre und Jahrzehnte prognostiziert werden.

Dies wird einen angemessenen Überblick über die Marktanteile von alternativen Kraftstoffen ergeben, sofern keine gravierenden politischen Entscheidungen Einfluss nehmen. Was passiert jedoch, wenn der Staat zu ordnungspolitischen oder fiskalpolitischen Mitteln greift und somit Technologien fördert bzw. benachteiligt? Welche Effekte werden die politischen Eingriffe auf Steuereinnahmen oder die Beschäftigung im Logistiksektor sowie andere Sektoren haben?

In der folgenden Arbeit sollen genau diese Fragestellungen untersucht werden. Dabei sollen sowohl der Reifegrad der Technologien als auch die Auswirkungen und Effekte staatlichen Handelns transparent aufgezeigt werden.

Es existieren zahlreiche Studien für Deutschland, die sich mit der Entwicklung des Logistiksektors beschäftigen. Deren Hauptaugenmerk ist jedoch das ansteigende Volumen der Transportleistungen, also der Anstieg der Transportmenge sowie des Anstiegs der

Fahrtstrecke. Wenige Studien beschäftigen sich jedoch mit dem Antriebstrang von Transportfahrzeugen. Der Antriebstrang im Straßengüterverkehr liegt zurzeit bei durchschnittlich 95 % Dieselkraftstoff (Adolf et al., 2016).

Während es einige Studien zur Reife alternativer Antriebstechnologien im Bereich der Logistik gibt, wurde bisher nicht untersucht, welche Effekte die verschiedenen politischen Instrumente auf die zukünftigen Marktanteile der Technologien haben können.

In ihrer Total-Cost-of-Ownership (TCO)-Studie zu Flüssigerdgas (*liquefied natural gas* – LNG) haben der ADAC und der TÜV Rheinland eine Übersicht zu aktuellen Studien im Bereich der Antriebstechnologien für Lastkraftwagen erstellt. Es wurden im Betrachtungszeitraum 2017 bis 2020 über 20 Marktstudien über das Thema „alternative Antriebe im Schwerlastverkehr“ identifiziert (Behring, 2020). In der Übersicht wurde darauf hingewiesen, dass die meisten betrachteten Studien sich schon heute mit Erdgas und Wasserstoff als alternativen Kraftstoffarten beschäftigen, jedoch Batterie und Oberleitung in weniger Studien untersucht wurden. Die meisten Studien sehen Erdgas, Wasserstoff und batterieelektrische Antriebe zukünftig als wettbewerbsfähige Alternativen zu Diesel. Laut TÜV und ADAC wirken sich gesetzliche Rahmenbedingungen positiv auf die Verbreitung von alternativen Antrieben aus. Allerdings wird die Verbreitung durch die fehlende Infrastruktur bisher noch eingeschränkt. Es wurde darüber hinaus festgestellt, dass es mehr als elf verschiedene TCO-Parameter, wie beispielsweise Fahrleistung, Lebensdauer, Verbrauch, Mautkosten oder Ähnliches, gibt, die man zur Bewertung der TCO heranziehen kann. Jedoch gab es keine Studie, die alle möglichen Parameter abdeckt (Behring, 2020). Es existiert somit bisher keine Komplettdarstellung der Kosten.

In der Shell-Nutzfahrzeugstudie werden bereits eine Prognose der Marktanteile bis 2040 sowie eine Bewertung der Marktreife aktueller Alternativen zum Diesel abgegeben (Adolf et al., 2016). Auf die wichtigsten Erkenntnisse der Studie wird in dieser Arbeit aufgebaut. Diese Erkenntnisse werden in der Shell-Studie wie folgt beschrieben: 1) Die Güterverkehrsleistung ist in den vergangenen 25 Jahren um 60 % gewachsen und wird bis 2040 nochmals um 50 % zulegen. Die Straße ist und bleibt der Hauptverkehrsträger für den Gütertransport. 2) Die Bestandsentwicklung wird von leichten Nutzfahrzeugen bestimmt. Die Schadstoffklassen (Euro-Normen) variieren deutlich nach Fahrzeugsegmenten. 3) Der Dieselantrieb als Standard für Nutzfahrzeuge besitzt weitere Effizienzpotentiale. Für Fernverkehrs-Lkw könnten Gasantriebe auf Basis von LNG eine Alternative darstellen. Potentiale für Elektromobilität weisen leichte Nutzfahrzeuge auf. 4) Bis 2040 wird der Nutzfahrzeugbestand in Deutschland auf 3,5 Mio. Fahrzeuge zulegen, die Lkw-

Fahrleistungen steigen um 39 %. Aufgrund von Effizienzfortschritten sinkt der Energiebedarf aller Nutzfahrzeuge von heute bis 2040 um bis zu 13 %. Die gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen gehen um bis zu 20 % zurück. Die 1990er CO<sub>2</sub>-Emissionswerte werden 2040 noch deutlich überschritten (Adolf et al., 2016).

Da es bisher keine Studien zur Wirkung und zum Vergleich von politischen Instrumenten zur Förderung von alternativen Kraftstoffen in der Transportindustrie gibt, wurde diese Arbeit mit dem Zweck verfasst, diese Lücke zu schließen. Ziel der Ausarbeitung ist es, die Emissionsminderungswirkung der alternativen Kraftstoffe gegenüber dem bisher eingesetzten Kraftstoffmix zu beurteilen und eine Aufklärung über die aktuelle Marktreife der Kraftstoffe sowie deren Potentiale zu schaffen. Dies ist Basis für die Untersuchung der politischen Instrumente. Ein staatlicher Eingriff in die Marktwirtschaft sollte wohlüberlegt sein. Die Annahme, dass der Markt sich von allein regeln wird, ist obsolet, sofern die Angst besteht, dass der Staat eingreifen könnte. Es handelt sich hierbei um Marktversagen aufgrund von unvollkommenen Informationen, da Unsicherheit besteht, ob der Staat eingreift oder nicht (Stiglitz, 2009). Diese Unsicherheit wird jegliche Innovationen so lange hemmen, bis ein klares Rahmenwerk und Regulierungen geschaffen wurden. In dieser Arbeit können nicht alle möglichen staatlichen Eingriffe untersucht werden. Es wurde daher nach einer umfassenden Recherche potentieller Instrumente und Maßnahmen eine Auswahl getroffen. Die Auswahl wurde so vorgenommen, dass nur solche Instrumente untersucht werden, die bisher in Deutschland noch keine Anwendung gefunden haben. Es werden somit keine Verschärfungen oder Abwandlungen der aktuellen politischen Instrumente im Einsatz untersucht.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in mehrere, aufeinander aufbauende Bausteine. In Kapitel 2 wird der Markt, der untersucht werden soll, segmentiert und näher betrachtet. In dieser Arbeit wird lediglich der Straßengüterverkehr untersucht. Es folgt eine Beschreibung des Status quo des Straßengüterverkehrs, inkl. der Entwicklung des Lkw-Gesamtverkehrs, des Bestandes, der Neuzulassungen, der Schadstoffklassen sowie des Kraftstoffmix. Abgeschlossen wird der theoretische Rahmen mit einer Recherche zu prognostizierten Entwicklungspfaden der alternativen Antriebe für die nächsten Jahrzehnte in aktuellen Studien.

Daran anschließend erfolgt in Kapitel 3 die ökologische Analyse der Technologien. Diese umfasst eine Untersuchung der Erzeugung, Verarbeitung sowie der Lieferkette der einzelnen Technologien, um die Nachhaltigkeit bewerten zu können. Die Herstellung und Herkunft eines Rohstoffes ist außerordentlich wichtig, sodass es vorkommen kann, dass derselbe Kraftstoff unterschiedliche Treibhausgasbilanzen aufweist. Es werden zudem ökologische Unterschiede bei den Herstellungsverfahren sowie dem Rohstofftransport beleuchtet.

Die Kosten-Nutzen-Analyse wird als Methode gewählt, um politische Instrumente hinsichtlich ihrer Wirkung zur Förderung der alternativen Kraftstoffe zu bewerten. Es wird in einem einleitenden Kapitel ein theoretischer Rahmen für diese Methode aufgezeigt (Kapitel 4).

Die Auswahl der politischen Instrumente, die innerhalb dieser Arbeit untersucht werden sollen, wird auf Basis einer Recherche zu bereits existierenden Instrumenten getroffen. Es werden somit in Kapitel 5 sowohl bereits in Deutschland angewendete Instrumente kurz skizziert als auch potentielle Instrumente, die jedoch noch nicht bzw. nicht in der untersuchten Ausgestaltung, eingesetzt werden, aufgezeigt. Es folgen die Auswahl der Instrumente sowie eine kurze Begründung der Auswahl.

Der erste Teil der Analyse (Kapitel 6) untersucht die direkten Effekte der einzelnen Maßnahmen hinsichtlich ihrer Kosten-Nutzen-Wirkung auf sechs identifizierte Akteure. In umfangreichen Kalkulationen werden in diesem Kapitel die mögliche THG-Einsparung sowie die Kosten pro Akteur dargestellt. Darauf folgt eine Sensitivitätsanalyse nach Vorgaben des Umweltbundesamtes, um die Robustheit der Kosten-Nutzen-Analyse zu untersuchen.

Neben direkten Kosten-Nutzen-Wirkungen entstehen auch indirekte Effekte auf die Volkswirtschaft, die auf eine Umsetzung der Maßnahmen zurückzuführen sind. Im zweiten Teil der Analyse (Kapitel 7) werden mit Hilfe einer Input-Output-Analyse die möglichen Beschäftigungs- und Wertschöpfungseffekte, resultierend aus den umgesetzten politischen Instrumenten, prognostiziert.

Daran anschließend erfolgt in Kapitel 8 eine Priorisierung der Instrumente hinsichtlich der untersuchten Dimensionen, Treibhausgaseinsparung, Kosten, Output-Wirkung, Beschäftigung und BIP-Effekte. Abschließend werden die Resultate zusammengefasst und es wird ein Ausblick gegeben (Kapitel 9).

## **2. Der deutsche Straßengüterverkehr**

Dieses Kapitel beschäftigt sich intensiv mit dem Untersuchungsrahmen. Während die Logistik viele verschiedene Bereiche umfasst, wird das Untersuchungsobjekt genau definiert sowie zu anderen Bereichen abgegrenzt. Es erfolgt somit zunächst eine Marktsegmentierung des Straßengüterverkehrs (Kapitel 2.1). Daran schließt sich eine Beschreibung der Ausgangslage des Straßengüterverkehrs an (Kapitel 2.2), um die Folgen der politischen Maßnahmen genaustens evaluieren zu können. Zuletzt wird in Kapitel 2.3 bereits ein Ausblick auf bestehende Entwicklungsprognosen bezüglich des deutschen Straßengüterverkehrs gegeben. Auch diese werden in der Analyse berücksichtigt.

### ***2.1 Marktsegmentierung des Straßengüterverkehrs***

Bei der Logistik handelt es sich laut Definition um die bedarfsgerechte Bereitstellung von Gütern an festgelegten Orten. An dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, dass es sich nicht um eine kartellrechtliche Marktabgrenzung handelt, sondern lediglich um eine Segmentierung. Diese Leistung kann in vier Grundfunktionen unterteilt werden: Transport, Umschlag, Lagerung und Kommissionierung. Ein Teilbereich davon ist die Transportlogistik, also der physische Transport von Gütern einschließlich des Sammelns, Verteilens und der mit dem Transport verbundenen Umschlagprozesse (Adolf et al., 2016). Die Transportlogistik umfasst die verschiedenen Verkehrsträger Schiene, Straße, Luftweg und Schifffahrtsweg. Innerhalb dieser Arbeit wird lediglich der Straßengüterverkehr betrachtet.

In der Logistik herrscht sowohl in Deutschland als auch europaweit ein starker Wettbewerb (Verkehrsrundschau, 2004). Mittel- und langfristig steht der Logistiksektor genau wie andere Wirtschaftssektoren in der Pflicht, zu einer Minderung der klimarelevanten Emissionen unter der Perspektive des Gesamtzieles einer 55%igen CO<sub>2</sub>-Reduktion bis 2030 (bezogen auf 1990) in Deutschland beizutragen (UBA, 2021f).

Zurzeit existiert noch keine standardisierte Segmentierung des deutschen Logistikmarktes. Prinzipiell stehen folgende Segmentierungskriterien zur Identifikation von Teilmärkten zur Verfügung:

Tabelle 1: Segmentierungskriterien zur Identifikation von Teilmärkten

<b>Segmentierungskriterium</b>	<b>Beschreibung</b>
Art des Logistikobjektes	Stückgüter, Schüttgüter, Flüssiggüter, gasförmige Güter, temperaturgeführte Güter, Schwergüter
Größe des Logistikobjektes	Gewicht/Volumen: Briefe (bis 2kg), Pakete (2-30kg), Einzelpaletten/Teilladung (30kg-3t), Komplettladung (3-25t), Schwergut (ab 25t); Containerisierbarkeit
Geografische Räume von Transportprozessen	Nah-, Regional- und Fernverkehr
Transportmittel	Straßen-, Schienen-, Luft-, Binnenschiffverkehrsverkehr, Seeverkehr, kombinierter Verkehr: Schiene-Straße (begleitet, unbegleitet), Schiene-Binnenschiffahrt, Straße-Binnenschiffahrt, Seeschiff-Schiene, Seeschiff-Straße
Leistungsbreite und -tiefe	Transport (standardisiert, individuell; zeitkritisch, zeitunkritisch); Organisation von Transporten; Lagerhausbetrieb; Umschlag-/Terminalbetrieb; Bestandsmanagement; weitere logistische Leistungen

Quelle: (Ahrens et al., 2007)

Neben der bereits erwähnten Segmentierung nach dem Transportmittel, resultierend in der reinen Betrachtung des Straßengüterverkehrs, wird in der vorliegenden Arbeit auch häufig nach dem geografischen Raum des Transportprozesses unterschieden. Manche politischen Instrumente legen in ihrer Ausgestaltung unter Umständen ein größeres Augenmerk auf den Nah-, Regional- oder Fernverkehr, während andere Instrumente Auswirkungen auf alle drei Bereiche haben.

Zur Beförderung von Gütern auf der Straße werden in der Regel zwei Arten von Kraftfahrzeugen eingesetzt: Lastkraftwagen und Zugmaschinen. Lkw transportieren die Ladung auf der eigenen Ladefläche, zudem können sie Lasten auf einem Anhänger ziehen (Gliederzüge). Zugmaschinen sind dagegen nicht selbst zum Transport von Gütern bestimmt. Da alternative Kraftstoffe zurzeit noch einen sehr geringen Stellenwert bei Zugmaschinen haben, werden diese in der aktuellen Studie nicht weiter betrachtet. Im Jahr

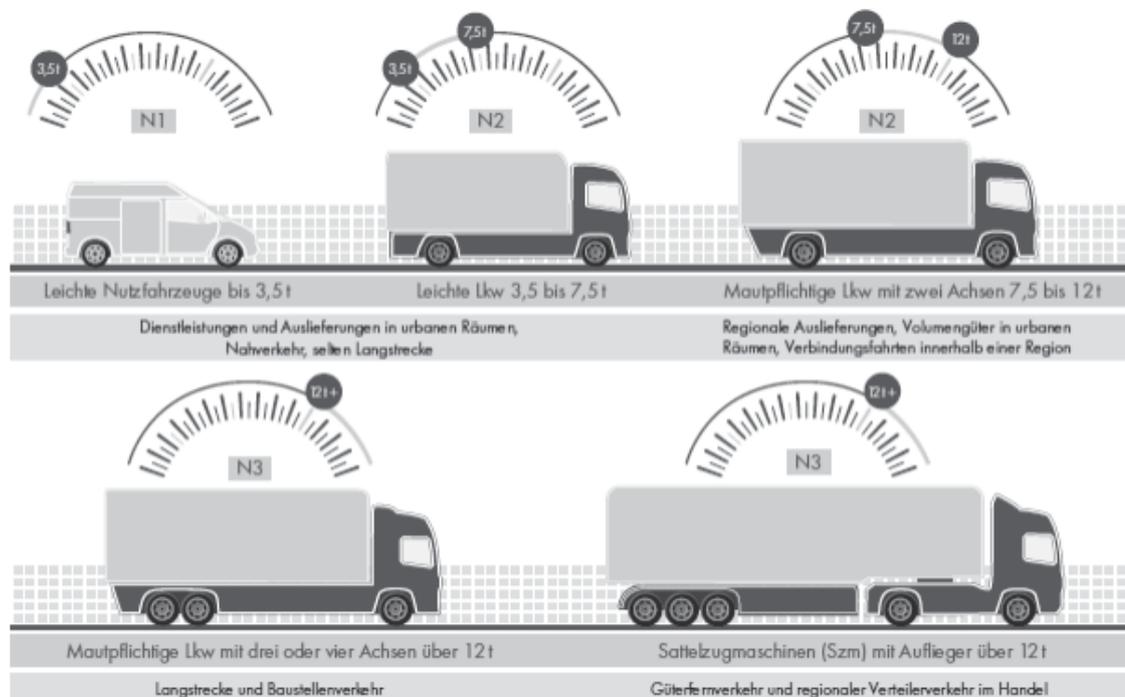
2018 teilte sich der Straßengüterverkehr in 58 % Lastkraftwagen und 42 % Zugmaschinen auf (KBA, 2010).

Die Unterscheidung zwischen Lastkraftwagen und Zugmaschinen erfolgt nach der Definition des Kraftfahrtbundesamtes. Ein Lastkraftwagen, gemäß Richtlinie 2007/46/EG i. V. m. 97/27/EG, ist ein Nutzfahrzeug, das nach seiner Bauart und Einrichtung zum Transport von Gütern bestimmt ist. Lkw gliedern sich nach der zulässigen Gesamtmasse (bis 3,5 t = N1, mehr als 3,5 t bis 12 t = N2 und mehr als 12 t = N3) und dem jeweiligen Aufbauart sowie weiteren Fahrzeugen mit besonderer Zweckbestimmung.

Zugmaschinen definieren sich demgegenüber gemäß Richtlinie 2007/46/EG i. V. m. 97/27/EG (N) oder gemäß Richtlinie 2003/37/EG (T) als Nutzfahrzeuge, die ausschließlich oder überwiegend zum Mitführen von Anhängern bestimmt sind. Sie unterscheiden sich in Sattelzugmaschinen (N1–N3, Aufbauart „BC“), Straßenzugmaschinen (N1–N3, Aufbauart „BD“) und land- oder forstwirtschaftliche Zugmaschinen auf Rädern (T) (KBA, 2010).

Die Anwendungen der verschiedenen Größenklassen von Lastkraftwagen werden in der folgenden Abbildung verdeutlicht.

Abbildung 1: Einsatz der verschiedenen Lkw-Fahrzeugklassen und -typen



Quelle: (Adolf et al., 2016)

Anhand der Grafik ist zu erkennen, dass die leichten Nutzfahrzeuge bis 7,5 t hauptsächlich im Nahverkehr eingesetzt werden. Die Lastkraftwagen von 7,5 bis 12 t werden meist im Regionalverkehr eingesetzt. Die großen Lastkraftwagen mit mehr als 12 t werden auf der Langstrecke eingesetzt (Adolf et al., 2016).

## **2.2 *Ausgangslage des deutschen Straßengüterverkehrs***

Der Straßengüterverkehr unterliegt einem ständigen Wandel, sodass auch hier die Digitalisierung einen hohen Stellenwert einnimmt. Besonderes Potential haben eine digitale Bündelung und Disposition der Sendungen für eine effizientere Transportabwicklung. Auch mehr Kooperationen und Netzwerke würden die Leistung der gesamten Branche steigern. Darüber hinaus bietet die vollumfängliche Nutzung der Möglichkeiten und Potentiale einer grünen Logistik weitere Chancen auf eine nachhaltige Leistungssteigerung (Bernecker et al., 2016).

Die sechs aktuell größten Trends, die die Logistik bestimmen, werden wie folgt zusammengefasst: 1) Globalisierung, 2) Containerisierung und Sendungsstruktur, 3) Konsumverhalten und E-Commerce, 4) IuK-Innovationen, 5) Outsourcing, 6) Grüne Logistik (VDE, 2020).

Die Globalisierung sorgt für eine verstärkte Arbeitsteilung. Es existieren standortspezifische Vorteile, wie unterschiedliche Arbeitskosten, Sozial- und Umweltstandards, Rohstoffverfügbarkeit, Qualifizierung und Absatzmarktnähe, aufgrund deren Produktions- oder Lagerstätten ins Ausland verlagert werden. Die Unternehmen konkurrieren nicht mehr nur mit lokalen Akteuren, sondern es existiert ein weltweiter Wettbewerb um Aufträge und Marktanteile. Dies führt wiederum zu einem Ausbau der Logistiknetzwerke sowie einem zunehmenden unternehmerischen Risiko (zunehmende Komplexität, weitere Transportdistanzen, Naturkatastrophen, Terroranschläge, Streiks etc.) (Adolf et al., 2016).

Auch die Sendungsstruktur verändert sich dahingehend, dass ein starker Trend weg von Massengütern hin zum Stückgut besteht. Die Güter werden leichter und die Sendungsgrößen kleiner. Die Möglichkeiten der Just-in-Time- und Just-in-Sequence-Lieferungen erlauben es, Lagerbestände und Lagerkapazitäten zu reduzieren. Darüber hinaus besteht ein Trend zur Containerisierung, also der vermehrten Verwendung von Containern zur Reduktion der Transportkosten. Somit ist eine leichtere Integration der Verkehrsträger Wasser, Schiene und Straße möglich (VDE, 2020).

Das Konsumverhalten ändert sich dahingehend, dass die bisherige Standardlieferkette vom Produzenten über den Großhandel zum Einzelhandel und somit zum Kunden durch den Internethändler abgekürzt wird, sodass ein Direktkauf der produzierten Ware über das Internet ermöglicht wird und Groß- und/oder Einzelhandel umgangen werden können (Bernecker et al., 2016).

Auch Informations- und Kommunikations-Innovationen wirken sich als Trend auf die Logistik aus. Physische Prozesse im Lager und bei der Lagerhaltung, begleitend zu Transportvorgängen, bei der Transportorganisation und beim Auftragsmanagement sowie insgesamt zur Realisierung der Informationsflüsse entlang der Lieferkette werden automatisiert und digitalisiert, beispielsweise die (Teil-)Automatisierung der Lager- und Lagerhaltungsprozesse, die Einführung von Managementsystemen für Lagerbestände und Fahrzeuge/Flotten, die automatische Datenerfassung und -weitergabe durch Fahrzeuge und die Güter selbst sowie das Informations- und Datenmanagement zwischen Akteuren und Aufträgen, u. a. über Internetplattformen (VDE, 2020).

Outsourcing ist ebenfalls ein Trend in der Logistik. So folgt die Konzentration auf Kernkompetenzen zum Beispiel infolge von Aufgabenfeldern für spezialisierte Logistikdienstleister sowie die eindeutige Entwicklung zur Fremdvergabe von Transportdienstleistungen (Gartner, 2019).

Grüne Logistik ist ein Indikator für Nachhaltigkeit und Umweltschutz. Die Pflicht zur Einsparung von THG- bzw. CO<sub>2</sub>-Emissionen bewirkt den Trend, dass Logistikprozesse möglichst umweltfreundlich und ressourcenschonend gestaltet werden müssen (VDE, 2020). In dieser Arbeit wird aufgrund des Fokus auf Treibhausgasemissionen vor allem der Trend Grüne Logistik betrachtet, jedoch hat auch der anhaltende Globalisierungstrend große Auswirkungen auf manche politischen Instrumente, da Deutschland mit seiner zentralen Lage in Europa wesentlichen Einfluss auf den Durchgangsverkehr nehmen kann.

Das geläufigste Kriterium für die Unterscheidung von Lkw ist die zulässige Gesamtmasse/das zulässige Gesamtgewicht. Weitere fahrzeugstatistische Klassifizierungen sind zum Beispiel das Alter, der Halter<sup>1</sup> der Fahrzeuge, ihre Nutzlast und die Motorisierung oder Kraftstoffart (Friedrich & Kleiner, 2017).

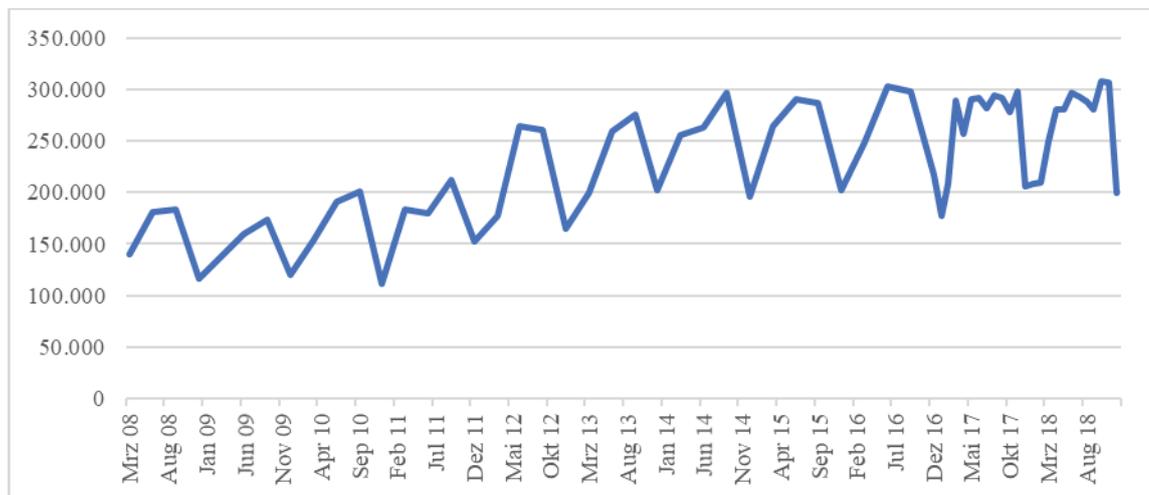
---

<sup>1</sup> In dieser Arbeit wird der (Fahrzeug-)Halter im generischen Maskulinum verwendet, da dies dem Kontext zufolge für Unternehmen und nicht männliche Personen steht.

### 2.2.1 Gesamtverkehr

Betrachtet man den gesamten Straßengüterverkehr, so gibt es einige wichtige Kennzahlen, die im Laufe der Arbeit häufiger betrachtet und in die Berechnungen einbezogen werden, beispielsweise das Güterverkehrsaufkommen. Dieses bezieht sich auf die Menge der transportierten Güter innerhalb eines abgegrenzten geografischen Bereiches, in diesem Fall der geografischen Grenzen von Deutschland. Die Kennzahl wird in Mio. Tonnen angegeben (KBA, 2019c).

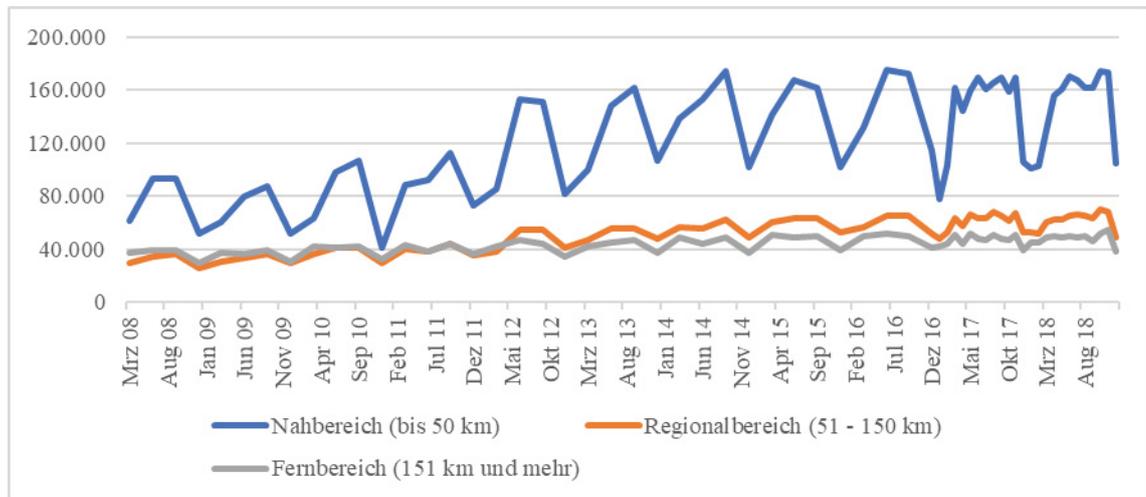
Abbildung 2: Transportmenge deutscher Lastkraftfahrzeuge von 2008 bis 2018 (in Tsd. t)



Quelle: (KBA, 2019c)

Die Abbildung 2 zeigt die Transportmenge deutscher Lastkraftfahrzeuge von 2008 bis 2018. Für die Jahre 2008 bis 2016 lagen lediglich Zahlen für März, Juni, September und Dezember vor, wohingegen für 2017 und 2018 monatliche Zahlen vorlagen. Es ist zu erkennen, dass jeweils ein Hoch im Sommer und ein Tief im Winter zu verzeichnen ist, sodass starke Schwankungen zustande kommen. Anhand der monatlichen Daten von 2017 und 2018 ist zu erkennen, dass diese niedrigeren Werte lediglich in 2 bis 3 Monaten vorkommen und die Werte ansonsten viel geringeren Schwankungen unterliegen. Insgesamt ist jedoch trotz der monatspezifischen Schwankungen zu erkennen, dass die Kurve steigend verläuft. Beispielsweise würde die Kurve für den Monat September eine sehr klare positive Tendenz aufweisen.

Abbildung 3: Transportmenge im deutschen Binnenverkehr von 2008 bis 2018 (in Tsd. t)

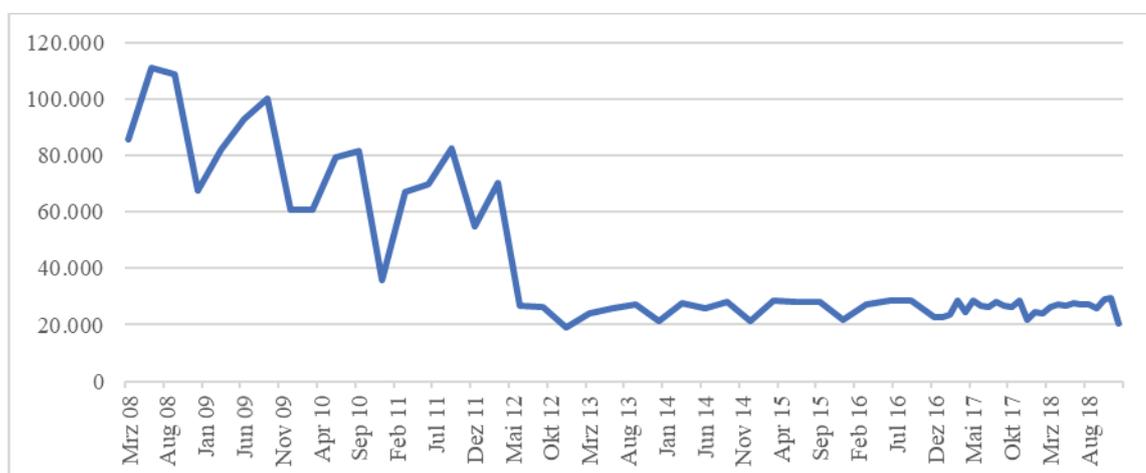


Quelle: (KBA, 2019c)

Schaut man sich den deutschen Binnenverkehr genauer an, so ist zu erkennen, dass die größten monatspezifischen Schwankungen auf den Nahbereich (bis 50 km) zurückzuführen sind. Darüber hinaus ist erkennbar, dass auch der größte Anteil der Transportmenge im deutschen Binnenverkehr auf den Nahbereich zurückzuführen ist, während der Regionalbereich bis zum Jahr 2012 mit dem Fernbereich mengenmäßig ungefähr gleichauf lag. Somit wird der Unterschied tendenziell größer.

Des Weiteren ist die Güterverkehrsleistung eine wichtige Kennzahl. Sie gibt das Güterverkehrsaufkommen in Bezug zur Entfernung, über die die Güter transportiert werden, an und wird in Mrd. Tonnenkilometer (tkm) angegeben.

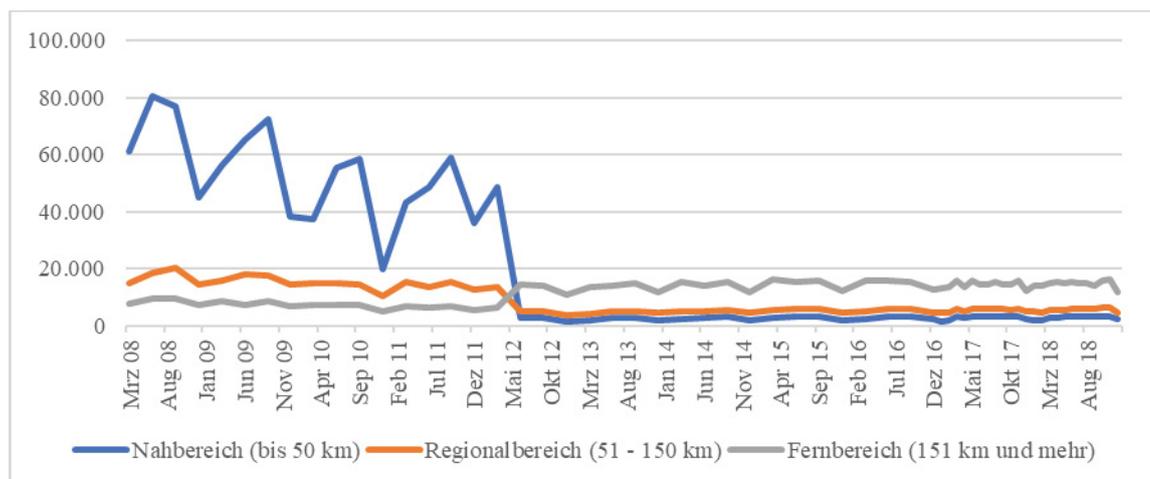
Abbildung 4: Beförderungsleistung deutscher Lastkraftwagen von 2008 bis 2018 (in Mio. tkm)



Quelle: (KBA, 2019c)

Die Beförderungsleistung deutscher Lastkraftfahrzeuge nimmt seit 2008 stark ab. Das bedeutet, dass die Entfernungen im Verhältnis zur Beförderungsmenge abgenommen haben. Da wir bereits festgestellt haben, dass die Transportmenge im selben Zeitraum angestiegen ist, wurden die Güter demnach über kürzere Strecken transportiert. Dies passt nicht zum Trend der Globalisierung, dem gemäß die Güter immer weitere Strecken zurücklegen müssen. Hierbei wurde allerdings die Transportleistung ausländischer Lkw in Deutschland nicht berücksichtigt, sodass auch der Trend zum Outsourcing an ausländische Unternehmen nicht einbezogen wird. In der folgenden Analyse wird von einer konstanten Verteilung von deutschen und ausländischen Fahrzeugen im deutschen Straßengüterverkehr ausgegangen. Dabei wird angenommen, dass sich die Trends „Outsourcing“ und „steigende Transportmenge“ gegenseitig aufheben. Die sinkende Beförderungsleistung hat dabei in der Analyse keine nennenswerte Relevanz.

Abbildung 5: Beförderungsleistung im deutschen Binnenverkehr von 2008 bis 2018 (in Mio. tkm)



Quelle: (KBA, 2019c)

Betrachtet man den Binnenverkehr im Detail, so ist klar zu erkennen, dass zwar die Entfernungen im Nahbereich und im Regionalbereich seit 2012 stark gesunken sind, allerdings die Entfernungen im Fernbereich konstant blieben oder stiegen, sodass an dieser Stelle die Beförderungsleistung gewachsen ist.

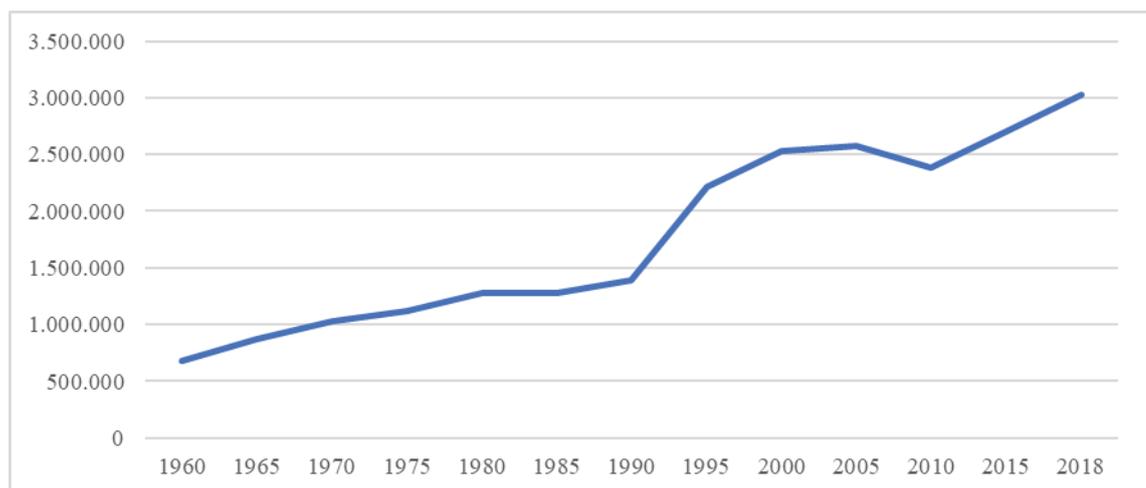
Darüber hinaus ist ein weiterer Kennwert die Fahrleistung. Diese misst die mit einem Güterfahrzeug erbrachte Fahrleistung. Sie umfasst alle Fahrten inkl. Ladungs- und Leerfahrten und die dabei zurückgelegte Entfernung und wird i. d. R. in Mrd. Fahrzeugkilometer pro Jahr angegeben. Die Fahrleistung ist notwendig, um die Nutzungsintensität von

Verkehrswegen zu ermitteln. Sie ergibt zusammen mit spezifischen Kraftstoffverbräuchen die Kraftstoffnachfrage und alle Emissionen, die dem Straßengüterverkehr zugeordnet sind (KBA, 2020b).

### 2.2.2 Bestand an Lastkraftwagen

Der Lkw-Bestand steigt seit 1960 fast konstant an. Lediglich in den Jahren 1990 bis 2009 ist ein Abweichen vom stetigen Wachstum zu erkennen (siehe Abb. 6). Aufgrund der Deutschen Einheit, der EU-Osterweiterung sowie der Liberalisierung des EU-Binnenmarktes für Transportdienstleistungen verlief der Anstieg der Kurve zunächst wesentlich stärker als zuvor. Die darauf begründete steigende Transportnachfrage führte zu einem starken Wachstum des inländischen Fahrzeugbestands. Daraufhin ist das Wachstum ab 2002 eher schwächer, allerdings immer noch positiv. Danach normalisierte sich das Wachstum wieder und glich dem Wachstum vor der Wende. Im Jahr 2006 fand eine Statistikumstellung statt, sodass ab 2006 alle vorübergehend stillgelegten Fahrzeuge von der Statistik nicht mehr erfasst werden. Dies führte zu einem um etwa 12 % niedrigeren Fahrzeugbestand (KBA, 2010). Grund für das negative Wachstum in den Jahren 2007 bis 2009 war die globale Finanzkrise (Groth, 2009).

Abbildung 6: Bestand deutscher Lastkraftwagen von 1960 bis 2018



Quelle: (KBA, 2019a)

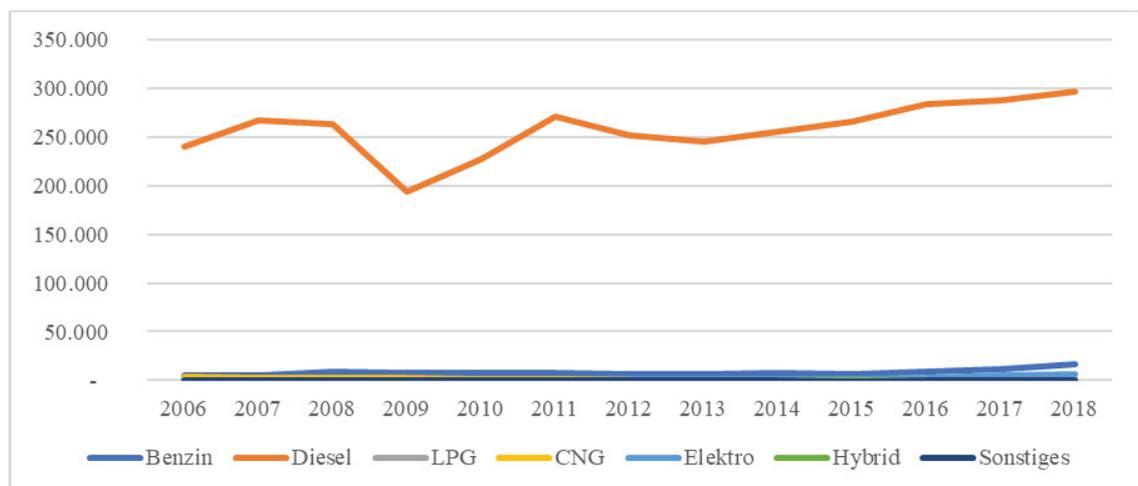
Seit 2009 wächst der Lkw-Bestand kontinuierlich weiter und hat sowohl das Vorkrisen-Niveau als auch die Statistikumstellung übertroffen. Insgesamt spiegeln die Bestandszah-

len den Trend einer höheren Transportnachfrage. Obgleich ein wachsender Teil der steigenden Nachfrage im Straßengüterverkehr durch gebietsfremde Lkw gedeckt wird, legt der inländische Bestand deutlich zu. Zum anderen reflektiert der Trend zu leichten Nutzfahrzeugen eine höhere Transportnachfrage durch abnehmende Fertigungstiefen und immer kleinteiligere Sendungsgrößen. Die Ausdehnung der Mautpflicht auf Fahrzeuge ab 7,5 t dürfte sich dämpfend auf die Lkw-Klasse auswirken (Adolf et al., 2016).

### 2.2.3 Neuzulassungen an Lastkraftwagen

Die Lkw-Neuzulassungen schwanken wesentlich stärker als die Fahrzeugbestände und spiegeln somit die wirtschaftliche Entwicklung sowie die daraus folgende Güterverkehrsnachfrage deutlicher wider. In der Abbildung 7 sind die Rezession sowie der darauffolgende Fahrzeugrückgang bei den Dieselfahrzeugen klar zu erkennen.

Abbildung 7: Neuzulassungen je Kraftstoff von 2006 bis 2018

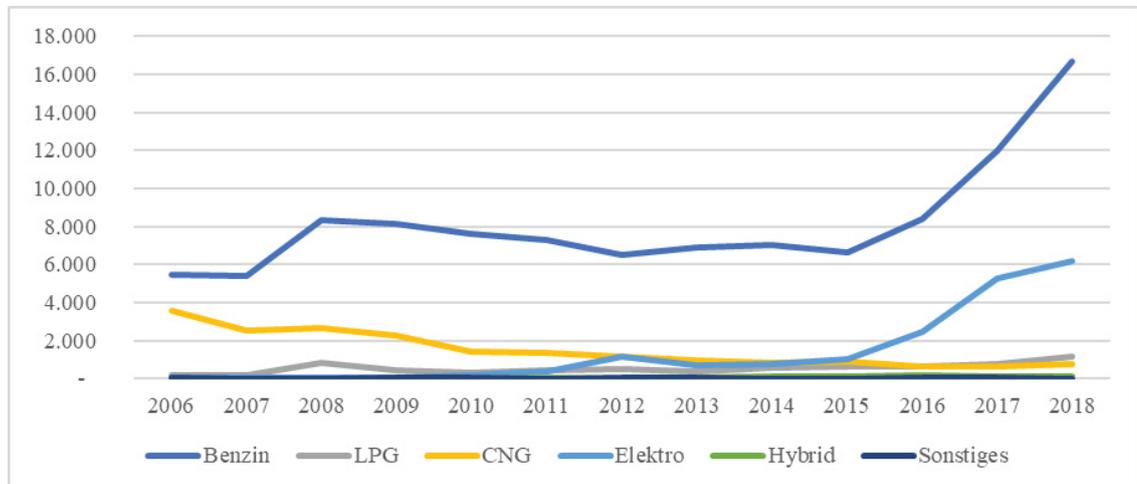


Quelle: (KBA, 2019a)

Diesel ist für jede Größenklasse der Hauptkraftstoff. Da die Anzahl der Diesel-Lkw ca. 95 % des Lkw-Volumens ausmacht, zeigt die Grafik lediglich für Diesel eine interpretierbare Kurve an. Die Kurve zeigt erneut deutlich die Finanzkrise sowie einen zeitweiligen Rückgang der Nachfrage ab dem Jahr 2011. Grund für diese Entwicklung ist laut Experten, dass die bevorstehende Umstellung auf die sehr teuren Euro-VI-Fahrzeuge die Beschaffungsaktivitäten lähmte. Die hohe Unsicherheit und fehlende Planbarkeit hinsichtlich der Mautkosten für Euro-VI-Fahrzeuge habe die Investitionen verzögert (DVZ,

2013). Die folgende Grafik bildet den Verlauf der Neuzulassungen ohne Diesel ab, um die Entwicklung der alternativen Kraftstoffe besser nachvollziehen zu können.

Abbildung 8: Neuzulassungen je Kraftstoff (ohne Diesel) von 2006 bis 2018



Quelle: (KBA, 2019a)

Anhand der Abbildung 8 ist deutlich zu erkennen, dass die Erdgas-Kurve (*compressed natural gas* – CNG) eher einen negativen Verlauf nimmt – ganz im Gegensatz zu Benzin und Elektro, die beide ab 2015 deutlich ansteigen. Hybrid und Autogas (*liquefied petroleum gas* – LPG) weisen keine signifikanten Veränderungen im Betrachtungszeitraum auf.

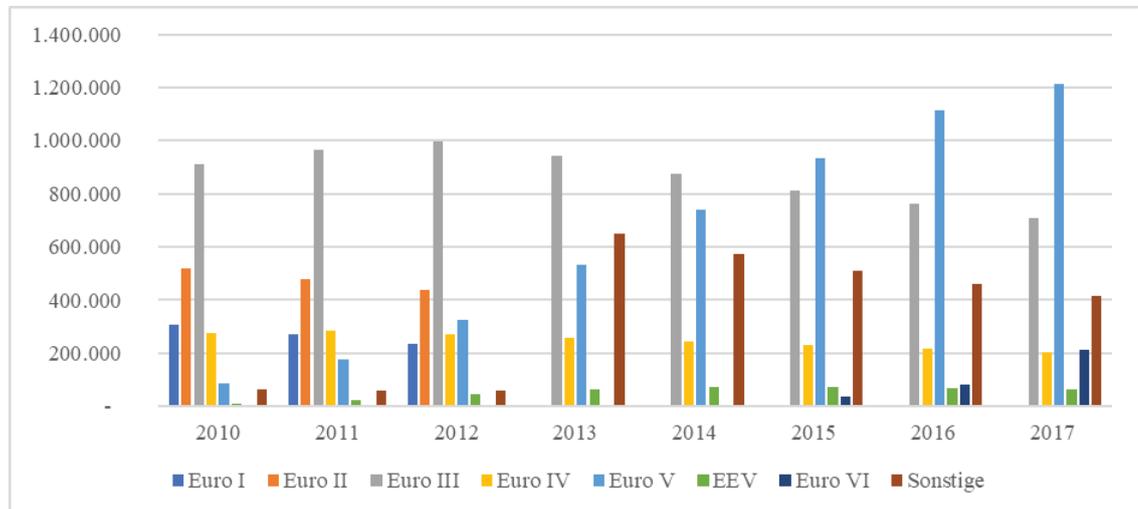
#### 2.2.4 Schadstoffklassen

Euro-Klassen haben gerade für Lastkraftwagen eine hohe ökologische Relevanz, da die Luftschadstoffemissionen im Straßengüterverkehr einen hohen Schaden verursachen. Darüber hinaus haben Plaketten eine erhebliche wirtschaftliche Relevanz, da bei Einfahrten in Umweltzonen, bei der Kraftfahrzeugsteuer sowie insbesondere für die Autobahn-Maut deren Tarife im ökologischen Teil nach Euro-Normen gestaffelt sind (BGL, 2019).

Mit Blick auf den Lkw-Bestand (siehe Abbildung 9) fährt der Großteil des Straßengüterverkehrs seit 2015 mit dem Standard Euro 5. Bei Nahverkehrs-Lkw von 7,5 bis 12 t machen Euro 5 bis Euro 6 nur gut die Hälfte des Fahrzeugbestands aus (52 %). Leichte Nutzfahrzeuge und vor allem kleine Nahverkehrs-Lkw fahren dagegen noch überwiegend mit Standards von Euro 4 und schlechter. Je schwerer das Gesamtgewicht und je höher

die Nutzlast des Fahrzeugs, desto sauberer ist das Fahrzeug hinsichtlich der Schadstoffklassen (Adolf et al., 2016).

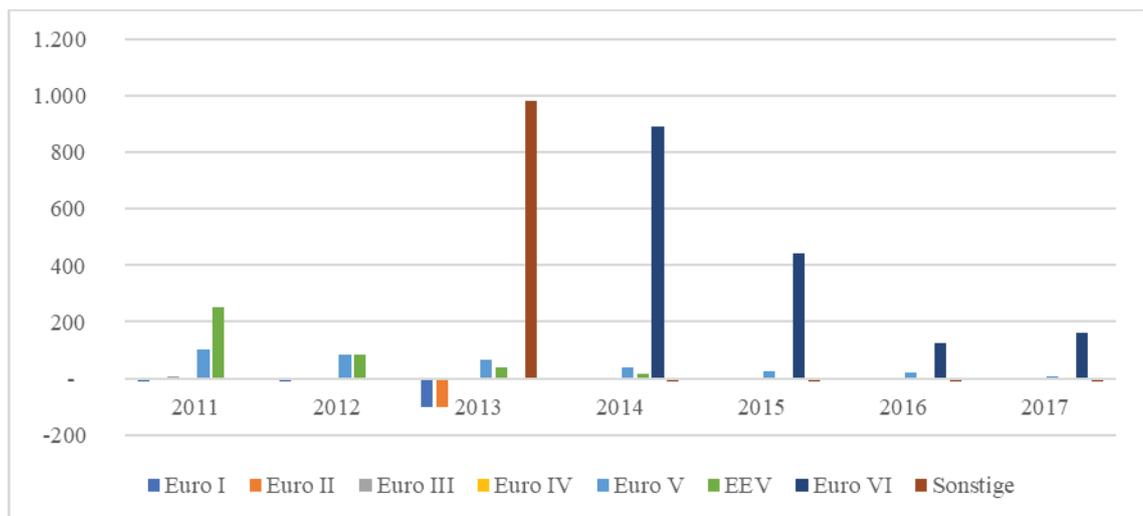
Abbildung 9: Bestand an Lastkraftwagen nach Schadstoffklassen von 2010 bis 2017



Quelle: (KBA, 2019a)

Insgesamt ist gut zu erkennen, dass die Emissionsklassen Euro I und Euro II an Bedeutung verloren und sich innerhalb der Gruppe Sonstige aufgelöst haben. Während Euro III bis 2012 noch Zuwachs genoss, ist auch diese Klasse seitdem stark im Rückgang begriffen. Euro IV schaffte den Durchbruch nicht, sodass auch diese Emissionsklasse seit 2012 zurückgeht. Euro V dagegen steigt seit dem Jahr 2010 rasant an und löst Euro III als häufigste Klasse ab. Seit dem Jahr 2015 ist nun auch die Euro-VI-Klasse hinzugekommen, die in den letzten Jahren kontinuierlich wächst.

Abbildung 10: Bestandsveränderung nach Emissionsklassen von 2010 bis 2017 (in %)



Quelle: (KBA, 2019a)

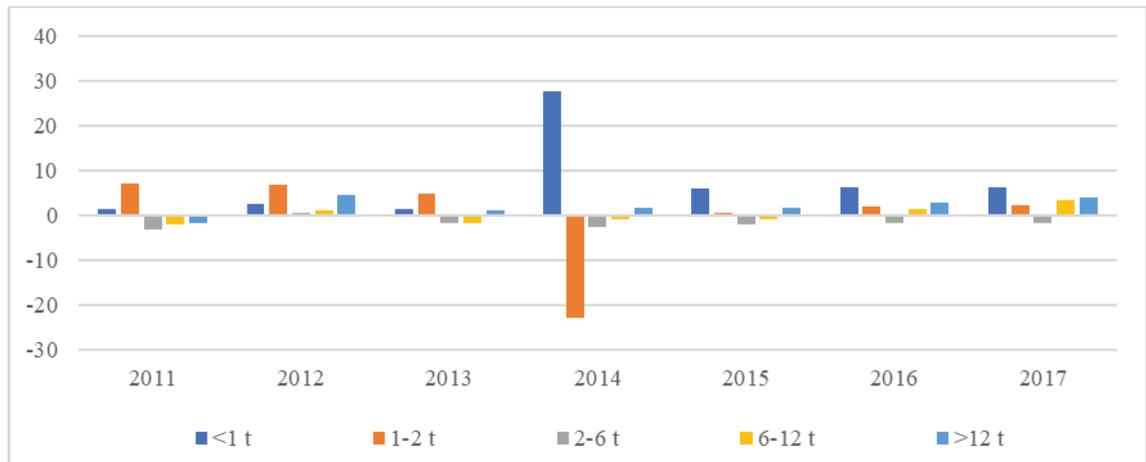
Bei den Neuzulassungen ist insbesondere der rasante Anstieg von Euro VI im Jahr 2014 und den folgenden Jahren zu erkennen (DVZ, 2013). Der hohe Ausschlag der Gruppe Sonstige ist wie oben beschrieben auf ein Zusammenführen der Euro-I- und -II-Gruppe in Sonstige zu begründen (KBA, 2019a). Lkw-Segmente mit geringer Erneuerungsrate erfüllen in der Regel niedrigere Abgasemissionsstandards. Segmente mit hoher Erneuerungsrate – wie Fernverkehrs-Lkw – decken die höchsten Abgasnormen ab. Somit haben kleine Lastkraftwagen meistens schlechtere Emissionsklassen als große Lkw (KBA, 2019b).

### 2.2.5 Kraftstoffmix

Bis heute fährt der überwiegende Anteil der Lastkraftwagen mit Dieselantrieb. Nur etwa 5 % aller Lkw fahren mit alternativen Antrieben. Wichtigster alternativer Kraftstoff ist Benzin. Die Anteile alternativer Antriebe variieren jedoch über die Fahrzeuggrößen. Je größer der Lkw, desto geringer ist der Anteil alternativer Kraftstoffe bei den Antrieben. Alternative Antriebe konzentrieren sich fast ausschließlich auf die Klasse der leichten Nutzfahrzeuge. In der kleinsten Nutzlastklasse der leichten Nutzfahrzeuge <1 t machen alternative Antriebe bereits einen Anteil von 9,1 % aus (KBA, 2019a).

Zunächst betrachten wir die prozentuale Veränderung des Bestandes von Lastkraftwagen in den einzelnen Kraftstoffgruppen. Die Veränderungen treten zum einen durch Neuzulassungen und zum anderen durch Fahrzeugabmeldungen auf.

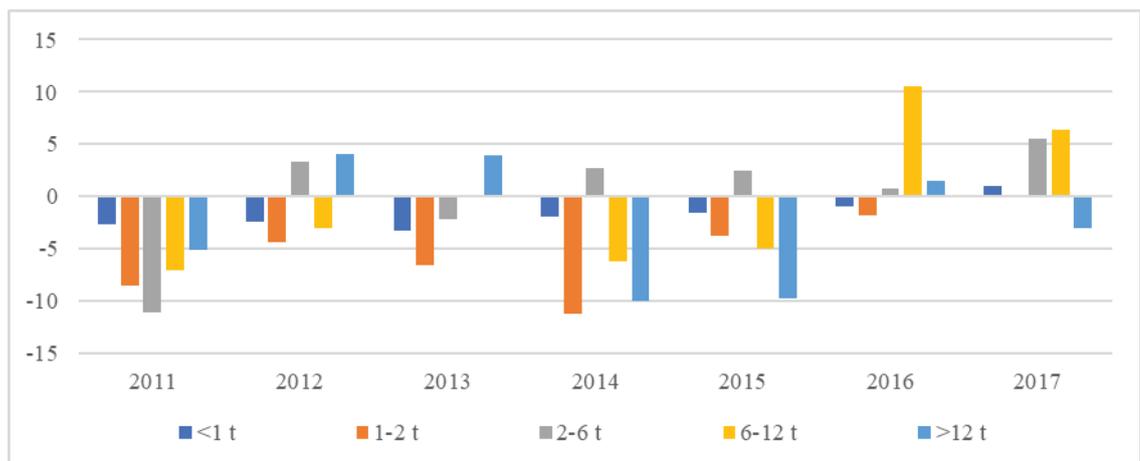
Abbildung 11: Bestandsveränderung von Diesel-Lkw je Größenklasse (in %)



Quelle: (KBA, 2019a)

Besonders im Jahr 2014 wurden besonders viele kleine Diesel-Lkw zugelassen. Im gleichen Jahr sanken die Lastkraftwagen eine Nummer größer um fast denselben Prozentsatz. Generell liegt jedoch die Veränderung der meisten Größenklassen durchweg im positiven Bereich. Lediglich die mittleren Lastkraftwagen mit einer Nutzlast von 2 bis 6 t haben mit Ausnahme des Jahres 2012 eine kontinuierlich negative Bestandsveränderung pro Jahr.

Abbildung 12: Bestandsveränderung von Benzin-Lkw je Größenklasse (in %)

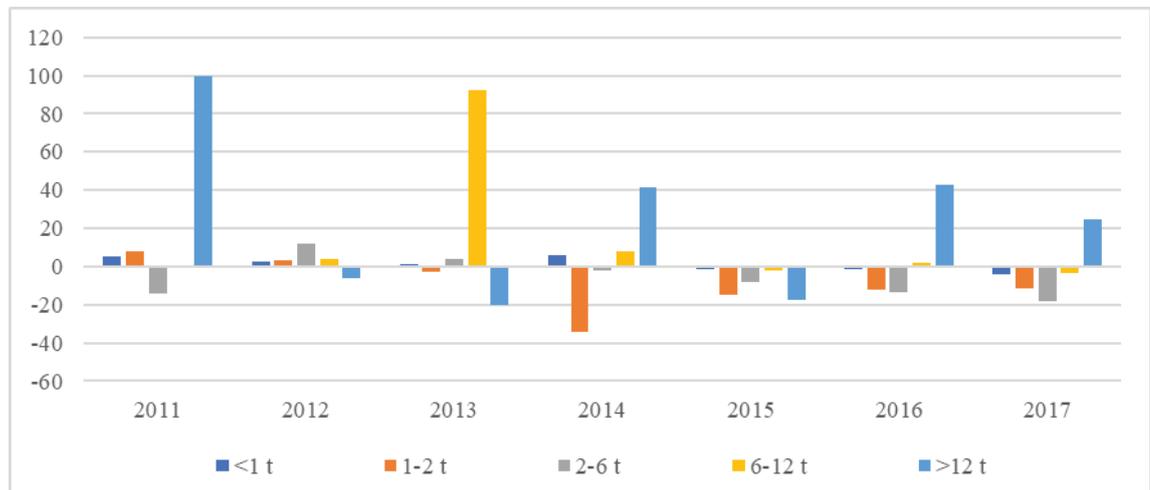


Quelle: (KBA, 2019a)

Allgemein sind die Veränderungen des Benzin-Bestandes eher negativ über die betrachteten Jahre, mit Ausnahme eines sehr deutlichen Anstiegs der größeren Lkw mit einer Nutzlast von 6 bis 12 t in den Jahren 2016 und 2017 sowie der Lkw mit einer Nutzlast

von 2 bis 6 t im Jahr 2017. Generell ist somit die Bestandsveränderung von kleineren Lastkraftwagen durchweg negativ. Bei den größeren Benzin-Lkw ist die Veränderung eher schwankend.

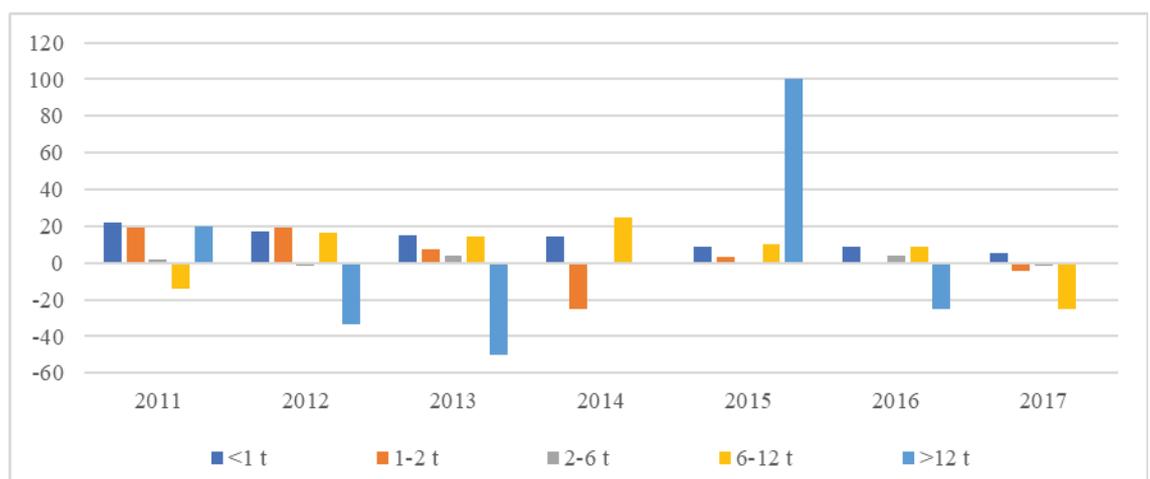
Abbildung 13: Bestandsveränderung von Erdgas-Lkw je Größenklasse (in %)



Quelle: (KBA, 2019a)

Der Bestand von Erdgasfahrzeugen hat sich im Jahr 2011 bei den großen Lastkraftwagen von 12 t und mehr verdoppelt. Im Jahr 2013 gab es ebenfalls einen rasanten Anstieg von 6 bis 12 t mit Erdgasantrieb. Der Bestand an Erdgasfahrzeugen im Bereich der kleineren Lkw sinkt seit 2012 fast konstant.

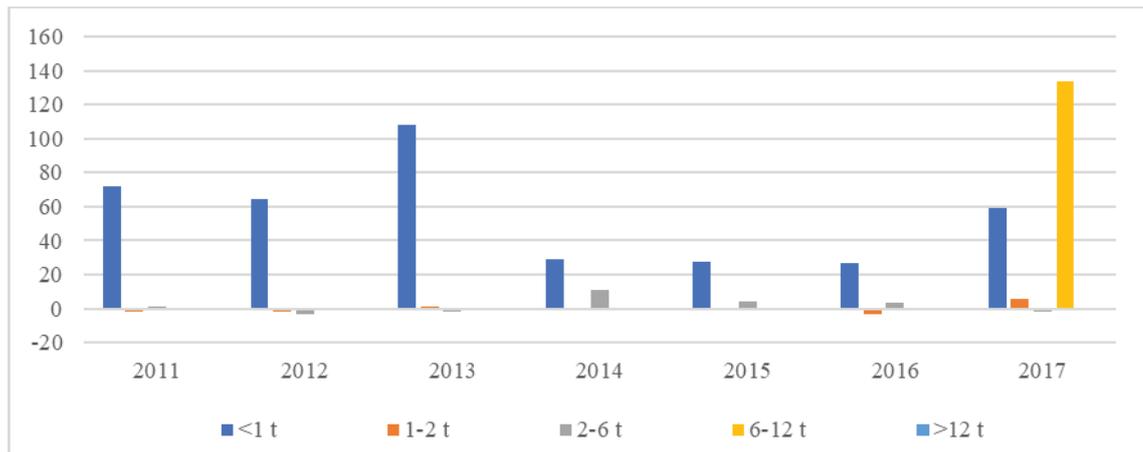
Abbildung 14: Bestandsveränderung von LPG-Lkw je Größenklasse (in %)



Quelle: (KBA, 2019a)

Während in den Jahren 2012, 2013 und 2016 der Bestand von LPG-Lkw im Bereich >12 t deutlich gesunken ist, verdoppelte sich der Bestand im Jahr 2015. Insgesamt ist CNG im Bereich der kleinen Lkw fast kontinuierlich im Wachstum, während es bei den größeren Lkw auch einige Jahre gibt, in denen Rückgänge zu verzeichnen sind.

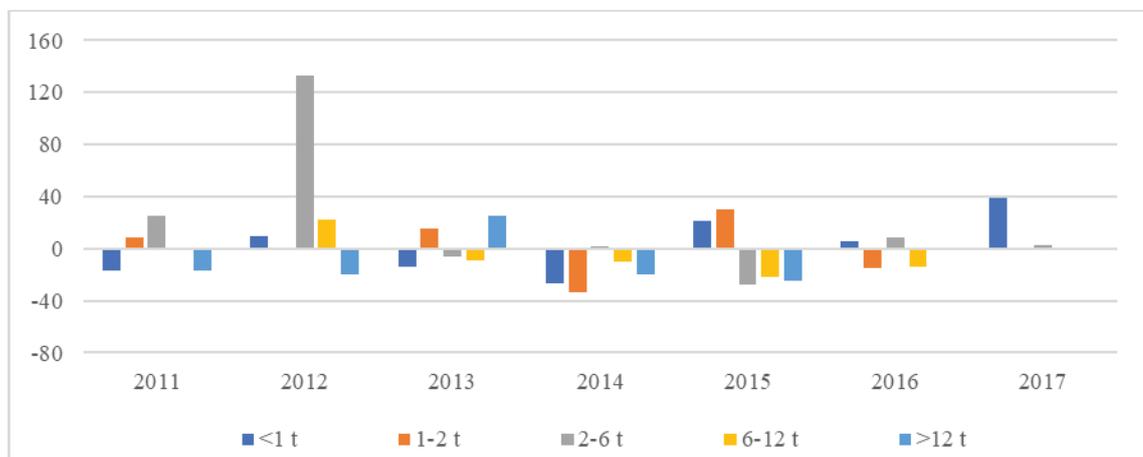
Abbildung 15: Bestandsveränderung von Elektro-Lkw je Größenklasse (in %)



Quelle: (KBA, 2019a)

Elektro-Lkw sind vor allem im Bereich der kleinen Fahrzeuge mit bis zu einer Tonne Nutzlast kontinuierlich im Wachstum. Die Wachstumsraten lagen zwischen 2011 und 2017 bei durchschnittlich 55 %. Bei den anderen Gruppen ist der Elektroantrieb jedoch nicht besonders beliebt. Lediglich im Jahr 2017 gab es einen erheblichen Anstieg von größeren Lastkraftwagen im Segment von 6 bis 12 t Nutzlast, mit einem Wachstum von mehr als 130 % des Bestandes.

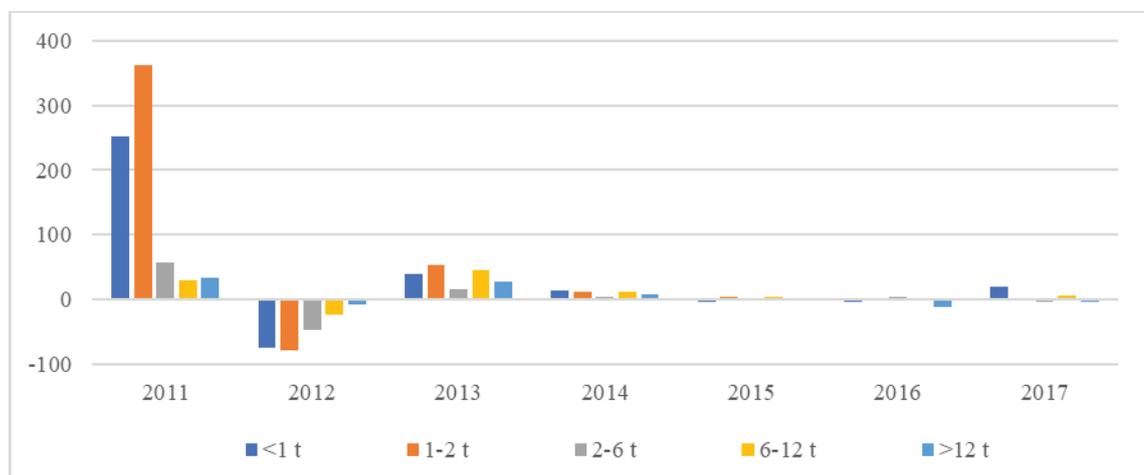
Abbildung 16: Bestandsveränderung von Hybrid-Lkw je Größenklasse (in %)



Quelle: (KBA, 2019a)

Nach einem außerordentlichen Anstieg der mittleren Lastkraftwagen um mehr als 130 % im Jahr 2012 ist der Bestand im Bereich der mittleren und größeren Lastkraftwagen fast ausschließlich gesunken. Der Bestand bei den kleineren Lastkraftwagen schwankt über die Jahre relativ stark vom Positiven ins Negative. Zumindest seit 2015 steigt der Hybrid-Bestand in der Kategorie der Lkw mit bis zu einer Tonne Nutzlast – im Jahr 2017 sogar um knapp 40 %.

Abbildung 17: Bestandsveränderung von Lkw der Gruppe „Sonstige“ je Größenklasse (in %)



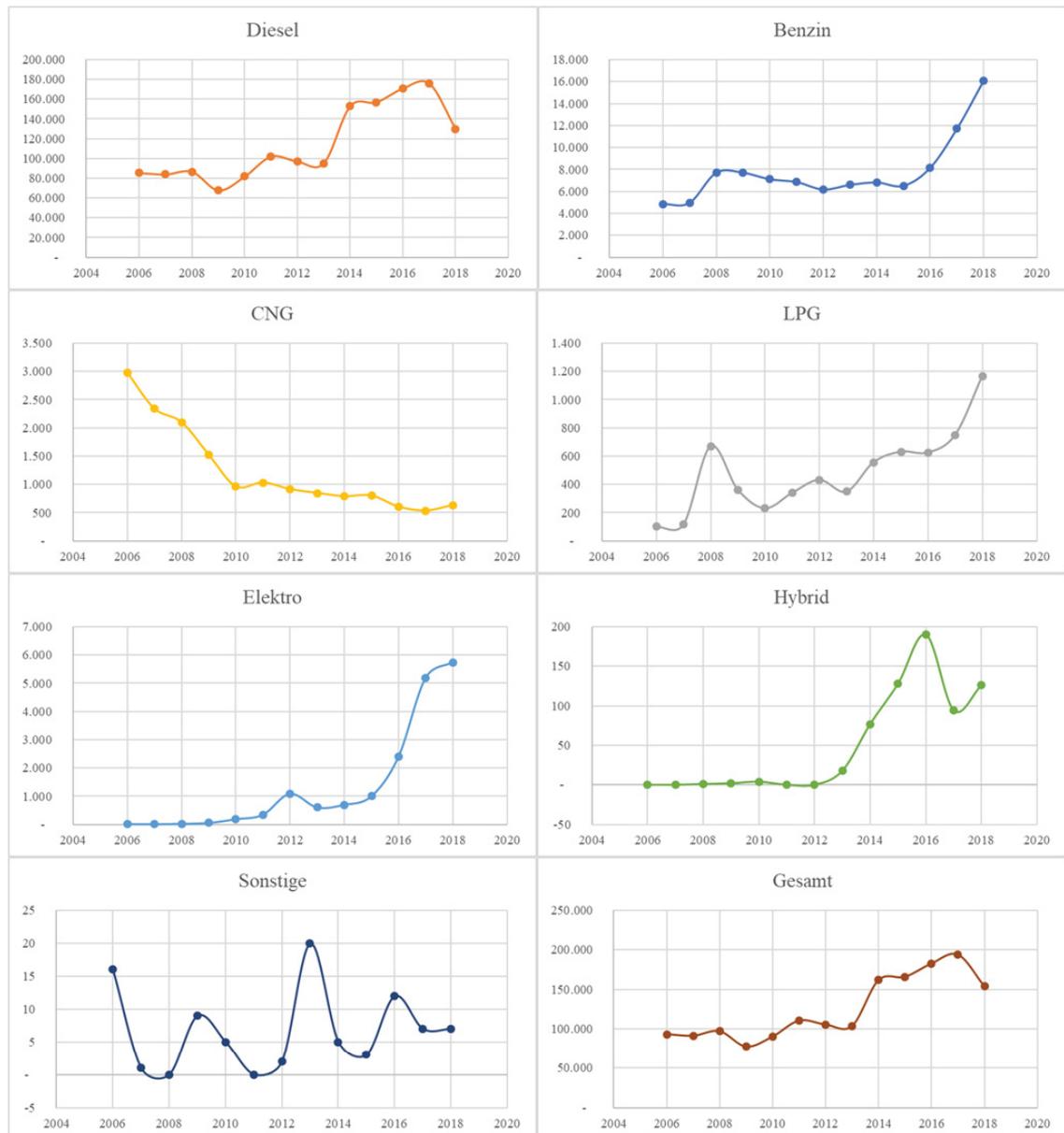
Quelle: (KBA, 2019a)

Während im Bereich der großen Lastkraftwagen kaum Veränderungen im Bestand der sonstigen Antriebe zu verzeichnen ist, ist gerade in den Jahren 2011 bis 2013 bei den kleinen Lkw ein hoher Anstieg und Abfall des Bestandes von Lkw mit sonstigen Antrieben zu verzeichnen. Im Jahr 2011 liegen die Wachstumsraten bei den Lkw <1 t Nutzlast bei +252 % und bei den Lkw mit 1 bis 2 t Nutzlast sogar bei + 362 %. Es handelt sich hierbei um einen Anstieg von 83 auf 292 Fahrzeuge im kleinsten Segment und von 55 auf 254 Fahrzeuge im Segment von 1 bis 2 t Nutzlast. Es wird angenommen, dass die Kategorie „Sonstige“ eine hohe Anzahl an Wasserstoff-Antrieben verzeichnet. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird daher häufig angenommen, dass die Kategorie wasserstofffähliche Spezifika (Kosten, Treibhausgasbilanz etc.) aufweist.

Während die Veränderungen des Bestandes auch Abmeldungen beinhalten, zeigen die Neuzulassungen die Entscheidungen zwischen den Antriebsarten auf, welche die Käufer

im entsprechenden Jahr getätigt haben. Ein Käufer eines Lastkraftwagens steht immer vor der Entscheidung, welchen Antrieb er für sein Produkt wählt. Besonders die unterschiedlichen Größen der Lastkraftwagen verursachen verschiedene Verlaufskurven der Kraftstoffe.

Abbildung 18: Neuzulassungen der Größenklasse <1 t von 2006 bis 2018 nach Kraftstoffen



Quelle: (KBA, 2019a)

In dieser Abbildung ist deutlich zu erkennen, dass die Anzahl der Neuzulassungen bei Dieselfahrzeugen in der kleinsten Größenkategorie <1 t Nutzlast gerade in den Jahren 2014 bis 2017 kaum angestiegen und im Jahr 2018 sogar deutlich gesunken ist. Während

dieses Einbruchs an Dieselfahrzeugen sind die Zahlen für Benzin, LPG, Hybrid und Elektro deutlich gestiegen. Der Effekt ist jedoch nicht komplett auf die Antriebswahl der Käufer zurückzuführen, denn auch die Gesamtzahl der Neuzulassungen ist im Jahr 2018 deutlich gesunken. Obwohl die kleinen Lastkraftwagen Vorreiter bei vielen der alternativen Kraftstoffe sind, ist anhand der Gesamtkurve erkennbar, dass Diesel auch bei den kleinen Fahrzeugtypen bei mehr als 90 % liegt.

Der Anteil von Benzinern an den Neuzulassungen lag in dieser Kategorie im Jahr 2006 bei 5 % und ist bis zum Jahr 2018 auf 10 % angestiegen. Der Dieselanteil wiederum sank von 91 % (2006) auf 85 % (2018). LPG schaffte im Jahr 2018 einen Anteil von 0,8 % (von 0,1 % in 2006), während CNG von einem Anteil von 3,2 % (2006) auf 0,4 % (2018) sank. Elektroantriebe starteten mit 0 % im Jahr 2006 und schafften es im Jahr 2018 auf 3,7 % Marktanteil. Hybrid- und sonstige Antriebe verbleiben bei einem Anteil von 0 % (KBA, 2019a).

Da jedoch aus den detaillierteren Kurven der größeren Fahrzeugklassen keine nennenswerten Mehrwerte für diese Arbeit erkennbar waren, werden diese Detailkurven lediglich im Anhang aufgeführt.

### **2.3 *Entwicklungsprognosen für den deutschen Straßengüterverkehr***

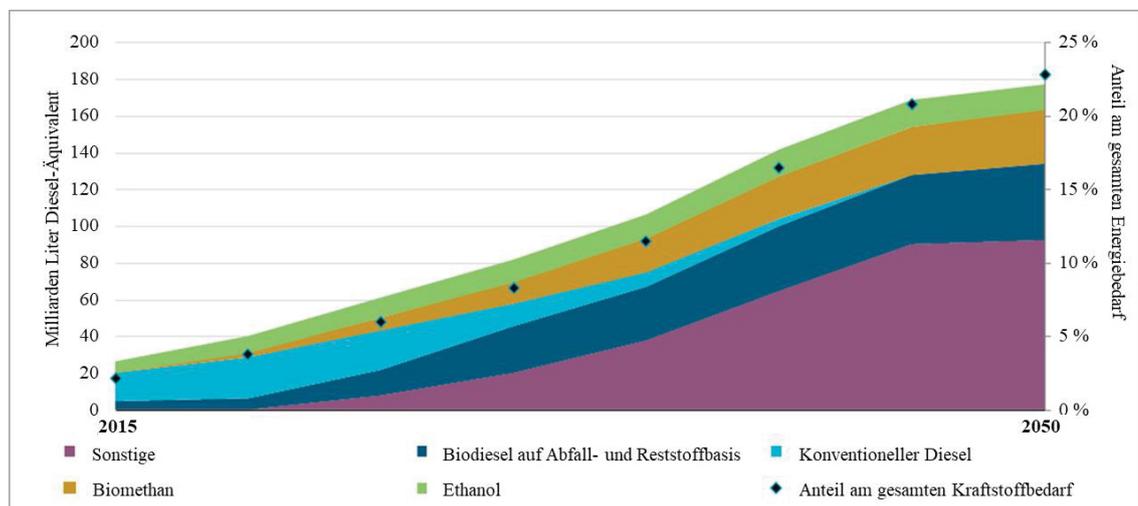
Das anhaltende Wachstum des globalen Handels sowie des Online-Handels führt zu einem weiterhin stark steigenden Paketversandvolumen. Nach aktuellen Prognosen soll der Güterverkehr bis 2030 weiterhin deutlich anwachsen. Mit dem Basisjahr 2010 wird für 2030 eine Steigerung der Transportleistung (in Tonnenkilometer) von 38 % prognostiziert. Beim Straßengüterverkehr wird in diesem Zeitraum sogar eine Steigerung von 39 % erwartet. Darüber hinaus wird die Hauptlast des Gütertransports weiterhin auf dem Straßenverkehr liegen. Es wird erwartet, dass der Straßengüterverkehr im Jahr 2030 einen fast unveränderten Anteil von 83,5 % am Transportaufkommen und von 72,5 % an der Transportleistung hält (Bernecker et al., 2016).

Gerade Städte, Kommunen und Logistikbetriebe müssen sich daher aufgrund aktueller Debatten mit umwelt- und sozialbewussten Lösungen für die Zustellung auf der letzten Meile auseinandersetzen. Die Forschung und Entwicklung ist im Hinblick auf alternative Antriebe von Privatkraftwagen bereits weit vorangeschritten (NPM, 2021). Eine merkliche Veränderung bei Lastkraftwagen ist jedoch bisher nicht zu erkennen. Dennoch wer-

den auch hier alternative Antriebe in den kommenden Jahren zunehmen, da auch die Logistikbranche umweltfreundlicher und nachhaltiger werden muss. Dies führt dazu, dass der Trend des „Green Energy Logistics“ laut Logistikradar bei einer Relevanz von weniger als 5 Jahren liegt. Darüber hinaus wird der Trend mit „High“ bewertet, was bedeutet, dass neue, möglicherweise disruptive Geschäftsmodelle damit verbunden sind (Bodenbenner et al., 2019).

Die International Energy Agency (IEA) veröffentlichte in der Publikation „Future of Trucks“ eine konservative (Referenzszenario) sowie eine ambitionierte Schätzung (Modern-Truck-Szenario) der Verwendung von alternativen Kraftstoffen im Jahr 2050 (IEA, 2017a).

Abbildung 19: Biokraftstoffprognose im ambitionierten „Modern Truck Scenario“

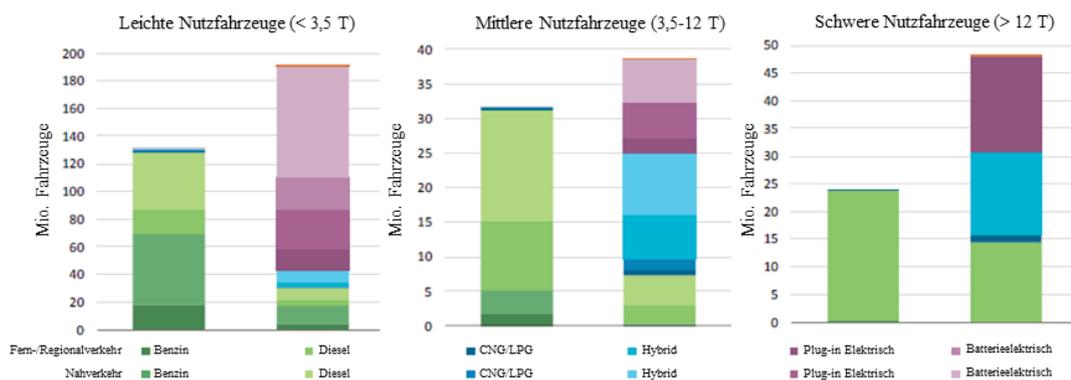


Quelle: (IEA, 2017a)

Hochentwickelte Biokraftstoffe werden laut der IEA kurz- bis mittelfristig in den Flüssigkraftstoffpool eintreten und bis 2050 3 mb/d Öl verdrängen. Bioethanol, Biodiesel und insbesondere Biomethan werden Benzin und Diesel zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen konventioneller Straßengüterfahrzeuge ersetzen. Ethanol wächst mäßig im Benzinkraftstoffpool und dient hauptsächlich für leichte Nutzfahrzeuge (LNF). Konventioneller Biodiesel wird schrittweise zugunsten von auf Abfällen und Rückständen basierendem erneuerbarem Biodiesel (*hydrotreated vegetable oils* – HVO) verdrängt. Da die weltweiten HVO-Lieferungen wahrscheinlich nicht ausreichen, um dieses Volumen zu liefern, muss der größte Teil dieses Biodiesels aus Biomass-to-Liquid (BtL)-Prozessen stammen, die weiterentwickelt werden müssen, um ihre Effizienz und wirtschaftliche

Rentabilität zu verbessern. Biomethan wird zuerst in staatlichen und städtischen Flotten mit einer zuverlässigen Versorgung von nachhaltigen und billigen Rohstoffen verwendet. Allmählich wird seine Verwendung ausgeweitet, um einige schwere Nutzfahrzeuge (SNF) zu betreiben. Andere fortschrittliche Biokraftstoffe oder sogar flüssige oder gasförmige Energieträger, die mit erneuerbarem Strom (Power-to-X/PtX) hergestellt werden, können dies längerfristig ergänzen, und es wird erwartet, dass Drop-in-Kraftstoffe die Mehrheit der fortschrittlichen, kohlenstoffarmen, nicht fossilen Kraftstoffe bis zur Mitte des Jahrhunderts ausmachen. In diesem Szenario liefern Biokraftstoffe und PtX-Produkte fast 23 % des gesamten Endenergiebedarfs im Jahr 2050 (IEA, 2017a). Es ist zu beachten, dass die genannten Biokraftstoffe keine Veränderungen im Antriebsstrang voraussetzen, sondern in etablierten Technologien, wie Dieselfahrzeugen funktionieren.

Abbildung 20: Fahrzeugbestand und Technologieanteile im „Modern Truck Szenario“, 2015–2050



Quelle: (IEA, 2017a)

Mit zunehmender Technologiereife und der entsprechenden Infrastruktur werden jedoch auch andere CO<sub>2</sub>-arme Alternativen, insbesondere Strom, im „Modern Truck Szenario“ einen immer größeren Anteil ausmachen. Die Verbreitung alternativer Kraftstoffe bei Lastkraftwagen ist je nach Fahrzeugsegment unterschiedlich (Friedrich & Kleiner, 2017). Die Nationale Plattform Zukunft der Mobilität (NPM) erwartet ebenfalls für leichte Nutzfahrzeuge eine starke Elektrifizierung des Antriebsstrangs während für schwere Nutzfahrzeuge weiterhin von Erdgas als Brückentechnologie bis 2050 die Rede ist. Hierbei sind besonders Biomethan sowie eine Mischung mit synthetischem Methan ein wesentlicher Entwicklungspfad zur Senkung der THG-Emissionen. Auch einer gewissen Elektrifizie-

rung steht die Arbeitsgruppe offen gegenüber, wenn auch aus technischer Sicht nicht unter optimalen Bedingungen. Alternativen sind gemäß der NPM bis 2030 nicht realistisch (NPM, 2021).

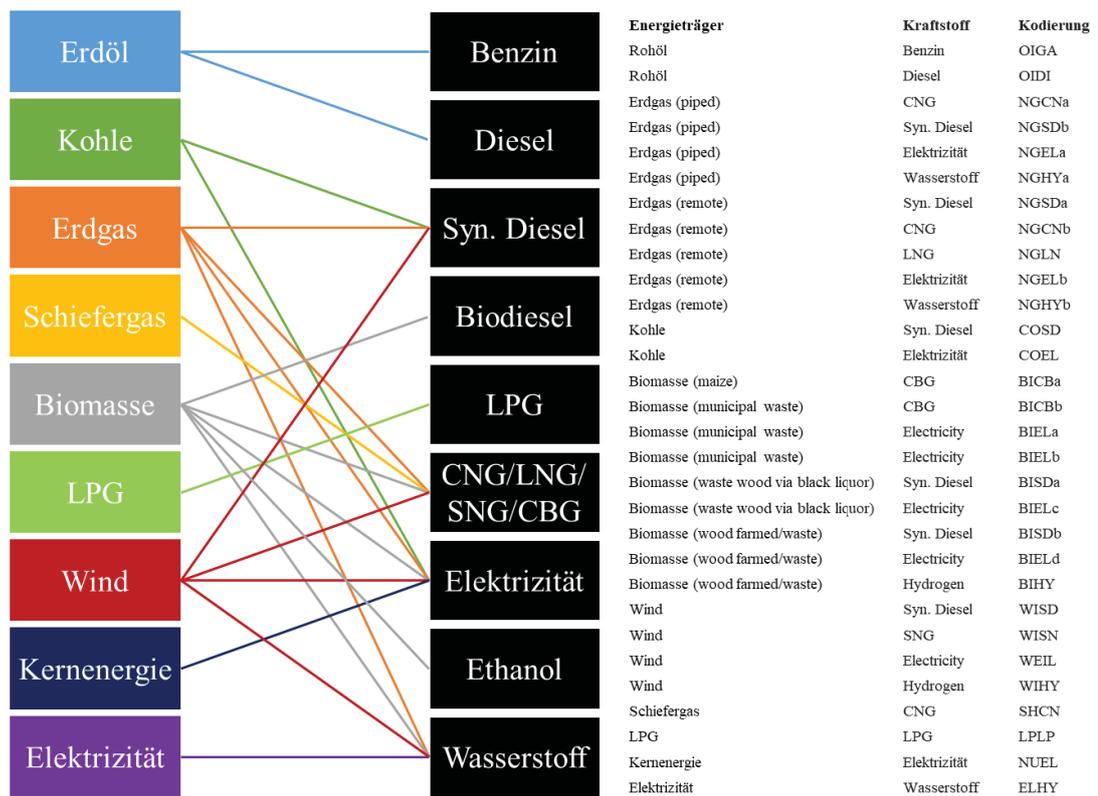
### **3. Stand der Technik: traditionelle und alternative Kraftstoffe**

Die Erreichung ambitionierter Klimaschutzziele erfordert eine Verkehrswende. Alternative Antriebe und Kraftstoffe bei Pkw und Lkw spielen dabei eine wichtige Rolle. Eine relevante Frage dabei ist, welchen Beitrag diese zur Verminderung der Treibhausgasemissionen leisten können. Kraftstoffe können meist aus mehr als einem Primärenergieträger hergestellt werden. Dabei sind die Herstellungsprozesse häufig unterschiedlich energieintensiv. Im folgenden Kapitel werden die unterschiedlichen Herstellungsverfahren sowie die Energie- und THG-Bilanz der Kraftstoffe betrachtet. Dabei wird zunächst ein Überblick über die Ressourcen und die betrachteten resultierenden Kraftstoffe gegeben (Kapitel 3.1). Daran anschließend werden in Kapitel 3.2 die Produktionsrouten näher erläutert. In einem abschließenden Kapitel werden die Energie- und THG-Bilanzen der Kraftstoffe evaluiert.

#### ***3.1 Überblick über die Ressourcen und die resultierenden Kraftstoffe***

Jeder Kraftstoff kann aus einem oder mehreren Primärenergieträgern gewonnen werden. Die Kombination der Prozessschritte, um diese Primärenergiequelle in den Kraftstoff zu transformieren, der letztendlich als Antrieb für Lastkraftwagen genutzt werden kann, wird Well-to-Tank (WTT)-Pfad genannt. Der Verbrauch des Kraftstoffs bei der Verbrennung wird demgegenüber Tank-to-Wheel (TTW)-Pfad genannt. Darüber hinaus gibt der Well-to-Wheel (WTW)-Pfad den WTT-Pfad plus den TTW-Pfad an (Puls, 2006). Es existieren zahlreiche unterschiedliche Gewinnungsprozesse von Kraftstoffen, sodass wir uns in dieser Arbeit auf die Ressourcen Erdöl, Kohle, Erdgas, Schiefergas, Flüssiggas, Biomasse, Wind, Elektrizität und Kernenergie beschränken wollen. Mit diesen Primärenergieträgern können die verschiedenen Kraftstoffe gewonnen werden. Besondere Beachtung in dieser Arbeit finden die Kraftstoffe Benzin, Diesel (inkl. Biodiesel und synthetischem Diesel), Flüssiggas/Autogas (LPG), Erdgas (CNG) (inkl. Flüssigerdgas [LNG]), synthetisches Erdgas (SNG), Bioerdgas (CBG), Elektrizität und Wasserstoff.

Abbildung 21: Die betrachtete Auswahl an Kombinationen von Herstellungsprozessen

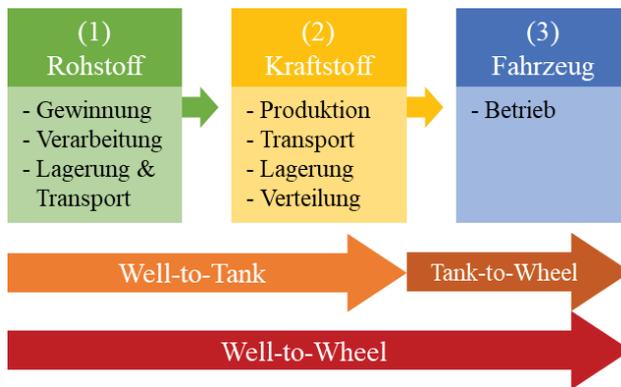


Quelle: eigene Darstellung.

### 3.2 Produktionsrouten und Herstellungsverfahren der Kraftstoffe

Für eine akkurate Analyse der Antriebstechnologien müssen die gesamten Gewinnungs- und Verarbeitungsprozesse einbezogen werden. Die WTW-Analyse betrachtet sowohl diese wie auch alle weiteren Prozesse bis zur Umwandlung in Bewegungsenergie (Puls, 2006). Somit können alle direkten und indirekten Emissionen über den kompletten Pfad der Bereitstellung eines Treibstoffs bzw. eines Energieträgers ermittelt werden. Emissionen beschränken sich in dieser Analyse auf Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Methan (CH<sub>4</sub>) und Stickoxide (NO<sub>x</sub>) (FIS, 2019). Zusammengefasst werden diese unter dem Begriff Treibhausgasemissionen.

Abbildung 22: Umfang des Well-to-Wheel-Gesamtsystems



Quelle: (FIS, 2019)

In jeder der drei Kategorien befinden sich Stellschrauben, die den Umfang der Emissionen beeinflussen können. In (1) Rohstoffe fällt nicht nur die Gewinnung von Rohstoffen, sondern es existiert auch eine Vielzahl an Treibstoffvorketten, die aus unterschiedlichen Rohstoffen gewonnen werden können. Die Verarbeitung der Rohstoffe mittels unterschiedlicher Produktionstechniken bestimmt letztendlich, welcher (2) Kraftstoff resultiert. Die Umwandlung in Bewegungsenergie ist abhängig von der Fahrzeugwahl (z. B. Ottomotor, Diesel, E-Fahrzeug). An dieser Stelle sind unterschiedliche Wirkungsgrade der (3) Fahrzeuge ausschlaggebend (FIS, 2019).

Besonders bei Power-to-X sowie generellen Strom-Kraftstoffen wird eine allgemeingültige Aussage zu Emissionen unmöglich, da hierbei der regionale bzw. nationale Strommix besonders entscheidend ist. Je höher der Anteil erneuerbarer Energien am Strommix ist, desto geringer sind die Emissionen. Für Biotreibstoffe ergeben sich ebenfalls geringere Emissionen als für konventionelle Treibstoffe, und zwar aufgrund der Rückkopplung von Emissionen mit eingesetzten Pflanzen, die zu einem verkürzten Emissionszyklus führen. Sie sind jedoch schwierig zu beurteilen, da diese Biotreibstoffe häufig mit dem fossilen Kraftstoff vermischt eingesetzt werden, sodass das Endergebnis ähnlich wie ein hybrider Antrieb aus Strom und Benzin/Diesel mehrere vermischte Herkunftspfade vereint (BMW, 2022).

Abbildung 23: Die fünf generischen Prozessschritte eines WTT-Pfades



Quelle: Edwards et al., 2013.

Die Prozessschritte können wie folgt beschrieben werden: 1) Produktion und Verarbeitung an der Quelle: Alle Vorgänge, die zur Gewinnung oder Kultivierung der Primärenergiequelle erforderlich sind. 2) Transformation an der Quelle: Fälle, in denen ein wichtiger industrieller Prozess am oder in der Nähe des Produktionsstandorts der Primärenergie durchgeführt wird. 3) Transport zu Absatzmärkten: Transport über große Entfernungen in die EU. 4) Verarbeitung in der EU: Verarbeitung und Umwandlung in der Nähe des Marktes, um einen Endbrennstoff gemäß einer vereinbarten Spezifikation herzustellen (z. B. Ölraffinerien oder Wasserstoffreformer). 5) Verarbeitung und Distribution: Endstufen, die erforderlich sind, um die fertigen Kraftstoffe vom Import- oder Produktionsort an die einzelnen Tankstellen (z. B. Straßentransport) zu verteilen und dem Fahrzeugtank zur Verfügung zu stellen (z. B. Kompression bei Erdgas) (Edwards et al., 2013). Im Folgenden werden jeweils diese fünf Prozessschritte für alle Herkunftspfade und die daraus resultierenden Kraftstoffe skizziert. Eine Tabelle über die Herkunftspfade befindet sich im Anhang unter e).

### *3.2.1 Rohöl*

Die Produktion in der Nordsee ist rückläufig, da die unaufhaltsame Erschöpfung bestehender Reserven nicht durch die Entdeckung neuer Reserven kompensiert wird. Russland ist ein ständiger Lieferant von Rohöl mittlerer Qualität nach Europa. Andere Ursprünge von Rohölen können Afrika, der Nahe Osten oder das Kaspische Meer sein (Puls, 2006). Rohöl wird im Allgemeinen unter dem natürlichen Druck des unterirdischen Reservoirs gefördert. In den meisten Fällen ist Öl mit Gasen verbunden und muss vor dem Versand stabilisiert werden. Die Produktionsbedingungen variieren erheblich zwischen den produzierenden Regionen, Feldern und sogar zwischen einzelnen Bohrlöchern. Daher ist es sinnvoll, typische oder durchschnittliche Energieverbrauchs- und Treibhausgasemissionswerte von Rohölen für den EU-Markt anzugeben (Speight, 2015).

Die EU-Emissionen aus Rohölen und die spezifischen Treibhausgasemissionen sind aufgrund des vergleichsweise hohen EU-Verbrauchs an europäischen und russischen Rohölen mit niedrigem Energieverbrauch und geringen Emissionen niedriger als der weltweite Durchschnitt (IEA, 2021).

Rohöl muss von den Produktionsgebieten zu Raffinerien in Europa transportiert werden. Meist wird es auf dem Seeweg transportiert. Rohöl aus Zentralrussland wird über ein

ausgedehntes Pipelinenetz zum Schwarzen Meer sowie direkt zu osteuropäischen Raffinerien geleitet (European Commission, 2015). Das in Deutschland verwendete Rohöl wird fast vollständig importiert, die inländische Förderung deckt nur ca. drei Prozent des Bedarfs. Die Herkunft und Transportwege des importierten Rohöls sind gut diversifiziert. Deutschland verfügt europaweit über die höchsten Verarbeitungskapazitäten (BMWI, 2015).

Traditionell wird Rohöl als solches transportiert und in der Nähe der Märkte raffiniert. Es ist nicht einfach, einem bestimmten Produkt Energie, Emissionen oder Kosten zuzuweisen. Aus der Analyse des WTT-Reports 2013 geht hervor, dass in Europa Dieselkraftstoff energieintensiver ist als Benzin (IEA, 2021). Durch das Erhitzen (Destillieren) des Rohöls trennt man die Kraftstoffe voneinander. Bei rund 40 °C entweichen Propan und Butan, die es an der Tankstelle als LPG oder Autogas zu kaufen gibt (BMWI, 2015). Fertige Produkte aus der Raffinerie werden entweder per Straßentanker direkt zu einer Einzelhandelsstation oder größtenteils per Pipeline, Zug oder Lastkahn zu einem Depot transportiert (IEA, 2021).

### 3.2.2 Erdgas

Der deutsche Erdgasverbrauch stammt zu ca. 88 % aus Importen. Die wichtigsten Herkunftsländer sind Russland, Norwegen und die Niederlande. Rund zwölf Prozent der deutschen Verbrauchsmenge wird im Inland gefördert. Erdgas ist einer der weltweit am weitesten verbreiteten alternativen Kraftstoffe. Es wird in angepassten Ottomotoren eingesetzt. Serienfahrzeuge mit Erdgasantrieb sind in Deutschland seit Mitte der 1990er-Jahre auf dem Markt. Das Erdgas-Antriebskonzept kann als technisch ausgereift angesehen werden (BMVBS, 2013).

Derzeit wird nur ein relativ kleiner Teil der bekannten Erdgasreserven genutzt. Der Abbau eines Erdgasfeldes erfordert eine schwere Infrastruktur in Form von Pipelines oder Verflüssigungsanlagen und LNG-Schiffen. Die tatsächliche Verfügbarkeit wird daher eher durch die Realisierung von Projekten zur Entwicklung neuer Felder und Verkehrssysteme als durch die physischen Reserven begrenzt. Die Inlandsproduktion ist zurückgegangen und wird voraussichtlich weiter schrumpfen, sodass die Importe einen immer größeren Anteil am Gesamtverbrauch haben. Der Import erfolgt hauptsächlich über Fernleitungen aus Norwegen, Russland und Nordafrika (European Commission, 2015).

Der WTT-Bericht 2013 berücksichtigte zwei Hauptoptionen: „Piped“-Gas, das über Fernleitungen nach Europa transportiert wird, und „Remote“ Gas, das aus verschiedenen produzierenden Regionen der Welt entweder als LNG nach Europa verschifft oder an der Quelle in flüssige Brennstoffe umgewandelt wird. Erdgas ist in ganz Europa über ein ausgedehntes Netz von Pipelines verfügbar, die praktisch alle dicht besiedelten Gebiete abdecken. Es gibt ein begrenztes Netz von Hochdruckleitungen (Ramesohl et al. , 2003). Für die Synthese flüssiger Produkte stehen verschiedene technische Optionen zur Verfügung, die den Vorteil eines einfacheren Transports wie synthetische flüssige Kraftstoffe bieten. Die bekanntesten Optionen sind: synthetische Kohlenwasserstoffe über die Fischer-Tropsch (FT)-Methode, Dimethylether (DME) und Methanol. Die Umwandlungsanlagen können entweder in der Nähe des Gasproduktionsgebiets oder in der Nähe der Märkte liegen. Bei flüssigen Brennstoffen ist die erste Option weitaus wahrscheinlicher, da sie dann eine Alternative zu LNG oder Pipelines für sehr große Entfernungen darstellt. Für Wasserstoff scheinen Anlagen in der Nähe von Märkten sinnvoller zu sein, da der Ferntransport von Erdgas normalerweise dem von Wasserstoff vorgezogen wird (Heracleous & Lappas, 2016).

Sowohl bei Kohle- als auch bei Erdgaserzeugnissen wird häufig das Herstellungsverfahren „CO<sub>2</sub> Capture and Storage (CCS)“ erwähnt. Dabei handelt es sich um eine unterirdische Speicherung von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), um die CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Atmosphäre zu verringern. Es wird davon ausgegangen, dass durch die Abscheidung von CO<sub>2</sub> bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe und eine anschließende unterirdische Speicherung 65 bis 80 % des CO<sub>2</sub> dauerhaft aus der Atmosphäre ferngehalten werden können. Jedoch ist dieses Verfahren politisch sensibel, da es im Fall von Leckagen zu schädlichen Wirkungen auf das Grundwasser und den Boden kommen kann (UBA, 2021a).

### 3.2.3 Kohle

„Saubere Kohle“-Technologien wie die Vergasung, gefolgt von der Stromerzeugung durch kombinierte Kreislauf- und fortschrittliche Rauchgasbehandlungssysteme, können die meisten Probleme der Luftverschmutzung lösen und bieten gleichzeitig hohe thermische Wirkungsgrade. Auf die Vergasung kann auch die Synthese von Methanol oder eine FT-Anlage zur Herstellung flüssiger Kohlenwasserstoffe folgen. Die Abscheidung und Speicherung von CO<sub>2</sub> bietet ferner die Vision einer praktisch kohlenstofffreien Strom-

oder Wasserstoffproduktion aus Kohle und könnte auch den CO<sub>2</sub>-Ausstoß von synthetischen Brennstoffen verringern.

Der WTT-Bericht enthält eine Reihe von Pfaden auf Kohlebasis, die die Verarbeitung des aktuellen EU-Kohlegemisches zu Wasserstoff, Methanol, synthetischem Diesel und Elektrizität (sowohl konventioneller Kessel + Dampf als auch IGCC) darstellen (UBA, 2016a).

#### 3.2.4 *Biomasse*

Die Verfügbarkeit von Biomasse und die Herstellung von Kraftstoffen daraus ist aufgrund der unterschiedlichen landwirtschaftlichen Bedingungen in der EU eine komplexe Frage, die eng mit den Kosten verbunden ist.

Raps hat relativ hohe Emissionen, da es in der nördlichen Hälfte Europas angebaut wird, wo Böden im Allgemeinen einen höheren organischen Gehalt aufweisen. Sonnenblumen, die im trockeneren Süden angebaut werden, haben geringere Emissionen pro Hektar, was allerdings von dem geringen Ertrag nicht vollständig kompensiert wird. Der hohe Ertrag an Zuckerrüben und die Tatsache, dass diese nicht auf schlecht entwässertem Boden angebaut werden können, senkt die Emissionen unter die der anderen Getreide-/Saatgutkulturen. Landwirtschaftliches Holz und Stroh haben die niedrigsten N<sub>2</sub>O-Emissionen (Hamje et al. , 2014).

Die Energie- und Treibhausgasemissionen für den Transport von Biomasse zu den Verarbeitungsbetrieben sind aufgrund der einfachen Transportmöglichkeiten vergleichsweise emissionsarm. In Europa sind die beiden am häufigsten verwendeten Ölsaaten Raps und Sonnenblumen. Ölsaatenerträge sind im Allgemeinen viel niedriger als bei Weizen oder Zuckerrüben. Raps wächst im Norden der EU besser und ist intensiver, während Sonnenblumen eher für Südeuropa geeignet sind. Die Verarbeitung der Ölsaaten aus beiden Quellen ist ähnlich. Mit zunehmender Nachfrage nach Biodiesel spielen importierte Öle (hauptsächlich aus Soja und Palmen) eine immer wichtigere Rolle. Reines Pflanzenöl kann wegen seiner hohen Viskosität und seines hohen Gummigehalts nicht als herkömmlicher Kraftstoff für Verbrennungsmotoren verwendet werden. Das häufigste Verfahren ist die Veresterung, d. h. die Reaktion der organischen Säure mit einem Alkohol. Dies ist ein wesentlicher Schritt, um sicherzustellen, dass der resultierende Kraftstoff stabil ist. Die Verarbeitung ist relativ unkompliziert, kostengünstig und erfordert nur wenig Energie. Das Nebenprodukt ist Sonnenblumen-/Rapsmehl, ein proteinreiches Tierfutter, das Sojabohnenmehl ersetzen kann (ufop, 2021).

In Europa fehlt es an Pflanzenöl. In der Vergangenheit bestand das Handelsmuster darin, die Rohstoffe (Ölsaaten) anstelle von Pflanzenöl zu importieren. Vielleicht liegt dies daran, dass es in der EU bisher einen reifen und profitablen Markt für Tierfutter-Nebenprodukte gab. Man kann jedoch einen wachsenden Trend erwarten, Pflanzenöl oder Biodiesel von Billigproduzenten (wie Malaysia und Brasilien) zu importieren. Palm hat inzwischen Soja als weltweit größte Quelle für Pflanzenöl abgelöst, obwohl beide Sektoren rasch expandieren. Die Rapsproduktion liegt an dritter Stelle, gefolgt von vielen weiteren kleineren Quellen, einschließlich Sonnenblumen. Während Öl das Hauptprodukt der meisten Ölsaaten ist, liefern Sojabohnen viel mehr Mehl als Öl. Die Ausweitung von Ölpalmenplantagen hat seitens NGOs Kritik in Bezug auf Regenwaldrodung, Verlust der biologischen Vielfalt, Arbeitsbedingungen und Vertreibung einheimischer Bevölkerungsgruppen ausgelöst (Sunarti et al., 2015).

Die einzige Art von Holzabfällen, die mit realistischer Wirtschaftlichkeit erhebliche Auswirkungen auf den Verkehrssektor haben könnte, sind Waldreste aus der gewerblichen Forstwirtschaft. Dies sind die Zweige und Spitzen, die mit herkömmlichen Erntemethoden im Wald verbleiben. Die Hauptproduzentenländer haben bereits Pläne, mehr Waldreste für Strom und Wärme zu verwenden, aber man könnte darüber nachdenken, sie stattdessen in flüssige Brennstoffe umzuwandeln (Edwards et al., 2013).

### 3.2.5 *Wind*

Theoretisch gibt es ein unbegrenztes Potential zur Stromerzeugung aus Windkraft. Es gibt jedoch eine Reihe von Faktoren, die eine solche Entwicklung behindern. Die Anzahl der für die Entwicklung großer Windparks geeigneten und für die Gesellschaft akzeptablen Standorte ist begrenzt. Die Volatilität der Erzeugung erschwert die Integration großer Windparks in bestehende Stromnetze und wirft das Problem der Reservekapazität auf. Im Jahr 2020 hatte Windkraft einen Anteil von rund 23 % an der Stromerzeugung in Deutschland (Statista, 2021d).

Die Stromerzeugung durch Wind kann nicht komplett gesteuert werden. Es wird aus Kapazitätsgründen Zeiten geben, in denen kein Strom in das Netz gespeist werden kann. Grundsätzlich ist es möglich, Methanol aus Wasserstoff und CO<sub>2</sub> zu synthetisieren. Methanol kann dann entweder in Methan oder Syndiesel umgewandelt werden. Dies könnte eine Option für die Verwendung von Windstrom außerhalb der Spitzenzeiten sein, der

zuerst zur Erzeugung von Wasserstoff verwendet werden könnte, während CO<sub>2</sub> beispielsweise aus den Rauchgasen eines Kraftwerks mit fossilen Brennstoffen gewonnen werden kann (Borisut & Nuchitprasittichai, 2019).

### 3.2.6 *Andere*

Darüber hinaus existieren weitere Primärenergieträger. Diese werden im Folgenden kurz erläutert.

#### a) Schiefergas

In jüngerer Zeit hat die Entwicklung der „Fracking“-Technologie die Nutzung von sogenanntem Schiefergas ermöglicht und potentiell große neue Gasreserven erschlossen (Bahadori & Zendehboudi, 2017).

#### b) Flüssiggas (LPG)

Flüssiggas fällt bei der Förderung von Rohöl oder Erdgas und als Raffineriegas an. Flüssiggas wird etwa in einer Heizung für die Wärmeversorgung und als Alternativkraftstoff genutzt und trägt zur Ressourcenschonung und zur Diversifikation der Energieerzeugung bei (European Commission, 2015). Flüssiggas zeichnet sich durch ein niedriges Treibhausgaspotential aus und setzt bei der Verbrennung rund 15 % weniger CO<sub>2</sub> frei als Heizöl. Dabei weist Flüssiggas einen hohen Heizwert auf. Außerdem gibt es deutlich weniger Luftschadstoffe an die Umwelt ab als andere Energieträger. Flüssiggas erzeugt bei der Verbrennung nur wenig Ruß und Asche, auch die Feinstaub- und Stickoxidemissionen sind niedrig. Diese Ressource ist als Beiprodukt anderer Erzeugnisse jedoch begrenzt und der Verbrauch in Europa übersteigt die Produktion. Ein erheblicher Anteil des LPG wird daher importiert (DVFG, 2020).

#### c) Kernenergie

Die Ressource ist in diesem Fall Uran, für das es große Reserven gibt. Ein Kernkraftwerk produziert Strom aus Wärme. Im Gegensatz zu Kohle- und Gaskraftwerken werden während der Wärmeproduktion weder Luftschadstoffe noch Treibhausgase erzeugt (Swissnuclear, 2020). Die einzige wesentliche Quelle für CO<sub>2</sub>-Emissionen ist fossile Kohlenstoff-Energie, die beim Abbau, Transport und der Anreicherung des Urans sowie bei der Wartung der Kraftwerke genutzt wird (Collum, 2017).

#### d) Elektrizität

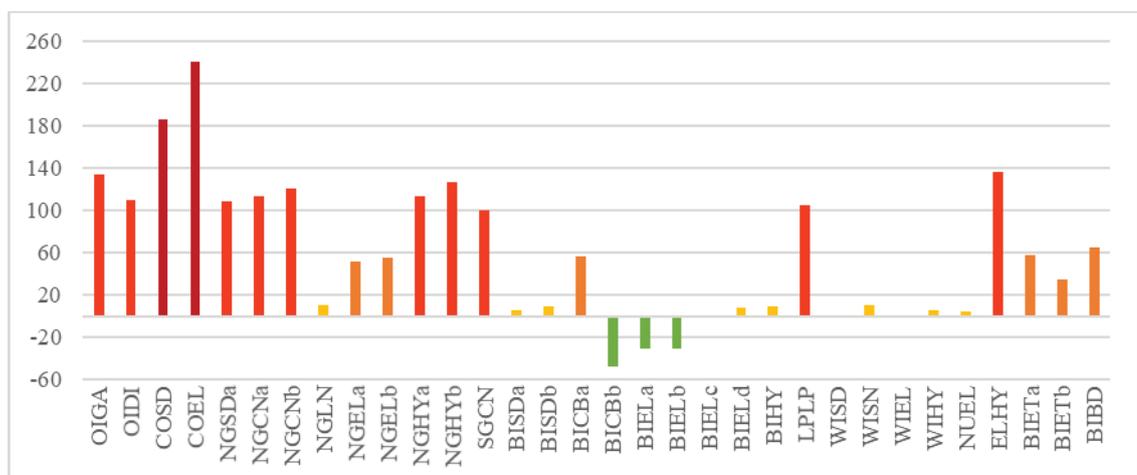
Strom kann aus praktisch jeder Energiequelle erzeugt werden. Die meisten praktischen Optionen sind Erdgas, Kohle, Biomasse (in Form von Holz), Wind und Atomkraft.

Erdgas wird bereits in großem Umfang zur Stromerzeugung eingesetzt. Dies wird in den kommenden Jahren stark zunehmen, da Erdgas neben den erneuerbaren Energien sowohl Atom- als auch Kohleerzeugung ersetzen und den Großteil der steigenden Nachfrage decken wird. Kohle kann heutzutage mit einem speziellen Verfahren „sauber“ verwendet werden, um Strom herzustellen. Während der „Kombi-Prozess mit integrierter Vergasung“ (*Integrated Gasification Combined Cycle – IGCC*) den besten Gesamtwirkungsgrad liefert, haben verschiedene technologische Fortschritte auch die Leistung des herkömmlichen thermischen Zyklus gesteigert (Hamje et al. , 2014).

### 3.3 Energie- und THG-Bilanz der finalen Kraftstoffe

Die Treibhausgasemissionen, die bei der Verbrennung von Kraftstoffen, also der Umwandlung in Bewegungsenergie, verursacht werden, liefern keinen allumfassenden Blick auf die Umweltfreundlichkeit des Kraftstoffs. Besonders wichtig sind die Herkunft und der Herstellungsprozess sowie der Primärenergieträger des Kraftstoffs. Für die verschiedenen Kraftstoffe gibt es ebenfalls mehrere unterschiedliche Herstellungsverfahren, sodass ein Kraftstoff nicht eine einzige Treibhausgasbilanz aufweist.

Abbildung 24: Übersicht über die Well-to-Wheel-Emissionen der betrachteten Kraftstoffe (in gCO<sub>2</sub>/km)



Quelle: eigene Darstellung.

Aus unterschiedlichen Verfahren können sehr unterschiedliche Emissionen resultieren – beispielsweise bei dem Verfahren COEL mit dem Primärenergieträger Kohle (*coal* – CO) und dem resultierenden Kraftstoff Strom (*electricity* - EL). In diesem Fall existiert je nach Detail-Herstellungsprozess eine Spanne bezüglich der Treibhausgasemissionen für das WTT-Szenario sowie für den Gesamtprozess. Die Spanne ist bei dieser Kombination von Primärenergieträger und Kraftstoff besonders groß.

Darüber hinaus ist der positive THG-Effekt von Biomasserisultaten sehr auffällig. Während kohlebasierte Kraftstoffe insgesamt (WTW) THG-Emissionen von bis zu 290 Gramm CO<sub>2</sub>-Äquivalent (Äq.) pro Megajoule Kraftstoff in die Atmosphäre ausstoßen, können bei Biomasseprozessen nicht nur Treibhausgasemissionen auf null gesetzt werden, sondern sogar Treibhausgasemissionen verhindert werden. Mit diesen Prozessen können unter Umständen bis zu 175 g CO<sub>2</sub>-Äq./MJ Emissionen verhindert werden (Edwards et al., 2013). Im Folgenden werden die verschiedenen alternativen Kraftstoffe hinsichtlich ihrer Energie- und Treibhausgasbilanz mit Dieselkraftstoff verglichen.

### 3.3.1 Benzin

Das Raffinieren ist der energieintensivste Prozessschritt bei der Herstellung von Benzin, gefolgt von der Rohölproduktion. Die Produktion von Dieselkraftstoff ist energieintensiver als die von Benzin. Auch die Treibhausgasemissionen sind bei Diesel geringfügig höher (Herce et al., 2022).

Abbildung 25: Energie- und THG-Bilanz von Benzin gegenüber Diesel

Kodierung	Energiebilanz in MJ (min)	Energiebilanz in MJ (max)	THG WTT in gCO <sub>2</sub> /MJ (min)	THG WTT in gCO <sub>2</sub> /MJ (max)	THG WTW in gCO <sub>2</sub> -äq./MJ (min)	THG WTW in gCO <sub>2</sub> -äq./MJ (max)
OIGA	0,19	0,19	13,9	13,9	87,2	87,2
OIDI	0,21	0,21	15,5	15,5	88,7	88,7

Quelle: eigene Darstellung.

### 3.3.2 Biodiesel

Mit Ausnahme von Soja verbraucht Biodiesel bei seiner Herstellung und Verwendung etwa die gleiche Menge Energie wie fossiler Dieselkraftstoff. Soja hat den höchsten Gesamtenergieverbrauch. Im Gegensatz zu anderen Kulturen liefert Soja mehr als viermal so viel Mehl wie Öl. Nach der Substitutionsmethode wird der gesamte Energieverbrauch

für den Anbau und die Verarbeitung dem Öl zugeordnet. Der Effekt wird in diesem Fall noch verstärkt, da die alternative Verwendung von Mehl als Tierfutter relativ wenig Energie spart. Die Verwendung von Ethanol anstelle von Methanol zur Veresterung erhöht die erforderliche Gesamtenergie geringfügig. Die Treibhausgasemissionen werden vom Saatgutproduktionsschritt dominiert, hauptsächlich durch N<sub>2</sub>O-Emissionen. Auch hier weist Soja die höchsten Werte auf (Heracleous & Lappas, 2016). Bei Raps ist eine Nettoeinsparung an fossiler Energie von etwa 60 % möglich. Palmöl verbraucht weniger fossile Energie als Raps, da Abfallbiomasse aus der Ölförderung zur Wärmeerzeugung im Produktionsprozess verwendet wird (Sunarti et al., 2015).

Abbildung 26: Energie- und THG-Bilanz von Biodiesel gegenüber Diesel

Kodierung	Energiebilanz in MJ (min)	Energiebilanz in MJ (max)	THG WTT in gCO <sub>2</sub> /MJ (min)	THG WTT in gCO <sub>2</sub> /MJ (max)	THG WTW in gCO <sub>2</sub> -äq./MJ (min)	THG WTW in gCO <sub>2</sub> -äq./MJ (max)
OIDI	0,21	0,21	15,5	15,5	88,7	88,7
BIETa	1,40	1,45	40,0	40,0	40,0	40,0
BIETb	1,90	1,95	22,0	22,0	22,0	22,0
BIBD	1,20	2,70	55,0	70,0	60,0	80,0

Quelle: eigene Darstellung.

### 3.3.3 Synthetischer Diesel (Syndiesel)

Fischer-Tropsch-Dieselmotorkraftstoff kann grundsätzlich allein oder gemischt als Bestandteil von normalem Dieselmotorkraftstoff verwendet und in herkömmlichen Fahrzeugen verwendet werden. Die Herstellung beruht auf einer Dampfreformierung oder einer teilweisen Oxidation eines fossilen Kohlenwasserstoffs oder eines organischen Ausgangsmaterials, um Synthesegas zu erzeugen, das wiederum unter Verwendung des geeigneten Verfahrens in den gewünschten Brennstoff umgewandelt wird (Heracleous & Lappas, 2016).

Erdgas ist aufgrund seiner weit verbreiteten Verfügbarkeit, insbesondere als gestrandetes Gas an abgelegenen Orten, und auch aufgrund der relativen Einfachheit des Dampfreformierungs- und/oder Teiloxidationsprozesses im Vergleich zu schwereren Ausgangsmaterialien der wahrscheinlichste Rohstoff für diese Prozesse. Kohle kann ebenfalls verwendet werden, obwohl die Komplexität und die Kosten der erforderlichen Anlage viel höher sind. Sowohl Kohle als auch Gas eignen sich für Großanlagen, die hinsichtlich der Kosten vorteilhaft sind. Biomasse in Form von Holz wird ebenfalls als Quelle für solche Brenn-

stoffe angesehen. Eine alternative Option zur Herstellung flüssiger Brennstoffe aus Altholz wäre die Black-Liquor-Route. Die Herstellung von synthetischem Diesel ist ein energieintensives Unterfangen. Die Kombination von Dampfreformierung, partieller Oxidation und FT-Synthese führt zu Gesamteffizienzen in einem weiten Bereich von 45 bis 65 %, die hauptsächlich vom Ausgangsmaterial und in geringerem Maße vom Verfahrenschema abhängen (Aslam et al., 2022).

Die GTL-Verfahren (Gas-to-Liquid) sind mit Zahlen im Bereich von 60 bis 65 % am effizientesten, da die Herstellung eines Synthesegases aus Erdgas relativ einfach ist. Die GtL-Produktion ist an einem entfernten Ort am sinnvollsten, wenn die große Gastransportenergie vermieden und durch den wesentlich effizienteren Transport einer Flüssigkeit ersetzt werden kann. Daher wurde in dieser Version nur der Fall eines „Remote“-Gases modelliert. Im besten Fall benötigt die Herstellung von Syndiesel-Kraftstoff aus Erdgas etwa dreimal so viel Gesamtenergie wie herkömmlicher Dieselkraftstoff. Syndiesel aus Kohle benötigt demgegenüber noch mehr Energie. Kohlebasierte Prozesse (CtL/Coal-to-Liquid) können Wirkungsgrade im Bereich von 55 % erreichen. Es wird erwartet, dass die Verfahren auf Holzbasis weniger effizient sind (bis zu 50 %). Bei der Holzverarbeitung dürften die Anlagen viel kleiner und energetisch weniger optimiert sein. Dies ist auch der Hauptgrund, warum Holzprozesse unter diesem Gesichtspunkt weniger günstig sind als CtL. Obwohl der Gesamtenergieverbrauch für die auf Holz basierenden Pfade relativ hoch ist, handelt es sich fast ausschließlich um erneuerbare Energien, und die fossilen Einträge sind sehr gering. Aus Windstrom und Rauchgas-CO<sub>2</sub> erzeugter Syndiesel ist im Wesentlichen kohlenstofffrei, wobei die einzigen potentiellen Emissionen mit der Verteilung des fertigen Kraftstoffs zusammenhängen. Der Energieverbrauch ist zwar größtenteils erneuerbar, aber aufgrund der Effizienz der Elektrolyse und des Energiebedarfs des Synthesevorgangs relativ hoch. Alle Optionen produzieren einen Dieselkraftstoff, der beim Verbrennen in einem bestimmten Fahrzeug die gleiche Effizienz wie fossiler Diesel erzielt (Aslam et al., 2022).

Die THG-Bilanz ist bei Erdgas besser, da die Energie weniger kohlenstoffintensiv ist. Die Verbrennungs-CO<sub>2</sub>-Emissionen von Syndiesel sind geringer als bei fossilem Diesel. Einschließlich der Verbrennung sind die Treibhausgasemissionen für GtL geringfügig höher als für konventionellen Diesel, können jedoch unter den günstigsten Bedingungen erreicht werden. Die Verwendung von Kohle führt zu sehr hohen Treibhausgasemissionen. Ohne CCS stößt Syndiesel aus Kohle doppelt so viel Treibhausgas aus wie fossiler Diesel oder Syndiesel aus Erdgas. Bei Holz fallen die Treibhausgasemissionen hauptsächlich für

den Holzanbau und das Sammeln/Transportieren von Holz an. Da das Verbrennungs-CO<sub>2</sub> als erneuerbar angesehen wird, ist die gesamte Treibhausgasemission sehr gering (Aslam et al., 2022).

Abbildung 27: Energie- und THG-Bilanz von Syndiesel gegenüber Diesel

<b>Kodierung</b>	<b>Energiebilanz</b> in MJ (min)	<b>Energiebilanz</b> in MJ (max)	<b>THG WTT</b> in gCO <sub>2</sub> /MJ (min)	<b>THG WTT</b> in gCO <sub>2</sub> /MJ (max)	<b>THG WTW</b> in gCO <sub>2</sub> -äq./MJ (min)	<b>THG WTW</b> in gCO <sub>2</sub> -äq./MJ (max)
OIDI	0,21	0,21	15,5	15,5	88,7	88,7
COSD	0,98	1,06	45,0	135,0	80,0	190,0
NGSDa	0,68	0,72	20,0	25,0	51,0	65,0
BISDa	1,60	1,60	-41,0	-41,0	-49,0	-49,0
BISDb	1,20	1,20	10,0	10,0	3,0	3,0

Quelle: eigene Darstellung.

### 3.3.4 LPG

Der WTT-Bericht hat nur das LPG berücksichtigt, das aus Erdgasfeldkondensat nach Europa importiert wurde. Ein großer Teil der insgesamt benötigten Energie bezieht sich auf die Trennung, Behandlung und Verflüssigung in der Nähe des Gasfeldes. Der Ferntransport ist aufgrund der kleineren Spezialschiffe auch aufwändiger als der Transport von Rohöl. Die an der Quelle benötigte Energie liegt in Form von Erdgas oder anderen leichten Kohlenwasserstoffen vor und ist daher weniger kohlenstoffintensiv als bei Rohöl, wodurch die gesamten Treibhausgasemissionen reduziert werden (Edwards et al., 2013).

Abbildung 28: Energie- und THG-Bilanz von LPG gegenüber Diesel

<b>Kodierung</b>	<b>Energiebilanz</b> in MJ (min)	<b>Energiebilanz</b> in MJ (max)	<b>THG WTT</b> in gCO <sub>2</sub> /MJ (min)	<b>THG WTT</b> in gCO <sub>2</sub> /MJ (max)	<b>THG WTW</b> in gCO <sub>2</sub> -äq./MJ (min)	<b>THG WTW</b> in gCO <sub>2</sub> -äq./MJ (max)
OIDI	0,21	0,21	15,5	15,5	88,7	88,7
LPLP	0,12	0,12	8,2	8,2	74,0	74,0

Quelle: eigene Darstellung.

### 3.3.5 CNG/LNG/SNG/CBG

Im Folgenden werden gasförmiges und flüssiges Erdgas getrennt von synthetischem und Bio-Erdgas betrachtet, da die Produktionsrouten deutlich voneinander abweichen.

#### a) CNG/LNG

Um in einem Fahrzeug verwendet zu werden, muss Erdgas zu einer Tankstelle gebracht und im Fahrzeugtank unter Druck gesetzt werden. Gas aus den Verteilungsnetzen ist die erste Wahl, aber auch die Verwendung von LNG kann in Betracht gezogen werden.

Eine direkte Verbindung zum Hochdrucknetz wäre zu bevorzugen, jedoch sind die Hochdruckleitungen nur selten und weit voneinander entfernt und selbst wenn sie in der Nähe einer Tankstelle verfügbar sind, sind sie aus praktischen oder behördlichen Gründen möglicherweise nicht zugänglich. Bei direkter LNG-Verteilung wird die Flüssigkeit auf den entsprechenden Druck gepumpt, während die Verdampfungswärme von einer externen Quelle zugeführt werden muss. Bei Rohrleitungen spielt die Transportentfernung eine entscheidende Rolle. Sowohl Energie als auch Emissionen werden etwas reduziert, wenn LNG dem Fahrzeug direkt zugeführt werden kann (Oeko-Institut e.V. & ICCT, 2020).

Auf der Basis des Energiegehalts ist CNG aus importierten Grenzgaslieferungen energieintensiver als herkömmliche Kraftstoffe. Da jedoch erwartet wird, dass die Gasversorgung nach Europa aus immer weiter entfernten Quellen stammt, wird die damit verbundene Gesamtenergie in Zukunft zunehmen. Bei allen Gastransformationsprozessen, die erhebliche Mengen an Strom erfordern, wurde angenommen, dass der Strom vor Ort von einem Gas-und-Dampf-Kombikraftwerk erzeugt wird (Edwards et al., 2013).

#### b) SNG

Dieser Pfad ist im Wesentlichen kohlenstofffrei, wobei die einzigen potentiellen Emissionen mit der Gaskompression an der Tankstelle zusammenhängen. Der Energieverbrauch ist zwar größtenteils erneuerbar, aber aufgrund der Effizienz der Elektrolyse und des Energiebedarfs des Synthesevorgangs relativ hoch (Chandel & Williams, 2009).

#### c) CBG

Biogas wird typischerweise aus organischen Abfällen gewonnen. In diesem Fall ist wenig fossile Energie beteiligt. Die gesamte WTT-Energiebilanz der CBG-Pfade zeigt eine relativ hohe Gesamtenergie, die hauptsächlich mit der begrenzten Umwandlungsrate der verwendeten Biomasse zusammenhängt. Für Abfallstoffe ist dies nicht wichtig, da es die einzige praktische Möglichkeit darstellt, sie für Energiezwecke zu nutzen. Bei Mais und Doppelanbau ist der fossile Energieeinsatz höher, was den Energieverbrauch für die Pflanzenproduktion und den Transport zur Verarbeitungsanlage widerspiegelt. Das Sammeln von Gülle und deren Verwendung für die Biogaserzeugung an sich verhindert sogar

Treibhausgasemissionen in die Atmosphäre. Alles in allem ist die Verwendung von organischen Abfällen zur Erzeugung von Biogas unter Energie- und Treibhausgasgesichtspunkten eine gute Option, insbesondere dort, wo eine unkontrollierte Zersetzung anaerober Biomasse und die Emission von Methan in die Atmosphäre vermieden werden können (Yadav & Sircar, 2021).

Abbildung 29: Energie- und THG-Bilanz von CNG/LNG/SNG/CBG gegenüber Diesel

Kodierung	Energiebilanz in MJ (min)	Energiebilanz in MJ (max)	THG WTT in gCO <sub>2</sub> /MJ (min)	THG WTT in gCO <sub>2</sub> /MJ (max)	THG WTW in gCO <sub>2</sub> -äq./MJ (min)	THG WTW in gCO <sub>2</sub> -äq./MJ (max)
OIDI	0,21	0,21	15,5	15,5	88,7	88,7
NGCNa	0,21	0,29	16,0	23,0	73,5	76,5
NGCNb	0,26	0,33	18,0	21,5	71,5	77,5
NGLN	0,24	0,24	19,0	19,0	14,5	14,5
SGCN	0,10	0,10	8,0	8,0	63,0	63,0
BICBa	1,30	1,35	28,0	41,0	28,0	41,0
BICBb	1,00	2,20	-69,0	17,0	-70,0	17,0
WISN	1,05	1,05	3,4	3,4	3,4	3,4

Quelle: eigene Darstellung.

### 3.3.6 Elektrizität

In Bezug auf die Gesamtenergie schneidet das sehr effiziente GuD-Kraftwerk (Gas- und Dampf-Kombikraftwerk) am besten unter den fossilen Brennstoffen ab. Kohle ist deutlich energieintensiver. Die Stromerzeugung aus Erdgas profitiert sowohl von der Effizienz der Erzeugung als auch vom geringeren Kohlenstoffgehalt des Gases, sodass die Treibhausgasemissionen etwa halb so hoch sind wie die der Kohle, selbst wenn das Gas über eine Fernleitung oder als LNG bezogen wird. CCS hat das Potential, die Treibhausgasemissionen sowohl für Kohle als auch für Erdgas um mehr als zwei Drittel zu senken, was zu einer gewissen Erhöhung des Energieverbrauchs führt. Die Gewinnung und Aufbereitung von Kernbrennstoffen erfordert ebenfalls eine erhebliche Energiemenge, was den relativ hohen Energieverbrauch erklärt, da der Wirkungsgrad der Dampfturbine bei etwa 33 % liegt. Die Kernenergie stützt sich jedoch auf eine andere Energiequelle als fossile Kohlenwasserstoffquellen und weist sehr geringe Treibhausgasemissionen auf. Windenergie wird demgegenüber als 100 % effizient angesehen. Wind ist natürlich insofern ein Sonderfall, als die Eingangsenergie nicht gemessen und praktisch unbegrenzt als völlig „frei“

angesehen werden kann. Die Effizienz der Holz-Pfade kommt bei einem großen Vergaser, der mit einem GuD-Kraftwerk verbunden ist, dem Gas nahe. Der größte Teil der verbrauchten Energie stammt aus dem Holz selbst, sodass der Verbrauch fossiler Energie und die Treibhausgasemissionen auf allen Wegen sehr gering sind. CCS wird in einer zentralen Einrichtung verbraucht und könnte im Prinzip angewendet werden, wodurch möglicherweise negative Treibhausgasemissionen für diese Pfade entstehen. Wenn Biogas aus Abfallstoffen erzeugt wird, ergeben sich sowohl Vorteile bei der Verwendung einer Energiequelle, die andernfalls weggeworfen werden könnte, als auch bei der Vermeidung von Treibhausgasemissionen bei der Entsorgung des Materials. Da der größte Teil der Energie aus dem Abfallmaterial stammt, sind die Gesamtenergiezahlen in diesem Fall von geringerem Interesse. In allen Fällen ist der Verbrauch fossiler Energie gering. Bei Siedlungsabfällen verbraucht der Export von Gas in einem GuD-Kraftwerk weniger Gesamtenergie als die Stromerzeugung in der Anlage, sodass aus einer bestimmten Menge Abfall mehr Strom erzeugt wird. Die Treibhausgasemissionen für Biogasstrom aus Siedlungsabfällen sind gering (IEA, 2003).

Abbildung 30: Energie- und THG-Bilanz von Elektrizität gegenüber Diesel

Kodierung	Energiebilanz in MJ (min)	Energiebilanz in MJ (max)	THG WTT in gCO <sub>2</sub> /MJ (min)	THG WTT in gCO <sub>2</sub> /MJ (max)	THG WTW in gCO <sub>2</sub> -äq./MJ (min)	THG WTW in gCO <sub>2</sub> -äq./MJ (max)
OIDI	0,21	0,21	15,5	15,5	88,7	88,7
COEL	1,55	2,00	70,0	290,0	70,0	290,0
NGELa	1,20	1,70	45,0	145,0	45,0	145,0
NGELb	1,40	1,40	147,0	147,0	147,0	147,0
BIELa	3,50	6,10	27,0	27,0	27,0	27,0
BIELb	2,75	4,95	-175,0	16,0	-175,0	16,0
BIELc	0,30	0,30	1,5	1,5	1,5	1,5
BIELd	1,45	2,20	8,0	14,2	8,0	14,2
WIEL	0,20	0,20	0,0	0,0	0,0	0,0
NUEL	3,10	3,10	10,0	10,0	10,0	10,0

Quelle: eigene Darstellung.

### 3.3.7 Wasserstoff

Einer der Vorteile von Wasserstoff besteht darin, dass er im Prinzip aus jeder Primärenergiequelle erzeugt werden kann. Dies kann entweder über einen chemischen Umwand-

lungsprozess erfolgen, der im Allgemeinen die Dekarbonisierung eines Kohlenwasserstoffs oder eines organischen Ausgangsmaterials und die Spaltung von Wasser umfasst, oder durch Elektrizität mittels Elektrolyse (Edwards et al., 2013).

Abbildung 31: Energie- und THG-Bilanz von Wasserstoff gegenüber Diesel

<b>Kodierung</b>	<b>Energiebilanz in MJ (min)</b>	<b>Energiebilanz in MJ (max)</b>	<b>THG WTT in gCO<sub>2</sub>/MJ (min)</b>	<b>THG WTT in gCO<sub>2</sub>/MJ (max)</b>	<b>THG WTW in gCO<sub>2</sub>-äq./MJ (min)</b>	<b>THG WTW in gCO<sub>2</sub>-äq./MJ (max)</b>
OIDI	0,21	0,21	15,5	15,5	88,7	88,7
NGHYa	2,40	2,50	205,0	205,0	205,0	205,0
NGHYb	2,80	2,80	220,0	220,0	220,0	220,0
BIHY	0,98	1,22	14,0	22,0	14,0	22,0
WIHY	0,85	0,85	15,0	15,0	15,0	15,0
ELHY	3,70	3,70	210,0	210,0	210,0	210,0

Quelle: eigene Darstellung.

## 4. Methodik der Analyse

Zentraler Gegenstand der Analyse ist die Ermittlung sozioökonomischer Wirkungen mehrerer politischer Instrumente auf den deutschen Straßengüterverkehr und beteiligte Akteure<sup>2</sup> in ganz Deutschland oder exemplarisch für eine oder mehrere Städte. Zur Bestimmung der direkten Effekte wird mittels einer Kosten-Nutzen-Analyse jede Maßnahme hinsichtlich ihrer direkten Kosten sowie der THG-Minderungspotentiale untersucht. In der Volkswirtschaftslehre wird die Kosten-Nutzen-Analyse als Evaluationsinstrument für staatliche Eingriffe in den Markt benutzt. Darüber hinaus werden mittels eines Input-Output-Modells die indirekten Kosten sowie weitere volkswirtschaftliche Effekte berechnet. In Kapitel 4.1 wird die konzeptionelle Fundierung der Kosten-Nutzen-Analyse (KNA) beschrieben. Es folgt in Kapitel 4.2 die Beschreibung des praktischen Einsatzes des theoretischen KNA-Ansatzes. In einem weiteren Kapitel (4.3) wird die Analyse makroökonomischer Wirkungen erläutert.

### 4.1 Die Kosten-Nutzen-Analyse in der Theorie

Die Kosten-Nutzen-Analyse ist ein Instrument, um zu bestimmen, ob das Ergebnis (der Nutzen) einer Aktion deren Aufwand (die Kosten) rechtfertigt. Die Kosten-Nutzen-Analyse ist das zentrale Werkzeug der Wohlfahrtsökonomik. Falls Nutzen und Kosten nicht sicher eintreten, werden deren Erwartungswerte ermittelt. Sind Wirkungen in mehr als einer Zeitperiode zu erwarten, werden die Kosten- und Nutzenströme abgezinst, um den Netto-Gegenwartswert des Projekts zu bestimmen (Davidson & White, 2015).

Die Kosten-Nutzen-Analyse kann als Rahmen für die Bewertung der relativen Effizienz politischer Alternativen angesehen werden. Es wird somit eine Situation betrachtet, in der Ressourcen wie Land, Arbeit und Kapital in Bezug auf Waren und Dienstleistungen für ihre höchstwertige Verwendung eingesetzt werden. In Situationen, in denen Entscheidungsträger sich nur um Effizienz kümmern, bietet die KNA eine Methode für direkte Vergleiche zwischen alternativen Strategien. Auch wenn andere Ziele als Effizienz wichtig sind, dient die KNA als Maßstab, anhand dessen Informationen über die relative Effizienz alternativer Richtlinien bereitgestellt werden können. In der Tat stoßen Analysten

---

<sup>2</sup> In dieser Arbeit wird der Akteur im generischen Maskulinum verwendet, da dies dem Kontext zufolge für Gruppen von Unternehmen bzw. Branchen und nicht für männliche Personen steht.

selten auf Situationen, in denen Effizienz nicht zu den relevanten Zielen gehört. Die kritische Bewertung dieser Behauptungen erfordert eine genauere Definition der Effizienz (Boardman et al., 2018).

Das Modell der Pareto-Effizienz entstammt aus der Wohlfahrtsökonomik und bedeutet im Allgemeinen, dass eine Situation, ein Zustand oder ein Markt als pareto-effizient gilt, wenn es keine Möglichkeit gibt, jemanden besser zu stellen, ohne jemand anderen dadurch schlechter zu stellen. Ist dies nicht der Fall, kann durch Transaktionen (z. B. einen Tausch) eine Pareto-Verbesserung herbeigeführt werden, d. h.; mindestens eine Person verbessert sich durch die Transaktion, ohne dass sich dadurch die anderen verschlechtern (Adler & Posner, 1999).

Das allgemeine Leitprinzip für die Bewertung ist die Zahlungsbereitschaft – der Betrag, den jede Person bereit wäre zu zahlen, um die Auswirkungen des politischen Instrumentes unter Berücksichtigung aller daraus resultierenden Änderungen des Verbrauchs der Person zu erzielen. In der Praxis ist es jedoch üblich und zweckmäßig, die Auswirkungen in die Ergebnisse der Richtlinie und die Opportunitätskosten zu unterteilen, um die Ressourcen zu bewerten, die erforderlich sind, um diese Ergebnisse durch die Umsetzung der Richtlinie zu erzielen. Dabei messen Opportunitätskosten den Wert dessen, worauf die Gesellschaft verzichten muss, um den Input zur Umsetzung des Instrumentes zu verwenden (European Commission, 2014).

In der Anwendung der Kosten-Nutzen-Analyse verwendet man eine alternative Entscheidungsregel mit etwas weniger konzeptioneller Attraktivität, aber viel größerer Durchführbarkeit als die tatsächliche Pareto-Effizienzregel. Sie basiert auf dem sogenannten Kaldor-Hicks-Kriterium: Eine Politik sollte genau dann verabschiedet werden, wenn diejenigen, die gewinnen, diejenigen, die verlieren, vollständig entschädigen können. Solange der Nettonutzen positiv ist, ist es möglich, dass Verlierer entschädigt werden, sodass die Politik möglicherweise eine Pareto-Verbesserung darstellt (Minken, 2021).

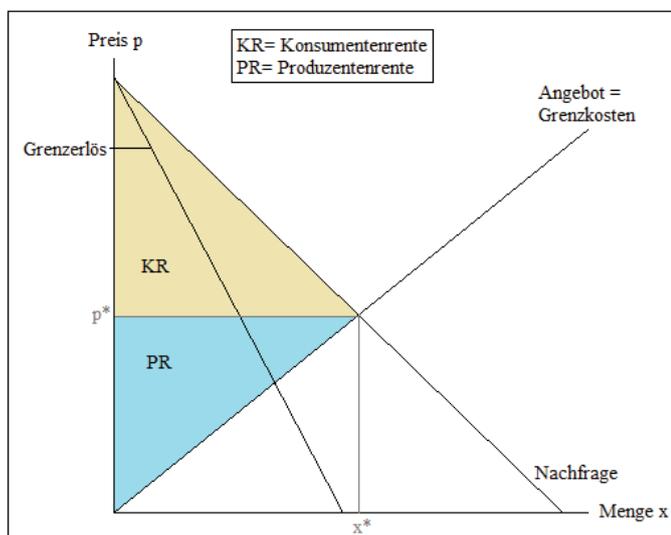
Wenn alle relevanten Projekte unabhängig sind, ist die KNA-Entscheidungsregel einfach: Führen Sie alle Instrumente ein, die einen positiven Nettonutzen haben. Eine allgemeinere Version der Regel gilt in Situationen, in denen mehrere Richtlinien sich verbessern oder gegenseitig stören können: Wählen Sie die Kombination von Richtlinien aus, die den Nettonutzen maximiert. Wichtig ist, dass sorgfältig darauf geachtet wird, die Interaktionen zwischen Projekten zu bestimmen, damit die Kombinationen von Projekten, die insgesamt den größten Nettonutzen bieten, leicht identifiziert werden können. Es kann

jedoch vorkommen, dass Kombinationen von einzelnen Maßnahmen aufgrund von Synergieeffekten höhere Nettonutzen verursachen als einzelne Maßnahmen allein (European Commission, 1997).

Ein Eingreifen des Staates ist aus wohlfahrtsökonomischen Gründen nicht wünschenswert, da der perfekte Wettbewerb in der Theorie für die höchste erreichbare Wohlfahrt sorgt. Die Wohlfahrt setzt sich aus der Summe von Konsumenten- und Produzentenrente zusammen. Die Konsumentenrente ist definiert als die Differenz aus der Zahlungsbereitschaft eines Konsumenten und dem tatsächlich bezahlten Preis. Die Zahlungsbereitschaft des Konsumenten wird durch die Nachfragekurve angegeben, während die Produzentenrente als die Differenz aus dem Verkaufspreis und den Produktionskosten eines Gutes definiert wird. Die Verkaufsbereitschaft des Produzenten wird durch die Angebotskurve angegeben (Griffin, 1998).

Die optimale Marktform ist die vollkommene Konkurrenz, bei der jeder Anbieter danach strebt, seinen Gewinn zu maximieren. Der Wettbewerbsdruck, bei dem kein Anbieter das Produkt zu einem geringeren Preis als den Grenzkosten anbieten, aber gleichzeitig den Konkurrenten unterbieten will, zwingt somit die Anbieter, beim Gleichgewichtspreis zu bleiben und zu einem Gewinn von null zu wirtschaften (Motta, 2004). Dieser ergibt sich im Schnittpunkt von Angebot und Nachfrage im Nash-Gleichgewicht. Die Unternehmen sind somit Preisnehmer und haben keinen Anreiz, vom Gleichgewichtspreis abzuweichen (Martin, 2002).

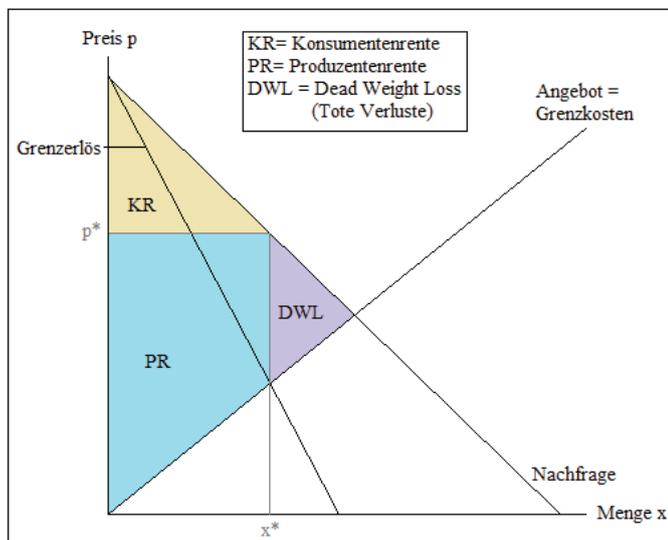
Abbildung 32: Wohlfahrt bei perfektem Wettbewerb



Quelle: eigene Zeichnung (vgl. Hirschhausen et al., 2007).

Die Nettosozialleistungen entsprechen der Differenz zwischen dem gesamten Verbrauchervorteil und den gesamten Erzeugerkosten. In Gegenwart eines gut funktionierenden, perfekt umkämpften Marktes werden die Nettosozialleistungen und der soziale Überschuss maximiert. Das Ergebnis ist pareto-effizient. Dieses Gleichgewicht ist allokativ effizient, weil der soziale Überschuss maximiert wird. In einem perfekt umkämpften Markt verringert alles, was den Wettbewerbsprozess stört, die Allokationseffizienz (Motta, 2004).

Abbildung 33: Wohlfahrt bei staatlichem Eingriff (Angebotsverknappung)



Quelle: eigene Zeichnung (vgl. Hirschhausen et al., 2007).

Nehmen wir zum Beispiel an, die Regierungspolitik beschränkt die Ausgabe auf  $X^*$ , beispielsweise aufgrund von Ausgabequoten. Der Verlust an sozialem Überschuss („dead weight loss“) würde der mit DWL markierten Fläche entsprechen. In den meisten Fällen sollte die Regierung daher nur bei Marktversagen in Betracht ziehen, in einen Markt einzugreifen. Jemand muss die KNA durchführen, um zu entscheiden, ob eine Intervention tatsächlich gerechtfertigt ist. In diesem Sinne würde eine vorgeschlagene Regierungspolitik, die einen derzeit verzerrten Markt in Richtung eines vollkommen wettbewerbsorientierten Gleichgewichts bewegen würde, einen Nettosozialnutzen bringen, indem der soziale Überschuss erhöht und der Mitnahmeverlust verringert wird (Sathaye et al., 1993). Die Formel zur Messung der Produzentenrente ist nicht immer zufriedenstellend, da sie die Fixkosten der Unternehmen ausschließt. Bisher konzentrierte sich die Analyse auf

kurzfristige Effekte, bei denen einige Produktionsfaktoren festgelegt sind. Einige Regierungsrichtlinien ändern die Fixkosten des Unternehmens nicht, während andere sie ändern. Änderungen der Fixkosten sollten in die Messung der Wohlfahrt einbezogen werden. Wenn wir uns wie üblich auf den jährlichen Nutzen und die jährlichen Kosten konzentrieren, müssen die Fixkosten möglicherweise über ihre Nutzungsdauer oder die Laufzeit des Projekts abgeschrieben werden. Somit wird die Formel für die Wohlfahrt um die Fixkosten der Produzenten erweitert (Lehtilä & Tuhkanen, 1999).

Darüber hinaus müssen wir Auswirkungen des Nettobudgets auf die Regierung berücksichtigen, was normalerweise als Staatsüberschuss bezeichnet wird. Finanzielle Zuflüsse aus Steuern an den Staat erhöhen den staatlichen Überschuss, während finanzielle Abflüsse aus Ausgaben den staatlichen Überschuss verringern. Daraus resultiert die angepasste Formel: Wohlfahrt = Konsumentenrente + Produzentenrente (inkl. Fixkosten) + Staatsüberschuss (Boardman et al., 2018).

#### **4.2 Gewähltes Vorgehen bei der Kosten-Nutzen-Analyse**

Um die direkten Effekte der Maßnahmen zu beurteilen, wird jede Maßnahme hinsichtlich ihrer Kosten und ihrer möglichen THG-Einsparung mittels einer Kosten-Wirksamkeits-Analyse analysiert. Die Kosten werden in Euro (€) gemessen, der Nutzen jedoch wird als THG-Minderungspotential in CO<sub>2</sub>-Äquivalent (Äq.) gemessen. Als Ergebnis erhält man einen Quotienten. Diejenige Maßnahme mit dem besten Verhältnis (Kosten-Nutzen-Ratio) wird gewählt. Für die Anwendung werden die beschriebenen Basisschritte einer Kosten-Nutzen-Analyse nach Boardman et al. (2018, S. 5) als Grundlage genutzt. Da politische Instrumente mehrere Ausgestaltungsmöglichkeiten zulassen, erfolgt für jedes Instrument zunächst eine Beschreibung und Konkretisierung der Maßnahme.

Für jedes der politischen Instrumente werden die THG-Einsparung sowie die Kostenwirkungen dargestellt. Diese Effekte treffen jedoch nicht alle Marktteilnehmer in gleichem Maße, sodass diese in Gruppen aufgeführt werden. Die Betroffenen werden in den folgenden Gruppen gebündelt: Staat, Logistik, Energiewirtschaft, Fahrzeughersteller und Infrastrukturhersteller<sup>3</sup>. Darüber hinaus wird das Ausland als Gesamtgruppe dargestellt, unabhängig davon, ob die Effekte ein Unternehmen oder einen anderen Staatshaushalt betreffen. Da unterschiedliche Staaten in unterschiedlichem Maße betroffen sind und die

---

<sup>3</sup> In dieser Arbeit wird die Bezeichnung „Hersteller“ im generischen Maskulinum verwendet, da dies dem Kontext zufolge für Gruppen von Unternehmen bzw. Branchen und nicht für männliche Personen steht.

Spezifika abweichen, wird das Ausland als Gesamtheit gesehen, unabhängig davon, ob es beispielsweise die USA, China oder Polen betrifft. Darüber hinaus werden lediglich die Effekte beschrieben und berechnet, die innerhalb von Deutschland oder in Verbindung mit Deutschland stehen. Dies bedeutet, dass Kostenflüsse, die zwar von der deutschen Politik ausgelöst werden, aber ausschließlich von einer ausländischen Partei (z. B. dem polnischen Staat) zu einer anderen ausländischen Partei (z. B. polnischen Logistikunternehmen) stattfinden, nicht weiter beachtet werden. Ebenso werden lediglich die THG-Emissionen innerhalb Deutschlands betrachtet. Müssen sich ausländische Unternehmen aufgrund der Politik ebenfalls neue Technologien anschaffen, so wird lediglich der positive Effekt innerhalb der regionalen Beschränkungen des deutschen Staates berechnet. Die Zuordnung zu den jeweiligen Gruppen erfolgt gemäß der in Tabelle 2 angegebenen Beschreibung.

Tabelle 2: Allgemeine Gruppierung der beteiligten Akteure

1) Logistikunternehmen	Betreiber von Fuhrparks und Speditionen
2) Energiewirtschaft	Tankstellenbetreiber, Energieversorger sowie alle vorgelagerten Unternehmen entlang der Primärenergie-Logistik-kette
3) Fahrzeughersteller	Hersteller und Zulieferer von Lastkraftwagen(-komponenten)
4) Infrastrukturhersteller	Hersteller und Zulieferer von Tankstelleninfrastruktur und Ladestationen
5) Ausland	Alle beteiligten Parteien außerhalb von Deutschland
6) Staat	Bund und Länder sowie Städte des deutschen Staates

Quelle: eigene Darstellung.

Im Ergebnis erhält man für jede Maßnahme die Höhe der Gesamteinsparung von THG-Emissionen und die der Gesamtkosten. Die Kosten-Nutzen-Effekte werden aus einer Gesamtkostenperspektive beziffert, in der Investitionen für Effizienztechnologien und Infrastruktur den eingesparten Kosten für Kraftstoffe aus einem geringeren Verbrauch gegenübergestellt werden. Diese Gesamtkosten bilden alle direkten und indirekten Kosten der einzelnen Maßnahmen ab, denen entweder mittelbarer oder unmittelbarer Ressourcenverbrauch gegenübersteht. Direkte Kosten werden definiert als jene Kosten, die direkt mit der Umsetzung der Maßnahmen verbunden sind. Indirekte Kosten umfassen hingegen

zum Beispiel Wartungs- und Instandhaltungskosten, also Folgekosten einer Investition. Die verwendeten Kostengrößen werden anhand der Definition des Umweltbundesamtes (UBA, 2008) angewendet.

Tabelle 3: Definition der Kostengrößen

<b>Kostenart</b>	<b>Definition</b>
<b>Gesamtkosten</b>	Mehrkosten der Maßnahmenumsetzung pro Jahr ohne Gegenrechnung der Energieeinsparung (Summe aus Differenzinvestitionen im Vergleich zur Standardtechnologie).
<b>Nettokosten</b>	Differenz aus Gesamtkosten und den erzielten eingesparten Energiekosten oder Erlösen.
<b>Eingesparte Energiekosten</b>	Nutzenstiftende Einspareffekte pro Jahr ohne weitere Berücksichtigung der eingesparten Umweltkosten (externe Effekte), d. h. ohne monetäre Bewertung beispielsweise von THG-Einsparungen.
<b>Spezifische Minderungskosten</b>	Das Verhältnis zwischen den Nettokosten einer Maßnahme und den erzielten THG-Einsparungen einer Maßnahme bildet die spezifischen Minderungskosten der Maßnahme ab. Diese Kennzahl kann verwendet werden, um eine Einschätzung zu erhalten, welche durchschnittlichen Kosten pro Jahr einer Maßnahme mit der Reduzierung einer Tonne CO <sub>2</sub> -Äq. durch diese Maßnahme verbunden sind.

Quelle: (UBA, 2008).

Die Berechnung der Kostengrößen einer Maßnahme orientiert sich jeweils an der Bestimmung der THG-Einsparung derselben. Diese Kalkulationen werden mittels eines Bottom-up-Ansatzes pro Maßnahme bestimmt. Dabei dienen die Vorstudien als Beispielberechnungen. Für die Kalkulationen werden frei zugängliche und unabhängige Daten genutzt. Das Ergebnis umfasst eine monetäre und jahresscharfe Abschätzung der mit der Umsetzung der Maßnahme verbundenen Gesamtkosten, Nettokosten, eingesparten Energiekosten sowie spezifischen Minderungskosten. Dies ist essentiell für die Vergleichbarkeit der Maßnahmen, da aufgrund unterschiedlicher Lebensdauern die Kosten und Nutzen der Maßnahmen zu unterschiedlichen Zeitpunkten anfallen können.

Für die jahresscharfe Betrachtung der Kosten ist es notwendig, Investitionen mittels der Annuitätenmethode auf die Jahre der Lebensdauer zu verteilen. Diese Methode ist eine

Variante der Kapitalwertmethode. Der Kapitalwert ist definiert als Überschuss einer Investition, der sich aus der Abzinsung zukünftiger Zahlungsströme mit dem Kalkulationszinsfuß auf den Zeitpunkt  $t = 0$  ergibt. Dies sichert die Vergleichbarkeit von heutigen und zukünftigen Kosten-Nutzen-Wirkungen.

Der Kalkulationszins orientiert sich dabei an den Vorgaben des Umweltbundesamtes (UBA, 2012) zur Schätzung von Umweltkosten. In diesem Bericht wird für Maßnahmen mit einer geringeren Lebensdauer als 20 Jahren ein Diskontierungsfaktor von 1,5 % in Anlehnung an das derzeit niedrige Niveau von Kapitalmarktzinsen für risikoarme Anleihen empfohlen. Sofern vorhanden, werden für jede Kosten-Quantifizierung mögliche Fördermittel aufgezeigt und in die Berechnungen einbezogen.

### **4.3 Analyse makroökonomischer Wirkungen**

Mittels einer Analyse makroökonomischer Wirkungen werden verschiedene wirtschaftliche Indikatoren, beispielsweise das Bruttoinlandsprodukt (BIP), die Bruttowertschöpfung (BWS), die Beschäftigung oder Importe untersucht. Auch diese Effekte lassen sich in Brutto- und Nettoeffekte unterteilen. Im Falle der Bruttoeffekte wird die durch ein umgesetztes Maßnahmenkonzept bedingte direkte Nachfragesteigerung nach Gütern oder Dienstleistungen erfasst. Abgeleitete Größen der Bruttoeffekte sind beispielsweise Investitionen und Beschäftigung. Unter Zuhilfenahme einer Input-Output-Analyse können zudem Nettoeffekte, also auch indirekte Effekte, durch die Nachfrage nach Vorleistungen und die Reduktion der Arbeitslosenquote aufgrund von mehr Beschäftigung abgebildet werden.

In Kapitel 7 wird eine solche Input-Output-Analyse vorgenommen, um die indirekten Effekte des Maßnahmenbündels zu ermitteln. Eine Betrachtung von Opportunitätskosten wird nicht in die Analyse einbezogen. Für die Ermittlung der entsprechenden Ergebnisgrößen wird die deutsche Input-Output-Tabelle des Statistischen Bundesamtes als Grundlage verwendet.

Die Theorie, wirtschaftliche Transaktionen in einem Kreislaufschema darzustellen, geht auf Wassily Leontief zurück. In einem gesamtrechnerischen Schema werden die Transaktionen zwischen den verschiedenen Sektoren in der Volkswirtschaft dargestellt und besonders die Produktion von Waren und Dienstleistungen hervorgehoben. Es werden das gesamte Güteraufkommen aus inländischer Produktion und aus Importen, die intermediäre und die letzte Verwendung dieser Güter sowie die in den Produktionsbereichen entstandene Wertschöpfung ausgewiesen (Blair & Miller, 2009).

Diese Input-Output-Tabellen (I-O-Tabellen) existieren in sehr ausführlicher Form mit 56 bzw. 71 Wirtschaftsklassen. Die gesamtwirtschaftliche Nachfrageerhöhung wird mittels der berechneten Gesamtkosten abgebildet, da diese die Nachfragestruktur und den Ressourcenverbrauch in den einzelnen Güterklassen annäherungsweise darstellen. Im Ergebnis werden die Vorleistungsverflechtungen der Güterklassen, die Wertschöpfungseffekte (BIP und Bruttowertschöpfung) und die Beschäftigungseffekte des Nachfrageimpulses näher untersucht (Inomata & Owen, 2014).

## **5. Politische Instrumente für die Energiewende im Straßengüterverkehr**

Für die Wahl der politischen Instrumente, die innerhalb dieser Arbeit untersucht werden, wurde zunächst eine Übersicht, der in Deutschland bereits existierenden Regulierungen erstellt (Kapitel 5.1). Danach folgt in Kapitel 5.2 eine Auflistung von politischen Instrumenten, die bereits im Ausland existieren, sich mit dem bestehenden Recht in Deutschland kombinieren lassen und sich bewährt haben, bzw. von Instrumenten, die in der deutschen Politik häufig thematisiert und gefordert wurden. Abschließend wird in Kapitel 5.3 eine Auswahl an politischen Instrumenten vorgenommen, die in der weiteren Analyse betrachtet werden.

### ***5.1 Politische Instrumente und Regulierung im Einsatz***

Der umweltpolitische Druck auf die Nutzfahrzeugindustrie und damit auf das Gütertransportgewerbe wächst ständig. Dieser Sektor wird von der europäischen Politik und der Bundespolitik durch Regulierung zunehmend gezwungen, erhebliche Anstrengungen zu unternehmen, um zur Erreichung der Klimaziele beizutragen. Ein Beispiel dafür sind die von der EU beschlossenen Flottengrenzwerte für den CO<sub>2</sub>-Ausstoß schwerer Nutzfahrzeuge: Die durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen von Lkw sollen von 2019 bis 2030 um 30 % sinken (bis 2025 um 15 %). Gleichzeitig sollen alternative, emissionsarme Antriebe gefördert werden. Während Versorgungsinfrastrukturen für alternative Kraftstoffe und Elektromobilität nur sehr langsam errichtet werden, profitiert der Güterverkehr schon seit einiger Zeit von Fördermaßnahmen für den Kauf und Betrieb von Gas- und Elektrofahrzeugen (Hailer, 2019).

### 5.1.1 Kraftstoff-/Energiesteuer

Die Energiesteuer ist eine vom Bund eingerichtete und verantwortete Verbrauchsteuer. Besteuert wird der Verbrauch von Energieerzeugnissen zu energetischen Zwecken (insbesondere Mineralöle, Erdgas und Kohle), während der nichtenergetische Verbrauch von der Besteuerung ausgenommen ist. Die Energiesteuer ist eine Ökosteuer, die eine Lenkungswirkung im Sinne des Umweltschutzes entfalten soll. Das Energiesteuergesetz enthält für den energetischen Verbrauch von Energieerzeugnissen eine Reihe von Begünstigungsregelungen, mit denen umweltfreundliche Energieträger und Verkehrsmittel gefördert werden. Auch für die Wirtschaft gibt es Vergünstigungen, um Wettbewerbsnachteile gegenüber der Konkurrenz aus dem Ausland zu vermeiden.

Die Energiesteuer wird auf Kraftstoffe, Heizöl, Flüssiggase und Erdgas erhoben. Mit rund 43,2 Mrd. Euro ist sie die mit Abstand wichtigste Verbrauchssteuer in Deutschland. Im Jahr 2016 trug sie knapp sechs Prozent zum gesamten Steueraufkommen bei (Hailer, 2019).

Der größte Teil des Energiesteueraufkommens geht auf den Verbrauch von Kraftstoffen zurück. Insgesamt macht Dieselkraftstoff 21 Mrd. (49 %) und Benzin 16 Mrd. Euro (37 %) des gesamten Energiesteueraufkommens aus (StBA, 2017). Diese beiden Kraftstoffe werden deutlich höher besteuert als der Verbrauch von Energie für das Heizen. So wird Diesel im Vergleich zum Heizöl – wobei zwischen Diesel und Heizöl auf chemischer Basis kein Unterschied besteht – deutlich höher belastet. Im Gegensatz dazu ist Erdgas für Mobilität derzeit geringer belastet als Erdgas für das Heizen. Kraftstoffe stellen die größte und für das Steueraufkommen bedeutendste Gruppe der steuerpflichtigen Energieerzeugnisse dar. Die Steuersätze für je 1000 Liter betragen für unverbleites Benzin (mit einem Schwefelgehalt von höchstens 10 mg/kg) 654,50 Euro und für Dieselkraftstoff (mit einem Schwefelgehalt von höchstens 10 mg/kg) 470,40 Euro nach § 2 Abs. 1 EnergieStG. Auch LPG, Erdgas und andere gasförmige Kohlenwasserstoffe unterliegen bei der Verwendung als Kraftstoff der Energiesteuer. Auf diese Steuersätze gelten jedoch Steuervergünstigungen mit unterschiedlich ausgestalteten Laufzeiten. Für Flüssiggaskraftstoff gilt seit dem 1. Januar 2019 ein ermäßigter Steuersatz von 226,06 Euro/1000 kg. Der Steuersatz wird bis zum Jahr 2022 schrittweise angehoben, bis ab dem Jahr 2023 der Regelsteuersatz von 409,00 Euro/1000 kg zum Tragen kommt. Erdgaskraftstoff wird weiterhin mit 13,90 Euro/Megawattstunde (MWh) versteuert. Die Anhebung der Steuer erfolgt hier erst über die Jahre 2024 bis 2026. Der Regelsteuersatz wird ab 2027 für eine MWh 31,80 Euro

betragen. In § 2 EnergieStG nicht ausdrücklich aufgeführte Energieerzeugnisse, beispielsweise Biokraftstoffe, unterliegen dem Steuersatz für dasjenige Energieerzeugnis, dem sie nach Beschaffenheit und Verwendungszweck am nächsten stehen (BfJ, 2020a).

### *5.1.2 Kraftfahrzeugsteuer*

Für 2021 ist eine Erhöhung der Kraftfahrzeugsteuer (Kfz-Steuer) geplant, die als Maßnahme aus dem Klimaschutzprogramm 2030 hervorgeht. Die Kfz-Steuer für Pkw wird stärker an CO<sub>2</sub>-Emissionen ausgerichtet. Damit wird laut Bundesfinanzministerium eine spürbare Lenkungswirkung hin zu emissionsärmeren und emissionsfreien Fahrzeugen erzielt. Der Gesetzesentwurf der Regierung lässt Nutzfahrzeuge jedoch außen vor (BMF, 2020). Die insbesondere von Handwerksbetrieben verwendeten leichten Nutzfahrzeuge bis 3,5 t Gesamtgewicht, die auch zur Personenbeförderung genutzt werden können, werden zukünftig nach den gewichtsbezogenen Steuersätzen für Nutzfahrzeuge besteuert. Die Regelung des § 18 Absatz 12 KraftStG wird abgeschafft. Damit werden insbesondere kleinere und mittelständische Betriebe entlastet (BMF, 2020). Die Berechnung der Kraftfahrzeugsteuer für Nutzfahrzeuge hat sich seit 2007 nicht verändert (Bundestag, 2020).

### *5.1.3 Schadstoffklassen*

Der Schadstoffklassen-Stufenplan für schwere Nutzfahrzeuge und Busse in Europa ähnelt dem für Pkw. Während bei Pkw und leichten Nutzfahrzeugen die Emission am kompletten Fahrzeug auf dem Rollenprüfstand gemessen wird, wird bei schweren Nutzfahrzeugen die Emission des Motors auf dem Motorenprüfstand in einer definierten Folge von Betriebszuständen, bezogen auf die im Test verrichtete Arbeit des Motors in g/kWh, gemessen. Die Richtlinie 91/542/EWG definiert die Stufen Euro I (ab 1992/93) und Euro II (ab 1995/96) und die Richtlinie 99/96/EG die Stufen Euro III (ab 2000/2001), Euro IV (ab 2005/2006) sowie Euro V (ab 2008/2009). Die zu erwartenden Reduktionen gegenüber der davor geltenden Regelung liegen ähnlich hoch wie bei Pkw. Bei Euro V wurde beispielsweise der Stickoxid-Grenzwert von 3,5 auf 2,0 g/kWh herabgesetzt.

Ab dem 31. Dezember 2012 gilt die Abgasnorm Euro VI. Diese wurde als Verordnung (EG) Nr. 595/2009 im Amtsblatt der Europäischen Union veröffentlicht. Mit Euro VI werden die Grenzwerte für Lkw bei Partikeln um etwa 67 % und bei Stickstoffoxiden sogar um 80 % gegenüber Euro V gesenkt. Auch ein Grenzwert für die Partikelanzahl wurde mit Euro VI eingeführt (UBA, 2021b). Für Lkw wird eine Euro-VII-Abgasnorm

in absehbarer Zeit nicht eingeführt, sodass die Euro-VI-Schadstoffklasse der aktuelle Standard bleibt (BAG, 2018).

#### *5.1.4 Emissionshandel*

Das Gesetz über einen nationalen Zertifikathandel für Brennstoffemissionen (Brennstoffemissionshandelsgesetz – BEHG) ist nach Unterzeichnung durch den Bundespräsidenten und Veröffentlichung im Bundesanzeiger vom 19.12.2019 am 20.12.2019 in Kraft getreten. Mit dem BEHG wird eine Bepreisung von CO<sub>2</sub> für die Sektoren Wärme und Verkehr eingeführt. Das Gesetz gibt vor, dass die Inverkehrbringer von Brennstoffen ab 2021 an einem Emissionshandelssystem teilnehmen müssen. Die entsprechenden Verantwortlichen müssen für die Emissionen der in Verkehr gebrachten Brennstoffe Zertifikate erwerben und abgeben. Die Deutsche Emissionshandelsstelle im Umweltbundesamt ist für den Vollzug des BEHG benannt worden (UBA & DEHSt, 2019).

Zweck dieses Gesetzes ist es, die Grundlagen für den Handel mit Zertifikaten für Emissionen aus Brennstoffen zu schaffen und für eine Bepreisung dieser Emissionen zu sorgen, soweit diese Emissionen nicht vom EU-Emissionshandel erfasst sind (BfJ, 2019).

Im Dezember 2019 sagte die Bundesregierung gegenüber dem Bundesrat zu, den im BEHG zunächst vorgeschlagenen Preisfad für die ersten Jahre zu erhöhen (BMU, 2019).

Im Klimaschutzprogramm 2030 („Klimapaket“) der Bundesregierung war ursprünglich für 2021 ein Startpreis von 10 Euro/tCO<sub>2</sub> vorgesehen und dann vom Bundestag beschlossen worden. Bis 2025 sollte der Festpreis auf 35 Euro/tCO<sub>2</sub> steigen. Der vom Bundeskabinett am 20. Mai 2020 verabschiedete „Entwurf eines Ersten Gesetzes zur Änderung des Brennstoffemissionshandelsgesetzes“ setzt nun das Vermittlungsergebnis mit einem Startpreis von 25 Euro/tCO<sub>2</sub> und einer schrittweisen Erhöhung auf 55 Euro/tCO<sub>2</sub> bis 2025 um. Analog zum Vermittlungsergebnis sieht der Gesetzentwurf vor, dass der Preiskorridor im Jahr 2026 anstatt von 35 auf 55 von 55 auf 65 Euro/tCO<sub>2</sub> angehoben wird. Erst nach der Einführungsphase, ca. ab 2027, muss die begrenzte Menge an Zertifikaten per Versteigerung veräußert werden (GEB, 2020).

Am nationalen Emissionshandelssystem (nEHS) des BEHG nehmen allerdings nicht die Verbraucher von Kraft- und Brennstoffen teil, sondern die Unternehmen, die beispielsweise mit Heizöl, Erdgas, Benzin und Diesel handeln. Sie sind verpflichtet, ab 2021 beim Absatz im Gesetz festgelegter Kraft- und Brennstoffe zuvor erworbene Zertifikate in Höhe ihrer verbrennungsbezogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen abzugeben. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen

der Vorketten werden an anderen Stellen berücksichtigt. Die sogenannten Inverkehrbringer werden ihre zusätzlichen Kosten für den Erwerb der Verschmutzungsrechte an die Verbraucher weiterreichen, wodurch schlussendlich die Zusatzkosten noch mit der Mehrwertsteuer belastet werden. Bei Heizöl, Erdgas, Diesel und Benzin sind es 19 %. Der Startwert beträgt für Endverwender damit nicht 25, sondern 29,75 Euro/tCO<sub>2</sub> (GEB, 2020).

#### 5.1.5 Lkw-Maut

Die Lkw-Maut ist eine streckenbezogene Straßennutzungsgebühr für schwere Nutzfahrzeuge. Die Einnahmen aus der Lkw-Maut werden für den Erhalt und den Ausbau des Verkehrsnetzes verwendet und leisten einen erheblichen Beitrag zur Verkehrsinfrastrukturfinanzierung. Die Maut setzt den Transportunternehmen zudem einen Anreiz, emissionsarme Fahrzeuge einzusetzen, und unterstützt die Verlagerung des Gütertransports auf die umweltfreundlichen Verkehrsträger Schiene und Binnenschiff. Mautpflichtig sind gemäß der Definition in § 1 Absatz 1 Satz 2 Bundesfernstraßenmautgesetz (BfJ, 2020b) Kraftfahrzeuge oder Fahrzeugkombinationen, die für den Güterkraftverkehr bestimmt sind (1. Alternative) oder für den Güterkraftverkehr verwendet werden (2. Alternative) und deren zulässiges Gesamtgewicht – einschließlich Anhänger – mindestens 7,5 t beträgt. Ausnahmen von der Mautpflicht gibt es unter anderem für Einsätze im Straßenunterhaltungsdienst, im Straßenbetriebsdienst, in der Straßenreinigung und im Winterdienst, beauftragt von der öffentlichen Hand (BAG, 2021).

Abrechnungsgrundlage für die streckenbezogene Benutzungsgebühr ist die Länge der mautpflichtigen Strecke. Alle Tariflängen der mautpflichtigen Strecken sind in einer Mauttabelle zusammengestellt, die im Internet abrufbar ist. Der Maut-Satz je Kilometer setzt sich zusammen aus drei Mautteilsätzen für die Infrastrukturkosten, die Luftverschmutzungskosten und die Lärmbelastungskosten. Seine Höhe ist abhängig von der Schadstoffklasse und der Gewichtsklasse des mautpflichtigen Fahrzeugs (BAG, 2021).

Mit der Einführung der Lkw-Maut auf Bundesautobahnen hat die Bundesrepublik im Jahr 2005 einen Systemwechsel weg von der Steuer- und hin zur Nutzerfinanzierung des Bundesfernstraßennetzes eingeleitet. In zwei Stufen wurde die Maut seitdem zum 01.08.2012 und 01.07.2015 auf rund 2300 km vierstreifige Bundesstraßen ausgedehnt. Zum 01.10.2015 wurde zudem die Mautpflichtgrenze von 12 auf 7,5 t zulässiges Gesamtgewicht gesenkt (BMVI, 2020a).

In einer dritten Stufe wurden zum 01.07.2018 alle rund 40 000 km Bundesstraßen für Lkw mautpflichtig. Rechtliche Grundlage ist das Vierte Gesetz zur Änderung des Bundesfernstraßenmautgesetzes vom 27. März 2017 (BGBl. I S. 564). Für Bundesautobahnen und Bundesstraßen gelten einheitliche Mautsätze (BMVI, 2020a).

Außerdem sieht das Bundesfernstraßenmautgesetz eine zeitlich gestaffelte Mautbegünstigung für Elektro- und Erdgasfahrzeuge vor, um den Markthochlauf dieser Fahrzeuge zu unterstützen. Elektrisch betriebene Fahrzeuge werden zunächst unbefristet komplett von der Lkw-Maut befreit. Dazu gehören reine Batterieelektrofahrzeuge, von außen aufladbare Hybridelektrofahrzeuge (Plug-in-Hybrid) und Brennstoffzellenfahrzeuge. Mit Erdgas betriebene Fahrzeuge werden für 2019 und 2020 komplett von der Lkw-Maut befreit. Fahrzeuge mit Flüssiggasantrieb (LPG) fallen hingegen nicht unter die Mautbegünstigung (BMVI, 2020a).

Für die beste erhältliche Schadstoffklasse stieg der Maut-Satz für 40-Tonner von 2005 bis 2019 von 10 auf 18,7 Cent, für 25-Tonner mit Euro 4 stieg er von 11 auf 19,4 Cent, das ist eine jährliche Erhöhung von 4,6 %, bzw. 4,1 % (BMVI, 2019). Lkw mit alternativen Antrieben wurden von der Maut ausgenommen, außerdem wurde ein neuer Anteil zur Bepreisung der Lärmbelastung eingeführt und erstmals eine Klassifizierung nach Gewicht eingeführt. Prozentual wurden Euro-5- und Euro-6-Fahrzeuge besonders erhöht (Toll Collect, 2019).

#### *5.1.6 Tempolimit*

Auf einspurigen Bundes- und Landstraßen liegt die Höchstgeschwindigkeit für Lastkraftwagen mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 3,5 bis 7,5 t bei 80 km/h. Lastkraftwagen mit einem Gesamtgewicht von über 7,5 t dürfen dagegen höchstens mit Tempo 60 fahren. Auf Autobahnen, bei denen die Fahrspuren deutlich voneinander getrennt sind, liegt die Höchstgeschwindigkeit für Lkw mit einem zulässigen Gesamtgewicht von über 3,5 laut StVO bei 80 km/h, während für Lkw unter 3,5 t keine verschärften Geschwindigkeitsgrenzen im Vergleich zu Pkw gelten (BfJ, 2013).

#### *5.1.7 Treibhausgas-Quote*

Biokraftstoffe wurden zunächst ausschließlich über steuerliche Begünstigungen gefördert. Mit Wirkung zum 1. Januar 2007 wurde eine Biokraftstoffquote, die die Mineralöl-

wirtschaft verpflichtet, die Treibhausgasemissionen durch das Inverkehrbringen von Biokraftstoffen zu senken, eingeführt. Hierzu wurden prozentual und stetig ansteigende Mindestanteile für Biokraftstoffe an der Gesamtabsatzmenge festgelegt (Hailer, 2019). Zum 1. Januar 2015 fiel die alte Biokraftstoffquote weg. Nun gilt die neue Treibhausgas-Minderungs-Quote (THG-Quote) von 3,5 %. Das heißt, nicht mehr die Menge der verwendeten Biokraftstoffe ist relevant, sondern die Höhe der eingesparten Treibhausgase. Der Verkehrssektor muss nun seine Emissionen von derzeit etwa 186 Mio. Tonnen (2012) um rund 6,5 Mio. Tonnen reduzieren. Die Quote steigt schrittweise. 2017 sind 4 % Einsparung Pflicht (OVID, 2015). Bis 2020 stieg diese Verpflichtung auf 6 % an (VDB, 2015).

Für die geplanten THG-Einsparungen ist die Mineralölwirtschaft verantwortlich. Dies gelingt ihr vor allem durch die Beimischung von Biokraftstoffen zum konventionellen Sprit. Mit der Einführung der neuen Klimaschutz-Quote hat der Gesetzgeber einen Wettbewerb um den klimafreundlichsten Kraftstoff am Markt eröffnet. Aus Sicht der Mineralölindustrie, die den Sprit mischt, ist der Biokraftstoff mit der höchsten THG-Einsparung der beste. Denn je höher die THG-Einsparung eines Biosprits ist, desto schneller ist die THG-Quote von 3,5 % erreicht und desto weniger Biosprit muss sie ihren fossilen Kraftstoffen beimischen. Das führt zu der paradoxen Situation, dass, je klimafreundlicher die Biokraftstoffindustrie ihre Produkte herstellt, sie am Ende desto weniger an die Mineralölindustrie verkaufen kann. In den letzten Jahren hat die Industrie bereits große Anstrengungen unternommen, um die Emissionen bei der Herstellung der Biokraftstoffe deutlich zu reduzieren (OVID, 2015).

#### *5.1.8 Zugangsbeschränkungen*

Das Umweltbundesamt hat rund 57 Kommunen identifiziert, in denen die Grenzwerte für Feinstaubemissionen (NO<sub>2</sub>) im Jahr 2018 überschritten wurden. 2019 waren es aufgrund von eingeführten Minderungsmaßnahmen nur noch rund 25 Kommunen. Gesundheitliche Folgen für Atemwege und Augen sowie Herz-Kreislauf-Erkrankungen und Lungenprobleme können die Folge dieser Überschreitungen sein. Spitzenreiter bei der Luftbelastung ist derzeit (Jahresmittelwert 2019) München mit 63 µg/m<sup>3</sup>, dicht gefolgt von Darmstadt mit 55 µg/m<sup>3</sup> und Stuttgart mit 53 µg/m<sup>3</sup> (UBA, 2020b).

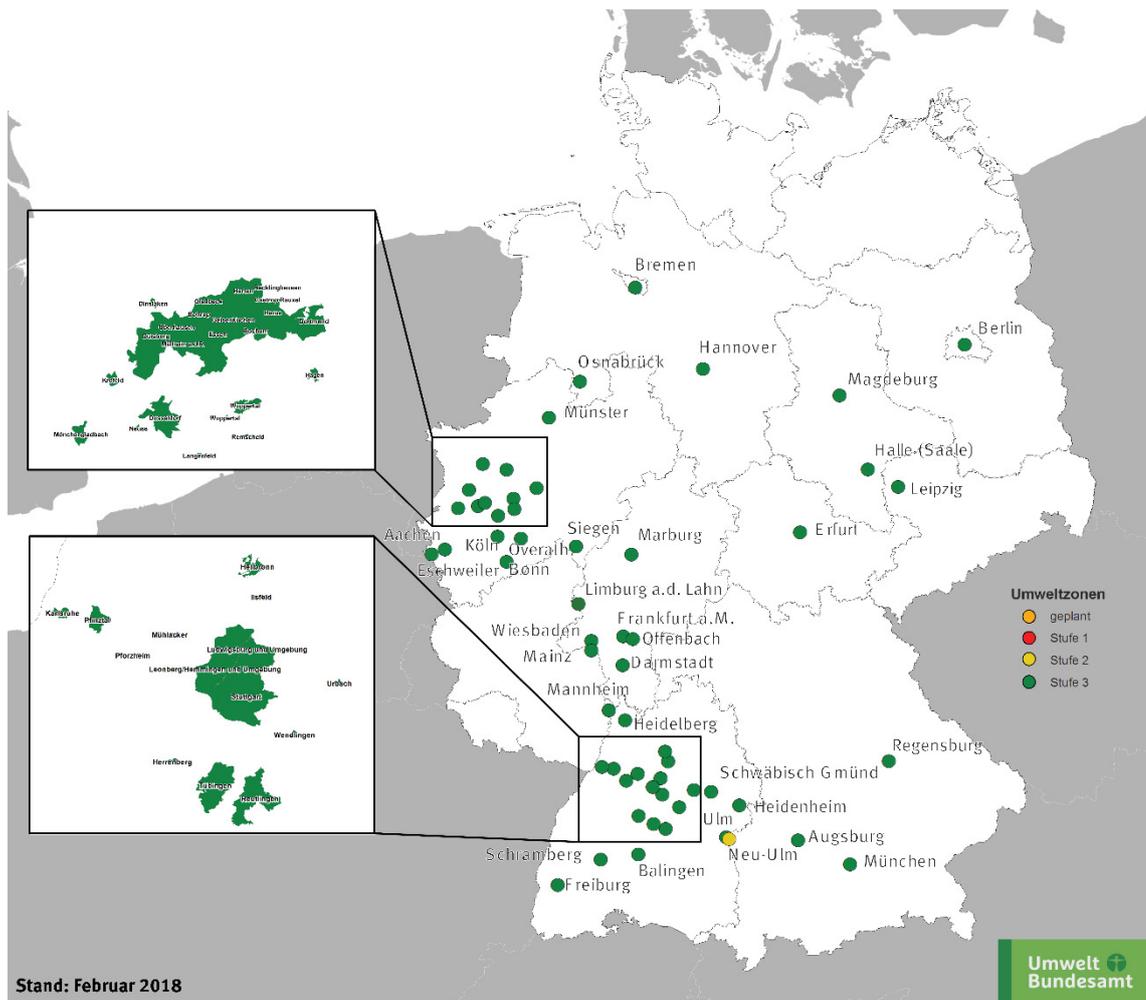
Tabelle 4: Übersicht der am meisten betroffenen Städte von NO<sub>2</sub>-Grenzwertüberschreitungen im Jahr 2019

<b>Gemeinde</b>	<b>Jahresmittelwert 2017 in µg/m<sup>3</sup></b>	<b>Jahresmittelwert 2018 in µg/m<sup>3</sup></b>	<b>Jahresmittelwert 2019 in µg/m<sup>3</sup></b>	<b>Umweltzone vorhanden</b>
München	78	66	63	Ja
Darmstadt	72	67	55	Ja
Stuttgart	73	71	53	Ja
Limburg	58	54	52	Nein
Frankfurt	54	52	51	Nein
Kiel	56	60	49	Nein
Berlin	49	59	48	Ja
Düsseldorf	56	54	48	Ja
Hamburg	58	55	48	Nein
Heilbronn	55	52	47	Ja

Quelle: (UBA, 2020b)

Eine Möglichkeit zur Reduktion von Feinstaubemissionen sind Zugangsbeschränkungen auf bestimmten Strecken oder Zonen. Zugangsbeschränkungen können auf verschiedene Arten eingeführt werden. Umweltzonen existieren bereits in 57 Städten in Deutschland. Mit 21 bzw. 17 befindet sich der Großteil der Umweltzonen in Baden-Württemberg und in Nordrhein-Westfalen. In den Umweltzonen dürfen nur die Fahrzeuge fahren, die hierfür mit einer grünen Plakette (Ausnahme: Umweltzone in Neu-Ulm) gekennzeichnet sind. Fahrverbote bestanden in der ersten Stufe für die Fahrzeuggruppen, die keine Plakette tragen (UBA, 2020c).

Abbildung 34: Umweltzonen in Deutschland



Quelle: (UBA, 2020a)

Neben Umweltzonen sind Durchfahrtsbeschränkungen eine Möglichkeit, die Feinstaubemissionen lokal zu senken. Erste deutsche Großstädte wie Hamburg, Stuttgart, Frankfurt, Mainz und Berlin ergreifen derartige Maßnahmen, um die Stickstoffdioxid-Belastung ( $\text{NO}_2$ ) zu senken. Nach den Entscheidungen des Bundesverwaltungsgerichts bezüglich der Fälle Stuttgart und Düsseldorf steht Fahrverboten in  $\text{NO}_2$ -belasteten deutschen Kommunen juristisch keine Hürde mehr im Weg. Das erste Dieselfahrverbot in Hamburg gilt bereits seit 2018 auf einzelnen Strecken – ab 2019 folgten weitere Städte (Stuttgart, Berlin, Darmstadt). Für Anwohner gab es eine Übergangsfrist (UBA, 2020a).

Das Fahrverbot in Hamburg erfasst alle Diesel-Pkw unterhalb der Euronorm 6. Die Fahrverbote in Berlin und Darmstadt erfolgen ebenfalls streckenbezogen, Stuttgart hat demgegenüber ein zonales Fahrverbot errichtet. Für die Sperrung einzelner Straßen oder Abschnitte – wie in Hamburg und Darmstadt – sahen die Richter am Bundesverwaltungsgericht keine größeren Hürden. Für zonale Fahrverbote, wie sie in Stuttgart gelten, muss der

Grundsatz der Verhältnismäßigkeit eingehalten werden. Die Einführung von zonalen Fahrverboten ist daher nur phasenweise möglich. Das Bundesverwaltungsgericht machte die Vorgabe, dass Euro-5-Fahrzeuge frühestens ab dem 1. September 2019 mit zonalen Verkehrsverboten belegt werden können. Die Durchfahrtbeschränkungen in Hamburg und Darmstadt gelten jedoch schon für Dieselfahrzeuge der Euronorm 5, allerdings nur auf einzelnen Straßenabschnitten. In Stuttgart weigern sich die Behörden derzeit, Verkehrsverbote für Dieselfahrzeuge der Euronorm 5 zu regeln. Euro-6-Dieselfahrzeuge sind nach der neuen gesetzlichen Regelung von Fahrverboten ausgenommen (§ 47 Abs. 4a BImSchG). Daher sind Verkehrsverbote für Euro-6-Dieselfahrzeuge unwahrscheinlich (Verbraucherzentrale, 2020). Fälle, in denen das Fahrverbot in gesamten (Innen-)Städten gilt, gibt es in Deutschland noch nicht. Nicht nur Privatpersonen sind betroffen, auch für die Liefer- und Transportbranche gilt das Dieselvebot. In der folgenden Abbildung wird eine Übersicht über die Städte gegeben, die bereits ein Dieselvebot planen oder umgesetzt haben (Stand 2020):

Abbildung 35: Umgesetzte und geplante Fahrverbote für Diesel-Pkw in Deutschland



Quelle: (Verbraucherzentrale, 2020)

Welche Städte darüber hinaus Dieselfahrverbote in irgendeiner Form einführen werden, ist momentan nicht absehbar. Einige der aktuell 25 Kommunen, die den zulässigen Grenzwert von 40 Mikrogramm je Kubikmeter Luft überschreiten, haben bisher weder Umweltzonen noch Fahrverbote erlassen und müssen schnellstmöglich handeln.

Eine weitere Alternative zu Fahrverboten ist die Errichtung von Umweltspuren. Diesbezüglich gibt es beispielsweise seit geraumer Zeit Diskussionen in Düsseldorf sowie zwei Strecken im Testbetrieb. Um ein Dieselfahrverbot zu verhindern, hat man ein Pilotprojekt gestartet: Mit Hilfe von Umweltspuren soll der Verkehr auf den stark befahrenen Strecken reduziert werden. Nur Busse, Taxis, Fahrräder, Elektrofahrzeuge und Fahrgemeinschaften dürfen die Spuren nutzen (Spiegel, 2019).

Seit den Herbstferien 2019 wurde in einem weiteren Verkehrsversuch die Einrichtung einer dritten Umweltspur gestartet, indem erste Teile zwischen dem Südpark und dem Nordstern eingerichtet wurden. Die Nord-Süd-Verbindung im Hauptverkehrsnetz mit 40 000 Fahrzeugen pro Tag und 24 Bussen in der Stunde ist Bestandteil des Radhauptnetzes. Nach Einrichtung der Umweltspur bleibt auf der Hauptverkehrsachse teils nur eine Fahrspur für den Autoverkehr (Stadt Düsseldorf, 2020). Die Umweltspuren in Düsseldorf wurden zwischenzeitlich jedoch aufgrund von hohen Stauschlägen zum 1. März 2021 aufgegeben (Stadt Düsseldorf, 2021). Weitere Umweltspuren existieren beispielsweise in Berlin, Bielefeld, Mannheim, Münster und Wiesbaden (WZ, 2019b).

#### *5.1.9 Förderprogramme*

Die Förderlandschaft in Deutschland ist sehr vielfältig und unübersichtlich. Für die vorliegende Arbeit wurde eine umfassende Recherche zu Fördermöglichkeiten für die verschiedenen Akteure und Maßnahmen betrieben. Die Förderprogramme müssen zunächst in zwei Bereiche getrennt werden. Es existieren einige Programme auf Bundesebene sowie weitere auf Länderebene. Für die vorliegende Arbeit wurden aus Gründen der Übersichtlichkeit bei Maßnahmen, die ganz Deutschland betreffen, auch nur Förderungen einbezogen, die seitens des Bundes implementiert wurden. Beziehen sich Maßnahmen jedoch auf spezielle Bereiche, zum Beispiel einzelne Städte, so wurden für diese regionalen Berechnungen ebenfalls die Fördermittel auf Länderebene einbezogen.

Der Bund hat auf dem zweiten Kommunalgipfel am 28. November 2017 mit dem „Sofortprogramm Saubere Luft“ ein Maßnahmenpaket für bessere Luft in Städten aufgelegt. Auf dem dritten Kommunalgipfel am 3. Dezember 2018 wurden im Rahmen einer Verstärkung und Aufstockung der Mittel des Sofortprogramms für die Förderrichtlinie „Digitalisierung kommunaler Verkehrssysteme“ zusätzlich 150 Mio. Euro von der Bundesregierung zur Verfügung gestellt (BMVI, 2018). Darüber hinaus existiert mit der „Richtlinie über die Förderung von energieeffizienten und/oder CO<sub>2</sub>-armen schweren Nutzfahr-

zeugen in Unternehmen des Güterkraftverkehrs“ ein mögliches Fördermittel für betroffene Transportunternehmen für den Austausch ihrer Fahrzeugflotte. Es wird darin die Anschaffung neuer Lkw direkt gefördert. Der Kauf von energieeffizienten Lkw ab 7,5 t wird vom BMVI bis Ende 2020 mit jährlich 10 Mio. Euro gefördert. Die Zuschüsse pro Fahrzeug betragen 8000 € für CNG-Lkw, 12.000 € für LNG-Lkw und für Elektro-Lkw bis 12 t ist der Zuschuss pro Unternehmen auf 500.000 € jährlich begrenzt (BMVI, 2020b).

Auch die Umrüstung auf nachhaltigere Fahrzeuge wird vom Bund unterstützt. Im Rahmen des sogenannten De-minimis-Förderprogramms wird die Umrüstung von Diesel-Lkw ab 7,5 t auf Elektroantrieb, Plug-in-Hybrid (PHEV) sowie auf CNG, LNG und LPG gefördert. Die Förderquote liegt bei maximal 80 % der zuwendungsfähigen Ausgaben und betrifft Aufwendungen für die Anschaffung des Motors sowie für dessen Umbau/Einbau (Montagekosten). Die Zuschüsse sind im Rahmen des De-minimis-Programms auf höchstens 2000 € pro Lkw und 33.000 € jährlich pro Unternehmen begrenzt. Die Förderung gilt nur für Bestandsfahrzeuge (BMVI, 2016).

Die gesamte Recherche für Fördermittel des Bundes im relevanten Bereich wird in Tabelle f im Anhang zusammengefasst. Diese enthält neben der Benennung der Fördermittel, dem Förderbereich sowie den Förderberechtigten auch eine Kurzbeschreibung der Förderung. Für Berechnungen von Maßnahmen in speziellen Städten wurden nach den Grenzwertüberschreitungen des Jahres 2018 drei Städte ausgewählt, die als Modellstädte dienen. Für diese drei Städte (München, Kiel und Düsseldorf) werden die möglichen Fördermittel des Landes ebenfalls einbezogen. Die Ergebnisse der Recherche werden im Anhang in Tabelle g aufgeführt.

## ***5.2 Überblick über mögliche zukünftige Instrumente***

Einige politische Instrumente sind immer wieder im Gespräch bzw. werden von politischen Parteien für Deutschland gefordert. Diese Instrumente können in die Kategorien der Fahrverbote, der Prämien/Sanktionen, der Steuern oder der Transparenz fallen. Einige der Instrumente existieren bereits in europäischen Nachbarländern. Die am häufigsten diskutierten Instrumente, die es noch in keiner Form in Deutschland gibt, werden in diesem Kapitel kurz beschrieben.

### 5.2.1 Bonus-Malus-System

Frankreich hat 2008 ein Bonus-Malus-System eingeführt, das an die CO<sub>2</sub>-Emissionen eines Fahrzeugs gekoppelt ist: Käufer von Neuwagen mit niedrigem CO<sub>2</sub>-Ausstoß erhalten einen Bonus, während die mit hohem CO<sub>2</sub>-Ausstoß einmalig einen Malus entrichten müssen. Jedem Emissionswert ist eine konkrete Summe zugeordnet. Im Jahr 2017 wurden die Normen weiter verschärft, sodass nur noch Fahrzeuge mit Elektro- oder Hybridantrieb förderungsfähig sind (Ministère de la transition écologique et solidaire, 2021).

Eine Studie des französischen Ministeriums für Ökologie, Energie, nachhaltige Entwicklung und des Meeres zeigt, dass durch die Einführung des Bonus-Malus-Systems, in Kombination mit der Abwrackprämie, 4,9 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äq. Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2035 eingespart werden. Das Bonussystem verursachte 2015 Kosten in Höhe von 226 Mio. Euro. Den Kosten stehen Einsparungen von 0,1 Mrd. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äq. im Jahr 2015 gegenüber. Diese Kosten werden vollständig von den Einnahmen durch die Strafzahlungen im Zuge des Malus-Systems gedeckt (Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer, 2017).

### 5.2.2 CO<sub>2</sub>-Steuer

In Frankreich werden Treibhausgasemissionen durch zwei unterschiedliche Preissysteme abgedeckt, zum einen durch das Europäische Emissionshandelssystem (EU-ETS), zum anderen über die CO<sub>2</sub>-Steuer, den sogenannten „Beitrag für Klima und Energie“. Die Besteuerung von Kraftstoffprodukten setzt sich in Frankreich aus zwei Verbrauchersteuern zusammen, aus der Verbrauchersteuer auf Energie und der Mehrwertsteuer. Zur Unterstützung des Kampfes gegen den Klimawandel trat im April 2014 eine umweltgerechtere und tendenziell steigende Besteuerung in Kraft (OFATE, 2018). Die Energie-Verbrauchersteuer wird auf das Volumen und nicht auf den Preis des jeweiligen Produktes erhoben. Sie ist ein fester Betrag in Euro, der abhängig vom CO<sub>2</sub>-Ausstoß der Endprodukte umgelegt wird. Die Steuerbelastung des Beitrags für Klima und Energie ist von 7 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub> (2014) auf 30,5 Euro pro Tonne (2017) angehoben worden (Ministère de la transition écologique et solidaire, 2017).

Eine Studie des französischen Ministeriums für Ökologie, Energie, nachhaltige Entwicklung und des Meeres zeigt, dass die CO<sub>2</sub>-Steuer zu einer Emissionseinsparung von 4,7 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äq. im Transportsektor führt (Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer, 2017). Die Einsparungen werden durch einen Nachfragerückgang erzeugt, der wiederum durch den Preisanstieg von Diesel und Benzin verursacht wird.

Ein weiterer Effekt der Steuer ist eine Reduktion der Öl- und Gasimporte, die die internationalen, durch Frankreich verursachten Emissionen 2030 um ca. 1,6 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äq. reduziert. Darüber hinaus verursacht die Steuer einen Trend hin zu energieeffizienteren Transportmitteln, der die lokale Luftverschmutzung, besonders in Ballungsräumen, reduziert. Diese Reduktion ist im Modell nicht quantifiziert. Andere Studien zeigen keinen deutlichen Trend hin zu öffentlichen Verkehrsmitteln, aber durchaus eine Verschiebung in Richtung Elektromobilität und energieeffizienten Fahrzeugen. Die durch die Steuer erzielten Einnahmen betragen 2016 ca. 3,8 Mrd. Euro und 2017 ca. 6 Mrd. Euro. Hier ist zu beachten, dass die Steuereinnahmen nicht ausschließlich aus dem Transportsektor stammen (Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer, 2017).

### 5.2.3 *City-Maut*

In Deutschland wurde vor allem im Zuge der Luftreinhaltevorschriften der EU in Bezug auf Feinstaub und Stickstoffdioxid über die Einführung einer City-Maut in mehreren deutschen Großstädten diskutiert. Allerdings setzte sich im Zuge der Diskussionen inzwischen das Modell der Umweltzonen durch. Bei dieser Lösung wird nicht schadstoffarmen Fahrzeugen die Einfahrt in Innenstadtbereiche verwehrt. Somit sind konkrete Pläne für die Einführung von Innenstadtmaut-Systemen in näherer Zukunft unwahrscheinlich. Die politische Diskussion darüber besteht jedoch weiterhin (IVT, 2011 vgl. mit Abel et al., 2020).

Ein prominentes Beispiel der City-Maut ist die „Congestion Charge“ in London. Diese gilt für ein 22 km<sup>2</sup> großes Gebiet im Stadtzentrum und fällt bei einer Einfahrt pro Tag einmalig an. Es bestehen einige Ausnahmeregelungen bzw. Gebührenbefreiungen (TFL, 2021). Ein Drittel aller Fahrzeuge, die täglich in die Innenstadt fahren, ist von der Maut befreit, unter anderem Fahrzeuge mit alternativen Antriebstechnologien, wie Gas-, Elektro-, Brennstoffzellen- oder Hybrid-Antrieb. In den ersten sechs Monaten ist der Verkehr innerhalb der Zone um ca. 15 % zurückgegangen (BBC, 2007). Verkehrsreduktionen aufgrund einer City-Maut in anderen Städten lagen bei 5 bis 10 % in Oslo, bei 44 % in Singapur und bei 18 bis 22 % in Stockholm (ifo Institut, 2020).

### 5.2.4 *Veröffentlichungs-/Transparenzpflichten*

Seit dem 1. Oktober 2013 sind Transportdienstleister (sowohl Passagier- als auch Güterverkehr) verpflichtet, die CO<sub>2</sub>-Emissionen für alle Transporte, die in Frankreich beginnen

oder enden, zu berechnen und zu veröffentlichen, was Verbrauchern die Möglichkeit geben soll, die Energieeffizienz der Alternativen abzuwägen (ICCT, 2013).

### 5.3 Auswahl des zu untersuchenden Instrumenten-Mix

Die Auswahl der zu testenden Maßnahmen erfolgt im Hinblick auf die Weiterentwicklungspotentiale der bereits existierenden politischen Instrumente. Einige Maßnahmen stellen eine Verschärfung der bereits existierenden Instrumente dar, während andere neue Anreize setzen. Einige Instrumente können auch in ihrer Verwendung verändert werden, beispielsweise existieren Umweltpuren zurzeit nur in Innenstädten. Eine Erweiterung auf Autobahnen ist bisher nicht bekannt. Einige politische Instrumente werden hinsichtlich unterschiedlicher Ausgestaltungen untersucht, um transparent Unterschiede und Effekte darzulegen. Eine Verschärfung von Instrumenten, die bereits existieren wird innerhalb dieser Arbeit nicht behandelt, beispielsweise eine Erhöhung des Steuersatzes.

Tabelle 5: Auswahl von politischen Instrumenten für die Analyse

<b>Nr.</b>	<b>Kategorie</b>	<b>Unterkategorie</b>	<b>Ausgestaltung</b>
1	Fahrverbote	Dieserverbot	Flächendeckendes Dieserverbot in Deutschland
2	Fahrverbote	Dieserverbot	Dieserverbot im Innenstadtring von München, Kiel und Düsseldorf
3	Fahrverbote	Dieserverbot	Dieserverbot im gesamten Stadtbereich von München
4	Fahrverbote	Dieserverbot	Dieserverbot im gesamten Straßennetz ausgenommen Autobahnen
5	Fahrverbote	Umweltpur	Einführung einer Umweltpur auf allen zweispurigen Bundesstraßen für alternative Antriebe in München
6	Fahrverbote	Umweltpur	Überholverbot für Benzin- und Diesel-Antriebe auf Autobahnen/mittlere Spur wird Umweltpur
7	Fahrverbote	Umweltzonen	Einführung einer Umweltpur in Kiel
8	Prämien/ Sanktionen	Bonus-Malus-System	Einführung eines Bonus-Malus-Systems für den Neukauf von Lastkraftwagen
9	Steuern	CO <sub>2</sub> -Steuer	Einführung der CO <sub>2</sub> -Maut für SNF
10	Maut	CO <sub>2</sub> -Maut	Einführung der CO <sub>2</sub> -Steuer für SNF
11	Maut	City-Maut	Einführung einer City-Maut für München
12	Transparenz	Ausweis der CO <sub>2</sub> -Belastung	Verpflichtender Ausweis der CO <sub>2</sub> -Belastung

Quelle: eigene Darstellung.

## **6. Qualitative Bewertung der Effektivität und Effizienz der politischen Instrumente**

In diesem Kapitel wird zunächst das innerhalb dieser Arbeit entwickelte CEPIR-Modell beschrieben. CEPIR steht für „Cost-Effectiveness of Political Instruments in Road Freight Transport“ und berechnet die Kosten-Nutzen-Effekte von politischen Instrumenten zur Förderung alternativer Kraftstoffe sowie zur Senkung der Treibhausgasemissionen im Straßengüterverkehr. Nach der Beschreibung des Modells werden die zwölf Beispielmaßnahmen berechnet und die Ergebnisse analysiert. In einer Sensitivitätsanalyse werden diverse Annahmen aus Plausibilitätsgründen variiert.

### **6.1 Beschreibung des CEPIR-Modells**

Das Kosten-Nutzen-Modell (CEPIR-Modell) beinhaltet viele Bestandsdaten und Allgemeine Annahmen zu technischen und wirtschaftlichen Parametern. Diese stammen aus unterschiedlichen Datenquellen. Um einen möglichst transparenten Überblick darüber zu schaffen, bei welchen Sektoren bzw. Betroffenen Kosten und Nutzen besonders hoch sind, wurden Gruppen von Akteuren identifiziert, die in Kapitel 6.1.1 näher erläutert werden.

Das CEPIR-Modell besteht aus verschiedenen Bausteinen. Zunächst wurden die allgemeinen Annahmen und Inputfaktoren aufgeführt. Diese werden in Kapitel 6.1.2 detailliert beschrieben. Das Modell berechnet zunächst die THG-Reduktion und die Kosten eines Austauschs von Altfahrzeugen zu Neufahrzeugen. In einem weiteren Abschnitt sind diese Berechnungen zu Treibhausgasemissionen und Kosten für jeden Akteur zu finden. Dies wird in den Kapiteln 6.1.3 (THG) und 6.1.4 (Kosten) dargestellt. Da die Maßnahmen meist über mehrere Jahre wirken, werden die Zahlungen der Investitionen mittels Annuitätenmethode, siehe Kapitel 6.1.4, vergleichbar gemacht. Je nachdem, ob ein Zwang zum Austausch oder ein Anreiz besteht, kann die Nachfrage einmalig oder langfristig verändert werden. Findet eine Nachfrageverschiebung in der Zukunft statt, so wird diese in einem zweiten Schritt separat berechnet. Das Vorgehen bei einer Nachfrageverschiebung wird in Kapitel 6.1.6 beschrieben.

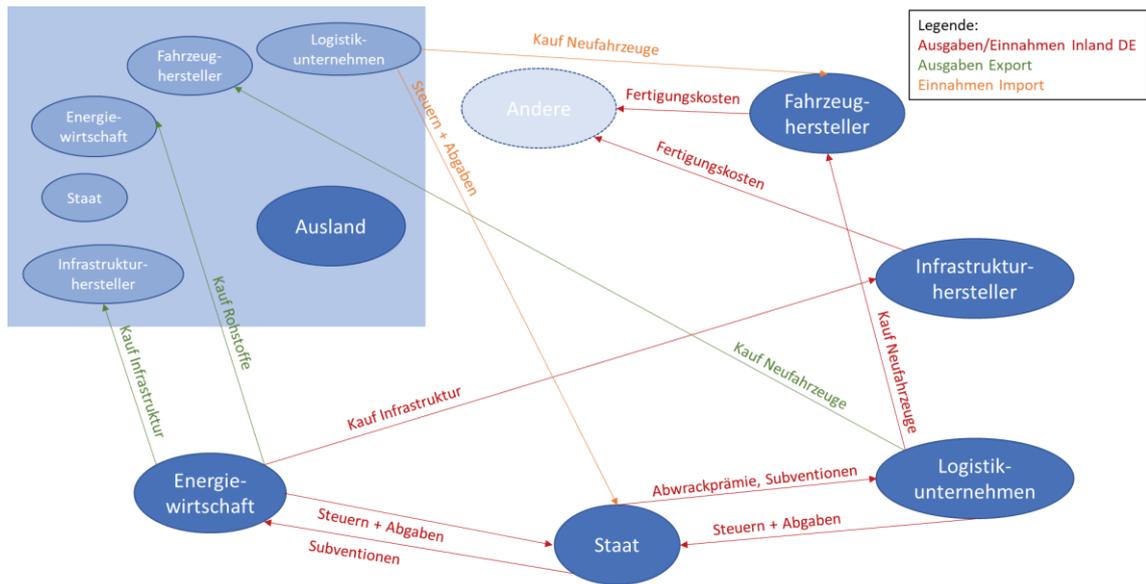
Die unterschiedlichen Maßnahmen können über bestimmte Hebel das Standardmodell verändern. Sie werden in Kapitel 6.1.7 beschrieben. Zu Beginn einer jeden Maßnahme wird diese in ihrer Ausgestaltung, insbesondere bezüglich der Hebel, näher erläutert (Kapitel 6.2 ff.). Darüber hinaus kann eine Maßnahme zusätzliche Berechnungen hinsichtlich Kosten und Nutzen von Akteuren haben, sodass in diesen Fällen Zusatzberechnungen

angefallen sind. Diese werden ebenfalls in den Einzelkapiteln der Maßnahmen ausgeführt.

### *6.1.1 Akteure*

Für jedes der politischen Instrumente werden die THG-Einsparung sowie die Kostenwirkungen dargestellt. Diese Effekte treffen jedoch nicht alle Betroffenen in gleichem Maße, sodass diese in Gruppen aufgeführt werden. Die betroffenen Akteure werden in den folgenden Gruppen gebündelt: Staat, Logistikunternehmen, Energiewirtschaft, Fahrzeughersteller und Infrastrukturhersteller. Darüber hinaus wird das Ausland als Gesamtgruppe dargestellt, unabhängig davon, ob die Effekte ein Unternehmen oder einen anderen Staatshaushalt betreffen (siehe Kapitel 4.2, Tabelle 2). Da unterschiedliche Staaten unterschiedlich stark betroffen sind und die Spezifika abweichen, wird das Ausland als Gesamteinheit gesehen, unabhängig davon, ob es beispielsweise die USA, China oder Polen betrifft. Darüber hinaus werden lediglich die Effekte beschrieben und berechnet, die innerhalb von Deutschland oder in Verbindung mit Deutschland über sogenannte Wechselwirkungen, zum Beispiel Geldflüsse, bestehen. Dies bedeutet, dass Kostenflüsse, die zwar von der deutschen Politik ausgelöst werden, aber ausschließlich von einer ausländischen Partei (z. B. dem polnischen Staat) zu einer anderen ausländischen Partei (z. B. polnischen Logistikunternehmen) stattfinden, nicht weiter beachtet werden. Ebenso werden lediglich die THG-Emissionen innerhalb von Deutschland betrachtet. Müssen sich ausländische Unternehmen aufgrund der Politik ebenfalls neue Technologien anschaffen, so wird lediglich der Effekt innerhalb der regionalen Beschränkungen des deutschen Staates berechnet. Die ansonsten resultierende Kettenreaktion würde die Grenzen dieser Arbeit überschreiten. Sie bietet einen Anknüpfungspunkt für zukünftige Untersuchungen.

Abbildung 36: Zusammenfassung der Effekte im Standardmodell



Quelle: eigene Darstellung.

### 6.1.2 Allgemeine Annahmen und Inputfaktoren

Die Inputfaktoren des Modells lassen sich in Bestandsdaten, allgemeine, technische und wirtschaftliche Parameter unterteilen. Grundidee des CEP-Modells ist die Analyse des Fahrzeugtauschs. Egal ob durch Anreize oder Zwänge – es findet ein Austausch von Altfahrzeugen zu Neufahrzeugen statt. Dafür ist es notwendig, zunächst zu wissen, wie viele Fahrzeuge von der Maßnahme betroffen sind.

#### (1) Bestandsdaten

Für das Standardmodell wird der Fahrzeugbestand des Kraftfahrtbundesamtes für Gesamtdeutschland zugrunde gelegt. Diese Daten sind nach Schadstoffklasse und Größenklasse (zulässige Gesamtmasse in kg) differenziert und gruppiert.

Tabelle 6: Bestand an Fahrzeugen (Gesamtdeutschland) nach Größen- und Schadstoffklasse

	Euro III	Euro IV	Euro V	EuroEEV	Euro VI	Sonstige	Summe
< 2,8 t	278.751	73.633	415.208	393	230.818	192.775	<b>1.191.578</b>
2,8 – 3,5 t	253.203	59.307	564.891	27.117	371.999	89.339	<b>1.365.856</b>
3,5 – 7,5 t	37.682	24.291	53.381	14.014	45.967	43.276	<b>218.611</b>
7,5 – 12 t	7.276	6.304	25.055	3.437	24.171	4.958	<b>71.201</b>

> 12 t	19.459	11.998	61.199	11.951	103.041	11.202	<b>218.850</b>
<b>Summe</b>	<b>596.371</b>	<b>175.533</b>	<b>1.119.734</b>	<b>56.912</b>	<b>775.996</b>	<b>341.550</b>	<b>3.066.096</b>

Quelle: (KBA, 2019a)

Insgesamt gibt es somit rund 3 Mio. Lastkraftwagen in Deutschland. Die Kategorie „Sonstige“ wird in dem Modell nicht näher betrachtet, da in dieser Kategorie sowohl die alternativen Antriebstechnologien als auch die alten Schadstoffklassen, beispielsweise alte Landwirtschaftsfahrzeuge, zu finden sind. Diese können jedoch nicht voneinander getrennt werden und würden das Modell verfälschen.

Es werden sowohl Maßnahmen berechnet, die sich auf Gesamtdeutschland auswirken, als auch Maßnahmen, die sich nur auf einen regionalen Bereich, zum Beispiel Städte oder Landkreise auswirken. Damit wird untersucht, an welcher Stelle im urbanen, regionalen oder ländlichen Gebiet ein Verbot oder ein Anreiz besonders wirkungsvoll wäre bzw. ob generelle Verbote unter Umständen nicht gerechtfertigt wären. In dieser Arbeit werden beispielhaft die Städte München, Düsseldorf und Kiel betrachtet sowie die Region München (München + Landkreis). Die Auswahl der drei Innenstädte erfolgte nach der Liste des Umweltbundesamtes, bei der die NO<sub>2</sub>-Grenzwertüberschreitungen der Jahre 2018 und 2019 angegeben wurden. Aussortiert wurden die Städte, die bereits ein Dieserverbot geplant oder umgesetzt haben. Die drei Städte mit den höchsten NO<sub>2</sub>-Werten und ohne Dieserverbot in Planung oder Umsetzung sind München, Kiel und Düsseldorf. Es ist jedoch anzumerken, dass eine Erweiterung des Modells um weitere deutsche Städte oder Landkreise jederzeit möglich wäre. Werden die Städte oder Regionen einzeln betrachtet, so werden die jeweiligen regionalen Bestandszahlen des Kraftfahrtbundesamtes (KBA) verwendet.

Tabelle 7: Bestand an Fahrzeugen (regional) nach Größenklasse

	<b>insgesamt</b>	<b>&lt; 2,8 t</b>	<b>2,8 – 3,5 t</b>	<b>3,5 – 7,5 t</b>	<b>7,5 – 12 t</b>	<b>&gt; 12 t</b>	<b>unbekannt</b>
<b>Kiel</b>	<b>8.167</b>	3.921	3.126	386	141	591	2
<b>München</b>	<b>42.913</b>	14.780	23.098	2.458	621	1.936	20
<b>Düsseldorf</b>	<b>19.692</b>	10.219	7.408	1.061	335	666	3
<b>München + LK</b>	<b>61.652</b>	21.708	31.978	3.637	958	3.343	28

Quelle: (KBA, 2021)

Meist liegen diese Daten jedoch nicht im selben Detailgrad vor, sodass die prozentuale Verteilung der Neuzulassungen auf die verschiedenen Schadstoffklassen und Kraftstoffarten von Gesamtdeutschland angenommen wird. Diese prozentuale Aufteilung der Neuzulassungen aus dem Jahr 2019 gibt somit den Status quo der Nachfrage hinsichtlich der Verteilung auf die Antriebstechnologien vor.

Tabelle 8: Neuzulassungen im Jahr 2019 (Gesamtdeutschland) nach Größenklasse und Antriebsart

	<b>Gesamt</b>	<b>&lt; 1 t</b>	<b>1 – 2 t</b>	<b>2 – 6 t</b>	<b>6 – 12 t</b>	<b>&gt; 12 t</b>
<b>Benzin</b>	<b>14.821</b>	13.909	883	12	6	9
<b>Diesel</b>	<b>318.510</b>	129.849	145.720	15.184	10.322	17.180
<b>LPG</b>	<b>1.398</b>	1.373	22	-	1	1
<b>CNG</b>	<b>1.167</b>	948	79	50	28	62
<b>Elektro</b>	<b>7.170</b>	5.863	1.288	11	5	2
<b>Hybrid</b>	<b>335</b>	181	149	4	1	-
<b>Sonstiges</b>	<b>307</b>	7	260	1	2	37
<b>Gesamt</b>	<b>343.708</b>	<b>152.130</b>	<b>148.401</b>	<b>15.262</b>	<b>10.365</b>	<b>17.291</b>

Quelle: (KBA, 2019b)

Um zu berechnen, welche Fahrzeuge aufgrund der Maßnahme getauscht werden, müssen zunächst die Fahrzeuge abgezogen werden, die ohnehin, also auch ohne die Maßnahme, getauscht würden. Es wird angenommen, dass Lastkraftwagen der Größenklassen 0 bis 3,5 t zulässige Gesamtmasse, sogenannte leichte Nutzfahrzeuge (LNF), eine Lebensdauer von 10 Jahren haben, während schwere Nutzfahrzeuge (SNF) von mehr als 3,5 t nur eine Lebensdauer von 6 Jahren haben (Wietschel et al., 2019). Dies ist auf die höhere Beladung sowie auf die unterschiedliche jährliche Fahrleistung zurückzuführen. Diese liegt bei LNFs bei durchschnittlich 19 343 km/a und bei SNFs bei durchschnittlich 27 527 km/a. Im Vergleich dazu liegen beispielsweise Sattelzugmaschinen bei durchschnittlich 93 136 km/a (KBA, 2020b). Es wird somit angenommen, dass pro Jahr 1/6 bzw. 1/10 des Bestandes ohnehin getauscht würde.

Die „von der Maßnahme betroffenen Fahrzeuge“ – also die Fahrzeuge aus dem Bestand, die aufgrund der Maßnahme ausgetauscht werden – pro Größen- und Schadstoffklasse berechnen sich in dem Modell über die Hebel automatisch. Die Berechnung wird für das Basisjahr, in diesem Fall das Jahr 2021, in dem die Maßnahme ausgeführt würde, sowie für neun Folgejahre durchgeführt. Die Anzahl der betroffenen Fahrzeuge schrumpft somit jedes Jahr um  $1/6$  bzw.  $1/10$  des Bestandes.

Hierbei gibt es beispielsweise einen Hebel, der mit „Anreiz-Quote“ betitelt wird. Dieser wird dann verändert, wenn es sich nicht um einen Austauschzwang, sondern lediglich um einen monetären Anreiz handelt. Es wird in dieser Arbeit davon ausgegangen, dass aufgrund von Unwissenheit und/oder fehlender Liquidität nicht alle Fahrzeughalter ihr Fahrzeug austauschen, obwohl es einen deutlichen finanziellen Anreiz gibt.

Aus den „betroffenen Fahrzeugen“ resultieren die „tatsächlich neu zu kaufende Fahrzeuge“. Die Neufahrzeuge werden hinsichtlich Größenklasse und Antriebsart differenziert. Die Werte werden ebenfalls für das Basisjahr sowie für neun weitere Jahre berechnet. Dabei wird mittels einer Verkauf-Neukauf-Quote ein Hebel eingesetzt, der das Verhältnis zwischen betroffenen Fahrzeugen, die abgestoßen werden, und Neukäufen festlegt. Wird angenommen, dass für jedes abzustoßende Fahrzeug ein neues gekauft wird, so wird der Hebel mit 1 angegeben. Dies steht für 100 % Wiederkauf. Im Standardmodell wird angenommen, dass dieser Hebel bei 1 liegt. Dies ist auf die beiden gegensätzlichen Effekte zurückzuführen, dass die Anzahl der Lastkraftwagen aufgrund des steigenden Bedarfs nach Logistikdienstleistungen grundsätzlich steigt, jedoch auch darauf, dass 10 % der betroffenen Fahrten im Wirtschaftsverkehr durch Optimierung der Routen und Leerfahrtenvermeidung entfallen werden (Nagel & Bächlin, 2006).

## (2) Technische Parameter

Zur Bestimmung der Treibhausgasemissionen, die beim Betrieb von Lastkraftwagen in die Luft ausgestoßen werden, wird der Energieverbrauch eines Fahrzeugs benötigt. Je nach Antriebsart, Alter bzw. Schadstoffklasse und Größe eines Lkw ist dieser unterschiedlich. Das Handbuch für Emissionsfaktoren (HBEFA) stellt Emissionsfaktoren für leichte und schwere Nutzfahrzeuge differenziert nach Emissionskonzepten (Euro 0 bis Euro 6/VI) zur Verfügung. Die für diese Arbeit benötigten Energieverbräuche wurden daraus entnommen und in Kilowattstunde pro Kilometer umgerechnet.

Tabelle 9: Energieverbrauch von Lkw nach Antriebsart, Schadstoffklasse und Größenklasse in kWh/km

	< 2,8 t	2,8 – 3,5 t	3,5 – 7,5 t	7,5 – 12 t	> 12 t
<b>Benzin</b>	0,64	0,88	1,47	1,76	2,16
<b>Diesel Euro VI</b>	0,56	0,76	1,27	1,53	1,88
<b>LPG</b>	0,81	1,11	1,85	2,23	2,73
<b>CNG</b>	0,49	0,72	1,45	1,74	2,29
<b>Elektro</b>	0,23	0,29	0,62	0,75	0,91
<b>Hybrid</b>	0,43	0,59	1,04	1,26	1,53
<b>Sonstiges</b>	0,56	0,76	0,95	1,16	1,41
<b>Diesel Euro I</b>	0,67	0,89	1,40	1,78	2,13
<b>Diesel Euro II</b>	0,64	0,86	1,32	1,72	2,03
<b>Diesel Euro III</b>	0,55	0,74	1,36	1,74	2,09
<b>Diesel Euro IV</b>	0,54	0,75	1,36	1,64	1,98
<b>Diesel Euro V</b>	0,54	0,80	1,29	1,55	1,90
<b>Diesel EEV</b>	0,54	0,80	1,29	1,55	1,90

Quelle: (UBA, 2021d)

Da das Handbuch für Emissionsfaktoren bezüglich Lastkraftwagen nicht vollständig ist, werden sämtliche Lücken mit der Tabelle 10 geschlossen. Diese stellt den Energiegehalt von Kraftstoffen dar, womit die Energieverbräuche für Lkw, die mit Benzin und LPG angetrieben werden, im Verhältnis zu Diesel berechnet werden können.

Tabelle 10: Energiegehalt von Kraftstoffen

	<b>Benzin</b>	<b>Diesel</b>	<b>LPG</b>	<b>CNG</b>
<b>Energiegehalt</b>	8,6	9,9	6,8	13,3
<b>Einheit</b>	Liter	Liter	Liter	Kg

Quelle: (Zukunft Erdgas, 2019)

Daraus resultierend können die Gesamtemissionen, die sowohl bei der Herstellung der Kraftstoffe als auch beim Betrieb der Fahrzeuge anfallen, wie folgt beschrieben werden. Der Emissionsfaktor von Elektrofahrzeugen wird häufig mit 0 angegeben, da vorausgesetzt wird, dass diese mit erneuerbaren Energien angetrieben werden. Dies ist jedoch in

der Realität eher selten, sodass in dieser Analyse zunächst der Emissionsfaktor resultierend aus dem europäischen Strommix verwendet wird.

Tabelle 11: Well-to-Wheel-Emissionen pro Kraftstoff, Größenklasse und Schadstoffklasse

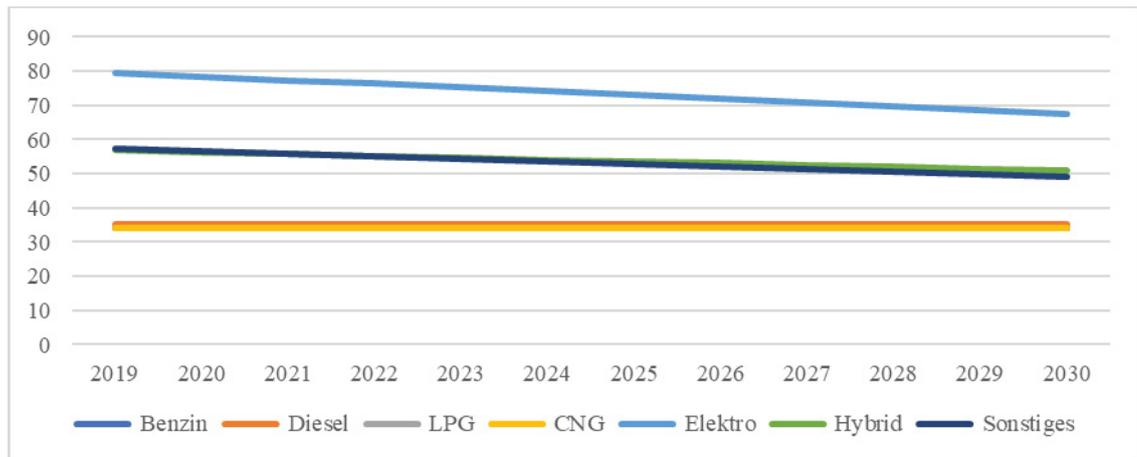
	< 2,8 t	2,8 – 3,5 t	3,5 – 7,5 t	7,5 – 12 t	> 12 t
<b>Benzin</b>	201	276	460	553	678
<b>Diesel Euro VI</b>	178	244	407	488	599
<b>LPG</b>	216	296	494	593	728
<b>CNG</b>	130	192	389	467	615
<b>Elektro</b>	42	53	112	137	165
<b>Hybrid</b>	121	165	286	345	422
<b>Sonstiges</b>	238	327	409	498	603
<b>Diesel Euro I</b>	215	284	447	568	679
<b>Diesel Euro II</b>	205	274	422	548	650
<b>Diesel Euro III</b>	176	238	434	557	668
<b>Diesel Euro IV</b>	174	240	434	523	633
<b>Diesel Euro V</b>	173	254	411	496	606
<b>Diesel EEV</b>	173	254	411	496	606

Quelle: (UBA, 2021d)

Nicht nur die Emissionen der Lastkraftwagen im Betrieb müssen berechnet werden, sondern ebenfalls die THG-Emissionen der Produktion von Fahrzeugen sowie der neu zu errichtenden Infrastruktur.

Die Emissionen, die bei der Herstellung eines Fahrzeugs anfallen, können mit der folgenden Tabelle beschrieben werden. Da es sich bei Diesel-, Benzin- und Erdgasfahrzeugen um bereits sehr ausgereifte Technologien handelt, wurde angenommen, dass bei der Produktion keine weiteren Emissionen aufgrund von Effizienzpotentialen eingespart werden können. Im Gegensatz dazu ist bei Elektro-, Hybrid- und Wasserstoff-Antrieben noch wesentlich mehr Einsparpotential vorhanden.

Abbildung 37: Herstellungsemissionen eines Lkw-Fahrzeugs (in gCO<sub>2</sub>-Äq./km)



Quelle: eigene Darstellung, vgl. mit (Wietschel et al., 2019) und (ICCT, 2018).

Dabei ist deutlich zu erkennen, dass besonders neuere Technologien, wie Wasserstoff- und Elektrofahrzeuge, in der Herstellung noch wesentlich mehr Treibhausgase emittieren als herkömmliche Technologien und auch im Jahr 2030 weiterhin deutlich hinter den Verbrennern zurückliegen werden.

Neben den Emissionen der Fahrzeugherstellung müssen auch neue Tankinfrastrukturen gebaut werden. Diese Emissionen werden generalistisch mit 0,76 Tsd. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äq. pro Tankstelle angegeben. Der Wert berechnet sich aus der Lebensdauer einer Tankstelle von 60 Jahren und den Emissionen durch den Bau und Unterhalt der Straßenverkehrsinfrastruktur aus dem Jahr 2008 (UBA, 2013) sowie aus der Anzahl der Tankstellen des Jahres 2008 (ADAC, 2021b).

### (3) Wirtschaftliche Parameter

Zur Bestimmung der Gesamtkosten eines Lastkraftwagens werden in der folgenden Tabelle alle Kostenbestandteile einzeln aufgeführt. Neben den Anschaffungskosten umfassen diese auch Wartungs- und Reparaturkosten, jährliche Kraftstoffkosten für leichte und schwere Nutzfahrzeuge, Lkw-Maut, Kfz-Steuer sowie Subventionen und Förderungen.

Tabelle 12: Kostenparameter Lastkraftwagen

	Diesel	Benzin	LPG	CNG	Elektro	Hybrid	Sonstige
Fertigung und Material in €	66.700	64.164	70.251	73.500	160.000	112.082	199.339
Wartungs- und Reparaturkosten in €/a	2.500	2.604	2.865	3.000	1.500	2.052	938
Kraftstoffkosten LNF in €/a	5.000	6.692	3.462	3.300	3.600	5.146	7.308
Kraftstoffkosten SNF in €/a	7.500	10.038	5.192	4.950	5.400	7.719	10.962
Lkw-Maut SNF in €/a	279	279	279	-	-	-	-
Lkw-Maut LNF in €/a	-	-	-	-	-	-	-
Subventionen/ Förderungen in €	-	-	-	8.000	12.000	-	12.000
Kfz-Steuer in €/a	290	290	290	290	-	290	-
<b>Kosten Anschaffung in €</b>	<b>66.700</b>	<b>64.164</b>	<b>70.251</b>	<b>65.500</b>	<b>148.000</b>	<b>112.082</b>	<b>187.339</b>
<b>Kosten Betrieb pro Jahr in €/a</b>	<b>8.069</b>	<b>9.865</b>	<b>6.895</b>	<b>6.590</b>	<b>5.100</b>	<b>7.488</b>	<b>8.245</b>
<b>Gesamtkosten Basisjahr in €</b>	<b>66.700</b>	<b>65.960</b>	<b>69.077</b>	<b>64.021</b>	<b>145.031</b>	<b>111.501</b>	<b>187.515</b>
<b>Durchschnittskosten SNF über 6 Jahre</b>	<b>19.186</b>	<b>20.559</b>	<b>18.604</b>	<b>17.507</b>	<b>29.767</b>	<b>26.169</b>	<b>39.468</b>
<b>Durchschnittskosten LNF über 10 Jahre</b>	<b>14.133</b>	<b>15.699</b>	<b>13.282</b>	<b>12.545</b>	<b>18.555</b>	<b>17.678</b>	<b>25.276</b>

Quelle: CEPiR-Modell, eigene Darstellung.<sup>4</sup>

Recherchiert man Kosten für Lkw, so ist vor allem zu beachten, dass in vielen Studien die großen 40-Tonnen-Sattelzugmaschinen betrachtet werden. Die Kosten für Lastkraftwagen in einer Bandbreite von 0 bis 12 t (und mehr) liegen weit darunter.

Um bestimmen zu können, wie viele Fahrzeuge tatsächlich in Deutschland unterwegs sind, ist es wichtig zu wissen, wie viel Anteil der deutsche Fahrzeugbestand daran hat. Es wird darüber hinaus angenommen, dass die Verteilung des Bestandes auf die Größenklassen, Antriebsarten und Schadstoffklassen im Ausland im Schnitt, dem von Deutschland entspricht. Die Marktanteile von deutschen bzw. ausländischen Fahrzeugen an den Lastkraftwagen auf deutschen Straßen sind in Tabelle 13 angegeben.

<sup>4</sup> Quellen: (Hacker et al., 2015), (Scholwin, 2021), (DLR, 2013), (Deloitte, 2017), (Kühn et al., 2017), (Wietschel et al., 2019), (BdF, 2021), (Strategy&, 2020a), (Oeko-Institut e.V. & ICCT, 2020), (Toll-Collect, 2021), (Verkehrsrundschau, 2018), (BMW, 2021), (Zoll, 2021)

Tabelle 13: Marktanteile deutscher/ausländischer Fahrzeuge in Deutschland

	Marktanteile in %
<b>Ausländischer Fahrzeuge</b>	42
<b>Deutscher Fahrzeuge</b>	58

Quelle: (Verkehrsrundschau, 2017)

Zur Berechnung der Kraftstoffpreise, Steuerwirkungen und auch der Umsatzveränderungen bei Rohstoffen werden die Preisbestandteile pro Kraftstoffart aufgeschlüsselt. Es wird ein einheitlicher Deckungsbeitrag von 10 % angenommen (Economic Times, 2020).

Tabelle 14: Kraftstoffpreise und Preisbestandteile

	Benzin	Diesel	LPG	CNG	Elektro	Hybrid	Sonstige	Einheit
<b>Preis 2020</b>	18,80	14,97	9,84	9,44	28,22	23,51	28,50	ct/kWh
<b>Energiesteuer</b>	7,40	4,80	2,12	1,39	2,05	4,73	-	ct/kWh
<b>Mehrwertsteuer 19%</b>	3,57	2,84	1,87	1,79	5,36	4,47	5,42	ct/kWh
<b>Deckungsbeitrag 10%</b>	1,88	1,50	0,98	0,94	2,82	2,35	2,85	ct/kWh
<b>Produktpreis</b>	5,94	5,83	4,87	5,31	17,98	11,96	20,24	ct/kWh

Quelle: CEPiR-Modell, eigene Darstellung.<sup>5</sup>

Kaufanreize sorgen meist für einen starken Umsatzanstieg bei der Herstellung. Die Höhe der Margen wurde im Durchschnitt für die Infrastruktur- und Fahrzeughersteller angenommen. Für Fahrzeuge wird eine durchschnittliche Marge von 9,5 % und für Infrastruktur von 5,7 % angenommen.

Tabelle 15: Margen für die Herstellung von Fahrzeugen und Infrastruktur

	Marge in %
<b>Fahrzeuge</b>	9,5
<b>Infrastruktur</b>	5,7

Quelle: CEPiR-Modell, eigene Darstellung.<sup>6</sup>

Je nach Kraftstoffart werden unterschiedlich viele Tankstellen benötigt. Wird eine Antriebsart stark ausgebaut, ist ein wesentlicher Zubau an Tankstellen notwendig. Dieser

<sup>5</sup> Quellen: (PwC, 2016), (Zukunft Erdgas, 2019), (BfJ, 2020a), (BfJ, 2021), (Hacker et al., 2015), (ADAC, 2021a), (Economic Times, 2020)

<sup>6</sup> Quellen: (Economic Times, 2020), (Strategy&, 2020b), (Sahu, 2017), (Maier, 2020), (Tesla, 2020)

lässt sich aus dem jeweiligen Verhältnis von bereits existierenden Fahrzeugen zu Tankstellen errechnen. Für Dieselfahrzeuge wird angenommen, dass bereits genügend Infrastruktur besteht. Die berechneten notwendigen Tankstellen werden in einem zweiten Schritt mit dem Finanzierungsbedarf pro Tankstelle für diese Antriebsart multipliziert. In Tabelle 16 ist deutlich zu erkennen, dass Tankstelleninfrastruktur für Wasserstoff (Sonstige) deutlich teurer ist als für die anderen Antriebsarten.

Tabelle 16: Notwendige Tankstellen und Infrastrukturkosten

	Anzahl Neukauf	Notwendige Tankstellen (Ratio)	Notwendige Tankstellen (absolut)	Kosten pro Fahrzeug in €	Gesamtkosten
<b>Benzin</b>	38.284	0,00028	11	42	1.614.464
<b>Diesel</b>	1.879.243				
<b>LPG</b>	3.533	0,01324	47	395	1.394.461
<b>CNG</b>	6.473	0,00944	61	2.830	18.320.192
<b>Elektro</b>	18.909	0,18519	3.502	3.000	56.727.445
<b>Hybrid</b>	1.117	0,09273	104	1.521	1.699.714
<b>Sonstige</b>	990	0,02280	23	15.909	15.752.074

Quelle: eigene Berechnung vgl. mit (Kehler, 2021)

Um berechnen zu können, wie hoch der Anteil der deutschen Produktion ist, wird der Marktanteil deutscher Fahrzeughersteller verwendet. Dieser liegt bei 56 % (KBA, 2020a). In der Sensitivitätsanalyse wird dieser Anteil variiert, um zu verdeutlichen, dass sich manche Maßnahmen nur deshalb positiv rechnen könnten, weil die Produktion und somit die Herstellungsemissionen ins Ausland verlagert werden, obwohl sie global gesehen mehr Treibhausgasemissionen produzieren als vermeiden. Für die Infrastrukturhersteller wird angenommen, dass 50 % deutsche und 50 % ausländische Hersteller auf dem Markt agieren.

Zur Berechnung des Restwertes eines Fahrzeugs wird angenommen, dass dieser nach 6, 8 bzw. 10 Jahren bei 19, 15 bzw. 11 % des Kaufwertes liegt. Für schwere Lastkraftwagen wird eine Lebensdauer von 6 Jahren angenommen (Wietschel et al., 2019). Nach diesen sechs Jahren wird pauschal ein Restwert von 19 % des Einkaufswertes unterstellt. Da besonders die Fahrzeuge mit schlechteren Schadstoffklassen älter als 6 Jahre sind, wird

für die Schadstoffklassen III und IV angenommen, dass das Fahrzeugalter bei der Verschrottung fortgeschrittener ist. Der Restwert wird daher angepasst. Es wird daher angenommen, dass pro weiterem Jahr ein Fahrzeug weitere 2 % des Restwertes verliert. Da die Schadstoffklasse V im Jahr 2011 eingeführt wurde und angenommen werden kann, dass in absehbarer Zeit danach nur technisch angepasste Fahrzeuge hergestellt werden, wird für die Schadstoffklasse IV ein durchschnittliches Alter von 8 Jahren veranschlagt und somit ein Restwert von 15 %. Äquivalent gilt für die Schadstoffklasse III ein Restwert von 11 % (Hacker et al., 2015).

Aufgrund der wirtschaftspolitischen Maßnahmen ist anzunehmen, dass die zu verkaufenden Fahrzeuge erheblich an Wert verlieren und zumindest in Deutschland keine Nachfrage mehr besteht. Ein Verkauf ins Ausland wird bei der hohen Anzahl ebenfalls schwierig werden, da die Nachfrage in den vergangenen Jahren ohnehin rückläufig ist (Eurotransport, 2015). Es wird daher davon ausgegangen, dass der Restwert auf 0 sinken würde. Da jedoch ab 2021 eine Abwrackprämie eingeführt wurde, bei der man für einen alten EEV- oder Euro-V-Lkw 15.000 Euro bzw. für einen Euro-III- oder Euro-IV-Lkw 10.000 Euro im Gegenzug erhält, wird dies als Restwert veranschlagt (Eurotransport, 2020). Es wird mit der Differenz aus dem Restwert der Lastkraftwagen ohne die Politik (also den 19 % des Einkaufspreises) und der Ablösesumme durch die Verschrottung berechnet, ob an dieser Stelle ein Gewinn oder ein Verlust für die Logistikunternehmen entsteht.

Für die jahresscharfe Betrachtung der Kosten ist es notwendig, Investitionen mittels der Annuitätenmethode auf die Jahre der Lebensdauer zu verteilen (UBA, 2012).

### *6.1.3 Berechnung der Treibhausgaseffekte im Standardmodell*

Die Berechnung der Treibhausgaseffekte wird je Akteur einzeln berechnet.

#### (1) Logistik

Bei einem Austausch von alten Verbrennern durch neue Verbrenner oder Fahrzeuge mit alternativen Antriebstechnologien wird in der Theorie ein hoher CO<sub>2</sub>-Ausstoß durch einen niedrigeren ersetzt. Dies ist jedoch in der Praxis nicht zwangsläufig der Fall, da die älteren Fahrzeuge der Schadstoffklassen III, IV und V einen geringeren CO<sub>2</sub>-Ausstoß haben als die Schadstoffklasse VI. Die Maßnahmen werden keinen direkten Einfluss auf die

Anzahl der Lastkraftwagen, die Strecke oder die Häufigkeit der Fahrten nehmen, sondern lediglich die THG-Einsparungen aufgrund eines Austauschs der Fahrzeuge bestimmen.

Für die Berechnung der wegfallenden Treibhausgase von alten Fahrzeugen wird die Summe der Fahrzeuge, die nicht mehr fahren dürfen, mit deren verursachten Emissionen multipliziert.

$\Sigma (KAT_{ij} * \text{ØFS} * \text{ØEM}_{ij})$		(1)
KAT	LKW-Kategorie	
Index i	Größenklasse	
Index j	Schadstoffklasse	
FS	Fahrstrecke in km	
EM	Emissionen in CO <sub>2</sub> -Äq. pro km	

Um eine möglichst realistische Annäherung zu berechnen, ist es notwendig, zwischen den unterschiedlichen Größenklassen der Lastkraftwagen und den zugehörigen Schadstoffklassen zu unterscheiden, da die Energieverbräuche und somit auch die Emissionen stark voneinander abweichen können.

Für die Berechnung der Treibhausgase aufgrund von Neukäufen von Euro-VI-Dieselfahrzeugen und Fahrzeugen mit alternativen Antrieben wird die Summe der Fahrzeuge mit den durch sie verursachten Emissionen multipliziert. Da die Käufer der Neufahrzeuge hinsichtlich der Antriebsart der Neufahrzeuge nicht weiter beeinflusst werden, kann – unter der Annahme, dass zunächst keine Nachfrageverschiebung zustande kommt – die Verteilung der Neuzulassungen auf die verschiedenen Antriebsarten aus den vorherigen Jahren angenommen werden.

$\Sigma (ALT_{ij} * \text{ØFS} * \text{ØEM}_{ij})$		(2)
ALT	Alternativen	
Index i	Größenklasse	
Index j	Emissionsklasse	
FS	Fahrstrecke in km	
EM	Emissionen in CO <sub>2</sub> -Äq. pro km	

## (2) Energiewirtschaft

Die Herstellung der Kraftstoffe wird bereits über WTW-Emissionen bei der Logistik eingerechnet.

## (3) Fahrzeughersteller

Auch die CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Herstellung von Lkw mit alternativen Antrieben im Gegensatz zur Herstellung von herkömmlichen Lkw können einen positiven oder negativen Effekt auf die Gesamtbilanz haben. Bei den schweren Lkw spielt die Herstellung nur eine sehr untergeordnete Rolle, während bei leichten Lkw die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Herstellung wesentlich größere Unterschiede ausmachen können (Wietschel et al., 2019).

Batteriebetriebene Motoren wiegen viel, haben meist eine geringe Reichweite und ihre Herstellung setzt vergleichsweise viel CO<sub>2</sub> frei (BDEW, 2020). Auf der Grundlage von aktuellen Studien geht man von 40 bis 100 kg/kWh aus. Die gemittelte Schätzung liegt bei 75 kg/kWh (Emilsson & Dahllöf, 2019). Im Vergleich zum konventionellen Fahrzeug entfallen beim Elektrofahrzeug Bauteile wie Verbrennungskraftmaschine, Getriebe oder Abgasstrang; Materialeinsatz und Gewicht sind somit geringer (Kutschera et al., 2014). Die höchsten vorgelagerten Emissionen von Wasserstoff-Lkw entstehen bei der Produktion der Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge, da hier der Materialaufwand klar am höchsten ist. Die Herstellungsemissionen bei Erdgas-Lkw bzw. LNG-Lkw weichen nicht von denen bei Diesel-Lkw ab. Die Herstellungsemissionen von Biomethan-Lkw liegen etwas höher als die von Diesel-Lkw. Für Benzin-Lkw und LPG-Lkw werden dieselben Herstellungsemissionen angenommen wie für Diesel-Lkw (Wietschel et al., 2019).

Um die Gesamtemissionen zu berechnen, die aufgrund der Maßnahme bei der Herstellung von Tank-Infrastrukturen produziert werden, werden die Gesamtzahlen der Fahrzeuge, die infolge der politisch gesetzten Anreize gekauft werden, mit den Herstellungsemissionen multipliziert. Davon abgezogen werden die Fahrzeuge, die ohnehin gekauft würden, und das Ergebnis wird mit den durch sie verursachten Emissionen multipliziert.

Die Anzahl der Fahrzeuge, die aufgrund der politischen Maßnahme gekauft werden, mal ihre Herstellungsemissionen berechnet sich wie folgt:

$\Sigma(\text{KAT} * \text{ØFS} * \text{ØEM})$		(3)
KAT	LKW-Kategorie	

FS	Fahrstrecke in km	
EM	Emissionen in CO <sub>2</sub> -Äq. pro km	

Da jedoch nicht der gesamte Anteil der Fertigung in Deutschland stattfindet, wird lediglich die in Deutschland stattfindende Produktion mit ihren Treibhausgasemissionen in die Gesamtrechnung eingehen. Darüber hinaus wird auch aus dem Ausland eine Nachfrage bei deutschen Herstellern erfolgen, sofern die Maßnahme die Nachfrage des Auslandes verändert.

Davon subtrahiert werden die Fahrzeuge, die ohnehin gekauft würden, mal ihre Herstellungsemissionen:

$\Sigma(\text{ALT} * \text{ØFS} * \text{ØEM})$		(4)
ALT	Alternativen	

Auch hier gilt, dass aufgrund der Marktanteile nur die in Deutschland stattfindenden THG-Emissionen betrachtet werden.

#### (4) Infrastrukturhersteller

In den meisten Studien werden Infrastrukturkosten und -emissionen nicht betrachtet, da valide Daten zu Lade- und Tankinfrastruktur aktuell nicht bei allen zu betrachtenden Kraftstoffarten verfügbar sind (Wietschel et al., 2019). Eine generelle Nichtbetrachtung erweckt jedoch den Eindruck, dass der Neubau von Infrastrukturen für alternative Kraftstoffe keinerlei Emissionen und Kosten verursache. Da jedoch sowohl Emissionen als auch Kosten auftreten würden, werden im Folgenden generelle Werte für Emissionen und Kosten angenommen. Diese Werte gelten allgemein für alle neuen Tankinfrastrukturen, unabhängig von der Technologie (Strom, LNG, Erdgas etc.).

Da die Infrastruktur für jegliche alternativen Kraftstoffe unzureichend ist, müssen hier keine ohnehin getätigten Investitionen von der Gesamtsumme abgezogen werden. Laut Umweltbundesamt lagen die CO<sub>2</sub>-Äq.-Emissionen durch den Bau und Unterhalt der Straßenverkehrsinfrastruktur im Jahr 2008 nach Verursachergruppen bei 15,4 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äq. Der Anteil von Tankstellen lag bei 1,2 %. Gemäß Umweltbundesamt (UBA) liegt die Lebensdauer von Tankstellen bei 60 Jahren (UBA, 2013). Die Anzahl an Tankstellen belief sich im Jahr 2018 auf 14 118 (ADAC, 2021). Wird an dieser Stelle von 60

Jahren Lebensdauer ausgegangen, so mussten 1/60 der Tankstellen neu gebaut werden. Pro Tankstelle ergeben sich demnach Emissionen von 763 t CO<sub>2</sub>-Äq. Für die alternativen Kraftstoffe müssen viele Tankstellen erweitert oder Teile ausgetauscht werden. Aufgrund der Tatsache, dass die überwiegende Anzahl an Elektrotankstellen für Lkw zu schwach ist, müssen auch für diese Fahrzeuge neue Infrastrukturen aufgebaut werden (Eurotransport, 2019).

Die Herstellungsemissionen für die Infrastruktur können demnach durch die Anzahl der Tankstellen, die gebaut werden müssen, multipliziert mit den Emissionen pro gebaute Tankstelle, berechnet werden. Dabei muss zunächst berechnet werden, wie viele Tankstellen pro Kraftstoff hinzugebaut werden müssen. Basis hierfür ist die Anzahl der bereits berechneten Neukäufe an Fahrzeugen. Aus dem bestehenden Verhältnis von Fahrzeugen zu Tankstellen lässt sich dann berechnen, wie viele weitere Tankstellen benötigt werden. Diese Anzahlen an benötigten Tankstellen werden dann mit den Emissionen für eine Tankstelle multipliziert. Daraus resultieren die Emissionen pro Antriebstechnologie.

<b>TS * EM</b>		(5)
TS	Anzahl der Tankstellen	
EM	Emissionen in CO <sub>2</sub> -Äq. pro km	

Da auch hierbei angenommen werden muss, dass nicht der gesamte Anteil in Deutschland gefertigt wird, wird mit einem Marktanteil von 50 % gerechnet. Aufgrund der geringen Daten über die Marktstruktur für Tankstelleninfrastruktur wurde diese Annahme analog zu den Werten für Anbieter von Ladeinfrastruktur festgelegt.

#### (5) Ausland

Für die Berechnung der Treibhausgasemissionen für die Gruppe Ausland werden alle THG-Emissionen der verschiedenen Akteure im Ausland addiert. Die Berechnung verläuft äquivalent zu den deutschen Gruppen getrennt, wurde jedoch weniger detailliert recherchiert und mit allgemeinen Annahmen versehen. Beispielsweise wurde angenommen, dass die prozentuale Nachfrage nach neuen Antriebstechnologien äquivalent zur deutschen Nachfrage ist, da das Ausland als Gesamtgruppe betrachtet wird. Insgesamt ist die Nachfrage im Ausland sehr heterogen. Beispielsweise sind die Marktanteile neuer Technologien in Frankreich anders als in Polen. Während in Polen die höchsten LPG-

Neuzulassungen bei leichten Nutzfahrzeugen vorliegen, führt Frankreich das Feld bei den Elektro-Lkw an (EAFO, 2020). Da jedoch lediglich die Anzahl der Fahrzeuge betrachtet wird, die in und durch Deutschland fährt, müssen sich die Logistikunternehmen aus dem Ausland bei der Wahl der Fahrzeugtechnologien an den jeweiligen Spezifika der Tankstelleninfrastruktur in Deutschland orientieren. Es kann somit angenommen werden, dass die Marktanteile im Ausland ähnlich der Verteilung der Nachfrage in Deutschland sind. Laut dem European Alternative Fuels Observatory (EAFO) liegt Deutschland im Schnitt bei allen Kraftstofftechnologien unter den besten fünf in der EU. Es wird im Durchschnitt ein ähnlicher Anteil von alternativen Kraftstoffen bei den umliegenden Staaten unterstellt (EAFO, 2020).

Die Auswirkungen der Maßnahmen auf das Ausland werden jedoch mittels der Hebel gesteuert. Nur wenn eine Maßnahme auf den Fernverkehr wirkt, wird angenommen, dass auch das Ausland seine Fahrzeugflotte austauschen muss, um in Deutschland fahren zu dürfen. Bei Maßnahmen, die nur den Regional- oder Nahverkehr betreffen, wird demgegenüber keine Auswirkung auf die ausländische Fahrzeugflotte angenommen, da ein Umgehen der Begrenzungen möglich ist. Ausnahme davon ist die Maßnahme 8 – das Bonus-Malus-System. Diese Maßnahme wirkt zwar auch im Fernverkehr, hat jedoch keinerlei Auswirkungen auf die Nachfrage des Auslandes. Dies ist auf den Fördermechanismus zurückzuführen, der lediglich deutschen Fahrzeughaltern einen Bonus verspricht bzw. einen Malus einfordert.

Somit teilt sich der Treibhausgaseneffekt des Auslands auf drei Effekte auf:

- 1) die THG-Einsparung in Deutschland durch den Austausch der Flotte ausländischer Fahrzeuge, die in Deutschland fahren und dort weniger Emissionen verursachen. Die THG-Einsparung in Deutschland kann äquivalent zur Berechnung bei deutschen Logistikunternehmen mittels Anwendung der Marktanteile ermittelt werden.
- 2) den THG-Anstieg durch die Mehrproduktion von Fahrzeugen im Ausland aus deutscher und ausländischer Nachfrage. Der THG-Anstieg im Ausland aufgrund der (Mehr-)Fertigung von Fahrzeugen kann äquivalent zur Berechnung bei deutschen Fahrzeugherstellern mittels Anwendung der Marktanteile ermittelt werden.

- 3) den THG-Anstieg durch die Mehrproduktion von Infrastruktur im Ausland aus deutscher Nachfrage. Der THG-Anstieg im Ausland aufgrund der (Mehr-)Fertigung von Infrastruktur kann äquivalent zur Berechnung bei deutschen Fahrzeugherstellern mittels Anwendung der Prozentsätze ermittelt werden.

Da in dieser Arbeit lediglich die Treibhausgasemissionen innerhalb Deutschlands betrachtet werden, wird nur der positive Effekt (siehe 1), also die THG-Reduktion beim Betrieb im Straßenverkehr, verbucht. Es wird darauf hingewiesen, dass die Politik im Ausland zu einer THG-Erhöhung führt. Es ist anzunehmen, dass die ausländischen Fahrzeuge nicht nur in Deutschland fahren, sondern ebenfalls im Ausland einen positiven THG-Effekt verursachen. Dies wird jedoch in dieser Arbeit nicht weiter beachtet.

#### (6) Staat

Im Standardmodell hat der Staat keinerlei wesentliche Reduktion oder einen Anstieg der THG-Emissionen zu verzeichnen.

### 6.1.4 Berechnung der Kosteneffekte im Standardmodell

#### (1) Logistik

Es werden, wie bei den eingesparten Treibhausgasemissionen, die Anzahlen der zu verschrottenden Fahrzeuge mit den prognostizierten Neuzulassungen im gleichen Verhältnis wie im Jahr 2019 unterstellt. Im Standardmodell wird angenommen, dass es keine Anreize an der bisherigen Kaufstrategie, also dem Status-quo-Nachfrageverlauf, gibt, etwas zu ändern, sodass der überwiegende Anteil weiterhin Dieselfahrzeuge kaufen wird. Bei einigen Maßnahmen wird jedoch eine Nachfrageverschiebung angenommen, die sich auch auf zukünftige Käufe auswirkt (siehe Kapitel 6.1.6).

Es entsteht somit für die Schadstoffklassen III, V und EEV ein Gewinn bei der Verschrottung, da der Restwert kleiner als die Abwrackprämie ist. Für die Schadstoffklasse IV hingegen entsteht ein geringer Verlust.

Die Berechnung sieht folgendermaßen aus:

$\Sigma ANI * (WEI - API) + \Sigma ALTI * Kok$		(6)
WE	Durchschnittlicher Wert eines alten Fahrzeugs (ohne Politik)	
AP	Abwrackprämie für einen alten Lkw (mit Politik)	

Index l	Schadstoffklasse des alten Lkw	
ALT	Alternativen	
KO	Kosten für Neukauf	
Index k	Antriebsart j	

Dem gegenüber stehen die Kosten, die Logistikunternehmen für die neuen Fahrzeuge investieren müssen. Diese Kosten teilen sich auf in einmalige Kosten, wie die Anschaffung des Fahrzeugs abzüglich der Förderungen und Subventionen und die laufenden Betriebskosten, die jährlich anfallen. Die laufenden Betriebskosten sind abhängig von den Wartungs- und Reparaturkosten, den Kraftstoffkosten, der Lkw-Maut und der Kfz-Steuer. Weitere Effekte (z. B. AdBlue-Kosten und Versicherungskosten) werden in den allgemeinen Annahmen als konstante Einflussfaktoren betrachtet und nicht in die Berechnung einbezogen (Wietschel et al., 2019).

<b><math>\Sigma \text{ALT}_k * \text{Kok}</math></b>		(7)
ALT	Alternativen	
KO	Kosten für Neukauf	
Index k	Antriebsart k	

## (2) Energiewirtschaft

Die Energiewirtschaft profitiert zum einen vom steigenden Absatz der alternativen Kraftstoffe. Zum anderen gibt es vor allem beim Diesel starke Umsatzeinbußen, weil der Verbrauch der Neufahrzeuge deutlich geringer ist. Es entsteht darüber hinaus die Notwendigkeit, dass die Tankstelleninfrastruktur für die steigende Nachfrage nach alternativen Kraftstoffen ausgebaut wird. Dieser Ausbau birgt zwar Absatzchancen und neue Geschäftsmodelle, jedoch zu Beginn auch hohe Investitionskosten. Wer Ladeinfrastruktur etc. für alternative Antriebstechnologien aufbauen soll, ist derzeit noch umstritten. Jedoch ist es naheliegend, dass vor allem die Energiewirtschaft ein starker Partner sein muss, sodass diese Verantwortung innerhalb dieser Arbeit als energiewirtschaftliche Aufgabe verstanden wird. Die Kosten für die Energiewirtschaft lassen sich somit in zwei Bereiche unterteilen: erstens die Investitionskosten für die Infrastruktur alternativer Kraftstoffe und zweitens die Veränderung des Kraftstoffumsatzes.

Die Investitionskosten für die Infrastruktur alternativer Kraftstoffe lassen sich mit der folgenden Formel bestimmen:

<b><math>\Sigma INF_m * KO_m</math></b>		(8)
INF	Infrastruktur für Antrieb m	
Index m	Antriebstechnologie	
KO	Kosten	

Dabei muss zunächst berechnet werden, wie viele Tankstellen pro Kraftstoff hinzugebaut werden müssen. Basis ist die Anzahl der bereits berechneten Neukäufe an Fahrzeugen. Aus dem bestehenden Verhältnis von Fahrzeugen zu Tankstellen lässt sich dann berechnen, wie viele weitere Tankstellen benötigt werden. Diese Anzahlen an benötigten Tankstellen werden danach mit den durchschnittlichen Kosten für eine Tankstelle für diese Antriebstechnologie multipliziert. Daraus resultieren die Infrastrukturkosten pro Antriebstechnologie. Summiert man diese Kosten, ergibt die Zahl die Gesamtkosten für den Neubau bzw. für die Erweiterung bestehender Tankstellen.

Darüber hinaus muss betrachtet werden, inwieweit sich die Umsätze aus dem Kraftstoffabsatz von Diesel und den alternativen Kraftstoffen verändern. Da alte Dieselfahrzeuge mehr verbrauchen als neue, geht die Nachfrage insgesamt zurück. Da jedoch alternative Kraftstoffe pro Kilowattstunde häufig teurer als Dieselmotorkraftstoff sind, wird dieser negative Trend geschmälert. Allerdings ist an dieser Stelle vor allem der Deckungsbeitrag der Kraftstoffe wichtig, denn der Kraftstoffpreis setzt sich aus vielen Bestandteilen zusammen, die für diese Rechnung keinerlei Relevanz haben. Kraftstoffpreise beinhalten eine Energiesteuer, die Mehrwertsteuer von 19 %, den Produktpreis (also die Herstellungs- und Einkaufspreise) sowie den Deckungsbeitrag.

Die Berechnung für die Veränderung des Kraftstoffumsatzes sieht wie folgt aus:

<b><math>\Delta UD + \Delta UALT</math></b>		(9)
UD	Umsatz aus Dieselmotorkraftstoff	
UALT	Umsatz aus alternativen Kraftstoffen	
$\Delta$	Veränderung	

Für die Berechnung wurde ein einheitlicher Deckungsbeitrag von 10 % angenommen (Economic Times, 2020). Diese Deckungsbeiträge werden in Cent pro Kilowattstunde

angegeben und müssen mit den spezifischen Energieverbräuchen der Lkw multipliziert werden. Der Verbrauch variiert zwischen den Antriebstechnologien. Zudem wird zwischen den unterschiedlichen Schadstoffklassen unterschieden.

Um den Energieverbrauch pro Jahr zu bestimmen, muss die durchschnittliche Fahrleistung in die Berechnung einbezogen werden. Daraus resultieren die Kraftstoffkosten pro Fahrzeug in einem Jahr, sodass diese Werte mit den Anzahlen der Neukäufe pro Kraftstofftechnologie multipliziert werden müssen.

### (3) Fahrzeughersteller

Die Fahrzeughersteller profitieren insoweit von den Maßnahmen, als die meisten davon zum Kauf anregen und den Absatz stärken. Unter der Annahme, dass zum jetzigen Zeitpunkt ohnehin nur noch Euro-VI-Fahrzeuge verkauft werden, wird ihr Absatz unterstützt. Es stehen demnach die Umsatzeinnahmen aus dem Verkauf von Neufahrzeugen, die durch die Politik gekauft werden müssen, deren Material- und Fertigungskosten gegenüber.

Die Berechnung erfolgt nach der Formel:

$(\sum \text{ALTk} * \text{KOk} - \text{MwSt19}) * \text{MDE} + \text{AU}$		(10)
ALT	Alternativen	
KO	Kosten für Neukauf	
Index k	Antriebsart k	
MwSt19	Mehrwertsteuer 19 %	
MDE	Marktanteil deutscher Firmen	
AU	Anteil Ausland	

Der Preis, den die Logistikunternehmen für neue Fahrzeuge bezahlen, muss versteuert werden. Da jedoch zunächst nur der Effekt für deutsche Unternehmen gemessen wird, wird der Marktanteil hier zugrunde gelegt. Daimler und VW sind die beiden großen deutschen Anbieter von Lastkraftwagen, wobei zum VW-Konzern sowohl MAN als auch Scania gezählt werden. Zusammen wurde im Jahr 2019 ein Marktanteil von 56 % gemessen (KBA, 2020a).

Dem gegenüber stehen die Kosten aus Materialkauf und Fertigung. Diese werden über die Marge berechnet, siehe Tabelle 15.

$(KOk - MwSt19) * MA * MDE + AU$		(11)
MA	Marge	

#### (4) Infrastrukturhersteller

Die Infrastrukturhersteller profitieren ebenfalls von dieser Maßnahme. Die Umsatzeinnahmen durch die höhere Nachfrage, die durch die Politik entsteht, stehen den Material- und Fertigungskosten gegenüber.

Die Berechnung erfolgt nach der Formel:

$(\sum ALT_k * KI_k - MwSt19) * MDE$		(12)
ALT	Alternativen	
KI	Kosten für Infrastruktur	
Index k	Antriebsart k	
MwSt19	Mehrwertsteuer 19 %	
MDE	Marktanteil deutscher Firmen	

Äquivalent zur Berechnung für die Energiewirtschaft erfolgt die Rechnung für die Infrastrukturkosten anhand der Berechnung der notwendigen Anzahl an Tankstellen. Von den Kosten wird die Mehrwertsteuer abgezogen, die der Staat einbehält. Da nur der Effekt für deutsche Unternehmen gemessen wird, wird der Marktanteil von 50 % zugrunde gelegt. Dem gegenüber stehen die Kosten aus Materialkauf und Fertigung. Diese werden über die Marge, siehe Tabelle 15, berechnet.

#### (5) Ausland

Für die Berechnung der Kosten für die Gruppe Ausland werden äquivalent zur Berechnung der THG-Emissionen die Kosten aus den verschiedenen Gruppen im Ausland addiert. Es werden somit die folgenden Effekte addiert:

- 1) der Umsatzanstieg aus dem Kauf von Neufahrzeugen aufgrund der Nachfrage aus Deutschland: Der Umsatzanstieg aus deutscher Nachfrage berechnet sich als Differenz aus der Gesamtnachfrage und der berechneten Nachfrage in Deutschland. Der Marktanteil ausländischer Unternehmen beträgt somit  $100\% - 56\% = 44\%$ .

- 2) der Umsatzrückgang aus der verringerten Nachfrage nach Primärenergieträgern wie beispielsweise Rohöl zur Herstellung von Diesel und Benzinkraftstoff: Sowohl aufgrund des Kaufs von alternativen Antrieben als auch aufgrund des verbesserten Verbrauchs der Fahrzeuge wird weniger Rohöl bzw. Dieselmotorkraftstoff nachgefragt. Da dieser zu 100 % aus dem Ausland importiert wird, liegt der Verlust ebenfalls zu 100 % im Ausland. Es wird somit der Kauf von Rohstoffen bzw. Energieträgern vor der Politik mit dem Kauf von Rohstoffen nach der Politik verglichen.
- 3) der Umsatzanstieg aus dem Kauf von Infrastruktur aufgrund der Nachfrage aus Deutschland: Der Umsatzanstieg aus deutscher Nachfrage berechnet sich als Differenz aus der Gesamtnachfrage und der berechneten Nachfrage in Deutschland. Der Marktanteil ausländischer Unternehmen wird mit 50 % angenommen.
- 4) Es werden Einsparungen bei den Betriebskosten aufgrund der alternativen Antriebstechnologien ausländischer Fahrzeuge anfallen: Die ausländischen Logistikunternehmen sparen aufgrund der alternativen Antriebstechnologien auf ihrer Fahrt durch Deutschland ebenfalls Betriebskosten ein. Hierbei wird vor allem weniger Lkw-Maut von ausländischen Fahrzeugen gezahlt und es entstehen Einsparungen beim Tanken in Deutschland durch die veränderte Energie- und Mehrwertsteuer auf alternative Kraftstoffe.
- 5) Kosten der Neuanschaffungen von Fahrzeugen im Ausland aufgrund der deutschen Politik: Die Kosten für die Neufahrzeuge werden ebenfalls in Anlehnung an die Berechnung der Kosten für deutsche Logistikunternehmen berechnet. Es wird eine ähnliche Verteilung der Größenklassen und Fahrzeugtypen wie in Deutschland unterstellt. Dabei können die Kosten anteilig mittels des ausländischen Anteils von Fahrzeugen bestimmt werden. Da hierbei jedoch Staat und Fahrzeughersteller gemeinsam betrachtet werden, muss die Mehrwertsteuer nicht abgezogen werden.
- 6) die Fertigungskosten für die nachgefragten Neufahrzeuge aus Deutschland: Die Fertigungskosten für die Fahrzeuge aus deutscher Nachfrage werden ebenfalls wie die Produktion innerhalb Deutschlands berechnet.
- 7) die Fertigungskosten für die nachgefragte Infrastruktur aus Deutschland: Die Fertigungskosten für die Infrastruktur aus deutscher Nachfrage werden ebenfalls wie die Produktion innerhalb Deutschlands berechnet.

Die aufsummierten Effekte ergeben somit direkte Kosten für das Ausland. Es ist anzunehmen, dass aufgrund der Politik weitere Kosten zwischen den beteiligten Akteuren innerhalb der Gruppe Ausland entstehen, die jedoch an dieser Stelle vernachlässigt werden.

(6) Staat

Die Einnahmen des Staates laufen vorwiegend über die Steuern und Abgaben. Im Folgenden werden die Energiesteuer, die Mehrwertsteuer auf Neufahrzeuge, die Mehrwertsteuer auf Infrastruktur, die Mehrwertsteuer auf Kraftstoffe, die Kfz-Steuer sowie die Lkw-Maut betrachtet. Bei den Neufahrzeugen und der Infrastruktur würden ohne die Maßnahmen keine Einnahmen stattfinden, bei den anderen Posten wurden die ursprünglichen Einnahmen ohne die Maßnahme minus die Einnahmen mit Maßnahme verglichen.

Die Berechnung erfolgt nach der Formel:

$\Sigma\Delta EStk + \Sigma MwStFZk + \Sigma MwStINFk + \Sigma\Delta MwStKSk + \Sigma\Delta KfzStk + \Sigma\Delta MAT-$		(13)
<b>Lkwk</b>		
ESt	Energiesteuer	
MwStFZ	Mehrwertsteuer aus dem Verkauf von Fahrzeugen	
MwStINF	Mehrwertsteuer aus dem Verkauf von Infrastruktur	
MwStKS	Mehrwertsteuer aus dem Verkauf von Kraftstoffen	
KfzSt	Kfz-Steuer	
MATLKW	Lkw-Maut	
Index k	Antriebsart k	

Dem gegenüber stehen Ausgaben in Form von Subventionen für Fahrzeuge und Infrastruktur sowie Förderungen wie die Abwrackprämie für Alt-Lastkraftwagen.

Die Ausgaben lassen sich mit der folgenden Formel bestimmen:

$\Sigma SVFZk + \Sigma SVINFk + \Sigma SVAP$		(14)
SVFZ	Subventionen für Fahrzeuge	
SVINF	Subventionen für Infrastruktur	
SVAP	Abwrackprämie für Alt-Lastkraftwagen	

#### 6.1.4 *Verlauf der Effekte über die Lebensdauer der Maßnahme*

Viele der Maßnahmen wirken hauptsächlich im Jahr der Umsetzung, also dem Basisjahr der Betrachtung. Einige Kosten und Emissionen verteilen sich jedoch auch auf die zukünftigen Jahre. Insgesamt liegt der Betrachtungszeitraum bei 10 Jahren, sodass mindestens eine Lebensdauer eines leichten Nutzfahrzeugs komplett in die Betrachtung einfließt. Um die Kosten pro Jahr vergleichbar zu machen, werden diese mit einem Annuitätenfaktor, abgestimmt auf die Lebensdauer der Maßnahme, multipliziert. Mit der Annuitätenmethode wird eine Investition in eine fiktive Zahlungsreihe verwandelt. Die Zahlungen werden gleich groß kalkuliert und zeitlich gleich weit voneinander entfernt. Die Barwerte der Kapitalwertreihe sind dabei gleich dem Barwert der Annuität. Eine Annuität entspricht demnach einer Zahlung des Zahlungsstromes und kann mit dem folgenden Annuitätenfaktor berechnet werden:  $\rho^{\text{Annuität}} = \frac{(1+i)^{LD} * i}{(1+i)^{LD} - 1}$  (15),

wobei  $i$  für den Kalkulationszinsfuß und  $LD$  für die Lebensdauer steht (Jung, 2009). Die Diskontierung zukünftiger Kosten oder Nutzen bedeutet, dass diese, aus heutiger Sicht, geringer eingeschätzt werden, als wenn sie heute realisiert würden. In der Quantifizierung des Basisfalls wird durchweg ein Diskontierungssatz von 1,5 % genutzt. Lediglich in der Sensitivitätsanalyse in Kapitel 6.16.1 wird dieser variiert und sowohl auf 3 % angehoben als auch auf 0 % herabgesetzt. Dies entspricht den Vorgaben der Sensitivitätsanalyse laut Umweltbundesamt (UBA, 2012).

#### 6.1.5 *Nachfrageverschiebungen zukünftiger Käufe*

Die Maßnahmen, die mit Verboten einen Austausch von Altfahrzeugen gegen Neufahrzeuge erzwingen, führen zu keiner weiteren Nachfrageänderung. Die Fahrzeuge, die nicht mehr fahren dürfen, werden ausgetauscht. Solange die neuesten Modelle der bevorzugten Antriebstechnologien von diesen Verboten ausgenommen werden, werden diese stattdessen nachgefragt. Besteht jedoch ein ökonomischer oder anderweitiger Vorteil bei einer anderen Antriebstechnologie, so könnte es sein, dass sich die Nachfrage dahingehend verschiebt.

Die Berechnung in dieser Arbeit wird somit zweigeteilt durchgeführt. Es wird, wie in allen Maßnahmen, zunächst der Austausch der Altfahrzeuge berechnet. Findet eine Nachfrageverschiebung statt, werden in einem zweiten Schritt die Effekte eines Kaufs von Neufahrzeugen mit der neuen Nachfrage gegenüber dem Status quo durchgeführt.

Zur Berechnung einer Nachfrageverschiebung wird zunächst die Höhe der Nachfrage benötigt. Dazu muss berechnet werden, wie viele Fahrzeuge jährlich neu gekauft werden. Hierfür werden erneut die Lebensdauern von 10 Jahren für LNF und von 6 Jahren für SNF angenommen (siehe Kapitel 6.1.2). Es findet auch hier jährlich ein Austausch von 1/10 bzw. 1/6 der Flotte statt.

Um einen Vergleich herzustellen, welchen Einfluss die neue Nachfrageverteilung über die Kraftstoffe in der Zukunft hat, wird der Status quo als Referenznachfrage benötigt. Diese Referenznachfrage wird aus der prozentualen Aufteilung der Neuzulassungen auf die verschiedenen Kraftstoffarten aus dem Jahr 2019 abgeleitet. Die Tabelle 8 – Neuzulassungen sieht als prozentuale Verteilung über die Größenklassen und Antriebstechnologien folgendermaßen aus.

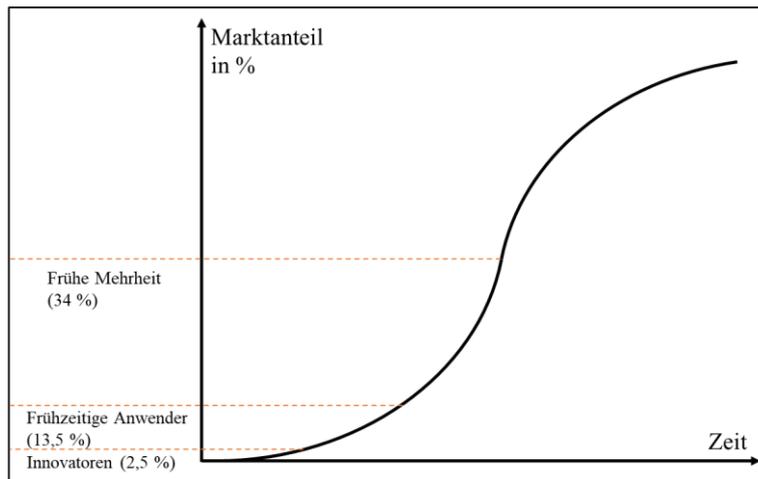
Tabelle 17: Prozentuale Aufteilung der Neuzulassungen auf die verschiedenen Kraftstoffarten (Referenznachfrage)

	< 2,8 t	2,8 – 3,5 t	3,5 – 7,5 t	7,5 – 12 t	>12 t
<b>Benzin</b>	0,049	0,001	0,001	0,001	0,001
<b>Diesel</b>	0,918	0,995	0,995	0,996	0,994
<b>LPG</b>	0,005	-	-	0,000	0,000
<b>CNG</b>	0,003	0,003	0,003	0,003	0,004
<b>Elektro</b>	0,024	0,001	0,001	0,000	0,000
<b>Hybrid</b>	0,001	0,000	0,000	0,000	-
<b>Sonstiges</b>	0,001	0,000	0,000	0,000	0,002
<b>Gesamt</b>	<b>1,000</b>	<b>1,000</b>	<b>1,000</b>	<b>1,000</b>	<b>1,000</b>

Quelle: (KBA, 2019b)

Der Verlauf einer Technologiediffusion kann mit der klassischen S-Kurve beschrieben werden. Diese sieht vor, dass bis zu einem Marktanteil von 50 %, an dem sich der Wendepunkt befindet, die Kurve exponentiell verläuft (Stoneman, 2002 vgl. mit Grohs & Massiani, 2015). Bezüglich der alternativen Antriebe für Lastkraftwagen befinden wir uns derzeit noch in der Phase der Innovatoren (bei rund 2 %), sodass anzunehmen ist, dass in den kommenden zehn Jahren sogar mit sehr ambitionierten Methoden lediglich die Phase der frühzeitigen Anwender bzw. der frühen Mehrheit erreicht wird, nicht aber der Wendepunkt (FuelsEurope, 2017).

Abbildung 38: S-förmige Diffusionskurve



Quelle: (Stoneman, 2002)

Mit Hilfe des statistischen Berichtes von FuelsEurope und der Annahme, dass die alternativen Kraftstoffe zumindest in den nächsten 10 Jahren einem exponentiellen Wachstum unterliegen, konnte eine Prognose der Verteilung alternativer Kraftstoffe für das Referenzszenario erstellt werden (FuelsEurope, 2017). Die Nachfrageverschiebung wird auf dieser Referenznachfrage basieren. Mit Hilfe einer qualitativen Analyse der Anreizwirkungen wird diese wiederum verschoben. Auf Basis der Höhe der relativen Kostenersparnis gegenüber dem Dieselloststoff der Maßnahmen wurde ein qualitatives Anreizsystem erstellt. Dieser Übersicht ist zu entnehmen, wie stark der Anreiz für die Fahrzeughalter ist, ihre Nachfrage zugunsten eines anderen Kraftstoffes zu ändern. Die Anzahl der Pfeile deutet auf die Stärke des Anreizes hin. Da die Maßnahmen die Lkw-Größenklassen in unterschiedlichem Maße betreffen und auch die Kraftstoffe in unterschiedlichem Maße fördern, wird hierbei zwischen LNF und SNF unterschieden. Die Tabelle 18 und Tabelle 19 zeigen lediglich die Maßnahmen an, bei denen eine Nachfrageverschiebung tatsächlich bewirkt wird.

Tabelle 18: Anreizsystem der Maßnahmen zur Bewertung der Nachfrageverschiebung für LNF

	M5	M6	M8	M9	M10	M11	M12
<b>Benzin</b>							
<b>Diesel</b>							
<b>LPG</b>	↑↑	↑↑				↑	
<b>CNG</b>	↑↑	↑↑	↑			↑	↑
<b>Elektro</b>	↑↑	↑↑	↑↑↑↑↑			↑	↑
<b>Hybrid</b>	↑↑	↑↑	↑↑↑↑			↑	↑

<b>Sonstiges</b>	↑↑	↑↑				↑	↑
<b>Anreizstärke</b>							
<b>insgesamt</b>	↑↑	↑↑	↑↑↑↑			↑	↑

Quelle: CEPiR-Modell, eigene Darstellung.

Während die Maßnahmen 9 – CO<sub>2</sub>-Maut und 10 – CO<sub>2</sub>-Steuer keinen Anreiz liefern, die Flotte der leichten Nutzfahrzeuge zu verändern, ist der Anreiz bei den SNF relativ gesehen ähnlich dem der Maßnahmen 11 – City-Maut und 12 – CO<sub>2</sub>-Ausweis. Den wohl deutlichsten monetären Anreiz liefert die Maßnahme 8 – Einführung eines Bonus-Malus-Systems.

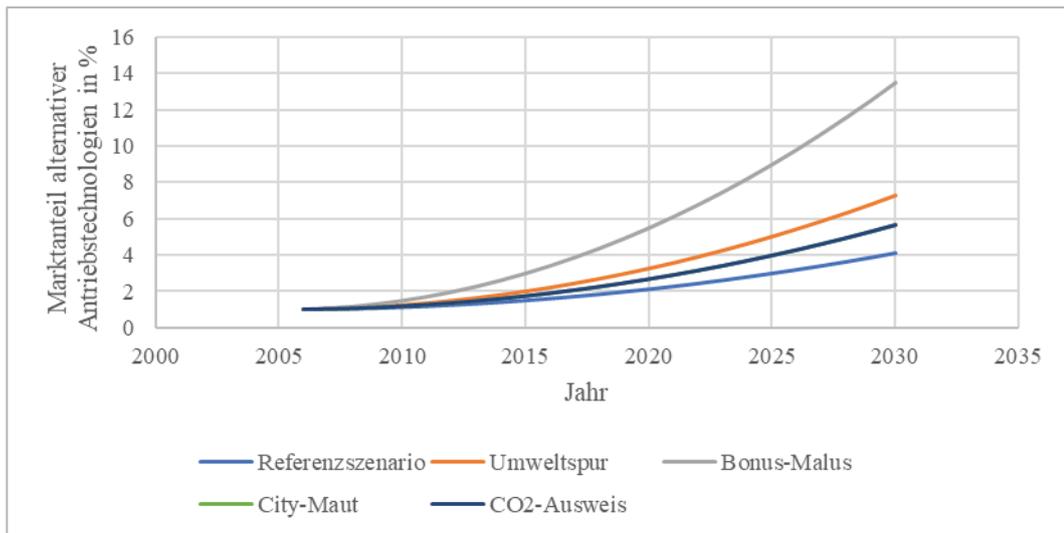
Tabelle 19: Anreizsystem der Maßnahmen zur Bewertung der Nachfrageverschiebung für SNF

	<b>M5</b>	<b>M6</b>	<b>M8</b>	<b>M9</b>	<b>M10</b>	<b>M11</b>	<b>M12</b>
<b>Benzin</b>							
<b>Diesel</b>							
<b>LPG</b>	↑↑	↑↑		↑	↑	↑	
<b>CNG</b>	↑↑	↑↑		↑	↑	↑	↑
<b>Elektro</b>	↑↑	↑↑	↑↑↑↑↑	↑	↑	↑	↑
<b>Hybrid</b>	↑↑	↑↑	↑↑↑↑	↑	↑	↑	↑
<b>Sonstiges</b>	↑↑	↑↑			↑	↑	↑
<b>Anreizstärke</b>							
<b>insgesamt</b>	↑↑	↑↑	↑↑↑↑	↑	↑	↑	↑

Quelle: CEPiR-Modell, eigene Darstellung.

Ausgehend von diesen Anreizen wird die Höhe der Nachfrageverschiebung festgelegt. Es entstehen somit vier Nachfrageverläufe für den Referenzfall, die Umweltpur, das Bonus-Malus-System und die vier anderen Maßnahmen. Die Abbildung 39 zeigt diese Nachfrageszenarien für leichte Nutzfahrzeuge auf.

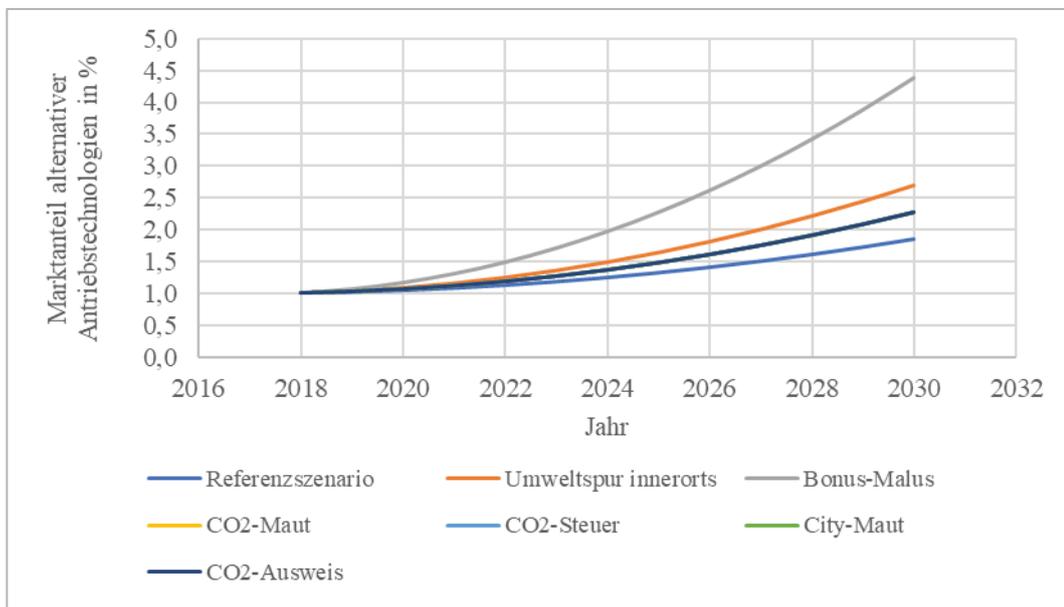
Abbildung 39: Markthochlauf alternativer Kraftstoffe bei LNF



Quelle: CEPiR-Modell, eigene Darstellung.

Die Kurven für schwere Nutzfahrzeuge sind wesentlich flacher als die der LNF, ausgehend von den bisherigen Marktanteilen.

Abbildung 40: Markthochlauf alternativer Kraftstoffe bei SNF



Quelle: CEPiR-Modell, eigene Darstellung.

Die Nachfragekurve wird jeweils für die unterschiedlichen alternativen Antriebstechnologien mit der bisherigen Nachfrageverteilung auf diese Kraftstoffe gewichtet. Daraus resultieren für das Referenzszenario die folgenden Werte:

Tabelle 20: Markthochlauf alternativer Kraftstoffe bei LNF

	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
<b>Benzin</b>	0,025	0,024	0,024	0,023	0,023	0,022	0,022	0,021	0,021	0,020	0,020	0,019
<b>Diesel</b>	0,957	0,956	0,955	0,954	0,953	0,952	0,950	0,949	0,947	0,946	0,944	0,942
<b>LPG</b>	0,002	0,002	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,004	0,004	0,004	0,004	0,005
<b>CNG</b>	0,003	0,003	0,004	0,004	0,004	0,005	0,005	0,005	0,006	0,006	0,006	0,007
<b>Elektro</b>	0,012	0,013	0,014	0,015	0,016	0,017	0,018	0,019	0,021	0,022	0,023	0,025
<b>Hybrid</b>	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
<b>Sonstiges</b>	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001

Quelle: CEPiR-Modell, eigene Darstellung.

Dabei zeigt die Linie die Trennung zwischen alternativen Kraftstoffen und Verbrennern an. In dieser Berechnung wird Benzin nicht als alternativer Kraftstoff aufgeführt, da dies in den Ausgangsdaten für das Referenzszenario so angegeben wurde.

Tabelle 21: Markthochlauf alternativer Kraftstoffe bei SNF (Referenzszenario)

	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
<b>Benzin</b>	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>Diesel</b>	0,999	0,999	0,998	0,998	0,997	0,996	0,996	0,995	0,994	0,993	0,991	0,990
<b>LPG</b>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>CNG</b>	0,000	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002	0,003	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007
<b>Elektro</b>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001
<b>Hybrid</b>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>Sonstiges</b>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002

Quelle: CEPiR-Modell, eigene Darstellung.

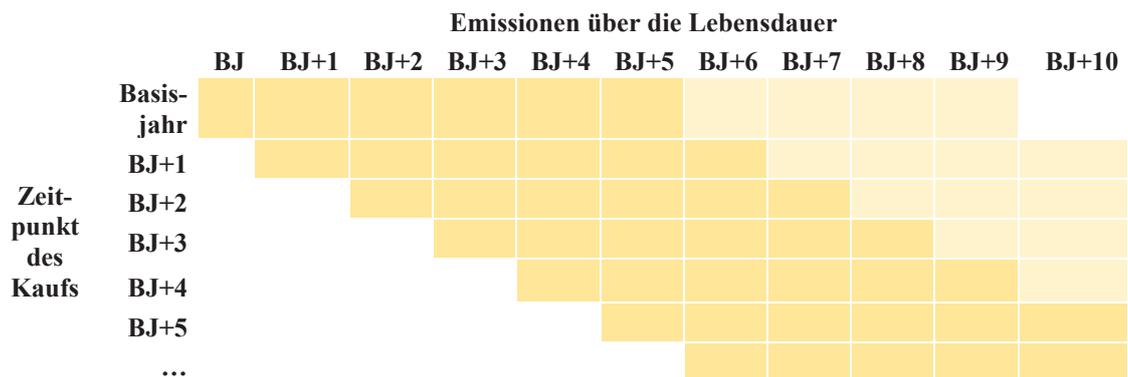
Mit diesen durchschnittlichen Gewichtungen wird durch Multiplikation mit der Verteilung über die Größenklassen die Nachfrage für die Jahre bis 2030 gebildet.

Für die Abbildung der Nachfrageverschiebung im Falle der Errichtung einer Umweltpur wird die Verteilung der Stadt Mannheim zugrunde gelegt. Die Stadt Mannheim hat im Jahr 2017 eine Umweltpur eingeführt (aktivmobil-bw, 2017). Abzüglich des Zuwachses bei alternativen Antrieben aus den zwei vorangegangenen Jahren wird das zusätzliche

Wachstum von Ende 2017 zu Anfang 2019 auf die Umweltspur zurückgeführt. Daraus resultiert die veränderte Nachfrage. Die Abbildung der Nachfrageverschiebung im Falle des Bonus-Malus-Systems wurde demgegenüber aus den Neuzulassungen (Statista, 2019a) und der Nachfrageveränderung in Frankreich abgeleitet (EAFO, 2020). Bei den anderen Verschiebungen wurde die grundsätzliche Verteilung der Referenznachfrage angewendet.

Für die zukünftigen Käufe bis zum Jahr 2030 werden somit die Veränderungen in den Berechnungen des Modells mit der neuen Nachfrage im Vergleich zur alten Nachfrage pro Jahr mit angerechnet. Dabei ist zu beachten, dass die Wirkungen der Käufe über den Betrachtungszeitraum hinausgehen können, da auch diese sich jeweils über die Lebensdauer erstrecken können.

Abbildung 41: Beispielhaftes Vorgehen bei der Berechnung der zukünftigen Käufe mit der Nachfrageverschiebung



Quelle: eigene Darstellung.

Dabei stehen die dunkelgelb hinterlegten Felder für die Lebensdauer von schweren Nutzfahrzeugen und die gesamten gelben Felder für die Lebensdauer von leichten Nutzfahrzeugen, die in dem jeweiligen Jahr gekauft wurden. Die kumulierten Veränderungen werden in die Gesamtrechnung im anfallenden Jahr eingerechnet.

### 6.1.6 Hebel zur Anpassung des Standardmodells

Wie bereits erwähnt, kann für die verschiedenen Berechnungen der Maßnahmen mittels Stellschrauben das Standardmodell angepasst werden. Eine gesammelte Tabelle dieser Hebel wird als Formular jeder Detailbeschreibung einer Maßnahme vorangestellt.

Zunächst wird die betroffene Region abgefragt. Die Maßnahme kann sich auf Gesamtdeutschland erstrecken oder, wie bei Kiel, München und Düsseldorf, auf einzelne Regionen fokussieren.

**1. Betroffene Region**

Gesamtdeutschland  Regionen-spezifisch

Ein Dieserverbot schließt die Schadstoffklasse Euro VI aus, sodass nur die älteren Schadstoffklassen betroffen sind. Eine Umweltzone bezieht sich demgegenüber bisher nur auf Schadstoffklassen unterhalb Euro IV. Daher werden in der zweiten Frage die von der Maßnahme betroffenen Schadstoffklassen abgefragt.

**2. Betroffene Schadstoffklassen**

SKL 3  SKL 4  SKL 5  SKL EEV  SKL 6  Sonstige

In städtischen Bereichen finden sich vermehrt die leichten Nutzfahrzeuge, im Fernverkehr jedoch eher die schweren. Auch hier unterscheidet sich der Fokus der Maßnahmen bei den betroffenen Größenklassen.

**3. Betroffene Größenklassen**

< 2,8 t  2,8 – 3,5 T.  3,5 – 7,5 T.  7,5 – 12 T.  > 12 t

Ein Austausch der Fahrzeugflotte aufgrund eines Anreizes zum Kauf von alternativen Antrieben schließt den Neukauf von fossilen Antriebstechnologien aus. Bei Frage 4 kann somit festgelegt werden, dass im Modell nur alternative Antriebe gekauft werden.

**4. Antriebsarten - Neukauf**

Benzin  Diesel  LPG  CNG  Elektro  Hybrid  Sonstige

Die bereits beschriebene Neukaufquote stellt fest, inwieweit ein altes Fahrzeug zu gleichen Teilen durch ein neues ersetzt wird. Im Standardmodell liegt diese bei 100 %, jedoch kann über das Feld „Andere Quote“ ein Multiplikator frei gewählt werden.

**5. Neukaufquote (Verkauf zu Neukauf)**

100 % (Standard)  Andere Quote:

Die Ausgestaltung der Maßnahme legt fest, ob der Fahrzeughalter eine Wahl hat und einen monetären Anreiz erhält, sein Fahrzeug auszutauschen, oder ob dies aus einem Zwang heraus, beispielsweise durch Fahrverbote, umgesetzt werden muss.

**6. Austauschzwang oder -anreiz?**

Zwang  Anreizquote:

Existieren regionale Förderungen bzw. entstehen lokale Förderungen durch die Ausgestaltung der Maßnahme? Wenn ja, wird dies an dieser Stelle in das Formular eingetragen und als Subvention auf den Kaufpreis der Fahrzeuge eingerechnet.

### 7. Subventionen Fahrzeuge

regionaler Zusatz:	LPG	<input type="checkbox"/>
	CNG	<input type="checkbox"/>
	Elektro	<input type="checkbox"/>
	Hybrid	<input type="checkbox"/>
	Sonstige	<input type="checkbox"/>

Die betroffenen Verkehrsbereiche legen fest, ob eine Maßnahme sich beispielsweise auf die Lkw-Maut, die nur auf Bundesstraßen und Autobahnen gilt, oder auf die Nachfrage des Auslands auswirkt.

### 8. Betroffene Verkehrsbereiche

<input type="checkbox"/> Nahverkehr	<input type="checkbox"/> Regionalverkehr (inkl. Bundesstraßen)	<input type="checkbox"/> Fernverkehr (inkl. Autobahn)
-------------------------------------	--	---

Zusatzberechnungen sind dann notwendig, wenn eine Maßnahme technologisch, organisatorisch oder aus anderen Gründen nicht ohne weitere Kosten und Treibhausgasemissionen durchgeführt werden kann. Diese Berechnungen finden speziell auf die Maßnahmen zugeschnitten statt.

### 9. Zusatzberechnungen

<input type="checkbox"/> Mikrodepot und Lastenfahrräder	<input type="checkbox"/> Bonus-Malus-System
<input type="checkbox"/> Verteilzentren	<input type="checkbox"/> CO2-Maut
<input type="checkbox"/> Umweltspur innerorts	<input type="checkbox"/> CO2-Steuer
<input type="checkbox"/> Umweltspur außerorts	<input type="checkbox"/> City-Maut
<input type="checkbox"/> Umweltzone	<input type="checkbox"/> CO2-Ausweis

Wenn die Maßnahme sich zwar auf alle Verkehrsbereiche auswirkt, jedoch lediglich deutsche Logistikunternehmen betrifft, wird zwischen einer Änderung der Nachfrage im Ausland unterschieden oder nicht. Dies ist lediglich für die Maßnahme 8 – Das Bonus-Malus-System relevant.

### 10. Änderung der Nachfrage im Ausland

<input type="checkbox"/> Ja	<input type="checkbox"/> Nein
-----------------------------	-------------------------------

Die Kombination aus unterschiedlichen Hebeln führt zur automatischen Befüllung des CEPIR-Modells.

## **6.2 Maßnahme 1: Flächendeckendes Dieserverbot in Deutschland**

### *6.2.1 Rahmenbedingungen*

Mit dem sogenannten Diesel-Urteil erklärte der 7. Revisionsssenat des deutschen Bundesverwaltungsgerichts am 27. Februar 2018 das Verkehrsverbot sowohl für Diesel-Kraftfahrzeuge unterhalb der Norm Euro 6 als auch für Fahrzeuge mit Ottomotor unterhalb der Norm Euro 3 für zulässig (BVerwG, 2018). Auf Basis dieser gerichtlichen Entscheidung existieren bereits in einigen deutschen Städten Planungen oder umgesetzte Fahrverbote für Dieselfahrzeuge. Bisher sind jedoch lediglich einzelne Strecken oder Straßenabschnitte von den Fahrverboten betroffen. Fälle, in denen das Fahrverbot in gesamten (Innen-)Städten gilt, gibt es in Deutschland noch nicht (Verbraucherzentrale, 2020).

Nicht nur Privatpersonen sind betroffen, auch für die Liefer- und Transportbranche gilt das Diesel-Verbot. Während einerseits der Trend in den Köpfen der Bürger\*innen in Richtung mehr Umweltbewusstsein geht, profitiert die Logistikbranche von einem florierendem Online-Handel und steigendem Warenangebot in den lokalen Läden. Dies bedeutet auch eine immer größere Zunahme des Lieferverkehrs in den Städten (UBA, 2020e). Das Dieserverbot wird gerade im regionalen Lieferverkehr Auswirkungen haben, denn ein Großteil der Lieferfahrzeuge in Deutschland fährt mit Diesel und erfüllt nicht die Euro-Norm VI (KBA, 2010). Mit der Ausnahme für Dieselfahrzeuge, die die Euro-VI-Norm erfüllen, unterstützt der Staat den technischen Fortschritt bei der Abgasreinigung (UBA, 2020e).

Kritiker befürchten, dass Fahrverbote, welche nicht das gesamte Stadtgebiet, sondern nur einzelne Straßenabschnitte betreffen, zu Ausweichverkehr auf andere Straßenabschnitte und damit eher zu einer Verlagerung als zu einer Lösung des Problems führen. Eine Verlagerung der Emissionen findet ebenfalls statt, wenn ältere Dieselautos zum Beispiel nach Osteuropa exportiert werden. Im Jahr 2017 wurden rund 350 000 Dieselfahrzeuge nach Polen exportiert, die meisten davon kamen aus Deutschland (Laska & Szaniawska-Schwabe, 2019).

Ein generelles Dieserverbot würde diese Verlagerungen nicht zulassen, da es keine Ausweichmöglichkeiten gibt. Da Deutschland ein wichtiger Verkehrsknotenpunkt Europas ist, würde eine solche Maßnahme nicht nur die nationalen Transportunternehmen und Lastkraftwagenhalter dazu zwingen, umweltfreundlichere Fahrzeuge zu beschaffen, sondern ebenfalls dazu führen, dass Unternehmen aus dem Ausland entweder Deutschland

umfahren müssten oder ebenfalls neue Fahrzeuge angeschafft würden, die die Anforderungen erfüllen. Da eine Umfahrung von Deutschland einen erheblichen Anstieg an Fahrtzeit bedeuten würde und gerade die Transportbranche einen hohen Zeitdruck hat, ist an dieser Stelle davon auszugehen, dass diese Möglichkeit vernachlässigt werden kann. Aus diesem Grund wird die Maßnahme eines generellen Dieselvebotes für Lastkraftwagen aller Größenklassen in diesem Kapitel näher beleuchtet. Verboten werden somit alle Schadstoffklassen außer der Euro-VI-Klasse. Wie in Kapitel 5.1.8 erläutert, sind Dieselfahrzeuge der Schadstoffklasse Euro VI aufgrund ihrer erst kurzen Lebensdauer gesetzlich von Fahrverboten ausgenommen. Dieses Verbot gilt auf allen Straßen im Bundesgebiet.

Nimmt man diese Kriterien als Grundlage, so kann das Modell mit den folgenden Hebeln bestimmt werden:

Tabelle 22: Hebel der Maßnahme 1

<b>1. Betroffene Region</b>	
<input checked="" type="checkbox"/> Gesamtdeutschland	<input type="checkbox"/> Regionen-spezifisch <input type="text"/>
<b>2. Betroffene Schadstoffklassen</b>	
<input checked="" type="checkbox"/> SKL 3	<input checked="" type="checkbox"/> SKL 4
<input checked="" type="checkbox"/> SKL 5	<input checked="" type="checkbox"/> SKL EEV
<input type="checkbox"/> SKL 6	<input type="checkbox"/> Sonstige
<b>3. Betroffene Größenklassen</b>	
<input checked="" type="checkbox"/> < 2,8 t	<input checked="" type="checkbox"/> 2,8 – 3,5 T.
<input checked="" type="checkbox"/> 3,5 – 7,5 T.	<input checked="" type="checkbox"/> 7,5 – 12 T.
<input checked="" type="checkbox"/> > 12 t	
<b>4. Antriebsarten - Neukauf</b>	
<input checked="" type="checkbox"/> Benzin	<input checked="" type="checkbox"/> Diesel
<input checked="" type="checkbox"/> LPG	<input checked="" type="checkbox"/> CNG
<input checked="" type="checkbox"/> Elektro	<input checked="" type="checkbox"/> Hybrid
<input checked="" type="checkbox"/> Sonstige	
<b>5. Neukaufquote (Verkauf zu Neukauf)</b>	
<input checked="" type="checkbox"/> 100 % (Standard)	<input type="checkbox"/> Andere Quote: <input type="text"/>
<b>6. Austauschzwang oder -anreiz?</b>	
<input checked="" type="checkbox"/> Zwang	<input type="checkbox"/> Anreizquote: <input type="text"/>
<b>7. Subventionen Fahrzeuge</b>	
regionaler Zusatz:	
LPG	<input type="text"/>
CNG	<input type="text"/>
Elektro	<input type="text"/>
Hybrid	<input type="text"/>
Sonstige	<input type="text"/>
<b>8. Betroffene Verkehrsbereiche</b>	
<input checked="" type="checkbox"/> Nahverkehr	<input checked="" type="checkbox"/> Regionalverkehr (inkl. Bundesstraßen)
	<input checked="" type="checkbox"/> Fernverkehr (inkl. Autobahn)
<b>9. Zusatzberechnungen</b>	
<input type="checkbox"/> Mikrodepot und Lastenfahrräder	<input type="checkbox"/> Bonus-Malus-System
<input type="checkbox"/> Verteilzentren	<input type="checkbox"/> CO2-Maut
<input type="checkbox"/> Umweltspur innerorts	<input type="checkbox"/> CO2-Steuer
<input type="checkbox"/> Umweltspur außerorts	<input type="checkbox"/> City-Maut

<input type="checkbox"/> Umweltzone	<input type="checkbox"/> CO2-Ausweis
<b>10. Änderung der Nachfrage im Ausland</b>	
<input checked="" type="checkbox"/> Ja	<input type="checkbox"/> Nein

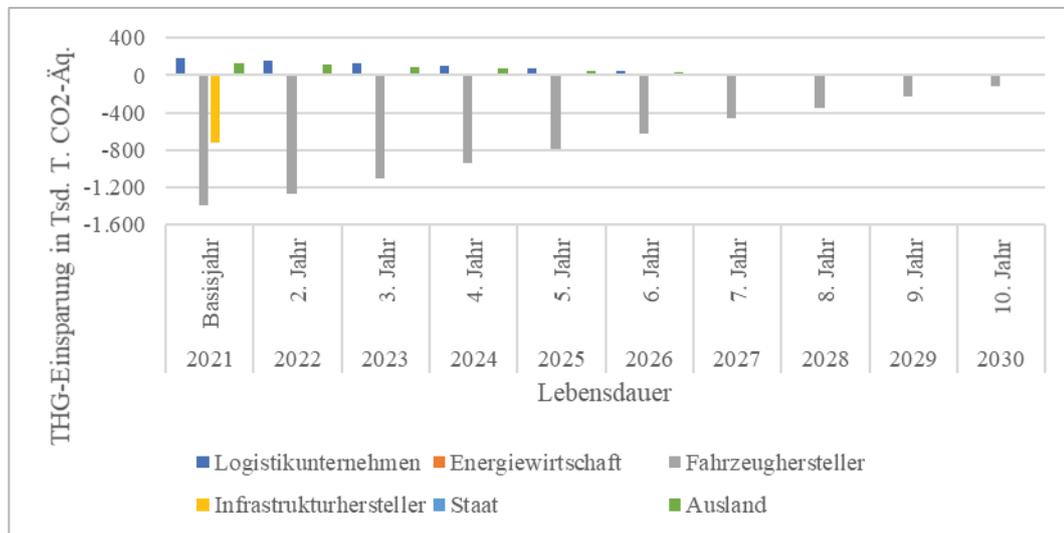
Quelle: eigene Darstellung.

Diese Auswahl an Hebeln wird als sogenanntes Standardmodell angesehen.

### 6.2.2 Treibhausgaseffekte

Die Abbildung 42 zeigt die Treibhausgaseffekte der 1. Maßnahme. Es ist deutlich zu erkennen, dass die jährlichen Einsparungen geringer sind als die Emissionen, die bei der Produktion von Fahrzeugen anfallen. Dies führt statt zu einer Einsparung von Treibhausgasen, welche erreicht werden sollte, insgesamt sogar zu einem großen Anstieg der Treibhausgase. Ein generelles Dieserverbot würde sich somit in dieser Ausgestaltung nicht positiv auf die Umwelt auswirken. Insgesamt kommen bei dieser Maßnahme rund 6,7 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äq. über die Lebensdauer hinzu.

Abbildung 42: Treibhausgaseinsparungen aufgrund von Maßnahme 1 über die Lebensdauer



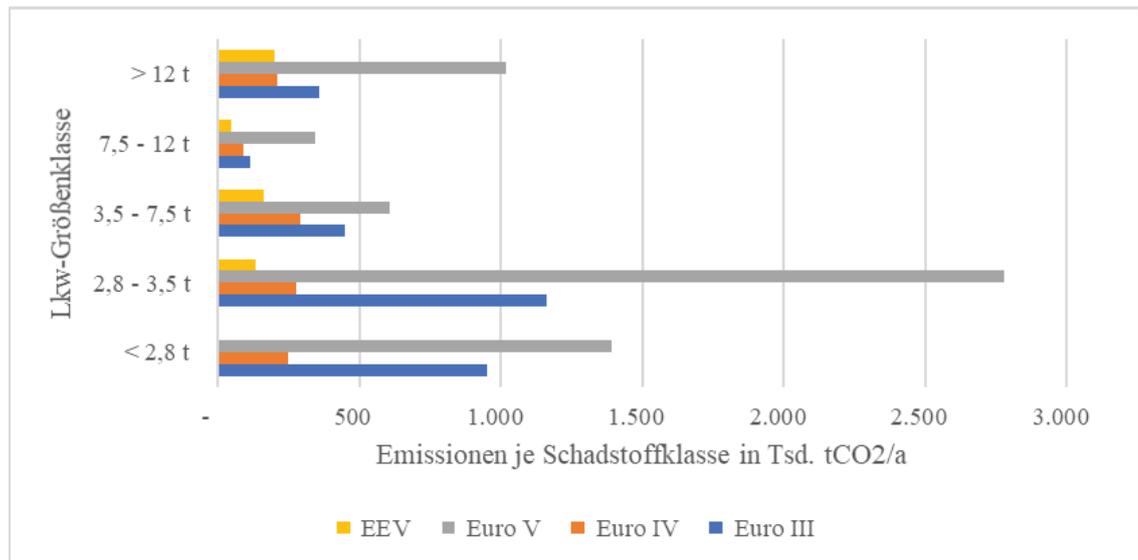
Quelle: CEPPIR-Modell, eigene Darstellung.

Im Folgenden werden die Treibhausgaseinsparungen und Kostenwirkungen der einzelnen Akteure näher betrachtet:

(1) Logistikunternehmen:

Ein generelles Dieserverbot sorgt in großem Maße für einen Austausch von alten Dieselfahrzeugen gegen neue. Besonders stark vom Austausch betroffen ist die Schadstoffklasse V. Diese Fahrzeuge sind meist noch nicht sehr alt, sodass hier der Effizienzgewinn zu niedrig ist und der positive Effekt geschmälert wird.

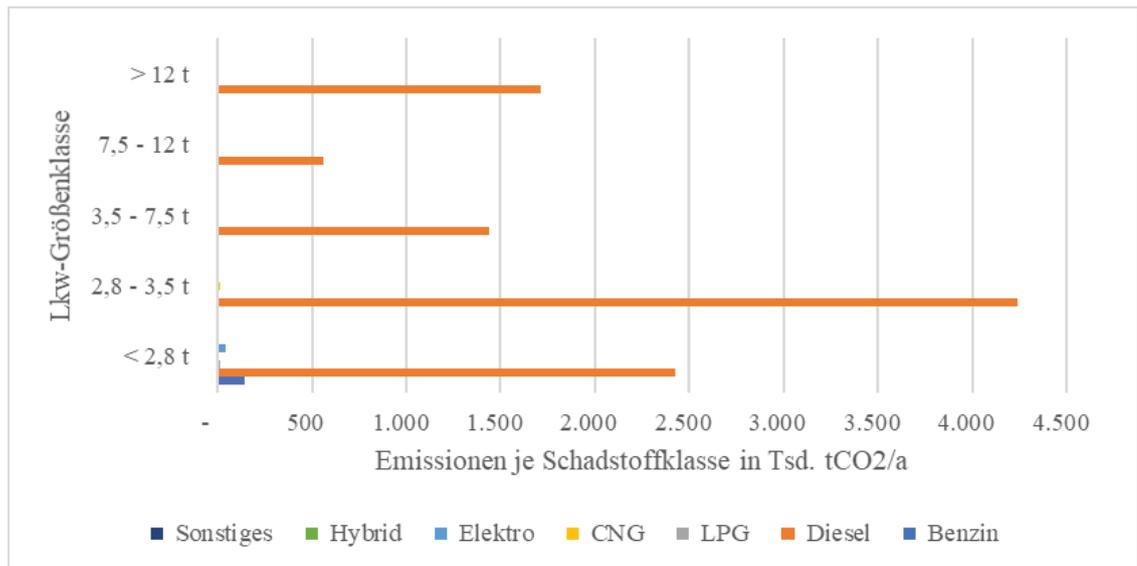
Abbildung 43: Emissionseinsparung durch Altfahrzeuge aufgrund von Maßnahme 1



Quelle: CEPPIR-Modell, eigene Darstellung.

Die Abbildung 43 zeigt die Verteilung der Neukäufe auf die Antriebstechnologien. Obwohl lediglich die Dieselfahrzeuge der Schadstoffklasse VI bei der Maßnahme erlaubt sind, führt nicht zu einer Verschiebung zugunsten anderer Technologien. Lediglich in den kleineren Kategorien der LNFs sind Fahrzeuge mit alternativen Antrieben zu finden. Dies überrascht aufgrund der Annahme, dass die Nachfrageverteilung sich nicht verändert, kaum.

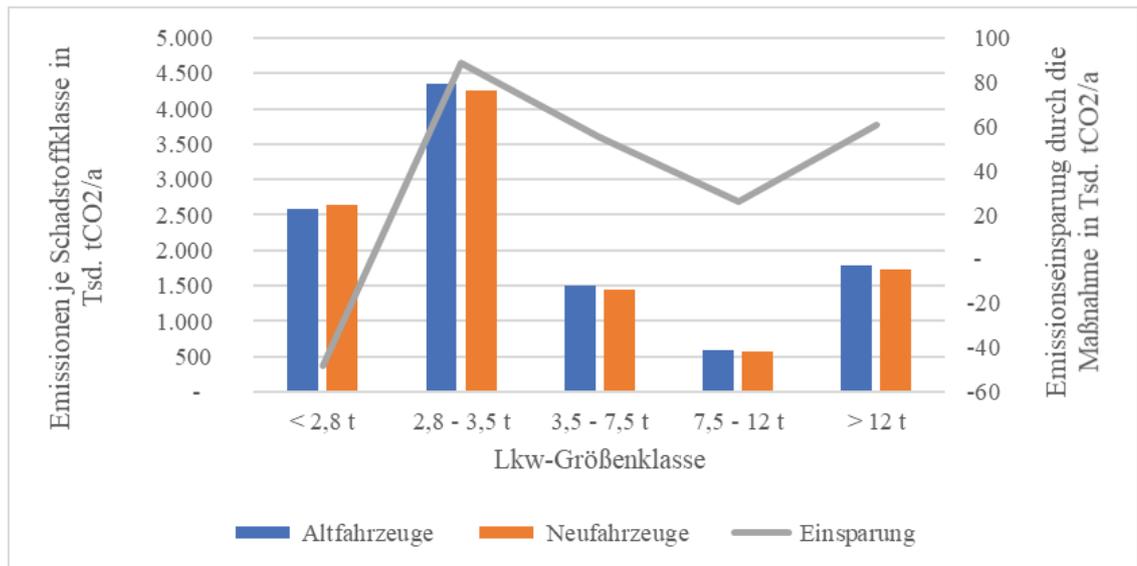
Abbildung 44: Emissionsanstieg durch Neufahrzeuge resultierend aus Maßnahme 1



Quelle: CEPiR-Modell, eigene Darstellung.

Die Treibhausgaseinsparung bei den kleineren Lastkraftwagen ist negativ, was bedeutet, dass, obwohl alte Fahrzeuge durch neue Fahrzeuge ersetzt wurden, die Treibhausgasemissionen gestiegen sind. Dies liegt vor allem daran, dass neue Benziner und Dieselfahrzeuge heutzutage teilweise mehr CO<sub>2</sub> ausstoßen als alte Fahrzeuge. Diese wurden zwar hinsichtlich Feinstaubemissionen optimiert, nicht jedoch hinsichtlich der CO<sub>2</sub>-Emissionen. Beispielsweise verbrennt ein Dieselfahrzeug mit der Schadstoffklasse III weniger CO<sub>2</sub> als ein brandneuer Benziner. Erst ab Schadstoffklasse II sind die CO<sub>2</sub>-Emissionen bei einem Diesel-Lkw höher. Dem gegenüber stehen hohe CO<sub>2</sub>-Einsparungen bei der Größenklasse 2,8 bis 3,5 t. Bei den anderen Größenklassen sind die Einsparungen ebenfalls positiv.

Abbildung 45: Emissionsvergleich mit und ohne Maßnahme 1 in Tsd. t CO<sub>2</sub>-Äq.

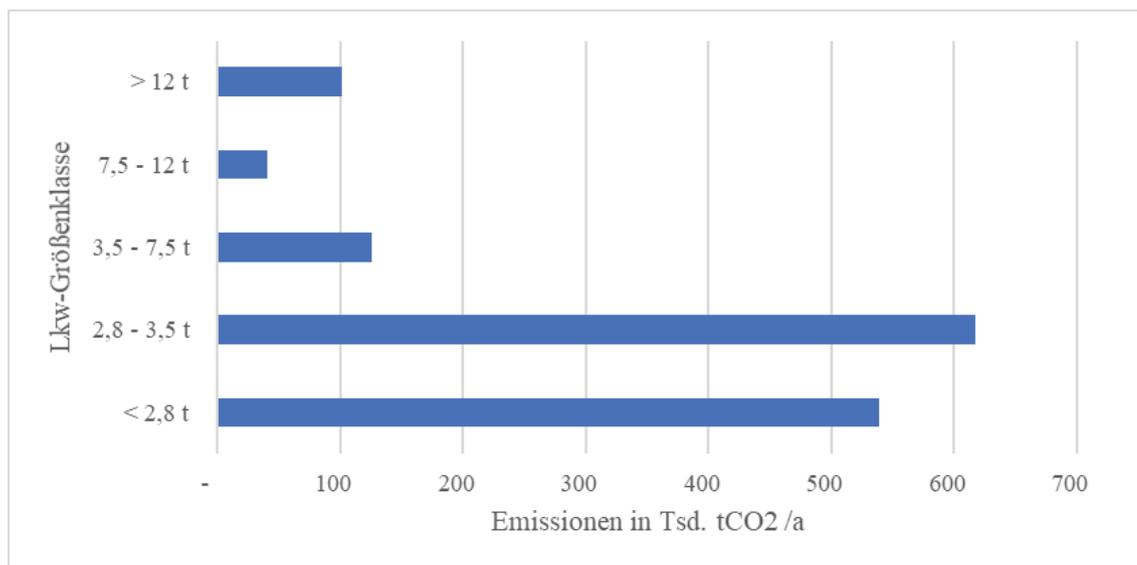


Quelle: CEP-IR-Modell, eigene Darstellung.

(2) Fertigungshersteller:

Aufgrund der starken Nachfrage nach Neufahrzeugen werden als Resultat die Treibhausgasemissionen der Fahrzeugproduktion stark ansteigen. Insbesondere die Emissionen bei der Herstellung von ausgetauschten leichten Nutzfahrzeugen haben einen hohen Anteil daran.

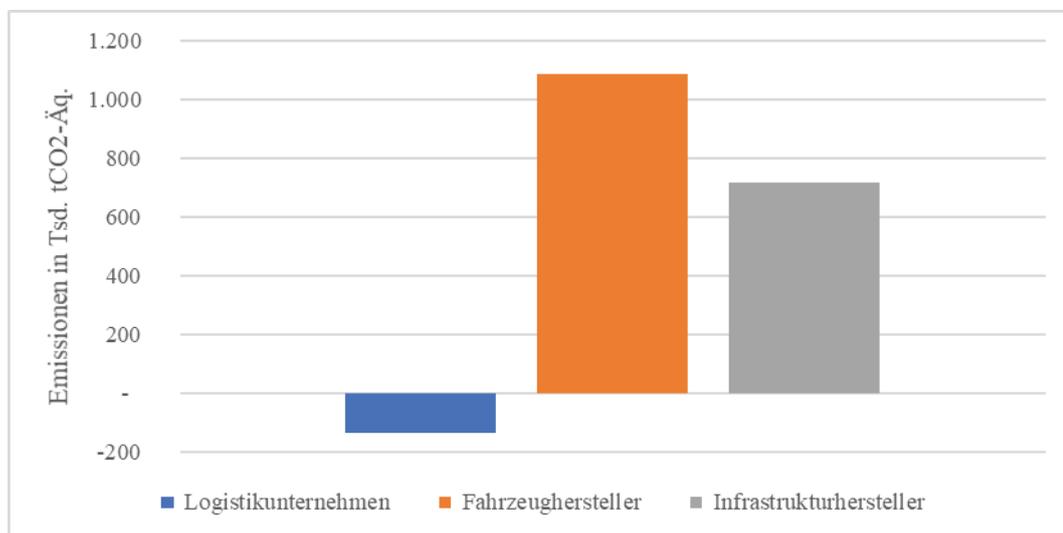
Abbildung 46: Anstieg der THG-Emissionen aufgrund der Herstellung von Neufahrzeugen aufgrund von Maßnahme 1



Quelle: CEP-IR-Modell, eigene Darstellung.

Bei der 1. Maßnahme, einem generellen Dieserverbot, werden von ausländischen Akteuren sowohl Treibhausgasemissionen über den Austausch der Flotte der Logistikunternehmen in Deutschland eingespart als auch THG-Emissionen bei Fahrzeugherstellern und Infrastrukturherstellern produziert. In dieser Arbeit wird lediglich der Teil der Emissionen, die im regionalen Bereich von Deutschland anfallen, eingerechnet, sodass an dieser Stelle eine Missinterpretation erfolgen könnte. Daher wird in der Sensitivitätsanalyse der Anteil, der im Ausland getätigt wird, validiert, indem angenommen wird, dass die gesamte Produktion im Ausland bzw. im Inland stattfindet.

Abbildung 47: THG-Reduktion und -Anstiege, verursacht von ausländischen Akteuren aufgrund von Maßnahme 1

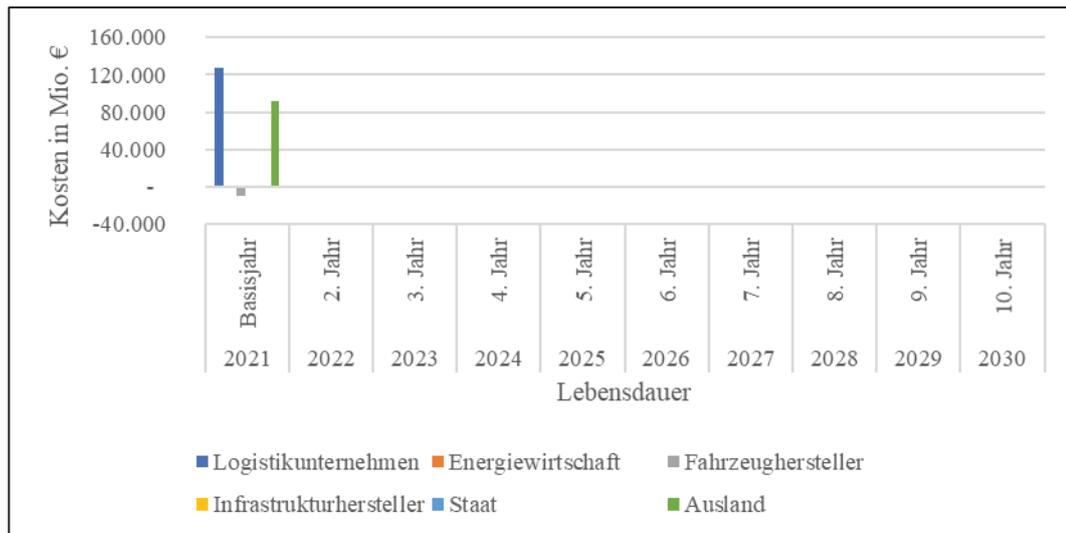


Quelle: CEPIR-Modell, eigene Darstellung.

### 6.2.3 Kosteneffekte

Die steigenden Treibhausgasemissionen, die aus dieser Maßnahme resultieren, sind nicht kostenfrei. Das Dieserverbot kostet insgesamt über die 10 Jahre des Betrachtungszeitraums rund 211 Mrd. Euro (Barwert). Hauptsächlich entstehen diese Kosten beim Kauf der Neufahrzeuge. Jedoch hat auch der Staat Kosten in Höhe von 672 Mio. Euro im Jahr 2021 für Förderungen und in Form von Steuerverlusten zu tragen.

Abbildung 48: Kosten aufgrund von Maßnahme 1 über die Lebensdauer

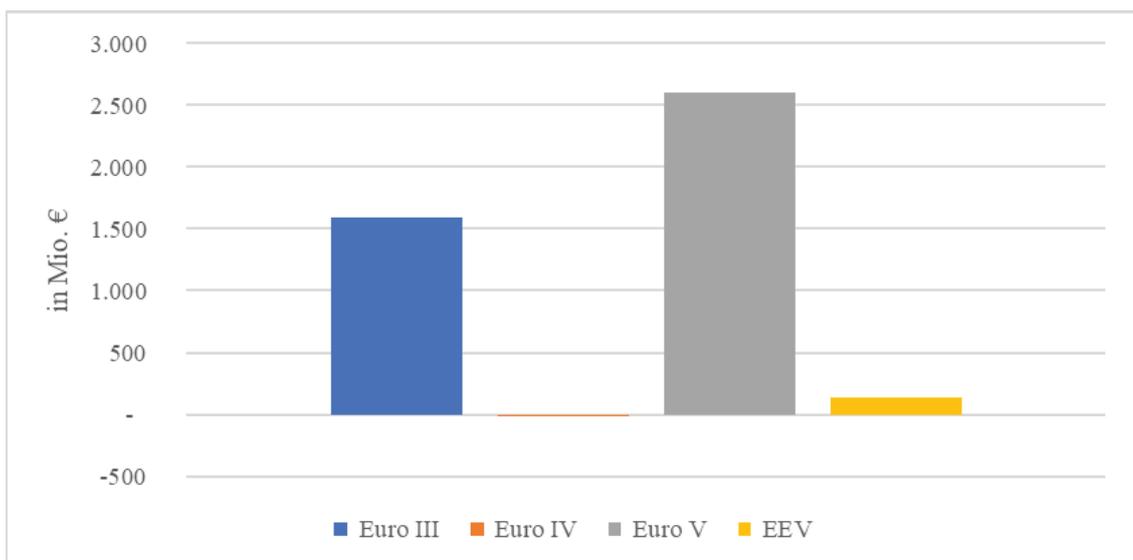


Quelle: CEPIR-Modell

(1) Logistikunternehmen:

Als Finanzierung für den Neukauf werden die Logistikunternehmen mit der Abwrackprämie unterstützt. Diese lohnt sich je nach Schadstoffklasse. Bei der Schadstoffklasse V bleibt mit rund 2500 Mio. Euro, gegengerechnet mit dem Restwert der Fahrzeuge, am meisten von der Prämie übrig.

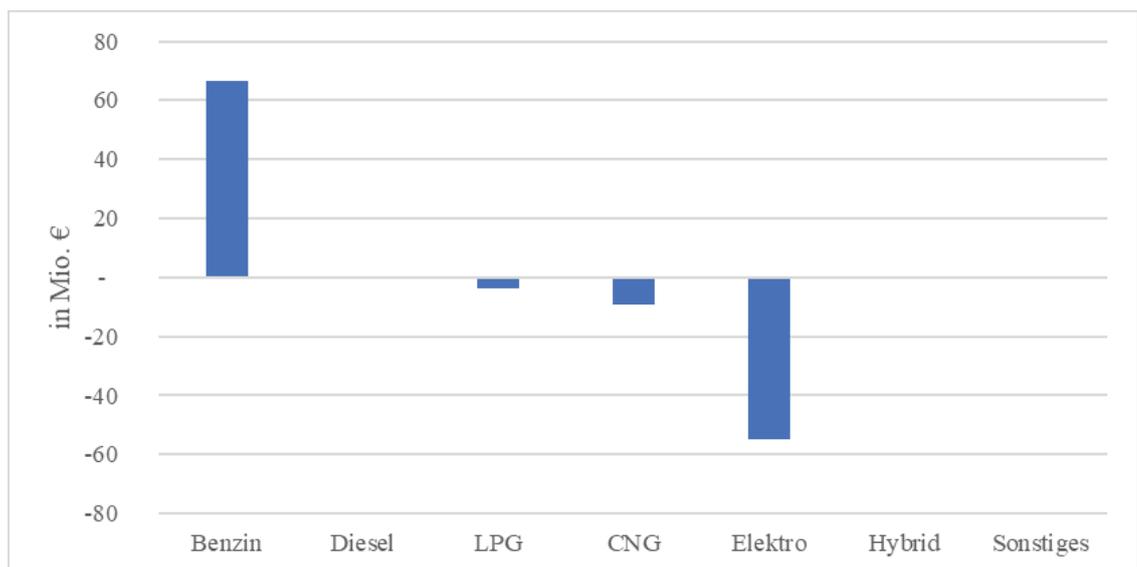
Abbildung 49: Gesamter Wertgewinn durch Abwrackprämien je Schadstoffklasse aufgrund von Maßnahme 1



Quelle: CEPIR-Modell, eigene Darstellung.

Trotz höherer Betriebskosten entscheiden sich viele Logistikunternehmen für den „alternativen Kraftstoff“ Benzin für ihren Lastkraftwagen, und dies ungeachtet der wesentlich höheren Betriebskosten pro Jahr. Da Benzin als verlässlicher Kraftstoff, basierend auf einer ausgereiften Technologie gilt, ist dies wenig überraschend, während die anderen Alternativen im Vergleich zum Diesel weniger Betriebskosten benötigen. Besonders bei der Summe der Elektrofahrzeuge ist eine deutliche Einsparung von Betriebskosten pro Jahr erkennbar.

Abbildung 50: Gesamte Einsparung von Betriebskosten mit Maßnahme 1 im Vergleich zum Status quo

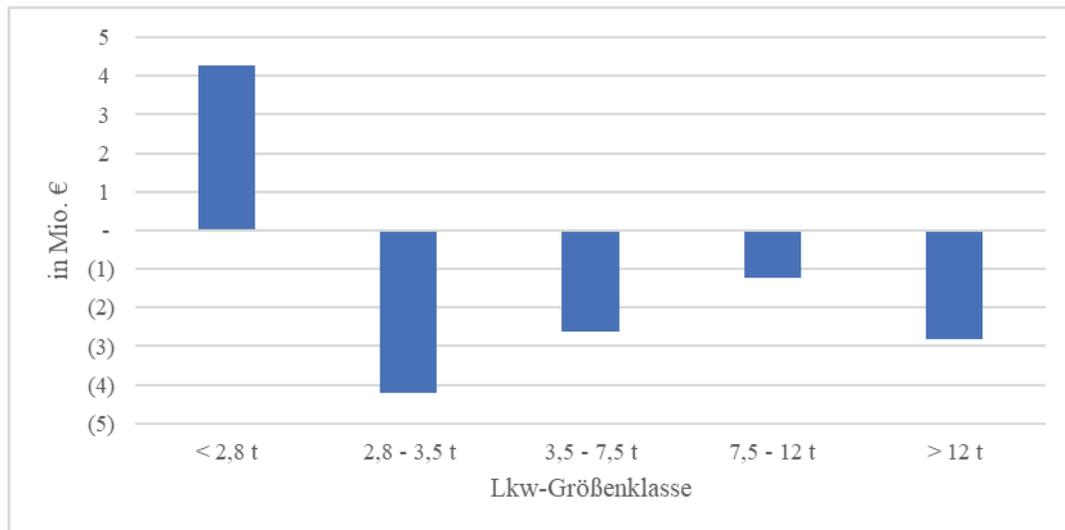


Quelle: CEPiR-Modell, eigene Darstellung.

## (2) Energiewirtschaft:

Die Tatsache, dass einige neuere Fahrzeuge mehr CO<sub>2</sub> emittieren, ist darauf zurückzuführen, dass deren Energieverbräuche höher sind als die der alten Fahrzeuge. Trotz Technologiefortschritts führt dies zu höheren Kraftstoffverbräuchen bei den leichten Nutzfahrzeugen bis 2,8 t. Währenddessen sinken die Verbräuche sowie dementsprechend die Umsätze bei den anderen Größenklassen.

Abbildung 51: Veränderung des Kraftstoffumsatzes durch die Veränderung des Verbrauchs aufgrund von Maßnahme 1

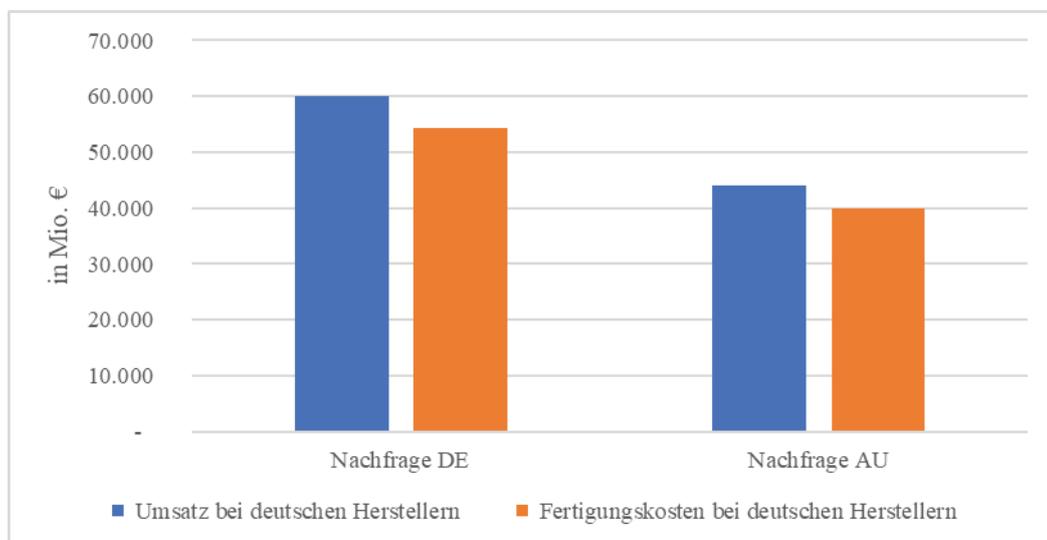


Quelle: CEPiR-Modell, eigene Darstellung.

(3) Fahrzeughersteller:

Die Fahrzeughersteller profitieren vom Zwang zum Austausch eines alten Fahrzeugs durch ein Neufahrzeug. Rund 60 Mrd. Euro zusätzlicher Umsatz sind aus deutscher Nachfrage zu erwarten. Zusätzlich wird auch die Nachfrage im Ausland erzwungen, sodass der Umsatz um weitere 45 Mrd. Euro ansteigt. Insgesamt dürften die deutschen Fahrzeughersteller somit knapp 10 Mrd. Euro Gewinn machen.

Abbildung 52: Gegenüberstellung von Umsatzeinnahmen und Fertigungskosten von deutschen Herstellern aufgrund von Maßnahme 1

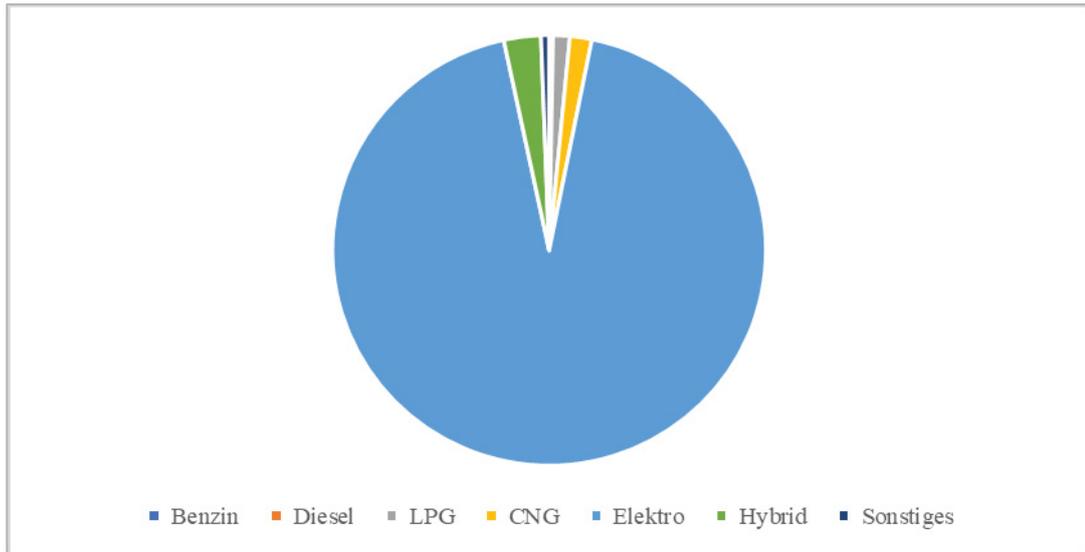


Quelle: CEPiR-Modell, eigene Darstellung.

(4) Infrastrukturhersteller:

Trotz des hohen Anteils neuer Dieselfahrzeuge wird ein Ausbau der Tank- und Ladeinfrastruktur der alternativen Kraftstoffe unerlässlich. Bei dieser Maßnahme ist vor allem ein Ausbau der Elektro-Tankstellen notwendig.

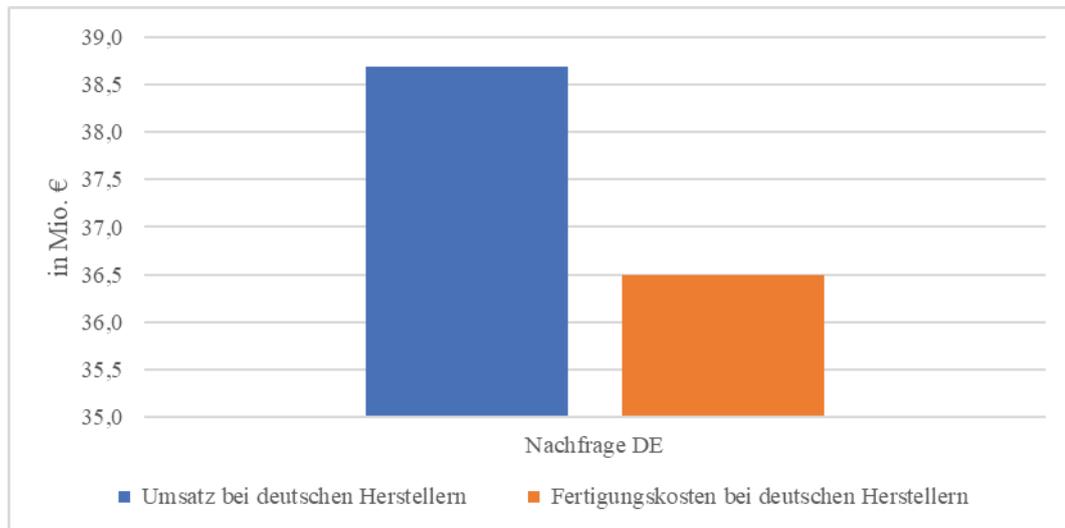
Abbildung 53: Notwendiger Ausbau von Tankstelleninfrastruktur aufgrund von Maßnahme 1



Quelle: CEPiR-Modell, eigene Darstellung.

Auch die Infrastrukturhersteller können rund 2 Mio. Euro Gewinn mit dieser Maßnahme erwirtschaften.

Abbildung 54: Gegenüberstellung von Umsatzeinnahmen und Fertigungskosten von deutschen Herstellern aufgrund von Maßnahme 1

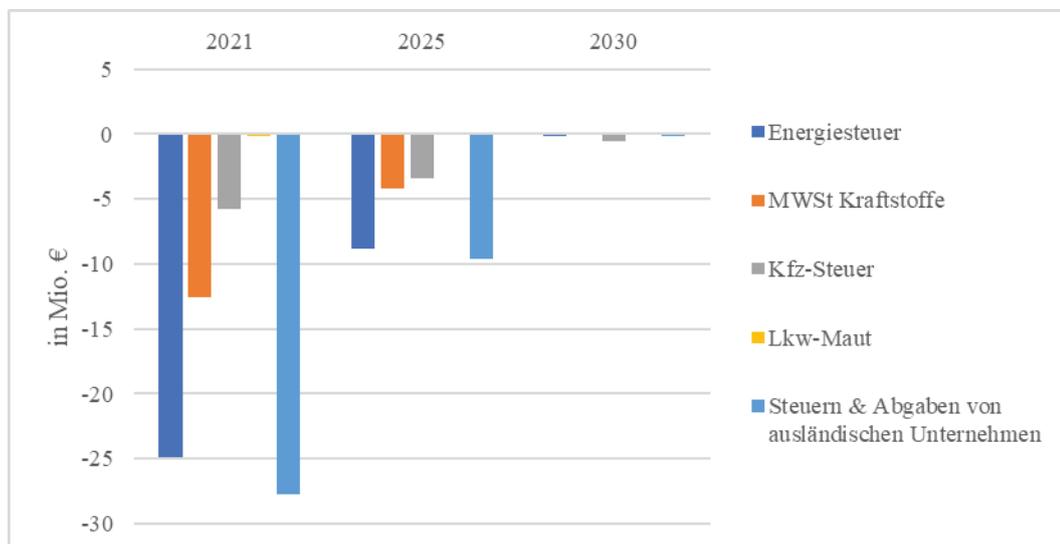


Quelle: CEPiR-Modell, eigene Darstellung.

(5) Staat:

Der Staat hat jährliche Einnahmen, die er für bestimmte Ausgaben benötigt. Auf rund 25 Mio. Euro Verlust an Energiesteuer muss die Haushaltskasse im Jahr 2021 verzichten. Die Lkw-Maut fällt demgegenüber nicht sichtbar ins Gewicht. Auch bei der Mehrwertsteuer der Kraftstoffe ist zu erkennen, dass besonders die geringeren Verbräuche der größeren Lastkraftwagen zu Verlusten bei den jährlichen staatlichen Einnahmen führen. Auch die verringerten Steuern und Abgaben, die ausländische Fahrzeughalter jährlich an den deutschen Staat zahlen, sind hohe Verluste für den deutschen Staatsapparat.

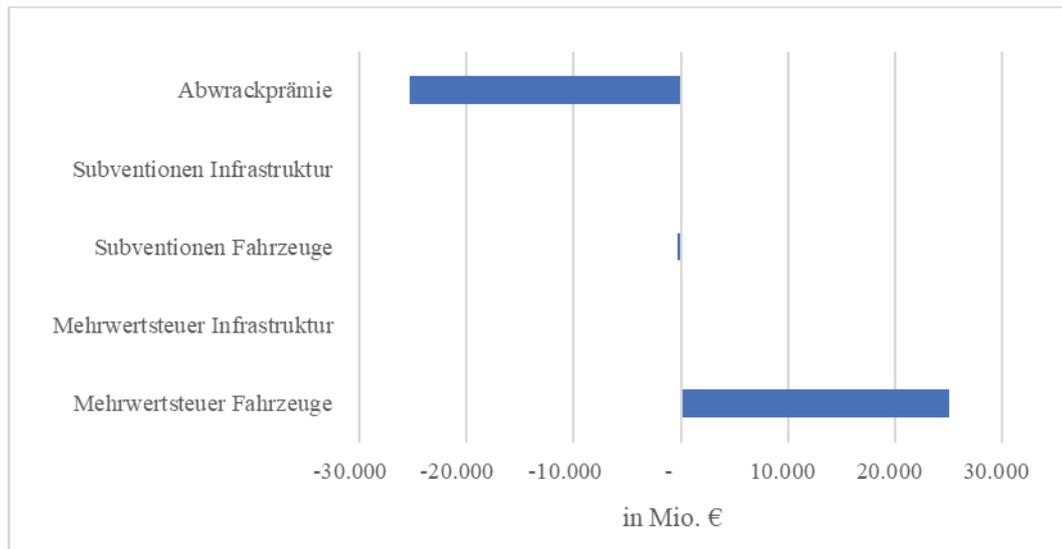
Abbildung 55: Veränderung der jährlichen Staatseinnahmen aufgrund von Maßnahme 1



Quelle: CEPiR-Modell, eigene Darstellung.

Im Jahr 2021 fallen zusätzlich einmalige Einnahmen und Ausgaben des Staates an. Insbesondere die hohen Ausgaben für die Abwrackprämie und die Einnahmen über die Mehrwertsteuer der Fahrzeuge gleichen sich im Mittel wieder aus. Im Verhältnis dazu sind alle weiteren Einnahmen und Ausgaben unbedeutend.

Abbildung 56: Einmalige Einnahmen und Ausgaben des Staates (in Mio. Euro) aufgrund von Maßnahme 1



Quelle: CEPiR-Modell, eigene Darstellung.

#### 6.2.4 Fazit

In dieser Ausgestaltung ist die Wirkung eines generellen Dieselvebotes negativ zu beurteilen. Auch über die Lebensdauer schafft es diese Maßnahme weder ökologisch noch ökonomisch, sinnvoll zu werden. Über die gesamte Lebensdauer liegt die Maßnahme 1 bei  $-31,33 \text{ € pro kg CO}_2\text{-Äq}$ . Dies ist jedoch so zu interpretieren, dass für ein weiteres Kilo produzierter  $\text{CO}_2$ -Emissionen rund 31 € gezahlt werden müssen. Im Basisjahr wären dies sogar 118 €. Dies ist nicht erstrebenswert, daher ist diese Maßnahme weder effektiv hinsichtlich der THG-Einsparung noch effizient hinsichtlich des Kosten-Nutzen-Verhältnisses.

### 6.3 *Maßnahme 2: Dieserverbot im Innenstadtring – am Beispiel von Kiel, Düsseldorf und München*

Im Gegensatz zur vorangegangenen Maßnahme, einem Dieserverbot für das gesamte deutsche Staatsgebiet, werden nun lediglich drei Städte exemplarisch untersucht, um den Effekt zu messen, der auf ein regional begrenztes Dieserverbot in den Innenstadtgebieten zurückzuführen ist. Hierbei sind vor allem kleine Lkw, die seltener ausgetauscht werden und somit meist ältere Modelle sind, betroffen. Währenddessen sind große Lkw aufgrund ihres selteneren Vorkommens im Nahverkehr von dieser Maßnahme weniger stark betroffen. Die Auswahl der drei Innenstädte erfolgte nach der Liste des Umweltbundesamtes (siehe Kapitel 6.1.2).

Tabelle 23: NO<sub>2</sub>-Messungen der drei ausgewählten Städte

Stadt	2018	2019
München	66	63
Kiel	60	49
Düsseldorf	54	45 <sup>7</sup>

Quelle: (UBA, 2020b)

Jede der drei Städte hat bereits durch diverse Maßnahmen eine Verbesserung gegenüber dem Vorjahr erreichen können. Jedoch bleiben die gemessenen Werte deutlich über der erlaubten Schwelle.

#### 6.3.1 *Rahmenbedingungen*

Während in Düsseldorf und München bereits Umweltzonen existieren, ist Kiel bisher frei von Fahrverboten (UBA, 2020c). Da die Umweltzonen meist den dichtesten Verkehr der Innenstädte haben, sind sie eine gute Annäherung an den Innenstadtkern. Daher werden sie bei München und Düsseldorf als die Zone für das Fahrverbot dieser Maßnahme festgelegt. Für Kiel wird ähnlich der Auswahl anderer Städte der Bereich zwischen den Hauptverkehrsstraßen bestimmt und dieser Maßnahme wie auch der Maßnahme 7 – Umweltzone zugrunde gelegt.

---

<sup>7</sup> Der Messpunkt wurde zwischen den Jahren geändert.

Tabelle 24: Bevölkerungs- und Flächendaten der drei Städte

	<b>München</b>	<b>Düsseldorf</b>	<b>Kiel</b>
<b>Bevölkerung</b>	1.484.226 Ew.	621.877 Ew.	246.794 Ew.
<b>Bevölkerungsdichte</b>	4.777 Ew./km <sup>2</sup>	2.860 Ew./km <sup>2</sup>	2.080 Ew./km <sup>2</sup>
<b>Gesamtfläche Stadt</b>	310,7 km <sup>2</sup>	217,41 km <sup>2</sup>	118,65 km <sup>2</sup>
<b>Fläche Umweltzone</b>	43,98 km <sup>2</sup>	60,40 km <sup>2</sup>	19,54 km <sup>2</sup>
<b>Anteil Umweltzone am Stadtgebiet</b>	14,2 %	27,8 %	16,5 %

Quelle: CEPiR-Modell, eigene Darstellung.<sup>8</sup>

Diese drei Städte sind für einen Vergleich deshalb sehr interessant, da sich sowohl die Stadtfläche als auch die Bevölkerungszahl stark unterscheiden und somit drei verschiedene Größenkategorien an Großstädten untersucht werden. Interessant ist ebenfalls, dass bei Düsseldorf die Umweltzone knapp 28 % der Stadtfläche ausmacht, während in München lediglich 14 % der Stadtfläche mit einer Einfahrtbeschränkung belegt sind (UBA, 2020c). Darüber hinaus ist hervorzuheben, dass sich die drei Städte in unterschiedlichen Bundesländern befinden und somit verschiedenen strukturellen, politischen und rechtlichen Besonderheiten unterliegen. Im Folgenden werden die drei Städte zunächst einzeln betrachtet und die berechneten Werte im Nachgang aufsummiert.

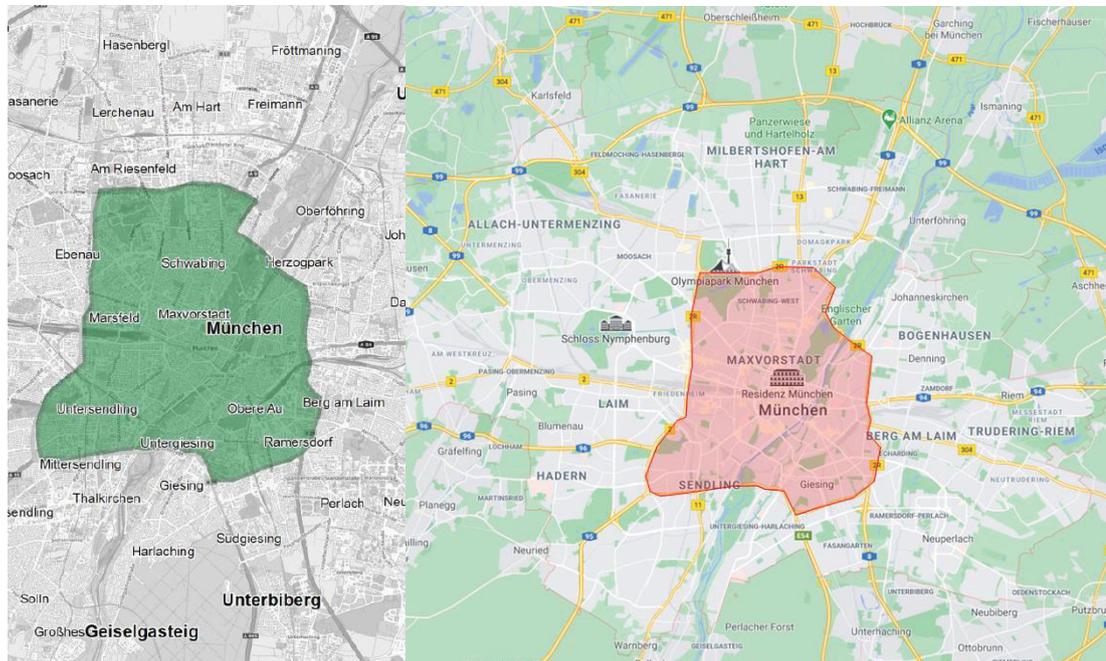
#### (1) München

In den Jahren von 2015 bis 2018 war in München ein NO<sub>2</sub>-Rückgang zu beobachten. Dies zeigt, dass die Umsetzung der in den Luftreinhalteplänen bisher vorgesehenen und der außerhalb eines Luftreinhalteplans umgesetzten Maßnahmen insgesamt eine Reduktion der Belastung mit Stickstoffdioxid bewirkt. Aufgrund der zeitlichen und quantitativen Unbekannten zu den einzelnen Entwicklungen, zum Beispiel Software-Updates, Förderprogramme, Abwrackprämie, Käuferverhalten oder Bewusstseinsbildung in der Bevölkerung, ist eine Trennung in einzelne Ursachen mit Quantifizierung nur schwer möglich (Regierung von Oberbayern, 2019).

<sup>8</sup> (Regierung von Oberbayern, 2007), (Bezirksregierung Düsseldorf, 2019), (MELUND, 2020), (UBA, 2019a), (UBA, 2019b), (Google, 2021)

Der geografische Bereich der Maßnahme, also der Innenstadtbereich wird auf die Umweltzone festgelegt.

Abbildung 57: Geografischer Bereich der Maßnahme in München (Umweltzone)



Quelle: (UBA, 2019b vgl. mit Google, 2021).

Innerhalb des Luftreinhalteplans der Stadt München wurde der Lkw-Durchgangsverkehr untersucht. Ziel des Konzeptes war die Verringerung derjenigen Lkw-Fahrten, die München lediglich als Durchgangsverkehr passieren. Durch die Verlagerung dieser Lkw-Verkehre auf den Autobahnring A 99 wurden unnötige Lkw-Fahrten in München verringert, wodurch sowohl im Bereich Abgas als auch im Bereich Abrieb/Aufwirbelung die Immissionsbelastung gemindert wurde. Die Werte aus diesem Konzept werden für die folgende Maßnahme zugrunde gelegt (Regierung von Oberbayern, 2007).

Das durchschnittliche tägliche Verkehrsaufkommen auf der Landshuter Allee liegt laut Fortschreibung des Luftreinhalteplans bei 131 000 Kfz, davon 7600 (5,8 %) schwere Nutzfahrzeuge (ohne Busse). Im Bereich des Luise-Kiesselbach-Platzes liegt das tägliche Verkehrsaufkommen bei 100 000 Kfz. Dort haben die schweren Nutzfahrzeuge einen Anteil von 6,8 % (absolut 6800 SNF) (Regierung von Oberbayern, 2007). Nach den Statistiken des KBA waren zum 01.01.2019 in der Stadt München 38 210 Lkw und im Landkreis München 17 391 Lkw zugelassen (Regierung von Oberbayern, 2019).

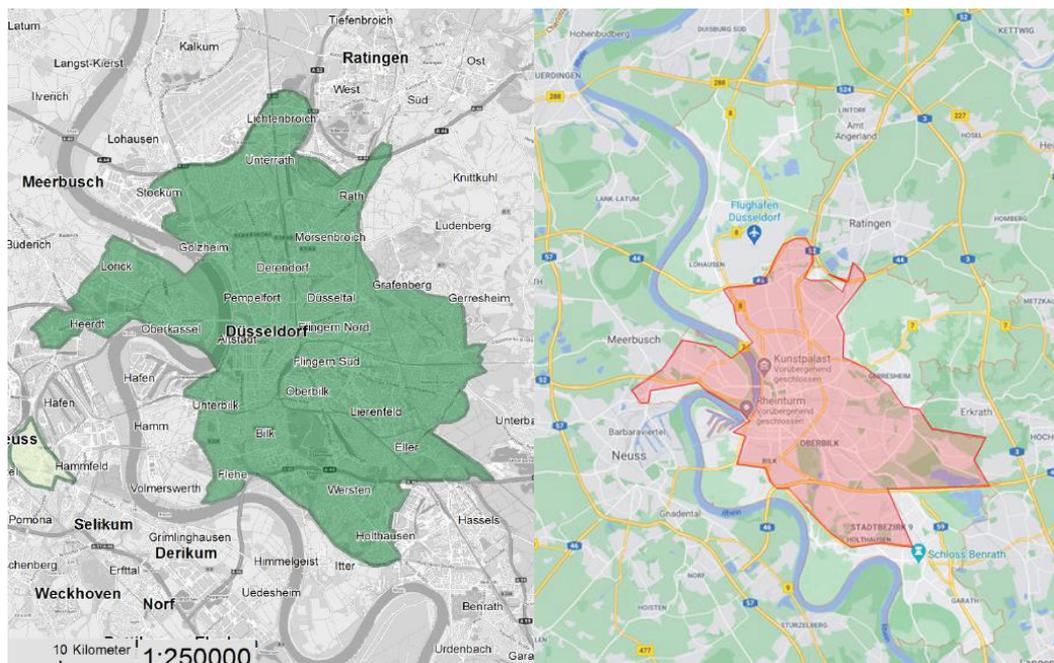
(2) Düsseldorf

Die Deutsche Umwelthilfe hat das Land Nordrhein-Westfalen im Januar 2015 wegen der gravierenden Nichteinhaltung der Grenzwerte für Stickstoffdioxid in Düsseldorf verklagt. Von dieser Klage sind daneben auch Essen, Köln, Bonn, Aachen und Gelsenkirchen betroffen. Im März 2018 folgten bundesweit elf weitere Klagen, davon vier in NRW für die Städte Dortmund, Bochum, Düren und Paderborn (Deutsche Umwelthilfe, 2018). Im Urteil des Verwaltungsgerichts Düsseldorf vom 13.09.2016 zur Klage der Deutschen Umwelthilfe gegen den Luftreinhalteplan Düsseldorf wurde die Bezirksregierung Düsseldorf aufgefordert, diesen Plan so fortzuschreiben, dass der Stickstoffdioxidgrenzwert schnellstmöglich eingehalten wird, wobei auch Einfahrtverbote von Dieselfahrzeugen zu prüfen seien (Deutsche Umwelthilfe, 2016).

Diese Situation gilt für die Landeshauptstadt Düsseldorf ebenso wie für die zahlreichen anderen Großstädte in NRW. Der EU-Jahresmittel-Grenzwert für 2017 wurde an 47 von 127 Messstellen (davon 89 Verkehrsstationen) in NRW nicht eingehalten. In Düsseldorf ist insgesamt ein Trend zur abnehmenden Schadstoffbelastung zu erkennen, jedoch wird der  $\text{NO}_2$ -Jahresmittelgrenzwert von  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  weiterhin an einigen durch den Kfz-Verkehr belasteten Standorten überschritten (Bezirksregierung Düsseldorf, 2019).

Der geografische Wirkungsbereich der Maßnahme, also der Innenstadtbereich, wird durch die Umweltzone festgelegt.

Abbildung 58: Geografischer Bereich der Maßnahme in Düsseldorf (Umweltzone)



Quelle: (UBA, 2019b vgl. mit Google, 2021).

Im Stadtgebiet Düsseldorf wird insgesamt eine Jahresfahrleistung von ca. 3976 Mio. Fahrzeugkilometer pro Jahr (FZkm/a) erbracht. Der höchste Anteil (ca. 89 %) davon besteht aus Pkw-Verkehr, der ca. 63 % der NO<sub>x</sub>-Emissionen verursacht. Die schweren Nutzfahrzeuge erbringen zusammen ca. 5,4 % der Jahresfahrleistung. Damit verursachen sie ca. 23 % der NO<sub>x</sub>-Emissionen des Straßenverkehrs. Den Rest bilden die leichten Nutzfahrzeuge (5 %) (Bezirksregierung Düsseldorf, 2019).

Tabelle 25: Jahresfahrleistung in Fahrzeugkilometer (FZkm) pro Jahr in Düsseldorf

	2015		Prognose 2020	
	Mio. FZkm/a	%	Mio. FZkm/a	%
<b>LNF</b>	195,6	5	202,2	5,1
<b>SNF</b>	186	5,4	192,9	4,9
<b>Gesamt</b>	3976	100	3958,5	100

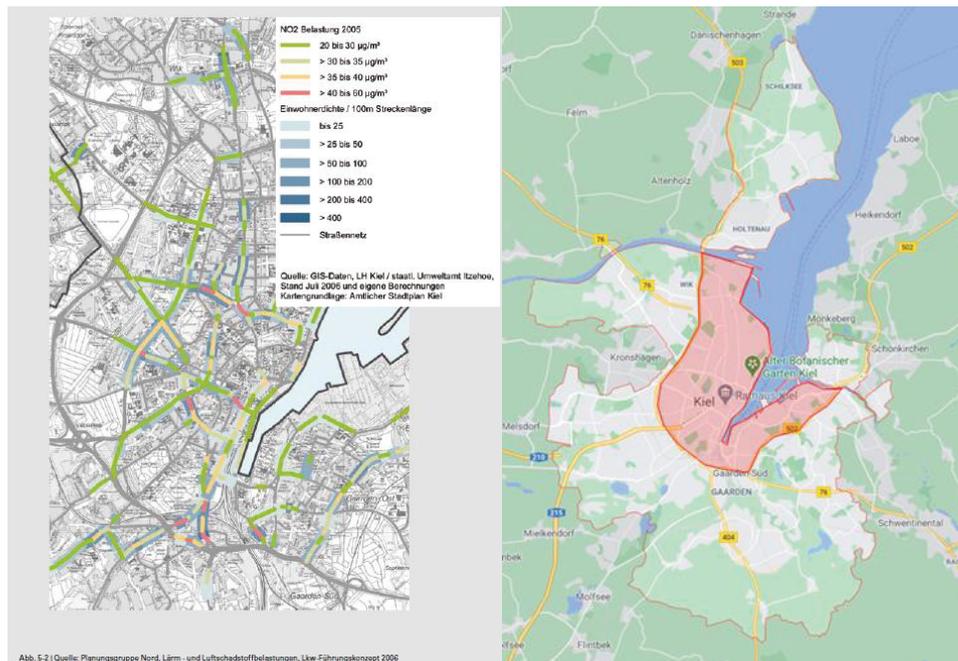
Quelle: (Bezirksregierung Düsseldorf, 2019)

### (3) Kiel

Die Stadt Kiel ist Landeshauptstadt von Schleswig-Holstein und liegt auf beiden Seiten der Kieler Förde, einer etwa 17 km langen, schmalen Bucht der Ostsee. Die Förde bildet einen natürlichen Tiefwasserhafen. Der Hafenbetrieb ist gekennzeichnet durch tägliche Passagier- und Frachtfährverbindungen nach Skandinavien und ins Baltikum. Seit einigen Jahren kommen zunehmend Kreuzfahrtschiffe hinzu (MELUND, 2020). Mit der regionalen Mobilitätsstrategie hat die Landeshauptstadt Kiel gemeinsam mit den beiden benachbarten Kreisen Plön und Rendsburg-Eckernförde im Jahr 2017 die Entwicklung einer modernen Mobilität definiert. Mit den Strategien aus dem Masterplan Mobilität sollen die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Verkehrs in der Region um insgesamt 35 % bis zum Jahr 2035 reduziert werden. Zur Zielerreichung ist eine Reduktion der Kfz-Fahrleistung um insgesamt etwa 25 % im gleichen Zeitraum und eine Veränderung der Verkehrsmittelwahl der Kieler Bevölkerung sowie in der ganzen Kiel-Region erforderlich (Planersocietät & Urbanus, 2018).

Da es für Kiel bisher keine geografische Darstellung einer potentiellen Umweltzone gibt, wurde anhand der Karte für „NO<sub>2</sub>-Belastung durch den Straßenverkehr“ der relevante Innenstadtbereich beschrieben.

Abbildung 59: Geografischer Bereich der Maßnahme in Kiel (mögliche Umweltzone)



Quelle: (Landeshauptstadt Kiel, 2008 vgl. mit Google, 2021).

Die Konzentrationen der Stickstoffoxide weisen starke zeitliche Schwankungen auf. An den Stationen im städtischen Hintergrund liegen niedrige Konzentrationen in den Sommermonaten und höhere Konzentrationen im Winter vor. Insbesondere die hohen Verkehrszahlen auf dem Theodor-Heuss-Ring mit durchschnittlich mehr als 100 000 Fahrzeugen an Werktagen in Kombination mit einer einseitig geschlossenen Bebauung und direkt angrenzender Wohnbebauung stellen eine besondere Situation dar. Über die Bundesstraße werden auch die Verkehre zu und von den Kieler Häfen zu den Autobahnen gelenkt, sodass diese insbesondere im Kieler Stadtgebiet auch eine wichtige Funktion für die Hafenhinterland-Anbindung der Kieler Häfen übernehmen. Danach fahren im Querschnitt des Standortes der Messstation ca. 1530 schwere Nutzfahrzeuge in west-östliche und ca. 1420 schwere Nutzfahrzeuge in ost-westliche Richtung. Daten für die Aufteilung des Verkehrs auf die insgesamt sechs Fahrspuren entstammen dem Verkehrsmodell der Stadt Kiel (MELUND, 2020). Vergleicht man Tabelle 26 mit den Bestandsdaten des Kraftfahrtbundesamtes, so wird die dort im Bestand angegebene Anzahl an Fahrzeugen für die Stadt Kiel als für die Maßnahme relevant bestätigt (KBA, 2021).

Tabelle 26: Messdaten aus dem Verkehrsmodell der Stadt Kiel

<i>Theodor-Heuss-Ring</i>	Fahrtrichtung Ost				Fahrtrichtung West			
	Spur 1 rechts	Spur 2 Mitte	Spur 3 links	Summe	Spur 4 links	Spur 5 Mitte	Spur 6 rechts	Summe
<b>PKW</b>	3700	17600	20000	41300	16800	20100	4500	41400
<b>LNF</b>	120	760	860	1740	690	810	110	1610
<b>SNF</b>	70	1180	280	1530	90	1240	90	1420
<b>Summe</b>	3890	19540	21140	44570	17580	22150	4700	44430
	Spur 7 rechts	Spur 8 Mitte	Spur 9 links	Summe	Spur 10 links	Spur 11 Mitte	Spur 12 rechts	Summe
<b>PKW</b>	8600	16200	16500	41300	4500	17000	19900	41400
<b>LNF</b>	530	660	550	1740	290	420	900	1610
<b>SNF</b>	450	990	90	1530	190	240	990	1420
<b>Summe</b>	9580	17850	17140	44570	4980	17660	21790	44430

Quelle: (MELUND, 2020)

Die verkehrlichen Auswirkungen einer selektiven Sperrung des Theodor-Heuss-Ringes für Dieselfahrzeuge wurde bereits untersucht. Im Gegensatz zur Untersuchung innerhalb dieser Arbeit beschränkt sich das bereits untersuchte Fahrverbot jedoch lediglich auf den Theodor-Heuss-Ring und umfasst nicht die gesamte Innenstadt, wodurch abweichende Effekte und Ergebnisse entstehen. Die verkehrlichen Auswirkungen der Sperrung des Theodor-Heuss-Ringes in Richtung Westen zwischen Lübscher Baum und Waldwiesenkreis für Diesel Pkw unterhalb Euro 6 sind mit dem Verkehrsmodell der Stadt Kiel gutachterlich untersucht worden. Dabei zeigte sich, dass die Sperrung des Theodor-Heuss-Rings für Diesel Pkw unter Euro 6 zu einem sogenannten „Rebound-Effekt“ führen würde. Knapp die Hälfte der freiwerdenden Kapazitäten würde durch andere Fahrzeuge wieder aufgefüllt. Diese Fahrzeuge sind jedoch nicht nur Pkw, sondern auch Lkw, was ein Ansteigen des Schwerlastverkehrs insgesamt und des Anteils an Diesel Lkw unterhalb Euro VI bewirken würde. Der Studie zufolge ist durch eine ganzjährige Sperrung für Diesel-Pkw der Emissionsklassen Euro 1 bis 5 in Fahrtrichtung Westen die Einhaltung des Grenzwertes im Jahr 2020 zu erwarten, allerdings kommt diese Studie ebenfalls zu dem Schluss, dass eine Ausweitung der selektiven Sperrung auf andere Fahrzeuggruppen wie leichte und schwere Nutzfahrzeuge nicht erforderlich und unbegründet wäre (MELUND, 2020). Der Lkw-Verkehr nimmt in Kiel mit im Durchschnitt 2,6 % der gesamten Fahrleistung eine eher geringe Rolle ein. Dieser Wert kann je nach Straße aber erheblich schwanken (Landeshauptstadt Kiel, 2008).

Obwohl die Maßnahme zunächst nur in drei Städten eingesetzt wird, wird angenommen, dass sie eine Signalwirkung hat und Unsicherheit und Zögern bei potentiellen Käufern verursacht. Es könnten andere Städte ebenfalls ein Dieserverbot beschließen und das gekaufte Fahrzeug könnte schnell unbrauchbar werden. Dies führt ebenso wie in Maßnahme 1 dazu, dass ein Verkauf der Altfahrzeuge ins Ausland unwahrscheinlich bleibt bzw. der Verkaufspreis aufgrund des erhöhten Angebots bei gleichbleibender Nachfrage nicht höher als die Abwrackprämie sein wird.

Zwar gibt es in Kiel und Düsseldorf selbst keine ansässigen Fahrzeugproduktionen. Da jedoch der Effekt auf das gesamte Staatsgebiet Deutschlands betrachtet wird, muss hier nicht unterschieden werden. Es werden somit nicht nur die lokalen Treibhausgaswirkungen in Kiel und Düsseldorf in diese Maßnahme einbezogen. Im Gegensatz zur ersten Maßnahme wird bei dieser angenommen, dass keine zusätzliche Nachfrage aus dem Ausland geschaffen wird. Da lediglich die Innenstädte betroffen sind, wird angenommen, dass der überwiegende Anteil der Fahrzeuge aus Deutschland kommt, da in den Innenstädten wenig Durchgangsverkehr besteht.

Nimmt man diese Kriterien als Grundlage, so kann das Modell mit den folgenden Hebeln bestimmt werden:

Tabelle 27: Hebel der Maßnahme 2

<b>1. Betroffene Region</b>	
<input type="checkbox"/> Gesamtdeutschland	<input checked="" type="checkbox"/> Regionen-spezifisch <span style="margin-left: 20px;">München, Düsseldorf, Kiel</span>
<b>2. Betroffene Schadstoffklassen</b>	
<input checked="" type="checkbox"/> SKL 3	<input checked="" type="checkbox"/> SKL 4 <input checked="" type="checkbox"/> SKL 5 <input checked="" type="checkbox"/> SKL EEV <input type="checkbox"/> SKL 6 <input type="checkbox"/> Sonstige
<b>3. Betroffene Größenklassen</b>	
<input checked="" type="checkbox"/> < 2,8 t	<input checked="" type="checkbox"/> 2,8 – 3,5 T. <input checked="" type="checkbox"/> 3,5 – 7,5 T. <input checked="" type="checkbox"/> 7,5 – 12 T. <input checked="" type="checkbox"/> > 12 t
<b>4. Antriebsarten - Neukauf</b>	
<input checked="" type="checkbox"/> Benzin	<input checked="" type="checkbox"/> Diesel <input checked="" type="checkbox"/> LPG <input checked="" type="checkbox"/> CNG <input checked="" type="checkbox"/> Elektro <input checked="" type="checkbox"/> Hybrid <input checked="" type="checkbox"/> Sonstige
<b>5. Neukaufquote (Verkauf zu Neukauf)</b>	
<input checked="" type="checkbox"/> 100 % (Standard)	<input type="checkbox"/> Andere Quote: <input type="text"/>
<b>6. Austauschzwang oder -anreiz?</b>	
<input checked="" type="checkbox"/> Zwang	<input type="checkbox"/> Anreizquote: <input type="text"/>
<b>7. Subventionen Fahrzeuge</b>	
regionaler Zusatz:	LPG <input type="text"/>
	CNG <input type="text"/>
	Elektro <input type="text"/>
	Hybrid <input type="text"/>

Sonstige

**8. Betroffene Verkehrsbereiche**

Nahverkehr  Regionalverkehr (inkl. Bundesstraßen)  Fernverkehr (inkl. Autobahn)

**9. Zusatzberechnungen**

Mikrodepot und Lastenfahrräder  Bonus-Malus-System  
 Verteilzentren  CO2-Maut  
 Umweltspur innerorts  CO2-Steuer  
 Umweltspur außerorts  City-Maut  
 Umweltzone  CO2-Ausweis

**10. Änderung der Nachfrage im Ausland**

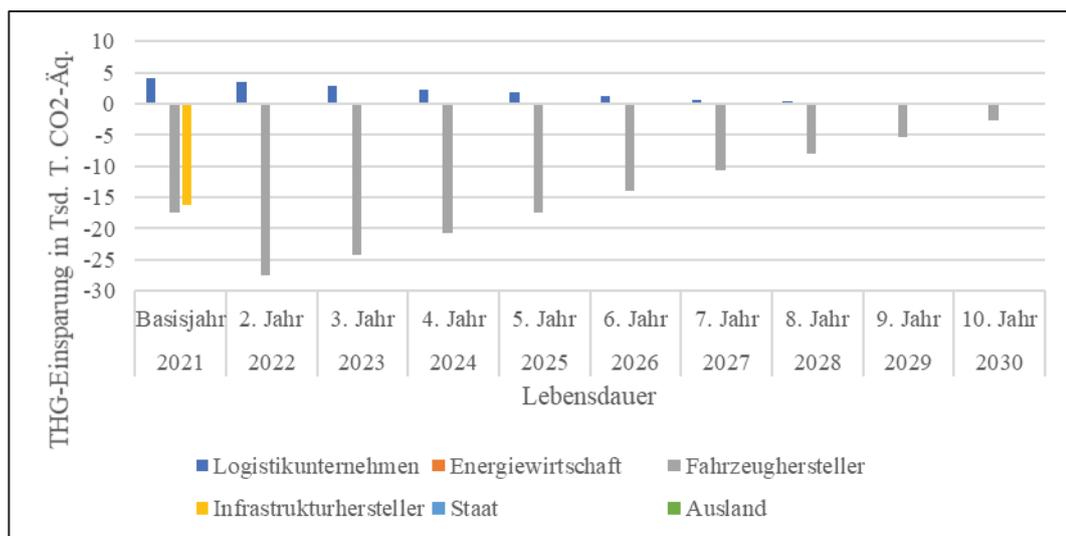
Ja  Nein

Quelle: eigene Darstellung.

### 6.3.2 Treibhausgaseffekte

Auch bei der Maßnahme 2 ist deutlich zu erkennen, dass die mit der Umsetzung der Maßnahme zu erreichenden THG-Einsparungen negativ sind. Dies bedeutet, dass die Maßnahme mehr CO<sub>2</sub> produziert, als sie verhindert. Dies ist ebenso wie in Maßnahme 1 auf die hohen Herstellungsemissionen und die zu geringen Einsparungen beim Fahrzeugbetrieb zurückzuführen. Insgesamt liegt die Einsparung bei –150 Tsd. Tonnen CO<sub>2</sub> über den gesamten Betrachtungszeitraum von 10 Jahren.

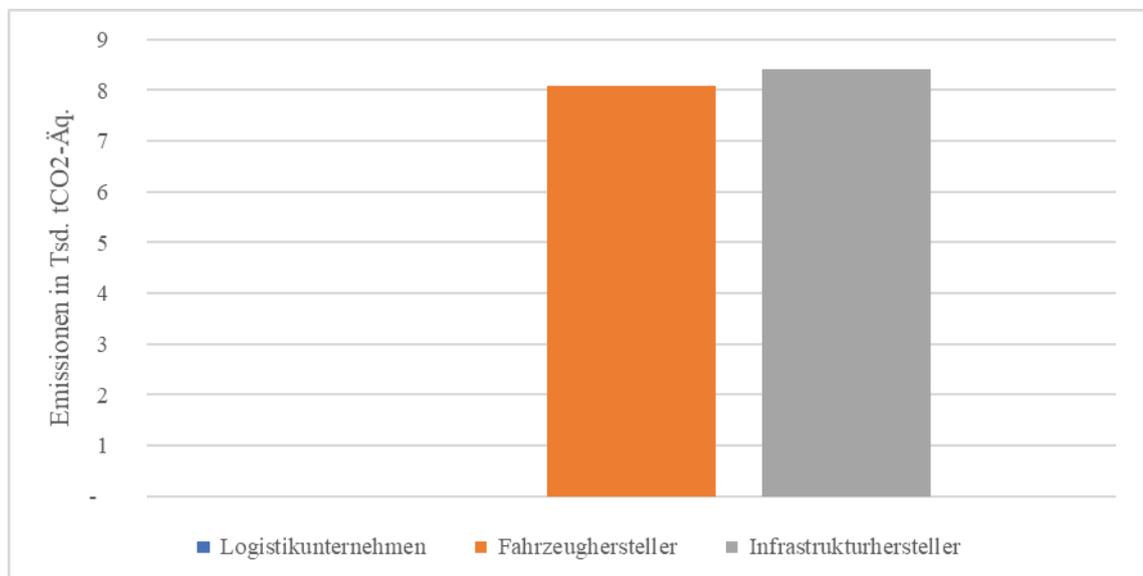
Abbildung 60: Treibhausgaseinsparungen aufgrund von Maßnahme 2 über die Lebensdauer



Quelle: CEPiR-Modell, eigene Darstellung.

Aufgrund des hohen Anteils an kleineren Fahrzeugen und des damit verbundenen Wechsels zu alternativen Kraftstoffen wird sowohl im In- als auch im Ausland vermehrt Infrastruktur produziert, die ebenfalls mit hohen Herstellungsemissionen einhergeht. Im Gegensatz zur Maßnahme 1 entsteht kein positiver Effekt durch die ausländischen Logistikunternehmen, die vom Zwang dieser Maßnahme nicht betroffen sind. Diese Emissionen werden jedoch wie bereits beschrieben im Modell nicht weiter berücksichtigt, da sie außerhalb der regionalen Grenzen stattfinden. Wichtig ist jedoch, dass, obwohl die Maßnahme bereits ineffektiv und ineffizient ist, diese negativen Einsparungen global betrachtet noch niedriger, also noch schlechter für die Umwelt sind.

Abbildung 61: THG-Anstiege verursacht von ausländischen Akteuren aufgrund von Maßnahme 2 am Beispiel München

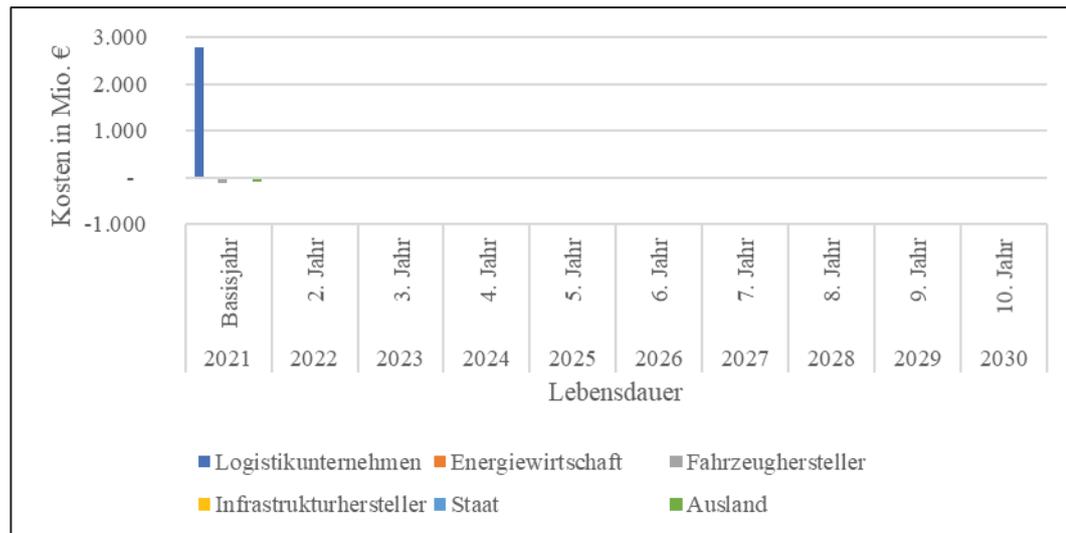


Quelle: CEPiR-Modell, eigene Darstellung.

### 6.3.3 Kosteneffekte

Auch hinsichtlich der Kosten ist die Bilanz der Maßnahme 2 ähnlich schlecht wie die von Maßnahme 1. Zwar können besonders im Basisjahr 2021 die Fahrzeughersteller, Infrastrukturhersteller und das Ausland Gewinne erwirtschaften, jedoch stehen dem wesentlich höheren Kosten seitens der Logistikunternehmens und des Staates gegenüber. Insgesamt liegen die Kosten dieser Maßnahme bei rund 2,6 Mrd. Euro, aufsummiert über den Betrachtungszeitraum von 10 Jahren. Rund 99,8 % fallen davon bereits im Basisjahr an.

Abbildung 62: Kosten aufgrund von Maßnahme 2 über die Lebensdauer



Quelle: CEPIR-Modell, eigene Darstellung.

#### 6.3.4 Fazit

Hinsichtlich des Kosten-Nutzen-Ratio ist die Maßnahme ebenfalls nicht effizient. Hierbei stehen über die Lebensdauer Kosten von rund 17 € einem hinzukommenden Kilogramm CO<sub>2</sub>-Äq. gegenüber, im Basisjahr sind es 86 €. Bei dieser Maßnahme ergibt somit die Interpretation des Verhältnisses ebenfalls keinen Sinn. Die Maßnahme ist in dieser Ausgestaltung zudem weder ökonomisch noch ökologisch sinnvoll.

### 6.4 Maßnahme 3: Dieserverbot im gesamten Stadtbereich von München inkl. Errichtung von Mikrodepots

#### 6.4.1 Rahmenbedingungen

Die Stadt München hat knapp 1,5 Mio. Einwohner\*innen und eine Fläche von rund 310 km<sup>2</sup>. Die Bevölkerungsdichte liegt daher bei 4777 Ew./m<sup>2</sup> (Regierung von Oberbayern, 2019). Es wird davon ausgegangen, dass ähnlich wie bei den vorangegangenen Maßnahmen ein Dieserverbot eher zu dem Kauf von saubereren Dieselfahrzeugen als zu Fahrzeugen mit alternativen Antriebstechnologien führt. Darüber hinaus wird bei dieser Maßnahme angenommen, dass sogenannte Mikrodepots im Münchner Stadtgebiet verteilt werden müssen, um das Dieserverbot möglichst effektiv umzusetzen. Diese Annahme beruht auf den Bemühungen der Städte, solche Mikrodepot-Konzepte zu erstellen und den bereits existierenden Konzepten, zum Beispiel für die Stadt Nürnberg (Bayer et al., 2018). Diese Mikrodepots beschreiben dabei einen Ort für den Umschlag oder die Zwischenspeicherung von Transportgütern, wie Paketen, in dicht besiedelten Zustellgebieten

mit hohem Sendungsaufkommen. Darüber hinaus liefern diese die Möglichkeit des gesicherten Abstellens von Transportfahrzeugen (Lastenräder etc.) für die letzte Meile. Mikrodepots sollen allen KEP-Dienstleistern (Kurier-, Express- und Paketdienste) als gemeinsame Logistikbasis dienen. So werden zum Beispiel Container aufgestellt, die als Depot zum Umschlag und zur Kleinverteilung dienen (IHK Mittlerer Niederrhein, 2019). Im Sommer 2017 wurden in München drei Mikrodepots eröffnet, die eine Lagerung von Paketen mit anschließender emissionsfreier Auslieferung durch zwei- oder dreirädrige Elektrofahrzeuge ermöglichen (Bauer et. al., 2018). UPS hat bereits mehrere dieser Depots in München und beschreibt die Zusammenarbeit mit der Stadt und den Stadtbezirken als besonders gut, wenn es darum gehe, Genehmigungen für die Aufstellung der Mikrodepots bei den unterschiedlichen städtischen Referaten einzuholen. Somit ist die Umsetzbarkeit der Maßnahme gewährleistet (Zeit-Online, 2019). Innerhalb dieser Annahme wird jedoch davon ausgegangen, dass nicht nur Elektrofahrzeuge zur Verteilung genutzt werden, sondern vor allem Lastenräder zum Einsatz kommen. Vorlage für ein solches Mikrodepot-Konzept ist das Konzept der Stadt Nürnberg. In einem Feldversuch wurden dort in zwei Mikrodepot-Gebieten sieben Dieseltransporter durch acht Lastenfahrräder ersetzt und die logistische Effizienz des Konzeptes sowie die errechnete Wirtschaftlichkeit unter Beweis gestellt (Bogdanski et. al., 2017). Gemäß diesem Konzept wurde die Reichweite eines Mikrodepots auf rund 7 km<sup>2</sup> (entspricht einem Radius von rund 1,5 km) festgelegt (Bayer et al., 2018). Es müssen somit insgesamt rund 44 Mikrodepots errichtet werden, um das gesamte Münchner Stadtgebiet abzudecken. Bei dieser Maßnahme werden nicht nur die Bestandsfahrzeuge für die Stadt München, sondern auch die Lkw aus dem Bestand des Landkreises München als betroffene Fahrzeuge eingerechnet, da sich diese Maßnahme nicht nur auf den Innenstadtkern bezieht.

Gemäß dem Mikrodepot-Konzept der Stadt Nürnberg werden rund 18 Dieselfahrzeuge von Lastenrädern ersetzt. Anhand der Fläche kann daraus abgeleitet werden, dass für die Mikrodepots der Stadt München insgesamt 262 Fahrzeuge durch Lastenfahrräder ersetzt werden können (Bayer et al., 2018). Diese 262 werden somit von der Anzahl der leichten Neufahrzeuge abgezogen.

Es wird davon ausgegangen, dass die Fahrzeughersteller von Lastkraftwagen nicht die Hersteller von Lastenfahrrädern sind, sodass an dieser Stelle keine Umsatzeinnahmen aus dem Verkauf von Lastenrädern hinzuzurechnen sind. Diese werden der Kategorie „Sonstiges“ zugeordnet. Somit wird auch der Treibhausgasanstieg der Fahrradproduktion innerhalb dieser Arbeit nicht abgebildet. Es wird davon ausgegangen, dass die Emissionen

bei der Produktion von den 262 Fahrrädern innerhalb dieser Berechnung vernachlässigbar sind.

Im Gegensatz zur gesamtdeutschen Betrachtung in Maßnahme 1 existieren in Bayern Fördermittel, die für den Aufbau von Infrastruktur beantragt werden können. Da in Bayern ein Förderprogramm existiert, bei dem Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge mit bis zu 8000 € gefördert wird, wird dies hierbei berücksichtigt. Darüber hinaus existiert ein Förderprogramm für die Errichtung von Wasserstoff-Tankstellen. Da angenommen wird, dass sich hinter dem Kraftstoff „Sonstige“ ein hoher Anteil an Wasserstofffahrzeugen verbirgt, wird dieses Förderprogramm zugrunde gelegt. Die Höhe des Zuschusses beträgt für öffentliche Wasserstoffbetankungsanlagen bis zu 90 % der zuwendungsfähigen Kosten (Förderdatenbank, 2021).

Nimmt man diese Kriterien als Grundlage, so kann das Modell mit den folgenden Hebeln bestimmt werden:

Tabelle 28: Hebel der Maßnahme 3

<b>1. Betroffene Region</b>	
<input type="checkbox"/> Gesamtdeutschland	<input checked="" type="checkbox"/> Regionen-spezifisch <input type="checkbox"/> München + LK
<b>2. Betroffene Schadstoffklassen</b>	
<input checked="" type="checkbox"/> SKL 3	<input checked="" type="checkbox"/> SKL 4 <input checked="" type="checkbox"/> SKL 5 <input checked="" type="checkbox"/> SKL EEV <input type="checkbox"/> SKL 6 <input type="checkbox"/> Sonstige
<b>3. Betroffene Größenklassen</b>	
<input checked="" type="checkbox"/> < 2,8 t	<input checked="" type="checkbox"/> 2,8 – 3,5 T. <input checked="" type="checkbox"/> 3,5 – 7,5 T. <input checked="" type="checkbox"/> 7,5 – 12 T. <input checked="" type="checkbox"/> > 12 t
<b>4. Antriebsarten - Neukauf</b>	
<input checked="" type="checkbox"/> Benzin	<input checked="" type="checkbox"/> Diesel <input checked="" type="checkbox"/> LPG <input checked="" type="checkbox"/> CNG <input checked="" type="checkbox"/> Elektro <input checked="" type="checkbox"/> Hybrid <input checked="" type="checkbox"/> Sonstige
<b>5. Neukaufquote (Verkauf zu Neukauf)</b>	
<input type="checkbox"/> 100 % (Standard)	<input checked="" type="checkbox"/> Andere Quote: <input type="text" value="0,999"/>
<b>6. Austauschzwang oder -anreiz?</b>	
<input checked="" type="checkbox"/> Zwang	<input type="checkbox"/> Anreizquote: <input type="text"/>
<b>7. Subventionen Fahrzeuge</b>	
regionaler Zusatz:	LPG <input type="text"/>
	CNG <input type="text"/>
	Elektro <input type="text"/>
	Hybrid <input type="text"/>
	Sonstige <input type="text"/>
<b>8. Betroffene Verkehrsbereiche</b>	
<input checked="" type="checkbox"/> Nahverkehr	<input checked="" type="checkbox"/> Regionalverkehr (inkl. Bundesstraßen) <input type="checkbox"/> Fernverkehr (inkl. Autobahn)
<b>9. Zusatzberechnungen</b>	

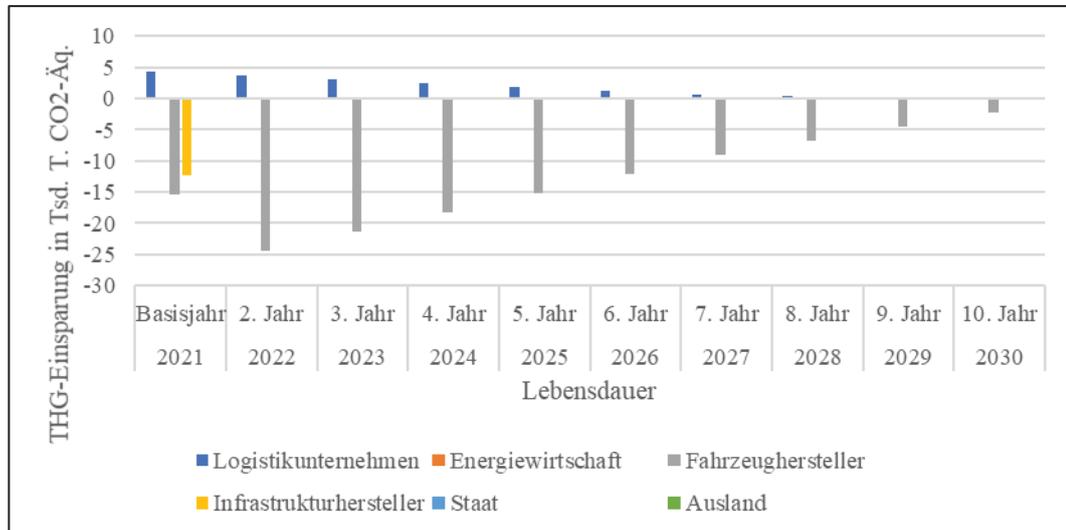
<input checked="" type="checkbox"/>	Mikrodepot und Lastenfahrräder	<input type="checkbox"/>	Bonus-Malus-System
<input type="checkbox"/>	Verteilzentren	<input type="checkbox"/>	CO2-Maut
<input type="checkbox"/>	Umweltspur innerorts	<input type="checkbox"/>	CO2-Steuer
<input type="checkbox"/>	Umweltspur außerorts	<input type="checkbox"/>	City-Maut
<input type="checkbox"/>	Umweltzone	<input type="checkbox"/>	CO2-Ausweis
<b>10. Änderung der Nachfrage im Ausland</b>			
<input type="checkbox"/>	Ja	<input checked="" type="checkbox"/>	Nein

Quelle: eigene Darstellung.

#### 6.4.2 Treibhausgaseffekte

Die Maßnahme ist ebenso wie die vorangegangenen nicht zur Einsparung von Treibhausgasen geeignet. Auch hier übersteigen die Herstellungsemissionen von Fahrzeugen und Infrastruktur den positiven Effekt der Einsparung im Fahrzeugbetrieb. Insgesamt liegt die negative THG-Einsparung bei -124 Tsd. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äq. über den Betrachtungszeitraum.

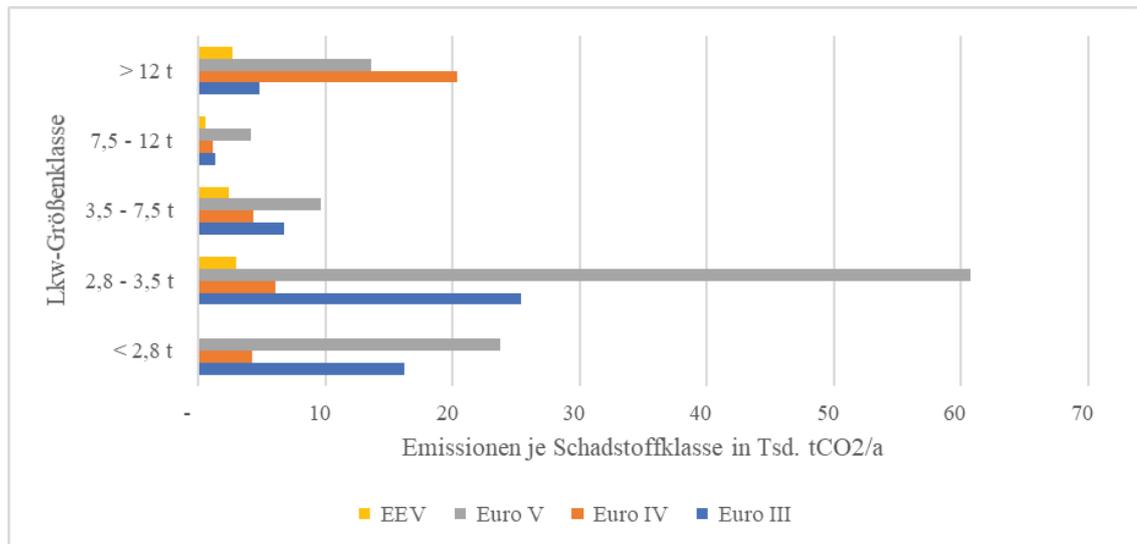
Abbildung 63: Treibhausgaseinsparungen aufgrund von Maßnahme 3 über die Lebensdauer



Quelle: CEPiR-Modell, eigene Darstellung.

Im Vergleich zur Verteilung für Gesamtdeutschland findet in München und Umland eine deutlich höhere Reduktion von Euro-IV-Fahrzeugen und weniger Euro-V-Fahrzeugen bei der Größenklasse über 12 t statt. Währenddessen ist die Verteilung bei den übrigen Größenklassen der Verteilung von Maßnahme 1 sehr ähnlich.

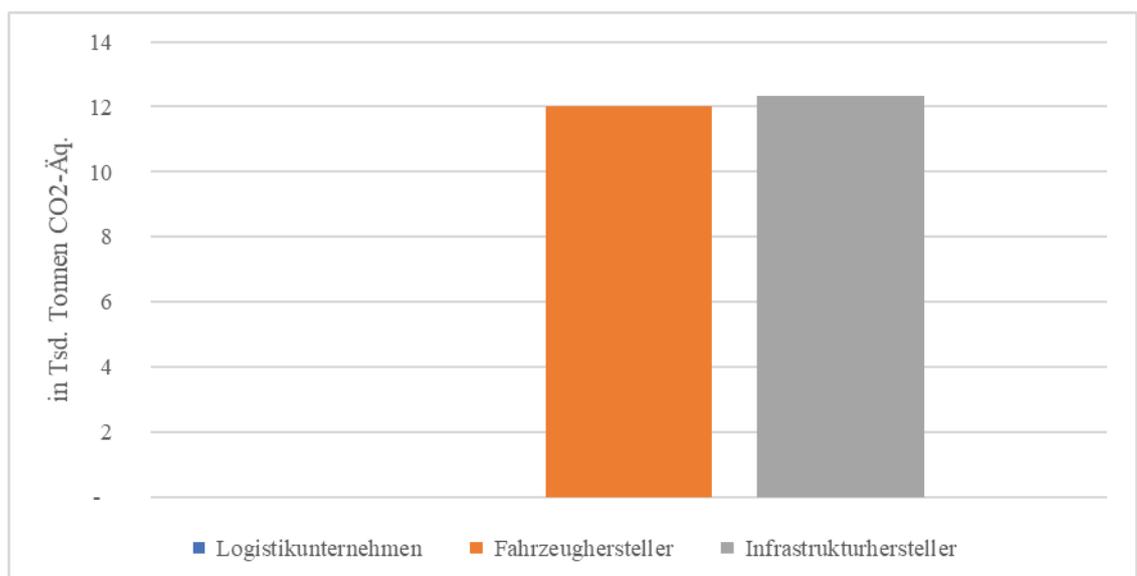
Abbildung 64: Emissionseinsparung durch Altfahrzeuge (in Tsd. t CO<sub>2</sub>-Äq./a) aufgrund von Maßnahme 3



Quelle: CEP-IR-Modell, eigene Darstellung.

Hinsichtlich der Treibhausgase, die vom Ausland verursacht werden, ist zu erkennen, dass sie bei dieser Maßnahme bei den Infrastrukturherstellern höher sind als bei den Fahrzeugherstellern. Dies liegt am höheren Anteil an alternativen Kraftstoffen im Nahverkehr. Je mehr Fahrzeuge mit alternativem Antrieb gekauft werden, desto mehr Tankstellen müssen gebaut werden und somit sind die Infrastrukturemissionen wesentlich höher.

Abbildung 65: THG-Anstiege verursacht von ausländischen Akteuren aufgrund von Maßnahme 3



Quelle: CEP-IR-Modell, eigene Darstellung.

Darüber hinaus werden Treibhausgasemissionen durch den Einsatz der Lastenfahrräder und der Mikrodepots eingespart. Es wird die angegebene Treibhausgaseinsparung der Stadt Nürnberg zugrunde gelegt. Dort konnte eine Einsparung von rund 0,16 t CO<sub>2</sub>-Äq. pro Quadratkilometer erzielt werden (Bayer et al., 2018).

Die Berechnung erfolgt nach der Formel:

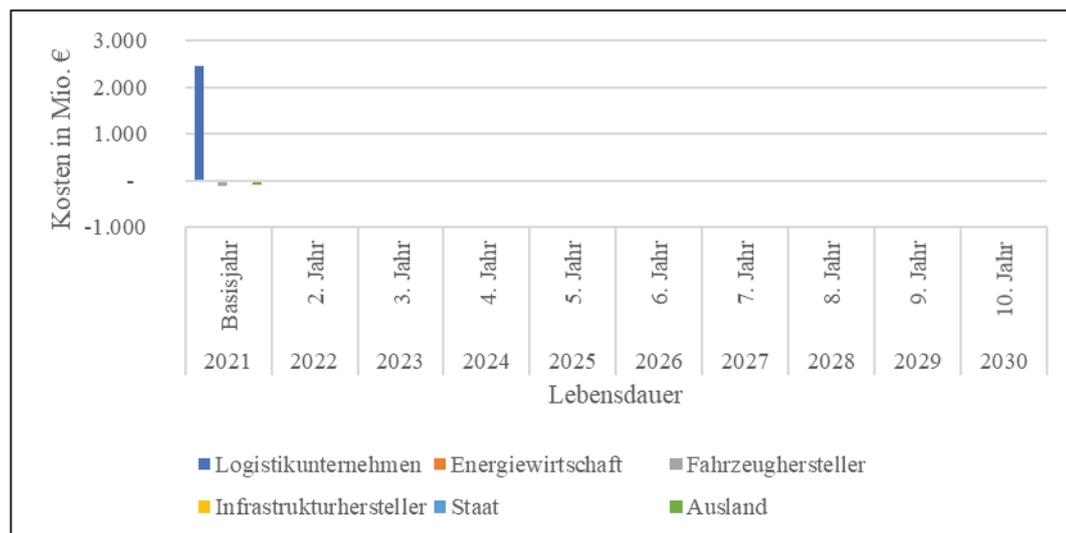
<b>TLU3 = THGR * FLM</b>		(15)
THGR	Treibhausgasreduktion in CO <sub>2</sub> -Äq. pro km	
FLM	Fläche der Stadt München in km <sup>2</sup>	

Auf einer Fläche von 310 km<sup>2</sup> können somit zusätzlich rund 49,4 t CO<sub>2</sub>-Äq. eingespart werden.

#### 6.4.3 Kosteneffekte

Auch bei der Maßnahme 3 liegen die Kosten für Logistikunternehmen bei über 2 Mrd. Euro im Basisjahr. Zwar können auch bei dieser Maßnahme die Hersteller Gewinne erzielen, diese liegen jedoch bei insgesamt rund 110 Mio. Euro.

Abbildung 66: Kosten aufgrund von Maßnahme 3 über die Lebensdauer

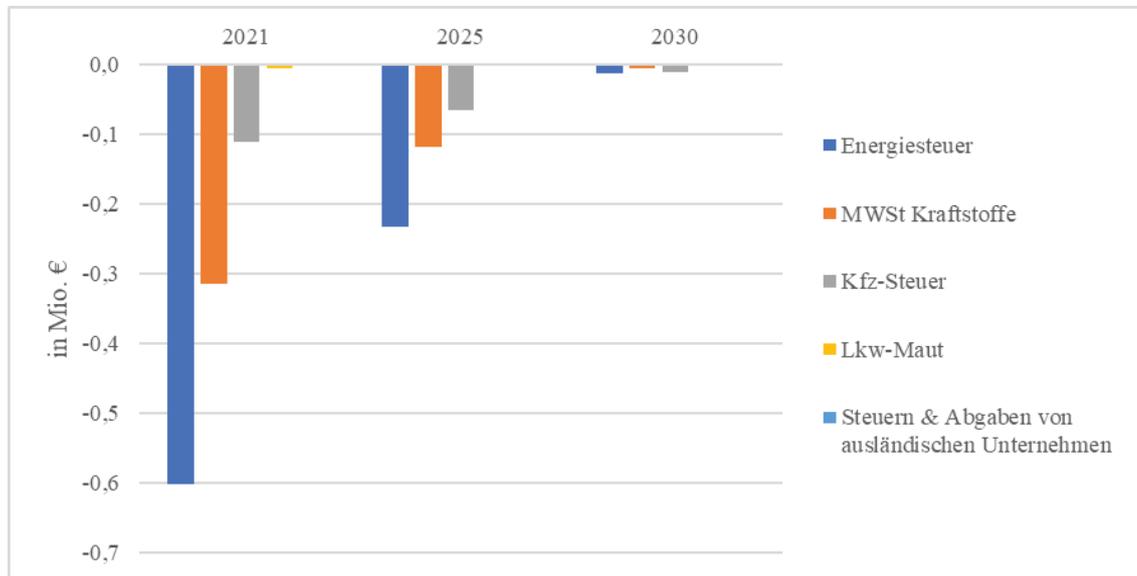


Quelle: CEPiR-Modell, eigene Darstellung.

Während bei Maßnahme 1 nicht nur auf die Einnahmen aus Steuern und Abgaben von deutschen Unternehmen verzichtet werden musste, sondern auch auf diejenigen von ausländischen Unternehmen, wird dieser Verlust in Maßnahme 3 insoweit geschmälert, als

diese Maßnahme keinerlei Wirkung auf das Ausland hat. Auch die Lkw-Maut fällt nicht stark ins Gewicht.

Abbildung 67: Veränderung der jährlichen Staatseinnahmen aufgrund von Maßnahme 3



Quelle: CEPiR-Modell, eigene Darstellung.

Darüber hinaus fallen Kosten für die Errichtung der Mikrodepots sowie den Kauf der Lastenfahrräder an.

Die Kosten für die Lastenräder werden wie folgt berechnet:

<b><math>KOLF = ((PLF + WBLF) * ANZ\_LF) + MwSt</math></b>		<b>(16)</b>
KOLF	Kosten Lastenfahrrad	
PLF	Durchschnittlicher Kaufpreis Lastenfahrrad	
WBLF	Wartungs- und Betriebskosten eines Lastenfahrrads	
ANZ_LF	Anzahl der benötigten Lastenfahrräder	
MwSt	Mehrwertsteuer	

Es wird ein durchschnittlicher Kaufpreis von 10.000 € für ein Lastenfahrrad veranschlagt. Die Wartungs- und Betriebskosten werden darüber hinaus mit 340 € pro Jahr näherungsweise angegeben (Bayer et al., 2018). Die Anschaffungs- und Betriebskosten eines Lastenrades sind geringer als die eines Transporters. Die Lohnkosten bleiben jedoch identisch (Riegel, A., 2019).

Die Kosten für die Mikrodepots werden wie folgt berechnet:

<b>KOMD =((KMD+MwSt)*ANZ_MD)*(1-FÖMD)</b>		(17)
KOMD	Kosten der Mikrodepots	
KMD	Mietkosten pro Mikrodepot	
ANZ_MD	Anzahl der benötigten Mikrodepots	
FÖMD	Förderzuschuss Mikrodepots	
MwSt	Mehrwertsteuer	

Es werden Mietkosten in Höhe von 21.600 € pro Mikrodepot veranschlagt. Diese werden aufgrund der Angabe der Verkehrsrundschau (2019b), dass ein Mikrodepot 180 Quadratmeter umfasst, sowie der monatlichen Mietkosten für die Fläche in einem Mikrodepot von 10 €/km<sup>2</sup> berechnet (Riegel, A., 2019). Da der Quadratmeterpreis in München vergleichsweise hoch ist, wurde hierbei der angegebene Höchstsatz angenommen. Für die Errichtung eines Mikrodepots erhält man vom Staat einen Zuschuss in Höhe von 40 % der zuwendungsfähigen Kosten (Förderdatenbank, 2021). Es entstehen folglich Kosten in Höhe von 0,7 Mio. Euro für die Mikrodepots.

Zusätzlich zur Maßnahme 1 kommen an dieser Stelle die Mehrwertsteuereinnahmen aus dem Kauf von Lastenrädern und Mikrodepots in Höhe von 0,68 Mio. Euro hinzu. Darüber hinaus hat der Staat Fördermittelkosten in Höhe von 0,46 Mio. Euro für die Mikrodepots.

#### 6.4.4 Fazit

Ähnlich wie bei den Maßnahmen 1 und 2 ist auch bei der Maßnahme 3 weder die Wirtschaftlichkeit noch die ökologische Nachhaltigkeit gegeben. Es entstehen sowohl Kosten als auch negative Einsparungen. Ähnlich wie bei den vorangegangenen Maßnahmen liegen die Kosten bei rund 19 € pro hinzukommendem Kilo CO<sub>2</sub>-Äq.

### 6.5 **Maßnahme 4: Dieserverbot im gesamten Straßennetz, ausgenommen Autobahnen**

#### 6.5.1 Rahmenbedingungen

Mit der Errichtung eines Dieserverbots im gesamten Straßennetz, ausgenommen Autobahnen, wird besonders der Nah- und Regionalverkehr in den Fokus gerückt. So wird untersucht, ob die schweren Lastkraftwagen, die ohnehin häufiger ausgetauscht werden

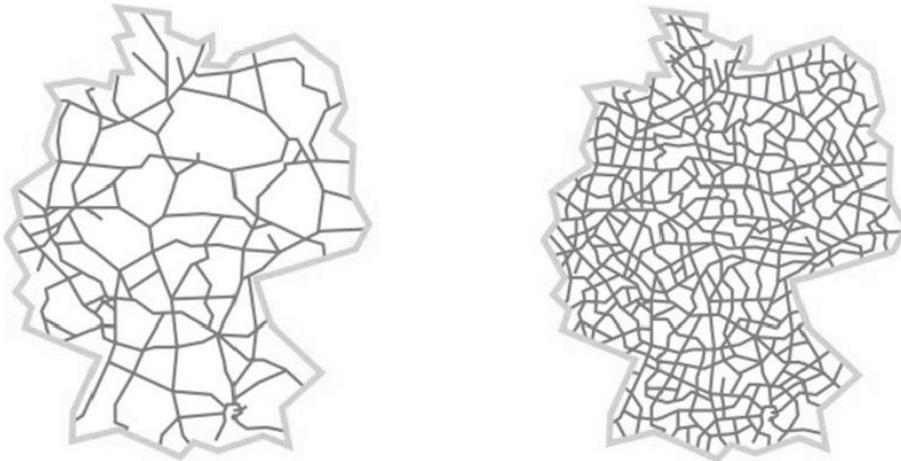
als kleine Nutzfahrzeuge, einen signifikanten Mehrwert zur Treibhausgasreduktion liefern. Da die Neufahrzeuge mit einer hohen Wahrscheinlichkeit wieder Dieselfahrzeuge wären, würde man eventuell nur relativ neue Dieselfahrzeuge durch neue Dieselfahrzeuge ersetzen. Der Vergleich zur ersten Maßnahme wird darüber Aufschluss geben.

Innerhalb dieser Maßnahme wird das Dieserverbot so ausgestaltet, dass nur Lastkraftwagen bis zu einer Größe von 7,5 t betroffen sind. Bereits in Abbildung 1 wurde beschrieben, dass der Nahverkehr meist durch die leichten und mittleren Lastkraftwagen abgedeckt wird. Da die Autobahnen vom Verbot ausgenommen werden, ist es weiterhin möglich, innerhalb von Deutschland die Waren über die Autobahnen mit den aktuellen Fahrzeugen zu transportieren.

Es wird davon ausgegangen, dass ähnlich wie bei den vorangegangenen Maßnahmen ein Dieserverbot zum Kauf von saubereren Dieselfahrzeugen und Fahrzeugen mit alternativen Antriebstechnologien führt. Darüber hinaus wird bei dieser Maßnahme, ähnlich wie bei den Mikrodepots in der vorigen Maßnahme, angenommen, dass sogenannte Logistik-Hubs an Autobahnausfahrten verteilt werden müssen, um das Dieserverbot möglichst effektiv umzusetzen. „Hub“ ist in der Logistik eine gängige Bezeichnung für einen zentralen Güterumschlagplatz. Das Wort „Hub“ kann dabei sowohl als Übernahme des englischen Wortes *hub* = Nabe gedeutet werden wie auch als Abkürzung für den Begriff Hauptumschlagbasis. Beim Hub ist ein Logistiknetz so aufgebaut, dass die Endpunkte des Netzes nicht direkt miteinander verbunden sind, sondern alle Wege von und zu einem zentralen Punkt, dem Hauptumschlagplatz, führen (Sats, 2021).

Aufgrund der Umschlagplätze wird davon ausgegangen, dass nur die Fahrzeuge bis zu 7,5 t betroffen sind, sodass es keinerlei Auswirkungen auf die Lkw-Maut gibt. Diese wurde im Jahr 2018 auf alle Bundesfernstraßen ausgeweitet. In der Abbildung 68 wird die Ausweitung der Lkw-Maut von Autobahnen (links) um das Bundesstraßennetz (rechts) dargestellt. Die folgende Grafik zeigt das Straßennetz, das von der Maßnahme ausgenommen wird.

Abbildung 68: Vergleich des Autobahn- und Bundesfernstraßennetzes in Deutschland



Quelle: (Ober, 2018).

Voraussetzung für die Umsetzung der Maßnahme ist, wie eingangs beschrieben, die Errichtung von Verteilzentren an den Dieserverbotsgrenzen. Wenn schwere Lastkraftwagen verwendet werden, um die Langstrecken über Autobahnen zurückzulegen, müssen die Waren an einem Umschlagplatz auf die leichten Lastkraftwagen umgeladen werden, die die Waren dann im Nahverkehr verteilen. Das System würde ähnlich wie bei der Verladung von Schifffracht auf Lastkraftwagen aufgebaut werden.

Das Autobahnnetz der Bundesrepublik Deutschland hat eine Länge von mehr als 13 141 km (Statista, 2019b) und mehr als 2260 Anschlussstellen sowie 94 Anschlüsse an das nachgeordnete Straßennetz (Buchhold, 2021). Würde an jede der insgesamt 2354 Ausfahrten bzw. Übergänge ein Verteilzentrum gebaut, so würde der Abstand zwischen den Verteilzentren ca. 5,6 km betragen, was als ausreichend angesehen wird.

Da die Größen der Verteilzentren sehr unterschiedlich sein können, wird ein Durchschnittswert aus den jüngst von Amazon in Deutschland geplanten bzw. gebauten Verteilzentren gebildet.

Abbildung 69: In Deutschland kürzlich von Amazon geplante bzw. gebaute Verteilzentren

Größe	Einheit	Ort	Quelle
10.000	m <sup>2</sup>	Hannover	(t3n, 2020)
66.000	m <sup>2</sup>	Aachen	(Zimmermann, 2021)
62.500	m <sup>2</sup>	Nürnberg	(Nordbayern, 2021)
12.470	m <sup>2</sup>	Saarbrücken	(Goodman, 2020)

Quelle: CEPiR-Modell, eigene Darstellung.

Es wird aus den vorangegangenen Daten eine Durchschnittsgröße von 37 743 m<sup>2</sup> für jedes der Verteilzentren abgeleitet. Auch die Kosten in Höhe von rund 22 Mio. Euro für den Bau eines solchen Verteilzentrums werden aus den jüngsten Angaben von Amazon übernommen (NDR, 2021).

Die Mikrodepot-Richtlinie aus der dritten Maßnahme findet an dieser Stelle keine Anwendung, da diese Förderung lediglich für Investitionen bis zu 2 Mio. Euro gilt (Förderdatenbank, 2021). Allerdings fördert der deutsche Staat den Bau effizienter Gebäude. Die maximale Höhe der förderfähigen Kosten beträgt bei Nichtwohngebäuden 1000 €/m<sup>2</sup> der Nettogrundfläche, maximal allerdings 15 Mio. Euro (Förderdatenbank, 2021). Es wird somit im Folgenden mit einer Förderung von 15 Mio. Euro gerechnet.

Derzeit ist ein Niedrigenergiestandard für alle Neubauten ab dem Jahr 2021 vorgesehen, was somit auch Logistikgebäude betrifft, die ebenfalls eine hohe Gesamtenergieeffizienz aufweisen müssen. Sowohl Bauherren, Planer als auch Investoren stehen zunehmend in der Pflicht, Energieeffizienzmaßnahmen in Logistikzentren umzusetzen. Ein großer Anteil des üblichen Energiebedarfs kann durch Optimierung eingespart werden (Freis et al., 2014). Daraus resultieren geringere THG-Emissionen beim Betrieb von neu gebauten Gebäuden.

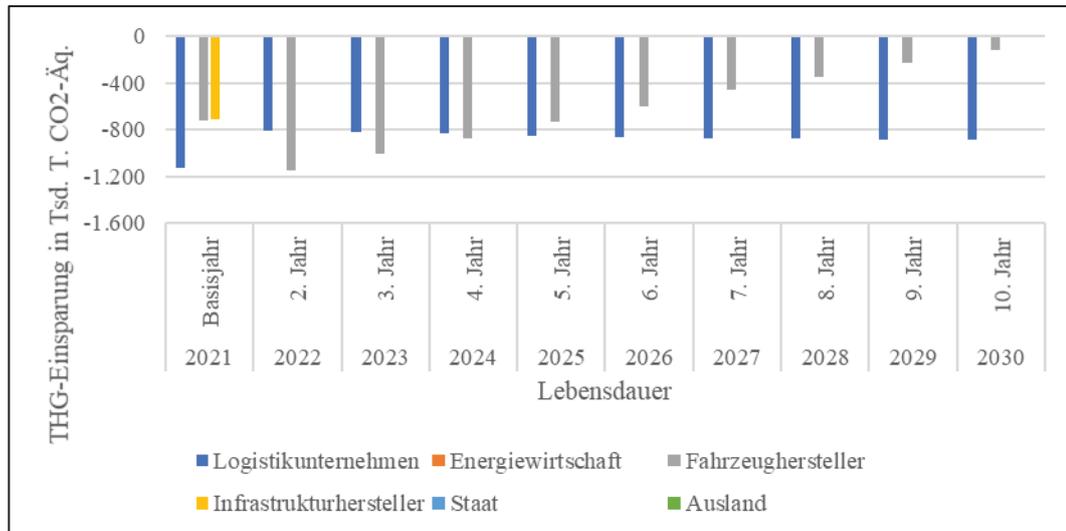
Nimmt man diese Kriterien als Grundlage, so kann das Modell mit den folgenden Hebeln bestimmt werden:

Tabelle 29: Hebel der Maßnahme 4

1. Betroffene Region	
<input checked="" type="checkbox"/> Gesamtdeutschland	<input type="checkbox"/> Regionen-spezifisch



Abbildung 70: Treibhausgaseinsparungen aufgrund von Maßnahme 4 über die Lebensdauer



Quelle: CEPiR-Modell, eigene Darstellung.

Auch bei dieser Maßnahme sind die Fahrzeug- und Infrastrukturherstellungsemissionen deutlich höher als die Einsparung aufgrund von Neufahrzeugen. Darüber hinaus verursachen die zusätzliche Produktion von Bauteilen und der Bau von Logistikzentren einen Anstieg der Treibhausgasemissionen. Das THG-Potential für die Herstellung und Entsorgung der Gebäudehülle einer Lagerhalle wird mit 140 t CO<sub>2</sub>-Äq. angegeben (Hauke & Siekers, 2011). Der Betrieb einer Lagerhalle liegt demgegenüber bei rund 378 t CO<sub>2</sub>-Äq./a (Verkehrsrundschau, 2011b).

Die Berechnung erfolgt nach der Formel:

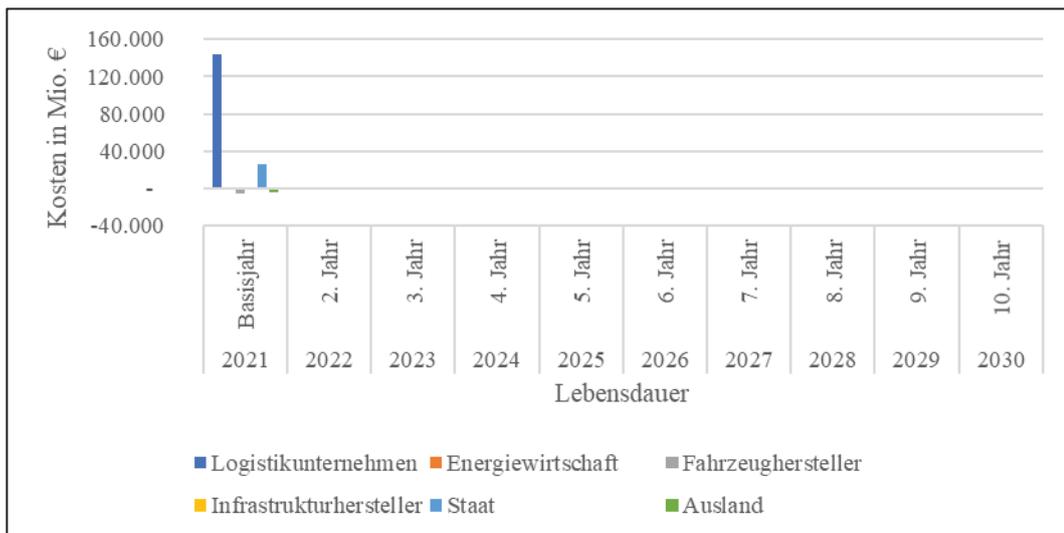
<b>(EM_BauVZ + EM_BetVZ) * ANZ_VZ</b>		<b>(18)</b>
EM_BauVZ	Emissionen aufgrund des Baus von Verteilzentren	
EM_BetVZ	Emissionen aufgrund des Betriebs von Verteilzentren	
ANZ_VZ	Anzahl der benötigten zusätzlichen Verteilzentren	

Die Errichtung und der Betrieb der Verteilzentren führen somit zu einem THG-Anstieg von 1,2 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äq. allein im Basisjahr. Über den gesamten Betrachtungszeitraum steigen die THG-Emissionen sogar auf mehr als 10 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äq. an. Die Variation des Dieselverbotes in Kombination mit Verteilzentren ist nicht effektiv.

### 6.5.3 Kosteneffekte

Im direkten Vergleich mit den Kosten, die aus den vorangegangenen Maßnahmen resultieren, schneidet die Maßnahme 4 am schlechtesten ab. Insgesamt liegen die Kosten für diese Maßnahme bei knapp 161 Mrd. Euro über die Lebensdauer. Die Kosten liegen aufgrund des Baus der Verteilzentren um ein Vielfaches über den Kosten der anderen Maßnahmen. Die Wirtschaftlichkeit ist somit nicht gegeben.

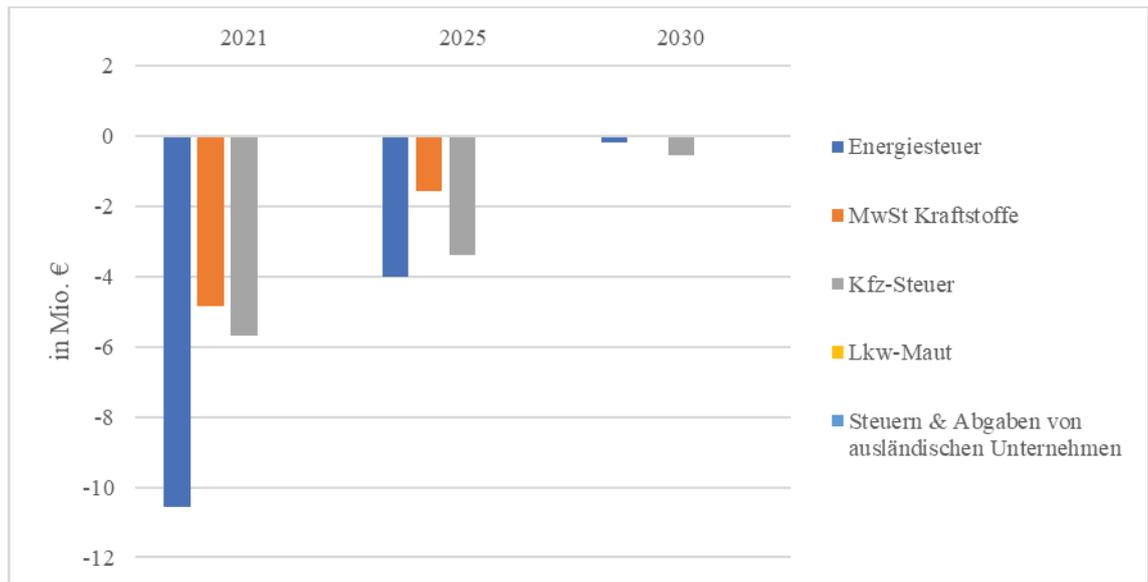
Abbildung 71: Kosten aufgrund von Maßnahme 4 über die Lebensdauer



Quelle: CEPiR-Modell, eigene Darstellung.

Bei dieser Maßnahme sind die Verluste an Kfz-Steuer höher als die Verluste der Mehrwertsteuer der Kraftstoffe.

Abbildung 72: Veränderung der jährlichen Staatseinnahmen aufgrund von Maßnahme 4



Quelle: CEPIR-Modell, eigene Darstellung.

Darüber hinaus fallen Kosten für die Errichtung der Verteilzentren an.

Die Kosten für die Verteilzentren werden wie folgt berechnet:

<b>KOVZ = ((KVZ-FÖVZ+MwSt)*ANZ_VZ)</b>		(19)
KVZ	Kosten pro Verteilzentrum	
FÖVZ	Förderung für den Bau von Verteilzentren	
ANZ_VZ	Anzahl der benötigten Verteilzentren	
MwSt	Mehrwertsteuer	

Wie eingangs beschrieben, wird mit Kosten in Höhe von 22 Mio. Euro und einer Förderung von 15 Mio. Euro pro Verteilzentrum gerechnet. Daraus resultieren Gesamtkosten in Höhe von 26,3 Mrd. Euro für die Verteilzentren.

Da angenommen wurde, dass das Ausland keine Fahrzeuge anschafft, wird es auch keinen Wegfall der Lkw-Maut bei ausländischen Fahrzeugen geben. Darüber hinaus verändern sich die Einnahmen durch die Lkw-Maut auch im Inland nicht, da lediglich die Lastkraftwagen betroffen sind, die von der Lkw-Maut ausgenommen sind. Zusätzlich zur Maßnahme 1 kommen an dieser Stelle die Mehrwertsteuereinnahmen aus dem Kauf von Verteilzentren in Höhe von 9,8 Mrd. Euro hinzu.

#### 6.5.4 Fazit

Auch bei dieser Maßnahme ist weder ein ökonomischer noch ein ökologischer Anreiz zur Umsetzung gegeben. Das Kosten-Nutzen-Verhältnis ist wie zuvor bei einem Dieserverbot nicht sinnvoll.

### **6.6 Maßnahme 5: Einführung einer Umweltspur auf allen zweispurigen Bundesstraßen für alternative Antriebe in München**

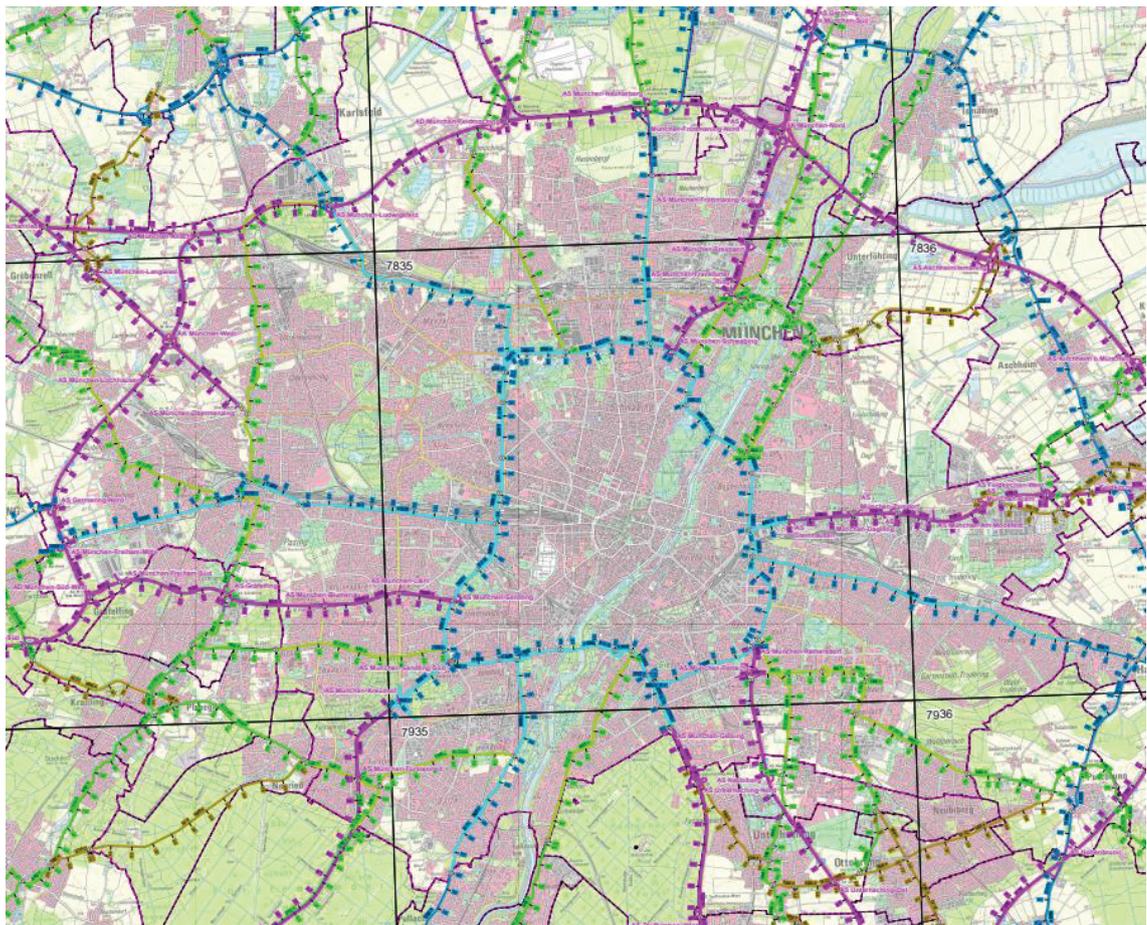
#### 6.6.1 Rahmenbedingungen

Die Errichtung von Umweltspuren wird bereits häufig diskutiert, bisher jedoch weniger im Rahmen eines Logistikkonzeptes für Lkw, sondern vermehrt für Busse, Fahrräder und Taxen (LNC & Fraunhofer IML, 2020). Das Prinzip lässt sich jedoch auch auf die städtische Logistik anwenden. Analysiert wird ein Szenario, bei dem alle mindestens zweispurigen Bundesstraßen im Stadtgebiet München für die Allgemeinheit um eine Spur reduziert werden. Diese reservierte Spur steht lediglich Fahrzeugen mit alternativen Antrieben zur Verfügung. Der Anreiz ist deshalb so stark, da besonders in der Logistik der Faktor „Zeit“ ein wichtiges Kriterium ist.

Es wird davon ausgegangen, dass der Anreiz lediglich Fahrzeuge im Nah- und Regionalverkehr betrifft, da schwerere Nutzfahrzeuge keinen hohen Anteil daran haben. Mit einer solchen Umweltspur wird somit die folgende Wirkungskette ausgelöst: Zunächst entsteht ein Zeitverlust in Staus für die Logistikunternehmen. Im Stau verbraucht ein Lastkraftwagen wesentlich mehr Treibstoff und verursacht somit mehr Emissionen, was in der Theorie zu einem Treibhausgasanstieg führt. Möglicherweise werden auch Alternativrouten stärker belastet. Ab einem bestimmten Punkt ist ein Anreiz gegeben, Fahrzeuge mit alternativen Antrieben zu kaufen, da die Zusatzkosten im Stau die Investitionskosten übersteigen. Ein Fahrzeug mit alternativem Antrieb wird attraktiver.

Von der Maßnahme betroffene Straßen sind im Grunde die Hauptverkehrsstraßen in München, d. h., alle in Abbildung 73 gelb markierten Straßen bekommen eine Umweltspur. Es handelt sich um die Hauptzufahrtswege zum Innenstadtkern, die man nur durch großen Aufwand und ohne zeitlichen Gewinn umfahren kann.

Abbildung 73: Straßenkarte München, insb. Bundesautobahnen und Bundesstraßen



Quelle: (BAYSIS, 2021)

Das Straßennetz in München umfasst nach eigener Berechnung knapp 67 km Bundesstraße im Stadtgebiet und teilt sich wie folgt auf die einzelnen Straßenabschnitte auf:

Abbildung 74: Berechnung der Länge der Bundesstraßen im Stadtgebiet München

<b>Bundesstraßen</b>		<b>Länge</b>	
Nord	B13	5,65	km
Nord	B304	7,89	km
West	B2	11,21	km
Süd	B11	5,43	km
Süd	B13	1,12	km
Ost	B304	7,68	km
Ring	B2R	27,95	km
<b>Summe</b>		<b>66,93</b>	<b>km</b>

Quelle: (Google, 2021)

Laut Verkehrsinformationsanbieter INRIX kommen Autofahrer\*innen in München im deutschlandweiten Vergleich am langsamsten voran. Sie verloren im vergangenen Jahr insgesamt 87 Stunden in Staus. Die Experten von INRIX gehen laut Studie von rund 80 Mrd. Euro an direkten und indirekten Kosten aufgrund von Staus in Deutschland aus. Bezogen auf die Städte geht man von insgesamt rund 5,1 Mrd. Euro aus (INRIX, 2020). Welche Kosten hierbei angesetzt werden, ist häufig unterschiedlich und hängt auch stark von den Annahmen ab. Einer der führenden deutschen Stau-Experten der Universität Duisburg-Essen setzt pro Stunde 35 € an (WirtschaftsWoche, 2019). Dies bezieht sich hauptsächlich auf den Stundenlohn der verlorenen Arbeitszeit. Dazu kommen die verschwendeten Kraftstoffkosten. Eine Studie des Londoner Centre for Economics and Business Research kam bereits 2014 zu dem Schluss, dass in deutschen Staus pro Jahr die Abgase von rund 1,2 Mrd. Liter Sprit emittiert werden. Die Studie rechnete zusätzlich die Mehrkosten für Unternehmen ein, weil sie beispielsweise Umwege fahren müssen (WirtschaftsWoche, 2019). Andere Berechnungen setzen lediglich den Mindestlohn als Durchschnittskosten für Fahrzeughalter aufgrund von Stau an (Verkehrsrundschau, 2016). Bei der Berechnung dieser Maßnahme wurden die oben erwähnten 35 € veranschlagt, um nicht nur die Kosten für die Fahrer\*innen, sondern auch Kraftstoffkosten und Verschleiß sowie mögliche Folgekosten der Lieferverzögerungen zu berücksichtigen.

Umweltspuren wurden bisher bereits in mehreren Städten getestet, beispielsweise in Düsseldorf. Ein Gutachten bestätigt, dass eine Wirksamkeit hinsichtlich der Reduktion von Feinstaubemissionen der Umweltspuren dort zutrifft. Der genaue Anteil der Umweltspuren am positiven Ergebnis des 1. Halbjahres 2020 lässt sich nicht ermitteln, da auch die Coronapandemie und weitere Verkehrsmaßnahmen einen positiven Effekt auf die Emissionsmessung bewirkt haben. Dem Gutachten zufolge liegt das Minderungspotential für Stickstoffdioxid, das direkt auf die Umweltspuren zurückzuführen ist, auf der Prinz-Georg-Straße bei bis zu  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  und auf der Merowingerstraße bei bis zu  $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Stadt Düsseldorf Umweltamt, 2020). Die Länge der Umweltspuren wird mit 10 km angegeben (ADFC, 2019). Insgesamt sieht man am Beispiel von Düsseldorf, dass eine Umweltspur zu einer Feinstaubreduktion auf der betroffenen Straße führt. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass es lediglich zu einer Verlagerung des Feinstaubes auf andere Strecken und nicht allgemein zu weniger Verkehr kommt. Somit wird in dieser Arbeit angenommen, dass lediglich die Einsparung des resultierenden Austauschs der Fahrzeuge einen positiven Effekt erbringt.

Es wird erwartet, dass es sich lediglich für Fahrzeughalter von Altfahrzeugen der Schadstoffklassen Euro III und Euro IV lohnt, ein Neufahrzeug anzuschaffen. Dies kann so begründet werden, dass die Schadstoffklasse Euro VI erst im Jahr 2015 eingeführt wurde und somit der Einführungszeitpunkt von Neufahrzeugen im September 2016 liegt (BAG, 2018). Da von einer Lebensdauer von 6 bis 10 Jahren ausgegangen wird, sind diese zum jetzigen Zeitpunkt (2021) noch nicht abgelaufen, sodass eine Erneuerung der Euro-V- und EEV-Fahrzeuge unlogisch und ökonomisch nicht sinnvoll wäre, da der Restwert der Altfahrzeuge zu hoch wäre. Somit sind die neueren Schadstoffklassen von dieser Maßnahme nicht betroffen.

Aufgrund der Tatsache, dass nicht jeder Halter, obwohl es sich finanziell lohnt, auch tatsächlich ein Fahrzeug mit alternativem Antrieb kaufen wird, wird mit einer Quote von 50 % gerechnet. Ausgehend von der Berechnung der Zusatzkosten durch Staus sparen Fahrzeughalter rund 13.533 € auf 6 Jahre (Lebensdauer) an Zeit-Kosten, sodass diese wie eine Art Kaufprämie gesehen werden können. Davon ausgehend lohnt sich besonders der Kauf von Gasfahrzeugen. Prinzipiell werden mit dieser Art von Kaufprämie sowohl LPG- als auch CNG-Fahrzeuge wesentlich günstiger als Diesel. Da jedoch CNG-Fahrzeuge mit einer originären Kaufprämie zusätzlich gefördert werden und die Kraftstoffpreise verhältnismäßig günstiger sind (Zukunft Erdgas, 2019), wird davon ausgegangen, dass Fahrzeughalter tendenziell CNG beim Kauf des Neufahrzeugs bevorzugen, wenn sie die Umweltpuren nutzen dürfen. Insgesamt führt die Maßnahme zu einer Verschiebung der Nachfrage hinsichtlich alternativer Kraftstoffe.

Mit der Einführung einer Umweltpur wird in dieser Maßnahme kein Zwang zum Neukauf, sondern lediglich ein Anreiz geschaffen, der Fahrzeughalter motivieren soll, auf alternative Antriebstechnologien umzuschwenken. Es muss somit zunächst berechnet werden, wie hoch der finanzielle Anreiz ist und wie viele Fahrzeuge letztendlich durch die Maßnahme ausgetauscht werden. Das Ergebnis dieser Berechnung wurde vorweg bereits im Kapitel 6.1.5 für die qualitative Einschätzung des Grades der Verschiebung verwendet.

Es müssen zwei Fälle berechnet werden: 1) zusätzliche Kosten für Fahrzeughalter aufgrund der umweltpurbedingt hinzukommenden Stauzeiten und 2) umweltpurbedingte Umfahrung von regulärem Stau.

Der Fall 1) wird wie folgt berechnet:

<b>KOUSL =ZA * KOH * STUS * ANZ</b>		(20)
KOUSL	Kosten aufgrund der Umweltpuren für Logistikunternehmen	
ZA	Zeitaufwand pro km Stau	
KOH	Kosten pro Stunde Stau	
STUS	Strecke Umweltpur	

Der Zeitaufwand pro Kilometer Stau wird anhand der in Düsseldorf gemessenen Werte berechnet. Dort stieg das Stauniveau im Tagesdurchschnitt aufgrund der Umweltpuren um 3 Punkte auf 24 %. Pro Kilometer wurden somit 0,35 Stunden mehr Zeit pro Jahr benötigt. Für die Kosten pro Stunde wurden die bereits erläuterten 35 €/h angesetzt. Die Gesamtlänge der Umweltpur in München wurde, wie bereits beschrieben, mit 66,93 km angegeben. Die Kosten pro Fahrzeug liegen bei durchschnittlich 820 €/a. Gerechnet über eine Lebensdauer von 6 Jahren liegt der Betrag bei 4919 €.

Der Fall 2) wird mit derselben Formel berechnet. Jedoch liegt die Zeitersparnis in diesem Fall bei 0,36 Stunden pro Kilometer. Dies lässt sich aus dem angegebenen Zeitverlust auf den Bundesstraßen B2 und B2R berechnen. Dieser liegt gemäß dem INRIX-Ranking „Die zehn am dichtesten befahrenen Straßenabschnitte Deutschlands 2019“ bei 24 Stunden pro Jahr (INRIX, 2020). Teilt man diese Verspätung durch die Umweltpurlänge, so kann davon ausgegangen werden, dass man 0,36 Stunden pro Kilometer wegen regulärem Stau aufgrund der Umweltpur einsparen kann. Die Kostenersparnis pro Umweltpur-Fahrzeug liegt bei durchschnittlich 840 €/a. Gerechnet über eine Lebensdauer von 6 Jahren<sup>9</sup> liegt der Betrag bei 5040 €. Insgesamt liegt die Kostenersparnis aufgrund eines Fahrzeugs mit alternativem Antrieb und somit der Möglichkeit, die Umweltpur zu nutzen, bei 9959 € über 6 Jahre. Stellt man nun die Gesamtkosten für ein Neufahrzeug nebeneinander, kann man erkennen, dass besonders CNG-Fahrzeuge attraktiver werden.

<sup>9</sup> In der konservativen Berechnung mit der geringeren Lebensdauer für schwere Nutzfahrzeuge.

Tabelle 30: Berechnung des Anreizsystems der Maßnahme

	Diesel	Benzin	LPG	CNG	Elektro	Hybrid	Sonstige
Durchschnittskosten über 6 Jahre (ohne Politik)	11.117	13.337	9.765	8.867	21.277	18.452	32.832
Durchschnittskosten über 6 Jahre (mit Politik)	11.117	13.337	8.105	7.207	19.617	16.792	31.172
Gesamtkosten 6 Jahre (ohne Politik)	128.440	141.760	120.332	114.940	189.400	172.450	258.733
Gesamtkosten 6 Jahre (mit Politik)	128.440	141.760	110.373	104.981	179.441	162.490	248.774

Quelle: eigene Berechnung.

Die Differenz von rund 25 Tsd. Euro ist somit ein erheblicher Anreiz für Fahrzeughalter, ein Erdgasfahrzeug zu kaufen. Die Kostenersparnis bei Elektro- oder Wasserstoffantrieb ist allerdings nicht hoch genug, um eine ökonomisch reizvolle Alternative darzustellen. Jedoch wird angenommen, dass die finanzielle Attraktivität nicht das einzige Entscheidungskriterium für einen Kauf ist und die Nachfrage steigen wird. Es wird davon ausgegangen, dass das gestiegene Umweltbewusstsein dazu führt, dass trotz des weiterhin höheren Anschaffungspreises eines Elektrofahrzeugs gegenüber einem Dieselfahrzeug die Reduktion des Kaufpreises um rund 10 Tsd. Euro einen sichtbaren positiven Effekt haben wird.

Nimmt man diese Kriterien als Grundlage, so kann das Modell mit den folgenden Hebeln bestimmt werden:

Tabelle 31: Hebel der Maßnahme 5

<b>1. Betroffene Region</b>						
<input type="checkbox"/> Gesamtdeutschland	<input checked="" type="checkbox"/> Regionen-spezifisch	<input type="checkbox"/> München + LK				
<b>2. Betroffene Schadstoffklassen</b>						
<input checked="" type="checkbox"/> SKL 3	<input checked="" type="checkbox"/> SKL 4	<input type="checkbox"/> SKL 5	<input type="checkbox"/> SKL EEV	<input type="checkbox"/> SKL 6	<input type="checkbox"/> Sonstige	
<b>3. Betroffene Größenklassen</b>						
<input checked="" type="checkbox"/> < 2,8 t	<input checked="" type="checkbox"/> 2,8 – 3,5 T.	<input checked="" type="checkbox"/> 3,5 – 7,5 T.	<input checked="" type="checkbox"/> 7,5 – 12 T.	<input checked="" type="checkbox"/> > 12 t		
<b>4. Antriebsarten - Neukauf</b>						
<input type="checkbox"/> Benzin	<input type="checkbox"/> Diesel	<input checked="" type="checkbox"/> LPG	<input checked="" type="checkbox"/> CNG	<input checked="" type="checkbox"/> Elektro	<input checked="" type="checkbox"/> Hybrid	<input checked="" type="checkbox"/> Sonstige
<b>5. Neukaufquote (Verkauf zu Neukauf)</b>						

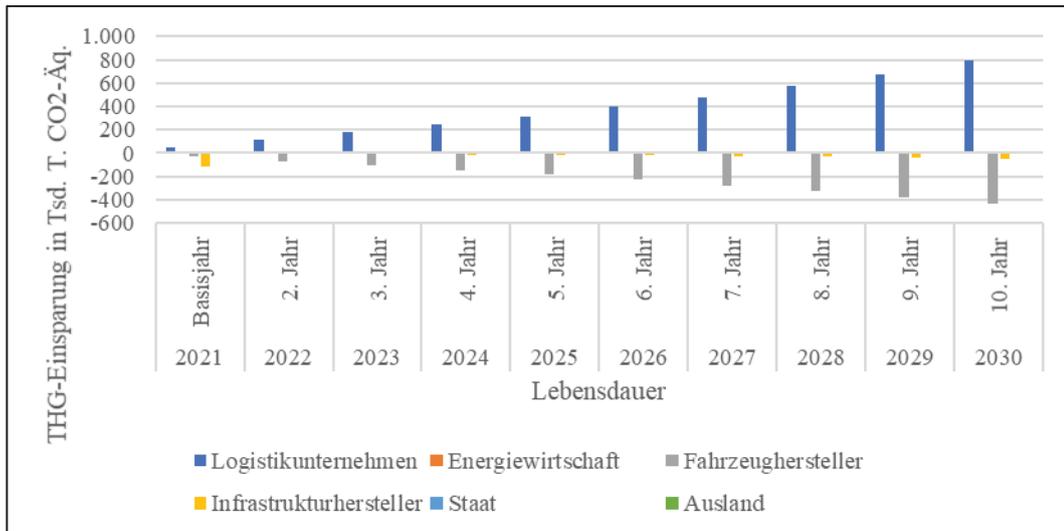
<input checked="" type="checkbox"/> 100 % (Standard)	<input type="checkbox"/> Andere Quote: <input type="text"/>	
<b>6. Austauschzwang oder -anreiz?</b>		
<input type="checkbox"/> Zwang	<input checked="" type="checkbox"/> Anreizquote: <input type="text" value="0,5"/>	
<b>7. Subventionen Fahrzeuge</b>		
regionaler Zusatz:	LPG <input type="text" value="13.533"/>	
	CNG <input type="text" value="13.533"/>	
	Elektro <input type="text" value="13.533"/>	
	Hybrid <input type="text" value="13.533"/>	
	Sonstige <input type="text" value="13.533"/>	
<b>8. Betroffene Verkehrsbereiche</b>		
<input checked="" type="checkbox"/> Nahverkehr	<input checked="" type="checkbox"/> Regionalverkehr (inkl. Bundesstraßen)	<input type="checkbox"/> Fernverkehr (inkl. Autobahn)
<b>9. Zusatzberechnungen</b>		
<input type="checkbox"/> Mikrodepot und Lastenfahrräder	<input type="checkbox"/> Bonus-Malus-System	
<input type="checkbox"/> Verteilzentren	<input type="checkbox"/> CO2-Maut	
<input checked="" type="checkbox"/> Umweltspur innerorts	<input type="checkbox"/> CO2-Steuer	
<input type="checkbox"/> Umweltspur außerorts	<input type="checkbox"/> City-Maut	
<input type="checkbox"/> Umweltzone	<input type="checkbox"/> CO2-Ausweis	
<b>10. Änderung der Nachfrage im Ausland</b>		
<input type="checkbox"/> Ja	<input checked="" type="checkbox"/> Nein	

Quelle: eigene Darstellung.

### 6.6.2 Treibhausgaswirkungen

Die Maßnahme 5 zeigt, wie effektiv eine Umweltspur in dieser Ausgestaltung zur Senkung von Treibhausgasemissionen führt. Indem kein Zwang, sondern ein Anreiz für den Austausch von Altfahrzeugen gegen Neufahrzeuge mit alternativen Antrieben eingeführt wird, wird der Fokus beim Austausch auf die Altfahrzeuge sowie auf die alternativen und nachhaltigeren Antriebe gelegt. Zwar bleibt aufgrund des verhältnismäßig großen Anstiegs der Treibhausgasemissionen durch die Infrastrukturproduktion die Bilanz für das Basisjahr im negativen Bereich, also bei einem Zuwachs an Treibhausgasemissionen. Jedoch ändert sich dieser, vornehmlich aufgrund der veränderten Nachfrage nach alternativen Kraftstoffen, wenn man den gesamten Betrachtungszeitraum bewertet. Insgesamt ist die Maßnahme ökologisch sinnvoll, denn die Treibhausgasemissionen sinken um rund 1,3 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äq. über 10 Jahre.

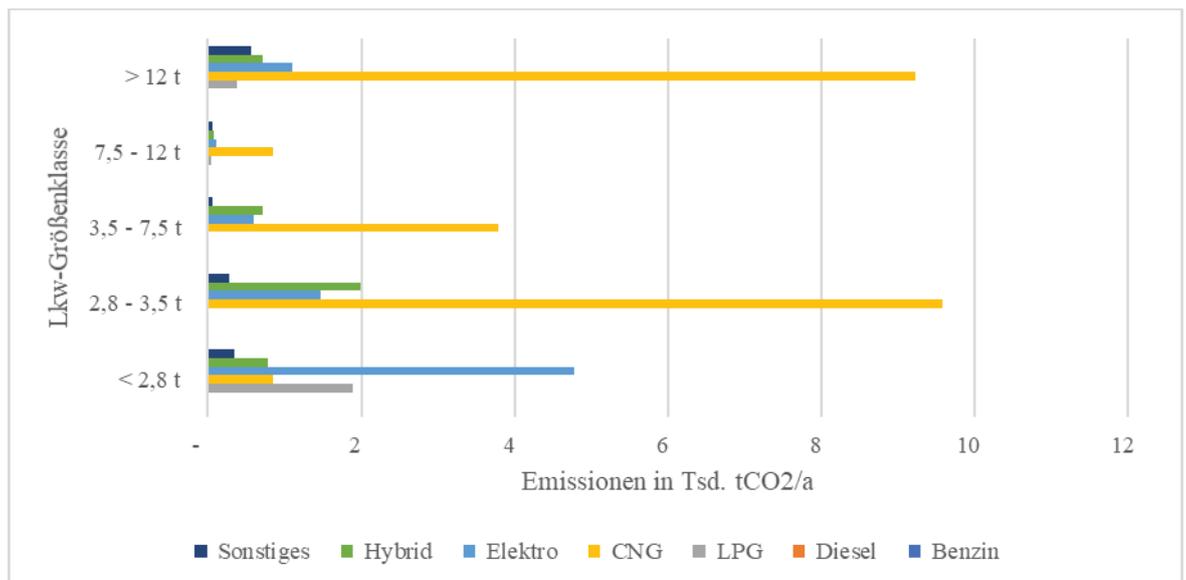
Abbildung 75: Treibhausgaseinsparungen aufgrund von Maßnahme 5 über die Lebensdauer



Quelle: CEP-IR-Modell, eigene Darstellung.

Da bei dieser Maßnahme auf den Neukauf von Diesel- und Benzin-Fahrzeugen verzichtet wurde, ist zu erkennen, dass bei größeren Fahrzeugen ab 2,8 t eher CNG als favorisierter Kraftstoff genutzt wird und für kleinere Lkw bis 2,8 t ein Elektroantrieb die favorisierte Alternative ist.

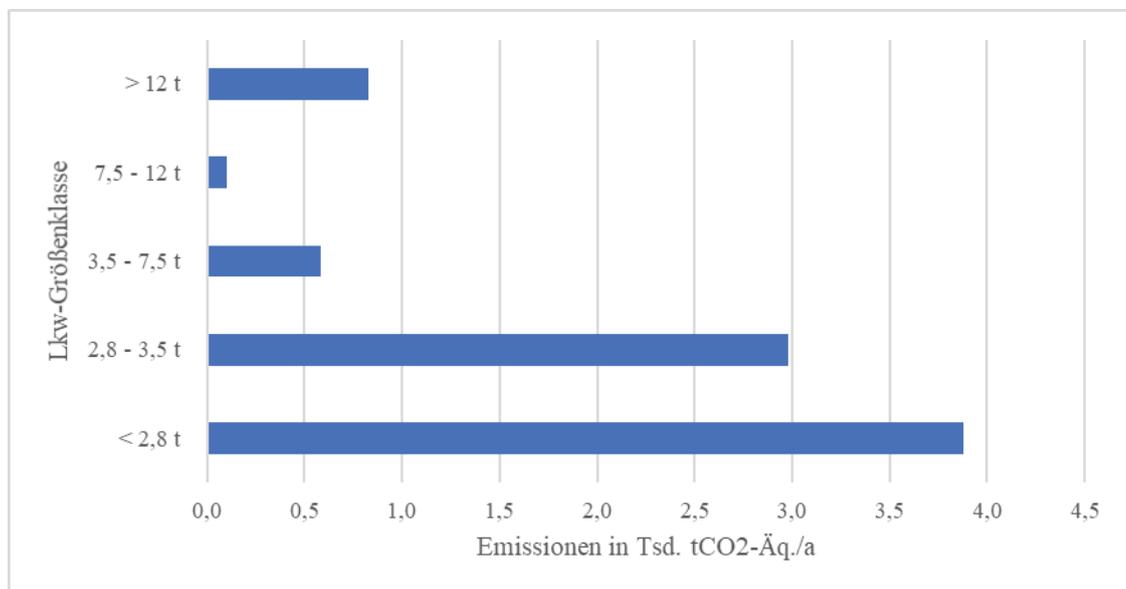
Abbildung 76: Emissionsanstieg durch Neufahrzeuge (in Tsd. t CO<sub>2</sub>-Äq./a), resultierend aus Maßnahme 5



Quelle: CEP-IR-Modell, eigene Darstellung.

Während in der 1. Maßnahme besonders die Lkw zwischen 2,8 und 3,5 t hohe THG-Emissionen bei der Herstellung verursacht haben, sind es bei dieser Maßnahme vor allem diejenigen bis 2,8 t. Dies ist auf die Fokussierung des Nahverkehrs zurückzuführen. In der Stadt München gibt es überdurchschnittlich viele kleinere Lkw, die zumeist auch in den niedrigeren Schadstoffklassen zu finden sind, die mit dieser Maßnahme ausgetauscht werden. Es werden somit mit der Umweltpur innerorts genau diejenigen Lkw adressiert, die schnellstmöglich aus Gründen der Feinstaubsenkung ausgetauscht werden sollen, bei gleichzeitiger Senkung der CO<sub>2</sub>-Werte.

Abbildung 77: Anstieg der Herstellungsemissionen aufgrund von Maßnahme 5

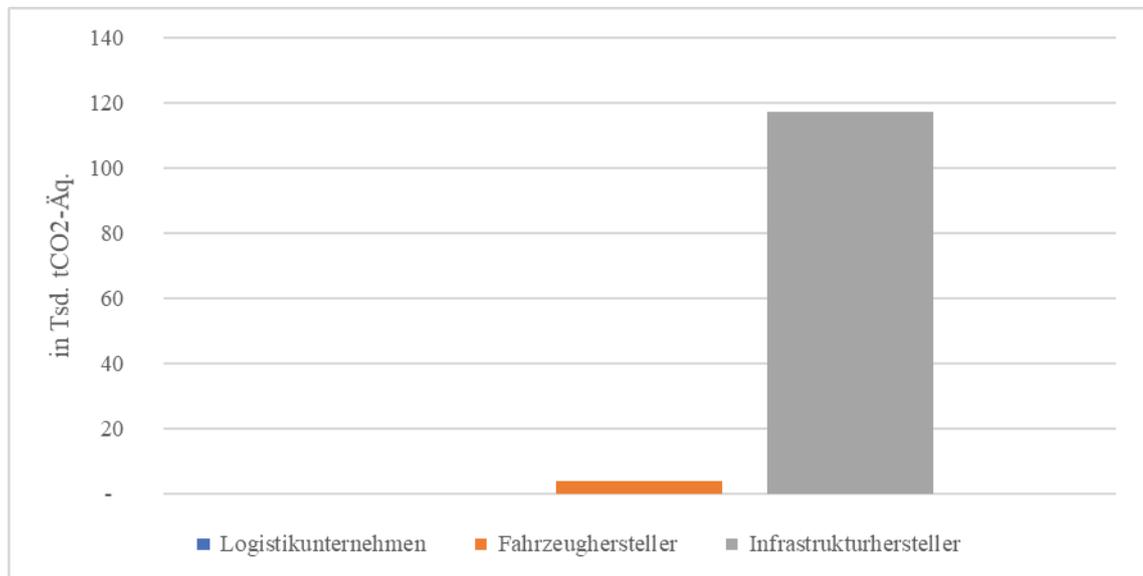


Quelle: CEPIR-Modell, eigene Darstellung.

Besonders bei der Maßnahme 5 kommt es zu hohen Treibhausgasemissionen bei Infrastrukturherstellern. Dies führt auch dazu, dass der Treibhausgasanstieg bei den ausländischen Infrastrukturherstellern im Vergleich zu den anderen Maßnahmen wesentlich höher ist. Bei den vorangegangenen Maßnahmen liegen die Emissionen der Fahrzeughersteller meist deutlich über denen der Infrastrukturhersteller. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei der Maßnahme 5, einer Umweltpur für die Stadt München, ein Anreiz entsteht, sich keinen Diesel oder Benziner zu kaufen. Dies ist aufgrund des zeitlichen Aufwandes und einer Verzögerung des Transportprozesses ein monetärer Anreiz. Dieser Anreiz existiert für alte Fahrzeuge, die ausgetauscht werden können, jedoch auch für alle Fahrzeuge, die ab dem Jahr 2021 neu gekauft werden. Dies führt zu einer Nachfrageverschiebung in Richtung alternativer Kraftstoffe und zu einem massiven Bedarf an Tankinfrastruktur für

dieselben. Es muss somit für die Maßnahme 5 verhältnismäßig wesentlich mehr Infrastruktur ausgebaut werden als für die übrigen Maßnahmen.

Abbildung 78: THG-Anstiege verursacht von ausländischen Akteuren aufgrund von Maßnahme 5

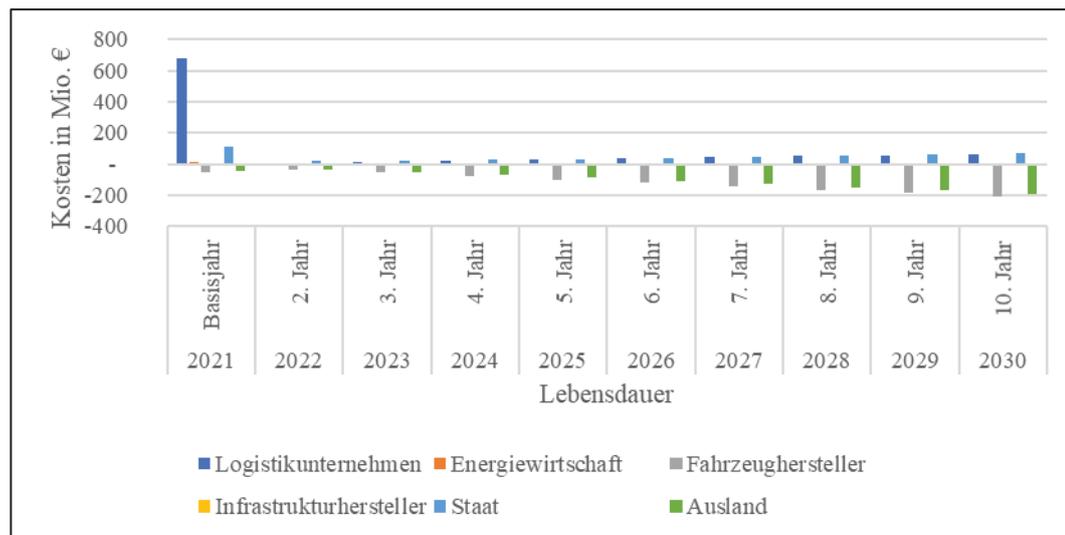


Quelle: CEPPIR-Modell, eigene Darstellung.

### 6.6.3 Kosteneffekte

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Nachfrageverschiebung zu mehr Kostenbewegungen in den Folgejahren im Betrachtungszeitraum führt. Die Kosten seitens der Logistikunternehmen gleichen sich mit den Gewinnen der Fahrzeughersteller über den Betrachtungszeitraum aus. Nicht zu vernachlässigen sind jedoch bei dieser Maßnahme die hohen Kosten für den Staat. Dies könnte ein Grund für die geringe Beliebtheit von Umweltsparen aufseiten des Staates sein. Diese Kosten sind hauptsächlich auf die Abwrackprämie sowie die Subventionen der Fahrzeuge mit alternativem Antrieb zurückzuführen. Insgesamt ist die Maßnahme über den Betrachtungszeitraum von 10 Jahren wirtschaftlich sinnvoll und führt zu Kosteneinsparungen von rund 683 Mio. Euro.

Abbildung 79: Kosten aufgrund von Maßnahme 5 über die Lebensdauer

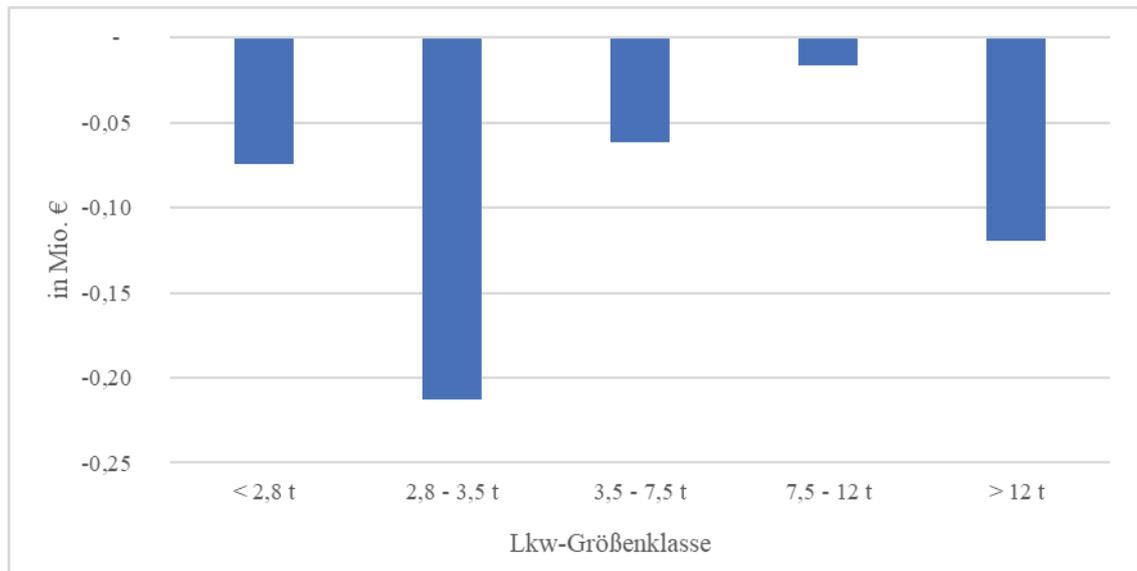


Quelle: CEPiR-Modell, eigene Darstellung.

Wie bereits beschrieben, wird angenommen, dass sich Fahrzeughalter mit älteren Modellen und Schadstoffklassen für einen Kauf entscheiden. Somit werden von den insgesamt betroffenen 38 210 Fahrzeugen 5182 Fahrzeuge ausgetauscht und 33 028 bleiben bei ihren Altfahrzeugen. Insgesamt entstehen somit Staukosten in Höhe von rund 29 Mio. Euro für die Gesamtheit derer, die ihr Fahrzeug nicht austauschen, und Staukostenersparnisse in Höhe von 11,5 Mio. Euro für diejenigen, die ihr Fahrzeug tauschen. Die Umweltspur führt somit insgesamt zu Staukosten in Höhe von knapp 18 Mio. Euro für Lkw-Halter. Darüber hinaus entstehend dem Staat Kosten in Höhe von 0,4 Mio. Euro für die Errichtung der Umweltspuren. Zur Berechnung der Kosten für die Umweltspuren wird erneut das Vorbild Düsseldorf genommen. Dort wurden 6000 € pro Kilometer Umweltspur fällig (WZ, 2019a).

Der Fokus der Maßnahme auf die Nachfrageverschiebung sowie auf die alten Schadstoffklassen schafft es, den bei den vorangegangenen Maßnahmen höheren Verbrauch im Vergleich zum Status quo (ohne Maßnahme) bei der kleinsten Größenklasse ebenfalls ins Negative zu verlagern. Nun wird auch bei dieser Größenklasse, also den Lkw unter 2,8 t, eine Verbrauchsreduktion erreicht. Diese geht natürlich mit einem geringeren Kraftstoffumsatz einher.

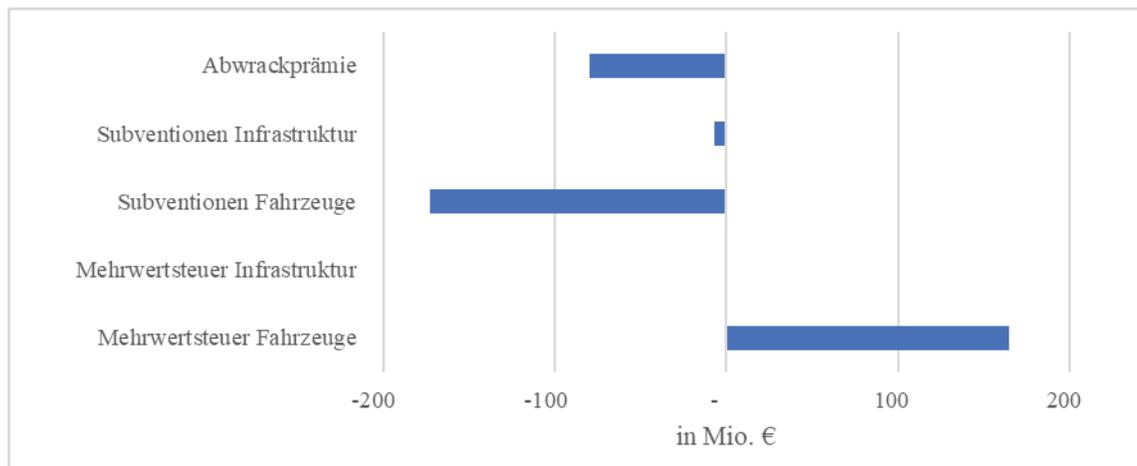
Abbildung 80: Veränderung des Kraftstoffumsatzes aufgrund von Maßnahme 5 im Vergleich zum Status quo



Quelle: CEPiR-Modell, eigene Darstellung.

Wie zu erwarten, werden neben den Ladesäulen für die Elektrofahrzeuge bei dieser Maßnahme vermehrt Erdgastankstellen sowie Ladeinfrastruktur für Hybridfahrzeuge benötigt. Dies ist auch bei den Kosten des Staates in Form von Subventionen für die Infrastruktur erkennbar.

Abbildung 81: Einmalige Einnahmen/Ausgaben des Staates aufgrund von Maßnahme 5



Quelle: CEPiR-Modell, eigene Darstellung.

Bei dieser Maßnahme ist zu erkennen, dass die staatlichen Ausgaben für die Abwrackprämie im Vergleich zu den Einnahmen der Fahrzeug-Mehrwertsteuer deutlich geringer sind. Bei den bisher untersuchten Maßnahmen haben sich die Ausgaben und Einnahmen

für beides in etwa ausgeglichen. Besonders hoch sind allerdings die Subventionen für Fahrzeuge. Dies ist ebenfalls auf den hohen Anteil alternativer Kraftstoffe bei der Neubeschaffung zurückzuführen. Da für diese Fahrzeuge meist Förderungen anfallen, hat der Staat vergleichsweise hohe Ausgaben.

#### *6.6.4 Fazit*

Das Kosten-Nutzen-Verhältnis ist bei Maßnahme 5 so zu interpretieren, dass über den Betrachtungszeitraum 520 € Gewinn erzielt werden, aufgrund einer Tonne eingespartem CO<sub>2</sub>-Äq. Diese Maßnahme ist somit gesamtwirtschaftlich sinnvoll. In diesem Fall wird mit der THG-Einsparung sogar Gewinn erwirtschaftet. Die Maßnahme ist somit sowohl effektiv als auch effizient. Betrachtet man nur das Basisjahr, wäre diese Maßnahme jedoch weder effektiv noch effizient und würde rund 6977 € pro zusätzlicher Tonne CO<sub>2</sub> verursachen. Dies ist auf die erhöhte Produktion und den Bau von Infrastruktur im Basisjahr zurückzuführen. An dieser Stelle ist die langfristige positive Wirkung aufgrund der Nachfrageverschiebung deutlich zu erkennen.

### ***6.7 Maßnahme 6: Überholverbot für fossile Antriebe auf Autobahnen/mittlere Spur wird Umweltspur***

#### *6.7.1 Rahmenbedingungen*

Ein generelles Überholverbot für Lastkraftwagen auf Autobahnen wurde bereits häufig diskutiert. Einige sind der Ansicht, dass das Überholverbot zu mehr Unsicherheit und Unfällen führt, da Lastkraftwagen häufig unvorsichtig und abrupt zum Überholvorgang ausscheren. Häufig dauern die Überholmanöver schwerer Lastkraftwagen minutenlang und schnellere Pkw müssen stark abbremsen und warten (WELT, 2017). Andere wiederum sind der Meinung, dass ein Überholverbot zu Unfällen führt, dies würde zu einer gefährlichen „Lkw-Wand“ auf der rechten Fahrbahn führen (Spiegel, 2010). Laut Landesstraßenbaubehörde Sachsen-Anhalt ist ein generelles Überholverbot nicht gewollt, da Lkw trotz einer vorgeschriebenen Maximalgeschwindigkeit von 80 km/h unterschiedlich schnell unterwegs seien. Dies wird auf unterschiedliche Fahrzeugtypen, auf die Tagesform der Fahrer\*innen, auf seine Termindichte und auf den Beladungszustand zurückgeführt. Ein generelles Überholverbot würde bedeuten, dass der langsamste Lkw die Geschwindigkeit auf der rechten Spur vorgibt (MDR, 2020).

Um diese sogenannten Elefantenrennen zu verhindern, macht die Straßenverkehrsordnung eindeutige Vorgaben. Demnach dürfen Lkw-Fahrer\*innen nicht überholen, wenn die Differenzgeschwindigkeit unter 10 km/h liegt und der Vorgang somit länger als 45 Sekunden dauern würde. In der Praxis wird dies jedoch kaum kontrolliert, sodass die Lastkraftwagen meist sowohl mit höheren Geschwindigkeiten unterwegs sind als auch die Regeln des Überholens nicht beachten (MDR, 2020). Anderen Studien zufolge ist die Geschwindigkeit der meisten Lkw annähernd die gleiche, da diese oft unter Zeitdruck stehen. Dies erschwere das zügige Überholen innerhalb der vorgegebenen 45 Sekunden (Authried et al., 2011).

In Sachsen ist man der Meinung, dass das Überholen von Lastkraftwagen zu einem erhöhten Unfallrisiko und zu erheblichen Einschränkungen des Verkehrsflusses führe. Daher wurden dort im Jahr 2018 die Überholverbote für Lkw auf insgesamt 190 km (RadioLausitz.de, 2018) der insgesamt 567 km (Sachsen-Fernsehen.de, 2018) Autobahn ausgeweitet. Dies macht 34 % der Autobahnen in Sachsen aus. Es wird angenommen, dass diese Verteilung innerhalb der Maßnahme repräsentativ für alle Bundesländer in Deutschland ist. Es wird im Folgenden davon ausgegangen, dass beide Varianten in gleichem Maße risikobehaftet sind und es somit mit der Umsetzung dieser Maßnahme keine Risikoveränderung gibt.

Innerhalb dieser Maßnahme wird ein Modell geprüft, bei dem für schwere Lastkraftwagen mit Diesel- und Benzinantrieb ein generelles Überholverbot herrscht. Um einen zusätzlichen Anreiz zum Kauf von Fahrzeugen mit alternativem Antrieb zu schaffen, wird die zweite Spur von rechts zur Umweltspur für Lkw. Diese darf somit nur mit einem alternativen Antrieb befahren werden. Zurzeit gibt es keine bestehenden oder geplanten Umweltspuren auf Autobahnen, die Lastkraftwagen adressieren. Lediglich in Düsseldorf wurde geprüft, ob man die Standstreifen der Stadtautobahnen für Linienbusse öffnen könnte, da es durch die dritte Umweltspur zu Stau bis auf die Autobahnen gekommen war (RP-Online, 2019).

In diesem Modell werden somit zwei Zustände miteinander verglichen, um herauszufinden, wie hoch der monetäre Anreiz für Logistikunternehmen ist, ihre alten Fahrzeuge durch neue Fahrzeuge mit alternativen Antriebstechnologien zu ersetzen. Wenn ein Überholverbot für diesel- und benzinbetriebene Fahrzeuge umgesetzt wird, so kann davon ausgegangen werden, dass die Durchschnittsgeschwindigkeit auf der rechten Fahrbahn annähernd 61 km/h beträgt. Wie bereits erläutert, wird sich die Geschwindigkeit am langsamsten Fahrzeug orientieren. Da die Mindestgeschwindigkeit für Autobahnen 61 km/h

beträgt, wird angenommen, dass dies die resultierende Geschwindigkeit wird. Da die erlaubte Höchstgrenze von 80 km/h von den meisten Lastkraftwagen erreicht wird, wird davon ausgegangen, dass ein Fahrzeug, das die Umweltspur nutzen darf, im Durchschnitt auch weiterhin mit dieser Geschwindigkeit fahren kann. Es wird somit der Verlust an Zeit aufgrund der geringeren Geschwindigkeit in Kosten berechnet. Hierfür werden, wie in der vorangegangenen Maßnahme, Kosten in Höhe von 35 € pro Stunde veranschlagt.

Es wird angenommen, dass dort, wo bereits aktuell ein Überholverbot existiert, auch ein Überholverbot für Lkw mit alternativem Antrieb besteht. Somit gilt die Erlaubnis zum Überholen auf der Umweltspur nur außerhalb dieser Zonen. Darüber hinaus wird angenommen, dass die Maßnahme zu mehr Stau auf der rechten Spur führen könnte, aus dem eine höhere Umweltbelastung resultiert. Jedoch wird die Maßnahme ebenfalls zu einem flüssigeren Verkehr von Pkw und zu einem geringeren Grundaustoß von Lkw aufgrund der geringeren Geschwindigkeit führen. Es wird somit angenommen, dass sich diese beiden Effekte gegenseitig aufheben. Da das Überholverbot auf Autobahnen für Lastkraftwagen über 3,5 t gilt, werden bei dieser Maßnahme die leichten Nutzfahrzeuge nicht betrachtet.

Mit der Einführung einer Umweltspur wird in dieser Maßnahme kein Zwang zum Neukauf, sondern lediglich ein Anreiz geschaffen, der Fahrzeughalter motivieren soll, auf alternative Antriebstechnologien zu setzen. Es muss somit zunächst berechnet werden, wie hoch der finanzielle Anreiz ist und wie viele Fahrzeuge letztendlich durch die Maßnahme ausgetauscht werden.

Die hinzukommenden Kosten werden wie folgt berechnet:

<b>KOUSL =ZA * KOH * JFL * ANZ</b>		(21)
KOUSL	Kosten aufgrund der Umweltspuren für Logistikunternehmen	
ZA	Zeitanstieg aufgrund der Umweltspur	
KOH	Kosten pro Stunde Verzögerung	
JFL	Jahresfahrleistung	

Aus den Geschwindigkeiten in Kilometer pro Stunde (61 km/h und 80 km/h), der Jahresfahrleistung in Kilometer (27 527 km, siehe Kapitel 6.1.2) und dem Anteil an Überholverboten (34 %) können die beiden unterschiedlichen Varianten berechnet werden:

Tabelle 32: Zeitaufwand für Fahrzeuge mit und ohne Berechtigung zur Nutzung der Umweltspur

	<b>Fahrtaufwand in Stunden</b>	
<b>Alternativer Antrieb</b>	380	h/a
<b>Benzin- oder Dieselantrieb</b>	451	h/a
<b>Differenz</b>	-71	h/a

Quelle: CEPiR-Modell, eigene Darstellung.

Für die Kosten pro Stunde wurden die bereits erläuterten 35 €/h angesetzt. Die Kosten pro Fahrzeug liegen bei durchschnittlich 2494 €/a. Gerechnet über eine Lebensdauer von 6 Jahren liegt der Betrag bei 14.965 €. Im direkten Vergleich der Gesamtkosten für ein Neufahrzeug werden besonders CNG-Fahrzeuge attraktiver.

Tabelle 17: Berechnung des Anreizsystems der Maßnahme

	<b>Diesel</b>	<b>Benzin</b>	<b>LPG</b>	<b>CNG</b>	<b>Elektro</b>	<b>Hybrid</b>	<b>Sonstiges/ Wasser- stoff</b>
Durchschnittskosten über 6 Jahre (ohne Politik)	24.197	26.417	22.845	19.157	31.567	28.742	43.122
Durchschnittskosten über 6 Jahre (mit Politik)	24.197	26.417	20.127	16.438	28.848	26.023	40.404
Gesamtkosten 6 Jahre (ohne Politik)	145.180	158.500	137.072	114.940	189.400	172.450	258.733
Gesamtkosten 6 Jahre (mit Politik)	145.180	158.500	120.763	98.631	173.091	156.141	242.424

Quelle: eigene Berechnung.

Die Differenz von knapp 60 Tsd. Euro über 6 Jahre ist somit ein starker Anreiz für Fahrzeughalter, ein Fahrzeug mit CNG-Antrieb zu kaufen. Die Kostenersparnis bei Elektro- oder Wasserstoffantrieb ist allerdings nicht hoch genug, um eine ökonomisch reizvolle Alternative darzustellen. Dennoch wird auch hier eine positive Nachfrageverschiebung zugunsten alternativer Kraftstoffe angenommen. Wie bereits beschrieben, ist zu erwarten,

dass sich Fahrzeughalter mit älteren Modellen und Schadstoffklassen für einen Kauf entscheiden. Somit werden von den insgesamt betroffenen 509 861 Fahrzeugen 53 618 Fahrzeuge ausgetauscht und 456 243 Halter bleiben bei ihren Altfahrzeugen. Insgesamt entstehen somit Kosten in Höhe von rund 1,1 Mrd. Euro für die Gesamtheit derer, die ihr Fahrzeug nicht austauschen.

Nimmt man diese Kriterien als Grundlage, so kann das Modell mit den folgenden Hebeln bestimmt werden:

Tabelle 33: Hebel der Maßnahme 6

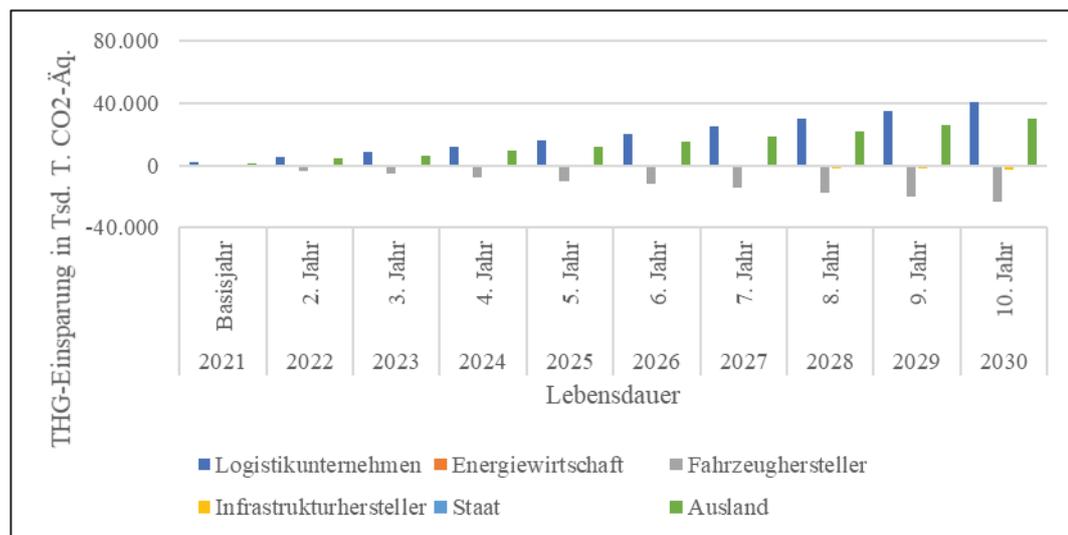
<b>1. Betroffene Region</b>	
<input checked="" type="checkbox"/> Gesamtdeutschland	<input type="checkbox"/> Regionen-spezifisch
<b>2. Betroffene Schadstoffklassen</b>	
<input checked="" type="checkbox"/> SKL 3	<input checked="" type="checkbox"/> SKL 4
<input type="checkbox"/> SKL 5	<input type="checkbox"/> SKL EEV
<input type="checkbox"/> SKL 6	<input type="checkbox"/> Sonstige
<b>3. Betroffene Größenklassen</b>	
<input type="checkbox"/> < 2,8 t	<input type="checkbox"/> 2,8 – 3,5 T.
<input checked="" type="checkbox"/> 3,5 – 7,5 T.	<input checked="" type="checkbox"/> 7,5 – 12 T.
<input checked="" type="checkbox"/> > 12 t	
<b>4. Antriebsarten - Neukauf</b>	
<input type="checkbox"/> Benzin	<input type="checkbox"/> Diesel
<input checked="" type="checkbox"/> LPG	<input checked="" type="checkbox"/> CNG
<input checked="" type="checkbox"/> Elektro	<input checked="" type="checkbox"/> Hybrid
<input checked="" type="checkbox"/> Sonstige	
<b>5. Neukaufquote (Verkauf zu Neukauf)</b>	
<input checked="" type="checkbox"/> 100 % (Standard)	<input type="checkbox"/> Andere Quote: <input type="text"/>
<b>6. Austauschzwang oder -anreiz?</b>	
<input type="checkbox"/> Zwang	<input checked="" type="checkbox"/> Anreizquote: <input type="text" value="0,5"/>
<b>7. Subventionen Fahrzeuge</b>	
regionaler Zusatz:	LPG
	CNG
	Elektro
	Hybrid
	Sonstige
	14.965
	14.965
	14.965
	14.965
	14.965
<b>8. Betroffene Verkehrsbereiche</b>	
<input type="checkbox"/> Nahverkehr	<input type="checkbox"/> Regionalverkehr (inkl. Bundesstraßen)
<input checked="" type="checkbox"/> Fernverkehr (inkl. Autobahn)	
<b>9. Zusatzberechnungen</b>	
<input type="checkbox"/> Mikrodepot und Lastenfahrräder	<input type="checkbox"/> Bonus-Malus-System
<input type="checkbox"/> Verteilzentren	<input type="checkbox"/> CO2-Maut
<input type="checkbox"/> Umweltspur innerorts	<input type="checkbox"/> CO2-Steuer
<input checked="" type="checkbox"/> Umweltspur außerorts	<input type="checkbox"/> City-Maut
<input type="checkbox"/> Umweltzone	<input type="checkbox"/> CO2-Ausweis
<b>10. Änderung der Nachfrage im Ausland</b>	
<input checked="" type="checkbox"/> Ja	<input type="checkbox"/> Nein

Quelle: eigene Darstellung.

### 6.7.2 Treibhausgaseffekte

Mit dieser Maßnahme können insgesamt über den Betrachtungszeitraum rund 214 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äq. eingespart werden. Der Fokus auf den Fernverkehr zeigt, dass ein Überholverbot für Lkw sowie ein damit einhergehender monetärer Anreiz zum Kauf von alternativen Antrieben besonders effektiv ist. In jedem Jahr innerhalb der Betrachtung liegt die Einsparung deutlich über den Produktionsemissionen. Gerade auch Fahrzeughalter aus dem Ausland sorgen für deutliche Einsparungen in Deutschland.

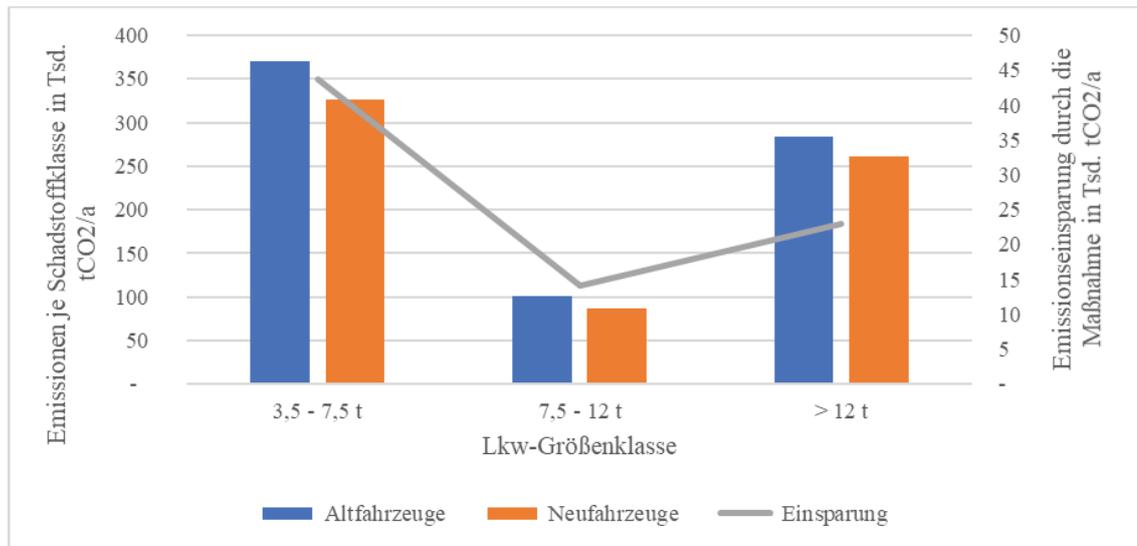
Abbildung 82: Treibhausgaseinsparungen aufgrund von Maßnahme 6 über die Lebensdauer



Quelle: CEPIR-Modell, eigene Darstellung.

Die Maßnahme 6 fokussiert sich auf den deutschen Fernverkehr, sodass die leichten Nutzfahrzeuge nicht in die Betrachtung einfließen. Es findet über alle Größenklassen hinweg eine Einsparung der Emissionen beim Betrieb der Fahrzeuge statt. Bei den Lkw von 3,5 bis 7,5 t liegt diese Einsparung sogar bei rund 45 Tsd. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äq./a.

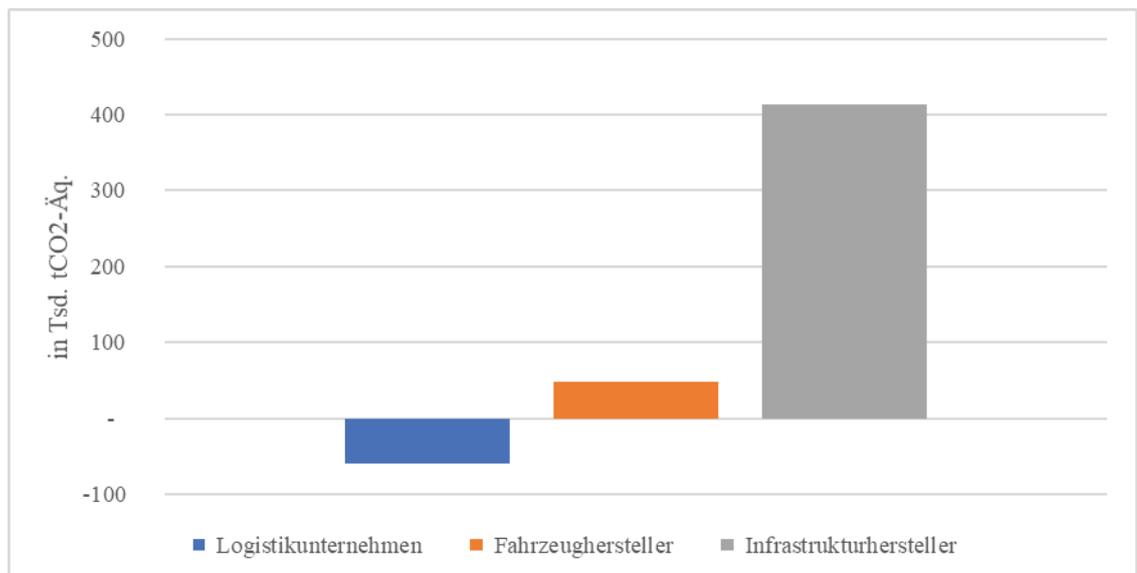
Abbildung 83: Emissionsvergleich mit und ohne Maßnahme 6 (in Tsd. t CO<sub>2</sub>-Äq.)



Quelle: CEPiR-Modell, eigene Darstellung.

Die Maßnahme 6 wirkt sich, ebenso wie die Maßnahme 1, auf die Fahrzeugflotte des Auslands aus. Hierbei ist zu erkennen, dass im Gegensatz zur ersten Maßnahme die THG-Einsparung im Betrieb höher ist als die Produktionsemissionen der Fahrzeughersteller, wohingegen die Emissionen bei den Infrastrukturherstellern ebenso wie in Maßnahme 5 wesentlich höher liegen als bei den anderen Maßnahmen. Dies ist genauso wie in Maßnahme 5 auf den höheren Anteil an alternativen Antrieben zurückzuführen.

Abbildung 84: THG-Reduktion und -Anstiege, verursacht von ausländischen Akteuren aufgrund von Maßnahme 6

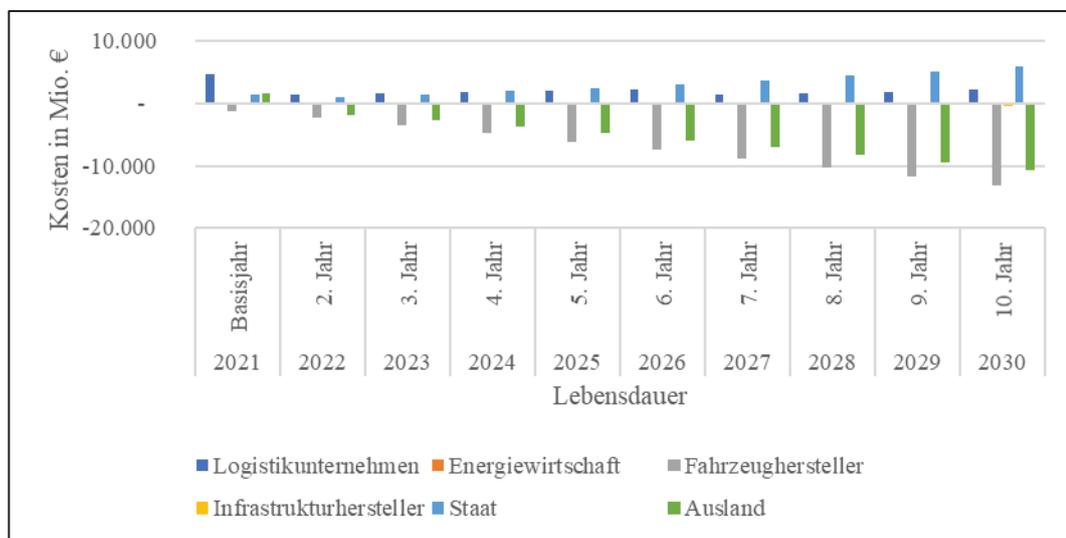


Quelle: CEPiR-Modell, eigene Darstellung.

### 6.7.3 Kosteneffekte

Während im Basisjahr die Kosten die Gewinne übersteigen, ist dies in allen Folgejahren umgekehrt. Besonders bei den Fahrzeugherstellern sind die Gewinne aufgrund des höheren Deckungsbeitrags bei Lkw mit alternativen Antrieben deutlich höher. Insgesamt ist diese Maßnahme ökonomisch sinnvoll, da über 10 Jahre insgesamt rund 71 Mrd. Euro gesamtwirtschaftlich eingespart werden können.

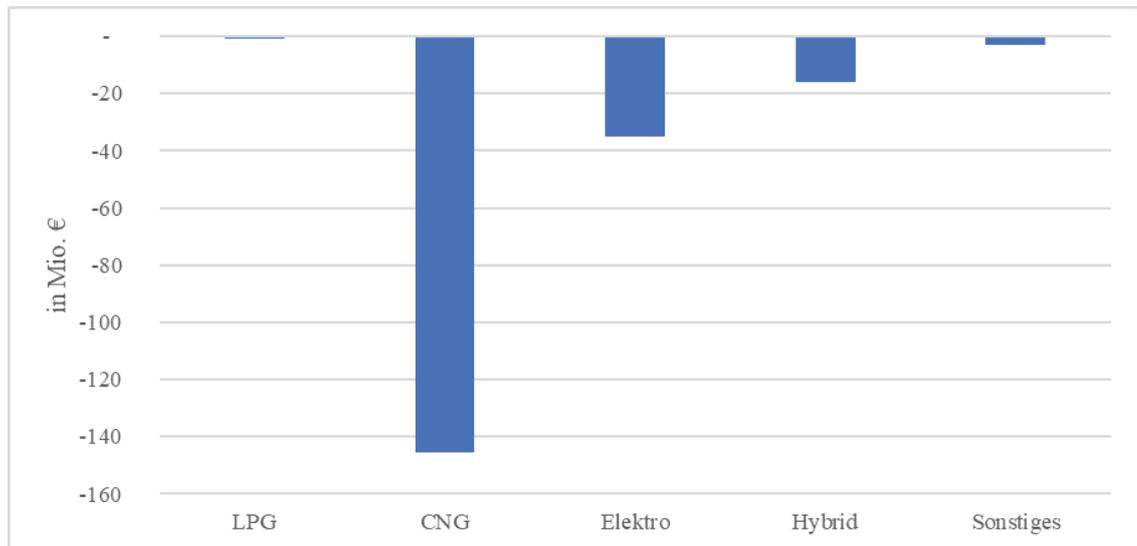
Abbildung 85: Kosten aufgrund von Maßnahme 6 über die Lebensdauer



Quelle: CEPiR-Modell, eigene Darstellung.

Aufgrund des Fokus auf schwere Nutzfahrzeuge ist die Kosteneinsparung von Betriebskosten im Vergleich zum Status quo auf den Zukauf von Erdgasfahrzeugen zurückzuführen.

Abbildung 86: Gesamte Kosteneinsparung von Betriebskosten mit Maßnahme 6 im Vergleich zum Status quo



Quelle: CEPIR-Modell, eigene Darstellung.

#### 6.7.4 Fazit

Mit dieser Maßnahme erhält man im Durchschnitt 332 € pro eingesparter Tonne CO<sub>2</sub>-Äq. über den Betrachtungszeitraum. Diese Maßnahme ist somit sowohl ökonomisch als auch ökologisch sinnvoll. Im Basisjahr fallen jedoch Kosten von 3462 € pro eingesparter Tonne CO<sub>2</sub>-Äq. an. Im ersten Jahr ist die Maßnahme somit zwar effektiv, aber erst über die Laufzeit von 10 Jahren effizient.

### 6.8 Maßnahme 7: Einführung einer Umweltzone in Kiel

#### 6.8.1 Rahmenbedingungen

In der zweiten Maßnahme wurde bereits erläutert, dass Kiel bisher keine Fahrverbote eingeführt hat. Im Zuge der vorangegangenen Maßnahme wurde für Kiel ähnlich wie bei der Auswahl anderer Städte der Bereich zwischen den Hauptverkehrsstraßen bestimmt und dieser Maßnahme als Wirkungsbereich zugrunde gelegt. In Kapitel 6.3 wird die Fläche der hypothetischen Umweltzone mit knapp 20 km<sup>2</sup> angegeben. Dies macht 16,5 % des Stadtgebietes aus. Wie bereits beschrieben, spielt der Lkw-Verkehr in Kiel mit 2,6 % der gesamten Fahrleistung eine eher geringe Rolle (Landeshauptstadt Kiel, 2008).

Geplant bzw. umgesetzt ist eine Umweltzone in Kiel bisher nicht, jedoch wird diese vom Naturschutzbund (NABU) gefordert. Laut einem Bericht sind die Maßnahmen aus dem Luftreinhalteplan nicht ausreichend und wirken nur punktuell (Kluth, 2019). Während

der ADAC Umweltzonen kritisch gegenübersteht (Laberer & Niedermeier, 2009) sowie eine Untersuchung der Universität Stuttgart Zweifel verlauten lässt (Kugler, 2011), ist man in Leipzig von der Wirksamkeit der Umweltzone überzeugt. Dort habe die Umweltzone zu einer beschleunigten Modernisierung des Fahrzeugbestandes und zu einer Minderung des hoch toxischen Anteils im Feinstaub in der Außenluft geführt (LfULG, 2015). Jedoch betrachtet diese Untersuchung lediglich den Austausch der Fahrzeuge, nicht aber die Produktionsemissionen. Innerhalb dieser Untersuchung wird der erzwungene Austausch der Fahrzeuge demgegenüber ganzheitlich betrachtet.

Das Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change hat in einer Untersuchung festgestellt, dass aufgrund von Umweltzonen die Konzentration von Feinstaub im Durchschnitt um 5,9 % reduziert werden konnte (MCC, 2020). Es wurde ein positiver Zusammenhang zwischen der Reduktion von Feinstaub und dem Rückgang von Ausgaben für Arzneimittel gegen Herz- und Atemwegserkrankungen in den betroffenen Regionen festgestellt. Laut MCC können in den 30 untersuchten Umweltzonen jährlich insgesamt 15,8 Mio. Euro Ausgaben für Arzneien eingespart werden. Während der Rückgang von PM10-Belastungen auch von anderen Studien bestätigt wird, ist man sich bezüglich der Wirkung von Umweltzonen auf die Stickoxidbelastung (NO<sub>x</sub>) unsicher bzw. erwartet nur geringe direkte positive Wirkungen (Boltze et al., 2014). Bisher gilt für Umweltzonen die Beschränkung bis zur Schadstoffklasse Euro III. Es wird im Folgenden somit berechnet, welche Auswirkungen es hätte, alle insgesamt 1604 Lastkraftwagen der Schadstoffklasse Euro III aus der Kieler Innenstadt zu ausschließen.

Nimmt man diese Kriterien als Grundlage, so kann das Modell mit den folgenden Hebeln bestimmt werden:

Tabelle 34: Hebel der Maßnahme 7

<b>1. Betroffene Region</b>					
<input type="checkbox"/> Gesamtdeutschland	<input checked="" type="checkbox"/> Regionen-spezifisch	<input type="checkbox"/> Kiel			
<b>2. Betroffene Schadstoffklassen</b>					
<input checked="" type="checkbox"/> SKL 3	<input type="checkbox"/> SKL 4	<input type="checkbox"/> SKL 5	<input type="checkbox"/> SKL EEV	<input type="checkbox"/> SKL 6	<input type="checkbox"/> Sonstige
<b>3. Betroffene Größenklassen</b>					
<input checked="" type="checkbox"/> < 2,8 t	<input checked="" type="checkbox"/> 2,8 – 3,5 T.	<input checked="" type="checkbox"/> 3,5 – 7,5 T.	<input checked="" type="checkbox"/> 7,5 – 12 T.	<input checked="" type="checkbox"/> > 12 t	
<b>4. Antriebsarten - Neukauf</b>					
<input checked="" type="checkbox"/> Benzin	<input checked="" type="checkbox"/> Diesel	<input checked="" type="checkbox"/> LPG	<input checked="" type="checkbox"/> CNG	<input checked="" type="checkbox"/> Elektro	<input checked="" type="checkbox"/> Hybrid <input checked="" type="checkbox"/> Sonstige
<b>5. Neukaufquote (Verkauf zu Neukauf)</b>					
<input type="checkbox"/> 100 % (Standard)	<input checked="" type="checkbox"/> Andere Quote:	<input type="text" value="0,999"/>			

**6. Austauschzwang oder -anreiz?**  
 Zwang       Anreizquote:

**7. Subventionen Fahrzeuge**  
 regionaler Zusatz:       LPG  
                                   CNG  
                                   Elektro  
                                   Hybrid  
                                   Sonstige

**8. Betroffene Verkehrsbereiche**  
 Nahverkehr       Regionalverkehr (inkl. Bundesstraßen)       Fernverkehr (inkl. Autobahn)

**9. Zusatzberechnungen**

<input type="checkbox"/> Mikrodepot und Lastenfahrräder	<input type="checkbox"/> Bonus-Malus-System
<input type="checkbox"/> Verteilzentren	<input type="checkbox"/> CO2-Maut
<input type="checkbox"/> Umweltspur innerorts	<input type="checkbox"/> CO2-Steuer
<input type="checkbox"/> Umweltspur außerorts	<input type="checkbox"/> City-Maut
<input checked="" type="checkbox"/> Umweltzone	<input type="checkbox"/> CO2-Ausweis

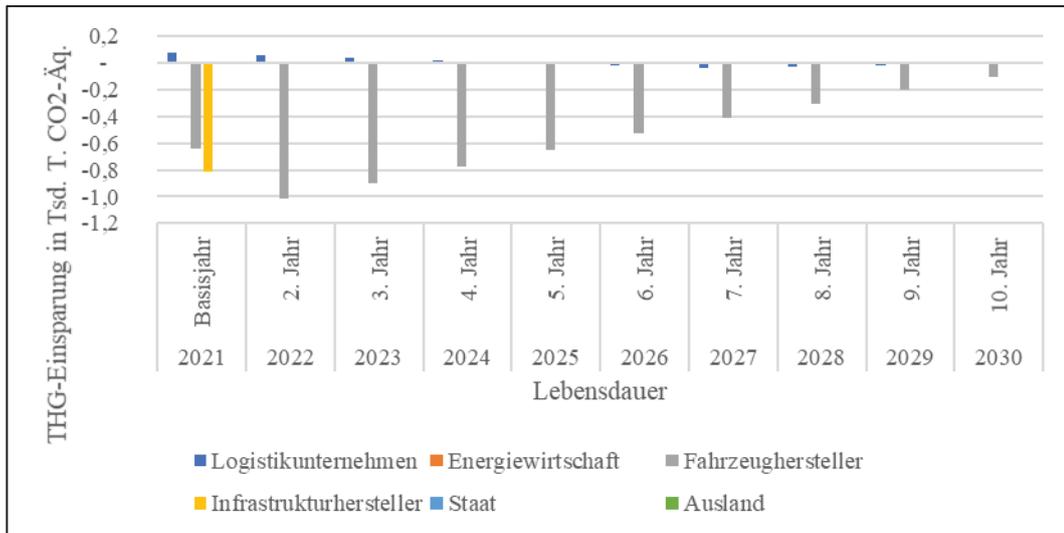
**10. Änderung der Nachfrage im Ausland**  
 Ja       Nein

Quelle: eigene Darstellung.

### 6.8.2 Treibhausgaswirkungen

Die Errichtung einer Umweltzone in Kiel hat im Vergleich zu den vorangegangenen Maßnahmen keine Effektivität vorzuweisen. Die Einsparung im Betrieb ist nahezu null, was darauf zurückzuführen ist, dass neuere Diesel- und Benzin-Lkw höhere CO<sub>2</sub>-Emissionen verursachen als die Diesel der Schadstoffklasse Euro III. Somit wird die Einsparung von alternativen Antrieben auf null ausgeglichen. Aufgrund der Produktion von Fahrzeugen und Infrastruktur steigen jedoch die Treibhausgasemissionen im Betrachtungszeitraum um rund 6,2 Tsd. Tonnen an. Diese Maßnahme ist somit ökologisch nicht erstrebenswert.

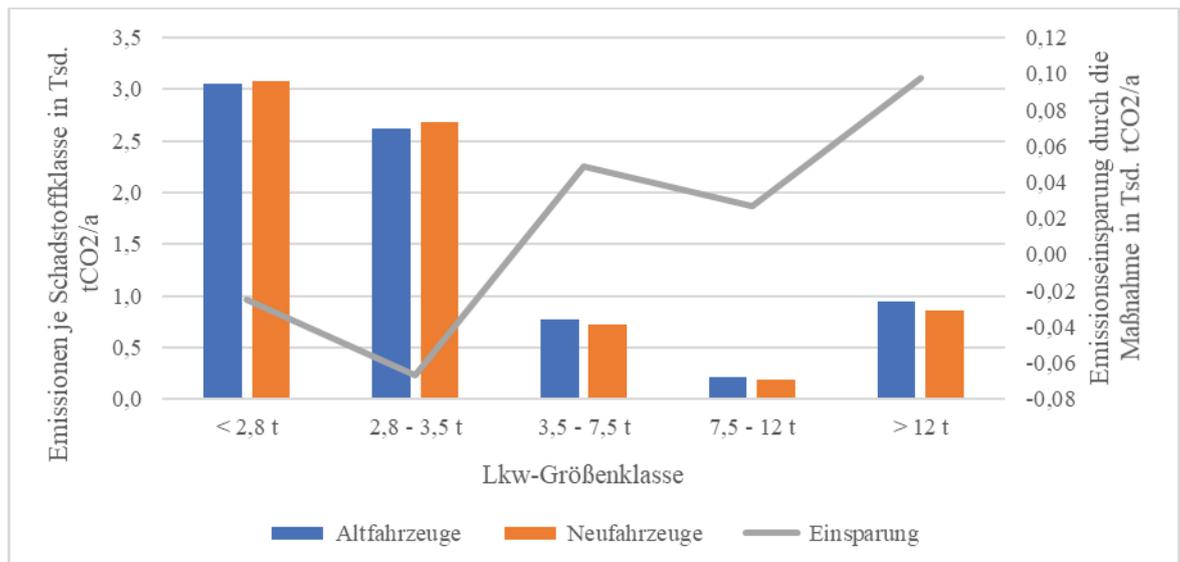
Abbildung 87: Treibhausgaseinsparungen aufgrund von Maßnahme 7 über die Lebensdauer



Quelle: CEPIR-Modell, eigene Darstellung.

Im Gegensatz zu den vorangegangenen Maßnahmen kann die Maßnahme 7, also die Einführung einer Umweltzone, gerade bei den Lkw von 2,8 bis 3,5 t, die bei allen anderen Maßnahmen sehr hohe Einsparungen verzeichnen konnten, keine Einsparungen liefern. Dagegen sind die Einsparungen bei den Lkw über 12 t vergleichsweise am höchsten.

Abbildung 88: Emissionsvergleich mit und ohne Maßnahme 7

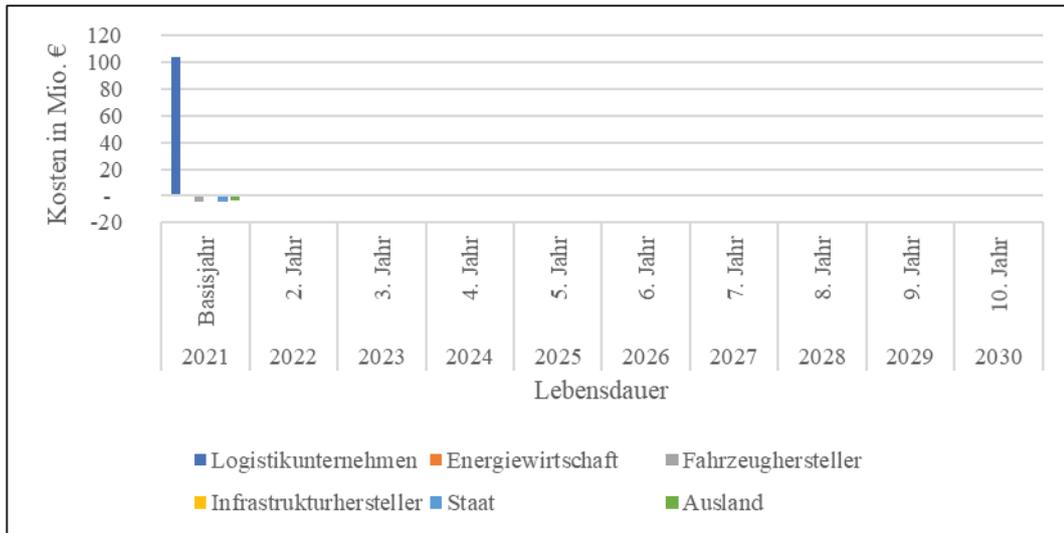


Quelle: CEPIR-Modell, eigene Darstellung.

### 6.8.3 Kosteneffekte

Die Umweltzone kostet insgesamt rund 90 Mio. Euro über den Betrachtungszeitraum. Der Hauptanteil findet im Basisjahr durch den Austausch der Fahrzeuge statt. In den Folgejahren finden nahezu keine Kosten statt.

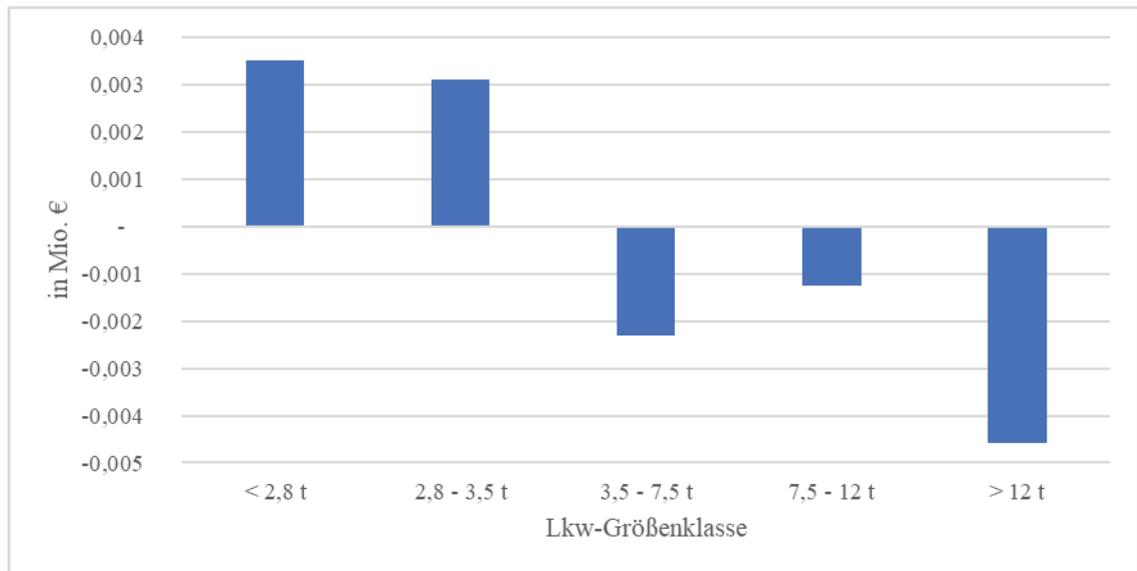
Abbildung 89: Kosten aufgrund von Maßnahme 7 über die Lebensdauer



Quelle: CEPiR-Modell, eigene Darstellung.

Während in der 1. Maßnahme lediglich bei den Lkw unter 2,8 t eine Verbrauchs- und Umsatzsteigerung resultiert, liefert die Maßnahme 7 sowohl in dieser als auch in der Größenklasse 2,8 bis 3,5 t eine Verbrauchssteigerung und einen Anstieg des Kraftstoffumsatzes. Besonders stark steigt der Kraftstoffumsatz beim Benzin an, während der von Elektrofahrzeugen sinkt.

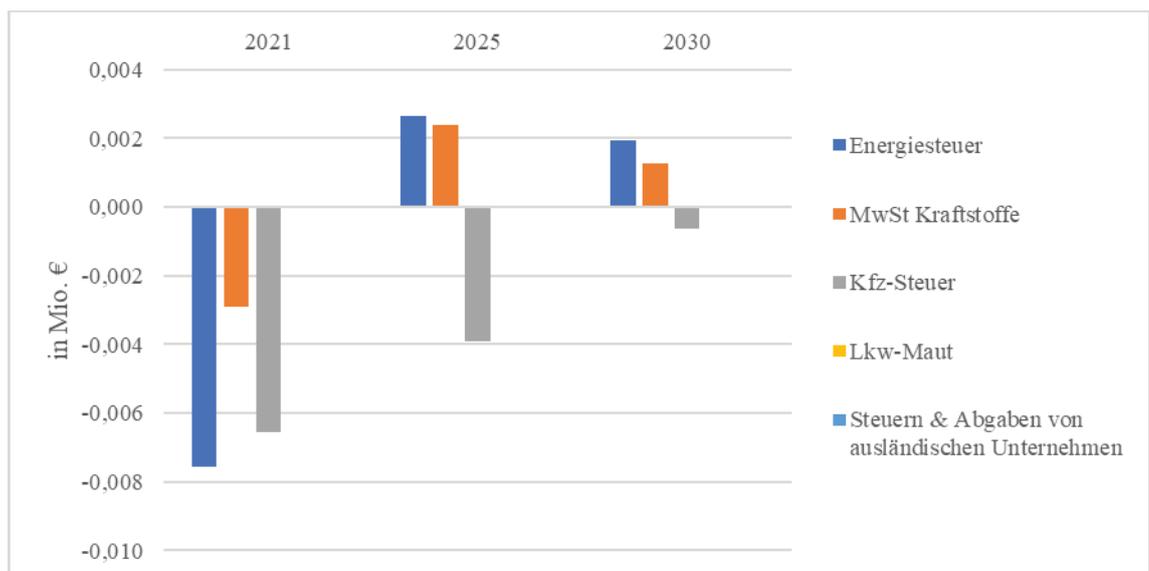
Abbildung 90: Veränderung des Kraftstoffumsatzes aufgrund von Maßnahme 7 im Vergleich zum Status quo



Quelle: CEPiR-Modell, eigene Darstellung.

Aufgrund dieser Verbrauchssteigerung steigen auch die jährlichen Staatseinnahmen von Energiesteuer und Mehrwertsteuer von Kraftstoffen in den Jahren 2025 und 2030. Die Kfz-Steuer-Einnahmen sinken konsequent bis 2030, jedoch werden die Verluste im Laufe der Zeit geringer.

Abbildung 91: Veränderung der jährlichen Staatseinnahmen aufgrund von Maßnahme 7



Quelle: CEPiR-Modell, eigene Darstellung.

Aufgrund der Umweltzone entsteht darüber hinaus ein positiver Effekt von rund 0,5 Mio. Euro. Dies ist auf die Einsparungen in der Beschaffung von Arzneimitteln zurückzuführen, die aufgrund der verringerten Feinstaubbelastung in der Luft seltener benötigt werden.

#### *6.8.4 Fazit*

Die Maßnahme 7 weist genau wie die Maßnahmen 1 bis 4 hohe Kosten und keine Effektivität hinsichtlich einer THG-Reduktion auf. Diese Maßnahme ist somit wieder so zu interpretieren, dass die Treibhausgasemissionen trotz der Investitionen (Kosten) ansteigen anstatt sinken. Dies ist weder ökonomisch noch ökologisch sinnvoll. Eine Umweltzone in Kiel in dieser Ausgestaltung ist somit nicht effizient.

### **6.9 Maßnahme 8: Bonus-Malus-System**

#### *6.9.1 Rahmenbedingungen*

Die Maßnahme 8 untersucht die Effektivität und die Effizienz eines Bonus-Malus-Systems (siehe 5.2.1) für Lastkraftwagen in Deutschland. Diese Maßnahme bezieht sich somit erneut auf das gesamte deutsche Gebiet. Sie ist jedoch die erste Maßnahme, die keinerlei Austausch der aktuellen Flotte impliziert, sondern sich vollkommen auf eine Nachfrageänderung bei den „ohnehin auszutauschenden Fahrzeugen“ fokussiert. Daraus resultiert, dass nicht mehr Fahrzeuge produziert werden als notwendig, da die generelle Produktion von Fahrzeugen im Status quo ebenfalls stattfinden würde. Hierbei entsteht bei den Emissionen in der Produktion sowie im Betrieb lediglich eine Abweichung ins Positive bzw. Negative im Vergleich zum Referenzfall hinsichtlich der geänderten Antriebswahl.

Das Bonus-Malus-System innerhalb dieser Maßnahme wird in Anlehnung an das französische Vorbild gestaltet. Es wird ein Bonus für Fahrzeuge mit einem verbrauchsarmen Antrieb und ein Malus für verbrauchsintensive Antriebstechnologien eingeführt, der einmalig beim Kauf des Fahrzeugs fällig wird. Anders als in Frankreich werden nicht die TTW-Emissionen, sondern die WTW-Emissionen für die Festlegung des Bonus/Malus zugrunde gelegt. Dies führt dazu, dass zum aktuellen Stand Wasserstoff nicht gefördert, sondern sanktioniert wird. Dies ist auf die sehr hohen Emissionen bei der Wasserstoffherstellung zurückzuführen. Wie in Kapitel 3.3.7 beschrieben wurde, kann Wasserstoff zwar mit erneuerbaren Energien als Ausgangsrohstoff ein emissionsarmer Kraftstoff sein,

jedoch ist dies aufgrund des derzeitigen Strommix aktuell in Deutschland nicht realistisch.

Da sich das französische System lediglich auf Pkw beschränkt, wird die Malus-Tabelle entlang der höheren Emissionen der verschiedenen Lkw-Größenklassen verschoben. Dabei werden die Emissionen von hybriden Fahrzeugen als Schwelle angelegt. Für ein Hybridfahrzeug ist somit kein Malus fällig, jedoch greift die Malus-Tabelle bei allem, was über dem spezifischen Ausstoß eines Hybrids liegt. Dieser Schwellenwert, der festlegt, ob und in welcher Höhe ein Bonus oder Malus fällig wird, sollte mit Blick auf die fortschreitende Technologieeffizienz und steigende Klimaschutzkriterien regelmäßig abgesenkt werden. Ansonsten würden die vom Staat zu leistenden Bonus-Zahlungen stetig zunehmen, während die Einnahmen durch Mali kontinuierlich sinken. Dies würde eine zunehmende Belastung des Staatshaushalts bedeuten. Weit überwiegende Bonus-Zahlungen würden ferner eine Subventionierung des Fahrzeugkaufs bedeuten, was den Zielen einer Verkehrswende entgegenwirkt (Elmer, 2019).

Das Umweltbundesamt weist auf die Problematik des zu schnellen Anpassens von Zahlungen hin. Dabei wird beschrieben, dass, wenn der Bonus zu hoch ist, die Nachfrage nach geförderten Fahrzeugen und damit auch die Gesamtheit der Bonuszahlungen stark ansteigt. Dies würde dazu führen, dass die Malus-Zahlungen ebenfalls angehoben werden müssten. Das würde wiederum die Attraktivität der emissionsarmen Fahrzeuge weiter steigern, sodass die Bonuszahlungen wieder gekürzt werden müssten. Wenn dieser Kreislauf zu häufig, zum Beispiel jährlich, angepasst würde, könnten sich über viele Jahre hinweg große Schwankungen in den Bonus- und Malus-Zahlungen ergeben, was die Kalkulation für Lkw-Hersteller und Logistikunternehmen praktisch unmöglich machen würde (UBA, 2019c). Daher wird angenommen, dass das Bonus-Malus-System relativ vorsichtig eingeführt und lediglich in einem Fünf-Jahres-Turnus angepasst wird. Für die Anpassungen im Jahr 2026 wurde die Malus-Tabelle um fünf Emissionspunkte (pro Jahr ein Emissionspunkt) verschoben. Die gesamte Malus-Tabelle befindet sich im Anhang (Tabelle h) und wird im Folgenden auf die wesentlichen Beträge reduziert. Der Bonus für Elektro- und Hybridfahrzeuge wird mit 27 % des Kaufpreises dotiert (UBA, 2019c). Auch hinsichtlich des Bonus muss im Jahr 2026 eine Anpassung stattfinden, da auch der Preis für Elektrofahrzeuge im Laufe der Zeit durch fallende Batteriekosten sinken wird (UBA, 2019d).

Ausgehend von dieser Schwelle liegen die durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Ausstöße somit bei den folgenden Beträgen:

Tabelle 35: Bonus-/Malus-Zahlungen pro Größenklasse und Kraftstoff im Jahr 2021 und 2026

<b>ab 2021</b>	<b>bis 2800 kg</b>	<b>2801 - 3500</b>	<b>3501 - 7500</b>	<b>7501 - 12000</b>	<b>12001 - mehr</b>
<b>Benzin</b>	3.331	10.011	12.012	18.905	30.000
<b>Diesel</b>	400	1.386	240	230	360
<b>LPG</b>	7.851	22.781	30.000	30.000	30.000
<b>CNG</b>	-	-	-	-	1.901
<b>Elektro</b>	-43.200	-43.200	-43.200	-43.200	-43.200
<b>Hybrid</b>	-30.262	-30.262	-30.262	-30.262	-30.262
<b>Sonstiges</b>	20.393	30.000	280	650	650

<b>ab 2026</b>	<b>bis 2800 kg</b>	<b>2801 - 3500</b>	<b>3501 - 7500</b>	<b>7501 - 12000</b>	<b>12001 - mehr</b>
<b>Benzin</b>	4.543	12.552	14.881	22.781	30.000
<b>Diesel</b>	818	2.049	360	330	740
<b>LPG</b>	10.011	27.166	30.000	30.000	30.000
<b>CNG</b>	-	-	-	-	2.726
<b>Elektro</b>	-38.604	-38.604	-38.604	-38.604	-38.604
<b>Hybrid</b>	-29.236	-29.236	-29.236	-29.236	-29.236
<b>Sonstiges</b>	24.472	30.000	450	1.074	1.074

Quelle: (Caroom.fr, 2021), (Cartegrise.com, 2021), eigene Berechnung.

Die Nachfrageänderung orientiert sich an der Nachfrageverschiebung aus dem französischen Vorbild (siehe Kapitel 6.1.5). Eine Änderung der Nachfrage im Ausland wird mit dieser Maßnahme nicht verursacht, da der Bonus bzw. Malus lediglich für die Zulassung in Deutschland gezahlt werden muss. Daraus resultiert jedoch auch, dass keinerlei Einsparungen der THG-Emissionen hinsichtlich der ausländischen Flotte bewirkt werden.

Nimmt man diese Kriterien als Grundlage, so kann das Modell mit den folgenden Hebeln bestimmt werden:

Tabelle 36: Hebel der Maßnahme 8

<b>1. Betroffene Region</b>					
<input type="checkbox"/> Gesamtdeutschland	<input checked="" type="checkbox"/> Regionen-spezifisch	<input type="checkbox"/> München, Düsseldorf, Kiel			
<b>2. Betroffene Schadstoffklassen</b>					
<input type="checkbox"/> SKL 3	<input type="checkbox"/> SKL 4	<input type="checkbox"/> SKL 5	<input type="checkbox"/> SKL EEV	<input type="checkbox"/> SKL 6	<input type="checkbox"/> Sonstige
<b>3. Betroffene Größenklassen</b>					
<input checked="" type="checkbox"/> < 2,8 t	<input checked="" type="checkbox"/> 2,8 – 3,5 T.	<input checked="" type="checkbox"/> 3,5 – 7,5 T.	<input checked="" type="checkbox"/> 7,5 – 12 T.	<input checked="" type="checkbox"/> > 12 t	
<b>4. Antriebsarten - Neukauf</b>					

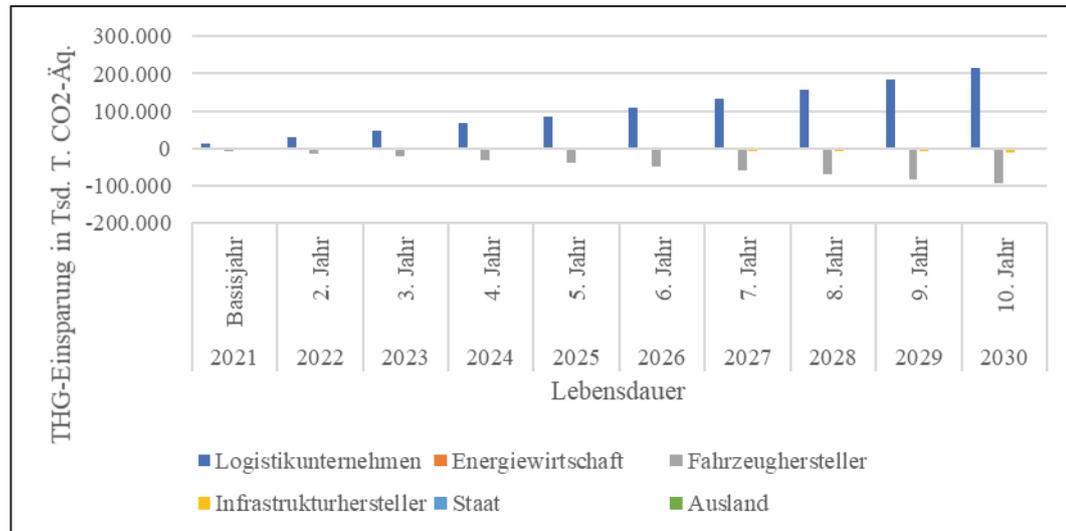
<input checked="" type="checkbox"/>	Benzin	<input checked="" type="checkbox"/>	Diesel	<input checked="" type="checkbox"/>	LPG	<input checked="" type="checkbox"/>	CNG	<input checked="" type="checkbox"/>	Elektro	<input checked="" type="checkbox"/>	Hybrid	<input checked="" type="checkbox"/>	Sonstige	
<b>5. Neukaufquote (Verkauf zu Neukauf)</b>														
<input checked="" type="checkbox"/>	100 % (Standard)			<input type="checkbox"/>	Andere Quote:		<input type="text"/>							
<b>6. Austauschzwang oder -anreiz?</b>														
<input type="checkbox"/>	Zwang			<input checked="" type="checkbox"/>	Anreizquote:		1							
<b>7. Subventionen Fahrzeuge</b>														
regionaler Zusatz:		LPG	<input type="text"/>											
		CNG	<input type="text"/>											
		Elektro	<input type="text"/>											
		Hybrid	<input type="text"/>											
		Sonstige	<input type="text"/>											
<b>8. Betroffene Verkehrsbereiche</b>														
<input checked="" type="checkbox"/>	Nahverkehr			<input checked="" type="checkbox"/>	Regionalverkehr (inkl. Bundesstraßen)				<input checked="" type="checkbox"/>	Fernverkehr (inkl. Autobahn)				
<b>9. Zusatzberechnungen</b>														
<input type="checkbox"/>	Mikrodepot und Lastenfahräder				<input checked="" type="checkbox"/>	Bonus-Malus-System								
<input type="checkbox"/>	Verteilzentren				<input type="checkbox"/>	CO2-Maut								
<input type="checkbox"/>	Umweltspur innerorts				<input type="checkbox"/>	CO2-Steuer								
<input type="checkbox"/>	Umweltspur außerorts				<input type="checkbox"/>	City-Maut								
<input type="checkbox"/>	Umweltzone				<input type="checkbox"/>	CO2-Ausweis								
<b>10. Änderung der Nachfrage im Ausland</b>														
<input type="checkbox"/>	Ja			<input checked="" type="checkbox"/>	Nein									

Quelle: eigene Darstellung.

### 6.9.2 Treibhausgaseffekte

Die Einführung eines Bonus-Malus-Systems für emissionsarme Fahrzeuge hat hohe Einsparungspotentiale zu verzeichnen. Insgesamt können über die Lebensdauer rund 529 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äq. eingespart werden. Während bei Fahrzeug- und Infrastrukturherstellern über die Jahre ansteigende Emissionen anfallen, steigen die Einsparungen bei den anderen Akteuren über die Jahre stark an.

Abbildung 92: Treibhausgaseinsparungen aufgrund von Maßnahme 8 über die Lebensdauer



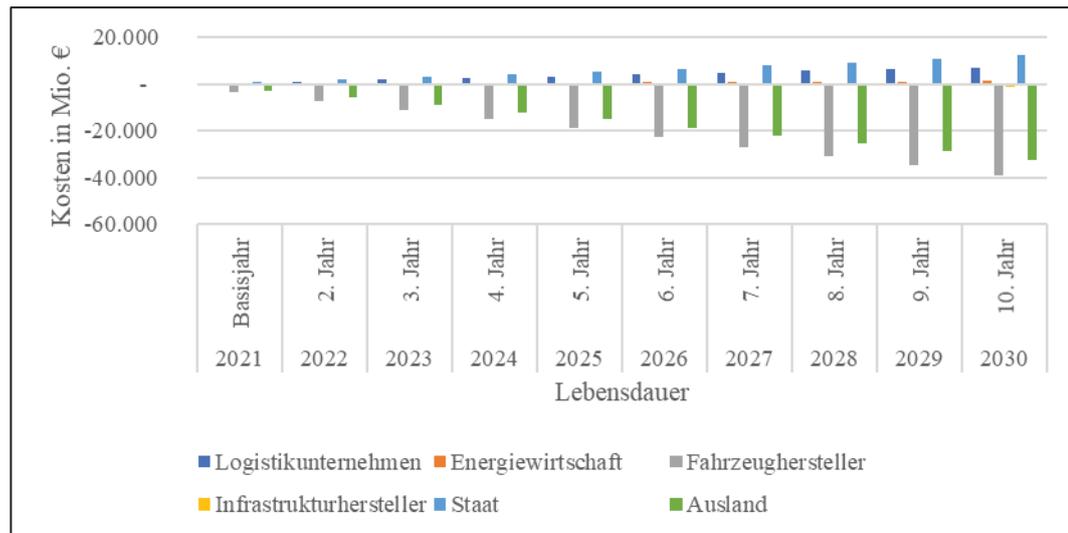
Quelle: CEP-IR-Modell, eigene Darstellung.

Da die Maßnahme nicht für ausländische Fahrzeuge gilt, wird aufgrund von ausländischen Fahrzeugen auch kein CO<sub>2</sub> eingespart. Bei dieser Maßnahme werden die Betriebsemissionen kontinuierlich von Jahr zu Jahr bis auf eine Einsparung von rund 214 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äq. im Jahr 2030 gesenkt. Währenddessen steigen die Herstellungsemissionen kontinuierlich mit, gleichen jedoch nur 50 % der eingesparten Emissionen aus.

### 6.9.3 Kosteneffekte

Mit dem Bonus-Malus-System können sowohl hohe Einsparungen als auch hohe Einnahmen verzeichnet werden. Da sich das Bonus-Malus-System gesamtwirtschaftlich ausgleicht, wird es bei den Gesamtkosten nicht aufgeführt. Jedoch ist zu erkennen, dass der Staat bei dieser Maßnahme Kosten in Höhe von knapp 62 Mrd. Euro zu tragen hat. Mehr als 4 Mrd. Euro entfallen dabei auf die Kosten für den Überschuss an Boni gegenüber Mali. Über den Zeitraum der Lebensdauer von 10 Jahren sparen die Logistikunternehmen aufgrund der Nachfrageverschiebung rund 4,6 Mrd. Euro an Betriebskosten. Darüber hinaus werden sie durch das Bonus-Malus-System mit insgesamt rund 4,1 Mrd. Euro vom Staat unterstützt. Daher verbleiben Restkosten von rund 38 Mrd. Euro. Auch die Energiewirtschaft zahlt für diese Maßnahme ca. 7 Mrd. Euro. 86 % davon entfallen auf den verringerten Kraftstoffumsatz sowie 14 % auf die Kosten für neue Infrastruktur.

Abbildung 93: Kosten aufgrund von Maßnahme 8 über die Lebensdauer



Quelle: CEPiR-Modell, eigene Darstellung.

Die Fahrzeughersteller gewinnen über die Lebensdauer rund 209 Mrd. Euro und die Infrastrukturhersteller knapp 5 Mrd. Euro. Das Ausland profitiert ebenfalls von der Maßnahme. Rund 95 % der 172 Mrd. Euro Einnahmen entfallen auf den Mehrgewinn aus dem Fahrzeugabsatz. Insgesamt können durch diese Maßnahme über die Lebensdauer 277 Mrd. Euro eingespart werden.

#### 6.9.4 Fazit

Die Einführung eines Bonus-Malus-Systems ist effizient. Es werden eine hohe THG-Einsparung sowie sinkende Gesamtkosten gegenüber dem Referenzszenario generiert. Insgesamt können pro eingespartem Kilogramm CO<sub>2</sub>-Äq. 0,52 € eingespart werden. Die Maßnahme ist bereits mit Einnahmen von 0,63 € pro eingespartem Kilogramm CO<sub>2</sub>-Äq. im Basisjahr effizient.

### 6.10 Maßnahme 9: Einführung der CO<sub>2</sub>-Maut

#### 6.10.1 Rahmenbedingungen

Seit dem Jahr 2017 wird in der EU eine einheitliche Maut diskutiert, die abhängig vom CO<sub>2</sub>-Ausstoß berechnet wird. Ende 2020 wurde mit der Eurovignetten-Richtlinie eine solche Maut auf EU-Ebene beschlossen. Diese soll ab dem Jahr 2023 in Deutschland die Lkw-Maut ergänzen und anhand des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes berechnet werden. Die Bepreisung ist unklar, jedoch wird angenommen, dass Diesel-Lkw um rund 50 % mehr zahlen müssen

als bisher (Handelsblatt, 2020a). Die aktuelle Lkw-Maut soll mittels der CO<sub>2</sub>-Differenzierung ergänzt und nicht ersetzt werden (Meyer & Runkel, 2018). Dies bedeutet, dass angenommen wird, dass die bisherige Lkw-Maut bestehen bleibt und lediglich die jährlichen Zusatzbeträge berechnet werden.

Die Maßnahme gilt – wie in dem beschlossenen Modell – zunächst nur für schwere Nutzfahrzeuge ab 3,5 t für Gesamtdeutschland. Es sind vorwiegend, wie bei der Lkw-Maut, der Regional- und Fernverkehr betroffen. Dabei besteht ein deutlicher Anreiz, die aktuelle Flotte auszutauschen, sodass angenommen wird, dass der Anreiz für die Schadstoffklassen III und IV bei 50 % liegt. Da diese Maßnahme ein Anreizsystem bewirkt, wird auch die Nachfrage bei den Neuzulassungen in der Zukunft verändert (siehe Kapitel 6.1.5). Die Nachfrage aus dem Ausland ist ebenfalls betroffen. Die Mautsätze werden abhängig vom CO<sub>2</sub>-Ausstoß der Schadstoffklassen und Kraftstoffkategorien beschlossen. Dabei wird ein über den Zeitverlauf steigender Betrag pro verursachter Tonne CO<sub>2</sub>-Äq. angenommen.

Tabelle 37: CO<sub>2</sub>-Mautsätze in € pro t CO<sub>2</sub>-Emission über die Lebensdauer der Maßnahme

<b>CO<sub>2</sub>-Mautsätze</b>	<b>2021</b>	<b>2022</b>	<b>2023</b>	<b>2024</b>	<b>2025</b>	<b>2026</b>	<b>2027</b>	<b>2028</b>	<b>2029</b>	<b>2030</b>
<i>in € pro t CO<sub>2</sub></i>	758	768,4	778,8	789,2	799,6	810	820,4	830,8	841,2	851,6

Quelle: eigene Berechnung

Die CO<sub>2</sub>-Mautsätze sind angelehnt an das französische CO<sub>2</sub>-Steuersystem, das in der folgenden Maßnahme näher betrachtet wird (OFATE, 2018). Die Mautsätze werden jedoch nur auf die Abweichung gegenüber dem Ausstoß eines Hybridfahrzeugs erhoben, sodass sowohl Hybrid- als auch Elektrofahrzeuge von der Strafe ausgenommen sind, jedoch keine Diskriminierung von Kraftstoffarten stattfindet, da, wie auch bei den vorangegangenen Maßnahmen, nicht davon ausgegangen werden kann, dass Elektro- und Hybridfahrzeuge gänzlich CO<sub>2</sub>-neutral fahren können. Da ein CNG-Fahrzeug unter 12 t ebenfalls einen niedrigeren CO<sub>2</sub>-Ausstoß hat als ein Hybridfahrzeug, wird die CO<sub>2</sub>-Maut bei Erdgasfahrzeugen lediglich auf die größte Größenklasse erhoben. Besonders schwer trifft die CO<sub>2</sub>-Maut Benzin-, LPG- und alte Dieselfahrzeuge. Diesel der Schadstoffklasse Euro VI sind wenig von dieser CO<sub>2</sub>-Maut betroffen, da sie nicht wesentlich mehr CO<sub>2</sub> ausstoßen als die alternativen Kraftstoffe Hybrid und CNG.

Die folgende Tabelle enthält die jährlichen Mautzahlungen eines Lkw der entsprechenden Größen- und Schadstoffklasse und Antriebsform im Jahr 2021.

Abbildung 94: Jährliche Mautzahlungen eines Lkw der entsprechenden Größen- und Schadstoffklasse und Antriebsform im Jahr 2021

	LKW 3501 - 7500	LKW 7501 - 12000	LKW 12001 - mehr
<b>Benzin</b>	1.329	1.535	1.955
<b>Diesel Euro VI</b>	212	193	308
<b>LPG</b>	2.033	2.379	2.991
<b>CNG</b>	-	-	640
<b>Sonstiges</b>	255	395	380
<b>Diesel Euro I</b>	1.057	1.865	1.967
<b>Diesel Euro II</b>	540	1.432	1.364
<b>Diesel Euro III</b>	782	1.630	1.742
<b>Diesel Euro IV</b>	771	923	1.021
<b>Diesel Euro V</b>	309	352	442
<b>Diesel EEV</b>	309	352	442

Quelle: CEPiR-Modell, eigene Darstellung.

Nimmt man diese Kriterien als Grundlage, so kann das Modell mit den folgenden Hebeln bestimmt werden:

Tabelle 38: Hebel der Maßnahme 9

**1. Betroffene Region**  
 Gesamtdeutschland     Regionen-spezifisch

**2. Betroffene Schadstoffklassen**  
 SKL 3     SKL 4     SKL 5     SKL EEV     SKL 6     Sonstige

**3. Betroffene Größenklassen**  
 < 2,8 t     2,8 – 3,5 T.     3,5 – 7,5 T.     7,5 – 12 T.     > 12 t

**4. Antriebsarten - Neukauf**  
 Benzin     Diesel     LPG     CNG     Elektro     Hybrid     Sonstige

**5. Neukaufquote (Verkauf zu Neukauf)**  
 100 % (Standard)     Andere Quote:

**6. Austauschzwang oder -anreiz?**  
 Zwang     Anreizquote:

**7. Subventionen Fahrzeuge**  
 regionaler Zusatz:    LPG      
                                   CNG      
                                   Elektro      
                                   Hybrid      
                                   Sonstige

**8. Betroffene Verkehrsbereiche**

Nahverkehr  Regionalverkehr (inkl. Bundesstraßen)  Fernverkehr (inkl. Autobahn)

**9. Zusatzberechnungen**

<input type="checkbox"/> Mikrodepot und Lastenfahrräder	<input type="checkbox"/> Bonus-Malus-System
<input type="checkbox"/> Verteilzentren	<input checked="" type="checkbox"/> CO <sub>2</sub> -Maut
<input type="checkbox"/> Umweltspur innerorts	<input type="checkbox"/> CO <sub>2</sub> -Steuer
<input type="checkbox"/> Umweltspur außerorts	<input type="checkbox"/> City-Maut
<input type="checkbox"/> Umweltzone	<input type="checkbox"/> CO <sub>2</sub> -Ausweis

**10. Änderung der Nachfrage im Ausland**

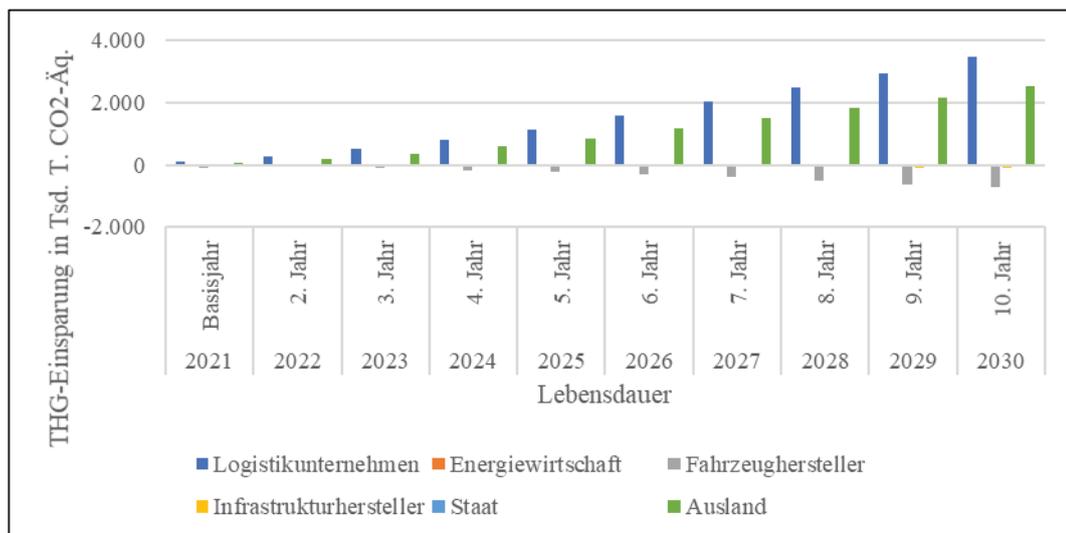
Ja  Nein

Quelle: eigene Darstellung.

### 6.10.2 Treibhausgaseffekte

Die Maßnahme 9 – CO<sub>2</sub>-Maut ist effektiv für die THG-Einsparung geeignet. Insgesamt können über die Lebensdauer knapp 22 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äq. eingespart werden. Die Einsparungen steigen kontinuierlich mit der Maut an und liegen im Jahr 2030 bei 3,5 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äq. Obwohl Fahrzeug- und Infrastrukturhersteller jährlich steigende hinzukommende Emissionen verursachen, sind die Einsparungen bei Logistikunternehmen und im Ausland deutlich höher.

Abbildung 95: Treibhausgaseinsparungen aufgrund von Maßnahme 9 über die Lebensdauer

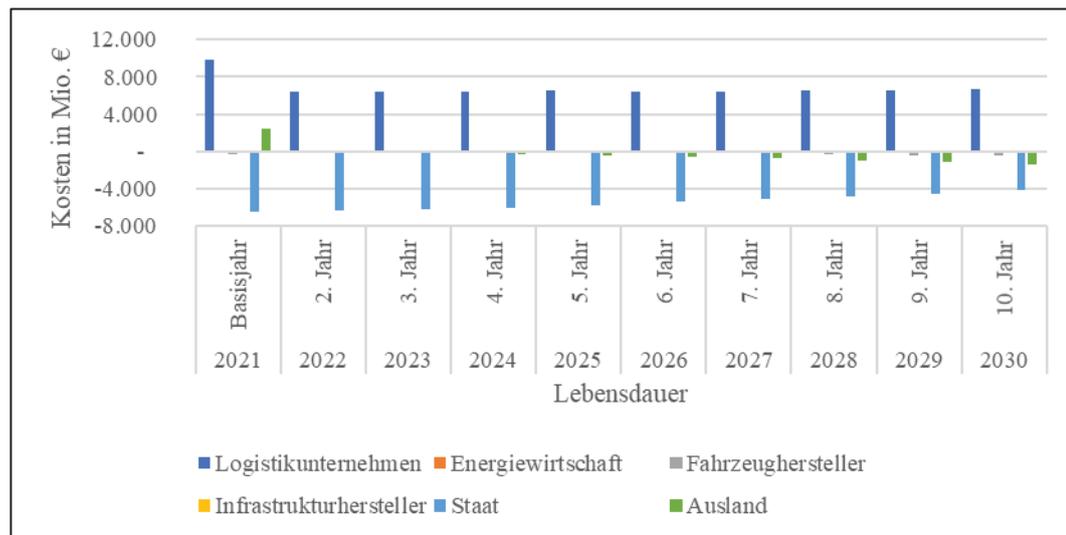


Quelle: CEPIR-Modell, eigene Darstellung.

### 6.10.3 Kosteneffekte

Diese Strafzahlungen wurden mit den entsprechenden Bestandszahlen pro Kraftstoff sowie der Veränderung der Anzahlen an Neuzulassungen aufgrund der geänderten zukünftigen Nachfrage berechnet.

Abbildung 96: Kosten aufgrund von Maßnahme 9 über die Lebensdauer



Quelle: CEPiR-Modell, eigene Darstellung.

Insgesamt verursacht die Maßnahme Kosten in Höhe von 8,9 Mrd. Euro über die Lebensdauer. Besonders der Staat macht bei dieser Maßnahme Gewinn – rund 55 Mrd. Euro. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Staat Einnahmen von knapp 65 Mrd. Euro aufgrund der CO<sub>2</sub>-Maut verbuchen kann. Die Einnahmen des Staates werden allerdings jedes Jahr geringer. Das Ausland verzeichnet im Basisjahr Kosten, während auch dort über alle weiteren Jahre steigende Gewinne entstehen, sodass insgesamt Einnahmen von rund 3,3 Mrd. Euro auf die CO<sub>2</sub>-Maut zurückzuführen sind. Die Logistikunternehmen haben bei dieser Maßnahme außer im Basisjahr – dort liegen die Kosten bei knapp 10 Mrd. Euro – relativ kontinuierliche Kosten von 6 bis 7 Mrd. Euro.

### 6.10.4 Fazit

Eine CO<sub>2</sub>-Maut ist somit zwar effektiv, jedoch nicht effizient. Es werden Kosten in Höhe von 387 € pro eingesparter Tonne CO<sub>2</sub>-Äq. fällig. Im Basisjahr liegen die Kosten pro Tonne sogar bei rund 63.012 €.

## 6.11 Maßnahme 10: Einführung der CO<sub>2</sub>-Steuer in Deutschland

### 6.11.1 Rahmenbedingungen

In Maßnahme 10 werden die Effektivität und Effizienz einer CO<sub>2</sub>-Steuer berechnet. Dabei wird die französische CO<sub>2</sub>-Steuer als Vorbild genutzt. Im Jahr 2021 wurde eine CO<sub>2</sub>-Steuer in Deutschland eingeführt. Aufgrund der Lkw-Maut wird jedoch argumentiert, dass schwere Lastkraftwagen von dieser Steuer ausgenommen sein sollten (Spiegel, 2020), sodass in dieser Maßnahme lediglich eine CO<sub>2</sub>-Steuer für schwere Lastkraftwagen betrachtet wird. Im Jahr 2017 beschloss die französische Regierung eine Verschärfung der Steuerbeträge, sodass im Jahr 2021 75,8 € pro Tonne CO<sub>2</sub>-Äq. anfallen. Dieser Betrag soll jährlich um 10,4 € ansteigen (OFATE, 2018). Die Steuerzahlungen werden aus dem französischen Modell übernommen, sodass der folgende Verlauf bis 2030 resultiert:

Tabelle 39: Steuerzahlungen CO<sub>2</sub>-Steuer pro Jahr im Zeitverlauf bis 2030 in € pro t CO<sub>2</sub>

CO <sub>2</sub> -Steuer	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
in € pro t CO <sub>2</sub>	75,8	86,2	96,6	107	117,4	127,8	138,2	148,6	159	169,4

Quelle: (OFATE, 2018)

Das Argument, dass die deutschen Logistikunternehmen aufgrund der erhöhten Kraftstoffpreise einen Nachteil durch die Steuer hätten, wird nicht weiter betrachtet, da die Kraftstoffpreise in Deutschland auch ohne die Maßnahme deutlich über dem europäischen Durchschnitt liegen. Es wird angenommen, dass die Speditionen, die vorher bereits in Deutschland getankt haben, dies auch weiterhin tun.

Ebenso wie in Maßnahme 8 werden pro Kraftstoff und Schadstoffklasse die WTW- und nicht wie im französischen Modell die TTW-Emissionen zugrunde gelegt. Wie im französischen Vorbild werden Wasserstoff-, Elektro- sowie Hybridfahrzeuge von der Steuer ausgenommen. Daraus resultieren die folgenden Erhöhungen (in ct/kWh) durch den CO<sub>2</sub>-Satz innerhalb der Energiesteuer auf die Kraftstoffpreise im Zeitraum bis 2030.

Tabelle 40: CO<sub>2</sub>-Steuersatz innerhalb der Energiesteuer in ct/kWh für die Jahre 2021 bis 2030 nach CO<sub>2</sub>-Ausstoß pro Kraftstoff

	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
<b>Benzin</b>	1,90	2,16	2,42	2,68	2,94	3,20	3,46	3,72	3,98	4,24
<b>Diesel Euro VI</b>	2,02	2,30	2,58	2,86	3,13	3,41	3,69	3,97	4,25	4,52
<b>LPG</b>	1,72	1,96	2,19	2,43	2,66	2,90	3,14	3,37	3,61	3,85
<b>CNG</b>	1,52	1,73	1,94	2,15	2,36	2,57	2,78	2,99	3,20	3,40

Quelle: CEPiR-Modell, eigene Darstellung.

Diese CO<sub>2</sub>-Steuer bewirkt für die verschiedenen Kraftstoffe eine Preiserhöhung zwischen 10 % (Benzin) und 17 % (LPG) im Jahr 2021. Im Jahr 2030 liegt diese Erhöhung sogar zwischen 23 % (Benzin) und 39 % (LPG) gegenüber 2021. Diese Maßnahme bewirkt auch eine Nachfrageänderung im Ausland. Es besteht ein geringer Anreiz, die aktuelle Flotte auszutauschen, sodass angenommen wird, dass der Anreiz für die Schadstoffklassen III und IV bei 10 % liegt. Dies ist eine Annahme, die aufgrund von Vergleichen mit den anderen Maßnahmen getroffen wurde, wobei der Anreiz deutlich geringer ist als bei anderen Maßnahmen.

Nimmt man diese Kriterien als Grundlage, so kann das Modell mit den folgenden Hebeln bestimmt werden:

Tabelle 41: Hebel der Maßnahme 10

<b>1. Betroffene Region</b>	
<input checked="" type="checkbox"/> Gesamtdeutschland	<input type="checkbox"/> Regionen-spezifisch
<b>2. Betroffene Schadstoffklassen</b>	
<input checked="" type="checkbox"/> SKL 3	<input checked="" type="checkbox"/> SKL 4
<input type="checkbox"/> SKL 5	<input type="checkbox"/> SKL EEV
<input type="checkbox"/> SKL 6	<input type="checkbox"/> Sonstige
<b>3. Betroffene Größenklassen</b>	
<input type="checkbox"/> < 2,8 t	<input type="checkbox"/> 2,8 – 3,5 T.
<input checked="" type="checkbox"/> 3,5 – 7,5 T.	<input checked="" type="checkbox"/> 7,5 – 12 T.
<input checked="" type="checkbox"/> > 12 t	
<b>4. Antriebsarten - Neukauf</b>	
<input checked="" type="checkbox"/> Benzin	<input checked="" type="checkbox"/> Diesel
<input checked="" type="checkbox"/> LPG	<input checked="" type="checkbox"/> CNG
<input checked="" type="checkbox"/> Elektro	<input checked="" type="checkbox"/> Hybrid
<input checked="" type="checkbox"/> Sonstige	
<b>5. Neukaufquote (Verkauf zu Neukauf)</b>	
<input checked="" type="checkbox"/> 100 % (Standard)	<input type="checkbox"/> Andere Quote: <input type="text"/>
<b>6. Austauschzwang oder -anreiz?</b>	
<input type="checkbox"/> Zwang	<input checked="" type="checkbox"/> Anreizquote: <input type="text" value="0,1"/>
<b>7. Subventionen Fahrzeuge</b>	
regionaler Zusatz:	LPG <input type="text"/>
	CNG <input type="text"/>
	Elektro <input type="text"/>

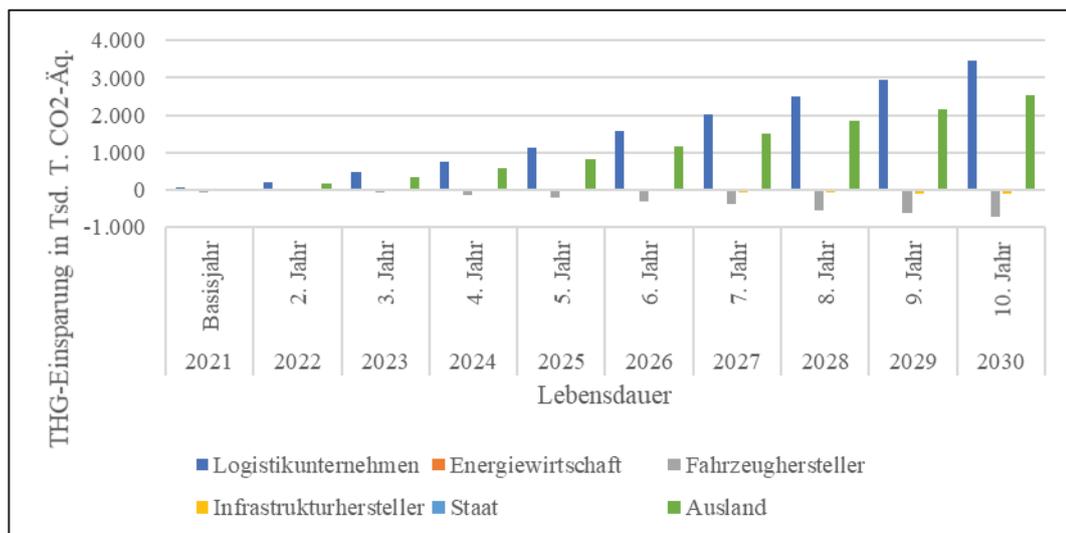
Hybrid	<input type="checkbox"/>
Sonstige	<input type="checkbox"/>
<b>8. Betroffene Verkehrsbereiche</b>	
<input checked="" type="checkbox"/> Nahverkehr	<input checked="" type="checkbox"/> Regionalverkehr (inkl. Bundesstraßen)
	<input checked="" type="checkbox"/> Fernverkehr (inkl. Autobahn)
<b>9. Zusatzberechnungen</b>	
<input type="checkbox"/> Mikrodepot und Lastenfahrräder	<input type="checkbox"/> Bonus-Malus-System
<input type="checkbox"/> Verteilzentren	<input type="checkbox"/> CO2-Maut
<input type="checkbox"/> Umweltspur innerorts	<input checked="" type="checkbox"/> CO2-Steuer
<input type="checkbox"/> Umweltspur außerorts	<input type="checkbox"/> City-Maut
<input type="checkbox"/> Umweltzone	<input type="checkbox"/> CO2-Ausweis
<b>10. Änderung der Nachfrage im Ausland</b>	
<input checked="" type="checkbox"/> Ja	<input type="checkbox"/> Nein

Quelle: eigene Darstellung.

### 6.11.2 Treibhausgaseffekte

Die Maßnahme 10 – CO<sub>2</sub>-Steuer weist Effektivität hinsichtlich der Einsparung von THG-Emissionen auf. Es können über die Lebensdauer rund 22,8 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äq. eingespart werden. Im Vergleich zu den Emissionseinsparungen bei Logistikunternehmen und Ausland sind die hinzukommenden Emissionen bei Fahrzeug- und Infrastrukturherstellern gering.

Abbildung 97: Treibhausgaseinsparungen aufgrund von Maßnahme 10 über die Lebensdauer

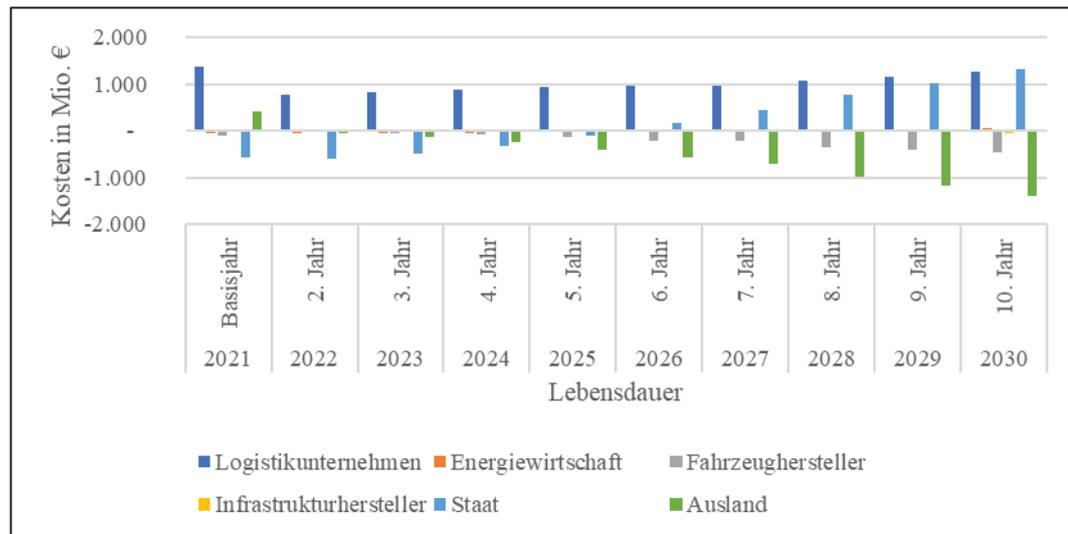


Quelle: CEPiR-Modell, eigene Darstellung.

### 6.11.3 Kosteneffekte

Diese Steuerzahlungen wurden mit den entsprechenden Bestandszahlen pro Kraftstoff sowie der Veränderung der Neuzulassungen aufgrund der geänderten zukünftigen Nachfrage berechnet. Insgesamt entstehen für die Akteure durch eine CO<sub>2</sub>-Steuer Kosten von 4,3 Mrd. Euro über die Lebensdauer.

Abbildung 98: Kosten aufgrund von Maßnahme 10 über die Lebensdauer



Quelle: CEPiR-Modell, eigene Darstellung.

Logistikunternehmen haben aufgrund der CO<sub>2</sub>-Steuer Kosten in Höhe von 10,2 Mrd. Euro zu erwarten, 9,3 Mrd. Euro davon sind auf die Steuerzahlungen zurückzuführen. Das Ausland hat im Basisjahr Kosten aufgrund des Fahrzeugtauschs zu verzeichnen, jedoch sind vor allem die sinkenden Betriebskosten ein Grund für eingesparte Kosten in den Folgejahren. Der Staat macht zunächst Gewinn, jedoch steigen ab dem 6. Jahr die Kosten jährlich an, bis auf 1,3 Mrd. Euro im Jahr 2030. Insgesamt hat der Staat Kosten in Höhe von 1,6 Mrd. €.

### 6.11.4 Fazit

Eine CO<sub>2</sub>-Steuer ist zwar effektiv, jedoch nicht effizient. Es werden Kosten in Höhe von 190 € pro eingesparter Tonne CO<sub>2</sub>-Äq. fällig. Im Basisjahr liegen die Kosten für eine eingesparte Tonne CO<sub>2</sub>-Äq. bei rund 21.110 €.

## 6.12 Maßnahme 11: Einführung einer City-Maut für München

### 6.12.1 Rahmenbedingungen

In der Maßnahme 11 wird die Einführung einer City-Maut für München kalkuliert. Dabei wird, wie beim Beispiel von London (siehe Kapitel 5.2.3), nicht die gesamte Innenstadt, sondern lediglich der Innenstadtkern mit einer Maut versehen. Es wird somit angenommen, dass die Mautgebühr dann fällig wird, wenn man den Bereich der aktuellen Umweltzone in München befährt. Dieser Betrag fällt einmal pro Tag an, auch wenn man mehrfach ein- und ausfährt. Eine solche Abgabe kann einerseits zur Verkehrsverminderung beitragen und andererseits die Nutzung von lokal emissionsfrei fahrenden Fahrzeugen unterstützen, indem man diese von der Maut befreit (UBA, 2019c).

In der folgenden Ausarbeitung wird die Maut lediglich für die Antriebstechnologien erhoben, für die auch die aktuelle Lkw-Maut gilt, also Diesel-, Benzin- und LPG-Fahrzeuge. Die City-Maut steigt jedes Jahr um 2 €, um den Anreiz zu verstärken, sein Fahrzeug frühzeitig zu tauschen. Als Ausgangsbasis werden, die vom ifo Institut veranschlagten 6 € angenommen (ifo Institut, 2020). Darüber hinaus konnte mittels City-Maut in den verschiedenen Beispielstädten auch der Wirtschaftsverkehr reduziert werden. Diese Reduktion lag zwischen 5 und 44 % und wird in dieser Ausarbeitung konservativ mit 10 % angenommen (ifo Institut, 2020). Darüber hinaus wurde in der Berechnung des ifo Instituts für München eine mögliche Fahrtzeiteinsparung von 7,5 % berechnet. Wird an dieser Stelle ebenfalls konservativ angenommen, dass die 7,5%-Fahrtzeiteinsparung nicht bei der sofortigen Umsetzung der Maßnahme, sondern erst als Konsequenz im Jahr 2030 gegenüber 2021 erreicht wird, so können ebenfalls die entsprechenden Kostenersparnisse auf Basis der Stauzeitreduktion berechnet werden.

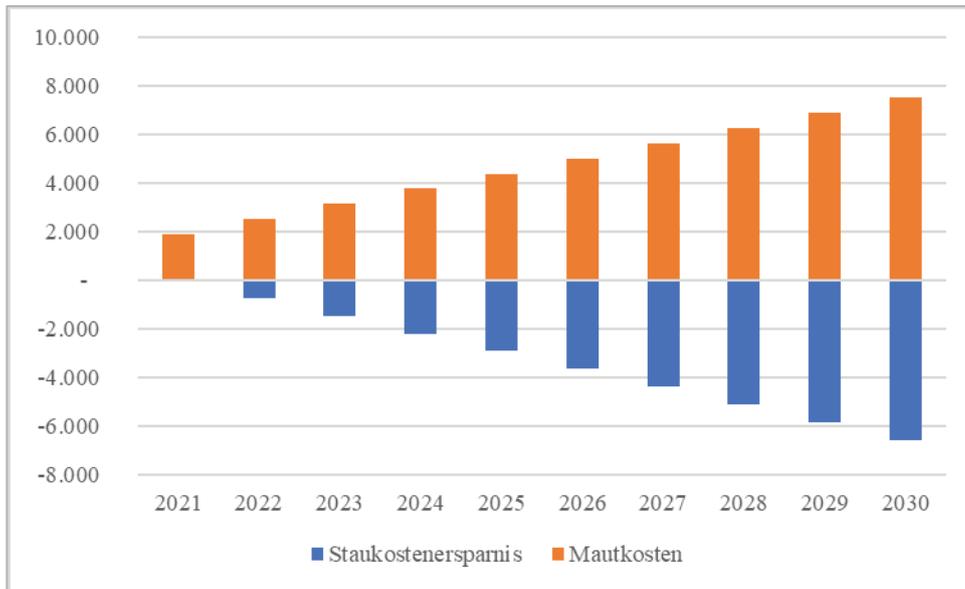
Tabelle 42: City-Maut-Gebühr pro Einfahrt in das Mautgebiet und prozentuale Fahrtzeitreduktion im Zeitverlauf

	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
<b>CO<sub>2</sub>-Maut</b> <i>in € pro Einfahrt in Mautgebiet</i>	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
<b>Fahrtzeitreduktion</b> <i>in %</i>	0,0	0,8	1,7	2,5	3,3	4,2	5,0	5,8	6,7	7,5

Quelle: eigene Annahme vgl. mit (ifo Institut, 2020)

Für ein Durchschnittsfahrzeug entstehen somit bei einmaliger Einfahrt in das Mautgebiet pro Werktag die folgenden jährlichen Mautkosten.

Abbildung 99: Mautkosten und Staukostensparnis in € pro Jahr für ein Durchschnittsfahrzeug



Quelle: eigene Darstellung.

Somit werden Fahrzeuge, die mit alternativen Antriebstechnologien ausgestattet sind, mit rund 46.929 (LNF) bzw. 20.649 (SNF) € über die Lebensdauer subventioniert.

Nimmt man diese Kriterien als Grundlage, so kann das Modell mit den folgenden Hebeln bestimmt werden:

Tabelle 43: Hebel der Maßnahme 11

<b>1. Betroffene Region</b>	
<input type="checkbox"/> Gesamtdeutschland	<input checked="" type="checkbox"/> Regionen-spezifisch <span style="margin-left: 20px;">München</span>
<b>2. Betroffene Schadstoffklassen</b>	
<input checked="" type="checkbox"/> SKL 3	<input checked="" type="checkbox"/> SKL 4 <input type="checkbox"/> SKL 5 <input type="checkbox"/> SKL EEV <input type="checkbox"/> SKL 6 <input type="checkbox"/> Sonstige
<b>3. Betroffene Größenklassen</b>	
<input checked="" type="checkbox"/> < 2,8 t	<input checked="" type="checkbox"/> 2,8 – 3,5 T. <input checked="" type="checkbox"/> 3,5 – 7,5 T. <input type="checkbox"/> 7,5 – 12 T. <input checked="" type="checkbox"/> > 12 t
<b>4. Antriebsarten - Neukauf</b>	
<input checked="" type="checkbox"/> Benzin	<input checked="" type="checkbox"/> Diesel <input checked="" type="checkbox"/> LPG <input checked="" type="checkbox"/> CNG <input checked="" type="checkbox"/> Elektro <input checked="" type="checkbox"/> Hybrid <input checked="" type="checkbox"/> Sonstige
<b>5. Neukaufquote (Verkauf zu Neukauf)</b>	
<input type="checkbox"/> 100 % (Standard)	<input checked="" type="checkbox"/> Andere Quote: <span style="margin-left: 20px;">0,9</span>
<b>6. Austauschzwang oder -anreiz?</b>	
<input type="checkbox"/> Zwang	<input checked="" type="checkbox"/> Anreizquote: <span style="margin-left: 20px;">1</span>
<b>7. Subventionen Fahrzeuge</b>	
regionaler Zusatz:	LPG <input type="text"/>
	CNG <input type="text"/>
	Elektro <input type="text"/>

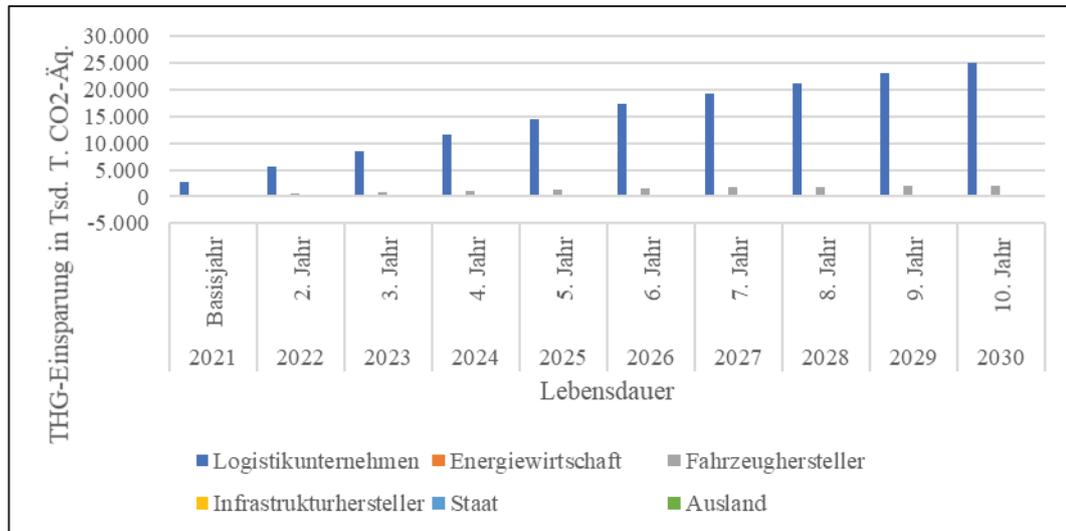
Hybrid	<input type="checkbox"/>
Sonstige	<input type="checkbox"/>
<b>8. Betroffene Verkehrsbereiche</b>	
<input checked="" type="checkbox"/> Nahverkehr	<input type="checkbox"/> Regionalverkehr (inkl. Bundesstraßen) <input type="checkbox"/> Fernverkehr (inkl. Autobahn)
<b>9. Zusatzberechnungen</b>	
<input type="checkbox"/> Mikrodepot und Lastenfahrräder	<input type="checkbox"/> Bonus-Malus-System
<input type="checkbox"/> Verteilzentren	<input type="checkbox"/> CO2-Maut
<input type="checkbox"/> Umweltspur innerorts	<input type="checkbox"/> CO2-Steuer
<input type="checkbox"/> Umweltspur außerorts	<input checked="" type="checkbox"/> City-Maut
<input type="checkbox"/> Umweltzone	<input type="checkbox"/> CO2-Ausweis
<b>10. Änderung der Nachfrage im Ausland</b>	
<input type="checkbox"/> Ja	<input checked="" type="checkbox"/> Nein

Quelle: eigene Darstellung.

### 6.12.2 Treibhausgaseffekte

Aufgrund der steigenden Nachfrage nach Infrastruktur bewirkt die Maßnahme 11 – City-Maut bei den Infrastrukturherstellern höhere Emissionen als der Status quo. Im Gegensatz zu den vorangegangenen Maßnahmen bewirkt jedoch die Maßnahme eine Reduktion bei der Produktion der Fahrzeughersteller. Dies ist auf die Verkauf-Neukauf-Quote von 90 % bzw. die Reduktion der Fahrzeuganzahl zurückzuführen. Es ist somit sehr deutlich zu erkennen, dass die Reduktion von Fahrzeugen in einer Stadt wesentlich höhere Einsparungen bewirken kann als der Austausch durch alternative Antriebstechnologien. Eine Kombination aus Fahrzeugreduktion und Wechsel der Antriebsart auf eine emissionsärmere Technologie ist in diesem Fall hocheffektiv. Es können insgesamt mit einer City-Maut in München mehr als 162 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äq. eingespart werden. Die höchsten Einsparungen können bei den Logistikunternehmen beobachtet werden, da kein Wechsel des Kraftstoffes die Emissionen so stark senken kann wie eine Reduktion der Fahrzeuganzahl und der Anzahl der Fahrten. Auch die Fahrzeughersteller sparen Emissionen gegenüber dem Referenzmodell ein, denn die Emissionseinsparung aufgrund nicht produzierter Fahrzeuge ist größer als der Emissionsanstieg aufgrund von höheren Herstellungsemissionen bei Lkw mit alternativem Antrieb.

Abbildung 100: Treibhausgaseinsparungen aufgrund von Maßnahme 11 über die Lebensdauer

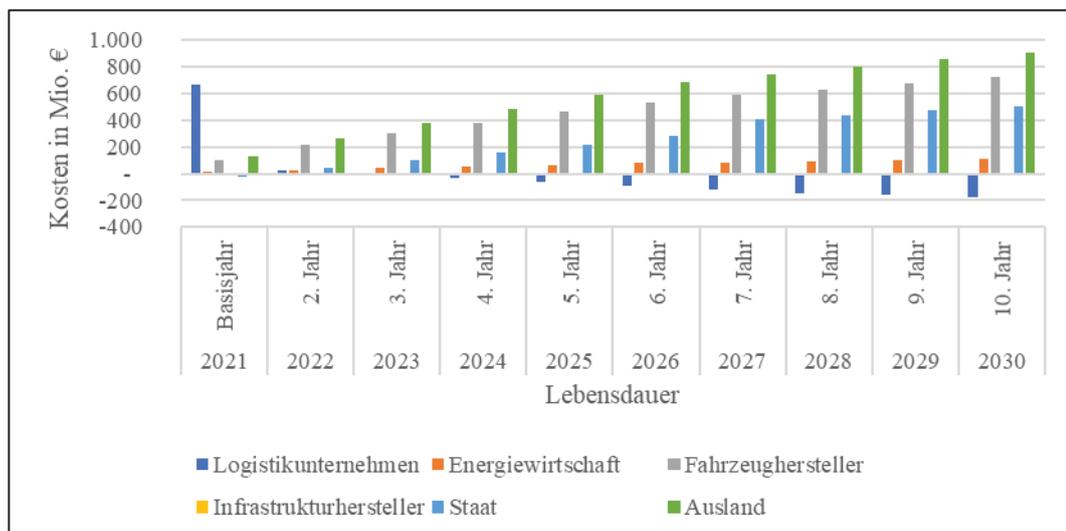


Quelle: CEP-IR-Modell, eigene Darstellung.

### 6.12.3 Kosteneffekte

Die Einsparungen über die Staukostenersparnis kompensieren einen Großteil der Mautkosten für Logistikunternehmen. Darüber hinaus werden die vermiedenen Ausgaben für Fahrzeuge an dieser Stelle als eingesparte Kosten aufgeführt, was letztendlich sogar zu einem Gesamtgewinn von 103 Mio. Euro bei dieser Maßnahme führt. Energiewirtschaft, Fahrzeughersteller, Ausland und Staat haben bei dieser Maßnahme Verluste aufgrund der geringeren Absatzmenge von Fahrzeugen sowie geringerer Betriebskosten. Insgesamt verursacht diese Maßnahme somit Kosten in Höhe von rund 13,6 Mrd. Euro.

Abbildung 101: Kosten aufgrund von Maßnahme 11 über die Lebensdauer



Quelle: CEP-IR-Modell, eigene Darstellung.

#### *6.12.4 Fazit*

Die City-Maut führt zwar zu höheren Kosten, jedoch sind diese hauptsächlich auf den geringeren Absatz von Fahrzeugen zurückzuführen, welcher ebenfalls zu den sehr hohen Emissionseinsparungen der Maßnahme führt. Somit ist die Effektivität der Maßnahme hinsichtlich der Einsparung von THG-Emissionen sehr wirkungsvoll, jedoch nicht effizient. Für ein eingespartes Kilogramm CO<sub>2</sub>-Äq. werden 0,08 € fällig.

### **6.13 Maßnahme 12: Ausweis der CO<sub>2</sub>-Belastung**

#### *6.13.1 Rahmenbedingungen*

Die Maßnahme 12 umfasst die Analyse eines verpflichtenden CO<sub>2</sub>-Reportings für Logistikunternehmen, welches Endnutzern transparent zur Verfügung gestellt wird. In Frankreich existiert seit dem 1. Oktober 2013 eine solche Verpflichtung, die von Transportdienstleistern für den Passagier- und Frachtverkehr eine Berechnung verlangt, die transparent aufschlüsselt, welche Lebenszyklusemissionen für diesen Transport notwendig waren. Ziel dieses Gesetzes ist, dass Endkunden die Leistungen auch nach den Umwelteinflüssen bewerten und entsprechend für eine Auswahl berücksichtigen können. Zwar deckt die französische Variante des Gesetzes die gesamten entstandenen WTW-Emissionen ab, beschränkt sich die Berechnung auf tatsächlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen und vernachlässigt wichtige CO<sub>2</sub>-Äq.e. Diese Initiative soll darüber hinaus zu effizienteren Abläufen führen, in denen Ineffizienzen, beispielsweise unnötige Leerfahrten oder Leerkilometer, aufgedeckt werden und durch alternative Methoden ersetzt werden können (ICCT, 2013). Beispielsweise lag der Anteil der Leerfahrten am gesamten Lkw-Verkehr im Jahr 2016 bei rund 58,5 % sowie der Anteil an Leerkilometern bei 23 % (Dörfelt, 2018). Somit ist an dieser Stelle durchaus noch Potential für einen geringeren Energieverbrauch aufgrund von Synergien vorhanden. Künstliche Intelligenz und IoT (Internet of Things) könnten an dieser Stelle wertvolle Weiterentwicklungen zur Optimierung darstellen. Darüber hinaus kann erwartet werden, dass diese Maßnahme Anreize für Leichtlaufreifen und Fahrerschulungen bietet. Der Einsatz von Leichtlaufreifen hat bei Lastkraftwagen eine größere Wirkung als bei Pkw, während die Fahrerschulungen bei Lkw-Fahrer\*innen nur geringe Effekte erzielen. Laut der Deutschen Energie-Agentur dena kann der Einsatz von Leichtlaufreifen genau wie der von Fahrerschulungen Energieeinsparungen bis zu 10 % bewirken (Dena, 2012). Die dena schätzt das Potential der Verschiebung des Modal Split aufgrund von Effizienzgründen auf rund 5 %, welche an dieser Stelle im CEP-IR-Modell ebenfalls angenommen werden. Im Straßengüterverkehr können laut dena darüber hinaus

weitere 5 % des Energieverbrauchs aufgrund von Effizienzsteigerungen eingespart werden (Dena, 2012). Werden weniger bzw. schnellere Fahrten durchgeführt, können bei gleichbleibenden Fahrleistungen im Jahr und konstanten Lebensdauern als Konsequenz weniger Fahrzeuge gekauft werden. Somit liegt die Verkauf-Neukauf-Quote bei dieser Maßnahme bei 90 %. In den Zusatzberechnungen für diese Maßnahme werden jedoch die Treibhausgase und Kosten, die auf die Verschiebung des Güterverkehrs von der Straße auf die Schiene zurückzuführen sind, berechnet.

Als ein großer Kunde für Transportdienstleistungen hat die Firma Mars im Jahr 2017 eine Frachtaussschreibung durchgeführt, um sowohl einen Preiswettbewerb als auch einen Wettbewerb um möglichst geringe Emissionen zu veranstalten. Das Unternehmen suchte strategisch nach solchen Dienstleistern, die die unternehmerischen Umweltziele mit geringen Lebenszyklusemissionen unterstützen können (Einsiedler, 2017). Es ist anzunehmen, dass aufgrund des steigenden Umweltbewusstseins die CO<sub>2</sub>-Bilanzen als wichtiges Wettbewerbskriterium für Endkunden herangezogen werden und zukünftig weitere Kunden, ähnlich wie die Firma Mars, die Dienstleister hinsichtlich ihrer Klimaschutzbemühungen bewerten werden (DSL, 2013). Das Unternehmen DHL bietet beispielsweise bereits seit 2011 ein Treibhausgas-Reporting für Lkw-Transporte an (Verkehrsrundschau, 2011a). Doch obwohl dieser und andere Services bereits seit Langem existieren, erfassen rund 45 % der Logistikunternehmen ihre CO<sub>2</sub>-Emissionen nicht oder nicht vollständig. Unternehmen mit bis zu 250 Mitarbeitern sollen laut Studie des Strategieberaters Appanion Labs und der Logistik-Initiative Hamburg sogar bei 64 % liegen. Gemäß der Studie seien die Logistikunternehmen zwar bereit, in Umweltbelange zu investieren, jedoch ist die Angst vor Wettbewerbsnachteilen aufgrund der CO<sub>2</sub>-Transparenz sehr hoch (Verkehrsrundschau, 2020). Es wird somit davon ausgegangen, dass es zu einer Nachfrageschiebung zugunsten emissionsärmerer Antriebskonzepte in der Zukunft kommt. Für den Bestand wird erwartet, dass es zu einem unwesentlichen Austausch kommt, der sich auf jegliche Diesel-Schadstoffklassen bezieht. Fahrzeuge der Schadstoffklasse Euro VI werden jedoch nicht ausgetauscht, da sich der Neukauf aufgrund der bisher geringen Fahrleistung wirtschaftlich nicht rechnen kann. Der Austausch wird bei 1 % als unwesentlich angenommen, da zu erwarten ist, dass die Logistikunternehmen bei dieser Maßnahme eher auf Effizienzsteigerungen durch Digitalisierung oder Prozessoptimierung anstelle des irregulären Austausches der Flotte setzen werden. Ähnlich wie bei der französischen Variante wird angenommen, dass das Gesetz für alle Transportdienstleister mit Start oder Ende in Deutschland gilt (ICCT, 2013). Somit gilt dieses Gesetz auch für die

Transportdienstleister im Ausland, was auch dort für eine Nachfrageverschiebung sorgen wird.

Für die Berechnung der Kosten für die Erstellung von CO<sub>2</sub>-Bilanzen wird mit einer Effizienzberatung kalkuliert. Dafür wird die Fördermenge einer Energieeffizienzberatung für Mittelständler in Höhe von 6000 € sowie der maximalen Förderhöhe von 80 % als Grundlage verwendet (BAFA, 2020). Es wird somit angenommen, dass ein Speditionsunternehmen für die Berechnung der CO<sub>2</sub>-Bilanz, welche mit der Durchführung eines Energie-Audits vergleichbar ist, durchschnittlich 7500 € zahlen muss. Da ein Unternehmen dieses Audit trotz des Besitzes mehrerer Lastkraftwagen nicht mehrfach durchführen muss, wird darüber hinaus die Anzahl der Speditionen in Deutschland in Höhe von 14 816 aus dem Jahr 2019 für die Berechnung der Zusatzkosten verwendet (Statista, 2021).

Für die Verlagerung des Modal Split von der Straße auf die Schiene wird aufgrund der Angabe über die Höhe der externen Kosten bezogen auf den Tonnenkilometer das Verhältnis von 2,18 festgestellt. Ein Lastwagen verursacht somit 2,18-mal so hohe externe Kosten wie der Transport über die Schiene. Dabei sei der größte Anteil der externen Kosten auf die Klimafolgen eines Lkw-Transports zurückzuführen, insbesondere die Herstellung und Verschrottung der Fahrzeuge sowie die Produktion der Kraftstoffe (Verkehrsrundschau, 2019a). Es werden somit für die 5%-Verschiebung um dieses Verhältnis reduzierte Treibhausgasemissionen und Kosten angenommen.

Nimmt man diese Kriterien als Grundlage, so kann das Modell mit den folgenden Hebeln bestimmt werden:

Tabelle 44: Hebel der Maßnahme 12

<b>1. Betroffene Region</b>	
<input checked="" type="checkbox"/> Gesamtdeutschland	<input type="checkbox"/> Regionen-spezifisch
<b>2. Betroffene Schadstoffklassen</b>	
<input checked="" type="checkbox"/> SKL 3	<input checked="" type="checkbox"/> SKL 4
<input checked="" type="checkbox"/> SKL 5	<input checked="" type="checkbox"/> SKL EEV
<input type="checkbox"/> SKL 6	<input type="checkbox"/> Sonstige
<b>3. Betroffene Größenklassen</b>	
<input checked="" type="checkbox"/> < 2,8 t	<input checked="" type="checkbox"/> 2,8 – 3,5 T.
<input checked="" type="checkbox"/> 3,5 – 7,5 T.	<input checked="" type="checkbox"/> 7,5 – 12 T.
<input checked="" type="checkbox"/> > 12 t	
<b>4. Antriebsarten - Neukauf</b>	
<input checked="" type="checkbox"/> Benzin	<input checked="" type="checkbox"/> Diesel
<input checked="" type="checkbox"/> LPG	<input checked="" type="checkbox"/> CNG
<input checked="" type="checkbox"/> Elektro	<input checked="" type="checkbox"/> Hybrid
<input checked="" type="checkbox"/> Sonstige	
<b>5. Neukaufquote (Verkauf zu Neukauf)</b>	
<input type="checkbox"/> 100 % (Standard)	<input checked="" type="checkbox"/> Andere Quote: 0,9

**6. Austauschzwang oder -anreiz?**  
 Zwang  Anreizquote: 0,01

**7. Subventionen Fahrzeuge**  
 regionaler Zusatz: LPG   
 CNG   
 Elektro   
 Hybrid   
 Sonstige

**8. Betroffene Verkehrsbereiche**  
 Nahverkehr  Regionalverkehr (inkl. Bundesstraßen)  Fernverkehr (inkl. Autobahn)

**9. Zusatzberechnungen**

<input type="checkbox"/> Mikrodepot und Lastenfahrräder	<input type="checkbox"/> Bonus-Malus-System
<input type="checkbox"/> Verteilzentren	<input type="checkbox"/> CO2-Maut
<input type="checkbox"/> Umweltspur innerorts	<input type="checkbox"/> CO2-Steuer
<input type="checkbox"/> Umweltspur außerorts	<input type="checkbox"/> City-Maut
<input type="checkbox"/> Umweltzone	<input checked="" type="checkbox"/> CO2-Ausweis

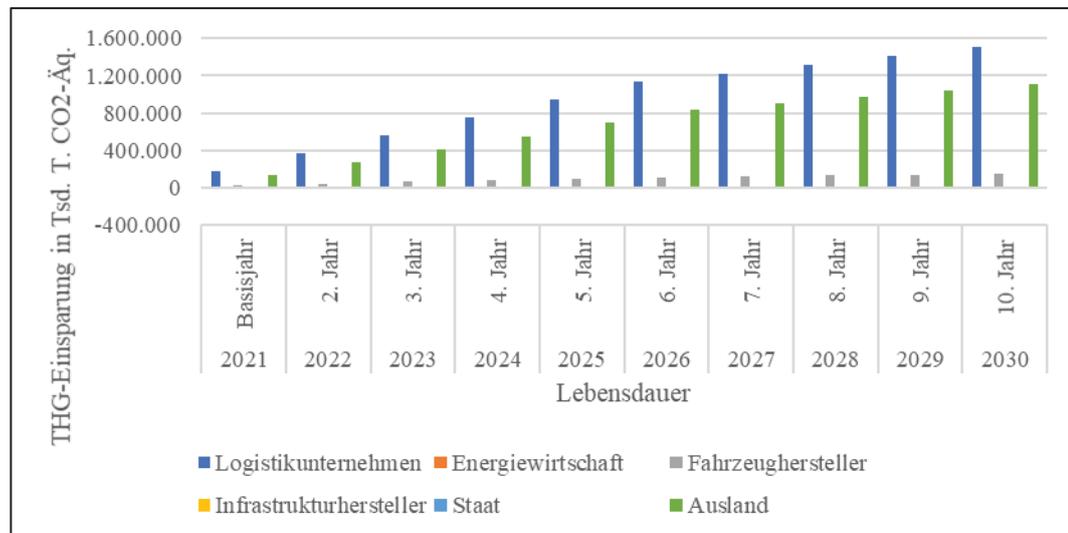
**10. Änderung der Nachfrage im Ausland**  
 Ja  Nein

Quelle: eigene Darstellung.

### 6.13.2 Treibhausgas effekte

Ähnlich wie bei Maßnahme 11 verursachen lediglich die Infrastrukturhersteller aufgrund der gestiegenen Nachfrage nach alternativen Kraftstoffen höhere Emissionen als im Referenzfall. Diese liegen bei rund 35 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äq. Insgesamt ist diese Maßnahme mit einer Einsparung von knapp 17,3 Mrd. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äq. über die Laufzeit als sehr effizient für die Reduktion von Treibhausgasen zu betrachten. Die hohen Einsparungen sind vor allem auf den geringeren Verkehr sowie auf die vermiedenen Fahrzeugherstellungsemissionen zurückzuführen.

Abbildung 102: Treibhausgaseinsparungen aufgrund von Maßnahme 12 über die Lebensdauer

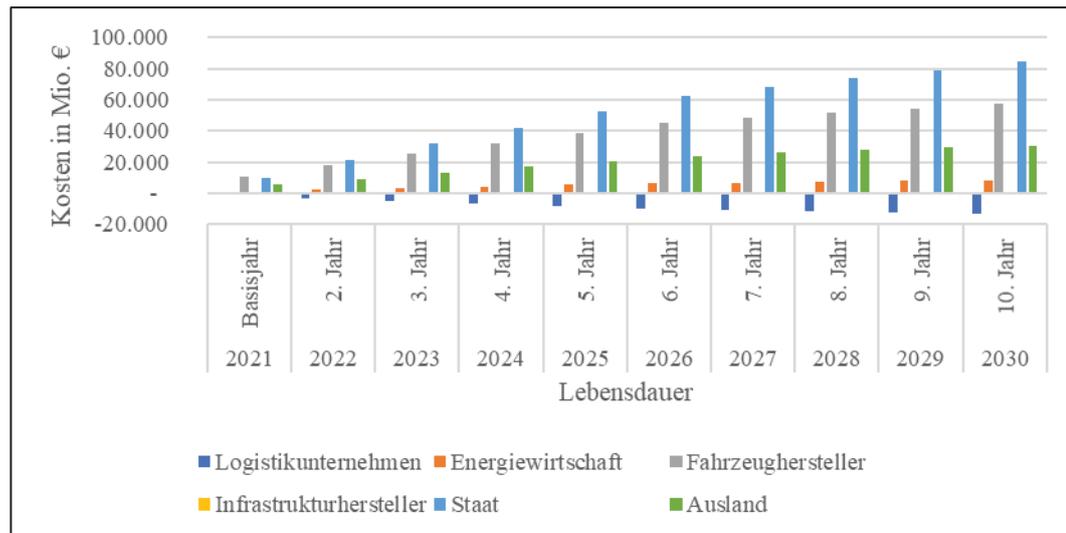


Quelle: CEP-IR-Modell, eigene Darstellung.

### 6.13.3 Kosteneffekte

Aufgrund der Verkauf-Neukauf-Quote von 90 % können die Logistikunternehmen aufgrund der Effizienzsteigerungen rund 83 Mrd. Euro einsparen. Die Verlagerung auf die Schiene sowie der Ausweis der CO<sub>2</sub>-Belastung kostet die Logistikunternehmen über die Laufzeit bis 2030 rund 12 Mrd. Euro. Die Energiewirtschaft hat mit rund 53 Mrd. Euro im Vergleich zum Ausland (203 Mrd. Euro), den Fahrzeugherstellern (381 Mrd. Euro) und dem Staat (526 Mrd. Euro) die geringsten Kosten zu verzeichnen. Diese Kosten der beteiligten Akteure sind auf die geringere Absatzmenge und die daraus resultierenden geringeren Einnahmen zurückzuführen. Die Infrastrukturhersteller profitieren mit rund 3,7 Mrd. Euro von der Maßnahme. Insgesamt resultieren aus dieser Maßnahme Kosten in Höhe von rund 1076 Mrd. Euro über die Lebensdauer.

Abbildung 103: Kosten aufgrund von Maßnahme 12 über die Lebensdauer



Quelle: CEPiR-Modell, eigene Darstellung.

#### 6.13.4 Fazit

Die Verpflichtung zum CO<sub>2</sub>-Ausweis ist sehr effizient zur Senkung der THG-Emissionen, und zwar aufgrund der Verlagerung auf die Schiene und des Zwangs zur Prozessoptimierung. Aufgrund der hohen Umsatzeinbrüche ist diese Maßnahme jedoch mit hohen Kosten verbunden und wird als nicht effizient eingestuft. Es werden 62 € zur Reduktion von einer Tonne CO<sub>2</sub>-Äq. fällig.

### 6.14 Übersicht über die Maßnahmenwirkungen

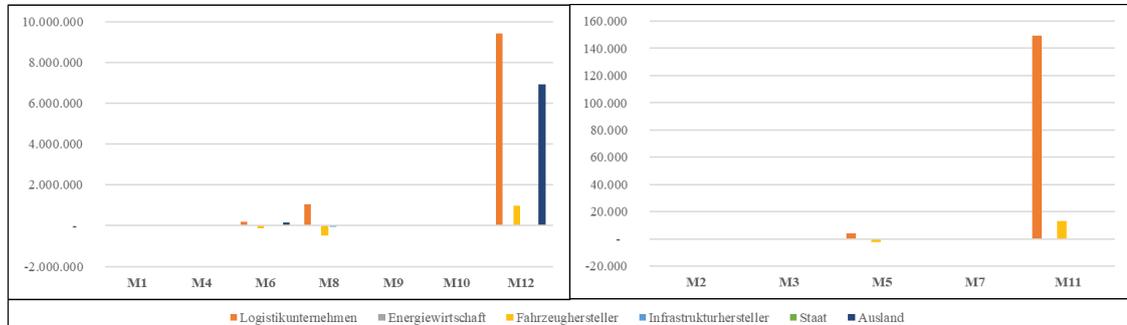
#### 2.14.1 Übersicht der THG-Wirkungen der Maßnahmen im Vergleich

Da die Maßnahmen unterschiedliche Wirkungsbereiche haben, werden jeweils die Maßnahmen mit einem gesamtdeutschen Wirkungsbereich und die Maßnahmen mit einem regionalen Wirkungsbereich miteinander verglichen.

Die höchsten Treibhausgasemissionen können im Standardmodell in der gesamtdeutschen Betrachtung mit den Maßnahmen 12 – CO<sub>2</sub>-Ausweis, 8 – Bonus-Malus-System und 6 – Umweltspur außerorts eingespart werden. Besonders Logistikunternehmen und das Ausland können hohe Emissionen einsparen, während Maßnahmen 1, 2, 3, 4 und 7 (Dieselverbote und Umweltzone) zusätzliche Emissionen bedeuten. Bei den regionenspezifischen Maßnahmen ist die Maßnahme 11 – City-Maut die mit der höchsten THG-Reduktion. Trotz des regionalen Wirkungsbereichs kann mit dieser Maßnahme mehr eingespart

werden, als mit den Maßnahmen 9 – CO<sub>2</sub>-Maut und 10 – CO<sub>2</sub>-Steuer, die auf Gesamtdeutschland wirken.

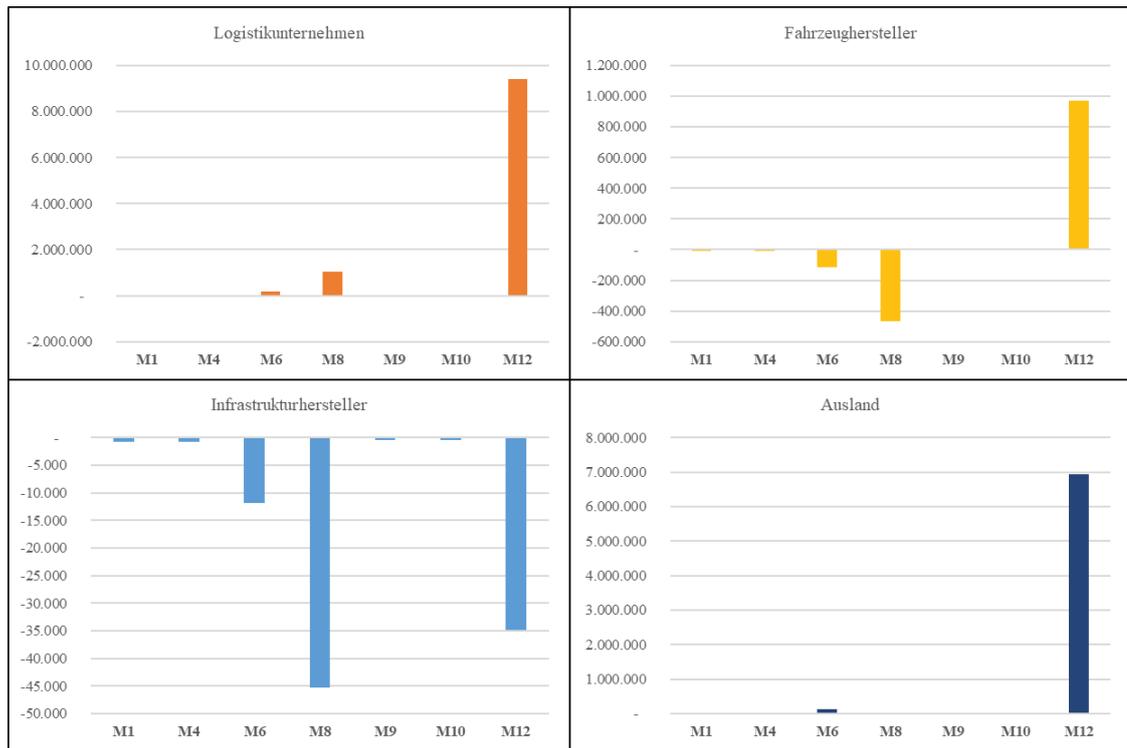
Abbildung 104: THG-Reduktion kumuliert von 2021 bis 2030 je Maßnahme in Tsd. t CO<sub>2</sub>-Äq.



Quelle: CEPIR-Modell, eigene Darstellung.

Die Treibhausgasemissionen je Akteur pro Maßnahme über die gesamte Lebensdauer von 10 Jahren wird in Abbildung 105 aufgezeigt. Im Falle der Logistikunternehmen können die Maßnahmen 6, 8 und 12 die größten Einsparungen erzielen. Bei den Fahrzeugherstellern führt die Maßnahme 12 zur größten Einsparung, die Maßnahmen 6 und 8 jedoch zu den höchsten Zunahmen an Emissionen. Dabei ist gut zu erkennen, dass, selbst wenn alternative Kraftstoffe im Betrieb keinerlei Emissionen aufweisen würden, trotzdem noch wesentlich mehr Treibhausgase in die Atmosphäre emittiert würden, als wenn die Fahrzeugflotte reduziert und die Fahrzeuge gar nicht erst produziert würden. Die Reduktion der Fahrzeuge im Verkehr ist somit in jedem Fall die umweltschonendere Variante. Auch bei den Infrastrukturherstellern sind die drei Maßnahmen diejenigen mit den höchsten Emissionsanstiegen. Dies ist auf die Nachfrageverschiebung zugunsten der alternativen Antriebe zurückzuführen. Da die Maßnahmen 9 und 10 sich lediglich auf die schweren Nutzfahrzeuge beziehen, die eine wesentlich flachere Nachfragekurve bei den alternativen Antriebstechnologien haben, wird an dieser Stelle auch weniger Infrastrukturausbau benötigt. Die Maßnahme 12 führt auch im Ausland zu besonders hohen Einsparungen, während die Maßnahme 6 dort zwar ebenfalls zu höheren Einsparungen führt, jedoch wesentlich weniger als Maßnahme 12. Auch an dieser Stelle wird der positive Effekt der geringeren Betriebsemissionen von den höheren Fertigungsemissionen gebremst, während damit eine Reduktion der Fahrzeuganzahl ohne THG-Nebenwirkungen einhergeht.

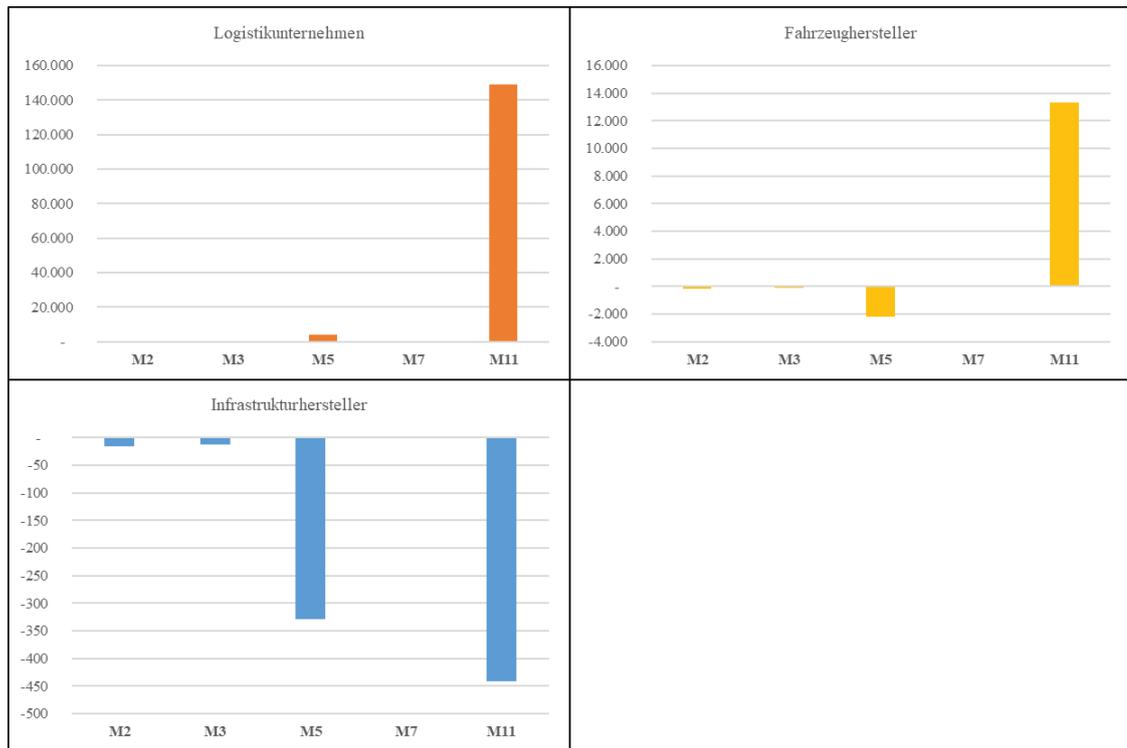
Abbildung 105: THG-Reduktion kumuliert von 2021 bis 2030 je Akteur in Tsd. t CO<sub>2</sub>-Äq.



Quelle: CEPIR-Modell, eigene Darstellung.

Bei den Maßnahmen, die sich nur auf eine Region beziehen, ist die THG-Reduktion mit Umsetzung der Maßnahme 11 am größten. Dort kann besonders bei Logistikunternehmen und Fahrzeugherstellern eine hohe Einsparung generiert werden. Im Falle der Infrastrukturhersteller wirken die Maßnahmen 5 und 11 mit einem ähnlich hohen Anstieg der THG-Emissionen. Auch an dieser Stelle ist die Wirkungsweise von einer Verlagerung auf andere Antriebstechnologien gegenüber einer Reduktion des Verkehrs deutlich zu erkennen. Obwohl ähnlich viel Infrastruktur für alternative Antriebe ausgebaut wird, sind die eingesparten Emissionen der Maßnahme 11 deutlich höher. Da die Maßnahmen 3, 5 und 11 sich ausschließlich mit der Stadt München beschäftigen, ist an dieser Stelle zu erkennen, dass die City-Maut die größtmögliche THG-Einsparung bedeuten würde, während die Umweltpur die effizienteste Maßnahme für München darstellt.

Abbildung 106: THG-Reduktion kumuliert von 2021 bis 2030 je Akteur in Tsd. t CO<sub>2</sub>-Äq.

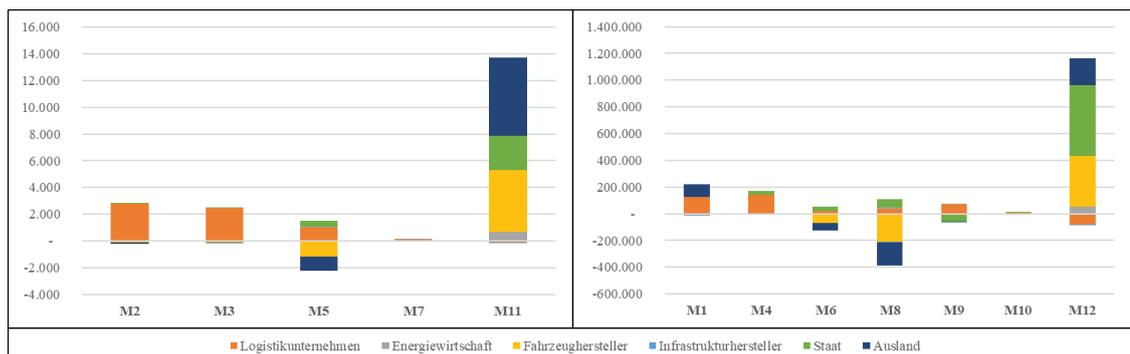


Quelle: CEPIR-Modell, eigene Darstellung.

#### 2.14.2 Übersicht über die Kostenwirkungen der Maßnahmen im Vergleich

Die Maßnahme 12 – Ausweis der CO<sub>2</sub>-Belastung liefert nicht nur die höchste THG-Einsparung sondern ebenfalls die höchsten Kosten. Während die Maßnahmen 5, 6 und 8 mit höheren Kosteneinsparungen als Kostenanstiegen eine positive Bilanz aufweisen, liegt die Maßnahme 12 bei Gesamtkosten über die Lebensdauer von rund 1077 Mrd. Euro. Die Maßnahmen 2, 3 und 7 bewegen sich auf einem sehr geringen Kostenniveau, nicht zuletzt weil sie lediglich einzelne Regionen betrachten. Unter den regionenspezifischen Maßnahmen ist die Maßnahme 11 bezüglich des Kostenniveaus besonders auffällig. Aufgrund der Reduktion der Fahrzeugflotte haben neben dem Staat auch die Fahrzeughersteller sowie das Ausland sehr hohe Kosten. Dies sind hauptsächlich die verlorenen Fahrzeugumsätze sowie Mehrwertsteuern der Fahrzeuge.

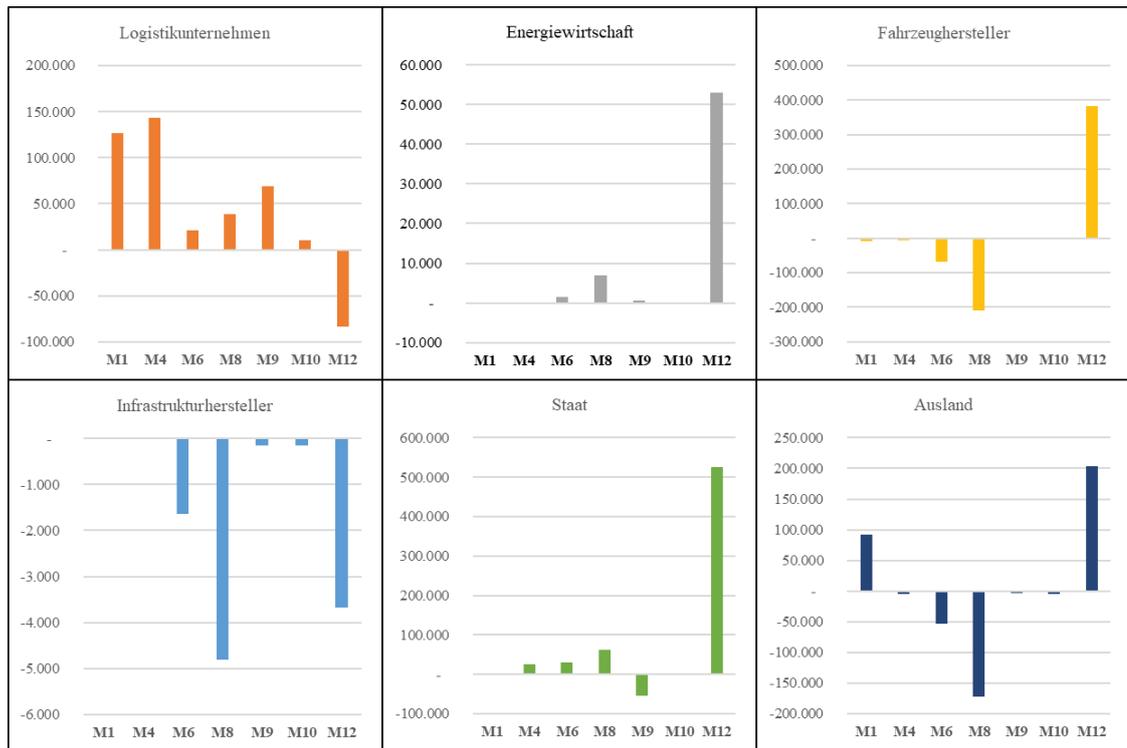
Abbildung 107: Kosten kumuliert von 2021 bis 2030 je Maßnahme in Mio. €



Quelle: CEPiR-Modell, eigene Darstellung.

Betrachtet man die kumulierten Kosten über die gesamte Lebensdauer pro Maßnahme je Akteur, so ist zu erkennen, dass die Logistikunternehmen besonders bei Maßnahmen 1 und 4 hohe Kosten haben. Dies ist auf den hohen Neukaufzwang sowie den Zwang zum Austausch der Bestandsfahrzeuge zurückzuführen, während die Energiewirtschaft besonders bei Maßnahme 12 zahlen muss. Dies sind eingesparte Energiekosten, die für einen Absatzeinbruch der Rohstoffe und Kraftstoffe sorgen. Die Fahrzeughersteller profitieren besonders von Maßnahmen 6 und 8, da dort die Nachfrage zugunsten der alternativen Antriebstechnologien, die für höhere Deckungsbeiträge sorgen, geändert wird. Hohe Kosten haben die Fahrzeughersteller durch einen Absatzrückgang von Fahrzeugen in Maßnahme 12. Die Infrastrukturhersteller profitieren von fast allen Maßnahmen, da ein Ausbau der alternativen Antriebe prinzipiell mit jeder der Maßnahmen erreicht wird und somit für jede Maßnahme auch ein Anstieg der Nachfrage nach Infrastruktur generiert wird. Jedoch wird mit den Maßnahmen, die auch eine Nachfrageverschiebung generieren, langfristig mehr Umsatz für die Infrastrukturhersteller erwirtschaftet. Auch der Staat hat die höchsten Einbußen aufgrund der Maßnahme 12. Dies ist mit den geringeren Steuereinnahmen von Kraftstoffen und Fahrzeugen sowie geringeren sonstigen Einnahmen, wie der Lkw-Maut, zu begründen. Somit ist klar zu erkennen, dass der Staat aus wirtschaftlicher Sicht einer geringeren Neukaufquote eher ablehnend gegenübersteht, auch wenn diese die vielversprechendste Maßnahme für die Reduktion von Treibhausgasemissionen wäre. Mit der Maßnahme 9 kann der Staat die höchsten Einnahmen generieren. Auch im Ausland entstehen durch die Maßnahme 12 die größten Kosten, gefolgt von Maßnahme 1, während ähnlich wie bei den deutschen Fahrzeugherstellern die größten Einnahmen durch die Maßnahmen 6 und 8 generiert werden.

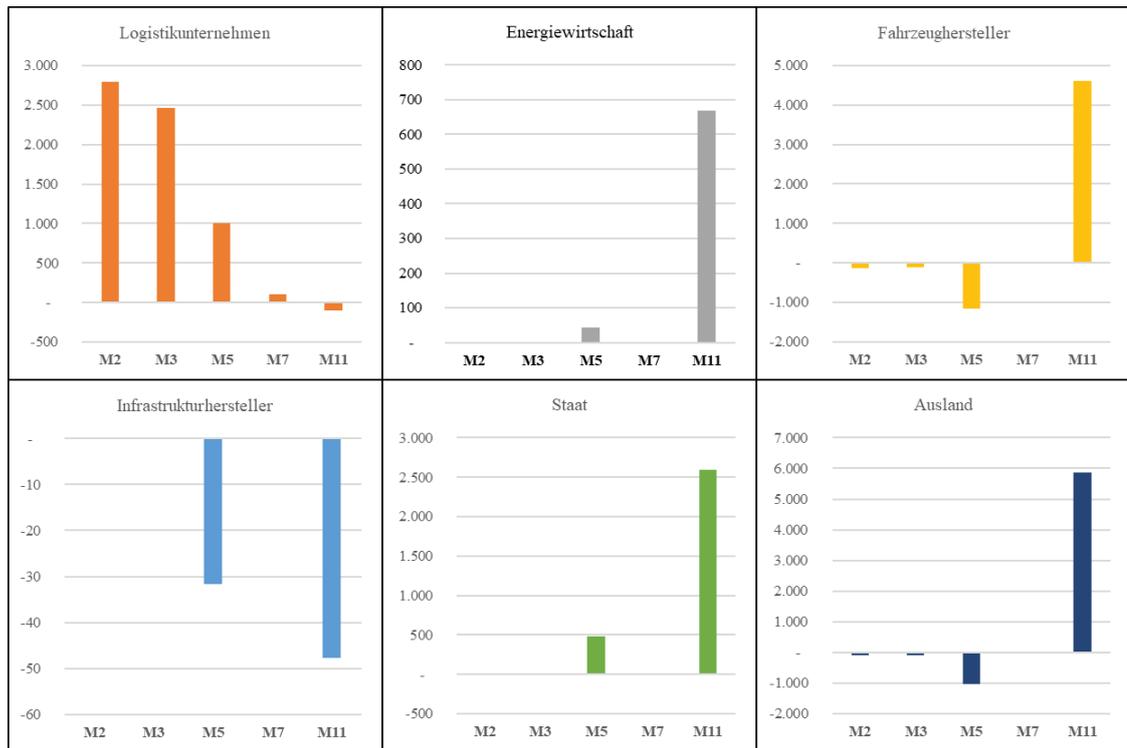
Abbildung 108: Kosten kumuliert von 2021 bis 2030 je Akteur in Mio. € – Gesamtdeutschland



Quelle: CEPiR-Modell, eigene Darstellung.

Hinsichtlich der Kosten bei Logistikunternehmen liegen die Maßnahmen 2 und 3 bei den regionenspezifischen Maßnahmen vorn. Für die Energiewirtschaft und den Staat ist die Maßnahme 11 die teuerste. Während sowohl die Fahrzeughersteller als auch das Ausland die höchsten Kosten durch die Maßnahme 11 haben, kann die Maßnahme 5 für diese Akteure sogar Einnahmen bedeuten. Bei den Infrastrukturherstellern führen sowohl Maßnahme 5 als auch Maßnahme 11 zu Einnahmen zwischen 45 und 51 Mio. Euro.

Abbildung 109: Kosten kumuliert von 2021 bis 2030 je Akteur in Mio. € – regionenspezifisch

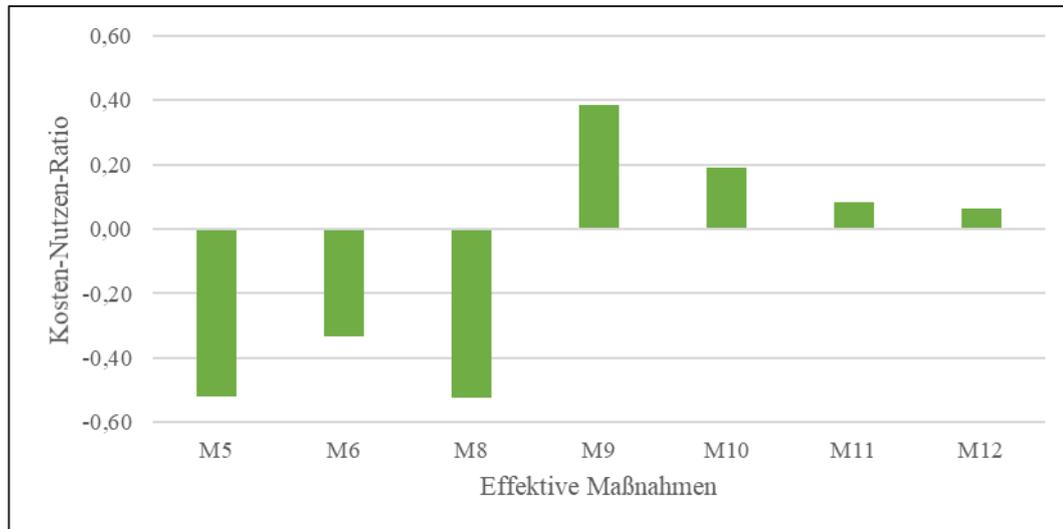


Quelle: CEPiR-Modell, eigene Darstellung.

#### 2.14.2 Übersicht über die Effizienz der Maßnahmen im Vergleich

In der folgenden Abbildung werden diejenigen Maßnahmen, die im Standardmodell als effektiv zur Reduktion von Treibhausgasemissionen eingestuft wurden, mit ihrem Kosten-Nutzen-Verhältnis aufgezeigt. Ein negativer Wert bedeutet, dass mit der Maßnahme sowohl Treibhausgasemissionen eingespart werden können, also die Maßnahme effektiv ist, als auch Kosten eingespart werden können, die Maßnahme demnach auch effizient ist. Die Maßnahmen 5 – Umweltspur innerorts und 8 – Bonus-Malus-System haben das effizienteste Kosten-Nutzen-Verhältnis. Es können dort mit jeder eingesparten Tonne CO<sub>2</sub>-Äq. rund 520 € Kosten eingespart werden. Es ist darüber hinaus zu erkennen, dass die Maßnahmen 9, 10, 11 und 12 zwar effektiv bei der Senkung von Treibhausgasemissionen, allerdings nicht effizient sind, während die Maßnahmen 5, 6 und 8 sowohl effektiv als auch effizient sind.

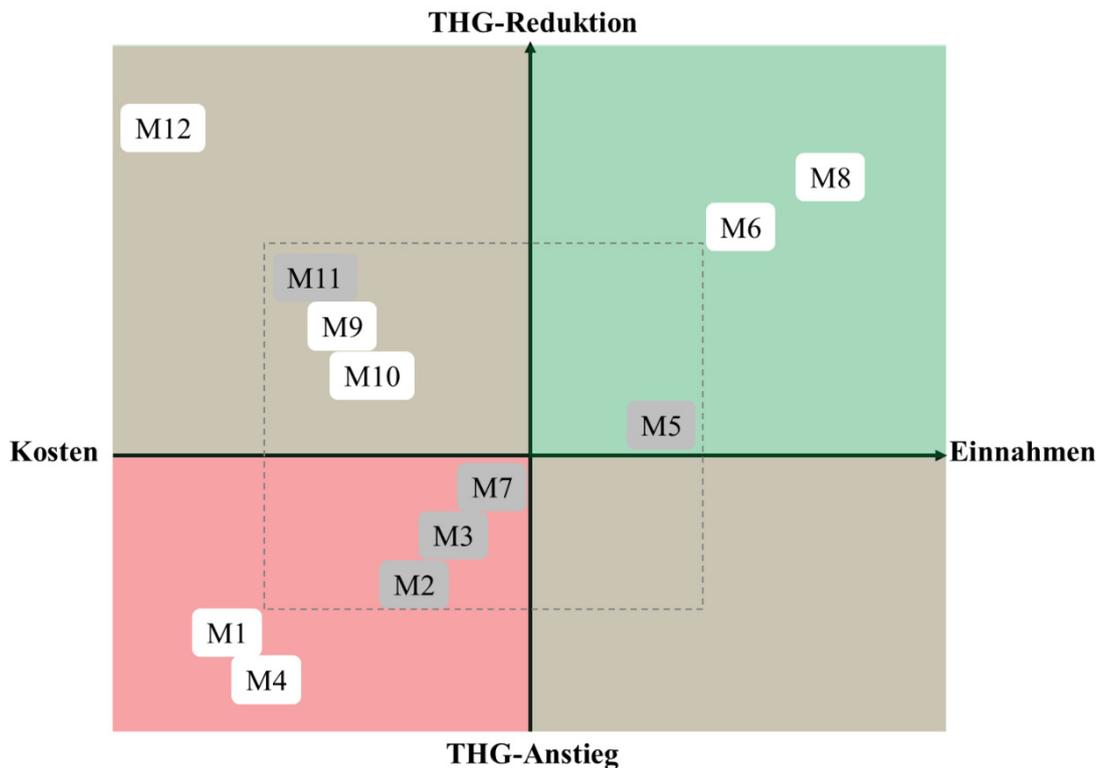
Abbildung 110: Effizienz der Maßnahmen über die Lebensdauer in Kosten in Tsd. € pro eingesparter t CO<sub>2</sub>-Äq.



Quelle: CEPiR-Modell, eigene Darstellung.

Die folgende Abbildung zeigt alle Maßnahmen in einer Drei-Felder-Matrix an, in der es die Kombinationen effektiv + effizient (grün), effektiv + nicht effizient (braun) sowie nicht effektiv + nicht effizient (rot) gibt. Die Kombination nicht effektiv + effizient existiert rein logisch nicht, da die Effektivität einer Maßnahme Voraussetzung für die Effizienz ist. Während die vorangegangene Abbildung aufzeigt, wie das Kosten-Nutzen-Verhältnis ist, werden hierbei die absoluten THG-Einsparungen sowie Kosten und Einnahmen aufgezeigt. Obwohl die Maßnahme 11 eine absolut höhere THG-Einsparung als die Maßnahme 5 aufweist, erkennt man, dass Letztere die einzige regionenspezifische Maßnahme ist, die effizient ist. Diese Maßnahme könnte bei einer Ausweitung auf weitere Städte demnach auch wesentlich höhere Einsparungen sowie Einnahmen bewirken. Betrachtet man die Maßnahmen 11 und 9, so ist zu erkennen, dass eine regionenspezifische Maßnahme wie eine City-Maut je nach Ausgestaltung eine höhere THG-Einsparung bewirken kann als beispielsweise eine CO<sub>2</sub>-Maut.

Abbildung 111: Drei-Felder-Matrix Maßnahmenvergleich hinsichtlich Effektivität und Effizienz



Quelle: CEPiR-Modell, eigene Darstellung.

Insgesamt würde bei der Umsetzung der effektivsten Maßnahme, also dem CO<sub>2</sub>-Ausweis, dennoch nur rund 4,9 % der Treibhausgasemissionen im Straßengüterverkehr eingespart. Bei der Maßnahme 8 wären es nur 0,15 % und bei Maßnahme 6 nur 0,06 %. Die Maßnahmen würden somit lediglich einen Bruchteil der hohen Treibhausgasemissionen einsparen können. Die Anforderung der deutschen Politik, dass die durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen von Lkw von 2019 bis 2030 um 30 % sinken sollen, ist somit allein mit diesen Maßnahmen kaum realistisch.

### 6.16 Sensitivitätsanalyse

Mittels einer Sensitivitätsanalyse kann überprüft werden, wie empfindlich die berechneten Ergebnisse hinsichtlich Veränderungen der Eingangsdaten sind. Dabei werden Annahmen des Standardmodells variiert und die Auswirkungen untersucht. Die Sensitivitätsanalyse erfolgt nach dem vergleichbaren Vorgehen des Umweltbundesamtes ((UBA, 2016b) vgl. mit (UBA, 2020g) und (UBA, 2019e)). In der folgenden Analyse wird dies

auf Basis der Einzelmaßnahmen geschehen und ebenso auf Basis genereller, für die Modellierung notwendiger Grundannahmen, wie der Lebensdauer von Fahrzeugen oder der Fahrleistung. Zunächst werden diese Grundannahmen variiert. Dieser Teil umfasst insgesamt sechs Analysen. Es findet eine Variation des Produktionsstandortes für Fahrzeuge und Infrastruktur, eine Variation der Kraftstoffe bzw. der Emissionsfaktoren, eine Veränderung der Lebensdauer von Fahrzeugen, eine Variation der Fahrleistung, eine Veränderung des Kalkulationszinsfußes sowie eine Variation der Herstellungsemissionen statt. Abschließend werden in einem zweiten Teil maßnahmenspezifische, individuelle Einflussgrößen variiert.

#### *6.16.1 Validierung von allgemeinen Annahmen*

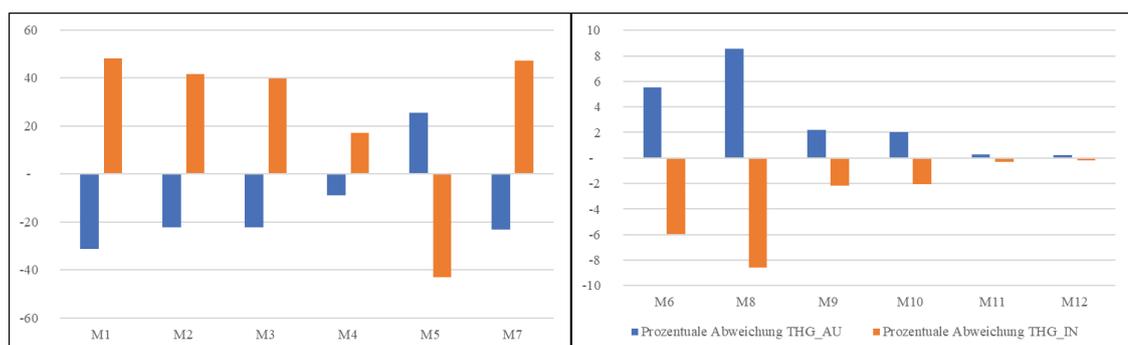
Es finden innerhalb dieser Analyse der Grundannahmen des Standardmodells sechs Analysen statt. Der Produktionsstandort ist insoweit entscheidend für die Analyse, als er Einnahmen für deutsche Hersteller bedeutet und somit einen großen Einfluss auf die Kosten der Maßnahme hat. Da lediglich die Emissionen innerhalb der deutschen Staatsgrenzen in die Analyse einfließen, werden je nach Produktionsstandort auch die Produktionsemissionen in die Berechnung einfließen oder unberücksichtigt gelassen. In einer anschließenden Analyse werden einzelne Kraftstoffe und ihre Emissionsfaktoren durch emissionsärmere Alternativen ausgetauscht. Es wird in einer ersten Teil-Analyse der Fall berechnet, dass anstatt Strom aus dem Strommix Strom aus regenerativen Energien verwendet wird. In einer zweiten Teil-Analyse wird kein Erdgas, sondern Biogas verwendet und in einer dritten Teil-Analyse wird synthetischer Diesel anstelle von originärem Dieselkraftstoff verwendet. Es wird somit jeweils ein Kraftstoff durch eine emissionsärmere Alternative ersetzt, die jedoch keiner baulichen oder technischen Veränderungen am Fahrzeug bedarf. Für diese emissionsärmere Variante wird jeweils der Durchschnitts-Emissionsfaktor, der aus den unterschiedlichen Herstellungsverfahren resultiert, verwendet. In einer vierten Teil-Analyse wird angenommen, dass alle drei Kraftstoffe durch die jeweils emissionsärmere Alternative ersetzt werden. In einer dritten Analyse wird die Fahrleistung der Fahrzeuge auf 150 % angehoben, also der Fall untersucht, dass die Fahrzeuge aufgrund längerer Strecken oder häufigerer Fahrten mehr Tank-to-Wheel-Emissionen ausstoßen. Daran anschließend wird in einer vierten Analyse die Lebensdauer der Fahrzeuge um ein Drittel verringert, sodass der Fall berechnet wird, dass die Fahrleistung pro Jahr ansteigt oder dass Fahrzeuge mit alternativen Antriebstechnologien oder Zusatztechnologien zur Abgasreduzierung eine geringere Lebensdauer haben. In einer fünften Analyse wird der

Kalkulationszinsfuß sowohl auf 3 % verdoppelt als auch auf 0 % verringert, um die Robustheit der Annahme zu prüfen. In einer sechsten Analyse werden die Herstellungsemissionen der Fahrzeuge variiert. Im Standardmodell kann beobachtet werden, dass diese einen großen Unterschied hinsichtlich der Effektivität einer Maßnahme machen können.

#### (1) Variation des Produktionsstandorts

In diesem Fall werden zwei Variationen berechnet. Zunächst der Fall (a), bei dem die gesamte Produktion im Ausland stattfindet, und im Anschluss der Fall (b), bei dem die gesamte Produktion im Inland stattfindet. Im Standardmodell liegt der Produktionsanteil für Fahrzeuge bei 56 % im Inland und 44 % im Ausland. Wird dieser Anteil auf 100 % im Ausland verschoben, ist zu erkennen, dass prozentual besonders bei den Maßnahmen 1 – Dieserverbot gesamt, 3 – Dieserverbot Stadtgebiet München, 5 – Umweltspur innerorts und 7 – Umweltzone Kiel Änderungen stattfinden. Die THG-Belastung geht beim generellen Dieserverbot (Maßnahme 1) um 31 % zurück, wenn im Ausland produziert wird, und nimmt um knapp 48 % zu, sofern die Produktion komplett in Deutschland stattfindet. Prinzipiell ist zu erwähnen, dass bei der Variation des Produktionsstandortes global gesehen keine weiteren Einsparungen bzw. THG-Anstiege stattfinden, sondern lediglich eine Umverteilung. Hierbei ist Kritik an der allgemeinen und geläufigen Berechnung der länderspezifischen Treibhausgasemissionen notwendig, denn es würde eine wesentlich transparentere Übersicht über die bewirkten globalen Treibhausgasemissionen ergeben, wenn diese dem Land der Nachfrage zugeordnet würden, anstatt dem Land, in dem die Produktion stattfindet. Bei den Maßnahmen mit einer Reduktion der Treibhausgasemissionen im Ergebnis steigert die Auslagerung der Produktionsemissionen die positive Wirkung und umgekehrt.

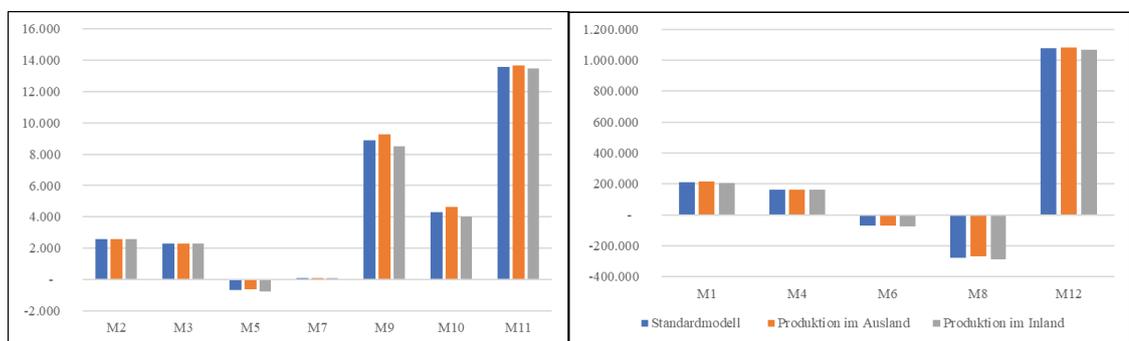
Abbildung 112: Prozentuale Veränderung der THG-Einsparung bei Variation des Produktionsstandortes



Quelle: CEPIR-Modell, eigene Darstellung.

Während die Auslagerung der Produktionsemissionen für die deutsche THG-Bilanz generell vorteilhaft ist, ist sie aus wirtschaftlicher Sicht weniger sinnvoll. Ein hoher Anteil der Kostenzunahmen ist auf geringere Umsatzeinnahmen von Fahrzeug- und Infrastrukturerstellern sowie den zugehörigen Mehrwertsteuereinnahmen für den Staat zurückzuführen. Relativ empfindlich auf diese Veränderung reagiert die Maßnahme 5, die Umweltspur innerorts. Bei einer Produktion im Inland können höhere Einnahmen durch deutsche Fahrzeughersteller generiert werden (+8 %). Währenddessen steigen die Kosten bei einer Produktion im Ausland um 8 % an.

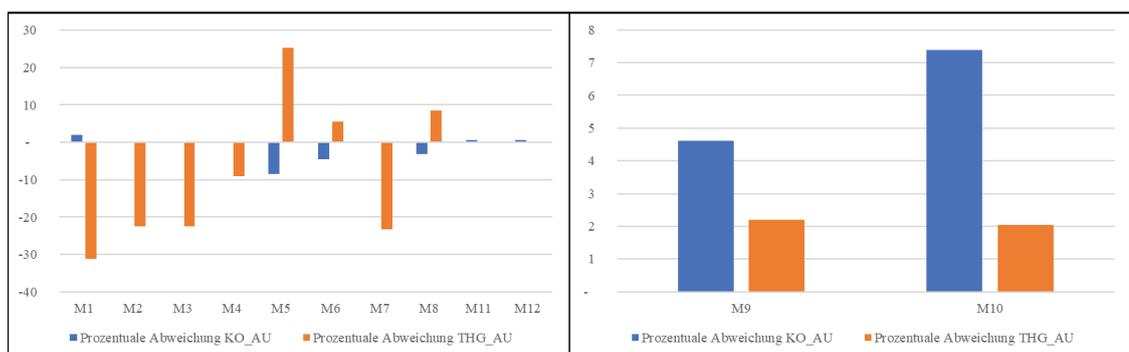
Abbildung 113: Absolute Veränderung der Kosten bei Variation des Produktionsstandortes (in Mio. €)



Quelle: CEPIR-Modell, eigene Darstellung.

Vergleicht man die prozentualen Abweichungen des Standardmodells mit der Variante Produktion im Ausland, so ist zu erkennen, dass diese bei der Maßnahme 5 – Umweltspur innerorts zu rund 25 % weniger Einnahmen führt, während die Veränderung bei der Reduktion der THG-Emissionen mit rund 8 % eher gering ausfällt. Besonders stark ist dieser Effekt bei der Maßnahme 1. Die Kosten verändern sich lediglich um +2 %, während die Treibhausgase um 31 % zurückgehen.

Abbildung 114: Vergleich prozentuale Abweichung THG-Reduktion mit Kosten für Produktion im Ausland



Quelle: CEPIR-Modell, eigene Darstellung.

Die Ausschläge bei der Produktion im Inland verlaufen ähnlich, jedoch in die jeweils andere Richtung.

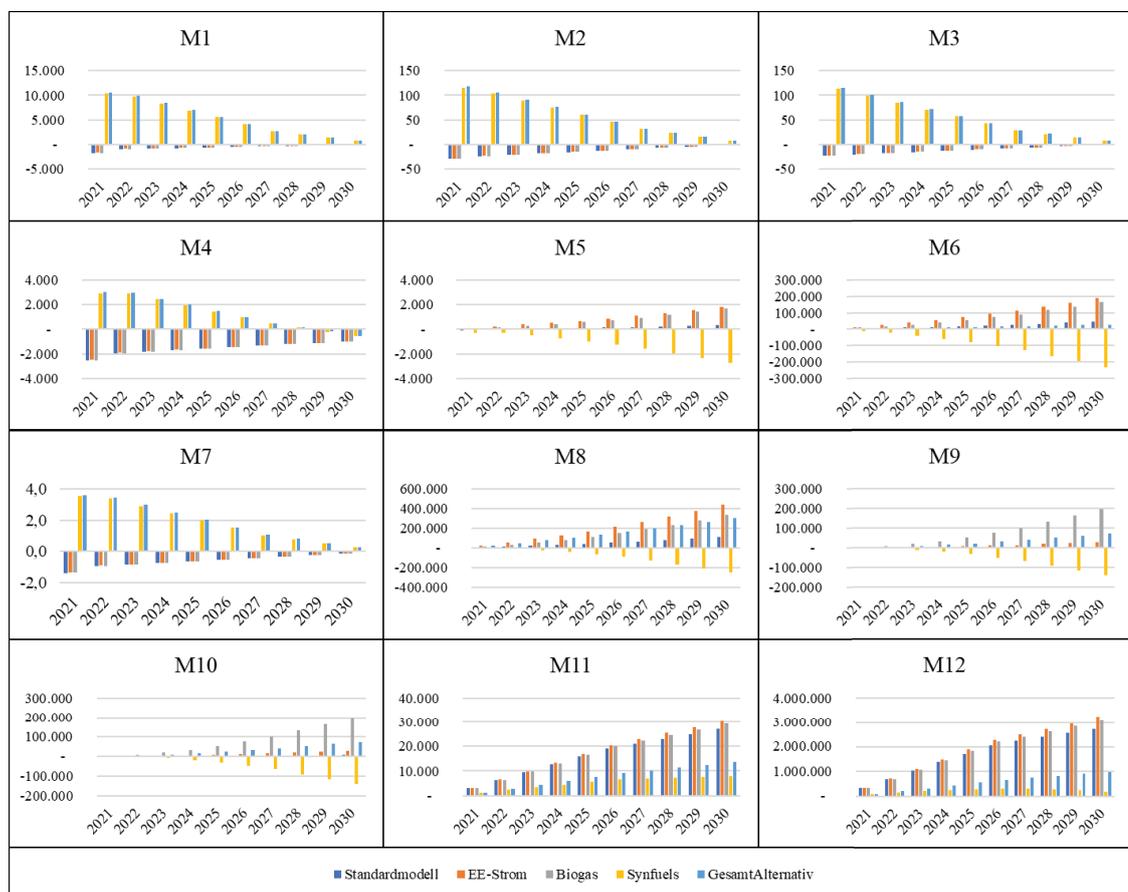
- (2) Austausch der aktuellen Kraftstoffe durch eine technisch kompatible, emissionsärmere Alternative.
  - a) Anstatt Strom aus dem Strommix wird ausschließlich Strom aus erneuerbaren Energien verwendet.
  - b) Anstatt Erdgas/CNG wird ausschließlich Biogas verwendet.
  - c) Anstatt Diesel wird in neuen Fahrzeugen (Euro VI) synthetischer Diesel verwendet.
  - d) Paralleler Austausch aller drei Kraftstoffe durch die emissionsärmere Alternative.

Bei dieser Sensitivitätsanalyse liegt der Fokus auf der Treibhausgaseinsparung. Im Standardmodell wird angenommen, dass der Strom für die Elektrofahrzeuge nicht aus erneuerbaren Energien gewonnen wird, wie es in den meisten Studien zum Klimaschutz der Fall ist. Realistisch ist dieses Szenario frühestens im Jahr 2035. Dafür sind ein sehr anspruchsvolles Vorgehen und eine hohe Motivation aller Beteiligten Voraussetzung (Bett et al., 2020). In früheren Studien wurde ein realistischer Zielhorizont von 2040 bis 2050 für ein Szenario mit 100 % erneuerbaren Energien angenommen (Henning & Palzer, 2012).

Es wird somit erwartet, dass die THG-Reduktion in diesem Szenario deutlich höher ist, insbesondere dort, wo es eine Nachfrageverschiebung in Richtung Elektro-Lkw gibt. Diese Erwartung besteht ebenfalls für das Szenario, in dem anstelle von Erdgas Biogas verwendet wird. Es wurde für dieses Szenario ein Durchschnitt aus den verschiedenen Emissionsfaktoren für Biogas je nach Herstellungsverfahren verwendet. Dieser durchschnittliche Emissionsfaktor liegt jedoch deutlich unter den Alternativen und ist somit der sauberste Kraftstoff, auch wenn nicht emissionsneutral. Auch hier ist das Ergebnis am sensibelsten, sofern eine Nachfrageverschiebung in Richtung Erdgas mit der Maßnahme bewirkt wird. Der Fall, dass Dieselmotoren durch eine emissionsarme, synthetische Variante ausgetauscht wird, bewirkt jedoch ein konträres Ergebnis. In diesem Fall würde jede Maßnahme, die im Standardmodell zu einer THG-Einsparung führt, nun zu einem THG-Anstieg führen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Maßnahmen generell die Alternativen Kraftstoffe unterstützen sollen, die in diesem Fall jedoch höhere Emissionen

verursachen würden, als weiterhin Dieselfahrzeuge mit synthetischem Diesel zu nutzen. Dies verdeutlicht die Relevanz einer sofortigen Strategie. Je nach Investitionsstrategie hinsichtlich alternativer Kraftstoffe können die politischen Instrumente sehr unterschiedliche Ergebnisse bewirken. Die Politik sollte demnach nur dann die Fahrzeughalter zu einem Austausch des Dieselfahrzeugs zwingen oder motivieren, wenn sicher ist, dass synthetischer Diesel (Syndiesel) in der Zukunft, aufgrund von zu niedrigen Produktionszahlen, keine Relevanz haben wird.

Abbildung 115: THG-Effekte der verschiedenen Sensitivitätsszenarien über die Lebensdauer pro Maßnahme im Vergleich (in Tsd. t CO<sub>2</sub>-Äq.).

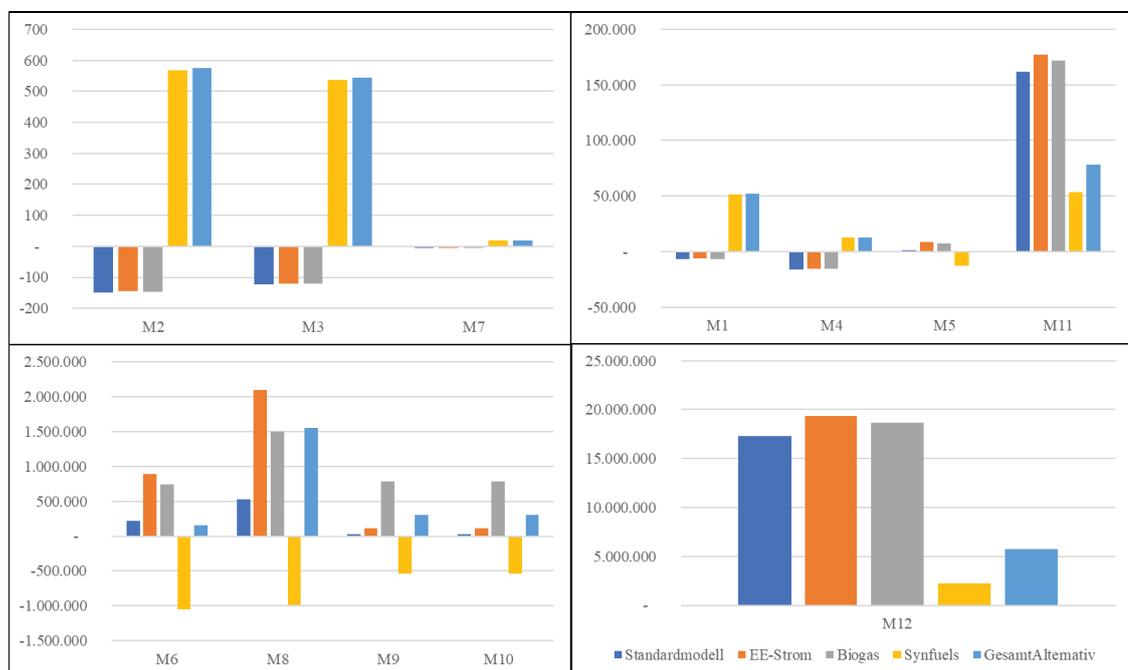


Quelle: CEP-IR-Modell, eigene Darstellung.

Die Abbildung 115 verdeutlicht die Brisanz der Festlegung auf eine Strategie. Während die Maßnahmen 11 – City-Maut und 12 – CO<sub>2</sub>-Ausweis eine generelle Reduktion der Fahrzeuge bewirken, was in jedem Fall zu einer THG-Reduktion führt, würde bei allen anderen Maßnahmen die Wirkung durch das Szenario „Synfuels“ im Vergleich zum Standardmodell umgekehrt. Wie erwartet verstärken die Szenarien „EE-Strom“ und „Biogas“

die THG-Reduktion (bei den Maßnahmen, die im Standardmodell eine Einsparung ergeben) bzw. schwächen den THG-Anstieg ab (bei den Maßnahmen, die im Standardmodell einen Anstieg ergeben). Während bei den meisten Maßnahmen das „EE-Strom“-Szenario etwas bessere Resultate erzielt als das „Biogas“-Szenario, sieht es bei den Maßnahmen 9 – CO<sub>2</sub>-Maut und 10 – CO<sub>2</sub>-Steuer anders aus. Dort erzielt das „Biogas“-Szenario deutlich bessere Werte. Dies liegt an der Konzentration der beiden Maßnahmen auf schwere Nutzfahrzeuge und der Präferenz von Gasantrieben. Das Szenario „GesamtAlternativ“ führt demgegenüber bei jeder Maßnahme zu einer positiven Einsparung. Bei den Maßnahmen ohne Nachfrageverschiebung und mit Zwang führt die emissionsarme Variante des Dieselmotors zu Einsparungen und bei den Maßnahmen mit Nachfrageverschiebung führen die emissionsarmen Varianten von Elektro- und Erdgaskraftstoff zum Erfolg. Die Höhe der Einsparung variiert jedoch stark. Die Einsparung ist beispielsweise oftmals deutlich geringer als in den anderen Szenarien, weil in diesem Szenario jegliche politische Maßnahme ineffizienter ist, da sie nicht auf die Kraftstoffstrategie ausgerichtet ist.

Abbildung 116: Vergleich der Szenarien hinsichtlich ihrer Gesamtreduktion über die Lebensdauer von 2021 bis 2030 je Maßnahme in Tsd. t CO<sub>2</sub>-Äq.

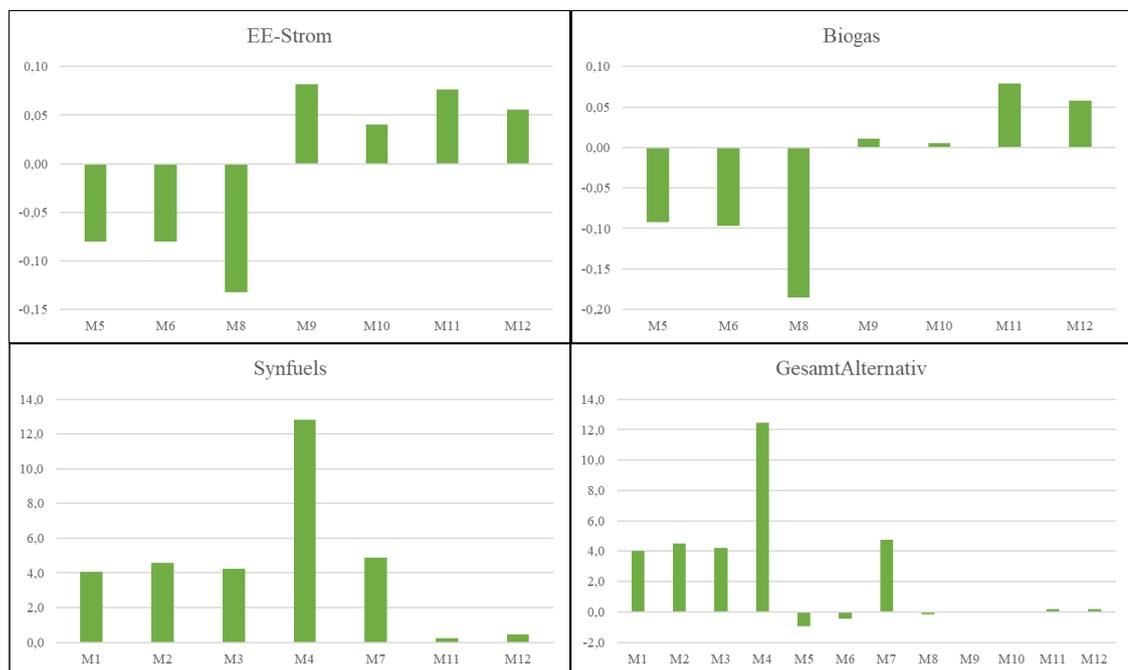


Quelle: CEPIR-Modell, eigene Darstellung.

Zwar ist es nicht sinnvoll, zuerst eine politische Maßnahme zu implementieren und danach die richtige Kraftstoffstrategie auszuwählen, jedoch ist der Abbildung 116 zu entnehmen, welche Kraftstoffstrategie bei welcher Maßnahme am zielführendsten gewesen

wäre. Die Maßnahmen 5, 6, 8, 11 und 12 sind besonders sinnvoll, wenn der Fokus auf Strom aus erneuerbaren Energien gelegt wird. Die Maßnahmen 1, 2, 3, 4 und 7, also Maßnahmen mit einem Dieserverbot bzw. der Umweltzone, bewirken die höchste Reduktion durch das Szenario „GesamtAlternativ“, dicht gefolgt vom Szenario „Synfuels“. Das Szenario „Biogas“ ist besonders wirkungsvoll, wenn die Maßnahme 9 oder 10, also eine CO<sub>2</sub>-Steuer oder eine CO<sub>2</sub>-Maut eingeführt wird.

Abbildung 117: Effizienzunterschiede in den unterschiedlichen Sensitivitätsszenarien (in Tsd. €/t CO<sub>2</sub>-Äq.)



Quelle: CEPiR-Modell, eigene Darstellung.

Auch die Effizienz der Maßnahmen variiert je nach Sensitivitätsszenario. In der Abbildung 117 werden je Szenario die Maßnahmen aufgeführt, die effektiv zur Reduktion der Treibhausgasemissionen beitragen. Im Szenario „EE-Strom“ sind die Maßnahmen 5 – Umweltspur innerorts, 6 – Umweltspur außerorts und 8 – Bonus-Malus-System effizient. Genau wie im Standardmodell weist Maßnahme 8 die höchste Kosten-Nutzen-Ratio auf. Dort können pro eingesparter Tonne CO<sub>2</sub> rund 130 € eingespart werden. Das Verhältnis liegt somit im Vergleich zum Standardmodell deutlich niedriger, wo mit dieser Maßnahme sogar rund 330 € an Kosten eingespart werden können. Das „Biogas“-Szenario liefert ähnliche Ergebnisse und Effizienzen wie das „EE-Strom“-Szenario. Im „Synfuels“-Szenario sind alle Maßnahmen ineffizient. Besonders ist die Maßnahme 4 – Dieserverbot ohne Autobahn hervorzuheben, die mit rund 13 Tsd. Euro je eingesparter

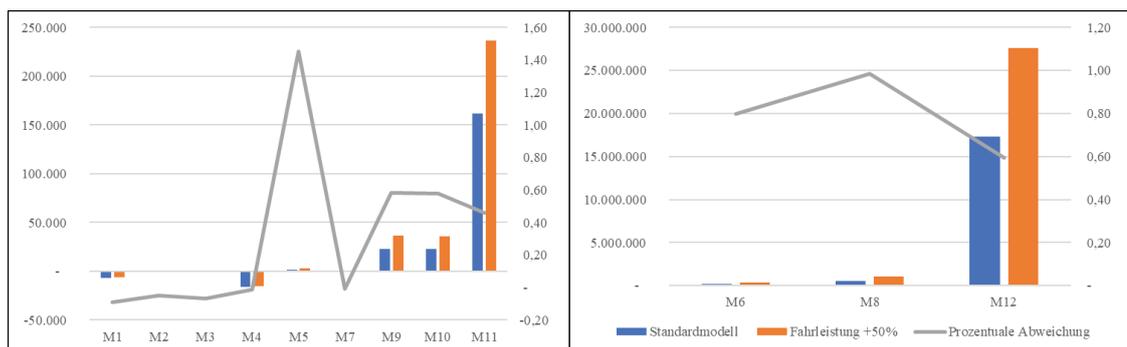
Tonne CO<sub>2</sub>-Äq. die teuerste der effektiven Maßnahmen ist. Das günstigste Kosten-Nutzen-Verhältnis in diesem Szenario hat die Maßnahme 11 – City-Maut mit 250 € je eingesparter Tonne CO<sub>2</sub>-Äq.

Wie bereits erwähnt, sind im Szenario „GesamtAlternativ“ alle Maßnahmen effektiv, jedoch sind auch bei diesem Szenario lediglich die Maßnahmen 5, 6 und 8 effizient. Dort liegt die Maßnahme 5 sogar bei Einnahmen von 960 € je eingesparter Tonne CO<sub>2</sub>-Äq.

### (3) Variation der Fahrleistung um +50 %:

Die Fahrleistung ist eine konstante Variable im Standardmodell, die lediglich als Durchschnittswert je für leichte und für schwere Nutzfahrzeuge angegeben wird. Daher wird die Sensitivität des Modells hinsichtlich der Fahrleistung gemessen, um zu erkennen, ob die Ergebnisse gegenüber einer Veränderung dieser beiden Variablen robust sind.

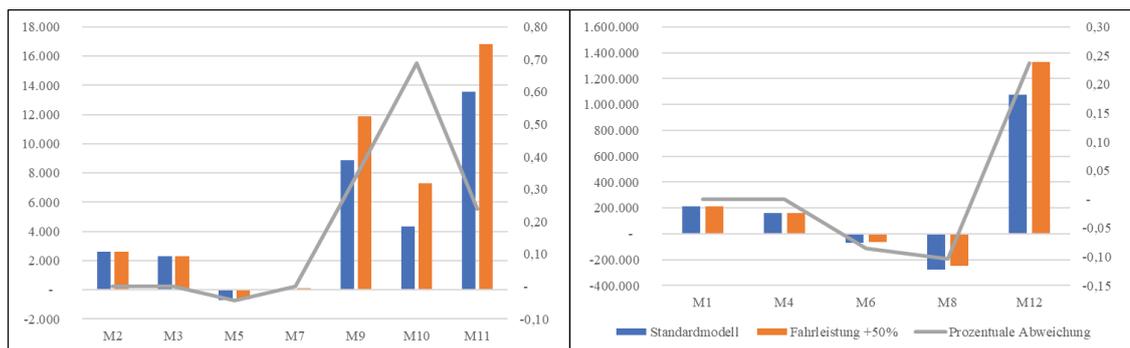
Abbildung 118: Veränderung der THG-Reduktion bei Variation der Fahrleistung (in Tsd. t CO<sub>2</sub>-Äq.)



Quelle: CEPIR-Modell, eigene Darstellung.

Betrachtet man die THG-Reduktion bei einer 50 % höheren Fahrleistung als im Standardmodell, so hat relativ gesehen die Maßnahme 5 – Umweltspur innerorts die höchste Sensibilität bezüglich der Veränderung aufzuweisen. Dort liegt die prozentuale Abweichung bei rund 145 % gegenüber dem Standardmodell. Auch die Maßnahmen 8 – Bonus-Malus-System und 6 – Umweltspur außerorts reagieren mit 99 % bzw. 80 % überproportional stark auf die Variation. Währenddessen schwanken die Maßnahmen mit Fahrverboten um 0 % und die anderen Maßnahmen bei rund 50 %, also bei einem prozentualen Zuwachs, der proportional mit dem Zuwachs der Fahrleistung übereinstimmt. Daraus lässt sich schließen, dass die Fahrleistung bei den Maßnahmen des Dieselvebotes und der Umweltzone von eher geringer Bedeutung ist, während die Maßnahme 5 einen dreimal so hohen Effekt erzielt.

Abbildung 119: Veränderung der Kosten bei Variation der Fahrleistung (in Mio. €)



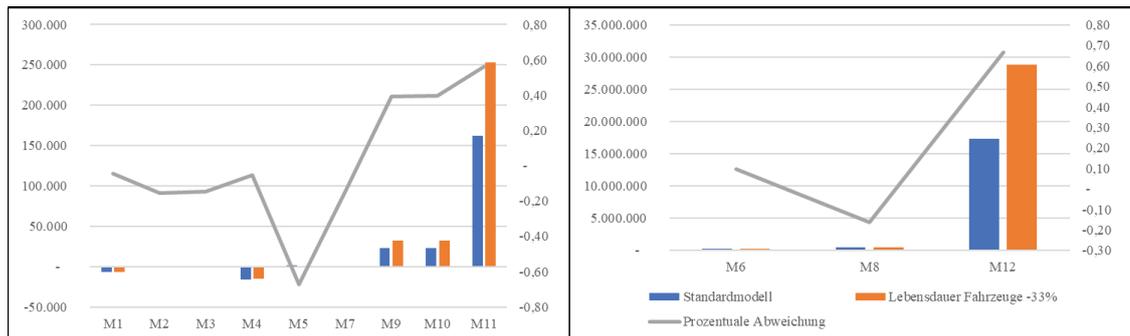
Quelle: CEP-IR-Modell, eigene Darstellung.

Betrachtet man die Kosten bei einer 50 % höheren Fahrleistung als im Standardmodell, so hat relativ gesehen die Maßnahme 10 – CO<sub>2</sub>-Steuer die höchste Sensibilität bezüglich der Veränderung aufzuweisen. Dort liegt die prozentuale Abweichung bei rund +69 % gegenüber dem Standardmodell. Auch die Maßnahme 9 – CO<sub>2</sub>-Maut ist mit einer prozentualen Abweichung von +34 % sehr sensibel bezüglich einer Änderung dieser Variablen. Währenddessen liegen die Maßnahmen 1 bis 8 bei 0 bis 10 % und die übrigen Maßnahmen (11 und 12) bei 24 %. Interessant ist an dieser Stelle, dass bei der Maßnahme 8, dem Bonus-Malus-System, der Steigerung der Einsparung von +99 % eine Änderung der Einnahmen von nur -10 % gegenübersteht.

#### (4) Variation der Lebensdauer um -33 %:

Die Lebensdauer von Fahrzeugen ist eine konstante Variable im Standardmodell, die ebenfalls lediglich als Durchschnittswert je für leichte und für schwere Nutzfahrzeuge angegeben wird. Daher wird die Sensitivität des Modells hinsichtlich der Lebensdauer gemessen, um zu erkennen, ob die Ergebnisse robust gegenüber einer Veränderung dieser Variablen sind. Dafür wird angenommen, dass die Lebensdauer nur zwei Drittel der bisher angenommenen Lebensdauer beträgt.

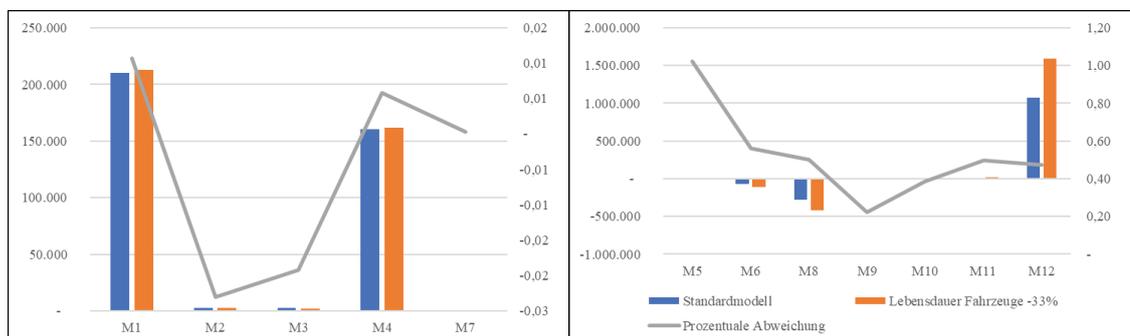
Abbildung 120: Veränderung der THG-Reduktion bei Variation der Lebensdauer (in Tsd. t CO<sub>2</sub>-Äq.)



Quelle: CEP-IR-Modell, eigene Darstellung.

Bei den Maßnahmen ohne Nachfrageverschiebung sorgt diese Variation für eine Abweichung von 0 bis 15 % hinsichtlich der THG-Emissionen. Da die Lebensdauer eine starke Verschiebung des Modells in Richtung der zukünftigen Nachfrage bedeutet, ist es einleuchtend, dass dort auch die größten Änderungen zu spüren sind. Vor allem die Maßnahme 5 – Umweltpur innerorts mit einer Abweichung von -67 %, die Maßnahme 11 – City-Maut mit einer Abweichung von +56 %, die Maßnahme 12 – CO<sub>2</sub>-Ausweis (+67 %) sowie die Maßnahmen 9 – CO<sub>2</sub>-Maut (+39 %) und 10 – CO<sub>2</sub>-Steuer (+40 %) reagieren sehr sensibel auf die Veränderung. Dort ist die Abweichung prozentual größer als die relative Veränderung der Lebensdauer. Die Maßnahmen 6 – Umweltpur außerorts und 8 – Bonus-Malus-System reagieren weniger empfindlich auf die Variation der Lebensdauer.

Abbildung 121: Veränderung der Kosten bei Variation der Lebensdauer (in Mio. €)



Quelle: CEP-IR-Modell, eigene Darstellung.

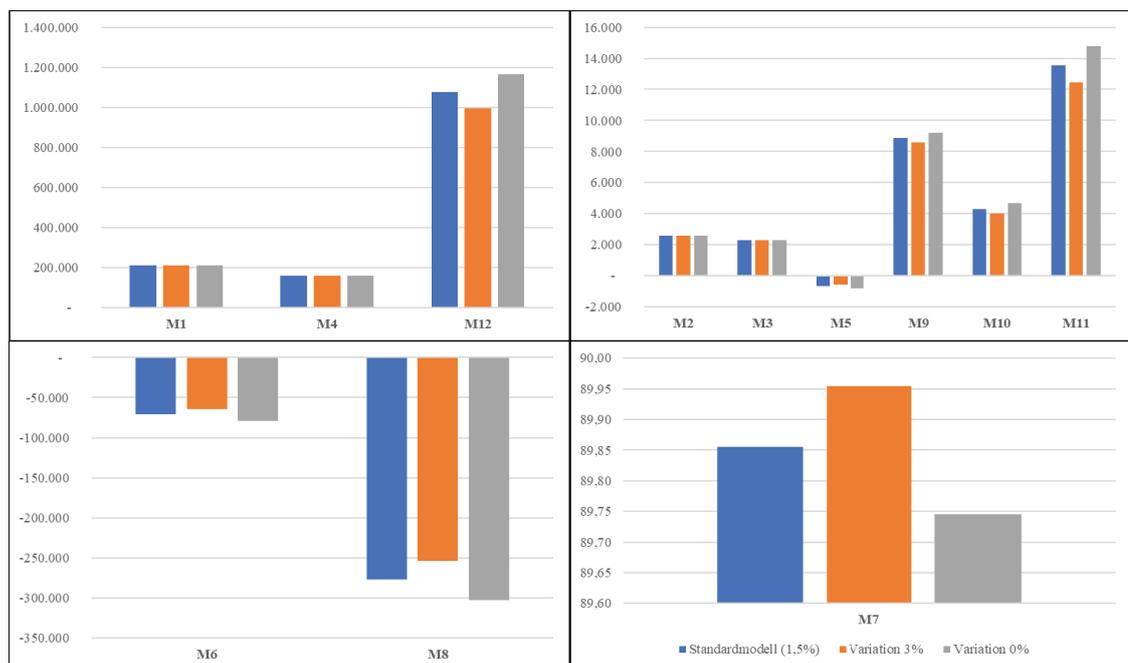
Auch bei den Kosten ist zu erkennen, dass eine Variation der Lebensdauer keine nennenswerte Veränderung bei den Maßnahmen ohne Nachfrageverschiebung bewirkt. Bei den

Maßnahmen mit einer Nachfrageverschiebung resultieren dagegen deutliche Veränderungen. Die insgesamt größte Reaktion ist bei der Maßnahme 5 – Umweltspur innerorts zu erkennen. Dort sorgt die Variation für eine Zunahme der Kosteneinsparung um 102 %. Auch die Maßnahmen 6, 8, 11 und 12 reagieren mit einer prozentualen Veränderung von rund 50 % gegenüber dem Standardmodell.

#### (5) Variation des Kalkulationszinsfußes

An dieser Stelle wird der Kalkulationszins innerhalb der Annuitätenmethode variiert. Im Gegensatz zum Basisfall wird dieser sowohl von 1,5 % auf 3 % angehoben als auch auf 0 % gesenkt. Grund dafür ist, dass ohne Betrachtung der Lebensdauer oder des aktuellen Zinsniveaus vom Umweltbundesamt ein Diskontierungsfaktor von 3 % empfohlen wird (UBA, 2012). Dies soll die Robustheit der Ergebnisse des Standardmodells untersuchen.

Abbildung 122: Veränderung der Kosten bei Variation des Diskontierungsfaktors (in Mio. €)



Quelle: CEP-IR-Modell, eigene Darstellung.

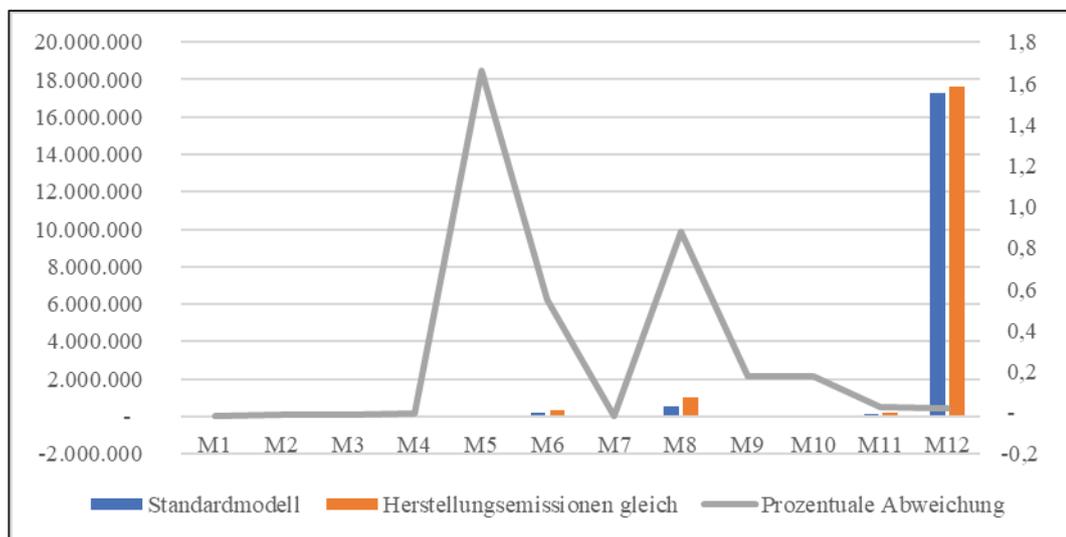
Die Maßnahmen 1 bis 4 (Dieselverbote) weisen keine sichtbare Reaktion auf die Veränderung des Diskontfaktors auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Großteil der Kosten dieser Maßnahmen im Basisjahr anfällt und nicht diskontiert wird. Ähnliches ist der Fall bei Maßnahme 7 – Umweltzone. Dort liegt die Abweichung bei +0,1 % (Diskontfak-

tor 3 %) und  $-0,1$  % (Diskontfaktor 0 %). Die Maßnahme 5 – Umweltpur innerorts reagiert mit  $-17,6$  % (Diskontfaktor 3 %) und  $+19,9$  % (Diskontfaktor 0 %) am sensibelsten auf die Variation. Die übrigen Maßnahmen reagieren mit prozentualen Abweichungen von knapp 0 % bis rund 11 %. Die Variation des Kalkulationszinsfußes hat keinen Einfluss auf die Effizienz der Maßnahmen im Vergleich zum Standardmodell.

#### (6) Variation der Herstellungsemissionen

Die Herstellungsemissionen im Fahrzeugbau sind starken Schwankungen ausgesetzt. Während fossile Antriebstechnologien bereits sehr weit entwickelt sind, kann davon ausgegangen werden, dass die Herstellungsemissionen bei Elektro- und Hybridfahrzeugen in Zukunft noch stark gesenkt werden können. Daher wurde mit dieser Sensitivitätsanalyse geprüft, wie stark die Ergebnisse von den Herstellungsemissionen abhängig sind. Es wurde somit beispielhaft der Fall berechnet, bei dem die Herstellungsemissionen für Elektro-, Hybrid- und Wasserstoff-Lkw denen eines Diesel-Lkw entsprechen, sodass hier keinerlei Vorteil für die fossilen Kraftstoffe mehr existiert.

Abbildung 123: Veränderung der THG-Einsparung bei Variation der Herstellungsemissionen (in Tsd. t CO<sub>2</sub>-Äq.)



Quelle: CEPiR-Modell, eigene Darstellung.

Die Maßnahme 5 – Umweltpur innerorts reagiert mit einer Abweichung von  $+166$  % am stärksten auf die Variation. Auch die Maßnahmen 6 – Umweltpur außerorts und 8 – Bonus-Malus-System reagieren mit Abweichungen von  $+55$  % und  $+88$  % sensibel auf

die Senkung der Herstellungsemissionen der alternativen Antriebstechnologien. Dies bedeutet, dass im Standardmodell eine konservative Berechnung der Emissionseinsparung stattgefunden hat und ein Technologiefortschritt bei der emissionsärmeren Herstellung von Fahrzeugen bedeuten würde, dass der positive Effekt der Maßnahmen noch stärker wäre. Die Maßnahmen des Dieserverbotes und der Umweltzone reagieren kaum merklich auf eine Veränderung der Herstellungsemissionen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass dort hauptsächlich neue Dieselfahrzeuge anstatt Lkw mit alternativem Antrieb gekauft werden. Die Maßnahmen 9 – CO<sub>2</sub>-Maut und 10 – CO<sub>2</sub>-Steuer reagieren mit +18 % ebenfalls schwächer auf die Variation der Herstellungsemissionen. Auch dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass diese Maßnahmen sich auf die schweren Nutzfahrzeuge beschränken und dort CNG der bevorzugte Alternativkraftstoff ist. CNG-Lkw sind jedoch bereits im Standardmodell in gleichem Maße emissionsreich herzustellen wie Diesellkw. Dort wird der positive Effekt somit abgeschwächt.

#### *6.16.1 Validierung von spezifischen Annahmen innerhalb der Maßnahmen*

In einem zweiten Teil der Sensitivitätsanalyse werden die Auswirkungen der Variation von einzelnen Annahmen auf ausgewählte Einzelmaßnahmen geprüft. Bei der Quantifizierung der Einzelmaßnahmen bietet sich eine Vielzahl an möglichen Parametern, die grundsätzlich alle variiert werden könnten. Es wird jedoch lediglich eine Annahme pro Maßnahme variiert, um den Rahmen dieser Arbeit nicht zu überschreiten und eine generelle Robustheit der Berechnung zu schaffen. Es wird jeweils eine elementare Annahme für die jeweilige Maßnahme exemplarisch ausgewählt. Für die Maßnahmen 1 – Dieserverbot gesamt und 2 – Dieserverbot Innenstadt existieren keine zusätzlichen Berechnungen. Daher werden für diese Maßnahmen keine weiteren Annahmen als im Standardmodell variiert. Für alle weiteren Maßnahmen wurden einzelne Annahmen durch eine einzelne Veränderung – ceteris paribus – validiert.

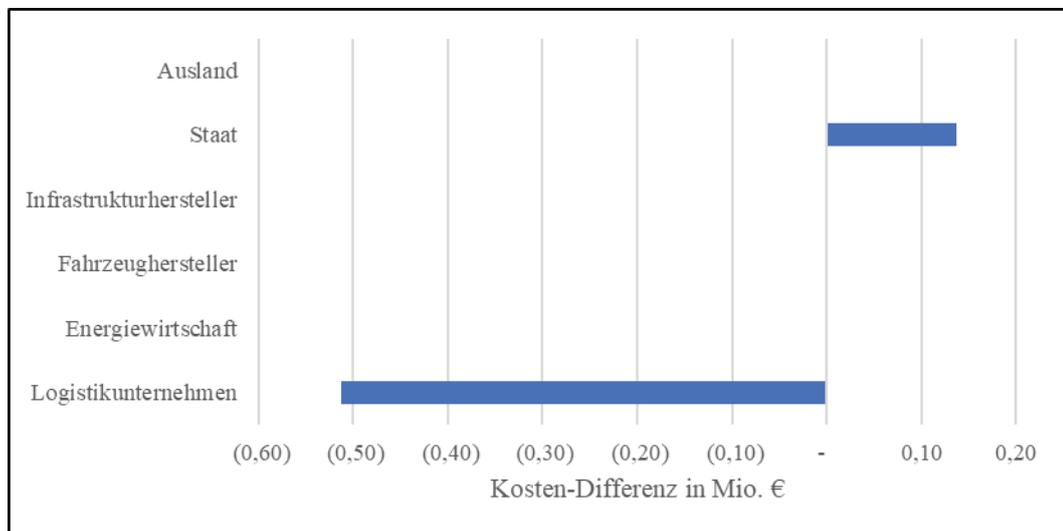
- (1) Variation der Mikrodepot-Reichweite bzw. Anzahl der benötigten Mikrodepots in Maßnahme 3

Die wesentliche Berechnungsgrundlage für diese Maßnahme ist ein Gutachten für die Stadt Nürnberg. Die Stadt München ist jedoch dichter besiedelt als die Stadt Nürnberg. Im Standardmodell wurde die Annahme getroffen, dass die Reichweite der Mikrodepots in jeder Stadt gleich ist. Man könnte jedoch ebenfalls die Annahme treffen, dass mit einer

höheren Bevölkerungsdichte auch die Reichweite der Mikrodepots geringer ist, da mehr Endnutzer Waren geliefert bekommen.

Die Variation der Mikrodepot-Reichweite von 7 km<sup>2</sup> auf 4 km<sup>2</sup> sorgt für eine Kostendifferenz gegenüber dem Standardmodell bei den Akteuren Staat und Logistikunternehmen. Die Kostendifferenz bei den Logistikunternehmen liegt bei rund -0,51 Mio. Euro (+0,02 %) und die des Staates bei 0,14 Mio. Euro (-0,9 %) gegenüber dem Standardmodell. Dies ist jedoch für die Gesamtkosten der Maßnahme nur von geringer Bedeutung, da die Veränderung lediglich +0,02 % ausmacht.

Abbildung 124: Variation der Mikrodepot-Reichweite bzw. Anzahl der benötigten Mikrodepots in Maßnahme 3

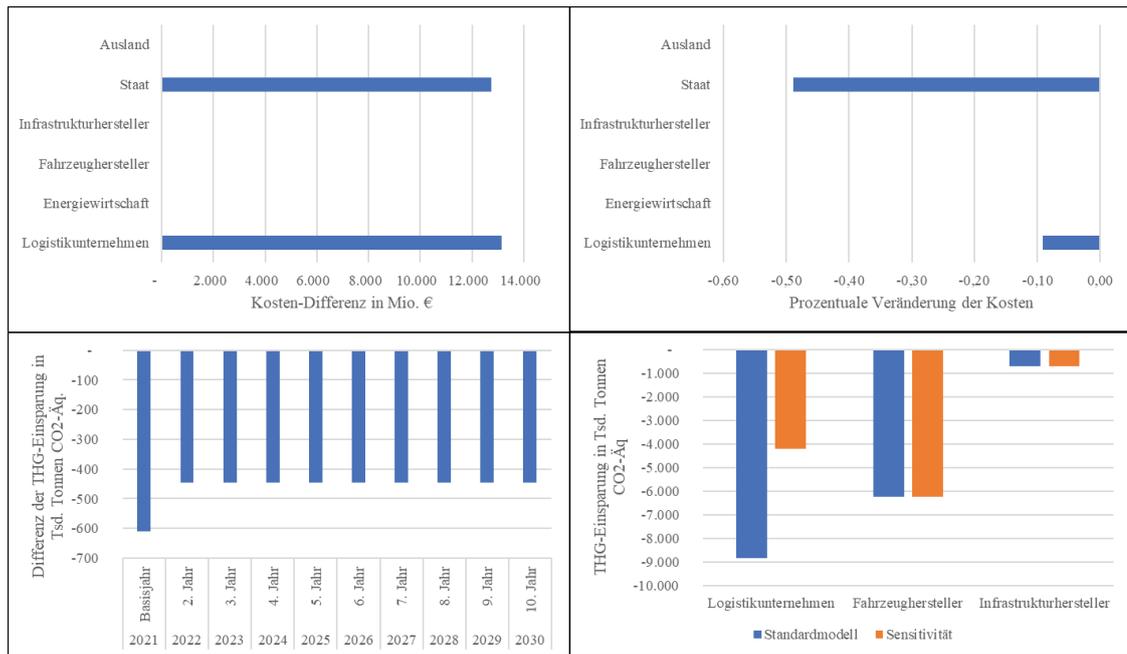


Quelle: CEPiR-Modell, eigene Darstellung.

## (2) Variation der Anzahl an benötigten Verteilzentren in Maßnahme 4

Es wurde im Standardmodell angenommen, dass ein Verteilzentrum an jeder Autobahnabfahrt errichtet werden muss, bzw. alle 5,6 km. Dies ist ein sehr konservatives Szenario, sodass in der Sensitivität geprüft werden muss, wie sich ein größerer (verdoppelter) Abstand von 11,2 km auswirken würde. Dies entspricht einem Verteilzentrum an jeder zweiten Autobahnabfahrt.

Abbildung 125: Variation der Anzahl an benötigten Verteilzentren in Maßnahme 4



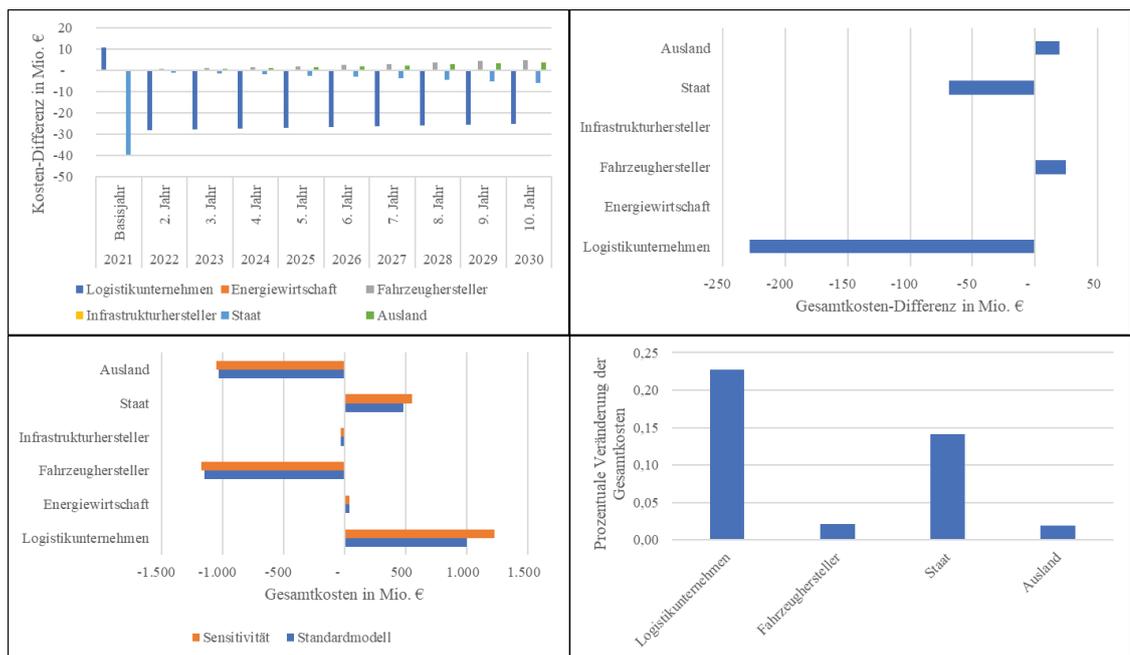
Quelle: CEPiR-Modell, eigene Darstellung.

Die Variation der Anzahl an benötigten Verteilzentren sorgt für eine Kostendifferenz gegenüber dem Standardmodell bei den Akteuren Staat und Logistikunternehmen. Die Kostendifferenz bei den Logistikunternehmen liegt bei 13,2 Mrd. Euro (-9 %) und die des Staates bei 12,7 Mrd. Euro (-49 %) gegenüber dem Standardmodell. Diese Veränderung bewirkt eine Reduktion der Gesamtkosten um mehr als 16 %. Die Variation bewirkt aufgrund der hohen Produktionsemissionen von Verteilzentren eine Reduktion der THG-Emissionen um 29 % gegenüber dem Standardmodell. Diese Maßnahme reagiert somit sehr empfindlich auf eine Variation der benötigten Anzahl an Verteilzentren.

### (3) Variation des Zeitverlustes pro Kilometer Umweltspur in Maßnahme 5

Der Zeitverlust pro Kilometer Umweltspur wurde auf Basis der Angaben der Umweltsuren in Düsseldorf getroffen. Daraus berechnet sich indirekt der Mehrkostenaufwand für Fahrer\*innen von alternativen Antrieben, sodass hier unbedingt geprüft werden sollte, welche Hebelwirkung diese Stellschraube hat. Da München dichter besiedelt ist als Düsseldorf, kann es auch hier zu mehr Verkehr bzw. Rückstau aufgrund einer Umweltspur kommen. Es wird somit der Zeitverlust pro Kilometer Umweltspur von 0,35 h/km auf 0,7 h/km verdoppelt.

Abbildung 126: Variation des Zeitverlustes pro km Umweltspur in Maßnahme 5



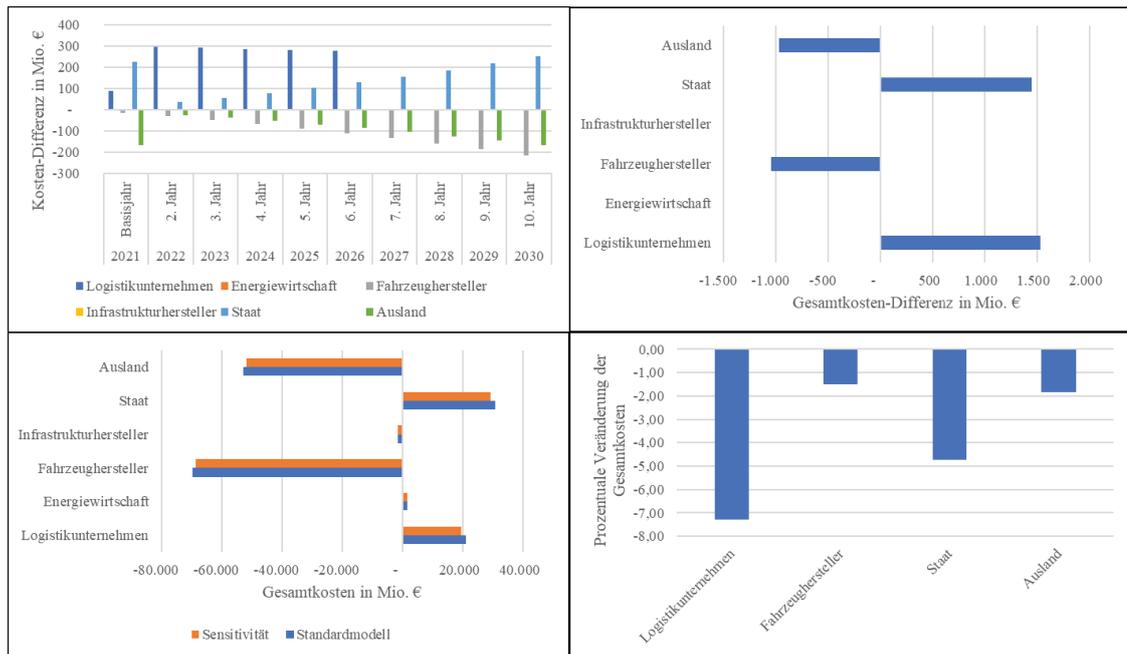
Quelle: CEPIR-Modell, eigene Darstellung.

Die Variation des Zeitverlustes pro Kilometer Umweltspur sorgt für eine Kostendifferenz gegenüber dem Standardmodell bei den Logistikunternehmen, Fahrzeugherstellern, dem Staat und dem Ausland. Die Kostendifferenz bei den Logistikunternehmen liegt bei -229 Mio. Euro (+23 %), bei den Fahrzeugherstellern bei 25 Mio. Euro (+2 %), beim Ausland bei 19 Mio. Euro (+2 %) und beim Staat bei -68 Mio. Euro (-14 %) gegenüber dem Standardmodell. Diese Maßnahme reagiert mit einer Reduktion der Gesamtkosten um -37 % sehr empfindlich auf eine Variation des Zeitverlustes pro Kilometer Umweltspur.

#### (4) Variation der Länge des Überholverbotes in Maßnahme 6

Laut dem Baustelleninformationssystem Sachsen liegen keine Baustellen auf Autobahnen in Sachsen vor. Diese Annahme ist fraglich, sodass mittels Sensitivität geprüft wird, welchen Effekt eine gesamte Länge von 100 km Baustelle und somit eine zusätzliche Strecke von Überholverbote hätte. Der Anteil der Überholverbote auf der gesamten Strecke würde somit bei 51,1 % anstatt bei 33,5 % liegen.

Abbildung 127: Variation der Länge des Überholverbotes in Maßnahme 6



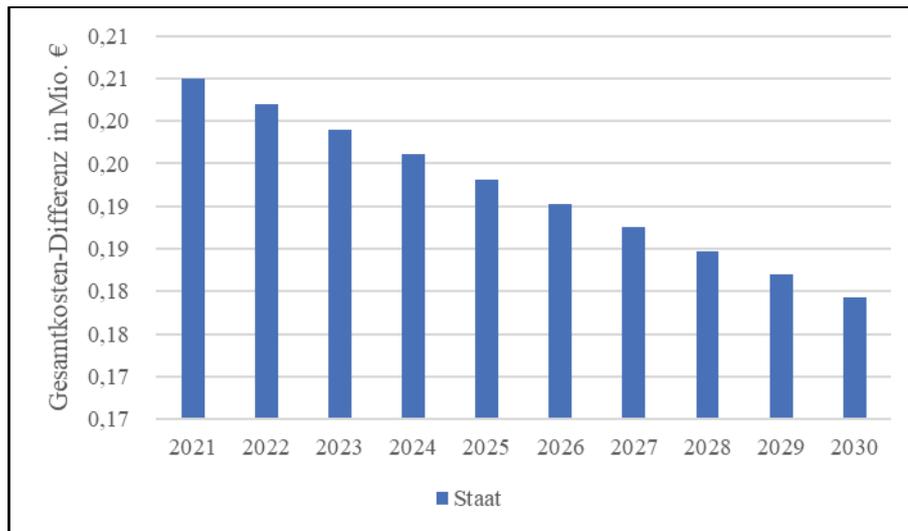
Quelle: CEPIR-Modell, eigene Darstellung.

Die Variation der Länge des Überholverbotes sorgt für eine Kostendifferenz gegenüber dem Standardmodell bei Logistikunternehmen, Fahrzeugherstellern, Staat und Ausland. Die Kostendifferenz bei den Logistikunternehmen liegt bei 1,5 Mrd. Euro (-7,3 %), bei den Fahrzeugherstellern bei -1,0 Mrd. Euro (-1,5 %), beim Ausland bei -1,0 Mrd. Euro (-1,9 %) und beim Staat bei 1,5 Mrd. Euro (-4,7 %) gegenüber dem Standardmodell. Diese Veränderung bewirkt eine Reduktion der Gesamtkosten um rund 1,3 %.

#### (5) Variation der Kosten der Umweltzone in Maßnahme 7

Die Kosten der Umweltzone wurden als Quadratmeterpreis von den Kosten der Umweltzone in München abgeleitet. Da jedoch die Stadt München ein wesentlich dichteres Straßennetz innerhalb dieser Zone und auch eine höhere Bevölkerungsdichte hat, kann angenommen werden, dass auch die Kosten pro Quadratmeter Umweltzone geringer sind. Die Kosten für die Umweltzone werden somit mit der Bevölkerungsdichte von 4790 Ew./km<sup>2</sup> in München bzw. 2078 Ew./km<sup>2</sup> in Kiel gewichtet.

Abbildung 128: Variation der Kosten der Umweltzone in Maßnahme 7



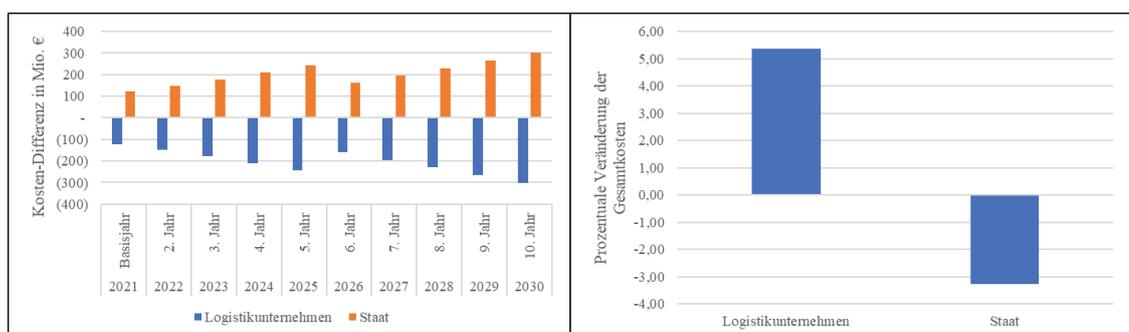
Quelle: CEPiR-Modell, eigene Darstellung.

Die Variation der Kosten der Umweltzone bewirkt lediglich eine Kostendifferenz gegenüber dem Standardmodell beim Staat. Diese Kostendifferenz liegt bei 1,9 Mio. Euro (+33 %) gegenüber dem Standardmodell. Diese Maßnahme reagiert mit einer Veränderung der Gesamtkosten um -2,14 % nicht sonderlich empfindlich auf eine Variation der Kosten der Umweltzone.

(6) Variation der Höhe der Bonus-Malus-Zahlungen in Maßnahme 8

Die Höhe der Bonus-Malus-Zahlungen wurde angelehnt an das französische System für Pkw vergeben. Es wird mittels dieser Sensitivitätsanalyse der Einfluss der Höhe dieser Zahlungen auf die Gesamtkosten und die Effizienz der Maßnahme betrachtet.

Abbildung 129: Variation der Höhe der Bonus-Malus-Zahlungen in Maßnahme 8



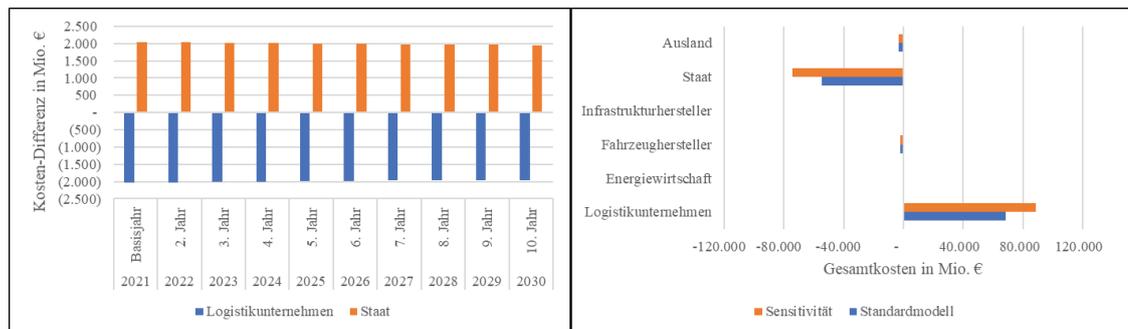
Quelle: CEPiR-Modell, eigene Darstellung.

Die Variation der Höhe der Bonus-Malus-Zahlungen sorgt für eine Kostendifferenz gegenüber dem Standardmodell bei den Logistikunternehmen und beim Staat. Die Kostendifferenz bei den Logistikunternehmen liegt bei 2,1 Mrd. Euro (+5,4 %) und die des Staates bei 2,1 Mrd. Euro (-3,3 %) gegenüber dem Standardmodell. Diese Veränderung bewirkt jedoch keine Veränderung der Gesamtkosten, da sich diese Effekte gegenseitig aufheben.

#### (7) Variation der Höhe der CO<sub>2</sub>-Maut in Maßnahme 9

Der CO<sub>2</sub>-Abschlag wurde angelehnt an die französische CO<sub>2</sub>-Steuer bestimmt. Hierbei wird die Sensitivität des Modells hinsichtlich eines höheren Abschlags bestimmt.

Abbildung 130: Variation der Höhe des CO<sub>2</sub>-Abschlags in Maßnahme 9



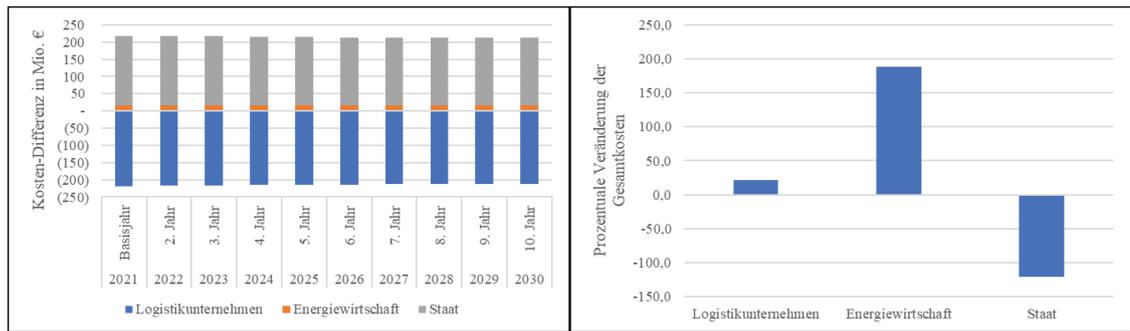
Quelle: CEPiR-Modell, eigene Darstellung.

Die Variation der Höhe der CO<sub>2</sub>-Maut sorgt für eine Kostendifferenz gegenüber dem Standardmodell bei den Logistikunternehmen und beim Staat. Die Kostendifferenz bei den Logistikunternehmen liegt bei -19,9 Mrd. Euro (+29 %) und die des Staates bei +19,9 Mrd. Euro (+36 %) gegenüber dem Standardmodell. Diese Veränderung bewirkt jedoch keine Veränderung der Gesamtkosten, da sich diese Effekte gegenseitig aufheben.

#### (8) Variation der Höhe der CO<sub>2</sub>-Steuer in Maßnahme 10

Die CO<sub>2</sub>-Steuer wurde angelehnt an die französische CO<sub>2</sub>-Steuer bestimmt. Hierbei wird die Sensitivität hinsichtlich eines höheren Abschlags pro Tonne CO<sub>2</sub>-Äq. bestimmt.

Abbildung 131: Variation der Höhe der CO<sub>2</sub>-Steuer in Maßnahme 10



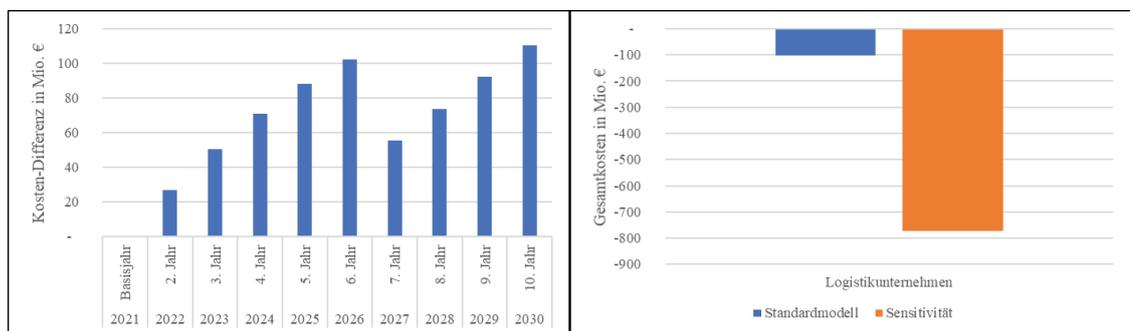
Quelle: CEPIR-Modell, eigene Darstellung.

Die Variation der Höhe des CO<sub>2</sub>-Steuersatzes sorgt für eine Kostendifferenz gegenüber dem Standardmodell bei den Logistikunternehmen, der Energiewirtschaft und dem Staat. Die Kostendifferenz bei den Logistikunternehmen liegt bei -2,1 Mrd. Euro (+21 %), bei der Energiewirtschaft bei 167 Mio. Euro (+188 %) und beim Staat bei +2,0 Mrd. Euro (-121 %) gegenüber dem Standardmodell. Diese Veränderung bewirkt jedoch keine Veränderung der Gesamtkosten, da sich diese Effekte gegenseitig aufheben.

(9) Variation der Staukostensparnis in Maßnahme 11

Die City-Maut könnte neben einer Einsparung von Stauzeiten im Kern der Stadt, also im eigentlichen Mautbereich, auch zu weniger Stau auf den umliegenden Straßen führen, sodass hier der Effekt einer verdoppelten Staukostensparnis gemessen wird.

Abbildung 132: Variation der Staukostensparnis in Maßnahme 11



Quelle: CEPIR-Modell, eigene Darstellung.

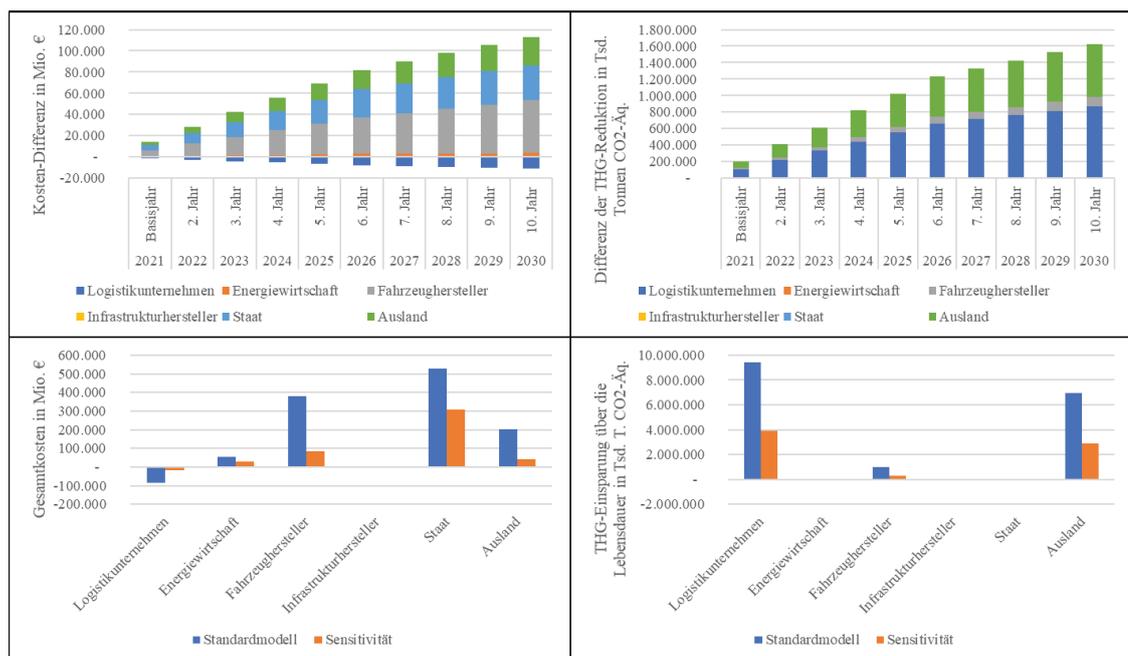
Die Verdopplung der Staukostensparnis sorgt lediglich für eine Kostendifferenz gegenüber dem Standardmodell bei den Logistikunternehmen. Diese Kostendifferenz liegt bei

+670 Mio. Euro (−650 %) gegenüber dem Standardmodell. Die Gesamtkosten der Logistikunternehmen sinken von −103 Mio. Euro auf −773 Mio. Euro. Diese Variation bewirkt eine Veränderung der Gesamtkosten dieser Maßnahme um −5 %.

#### (10) Variation der Neukaufquote in Maßnahme 12

Es wird angenommen, dass aufgrund von Energiesparmaßnahmen 5 % der Fahrzeuge infolge eines Wechsels zur Schiene und weitere 5 % aufgrund von Effizienzsteigerungen nicht neu beschafft werden. Somit liegt die Neukaufquote im Standardmodell bei 90 %. Nun wird mit dieser Sensitivitätsanalyse geprüft, welche Konsequenz es hätte, wenn diese Neukaufquote lediglich bei 95 % läge und neben dem Wechsel zur Schiene keine weiteren Effizienzgewinne resultierten.

Abbildung 133: Variation der Neukaufquote in Maßnahme 12



Quelle: CEPIR-Modell, eigene Darstellung.

Die Variation der Neukaufquote hat Konsequenzen für alle Akteure, sowohl hinsichtlich der Kosten als auch der THG-Einsparung. Diese Kostendifferenz liegt bei den Logistikunternehmen bei −67 Mrd. Euro (−80 %), bei der Energiewirtschaft bei + 24 Mrd. Euro (−44 %), bei den Fahrzeugherstellern bei +297 Mrd. Euro (−78 %), bei den Infrastrukturerstellern bei 0,3 Mrd. Euro (−9 %), beim Staat bei 218 Mrd. Euro (−41 %) und beim Ausland bei 161 Mrd. Euro (−79 %) gegenüber dem Standardmodell. Die Gesamtkosten

der Maßnahme sinken von rund 1.077 Mrd. Euro auf 444 Mrd. Euro. Diese Variation bewirkt eine erhebliche Veränderung der Gesamtkosten dieser Maßnahme um  $-59\%$ . Die Berechnung der Kosten reagiert somit sehr empfindlich auf eine Veränderung dieser Annahme.

Die Variation dieser Annahme bewirkt zudem eine Veränderung der THG-Emissionen. Diese THG-Differenz liegt bei den Logistikunternehmen bei  $-58\%$ , bei den Fahrzeugherstellern bei  $-71\%$ , bei den Infrastrukturherstellern bei  $+8\%$  und beim Ausland bei  $-58\%$  gegenüber dem Standardmodell. Insgesamt reduzieren sich die THG-Einsparungen dieser Maßnahme um  $-59\%$  gegenüber dem Standardmodell. Die Berechnung der THG-Einsparungen reagiert somit ebenfalls sehr empfindlich auf eine Veränderung dieser Annahme.

### ***6.17 Synergieeffekte und Maßnahmenkombinationen***

Die Maßnahmen sind prinzipiell dazu geeignet, miteinander kombiniert zu werden. Jedoch zeigt das Beispiel der Sensitivitätsanalyse mit den Emissionsfaktoren, dass eine Strategie, die nicht durchdacht und leicht widersprüchlich ist, zu weniger Erfolg führt als zielgerichtete Maßnahmen und Strategien. Einige der Maßnahmen schließen sich jedoch auch gegenseitig aus, wie die unterschiedlichen Ausgestaltungen des Dieselvebotes. Währenddessen ist eine Kombination der beiden Maßnahmen mit Umweltpuren durchaus durchführbar, da sich diese weitestgehend nicht überschneiden, sondern lediglich an der Stelle der schweren Nutzfahrzeuge tangieren. Auch das französische Beispiel zeigt, dass sich die CO<sub>2</sub>-Steuer mit dem Bonus-Malus-System verträgt. Dies liegt jedoch hauptsächlich daran, dass die beiden Maßnahmen derselben Kraftstoffstrategie folgen und zum Kauf von Elektrofahrzeugen sowie Hybriden motivieren. Während wir gesehen haben, dass ein Dieselvebot allein lediglich zu einem Austausch alter Dieselfahrzeuge gegen neue anreizt, würde eine zusätzliche Maßnahme, die – wie beispielsweise das Bonus-Malus-System – eine starke Nachfrageverschiebung in Richtung CNG-, Elektro- und Hybridfahrzeugen bewirkt, zu einem positiven Multiplikatoreffekt und einem Rückgang des Dieselantriebs führen. Die Maßnahme könnte jedoch auch zu einem negativen Multiplikatoreffekt werden, sollte sich herausstellen, dass Syndiesel der zukünftige Hauptkraftstoff für Lastkraftwagen wird.

## 7. Volkswirtschaftliche Effekte der politischen Instrumente

Neben der Berechnung der Kosten und der Treibhausgaseinsparung der Maßnahmen gibt es volkswirtschaftliche Indikatoren, die für eine umfassende Analyse ebenfalls berücksichtigt werden sollten. Zum Beispiel könnte eine Maßnahme zwar negative Kosten – also für die aufgeführten Akteure Einnahmen – verursachen, die nun nicht mehr als Investitionen in die Volkswirtschaft einfließen. Somit könnte ein Rückgang der Beschäftigung oder des Bruttoinlandsproduktes ein weiteres Resultat sein. Professor Wassily Leontief entwickelte in den 1930er Jahren eine Methode zur Analyse der Beziehungen zwischen verschiedenen Sektoren in einer Volkswirtschaft, wofür er im Jahr 1973 mit dem Nobelpreis ausgezeichnet wurde (Destatis, 2010). Im Folgenden werden somit die direkten und indirekten Auswirkungen der hypothetisch umgesetzten Maßnahmen modellhaft untersucht. Mit Hilfe dieser Analyse können mögliche Beschäftigungs- und Wohlfahrts-effekte der Implementierung der politischen Instrumente aus dem Kapitel 6 aufgedeckt werden.

Mit der Input-Output-Analyse (IOA) können Produktionsverflechtungen untersucht werden. Beispielsweise kann erforscht werden, wie viel Vorleistungen in Geldwert innerhalb eines Jahres für die Produktion in Sektor B aus dem Sektor A erbracht werden. Für die vorliegende Untersuchung würde somit eine erhöhte Nachfrage nach Lastkraftwagen vermutlich zu zusätzlichen Lieferungen aus Stahl-, Gummi-, Elektro-, Textil-, Mineralöl- und weiteren Industriesektoren führen. Für diese Lieferungen werden darüber hinaus Lieferungen aus vorgelagerten Industrien, beispielsweise dem Erzbergbau, der Eisen- und Metallverarbeitung, der Strom- oder Gaserzeugung usw., notwendig (Distelkamp et al., 2017).

Die Vorleistungsmatrix hat im Wesentlichen die Form wie in Tabelle 45. Diese Matrix ist so zu lesen, dass die Umsätze  $z_{ij}$  von Sektor  $i$  an Sektor  $j$  verkaufte Vorleistungen darstellen. Bei  $i \neq j$  liegt intersektoraler Handel vor, während bei  $i = j$  intrasektoraler Handel stattfindet (Leontief & Strout, 1963).

Tabelle 45: Transaktionsmatrix

Verwendung →	Sektor 1	Sektor 2	...
Herkunft ↓			
Sektor 1	z11	z12	
Sektor 2	z21	z22	
...			

Quelle: (United Nations, 1999)

Neben diesen Vorleistungsverflechtungen werden auch die Endnachfrage (Konsum, Investitionen und Exporte) bzw. die Inputs, wie Arbeit, Importe und Abschreibungen, aufgeführt. Neben den direkten Verflechtungen sind auch die indirekten wirtschaftlichen Verflechtungen in einer Volkswirtschaft von Bedeutung. Eine erhöhte Nachfrage nach einem Gut erhöht die Produktion. Damit ist eine erhöhte Nachfrage an Vorleistungen verbunden, die wiederum zu einer erhöhten Produktion an Vorleistungen führt. Im Folgenden werden somit jeweils die direkten als auch die indirekten Effekte des Nachfrageimpulses der Umsetzung der zwölf Maßnahmen untersucht.

Als Basis für diese Untersuchung wird eine multiregionale Input-Output-Tabelle (MRIO) erstellt. Diese wird wie das Kapitel 6 eine Betrachtung der Region Deutschland sowie der Region Ausland enthalten. Als Ausland werden erneut alle Länder außerhalb Deutschlands zusammengefasst (Blair & Miller, 2009).

Neben den Output-Effekten können mittels Multiplikatoren auch die Effekte auf andere volkswirtschaftliche Größen bestimmt werden. Beispielsweise kann somit der Effekt auf die Wertschöpfung, das Einkommen, die Beschäftigung oder auch den Ausstoß von Nebenprodukten (Emissionen) bei der Befriedigung von 1 Euro an Nachfrage nach einem Gut bestimmt werden (Schröder & Zimmermann, 2014).

### 7.1 Datenbasis und Aufbereitung

Die inländische Input-Output (I-O)-Tabelle für Deutschland wird vom Statistischen Bundesamt (Destatis) als integraler Bestandteil der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen (VGR) veröffentlicht. Die Gliederung der Destatis-I-O-Tabelle erfolgt in 72 Sektoren und wird in Mio. Euro angegeben (Destatis, 2010). Es muss wie in Abbildung 134 eine zweisektorale I-O-Tabelle erstellt werden. Dafür werden die Input-Output-Tabelle für die inländische Produktion wie auch die Importverflechtungen für Deutschland benötigt. Diese

werden aus der I-O-Tabelle von Destatis entnommen. Darüber hinaus wird eine I-O-Tabelle für das Ausland benötigt. Dafür wird die World-Input-Output-Tabelle (WIOT) der World Input Output Database (WIOD) verwendet (Dietzenbacher et al., 2015). Laut Inomata und Owen (2014) existieren einige MRIO-Datensätze, jedoch ist die WIOD die aktuellste Datenbasis mit einem zeitlichen Bezug auf die Jahre 2000 bis 2014. Diese Input-Output-Tabelle liefert Daten zu 56 Sektoren über 44 Regionen in Mio. US-Dollar (vgl. mit GWS, 2017). Diese 44 Regionen enthalten eine detaillierte Auswertung der 43 größten Industrienationen sowie eine Rest-of-World (RoW)-Darstellung aller übrigen Länder. Da vor allem kleinere oder wirtschaftlich schwächere Länder keine detaillierten I-O-Daten erheben oder veröffentlichen, werden diese Länder zusammengefasst.

Abbildung 134: Schematische Darstellung einer MRIO-Tabelle

	Deutschland (DEU)	Ausland (ROW)
Deutschland (DEU)	Inländische Produktion	Exporte DEU an ROW
Ausland (ROW)	Importe DEU aus RoW	Ausländische Produktion

Quelle: (Blair & Miller, 2009)

Werden zwei I-O-Datenbanken zusammengelegt, so entsteht eine gewisse Unsicherheit, da verschiedene Ansätze zur Harmonisierung der Daten gewählt werden können. Diese Unsicherheit überträgt sich automatisch auf die gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse (Distelkamp et al., 2017).

Es können drei Aufgaben für eine erfolgreiche Erstellung der gewünschten MRIO identifiziert werden. Die I-O-Tabellen aus Destatis und WIOD liefern Daten in unterschiedlichen Währungen für eine unterschiedliche Anzahl von Sektoren und die deutsche inländische Produktion wird in beiden Tabellen aufgeführt. Um eine MRIO zu erstellen, muss somit die WIOT in Euro umgerechnet werden. Dafür wird der Wechselkurs von 0,86 \$/€ verwendet (Statista, 2021c). Deutschland muss in der RoW-Tabelle als eine der Regionen entfernt werden, ansonsten werden die inländische Produktion sowie die Importe in Deutschland doppelt gezählt. Darüber hinaus muss darauf geachtet werden, dass nicht nur die inländischen Verflechtungen in der Tabelle eliminiert werden, sondern ebenfalls in der Gesamtsumme des Produktionswertes und der Bruttowertschöpfung etc.

Demgegenüber muss die Destatis-Tabelle für Deutschland von 72 Sektoren auf 56 reduziert werden. Umgekehrt müsste aufgrund fehlender Daten über die Vorleistungsstruktu-

ren der einzelnen Regionen im Ausland angenommen werden, dass diese dieselbe Struktur wie Deutschland haben. Dies könnte zu sehr großen Ungenauigkeiten führen, da Deutschland als Industrie- und Exportnation nicht für alle Länder repräsentativ ist. Somit wird das Ergebnis aufgrund der geringeren Anzahl von Sektoren zwar weniger detailliert, ist jedoch zuverlässiger. Die Überlieferung vom Destatis-72x72- zum WIOD-56x56-Format erfolgte anhand der Tabelle 46.

Tabelle 46: Überlieferung vom Destatis- zum WIOD-Format

Nr.	Destatis	Nr.	WIOD
1	Erz. d. Landwirtschaft, Jagd und Dienstleistungen	1	Erz. d. Landwirtschaft, Jagd und Dienstleistungen
2	Forstwirtschaftl. Erzeugnisse und Dienstleistungen	2	Forstwirtschaftl. Erzeugnisse und Dienstleistungen
3	Fische, Fischerei- und Aquakulturerzeugnisse, DL	3	Fische, Fischerei- und Aquakulturerzeugnisse, DL
4	Kohle	4	Kohle, Erdöl und Erdgas, Erze, Steine und Erden, sonstige Bergbauerz., DL
5	Erdöl und Erdgas		
6	Erze, Steine und Erden, sonstige Bergbauerz., DL		
7	Nahrungs- u. Futtermittel, Getränke, Tabakerzeugn.	5	Nahrungs- u. Futtermittel, Getränke, Tabakerzeugn.
8	Textilien, Bekleidung, Leder und Lederwaren	6	Textilien, Bekleidung, Leder und Lederwaren
9	Holz, Holz- u. Korkwaren (oh. Möbel), Flecht- u. Korbw.	7	Holz, Holz- u. Korkwaren (oh. Möbel), Flecht- u. Korbw.
10	Papier, Pappe und Waren daraus	8	Papier, Pappe und Waren daraus
11	Druckereileist., bsp. Ton-, Bild- u. Datenträger	9	Druckereileist., bsp. Ton-, Bild- u. Datenträger
12	Kokerei- und Mineralölerzeugnisse	10	Kokerei- und Mineralölerzeugnisse
13	Chemische Erzeugnisse	11	Chemische Erzeugnisse
14	Pharmazeutische Erzeugnisse	12	Pharmazeutische Erzeugnisse
15	Gummi- und Kunststoffwaren	13	Gummi- und Kunststoffwaren
16	Glas und Glaswaren	14	Glas und Glaswaren, Keramik, bearbeitete Steine und Erden
17	Keramik, bearbeitete Steine und Erden		
18	Roheisen, Stahl, Erz. d. erst. Bearb. v. Eisen u. Stahl	15	Roheisen, Stahl, Erz. d. erst. Bearb. v. Eisen u. Stahl
19	NE-Metalle und Halbzeug daraus	16	NE-Metalle und Halbzeug daraus, Gießereierzeugnisse, Metallerzeugnisse
20	Gießereierzeugnisse		
21	Metallerzeugnisse		
22	DV-Geräte, elektronische und optische Erzeugnisse	17	DV-Geräte, elektronische und optische Erzeugnisse
23	Elektrische Ausrüstungen	18	Elektrische Ausrüstungen
24	Maschinen	19	Maschinen
25	Kraftwagen und Kraftwagenteile	20	Kraftwagen und Kraftwagenteile
26	Sonstige Fahrzeuge	21	Sonstige Fahrzeuge
27	Möbel und Waren, a. n. g.	22	Möbel und Waren, a. n. g.
28	Rep., Instandh. u. Inst. v. Maschinen u. Ausrüst.	23	Rep., Instandh. u. Inst. v. Maschinen u. Ausrüst.
29	Elektr. Strom, DL d. Elektriz.-, Wärme-u. Kälteversorg.	24	Elektr. Strom, DL d. Elektriz.-, Wärme-u. Kälteversorg., Indust. erz. Gase, Dienstleistungen d. Gasversorgung
30	Indust.erz.Gase, Dienstleistungen d.Gasversorgung		
31	Wasser, Dienstleistungen der Wasserversorgung	25	Wasser, Dienstleistungen der Wasserversorgung
32	DL d. Abwasser-, Abfallentsorgung u. Rückgewinnung	26	DL d. Abwasser-, Abfallentsorgung u. Rückgewinnung
33	Hochbauarbeiten	27	

34	Tiefbauarbeiten		Hochbauarbeiten, Tiefbauarbeiten, Vorb.Baustellen-,Bauinstallations-,Ausbauarbeiten
35	Vorb. Baustellen-,Bauinstallations-,Ausbauarbeiten		
36	Handelsleistungen mit Kfz, Instandh. und Reparatur	28	Handelsleistungen mit Kfz, Instandh. und Reparatur
37	Großhandelsleistungen (oh. Handelsleistungen m.Kfz)	29	Großhandelsleistungen (oh. Handelsleistungen m. Kfz)
38	Einzelhandelsleistungen (ohne Handelsleist. m. Kfz)	30	Einzelhandelsleistungen (ohne Handelsleist. m. Kfz)
39	Landverkehrs- u. Transportleist. in Rohrfernleit.	31	Landverkehrs- u. Transportleist. in Rohrfernleit.
40	Schiffahrtsleistungen	32	Schiffahrtsleistungen
41	Luftfahrtleistungen	33	Luftfahrtleistungen
42	Lagereleist., sonst. Dienstleistungen f. d. Verkehr	34	Lagereleist., sonst. Dienstleistungen f. d. Verkehr
43	Post-, Kurier- und Expressdienstleistungen	35	Post-, Kurier- und Expressdienstleistungen
44	Beherbergungs- und Gastronomiedienstleistungen	36	Beherbergungs- und Gastronomiedienstleistungen
45	Dienstleistungen des Verlagswesens	37	Dienstleistungen des Verlagswesens
46	DL v. audiovis. Med., Musikverlag. u. RF-veranstalt.	38	DL v. audiovis. Med., Musikverlag. u. RF-veranstalt.
47	Telekommunikationsdienstleistungen	39	Telekommunikationsdienstleistungen
48	IT- und Informationsdienstleistungen	40	IT- und Informationsdienstleistungen
49	Finanzdienstleistungen	41	Finanzdienstleistungen
50	Dienstleistungen v. Versicherungen u. Pensionskassen	42	Dienstleistungen v. Versicherungen u. Pensionskassen
51	Mit Finanz- u. Versicherungs-DL verbundene Dienstl.	43	Mit Finanz- u. Versicherungs-DL verbundene Dienstl.
52	Dienstleistungen d. Grundstücks- u. Wohnungswesens	44	Dienstleistungen d. Grundstücks- u. Wohnungswesens
53	DL der Rechts-, Steuer- und Unternehmensberatung	45	DL der Rechts-, Steuer- und Unternehmensberatung
54	DL v. Arch./Ing.-büros, techn., phys., chem. Unters.	46	DL v. Arch./Ing.-büros, techn., phys., chem. Unters.
55	Forschungs- und Entwicklungsleistungen	47	Forschungs- und Entwicklungsleistungen
56	Werbe- und Marktforschungsleistungen	48	Werbe- und Marktforschungsleistungen
57	Sonst. freiberufl., wiss., techn. u. veterinärmed. DL	49	Sonst. freiberufl., wiss., techn. u. veterinärmed. DL
58	Dienstleist. der Vermietung v. beweglichen Sachen	50	Dienstleist. der Vermietung v. beweglichen Sachen
59	DL d. Vermittlung u. Überlassung v. Arbeitskräften	51	Öffentliche Verwaltung und Verteidigung; Sozialversicherung
60	DL v. Reisebüros, -veranstaltern u. sonst. Reserv.		
61	Wach-, Sicherheits-DL, wirtschaftliche DL a. n. g		
62	DL d. öffentlichen Verwaltung und der Verteidigung		
63	Dienstleistungen der Sozialversicherung		
64	Erziehungs- und Unterrichtsdienstleistungen	52	
65	Dienstleistungen des Gesundheitswesens	53	
66	Dienstleistungen von Heimen und des Sozialwesens	54	Sonstige Servicetätigkeiten
67	Dienstleist. der Kunst, Kultur u. des Glücksspiels		
68	DL des Sports, der Unterhaltung und der Erholung		
69	DL d. Interessenvertr., kirchl. u. sonst. Vereinig.		
70	Reparaturarbeiten an DV-Geräten u. Gebrauchsgütern		
71	Sonstige überwiegend persönliche Dienstleistungen	55	Waren u. Dienstleistungen privater Haushalte o. a. S., Sonstige überwiegend persönliche Dienstleistungen
72	Waren u. Dienstleistungen privater Haushalte o. a. S.		
		56	Aktivitäten von extraterritorialen Organisationen und Körperschaften

Quelle: eigene Darstellung.

Die Vorleistungsverflechtungen aus DEU und RoW an DEU und RoW, wie sie in Abbildung 134 dargestellt werden, liefern die Transaktionsmatrix (vgl. Tabelle 45). Gewünscht ist als Endergebnis, den Produktionsvektor  $P$  zu finden, der anzeigt, welchen Effekt auf die Produktion die gestiegene Nachfrage volkswirtschaftlich auslöst. Um  $P$  (Produktionsvektor) in Bezug auf  $d$  (Nachfragevektor) zu finden, sind einige lineare Gleichungen notwendig (Blair & Miller, 2009).

Die generelle Formel zur Bestimmung des Produktionsvektors lautet:

$P = (I - A)^{-1} * D$	(22)
------------------------	------

mit

$P$  = Produktionsvektor

$D$  = Nachfragevektor

$I$  = Einheitsmatrix

$A$  = Technologiematrix

Zunächst wird somit die Technologiematrix  $A$  benötigt. Zur Erstellung der Technologiematrix aus der I-O-Tabelle werden die Inputkoeffizienten benötigt. Diese sind die Vorleistungen des Sektors  $i$  je Werteinheit Output (Produktionswert) des Sektors  $j$  (Blair & Miller, 2009).

Die Berechnung erfolgt somit anhand der Formel:

$a_{ij} = z_{ij} / X_j$	(23)
-------------------------	------

mit

$a$  = Inputkoeffizienten

$z$  = Vorleistungen

$X$  = Produktionswert

Mittels der Inputkoeffizienten kann für jeweils eine Einheit des Outputs die notwendige vorgelagerte Produktion dargestellt werden. Ein Beispiel für die Interpretation wäre: Für die Erzeugung eines Produktionswertes in Höhe von 1 Euro in Sektor A waren im Jahr 2021 Vorleistungen aus inländischer Produktion in Höhe von 54,8 Cent erforderlich. Daher wird jede Vorleistung durch die Summe der Vorleistungen in einem Sektor geteilt. Es entsteht eine prozentuale Verteilung eines Produktions-Euros auf alle Vorleistungssektoren. Das Ergebnis ist die Technologiematrix  $A$  mit 112 x 112 Einträgen.

Aus der I-O-Tabelle wird die Technologiematrix erstellt. Diese muss in einem nächsten Schritt von der Einheitsmatrix subtrahiert werden. Bildet man von der resultierenden Matrix die Inverse, so erhält man die Leontief-Inverse (L). Die Leontief-Inverse ist ein zentrales Element der IOA. Sie ist definiert als die Matrix der kumulierten Inputkoeffizienten (Hertwich & Peters, 2010).

Zunächst muss überprüft werden, ob die Leontief-Inverse  $L = (I - A)^{-1}$  existiert. In unserem Fall existiert diese Inverse zunächst noch nicht. Da der Sektor 56 lediglich aus Reihen und Spalten mit Nullen besteht, kann keine Inverse gebildet werden. Dies zeigt, dass der Sektor 56 im Ausland eine geringe Relevanz bezüglich der Verflechtungen mit anderen Sektoren aufweist. Für Deutschland hat der Sektor gemäß Tabelle 47 ebenfalls keine Relevanz. Daher wird der Sektor 56 aus der Betrachtung gelöscht. Dies ist möglich, da er offensichtlich keine nennenswerte Interaktion mit den anderen Sektoren aufweist. Nach der Reduktion auf 55 Sektoren, kann die Inverse mit 110 x 110 Einträgen gebildet werden. Die Hauptdiagonale der Leontief-Inversen enthält Werte  $> 1$ . Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Matrix den direkten und den indirekten Effekt enthält (Blair & Miller, 2009).

Neben den Daten zu Vorleistungsverflechtungen stellen die Statistischen Ämter und Organisationen auch Daten zu Beschäftigung und Wertschöpfung pro Sektor zur Verfügung, so auch Destatis und WIOD. Diese Werte werden für die Bruttowertschöpfung und das Arbeitnehmerentgelt in Euro (Destatis) bzw. in Dollar (WIOD) angegeben. Für die Erwerbstätigen und die Arbeitnehmer werden Anzahlen pro Jahr angegeben. Die Werte pro Sektor müssen nun ebenfalls durch den Produktionswert des Sektors geteilt werden. So erhält man den Multiplikatoreffekt pro Euro Produktionswert. Es resultiert nun für beide Regionen für jeden Sektor jeweils ein Gesamtmultiplikator (Blair & Miller, 2009 vgl. mit Los et al., 2016).

Die politischen Instrumente werden im vorherigen Kapitel über eine Lebensdauer von 10 Jahren untersucht, dies wird auch in dieser Analyse zugrunde gelegt. Einige der Maßnahmen bewirken vorwiegend im ersten Betrachtungsjahr, dem Jahr der Umsetzung, einen Nachfrageimpuls. Andere Maßnahmen wirken in jedem Jahr bzw. sogar tendenziell mit steigender Nachfrage. Somit entstehen insgesamt 120 Nachfragevektoren (12 Maßnah-

men \* 10 Jahre), die unabhängig voneinander berechnet werden. So kann untersucht werden, welchen Effekt die Maßnahmen kurz- und langfristig und in welcher Höhe auf die Produktion, die Beschäftigung und die Wertschöpfung haben.

Die Erstellung der Nachfragevektoren erfolgt aus der Kostenkalkulation in Kapitel 6. Es werden jedoch nicht alle Geldflüsse berücksichtigt. Um eine Doppelzählung zu vermeiden, werden ausschließlich die Kosten und nicht die Einnahmen berücksichtigt. Die Aufteilung in Kosten, die ins Ausland fließen, und solche, die in Deutschland bleiben, bleibt bestehen, sodass auch die Effekte auf das Ausland berechnet werden können.

Die Kosten der Akteure sind als Investition bzw. Nachfrageimpuls in die deutsche Volkswirtschaft zu verstehen. Für jede Maßnahme müssen diese Kosten auf die Sektoren aufgeteilt werden, in denen die Investitionen stattfinden. Müssen beispielsweise die Logistikunternehmen Fahrzeuge im Wert von 1 Mio. Euro bei den Fahrzeugherstellern einkaufen, werden in dieser Analyse die Fahrzeughersteller nicht als ein Akteur betrachtet. Die Investitionen verteilen sich hierbei auf die Sektoren für Kunststoffwaren, Glaswaren, Kraftfahrzeugteile und elektronische und optische Erzeugnisse. Die Investitionen, die aus den Maßnahmen resultieren, wurden in ihre Kostenbestandteile aufgespalten und auf die einzelnen Gütergruppen verteilt (siehe Tabelle 47).

Tabelle 47: Aufteilung der Kostenbestandteile auf die Gütergruppen

Gütergruppen	Fahrzeuge	Infrastruktur	Förderung	Kraftstoffe	Mikrodepot	Verteilzentrum	Umweltspur - Staat	Umweltspur - LU	Umweltzone - Staat	Strafzahlung	CO2-Maut	CO2-Steuer	City-Maut	Verlagerung u. CO2-Ausweis
S4				0,01										
S5				0,01										
S12				0,98										
S15	0,10													
S16	0,02													
S22	0,03													
S23		0,15												
S25	0,41													
S29		0,02												
S33		0,11			1	1								
S34		0,22												
S35							0,1		0,1					
S39								1		1			0,36	0,91
S53														0,09
S55			0,5											
S62			0,5				0,9		0,9		1	1	0,64	

Quellen: eigene Darstellung<sup>10</sup>

Hierbei werden aus Gründen der Übersichtlichkeit nur die Sektoren aufgeführt, die von mindestens einer der Maßnahmen direkt betroffen sind.

Die Output-Effekte können wie bereits beschrieben mit der Formel  $P = L * d$  berechnet werden. Darüber hinaus werden für die volkswirtschaftlichen Multiplikatoren sowohl direkte als auch indirekte Effekte berechnet. Die direkten Effekte werden am Beispiel des Multiplikators Erwerbstätige wie folgt berechnet:

$E_{dir} = ME * L * d$	(24)
------------------------	------

mit

$E_{dir}$  = direkter Zuwachs Erwerbstätige

ME = Multiplikator Erwerbstätige

Somit führt eine Endnachfrage Y zu einer direkten Beschäftigung von  $E_{dir}$  (Bjelle et al., 2018). Die indirekten Effekte werden berechnet, indem die Gesamteffekte, also direkte

<sup>10</sup> Quellen: (Müller & Kerkow, 2012); (Ambel et. al, 2018); (NOW, 2020); (KBA, 2019b); (Forster & Hutter, 2010)

und indirekte Effekte, berechnet und anschließend die direkten Effekte abgezogen werden. Die Formel dafür lautet:

$$E_{\text{ind}} = [ME * L * P] - E_{\text{dir}} \quad (25)$$

Somit führt eine Endnachfrage Y zu einer indirekten Beschäftigung von  $E_{\text{ind}}$  (Bjelle et al., 2018). Induzierte Effekte, also Nachfrageanstiege, die auf das gestiegene Einkommen und die erhöhte Beschäftigung zurückzuführen sind und erneut alle Multiplikatoren betreffen, werden in der vorliegenden Analyse nicht untersucht.

## 7.2 Ergebnisse der Analyse

Mit dem volkswirtschaftlichen Modell können die Einflüsse sowie Effekte der Maßnahmen auf die Produktion sowie auf die Beschäftigung und die Wertschöpfung untersucht werden. Für jede Maßnahme existieren somit die folgenden Ergebnisse:

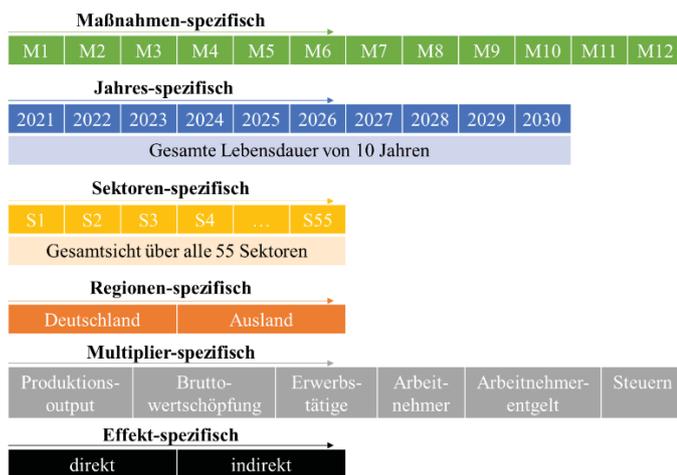


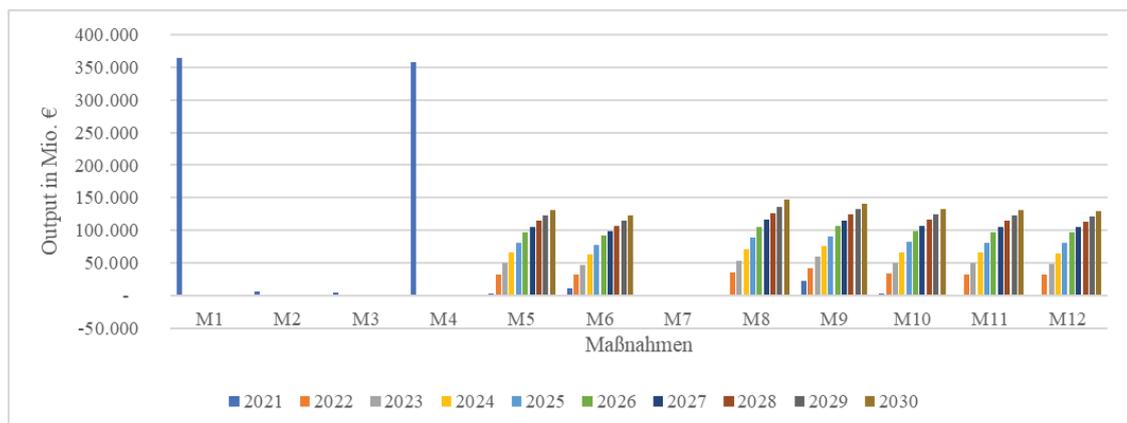
Abbildung 135: Ergebnisdimensionen des I-O-Modells

Die Ergebnisse werden pro Maßnahme betrachtet, da die Maßnahmen sich zum Teil gegenseitig ausschließen und nicht als Paket durchgeführt werden können. Darüber hinaus werden die Ergebnisse sowohl pro Jahr als auch über die gesamte Lebensdauer von 10 Jahren ausgegeben. Des Weiteren kann hinsichtlich der Sektoren, der Regionen, der Multiplikatoren oder der Art der Effekte unterschieden werden. Zur besseren Darstellung wurden die Grafiken immer entweder über die gesamte Lebensdauer oder über alle Sektoren hinweg betrachtet, da der Detailgrad ansonsten zu hoch und die Darstellung damit zu unübersichtlich wäre.

### 7.2.1 Output

Die direkten Produktionswirkungen werden für das Modell bereits anhand von Literaturnachweisen exogen festgelegt (siehe Tabelle 47), sodass aus dem Modell heraus lediglich die indirekten Produktionswirkungen entstehen. Über alle Ergebnisse hinweg ist erneut zu erkennen, dass sich die Maßnahmen 1, 2, 3, 4 und 7 genauso wie die Maßnahmen 5, 6, 8, 9, 10, 11 und 12 jeweils sehr ähnlich verhalten. Es lassen sich somit genau wie in Kapitel 6 zwei Gruppen unterscheiden: die erste Gruppe, bestehend aus den Maßnahmen des Dieserverbotes und der Umweltzone ohne Nachfrageverschiebung in den Folgejahren sowie die zweite Gruppe mit den übrigen Maßnahmen und einer Nachfrageverschiebung in den Folgejahren. Zur Vereinfachung wird immer dann, wenn das Resultat sich auf alle Maßnahmen innerhalb einer Gruppe bezieht, lediglich von Gruppe KNV oder Gruppe NV gesprochen. „NV“ steht dabei für „Nachfrageverschiebung“ während „KNV“ für „keine Nachfrageverschiebung“ steht.

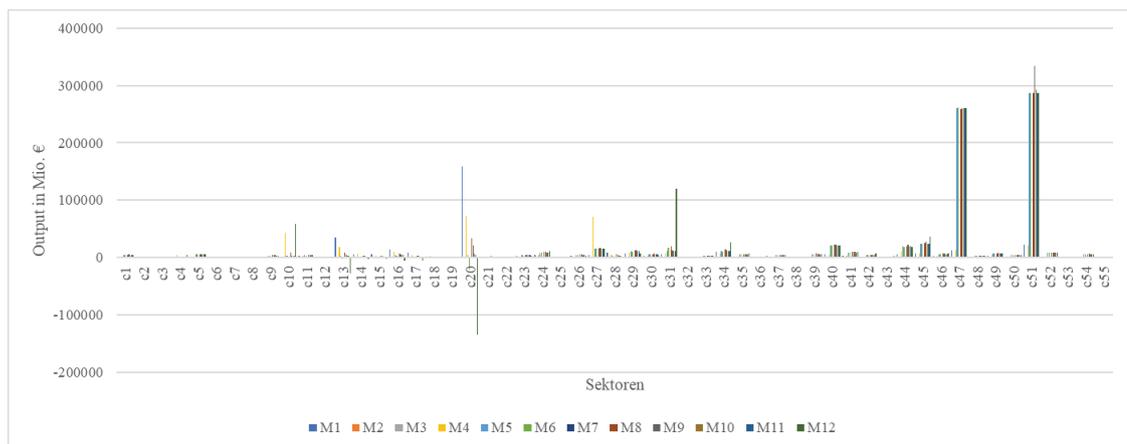
Abbildung 136: Indirekte Output-Wirkung der Maßnahmen in Deutschland je Jahr



Quelle: eigene Berechnung.

Der indirekte Einfluss der Maßnahmen auf den Produktionsoutput ist bei der Gruppe NV über die Lebensdauer jeweils ansteigend. Das Jahr 2021 spielt dabei kaum eine Rolle und es ist gut zu erkennen, dass lediglich bei den Maßnahmen 6 – Umweltspur außerorts und 9 – CO<sub>2</sub>-Maut in diesem Jahr ein signifikanter Einfluss zu sehen ist. Die Maßnahme 9 hat auch indirekt den größten Einfluss auf den Produktionsoutput. Währenddessen ist der Einfluss der Maßnahmen der Gruppe KNV im Jahr 2021 hauptsächlich punktuell. Der resultierende Produktionsschub im Jahr 2021 ist bei den Maßnahmen 1 – Dieserverbot gesamt und 4 – Dieserverbot ohne Autobahn deutlich höher als bei den übrigen zehn Maßnahmen.

Abbildung 137: Indirekter Output in Deutschland je Maßnahme über die Lebensdauer



Quelle: eigene Berechnung.

Für die Maßnahmenumsetzung sind vor allem Güter bzw. Dienstleistungen aus den Sektoren „C47 – Forschungs- und Entwicklungsleistungen“ und „C51 – Öffentliche Verwaltung und Verteidigung; Sozialversicherung“ notwendig. Die Sektoren „C20 – Kraftwagen und Kraftwagenteile“, „C27 – Hochbauarbeiten, Tiefbauarbeiten, Vorb. Baustellen-, Bauinstallations-, Ausbauarbeiten“ und „C31 – Landverkehrs- u. Transportleist. in Rohrfernleit.“ sind über die Maßnahmen hinweg sehr unterschiedlich betroffen. Aus der Maßnahme 6 – Umweltspur außerorts resultiert beispielsweise ein Rückgang der Produktion in Sektor „C20 – Kraftwagen und Kraftwagenteile“. Dies ist auf die geringere Nachfrage nach ausländischen Fahrzeugen zurückzuführen.

Abbildung 138: Indirekte Effekte auf den Produktionsoutput je Sektor über die Lebensdauer in Deutschland

Maßnahme	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
c1	0,12	0,13	0,13	0,10	0,57	0,60	0,13	0,52	0,59	0,57	0,57	0,56
c2	0,01	0,01	0,01	0,04	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
c3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
c4	0,22	1,14	1,14	1,02	0,13	0,13	1,15	0,17	0,14	0,13	0,13	0,48
c5	0,13	0,16	0,16	0,12	0,65	0,68	0,15	0,60	0,67	0,65	0,65	0,66
c6	0,09	0,07	0,07	0,06	0,03	0,03	0,07	0,04	0,04	0,03	0,03	0,00
c7	0,09	0,08	0,08	0,37	0,11	0,11	0,08	0,11	0,11	0,11	0,11	0,10
c8	0,22	0,19	0,19	0,17	0,23	0,23	0,19	0,22	0,23	0,23	0,23	0,18
c9	0,21	0,21	0,21	0,18	0,44	0,45	0,20	0,42	0,45	0,44	0,44	0,44
c10	0,32	17,41	17,42	12,01	0,30	0,43	17,55	1,01	0,34	0,34	0,38	7,45
c11	0,93	0,81	0,81	0,80	0,46	0,42	0,82	0,49	0,49	0,46	0,46	0,19
c12	0,02	0,02	0,02	0,01	0,04	0,04	0,02	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
c13	9,65	6,56	6,56	5,05	0,31	-0,40	6,62	1,02	0,69	0,39	0,29	-3,55
c14	1,61	1,12	1,12	1,97	0,23	0,12	1,14	0,33	0,29	0,24	0,22	-0,38
c15	1,41	1,03	1,03	0,95	0,22	0,13	1,04	0,31	0,27	0,23	0,22	-0,25
c16	3,75	2,72	2,72	2,64	0,56	0,31	2,74	0,80	0,68	0,58	0,55	-0,77
c17	2,37	1,63	1,63	1,13	0,20	0,03	1,64	0,36	0,28	0,22	0,19	-0,74
c18	0,44	0,35	0,35	0,62	0,16	0,15	0,35	0,20	0,17	0,16	0,16	0,05
c19	0,35	0,29	0,29	0,35	0,17	0,15	0,29	0,18	0,18	0,17	0,17	0,07
c20	43,64	29,47	29,46	20,11	0,56	-2,72	29,77	3,87	2,30	0,93	0,48	-17,00
c21	0,09	0,08	0,08	0,07	0,24	0,25	0,08	0,22	0,24	0,24	0,24	0,23
c22	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
c23	0,80	0,67	0,67	0,54	0,45	0,43	0,67	0,48	0,45	0,45	0,45	0,36
c24	1,29	1,60	1,60	1,37	1,08	1,08	1,60	1,13	1,09	1,08	1,08	1,35
c25	0,06	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05
c26	0,83	0,68	0,68	0,59	0,60	0,57	0,68	0,61	0,62	0,60	0,60	0,36
c27	1,07	1,10	1,10	19,92	1,88	1,94	1,12	1,83	1,89	1,87	1,87	2,01
c28	2,47	1,77	1,77	1,31	0,41	0,27	1,79	0,59	0,49	0,43	0,41	-0,16
c29	2,03	1,72	1,72	2,41	1,35	1,30	1,73	1,40	1,40	1,36	1,35	0,93
c30	0,85	0,71	0,71	0,85	0,68	0,67	0,71	0,69	0,70	0,69	0,68	0,51
c31	1,60	2,60	2,60	2,02	1,35	2,12	2,61	2,29	1,37	1,35	1,34	5,11
c32	0,05	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02
c33	0,16	0,14	0,14	0,11	0,34	0,35	0,14	0,32	0,34	0,34	0,34	0,31
c34	2,69	2,47	2,47	2,09	1,33	1,37	2,48	1,60	1,38	1,34	1,33	3,26
c35	0,52	0,50	0,50	0,44	0,70	0,72	0,50	0,69	0,70	0,70	0,70	0,89
c36	0,11	0,12	0,12	0,15	0,21	0,22	0,12	0,21	0,21	0,21	0,21	0,32
c37	0,19	0,20	0,20	0,18	0,48	0,50	0,20	0,45	0,48	0,48	0,48	0,50
c38	0,09	0,10	0,10	0,08	0,14	0,15	0,10	0,14	0,14	0,14	0,14	0,15
c39	0,43	0,42	0,42	0,39	0,76	0,78	0,42	0,73	0,77	0,76	0,76	0,78
c40	1,38	1,33	1,33	1,17	2,59	2,67	1,31	2,47	2,51	2,58	2,59	2,72
c41	0,84	0,85	0,85	0,99	1,13	1,15	0,85	1,10	1,12	1,13	1,13	1,19
c42	0,40	0,42	0,42	0,41	0,50	0,53	0,41	0,52	0,51	0,50	0,50	0,90
c43	0,18	0,18	0,18	0,18	0,22	0,23	0,18	0,22	0,22	0,22	0,22	0,33
c44	1,65	1,51	1,51	2,58	2,39	2,43	1,51	2,30	2,41	2,39	2,39	2,33
c45	2,03	2,15	2,15	1,95	2,98	3,03	2,14	2,88	3,00	2,98	2,98	4,49
c46	0,82	0,74	0,74	0,78	0,74	0,74	0,74	0,75	0,73	0,74	0,74	0,81
c47	3,56	4,93	4,93	3,35	32,56	34,31	4,54	29,52	28,77	32,01	32,63	32,84
c48	0,29	0,32	0,32	0,25	0,30	0,30	0,32	0,30	0,30	0,30	0,30	0,28
c49	0,83	0,78	0,78	1,22	0,85	0,86	0,78	0,85	0,87	0,85	0,85	0,95
e50	0,34	0,34	0,34	0,29	0,46	0,47	0,33	0,45	0,46	0,46	0,46	0,47
e51	6,13	7,39	7,39	5,90	35,81	37,52	7,18	32,63	36,85	35,80	35,80	36,17
e52	0,27	0,29	0,29	0,21	1,04	1,08	0,28	0,95	0,96	1,03	1,04	1,02
e53	0,04	0,04	0,04	0,03	0,16	0,17	0,04	0,15	0,15	0,16	0,16	0,16
e54	0,26	0,29	0,29	0,29	0,70	0,73	0,29	0,66	0,71	0,70	0,70	0,73
e55	0,04	0,04	0,04	0,04	0,07	0,07	0,04	0,07	0,07	0,07	0,07	0,08

Quelle: eigene Berechnung.

Betrachtet man die Maßnahmen einzeln, so ist bei der Maßnahme 1 – Dieselverbot gesamt ein Anstieg der Produktion in Sektor „C20 – Kraftwagen und Kraftwagenteile“ um rund 159 Mrd. Euro zu beobachten. Dieser Anstieg macht 44 % des Gesamteffektes auf den Produktionsoutput dieser Maßnahme aus (siehe Abbildung 138). Auch der Sektor „C13 – Gummi- und Kunststoffwaren“ ist mit einem Anteil von 10 % am Produktionszuwachs betroffen. Mit einem Anteil von 6 % am Zuwachs des Produktionsoutputs profitiert der Sektor „C51 – Öffentliche Verwaltung und Verteidigung; Sozialversicherung“ ebenfalls von der Maßnahmenumsetzung. Somit sind rund 40 % des Output-Effektes auf die übrigen 52 Sektoren verteilt. Die Verteilung ist schlüssig, da bei dieser Maßnahme viele Fahrzeuge ersetzt werden und somit sehr viele neue Fahrzeuge produziert werden müssen.

Zusätzlich kann der Staat hohe zusätzliche Steuereinnahmen aufgrund der Fahrzeugverkäufe generieren. Insgesamt verursacht die Maßnahme indirekt eine Produktionssteigerung im Wert von knapp 365 Mrd. Euro in Deutschland.

Genau wie Maßnahme 1 verursachen auch die Maßnahmen 2 und 3 den höchsten Produktionsanstieg im Sektor „C20 – Kraftwagen und Kraftwagenteile“. Rund 29 % des Nachfrageeffektes der beiden Maßnahmen entfallen auf diesen Sektor. Dies entspricht bei der Maßnahme 2 – Dieserverbot Innenstadt einem Produktionsanstieg von rund 1,7 Mrd. Euro und bei der Maßnahme 3 (DV – Stadtgebiet München) einem Produktionsanstieg von rund 1,5 Mrd. Euro. Weitere 17 % des Nachfrageeffektes beider Maßnahmen entfallen auf den Sektor „C10 – Kokerei- und Mineralölerzeugnisse“. Damit ist dieser Sektor wesentlich stärker betroffen als bei Maßnahme 1. Die Verteilung auf die Sektoren decken sich über das gesamte Modell hinweg, sodass sie auch bei der weiteren Analyse gemeinsam betrachtet werden. Dies ist auf die Ähnlichkeit der Berechnungsmethodik beider Maßnahmen zurückzuführen. Interessant ist, dass der Sektor „C13 – Gummi- und Kunststoffwaren“ bei diesen beiden Maßnahmen weniger stark vom Nachfrageschub betroffen ist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei diesen beiden Maßnahmen das Ausland keine neuen Fahrzeuge anschaffen muss und eher kleinere Fahrzeuge betroffen sind. Zudem ist der Verbrauch von neuen Dieselfahrzeugen, wie bereits in Kapitel 6 beschrieben, teilweise höher als bei alten, sodass hier auch ein Produktionszuwachs an Mineralölerzeugnissen notwendig ist. Insgesamt bewirkt die Maßnahme 2 einen Produktionsschub in Höhe von rund 5,8 Mrd. Euro und die Maßnahme 3 einen in Höhe von 5,1 Mrd. Euro.

Die Maßnahme 4 – Dieserverbot ohne Autobahn verursacht ebenfalls mit einem Anteil von 20 % den größten Nachfrageeffekt im Sektor „C20 – Kraftwagen und Kraftwagenteile“. Dies entspricht rund 71,9 Mrd. Euro. Auch der Sektor „C27 – Hochbauarbeiten, Tiefbauarbeiten, Vorb. Baustellen-, Bauinstallations-, Ausbauarbeiten“ ist mit knapp 20 % stark vom Nachfrageeffekt betroffen – deutlich stärker als bei den vorangegangenen Maßnahmen. Dies ist auf den erheblichen Zubau von Verteilzentren zurückzuführen. Der Sektor „C10 – Kokerei- und Mineralölerzeugnisse“ ist mit 12 % ebenfalls vom Produktionseffekt betroffen. Wie bei den vorangegangenen Maßnahmen ist dies auf den höheren Kraftstoffverbrauch neuerer Modelle zurückzuführen. Insgesamt ist auf diese Maßnahme ein indirekter Produktionseffekt in Deutschland von mehr als 357 Mrd. Euro zurückzuführen. Damit ist der Produktionseffekt nahezu genauso hoch wie bei der Maßnahme 1, die sich allerdings auf alle Straßen bezieht. Auch an dieser Stelle kann dies mit dem Bau von Verteilzentren begründet werden.

Die unterschiedliche Wirkungsweise der beiden Gruppen wurde bereits erwähnt. Im Gegensatz zu den vorangegangenen Maßnahmen sind bei der Maßnahme 5 – Umweltspur innerorts die Sektoren „C51 – Öffentliche Verwaltung und Verteidigung; Sozialversicherung“ mit 36 % und „C47 – Forschungs- und Entwicklungsleistungen“ mit 33 % vom Produktionseffekt am stärksten betroffen. Beide Sektoren zusammen umfassen bereits knapp 70 % des gesamten Effektes der Maßnahme. Die Sektoren „C40 – IT- und Informationsdienstleistungen“ und „C45 – DL der Rechts-, Steuer- und Unternehmensberatung“ sind mit jeweils 3 % mäßig betroffen. Insgesamt liegt der Produktionseffekt bei dieser Maßnahme bei knapp 801 Mrd. Euro. Somit hat diese Maßnahme, obwohl sie sich lediglich auf eine Stadt bezieht, einen höheren Produktionseffekt als die Maßnahmen 1 und 4, die sich beide auf Gesamtdeutschland beziehen.

Genau wie bei der Maßnahme 5 sind bei der Maßnahme 6 – Umweltspur außerorts die Sektoren „C51 – Öffentliche Verwaltung und Verteidigung; Sozialversicherung“ (38 %) und „C47 – Forschungs- und Entwicklungsleistungen“ (34 %) am stärksten betroffen. Währenddessen wirken sich die fehlenden Investitionen besonders auf den Sektor „C20 – Kraftwagen und Kraftwagenteile“ (-3 %) aus. Die Zeiteinsparungen durch diese Maßnahme sorgen somit für eine geringere Nachfrage nach Gütern bzw. Vorleistungen aus diesen Produktionssektoren. Insgesamt liegt der indirekte Produktionseffekt der Maßnahme 6 in Deutschland bei rund 763 Mrd. Euro über die Lebensdauer.

Die Maßnahme 7 – Umweltzone Kiel bewirkt ähnliche Veränderungen wie die anderen Maßnahmen aus der Gruppe KNV. Der Sektor „C20 – Kraftwagen und Kraftwagenteile“ ist mit einem Anteil von 30 % der am stärksten betroffene Sektor bezüglich des Produktionseffektes. Der Sektor „C10 – Kokerei- und Mineralölerzeugnisse“ liegt mit einem Anteil von 18 % an zweiter Stelle. Die Sektoren „C13 – Gummi- und Kunststoffwaren“ und „C51 – Öffentliche Verwaltung und Verteidigung; Sozialversicherung“ liegen mit jeweils 7 % an dritter Stelle. Die vier Sektoren zusammen umfassen somit 62 % der notwendigen Vorleistungen der Maßnahme. Insgesamt verursacht die Umsetzung der Maßnahme einen indirekten Produktionseffekt von rund 0,21 Mrd. Euro in Deutschland.

Wie bei den Maßnahmen 5 und 6 profitieren auch bei der Maßnahme 8 – Bonus-Malus-System die Sektoren „C51 – Öffentliche Verwaltung und Verteidigung; Sozialversicherung“ mit 33 % und „C47 – Forschungs- und Entwicklungsleistungen“ mit 30 % am stärksten von dem ausgelösten Produktionseffekt. Mit deutlichem Abstand gewinnt der Sektor „C20 – Kraftwagen und Kraftwagenteile“ mit einem Anteil von 4 % ebenfalls. Während die Sektoren C47 und C51 jeweils Vorleistungen im Wert von über 250 Mrd.

Euro produzieren, liegt der Sektor C20 mit rund 40 Mrd. Euro jedoch deutlich darunter. Alle anderen Sektoren liegen bei 0 bis 30 Mrd. Euro. Insgesamt liefert die Maßnahme einen indirekten Produktionseffekt von knapp 879 Mrd. Euro in Deutschland über die Lebensdauer.

Die Maßnahme 9 – CO<sub>2</sub>-Maut ähnelt hinsichtlich des resultierenden Produktionseffektes stark der Maßnahme 8 – Bonus-Malus-System. Der Sektor C47 hat einen Anteil von 29 % und der Sektor C51 hat einen Anteil von 37 % an den zusätzlichen Vorleistungen durch die Maßnahme. Diese gewinnen Vorleistungen in Höhe von 261 Mrd. Euro (C47) und 335 Mrd. Euro (C51). Insgesamt liefert die Maßnahme einen indirekten Produktionseffekt von rund 908 Mrd. Euro in Deutschland über die Lebensdauer.

Die Verteilung des Produktionseffektes der Maßnahme 10 – CO<sub>2</sub>-Steuer ähnelt ebenfalls der der Maßnahme 8. Alle Sektoren liegen bei Vorleistungen in Höhe von 0 bis 30 Mrd. Euro, außer den Sektoren „C47 – Forschungs- und Entwicklungsleistungen“ (261 Mrd. €) und „C51 – Öffentliche Verwaltung und Verteidigung; Sozialversicherung“ (292 Mrd. €). Beide Sektoren zusammen umfassen somit bereits 68 % der Vorleistungen dieser Maßnahme. Die Maßnahme bewirkt insgesamt einen indirekten Produktionsschub in Höhe von 816 Mrd. Euro.

Die Maßnahme 11 – City-Maut weist hinsichtlich der Wirkungsweise des Produktionseffektes eine hohe Ähnlichkeit mit den vorangegangenen Maßnahmen auf. Insgesamt liegt der indirekte Produktionswert in Deutschland bei knapp 800 Mrd. Euro.

Ähnlich wie bei den vorangegangenen Maßnahmen liegen die Sektoren „C47 – Forschungs- und Entwicklungsleistungen“ (33 %) und „C51 – Öffentliche Verwaltung und Verteidigung; Sozialversicherung“ (36 %) auch bei der Maßnahme 12 – CO<sub>2</sub>-Ausweis mit einem deutlich höheren Anteil am Produktionseffekt vor den anderen Sektoren, wenn auch ihr prozentualer Anteil an den gesamten Vorleistungen deutlich geringer ist. Der Sektor „C31 – Landverkehrs- u. Transportleist. in Rohrfernleit.“ hat mit 15 % einen deutlich höheren Anteil an den für die Nachfrage notwendigen Vorleistungen. Dies ist mit der teilweisen Verlagerung auf die Schiene zu begründen. Auch der Sektor „C10 – Kokerei- und Mineralölerzeugnisse“ gewinnt mit 7 % deutlich stärker von der Maßnahme als bei den vorangegangenen Maßnahmen. Der Sektor „C20 – Kraftwagen und Kraftwagenteile“ verliert aufgrund der Maßnahme 17 % des Outputs. Dies ist aufgrund des starken Rückgangs an Fahrzeugen, der dieser Maßnahme zugrunde liegt, nicht verwunderlich. Insgesamt erhöht die Maßnahme die Produktion indirekt um einen Wert von 795 Mrd. Euro.

Betrachtet man die aus den Maßnahmen im Ausland resultierenden Auswirkungen der Nachfrageerhöhung, so erkennt man bezüglich der zeitlichen Wirkungsweise eine hohe optische Ähnlichkeit mit den Auswirkungen in Deutschland. Die Wirkungssteigerungen von Jahr zu Jahr bei der Gruppe NV sind jedoch schwächer, sodass die Kurven flacher sind. Bezüglich der Gruppe KNV liegen die Maßnahmen 1 und 4 bei der Wirkung in Deutschland nahezu gleichauf, während im Ausland die Maßnahme 1 deutlich stärker wirkt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Maßnahme 1 sich auch auf die Nachfrage aus dem Ausland auswirkt. Insgesamt resultieren aus der Umsetzung der Maßnahmen indirekte Produktionsanstiege im Ausland in Höhe von 449 Mrd. Euro bei Maßnahme 1 – Dieserverbot gesamt, 6,8 Mrd. Euro bei 2 – Dieserverbot Innenstadt, 5,9 Mrd. Euro bei 3 – Dieserverbot Stadtgebiet München, 311 Mrd. Euro bei Maßnahme 4 – Dieserverbot ohne Autobahn, 793 Mrd. Euro bei 5 – Umweltspur innerorts, 732 Mrd. Euro bei Maßnahme 6 – Umweltspur außerorts, 0,25 Mrd. Euro bei Maßnahme 7 – Umweltzone Kiel, 875 Mrd. Euro bei Maßnahme 8 – Bonus-Malus-System, 961 Mrd. Euro bei Maßnahme 9 – CO<sub>2</sub>-Maut, 814 Mrd. Euro bei Maßnahme 10 – CO<sub>2</sub>-Steuer, 791 Mrd. Euro bei Maßnahme 11 – City-Maut und 541 Mrd. Euro bei Maßnahme 12 – CO<sub>2</sub>-Ausweis. Generell gilt somit, dass die Maßnahmen mit einer Nachfrageverschiebung in den Folgejahren zu einer höheren Produktionsleistung führen, unabhängig davon, ob diese Maßnahmen lediglich auf eine Stadt oder auf Gesamtdeutschland wirken.

Anders als in Deutschland ist im Ausland der Sektor „C5 – Nahrungs- u. Futtermittel, Getränke, Tabakerzeugn.“ besonders stark von den Investitionen betroffen. Auch aus dem Sektor „C1 – Erz. d. Landwirtschaft, Jagd und Dienstleistungen“ werden einige Vorleistungen aufgrund der Investitionen benötigt. Besonders beim Sektor „C34 – Lagereleist., sonst. Dienstleistungen f. d. Verkehr“ haben die Maßnahmen einen unterschiedlichen Einfluss.

Abbildung 139: Indirekte Effekte auf den Produktionsoutput je Sektor über die Lebensdauer im Ausland

Maßnahme	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
c1	2,07	2,45	2,45	2,32	13,45	14,50	2,38	12,18	13,01	13,33	13,46	19,13
c2	0,15	0,16	0,16	0,19	0,24	0,24	0,16	0,23	0,23	0,24	0,24	0,28
c3	0,11	0,14	0,14	0,13	0,81	0,87	0,13	0,73	0,78	0,80	0,81	1,16
c4	4,55	14,20	14,20	13,81	2,91	2,85	14,25	3,57	2,97	2,95	2,96	9,32
c5	4,52	6,12	6,12	5,69	42,13	45,62	5,88	37,96	40,67	41,74	42,16	61,18
c6	0,76	0,65	0,65	0,68	0,42	0,38	0,66	0,45	0,43	0,42	0,41	0,17
c7	0,42	0,44	0,44	0,60	0,30	0,29	0,44	0,32	0,31	0,30	0,30	0,27
c8	0,61	0,58	0,58	0,64	1,06	1,10	0,58	1,01	1,04	1,06	1,06	1,27
c9	0,22	0,21	0,21	0,21	0,24	0,25	0,21	0,24	0,24	0,24	0,24	0,26
c10	2,99	4,29	4,29	4,32	1,93	1,86	4,30	2,12	1,97	1,95	1,94	2,58
c11	5,32	5,05	5,05	5,47	2,93	2,71	5,06	3,18	3,02	2,96	2,93	1,51
c12	0,22	0,22	0,22	0,23	0,27	0,27	0,22	0,27	0,26	0,27	0,27	0,29
c13	1,77	1,51	1,51	1,84	1,23	1,18	1,51	1,28	1,25	1,24	1,23	0,80
c14	0,84	0,74	0,74	1,03	0,49	0,46	0,74	0,53	0,51	0,50	0,49	0,26
c15	3,76	3,34	3,34	3,69	1,25	1,01	3,35	1,51	1,34	1,27	1,24	-0,26
c16	2,09	1,85	1,85	2,24	0,98	0,88	1,86	1,09	1,02	0,99	0,98	0,29
c17	1,82	1,61	1,61	1,68	1,19	1,13	1,61	1,25	1,17	1,19	1,19	0,76
c18	1,26	1,11	1,11	1,56	0,55	0,49	1,12	0,63	0,57	0,56	0,55	0,14
c19	2,37	2,26	2,26	2,30	0,82	0,67	2,26	0,98	0,88	0,83	0,81	-0,04
c20	5,50	4,10	4,10	3,83	0,71	0,25	4,13	1,17	0,91	0,76	0,70	-2,65
c21	0,40	0,35	0,35	0,35	0,25	0,24	0,35	0,27	0,26	0,26	0,25	0,16
c22	0,36	0,32	0,32	0,33	0,22	0,21	0,32	0,22	0,22	0,22	0,22	0,12
c23	0,19	0,20	0,20	0,20	0,16	0,15	0,20	0,16	0,15	0,16	0,16	0,18
c24	2,90	3,38	3,38	3,44	2,33	2,28	3,38	2,42	2,35	2,34	2,33	2,42
c25	0,17	0,15	0,15	0,15	0,12	0,12	0,15	0,12	0,12	0,12	0,12	0,08
c26	6,01	4,34	4,34	4,05	0,28	-0,28	4,37	0,82	0,55	0,34	0,27	-3,96
c27	1,95	1,62	1,62	1,55	0,56	0,43	1,63	0,70	0,63	0,58	0,56	-0,40
c28	0,56	0,49	0,49	0,49	0,41	0,40	0,49	0,42	0,41	0,41	0,41	0,36
c29	2,95	2,91	2,91	2,95	4,22	4,33	2,90	4,07	4,16	4,20	4,22	4,80
c30	0,91	0,89	0,89	0,89	1,47	1,52	0,88	1,41	1,45	1,46	1,47	1,72
c31	3,98	3,38	3,38	3,30	2,14	1,96	3,39	2,31	2,22	2,16	2,13	0,82
c32	0,55	0,54	0,54	0,53	0,38	0,37	0,54	0,41	0,38	0,38	0,38	0,30
c33	0,44	0,38	0,38	0,37	0,35	0,34	0,38	0,35	0,35	0,35	0,35	0,26
c34	22,46	16,19	16,18	14,91	0,98	-1,11	16,29	3,03	1,99	1,21	0,93	-14,65
c35	0,31	0,25	0,25	0,24	0,13	0,11	0,25	0,14	0,14	0,13	0,13	0,01
c36	0,87	0,83	0,83	0,86	1,34	1,38	0,83	1,29	1,31	1,33	1,34	1,62
c37	0,28	0,28	0,28	0,30	0,49	0,51	0,28	0,47	0,45	0,48	0,49	0,65
c38	0,16	0,15	0,15	0,15	0,16	0,16	0,15	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
c39	0,67	0,60	0,60	0,60	0,48	0,46	0,60	0,50	0,49	0,48	0,48	0,35
c40	0,70	0,76	0,76	0,78	0,77	0,78	0,76	0,77	0,74	0,76	0,77	0,95
c41	1,98	1,97	1,97	2,00	1,65	1,62	1,97	1,69	1,65	1,65	1,65	1,52
c42	0,59	0,52	0,52	0,52	0,36	0,35	0,52	0,40	0,37	0,36	0,36	0,28
c43	0,28	0,26	0,26	0,27	0,20	0,21	0,27	0,24	0,20	0,20	0,20	0,22
c44	1,16	0,98	0,98	0,96	0,67	0,62	0,98	0,71	0,69	0,67	0,67	0,30
c45	2,06	2,07	2,07	2,10	2,00	1,99	2,07	2,01	1,98	1,99	2,00	2,10
c46	0,59	0,54	0,54	0,57	0,40	0,38	0,54	0,42	0,40	0,40	0,40	0,31
c47	0,22	0,22	0,22	0,22	0,30	0,31	0,22	0,29	0,28	0,30	0,30	0,35
c48	0,38	0,38	0,38	0,39	0,43	0,43	0,38	0,43	0,42	0,43	0,43	0,48
c49	2,17	1,91	1,91	1,91	1,37	1,30	1,91	1,45	1,39	1,38	1,37	0,86
c50	0,57	0,52	0,52	0,52	0,38	0,36	0,53	0,40	0,38	0,38	0,38	0,26
c51	0,73	0,65	0,65	0,68	0,51	0,49	0,65	0,53	0,51	0,51	0,51	0,39
c52	0,17	0,15	0,15	0,15	0,10	0,09	0,15	0,11	0,10	0,10	0,10	0,05
c53	0,08	0,07	0,07	0,07	0,06	0,06	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05
c54	0,82	0,72	0,72	0,70	0,42	0,39	0,72	0,46	0,44	0,43	0,42	0,16
c55	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01

Quelle: eigene Berechnung.

Anders als in Deutschland ist im Ausland bei der Gruppe KNV der Sektor „C34 – Lagereileist., sonst. Dienstleistungen f. d. Verkehr“ stark vom Produktionsschub betroffen. Auch aus den Sektoren „C26 – DL d. Abwasser-, Abfallentsorgung u. Rückgewinnung“, „C20 – Kraftwagen und Kraftwagenteile“ und „C11 – Chemische Erzeugnisse“ wird aufgrund der Maßnahmen stark nachgefragt. Unterschiede gibt es in dieser Gruppe bei den Sektoren C4 und C5. Der Sektor „C4 – Kohle, Erdöl und Erdgas, Erze, Steine und Erden, sonstige Bergbauverz., DL“ ist beispielsweise bei den Maßnahmen 2 und 3 mit 14 % am zweitstärksten betroffen. Der Sektor „C5 – Nahrungs- u. Futtermittel, Getränke, Tabakerzeugn.“ profitiert mit 6 % Produktionszuwachs bei den beiden Maßnahmen ebenfalls. Die Maßnahmen der Gruppe NV verursachen demgegenüber einen deutlichen Produktionszuwachs im Sektor „C5 – Nahrungs- u. Futtermittel, Getränke, Tabakerzeugn.“. Auch

aus den Sektoren „C1 – Erz. d. Landwirtschaft, Jagd und Dienstleistungen“ und „C29 – Großhandelsleistungen (oh. Handelsleistungen m. Kfz)“ sind Vorleistungen notwendig. Innerhalb der Gruppe sind die Wirkungsweisen im Ausland relativ ähnlich. Bei den Maßnahmen 6 – Umweltspur außerorts und 12 – CO<sub>2</sub>-Ausweis ist jedoch der Sektor „C34 – Lagereileist., sonst. Dienstleistungen f. d. Verkehr“ mit –1 % (M6) bzw. –15 % (M12) negativ betroffen. Dies ist auf die Zeiteinsparung bzw. die geringere Verkehrslast zurückzuführen.

### 7.2.2 Beschäftigung

Aus der Analyse ergeben sich die zusätzlichen Erwerbstätigen, die in Deutschland bzw. im Ausland benötigt werden, um die zusätzliche Nachfrage je Jahr bzw. über die gesamte Lebensdauer bedienen zu können. Zunächst wird der Gesamteffekt auf die Erwerbstätigen über die Lebensdauer betrachtet. Hierbei ist es wichtig zu beachten, dass es sich in der Analyse um Personenjahre (PJ) handelt. Diese bezeichnen die Arbeitsdauer, die eine Person durchschnittlich während eines Jahres arbeitet. Eine Aussage über die Höhe von dauerhaft Beschäftigten kann an dieser Stelle nicht getroffen werden, da dies u. a. von den langfristigen Nachfrageimpulsen abhängt. Diese Analyse ist nicht Bestandteil der Untersuchung. Für einen ersten Indikator zum Vergleich, kann jedoch der Gesamteffekt pro Maßnahme durch die Lebensdauer geteilt werden. So kann der Beschäftigungseffekt für diese 10 Jahre der Lebensdauer geschätzt werden.

Abbildung 140: Beschäftigungseffekte in Tsd. PJ

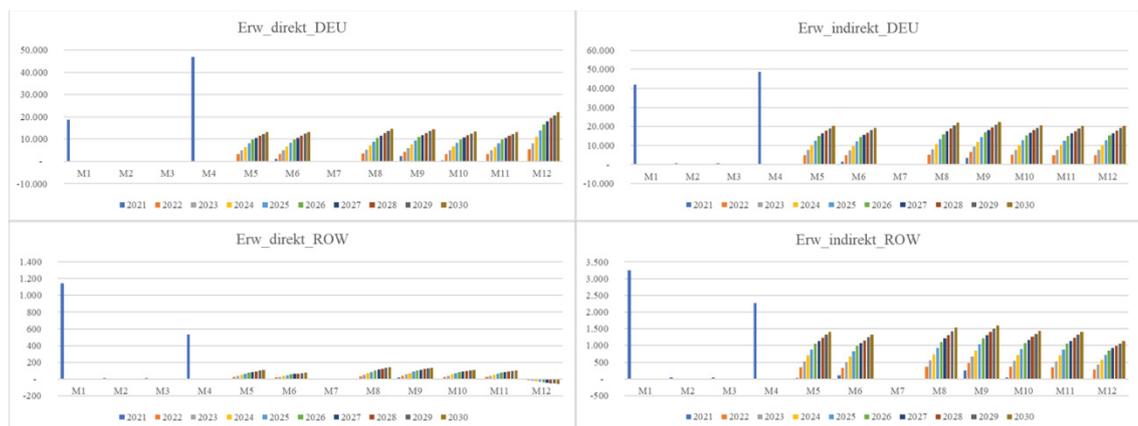
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
direkt_DEU	18.750	306	269	46.817	80.697	82.113	11	87.912	93.621	82.159	80.512	135.375
indirekt_DEU	41.983	701	616	48.669	124.045	119.982	26	132.525	143.626	126.478	123.866	124.834
direkt_ROW	1.145	13	11	530	655	481	0	861	880	689	650	- 335
indirekt_ROW	3.250	48	43	2.277	8.644	8.236	2	9.181	10.313	8.847	8.625	6.933
<b>DEU_gesamt</b>	60.733	1.007	885	95.486	204.742	202.095	37	220.436	237.246	208.637	204.377	260.208
<b>ROW_gesamt</b>	4.396	61	54	2.808	9.299	8.716	2	10.041	11.193	9.536	9.275	6.598
<b>Gesamt</b>	65.128	1.068	939	98.294	214.041	210.811	39	230.478	248.439	218.173	213.652	266.807
<b>Gesamt pro Jahr</b>	6.513	107	94	9.829	21.404	21.081	4	23.048	24.844	21.817	21.365	26.681

Quelle: eigene Berechnung.

Insgesamt ist beispielsweise mit einem zusätzlichen Beschäftigungseffekt in Höhe von 6,5 Mio. Erwerbstätigen bei der Umsetzung der Maßnahme 1 – Dieselverbot gesamt zu rechnen. Die Maßnahmen, die mit einer Nachfrageverschiebung einhergehen, führen zu einem generell höheren Niveau langfristiger Beschäftigung als die Maßnahmen ohne Nachfrageverschiebung. Die Maßnahme 12 – CO<sub>2</sub>-Ausweis liefert dabei den höchsten Beschäftigungszuwachs mit zusätzlich knapp 27 Mio. Erwerbstätigen.

Auch bei den Erwerbstätigen – direkt wie indirekt – ist zu erkennen, dass sowohl bei den Maßnahmen mit Dieserverbot und Umweltzone der Nachfrageschub nach mehr Erwerbstätigen jeweils im Jahr 2021 liegt. Während die Nachfrage nach direkten Erwerbstätigen zwischen Maßnahme 1 und 4 deutlich unterschiedlich stark ausfällt, liegt sie bei den indirekten Erwerbstätigen sehr nah beieinander. Währenddessen steigert sich die Nachfrage bei den übrigen Maßnahmen von Jahr zu Jahr. Betrachtet man die 10 000er Marke, so ist zu erkennen, dass alle der jährlich steigenden Maßnahmen mehr indirekte Erwerbstätige als direkte Erwerbstätige verursacht. Relativ ausgeglichen sieht es lediglich bei den Maßnahmen 12 – CO<sub>2</sub>-Ausweis und 6 – Umweltpur außerorts aus. Die Maßnahmen 2 – Dieserverbot Innenstadt, 3 – Dieserverbot Stadtgebiet München und 7 – Umweltzone Kiel sind in der Abbildung 141 kaum zu erkennen. Sie weisen jedoch eine ähnliche Verteilung wie die Maßnahme 1 – Dieserverbot gesamt auf.

Abbildung 141: Beschäftigungseffekte pro Maßnahme je Jahr



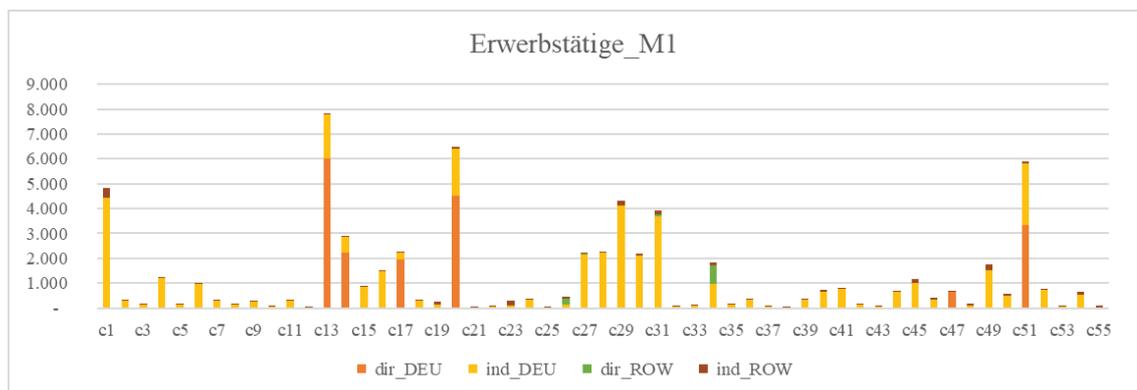
Quelle: eigene Berechnung.

Genau wie in Deutschland verursachen die Maßnahmen der Gruppe KNV bei den Erwerbstätigen im Ausland – direkt wie indirekt – einen Nachfrageschub, der jeweils im Jahr 2021 liegt. Während die Nachfrage nach direkten und indirekten Erwerbstätigen in Deutschland bei Maßnahme 4 – Dieserverbot ohne Autobahn stärker war als bei der Maßnahme 1, ist dies im Ausland genau umgekehrt. Dies ist wieder darauf zurückzuführen, dass die Maßnahme 1 im Gegensatz zur Maßnahme 4 die Nachfrage im Ausland beeinträchtigt. Währenddessen steigert sich die Nachfrage nach Erwerbstätigen bei den übrigen Maßnahmen genau wie in Deutschland von Jahr zu Jahr. Hierbei ist jedoch zu erkennen, dass der indirekte Anteil deutlich höher als der direkte Anteil ist. Darüber hinaus erfolgt bei der Maßnahme 12 ein negativer direkter Nachfragezuwachs an Erwerbstätigen. Währenddessen ist die indirekte Nachfrage bei dieser Maßnahme jedoch positiv. Die Tatsache,

dass bei der Gruppe KNV die Nachfrage nach Erwerbstätigen nur im Jahr 2021 stattfindet, führt dazu, dass es aufgrund der Maßnahmen lediglich zu kurzzeitiger Beschäftigung kommt, während die übrigen Maßnahmen zu längerfristiger Beschäftigung führen.

Der direkte Erwerbstätigen effekt in Deutschland von Maßnahme 1 betrifft besonders die Sektoren „C13 – Gummi- und Kunststoffwaren“ (32 %), „C20 – Kraftwagen und Kraftwagenteile“ (24 %) und „C51 – Öffentliche Verwaltung und Verteidigung; Sozialversicherung“ (18 %). Indirekt sind die Erwerbstätigen in Deutschland besonders im Sektor „C1 – Erz. d. Landwirtschaft, Jagd und Dienstleistungen“ mit einem Anteil von 11 % am stärksten betroffen. Interessanterweise ist der Sektor „C47 – Forschungs- und Entwicklungsleistungen“ zwar deutlich direkt, aber kaum indirekt betroffen.

Abbildung 142: Direkter und indirekter Beschäftigungseffekt der Maßnahme 1 für beide Regionen im Vergleich



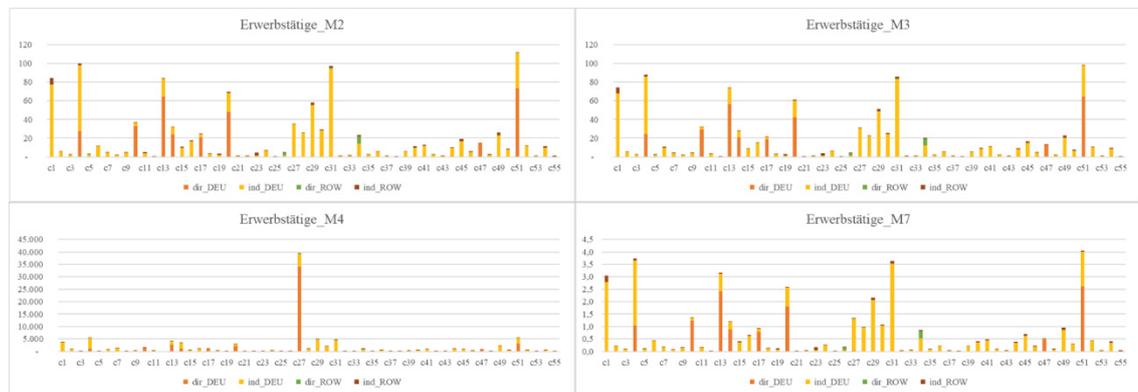
Quelle: eigene Berechnung.

Die Maßnahme 1 hat im Ausland mit einem Anteil von 66 % einen sehr hohen direkten Einfluss auf den Sektor „C34 – Lagereleist., sonst. Dienstleistungen f. d. Verkehr“. Der größte indirekte Einfluss im Ausland ist im Sektor „C1 – Erz. d. Landwirtschaft, Jagd und Dienstleistungen“ mit 12 % zu erkennen.

Auch bei den Erwerbstätigen ist eine Aufteilung in die beiden Gruppen mit Nachfrageverschiebung (NV) und ohne Nachfrageverschiebung (KNV) sinnvoll, da sie sich hinsichtlich ihres Verhaltens stark ähneln. Daher werden im Folgenden lediglich die Unterschiede hervorgehoben. Zusätzlich zu den direkt betroffenen Sektoren der Maßnahme 1 hat die Maßnahme 2 jedoch, wie auch bei der Produktion, einen deutlichen direkten Effekt in Deutschland, nämlich auf die Sektoren „C4 – Kohle, Erdöl und Erdgas, Erze, Steine und Erden, sonstige Bergbauerz., DL“ (9 %) und „C10 – Kokerei- und Mineral-

ölerzeugnisse“ (11 %). Im Gegensatz zur Maßnahme 1 hat die Maßnahme 2 den deutlichsten indirekten Einfluss in Deutschland, nämlich auf den Sektor „C31 – Landverkehrs- u. Transportleist. in Rohrfernleit.“ mit einem Anteil von 13 %.

Abbildung 143: Direkter und indirekter Beschäftigungseffekt der Maßnahmen 2, 3, 4 und 7 für beide Regionen im Vergleich

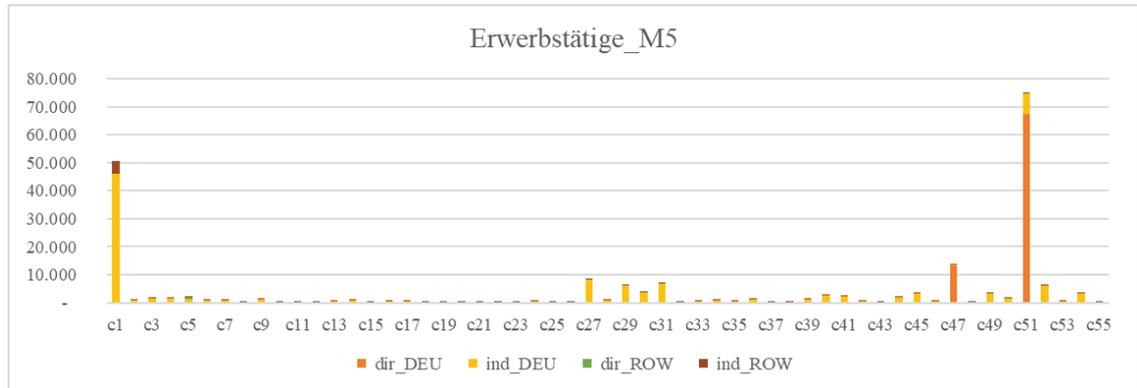


Quelle: eigene Berechnung.

Die Maßnahme 4 – Dieserverbot ohne Autobahn hat direkt lediglich einen sehr hohen Einfluss auf den Sektor „C27 – Hochbauarbeiten, Tiefbauarbeiten, Vorb. Baustellen-, Bauinstallations-, Ausbauarbeiten“ (73 %) in Deutschland. Andere Sektoren werden nur geringfügig direkt beeinflusst. Indirekt sind die Sektoren „C27 – Hochbauarbeiten, Tiefbauarbeiten, Vorb. Baustellen-, Bauinstallations-, Ausbauarbeiten“ (11 %), „C29 – Großhandelsleistungen (oh. Handelsleistungen m. Kfz)“ (10 %) und „C31 – Landverkehrs- u. Transportleist. in Rohrfernleit.“ (9 %) am stärksten vom Beschäftigungszuwachs betroffen.

Die Maßnahme 5 – Umweltspur innerorts hat wie bei der Produktion auch bezüglich der Beschäftigung in Deutschland lediglich einen sehr hohen direkten Einfluss auf die Sektoren „C47 – Forschungs- und Entwicklungsleistungen“ (16 %) und „C51 – Öffentliche Verwaltung und Verteidigung; Sozialversicherung“ (83 %). Somit entfallen bereits 99 % der direkten Effekte auf diese beiden Sektoren. Andere Sektoren werden nicht direkt beeinflusst. Indirekt ist der Sektor „C1 – Erz. d. Landwirtschaft, Jagd und Dienstleistungen“ mit 37 % in Deutschland am stärksten betroffen. Die Maßnahme hat auch im Ausland lediglich einen direkten erkennbaren Einfluss auf den Sektor „C5 – Nahrungs- u. Futtermittel, Getränke, Tabakerzeugn.“ (99 %). Der größte indirekte Einfluss im Ausland besteht im Sektor „C1 – Erz. d. Landwirtschaft, Jagd und Dienstleistungen“ mit einem Anteil von 53 %.

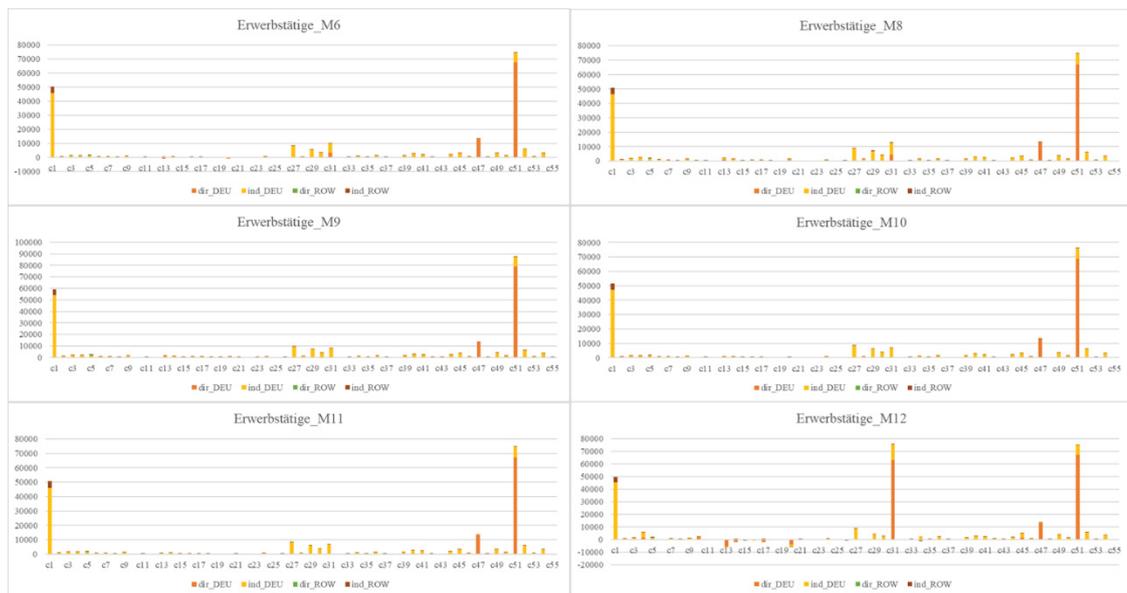
Abbildung 144: Direkter und indirekter Beschäftigungseffekt der Maßnahme 5 für beide Regionen im Vergleich



Quelle: eigene Berechnung.

Die Maßnahme 6 – Umweltpur außerorts weist eine hohe Ähnlichkeit mit Maßnahme 5 auf. Unterschiedlich ist jedoch die negative direkte Nachfrage in Deutschland nach Erwerbstätigen in den Sektoren „C13 – Gummi- und Kunststoffwaren“ (-1 %) und „C20 – Kraftwagen und Kraftwagenteile“ (-1 %). Die Sektoren „C24 – Elektr. Strom, DL d. Elektriz., Wärme- u. Kälteversorg.“ (-24%), „C26 – DL d. Abwasser-, Abfallentsorgung u. Rückgewinnung“ (-8 %), „C27 – Hochbauarbeiten, Tiefbauarbeiten, Vorb. Baustellen-, Bauinstallations-, Ausbauarbeiten“ (-1 %) und „C31 – Landverkehrs- u. Transportleist. in Rohrfernleit.“ (-3 %) sind im Ausland ebenfalls direkt negativ von der Maßnahme betroffen. Bei der Maßnahme 7 – Umweltzone Kiel werden dieselben Sektoren wie in den Maßnahmen 2 bis 4 beeinflusst.

Abbildung 145: Direkter und indirekter Beschäftigungseffekt der Maßnahmen 6, 8, 9, 10, 11 und 12 für beide Regionen im Vergleich



Quelle: eigene Berechnung.

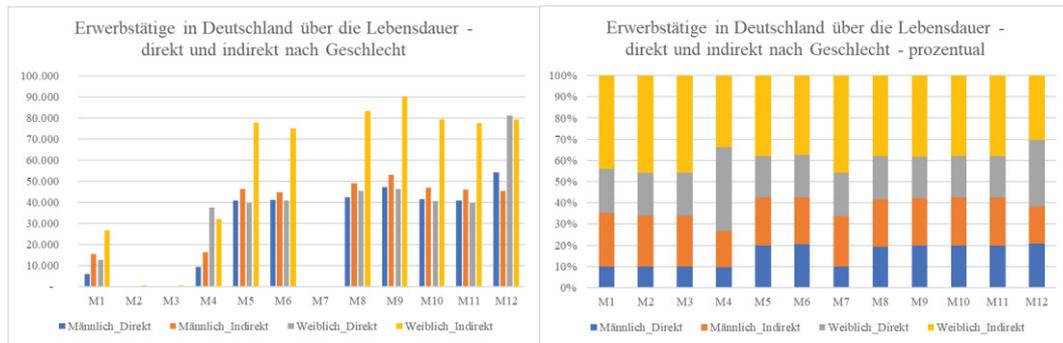
Die Maßnahme 8 – Bonus-Malus-System hat in Deutschland einen sehr hohen direkten Einfluss auf den Sektor „C51 – Öffentliche Verwaltung und Verteidigung; Sozialversicherung“ (76 %). Einen weiteren nennenswerten Einfluss hat die Maßnahme auf die Sektoren „C47 – Forschungs- und Entwicklungsleistungen“ (15 %) und „C31 – Landverkehrs- u. Transportleist. in Rohrfernleit.“ (5 %). Somit entfallen auf diese drei Sektoren bereits 96 % des direkten Effektes. Indirekt ist der Sektor „C1 – Erz. d. Landwirtschaft, Jagd und Dienstleistungen“ mit 35 % am stärksten betroffen. Auch die Sektoren „C27 – Hochbauarbeiten, Tiefbauarbeiten, Vorb. Baustellen-, Bauinstallations-, Ausbaurbeiten“ (7 %), „C29 – Großhandelsleistungen (oh. Handelsleistungen m. Kfz)“ (5 %), „C31 – Landverkehrs- u. Transportleist. in Rohrfernleit.“ (6 %), „C51 – Öffentliche Verwaltung und Verteidigung; Sozialversicherung“ (6 %) und „C52 – Erziehungs- und Unterrichtsdienstleistungen“ (5 %) sind mäßig betroffen. Die übrigen 36 % verteilen sich somit auf die restlichen 49 Sektoren. Die Maßnahme hat im Ausland mit 75 % einen deutlichen direkten Effekt auf den Sektor „C5 – Nahrungs- u. Futtermittel, Getränke, Tabakerzeugn.“. Der größte indirekte Einfluss besteht im Sektor „C1 – Erz. d. Landwirtschaft, Jagd und Dienstleistungen“ mit 49 %.

Die Maßnahmen 9 – CO<sub>2</sub>-Maut, 10 – CO<sub>2</sub>-Steuer und 11 – City-Maut weisen im Wesentlichen eine ähnliche Verteilung des Beschäftigungseffektes auf die Sektoren auf wie die Maßnahme 8.

Die Maßnahme 12 – CO<sub>2</sub>-Ausweis hat einen hohen direkten Einfluss in Deutschland auf die Sektoren „C31 – Landverkehrs- u. Transportleist. in Rohrfernleit.“ mit 47 % und „C51 – Öffentliche Verwaltung und Verteidigung; Sozialversicherung“ mit 50 %. Neben diesem positiven Einfluss bewirkt die Maßnahme jedoch auch eine negative direkte Nachfrage in Deutschland nach Erwerbstätigen in den Sektoren „C13 – Gummi- und Kunststoffwaren“ (-4 %) und „C20 – Kraftwagen und Kraftwagenteile“ (-3 %). Der größte indirekte Einfluss ist im Sektor „C1 – Erz. d. Landwirtschaft, Jagd und Dienstleistungen“ mit 36 % zu erkennen. Im Ausland wird der Sektor „C34 – Lagereleist., sonst. Dienstleistungen f. d. Verkehr“ mit einem Anteil von 200 % am stärksten direkt positiv beeinflusst. Der Sektor „C5 – Nahrungs- u. Futtermittel, Getränke, Tabakerzeugn.“ wird demgegenüber mit -195 % am stärksten negativ beeinflusst.

Die aufgrund der Nachfrage hinzukommenden Erwerbstätigen können auch nach Geschlecht aufgeteilt werden. Dabei wird – wie auch zuvor – nach direkten und indirekten Effekten unterschieden. Am meisten profitieren die weiblichen Arbeitskräfte von den Maßnahmen. Der männliche (direkt und indirekt) Anteil liegt bei der Maßnahme 4 sogar bei weniger als 30 %. Auch bei den Maßnahmen 1, 2, 3, 7 und 12 liegt der Anteil der männlichen Arbeitskräfte bei unter 40 %. Dagegen liegt er bei den anderen Maßnahmen zwischen 40 und 50 %, also immer noch bei weniger als der Hälfte. Bei den meisten Maßnahmen ist – egal ob männlich oder weiblich – der direkte Anteil geringer als der indirekte. Auch hier bildet die Maßnahme 4 – Dieserverbot ohne Autobahn eine der Ausnahmen. Dort ist zumindest bei den weiblichen Arbeitskräften der direkte Anteil an Erwerbstätigen höher als bei den indirekten. Dagegen ist bei der Maßnahme 12 – CO<sub>2</sub>-Ausweis der Anteil der direkten Arbeitskräfte höher als der der indirekten, egal ob männlich oder weiblich. Bei den meisten Maßnahmen ist der Anteil der indirekten männlichen Erwerbstätigen, die aufgrund der Maßnahmen hinzukommen, höher als der Anteil direkter weiblicher Erwerbstätiger. Ausnahmen sind dabei die Maßnahmen 4 und 12. Dort liegt der Anteil weiblicher direkter Erwerbstätiger weit höher als der Anteil indirekter männlicher Erwerbstätiger.

Abbildung 146: Beschäftigungseffekte nach Geschlecht



Quelle: eigene Berechnung.

Die Verteilungen der Arbeitnehmer und der Erwerbstätigen verlaufen in den meisten Fällen synchron, da die Arbeitnehmer bei den Erwerbstätigen inkludiert sind. Jedoch gibt es einige Sektoren, in denen der Anteil der Arbeitnehmer an den Erwerbstätigen proportional hoch oder niedrig sein kann. So weichen die betroffenen Sektoren in manchen Fällen bei den Arbeitnehmern gegenüber den Erwerbstätigen ab. Die größten Unterschiede werden im folgenden Abschnitt skizziert.

Bei den Maßnahmen der Gruppe KNV sind die Sektoren „C51 – Öffentliche Verwaltung und Verteidigung; Sozialversicherung“ und „C20 – Kraftwagen und Kraftwagenteile“ bei den Arbeitnehmern im direkten Einfluss in Deutschland etwas stärker betroffen als bei den Erwerbstätigen. Der Sektor „C13 – Gummi- und Kunststoffwaren“ ist bei diesen Maßnahmen demgegenüber schwächer betroffen. Indirekt sind die Sektoren „C49 – Sonst. freiberufl., wiss., techn. u. veterinärmed. DL“ und „C51 – Öffentliche Verwaltung und Verteidigung; Sozialversicherung“ bei den Arbeitnehmern stärker betroffen als bei den Erwerbstätigen. Die Sektoren „C1 – Erz. d. Landwirtschaft, Jagd und Dienstleistungen“ und „C29 – Großhandelsleistungen (oh. Handelsleistungen m. Kfz)“ sind indirekt ebenfalls schwächer betroffen. Im Ausland ist der Sektor „C34 – Lagereleist., sonst. Dienstleistungen f. d. Verkehr“ etwas weniger direkt betroffen, während der Sektor „C26 – DL d. Abwasser-, Abfallentsorgung u. Rückgewinnung“ stärker betroffen ist. Die Sektoren „C5 – Nahrungs- u. Futtermittel, Getränke, Tabakerzeugn.“ und „C31 – Landverkehrs- u. Transportleist. in Rohrfernleit.“ verlieren ebenfalls an Einfluss. Die Sektoren „C23 – Rep., Instandh. u. Inst. v. Maschinen u. Ausrüst.“ und „C49 – Sonst. freiberufl., wiss., techn. u. veterinärmed. DL“ sind bei den Arbeitnehmern im Ausland indirekt relativ stärker betroffen, als bei den Erwerbstätigen. Die Sektoren C1 und C29 sind schwächer betroffen.

Bei den Maßnahmen der Gruppe NV sind direkt in Deutschland die größten Abweichungen bei den Sektoren „C47 – Forschungs- und Entwicklungsleistungen“ und „C51 – Öffentliche Verwaltung und Verteidigung; Sozialversicherung“ zu erkennen. Während der Sektor C47 stärker betroffen ist, verliert der Sektor C51 bei vielen Maßnahmen. Bei den Maßnahmen 8 und 12 gewinnt dieser Sektor jedoch ebenfalls. Indirekt weicht der Sektor „C1 – Erz. d. Landwirtschaft, Jagd und Dienstleistungen“ bei den Arbeitnehmern stark gegenüber den Erwerbstätigen ab, es resultiert eine bis zu 16 % (Maßnahme 6) geringere Betroffenheit bei den Arbeitnehmern. Der Sektor „C29 – Großhandelsleistungen (oh. Handelsleistungen m. Kfz)“ verliert ebenfalls geringfügig. Im Ausland sind bei den Arbeitnehmern gegenüber den Erwerbstätigen die Sektoren „C26 – DL d. Abwasser-, Abfallentsorgung u. Rückgewinnung“ und „C34 – Lagereileist., sonst. Dienstleistungen f. d. Verkehr“ direkt stärker und der Sektor „C5 – Nahrungs- u. Futtermittel, Getränke, Tabakerzeugn.“ schwächer betroffen. Ausnahmen sind an dieser Stelle die Maßnahmen 6 (28 %) und 12 (114 %), bei denen der Sektor C5 deutlich stärker betroffen ist. Indirekt ist der Sektor C1 bei den Arbeitnehmern sogar um bis zu 19 % schwächer betroffen.

### 7.2.3 Wertschöpfung

Einer der Multiplikatoren ist die Bruttowertschöpfung. Diese umfasst das Arbeitnehmerentgelt im Inland, die sonstigen Produktionsabgaben abzüglich der sonstigen Subventionen, Abschreibungen und des Nettobetriebsüberschusses. Die Bruttowertschöpfung zeigt den im Produktionsprozess geschaffenen Mehrwert auf, also den Produktionswert, vermindert um den Wert der Vorleistungen (Destatis, 2010).

Abbildung 147: Übersicht der gesamten Bruttowertschöpfung über die Lebensdauer je Maßnahme

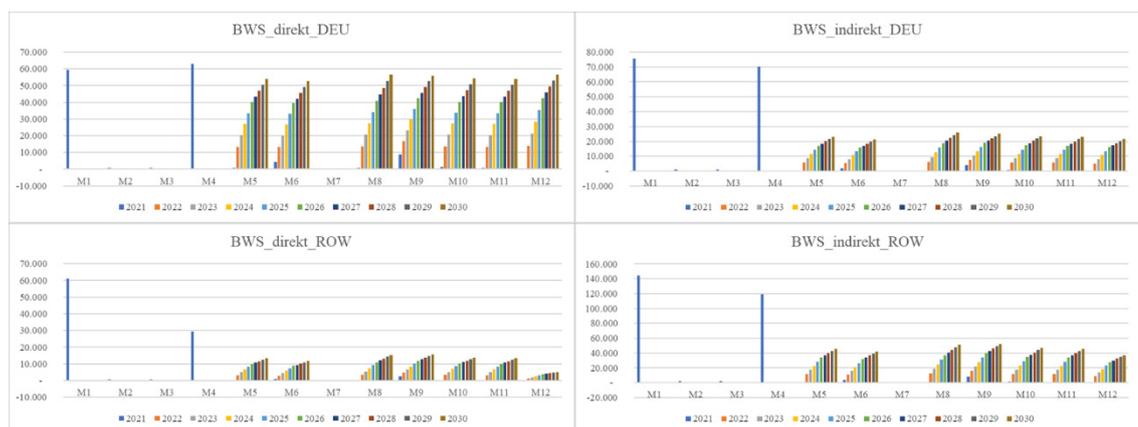
<i>in Mio. €</i>	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
direkt DEU	59.410	857	753	62.883	329.936	326.798	31	339.541	360.869	333.717	329.700	346.472
indirekt DEU	75.563	1.083	952	70.078	140.524	132.291	40	156.343	161.814	143.435	140.249	131.935
direkt ROW	61.248	700	615	29.457	81.862	72.953	26	91.996	101.570	84.443	81.501	30.903
indirekt ROW	144.657	2.562	2.253	119.120	280.184	261.469	95	308.774	337.612	287.630	279.765	225.979
<b>DEU_gesamt</b>	<b>134.973</b>	<b>1.939</b>	<b>1.705</b>	<b>132.961</b>	<b>470.460</b>	<b>459.090</b>	<b>71</b>	<b>495.883</b>	<b>522.684</b>	<b>477.152</b>	<b>469.949</b>	<b>478.406</b>
<b>ROW_gesamt</b>	<b>205.905</b>	<b>3.262</b>	<b>2.868</b>	<b>148.577</b>	<b>362.046</b>	<b>334.422</b>	<b>121</b>	<b>400.770</b>	<b>439.182</b>	<b>372.072</b>	<b>361.266</b>	<b>256.883</b>
<b>Gesamt</b>	<b>340.878</b>	<b>5.201</b>	<b>4.573</b>	<b>281.539</b>	<b>832.506</b>	<b>793.512</b>	<b>192</b>	<b>896.653</b>	<b>961.866</b>	<b>849.224</b>	<b>831.215</b>	<b>735.289</b>

Quelle: eigene Berechnung.

Die Maßnahme 9 – CO<sub>2</sub>-Maut liefert mit 962 Mrd. Euro den höchsten Mehrwert über die Lebensdauer von 10 Jahren. Insgesamt führen die Maßnahmen mit einer Nachfrageverschiebung (Gruppe NV) zu einem höheren Niveau der Bruttowertschöpfung, kumuliert über die Betrachtungsdauer.

Genau wie beim Produktionsoutput und den Erwerbstätigen konzentriert sich der Zuwachs bei den Maßnahmen der Gruppe KNV auf das Jahr 2021 und es gibt somit dort nur einen starken Ausschlag in diesem Jahr. Bei diesen Maßnahmen ist in Deutschland der indirekte Einfluss ein wenig größer als der direkte Einfluss. Während die Maßnahme 1 – Dieserverbot gesamt einen etwas geringeren direkten Einfluss hat, liegt der Einfluss indirekt etwas höher als bei der Maßnahme 4 – Dieserverbot ohne Autobahn. Dagegen ist der Einfluss der übrigen Maßnahmen im Jahr 2021 sehr gering. Die Maßnahme 9 – CO<sub>2</sub>-Maut hat von den Maßnahmen der Gruppe NV den stärksten Einfluss im ersten Jahr. Bei den Maßnahmen der Gruppe NV steigt der Einfluss jedes Jahr an. Der direkte Einfluss ist wesentlich größer als der indirekte Einfluss bei diesen Maßnahmen.

Abbildung 148: Jahresscharfe direkte und indirekte Bruttowertschöpfung in Deutschland bzw. im Ausland aufgrund der Maßnahmen



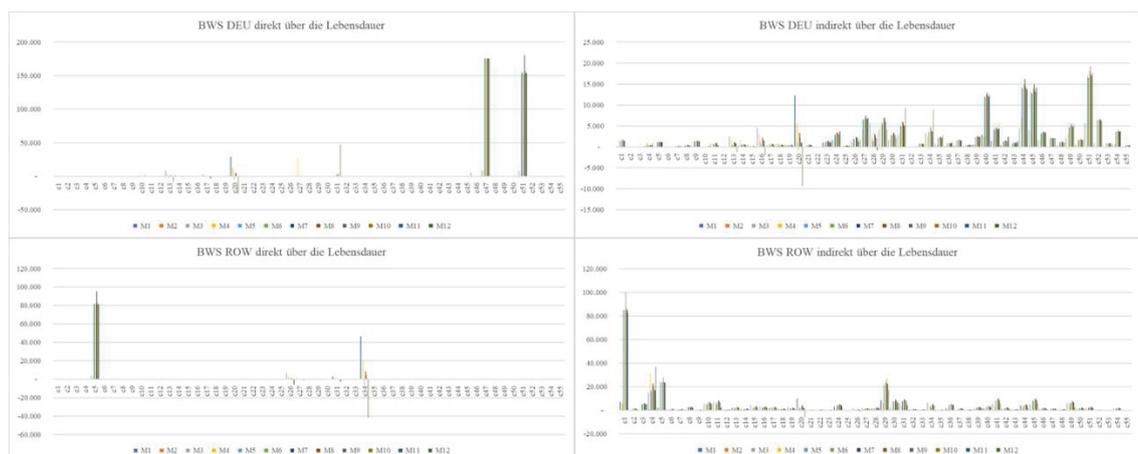
Quelle: eigene Berechnung.

Bei den Maßnahmen der Gruppe KNV ist der indirekte Einfluss im Ausland deutlich größer als der direkte Einfluss. Der Einfluss der Maßnahme 1 ist im Ausland indirekt mehr als doppelt so hoch wie der direkte, während der Einfluss bei der Maßnahme 4 sich von direkt zu indirekt vervierfacht. Bei den Maßnahmen der Gruppe NV ist der indirekte Einfluss im Ausland wesentlich größer als der direkte Einfluss, im Gegensatz zur Deutschland-Betrachtung.

Die Maßnahmen führen insgesamt zu stärkeren direkten Änderungen der Bruttowertschöpfung in Deutschland in den Sektoren „C47 – Forschungs- und Entwicklungsleistungen“ und „C51 – Öffentliche Verwaltung und Verteidigung; Sozialversicherung“. Weitere direkt betroffene Sektoren sind – je nach Maßnahme – die Sektoren „C13 – Gummi- und Kunststoffwaren“, „C20 – Kraftwagen und Kraftwagenteile“, „C27 – Hochbauarbeiten, Tiefbauarbeiten, Vorb. Baustellen-, Bauinstallations-, Ausbauarbeiten“ und „C31 –

Landverkehrs- u. Transportleist. in Rohrfernleit.“. Indirekt sind fast alle Sektoren von den Maßnahmen betroffen. Stärker betroffen sind jedoch die Sektoren „C51 – Öffentliche Verwaltung und Verteidigung; Sozialversicherung“, „C45 – DL der Rechts-, Steuer- und Unternehmensberatung“, „C44 – Dienstleistungen d. Grundstücks- u. Wohnungswesens“, „C40 – IT- und Informationsdienstleistungen“, „C20 – Kraftwagen und Kraftwagenteile“, „C27 – Hochbauarbeiten, Tiefbauarbeiten, Vorb. Baustellen-, Bauinstallations-, Ausbaurbeiten“, „C29 – Großhandelsleistungen (oh. Handelsleistungen m. Kfz)“, „C31 – Landverkehrs- u. Transportleist. in Rohrfernleit.“ und „C34 – Lagereileist., sonst. Dienstleistungen f. d. Verkehr“. Im Ausland sind die Sektoren „C5 – Nahrungs- u. Futtermittel, Getränke, Tabakerzeugn.“ und „C34 – Lagereileist., sonst. Dienstleistungen f. d. Verkehr“ am stärksten über alle Maßnahmen hinweg betroffen.

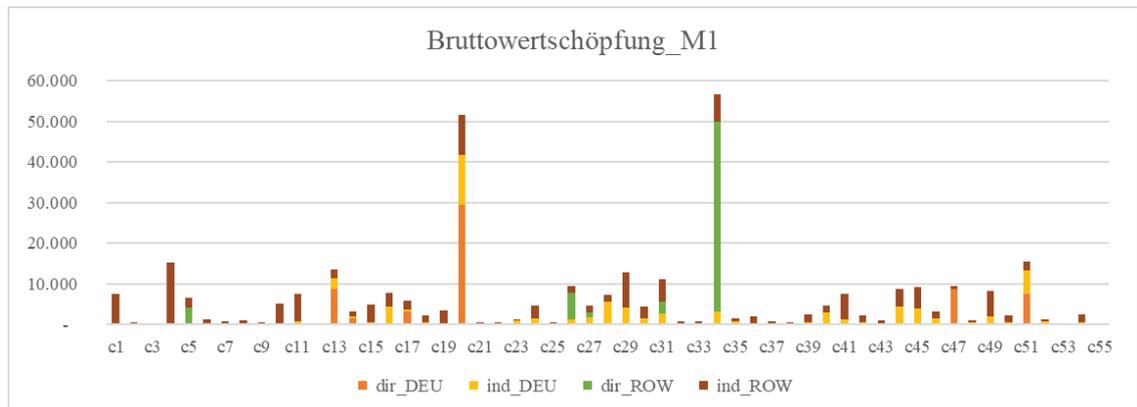
Abbildung 149: Direkte und indirekte Bruttowertschöpfung über die Lebensdauer je Maßnahme und je Sektor



Quelle: eigene Berechnung.

Bei der Maßnahme 1 – Dieserverbot gesamt ist der Sektor „C20 – Kraftwagen und Kraftwagenteile“ sowohl direkt, mit 50 %, als auch indirekt, mit 16 %, in Deutschland von der Steigerung der Bruttowertschöpfung am stärksten betroffen. Im Ausland hat die Maßnahme 1 eine starke direkte Wirkung auf die Bruttowertschöpfung im Sektor „C34 – Lagereileist., sonst. Dienstleistungen f. d. Verkehr“ (76 %). Indirekt ist der Sektor „C4 – Kohle, Erdöl und Erdgas, Erze, Steine und Erden, sonstige Bergbauerz., DL“ (10 %) am stärksten betroffen.

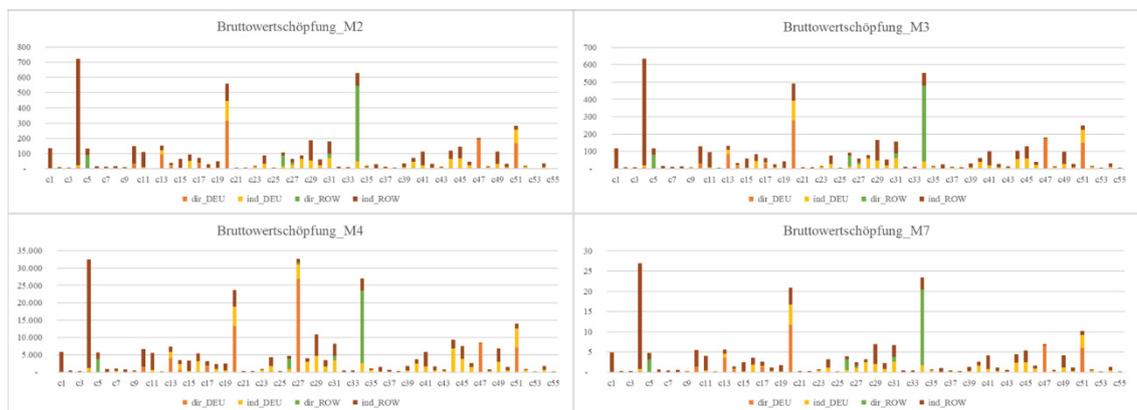
Abbildung 150: Direkter und indirekter Bruttowertschöpfungseffekt der Maßnahme 1 für beide Regionen im Vergleich



Quelle: eigene Berechnung.

Die Maßnahmen der Gruppe KNV weisen auch hinsichtlich der Bruttowertschöpfung sehr ähnliche Profile auf. Die größte Abweichung stellt der Sektor „C4 – Kohle, Erdöl und Erdgas, Erze, Steine und Erden, sonstige Bergbauernz., DL“ dar. Dieser ist bei den Maßnahmen 2, 3, 4 und 7 sehr viel stärker im Ausland von dem indirekten Wertschöpfungsanstieg betroffen. Darüber hinaus weist die Maßnahme 4 – Dieserverbot ohne Autobahn erneut eine Abweichung im Sektor „C27 – Hochbauarbeiten, Tiefbauarbeiten, Vorb. Baustellen-, Bauinstallations-, Ausbaurbeiten“ auf. Besonders in Deutschland ist der Sektor mit 43 % am stärksten direkt von der steigenden Bruttowertschöpfung der Maßnahme 4 betroffen.

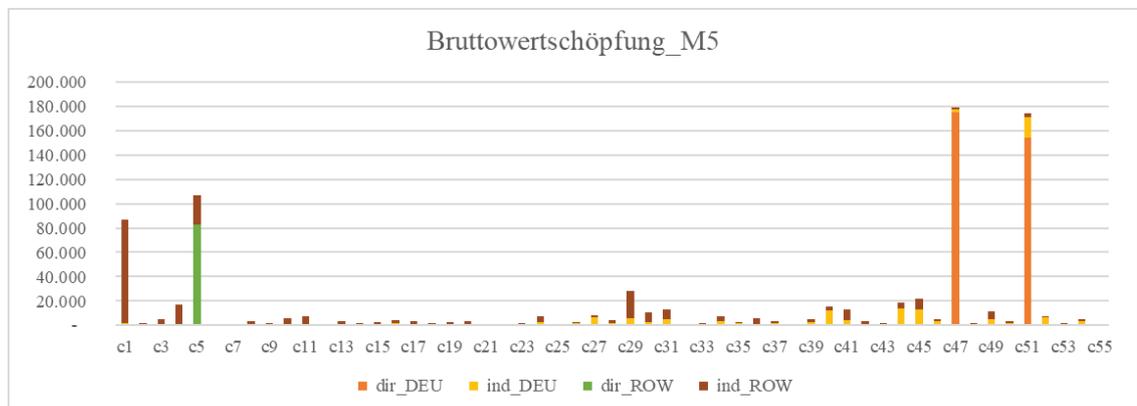
Abbildung 151: Direkter und indirekter Bruttowertschöpfungseffekt der Maßnahmen 2, 3, 4 und 7 für beide Regionen im Vergleich



Quelle: eigene Berechnung.

Bei der Maßnahme 5 – Umweltspur innerorts sind direkt in Deutschland lediglich die Sektoren „C47 – Forschungs- und Entwicklungsleistungen“ (53 %) und „C51 – Öffentliche Verwaltung und Verteidigung; Sozialversicherung“ (47 %) betroffen. Indirekt ist der Sektor „C51 – Öffentliche Verwaltung und Verteidigung; Sozialversicherung“ mit 12 % am stärksten betroffen. Im Ausland hat die Maßnahme 5 lediglich einen Einfluss auf den Sektor „C5 – Nahrungs- u. Futtermittel, Getränke, Tabakerzeugn.“ (100 %). Indirekt ist im Ausland der Sektor „C1 – Erz. d. Landwirtschaft, Jagd und Dienstleistungen“ mit 30 % am stärksten betroffen.

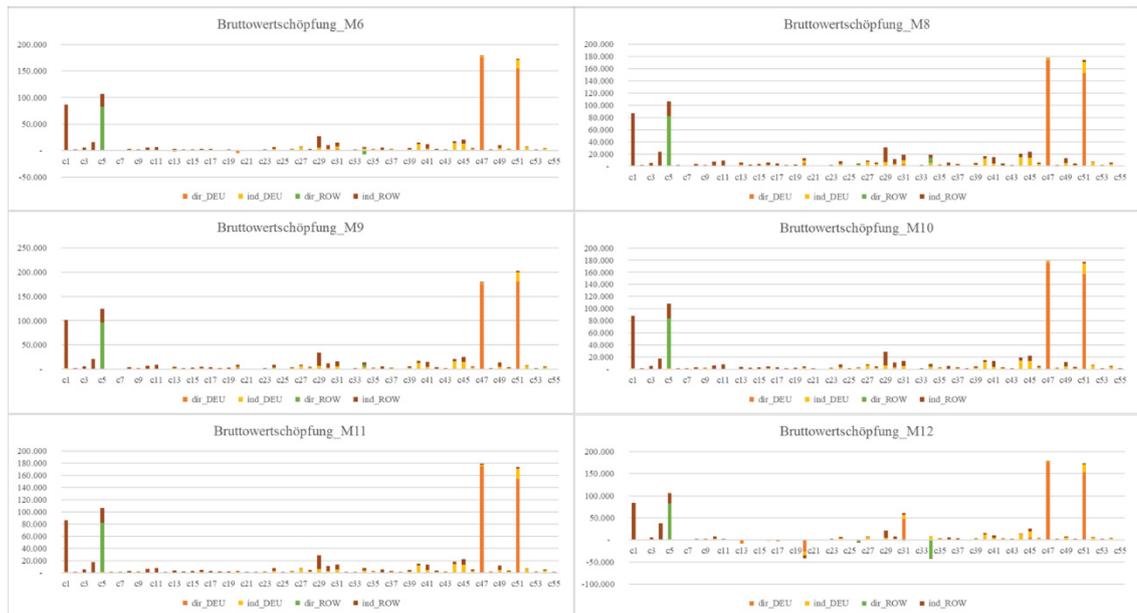
Abbildung 152: Direkter und indirekter Bruttowertschöpfungseffekt der Maßnahme 5 für beide Regionen im Vergleich



Quelle: eigene Berechnung.

Die Sektoren „C20 – Kraftwagen und Kraftwagenteile“ und „C13 – Gummi- und Kunststoffwaren“ sind auch bei den Maßnahmen 6 – Umweltspur außerorts und 12 – CO<sub>2</sub>-Ausweis in Deutschland direkt betroffen, jedoch in diesem Fall negativ. Anders als bei den übrigen Maßnahmen der Gruppe NV ist bei der Maßnahme 12 auch ein stärkerer Anstieg der Bruttowertschöpfung im „C31 – Landverkehrs- u. Transportleist. in Rohrfernleit.“ (14 %) zu erkennen. Der Sektor „C4 – Kohle, Erdöl und Erdgas, Erze, Steine und Erden, sonstige Bergbauernz., DL“ wird mit 16 % im Gegensatz zu den anderen Maßnahmen von der Maßnahme 12 im Ausland ebenfalls sehr stark indirekt beeinflusst.

Abbildung 153: Direkter und indirekter Bruttowertschöpfungseffekt der Maßnahmen 6, 8, 9, 10, 11 und 12 für beide Regionen im Vergleich



Quelle: eigene Berechnung.

Durch den positiven Nachfrageschock steigt nicht nur die Wertschöpfung, sondern damit verbunden steigen auch die Arbeitnehmerentgelte. Diese sind ein Teil der Bruttowertschöpfung, weisen jedoch an der ein oder anderen Stelle ein unterschiedliches Verhalten bezüglich ihrer Reaktion je Sektor auf die Maßnahmen auf. Die größten Unterschiede werden im folgenden Abschnitt skizziert.

Bei den Maßnahmen der Gruppe KNV sind die Sektoren „C47 – Forschungs- und Entwicklungsleistungen“ und „C51 – Öffentliche Verwaltung und Verteidigung; Sozialversicherung“ bei den Arbeitnehmerentgelten direkt in Deutschland relativ etwas stärker betroffen als bei der Bruttowertschöpfung. Der Sektor „C20 – Kraftwagen und Kraftwagenanteile“ ist bei diesen Maßnahmen demgegenüber schwächer betroffen.

Bei den Maßnahmen der Gruppe NV sind direkt in Deutschland die größten Abweichungen bei den Sektoren C47 und C51 zu erkennen. Während der Sektor C47 stärker betroffen ist, verliert der Sektor C51 bei allen Maßnahmen. Über alle Maßnahmen hinweg ist der Sektor „C44 – Dienstleistungen d. Grundstücks- u. Wohnungswesens“ bezüglich der Arbeitnehmerentgelte in Deutschland indirekt schwächer betroffen als bei der Bruttowertschöpfung. Der Sektor C51 ist dafür stärker betroffen.

Im Ausland ist der Sektor „C5 – Nahrungs- u. Futtermittel, Getränke, Tabakerzeugn.“ etwas weniger direkt betroffen, während der Sektor „C26 – DL d. Abwasser-, Abfallentsorgung u. Rückgewinnung“ stärker betroffen ist. Indirekt weicht der Sektor „C4 - Kohle,

Erdöl und Erdgas, Erze, Steine und Erden, sonstige Bergbauverz., DL“ bei den Arbeitnehmerentgelten stark gegenüber der Bruttowertschöpfung ab. Es resultiert eine bis zu 17 % (Maßnahmen 2, 3 und 7) geringere Betroffenheit bei den Arbeitnehmerentgelten.

Des Weiteren lässt sich die Wirkung der Maßnahmen auf das Bruttoinlandsprodukt darstellen. Das Bruttoinlandsprodukt wird als der Produktionswert (zu Herstellungspreisen) minus Vorleistungen (zu Anschaffungspreisen, also Bruttowertschöpfung) plus Nettogütersteuern definiert (Destatis, 2010).

Abbildung 154: Steigerung des Bruttoinlandsproduktes je Maßnahme

	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	Lebensdauer
M1	272.523	22	17	13	8	4	1	1	0	0	272.584
M2	3.929	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3.930
M3	3.453	1	1	0	0	0	0	0	0	0	3.455
M4	268.877	9	7	5	3	1	1	1	1	0	268.899
M5	2.333	38.711	58.519	78.001	97.181	116.085	126.172	136.363	146.363	156.346	956.075
M6	12.400	38.315	57.293	76.006	94.474	112.715	120.544	130.637	140.515	150.397	933.296
M7	142	0	0	0	0	0	0	0	0	0	144
M8	2.022	40.283	60.796	81.111	101.245	120.810	132.551	144.462	156.228	168.027	1.007.533
M9	25.793	49.300	68.689	87.737	106.475	124.928	134.737	144.912	154.855	164.778	1.062.204
M10	4.196	39.843	59.684	79.184	98.370	117.266	127.348	137.754	147.928	158.089	969.662
M11	1.885	38.770	58.553	78.009	97.163	116.040	126.064	136.224	146.194	156.145	955.046
M12	1.379	38.831	59.459	79.731	99.670	119.298	129.174	139.279	149.132	158.975	974.928

Quelle: eigene Berechnung.

Insgesamt lässt sich mit der Maßnahme 9 – CO<sub>2</sub>-Maut eine BIP-Steigerung über die Lebensdauer von rund 1062 Mrd. Euro verzeichnen. Im Jahr 2020 lag das BIP in Deutschland bei insgesamt 3360 Mrd. Euro (Statista, 2021b). Den höchsten Anstieg in einem Jahr würde die Maßnahme 1 – Dieserverbot gesamt im Jahr 2021 verursachen. Dies würde prozentual eine Steigerung des BIP in Deutschland um rund 8 % im Jahr 2021 bedeuten. Während die Maßnahmen der Gruppe KNV lediglich eine kurzzeitige BIP-Steigerung bedeuten, könnte die Maßnahme 8 – Bonus-Malus-System das BIP beispielsweise jedes Jahr erhöhen – mit steigender Tendenz. Im Jahr 2021 würde die Erhöhung lediglich bei 0,1 % liegen, im Jahr 2030 jedoch bereits bei 5 %. Daher muss die Gesamterhöhung der Maßnahmen über die Lebensdauer von 10 Jahren betrachtet werden.

Abbildung 155: Gesamterhöhung des BIP über die Lebensdauer je Maßnahme (in %)

Maßnahme	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
Erhöhung	0,8	0,0	0,0	0,8	2,8	2,8	0,0	3,0	3,2	2,9	2,8	2,9

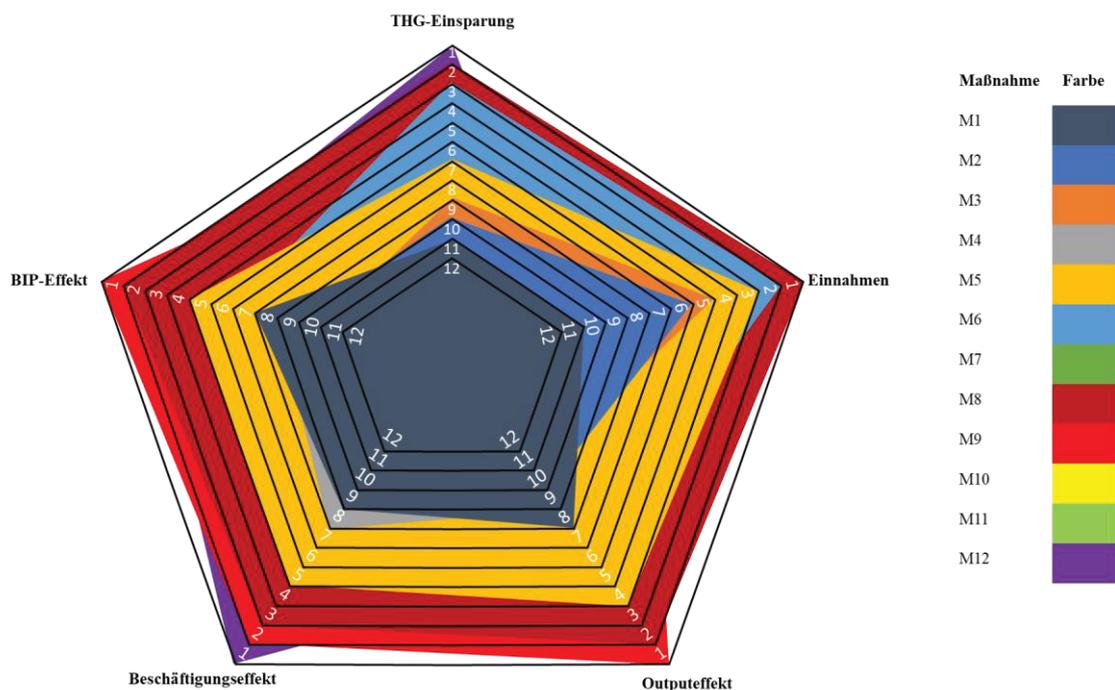
Quelle: eigene Berechnung.

Anhand der Abbildung 155 ist deutlich zu erkennen, dass langfristig die Maßnahmen der Gruppe NV eine deutlich höhere Steigerung des BIP bedeuten würden. Die Maßnahme 9 – CO<sub>2</sub>-Maut liefert insgesamt die höchste Steigerung mit 3,2 % über 10 Jahre.

## 8. Priorisierung der Maßnahmen

Im folgenden Abschnitt werden die Maßnahmen im Hinblick auf die fünf Dimensionen „Treibhausgaseinsparung“, „Einnahmen/negative Kosten“, „Output-Effekt“, „Beschäftigungseffekt“ und „BIP-Effekt“, die sich aus den Kapiteln 6 und 7 ergeben, beurteilt. Zunächst erfolgt eine separate Priorisierung hinsichtlich jeder dieser fünf Dimensionen. Die Priorisierung erfolgt mittels eines Scoring-Ansatzes (EC, 2010). Demnach wird eine Rangfolge der Maßnahmen erstellt und ihnen ein Rang von 1 bis 12 zugewiesen. Die Maßnahmen mit dem kleinsten Rang sind im Sinne des Drei-Säulen-Modells der nachhaltigen Entwicklung zu priorisieren. Dieses Modell geht von der Annahme aus, dass nur durch eine gleichzeitige und gleichberechtigte Rücksichtnahme auf ökologische, wirtschaftliche und soziale Ziele eine nachhaltige Entwicklung erreicht werden kann (Kleine, 2009).

Abbildung 156: Rangfolge der Maßnahmen hinsichtlich der fünf Dimensionen – Gesamtbetrachtung



Quelle: eigene Darstellung.

Nicht alle der betrachteten Maßnahmen haben einen positiven Umwelteffekt. Es gibt jedoch Unterschiede im Ausmaß der Umweltwirkung. Als Indikator für den Beitrag zum Klimaschutz wird die Treibhausgaseinsparung jeder Maßnahme verglichen. Bei dieser

Rangfolge führt die Maßnahme 12 auf dem 1. Rang. Von besonderer Wichtigkeit für die Wirtschaftlichkeit sind die negativen Kosten, also die Einnahmen seitens der betroffenen Akteure. Hierbei führt die Maßnahme 8 zu den höchsten Einnahmen seitens der direkt von den Maßnahmen betroffenen Akteure. Je mehr Outputs für die Durchführung der Maßnahmen erforderlich sind, desto höher ist der wirtschaftliche Gesamteffekt. Der Output-Effekt stellt somit der Reihe nach dar, in welchem Maße die einzelnen Maßnahmen die Nachfrage nach Vorleistungen erhöhen. Der höchste monetäre Wert an Vorleistungen resultiert aus der Maßnahme 9. Die Anzahl der erwerbstätigen Personen, unabhängig von der Art des Beschäftigungsverhältnisses oder der geleisteten Arbeitszeit, wird als Kennzahl zur Messung der Beschäftigungseffekte hinzugezogen. Die Maßnahme 12 führt zu den meisten hinzukommenden Erwerbstätigen im Durchschnitt über die Lebensdauer.

Der BIP-Effekt zeigt die Rangfolge der Maßnahmen hinsichtlich einer Erhöhung der erwirtschafteten Arbeits- und Kapitaleinkommen sowie der Steuern auf, die auf die Umsetzung der Maßnahmen zurückzuführen sind. Aus der Maßnahme 9 resultiert der höchste Beschäftigungszuwachs. Somit bilden die fünf Dimensionen jeweils die unterschiedlichen Ziele einer nachhaltigen Entwicklung, wobei die Kosten/Einnahmen und die Output-Effekte für die ökonomische, der Beschäftigungseffekt und der BIP-Effekt für die soziale und die THG-Einsparung für die ökologische Komponente steht.

Dabei werden die Treibhausgasemissionen sowie deren Einsparung in erster Linie in die ökologische Säule eingeordnet. Jedoch hat dies ebenfalls einen sozialen Effekt im Hinblick auf die Generationengerechtigkeit. Die Generationengerechtigkeit ist auch bei den Kosten ein wichtiger Punkt, denn eine Vermehrung von Schulden ist eine Verlagerung eines Problems in die Zukunft. Das BIP, die Beschäftigung und die Output-Effekte der Maßnahmen lassen sich ebenfalls nicht eindeutig nur zu der sozialen oder der ökonomischen Säule zuordnen. Es ist somit anzumerken, dass an dieser Stelle lediglich stark vereinfacht angenommen wird, dass die Dimensionen nur einer Säule zugeordnet werden. Innerhalb dieser Vereinfachung werden die Dimensionen jeweils zu gleichen Teilen in die Betrachtung eingehen sowie auch die drei Säulen zueinander. Somit wird die THG-Einsparung mit  $1/3$  und alle anderen Dimensionen mit  $1/6$  gewichtet.

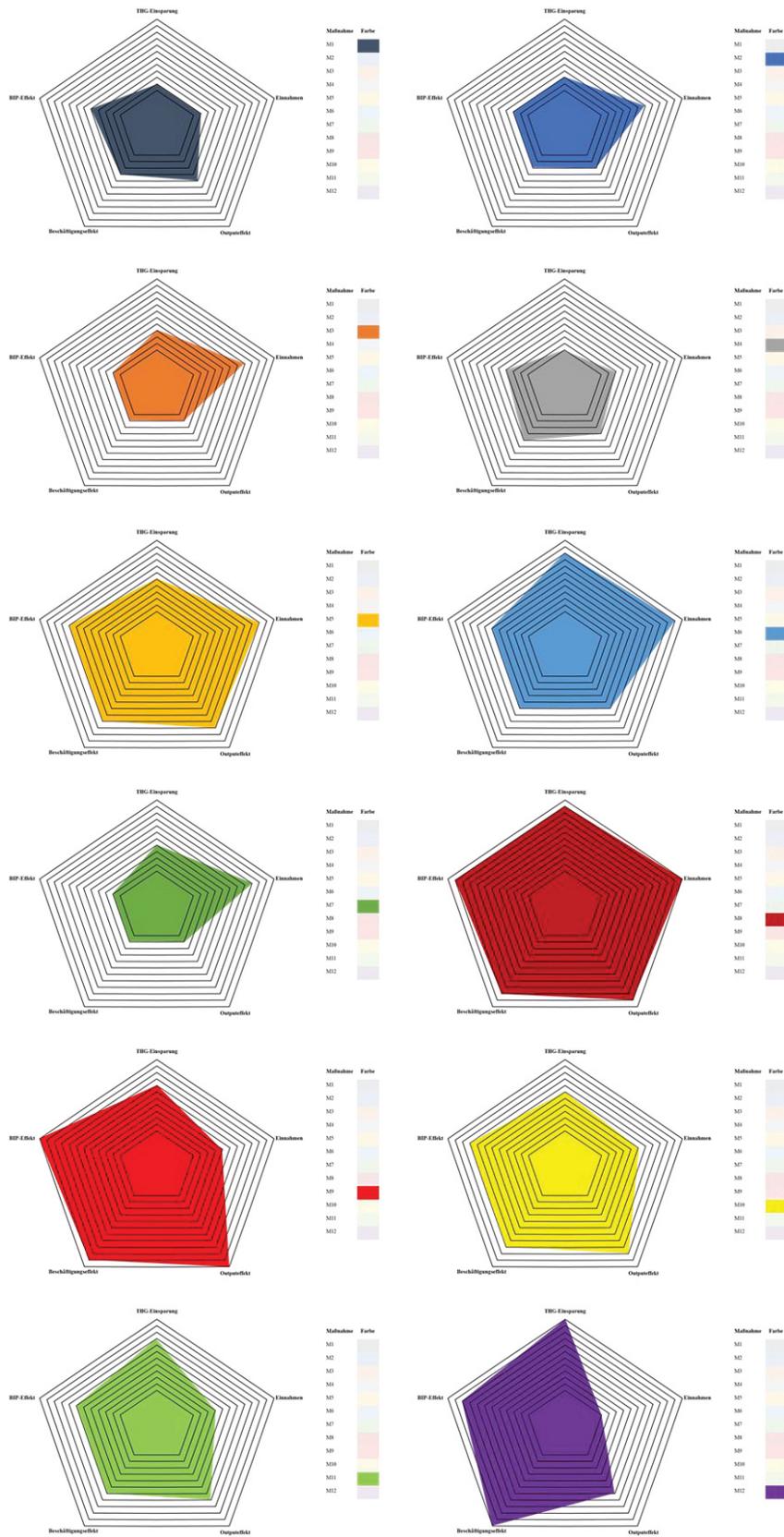
Anhand der Einzelbetrachtungen in Abbildung 157 ist zu erkennen, dass die Maßnahme 8 – Bonus-Malus-System die beste Zielerreichung hinsichtlich des Drei-Säulen-Modells der nachhaltigen Entwicklung liefern würde. Bei dieser Maßnahme wird zwar nicht bei jeder Dimension das volle Potential ausgeschöpft, jedoch die beste Vereinbarkeit erreicht. Während die Maßnahme 12 – CO<sub>2</sub>-Ausweis hinsichtlich des ökonomischen Ziels deutlich

schwächer ist, schneidet die Maßnahme 9 – CO<sub>2</sub>-Maut beim ökologischen Ziel deutlich schlechter ab. Die Maßnahme 9 verdeutlicht ebenfalls, dass eine Maßnahme wirtschaftlich zwar als nicht sinnvoll erscheinen kann, wenn man lediglich die direkten Auswirkungen betrachtet, sie jedoch gesamtwirtschaftlich zu deutlichen positiven ökonomischen Effekten führen kann. Umgekehrt zeigt die Maßnahme 6 – Umweltspur außerorts, dass, nur weil eine Maßnahme wirtschaftlich sinnvoll für die Akteure erscheint und einen positiven Effekt auf die Treibhausgasbilanz hat, sie nicht zwangsläufig dieselben positiven Effekte auf die Gesamtwirtschaft bewirkt wie die anderen Maßnahmen.

Grundsätzlich ist zu erkennen, dass die Maßnahmen, egal ob sie nur regional oder in Gesamtdeutschland wirken, prinzipiell hinsichtlich aller Dimensionen effektiver sind, wenn sie mit einer Nachfrageverschiebung einhergehen. Die Maßnahmen der Gruppe KNV teilen sich dabei durchweg die hinteren Platzierungen, während die Maßnahmen der Gruppe NV die vorderen Platzierungen einnehmen. Betrachtet man die Maßnahmen 2, 3, 5, 7 und 11 separat, so ist die deutlich stärkere Wirkung der Maßnahmen 5 – Umweltspur innerorts und 11 – City-Maut hinsichtlich der meisten Dimensionen klar erkennbar.

Die wirtschaftspolitische Umsetzung der favorisierten Maßnahme 8 - Bonus-Malus-System, könnte sowohl mittels einer Integration in das derzeitige Abgaben- bzw. Steuersystem oder über eine neu einzuführende Zulassungssteuer erfolgen. Dabei wäre die Integration in die bestehenden Richtlinien mit einem geringeren zeitlichen Aufwand verbunden (UBA, 2021g). Verfassungsrechtlich wird gemäß einem Gutachten von BBH (2021) empfohlen ein Bonus-Malus-System über die Erhöhung der Kfz-Steuer einzuführen.

Abbildung 157: Rangfolge der Maßnahmen hinsichtlich der fünf Dimensionen – Einzelbetrachtung



Quelle: eigene Darstellung.

## 9. Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit zeigt die Ergebnisse der Untersuchung direkter und indirekter Effekte von politischen Maßnahmen hinsichtlich ihres Beitrags zum Klimaschutz in Form einer Reduktion der Treibhausgase, ihrer Kostenwirkungen sowie ihrer gesamtwirtschaftlichen Wirkungen. Die Festlegung der zwölf Maßnahmen erfolgte nach dem Prinzip, Maßnahmen, die bereits für Deutschland diskutiert, jedoch noch nicht eingeführt wurden, in unterschiedlicher Ausgestaltung hinsichtlich ihrer potentiellen Wirkungen zu untersuchen.

### Treibhausgas-Minderungswirkung der Maßnahmen

In Kapitel 6 wurden unter anderem die THG-Minderungswirkungen maßnahmenscharf dargestellt. Hinsichtlich der THG-Minderungswirkung ergeben sich folgende Kernaussagen:

- Die höchsten Treibhausgasemissionen können im Standardmodell in der gesamtdeutschen Betrachtung mit den Maßnahmen 12 – CO<sub>2</sub>-Ausweis, 8 – Bonus-Malus-System und 6 – Umweltspur außerorts eingespart werden.
- Bei den regionenspezifischen Maßnahmen ist die Maßnahme 11 – City-Maut diejenige mit der höchsten THG-Reduktion. Obwohl diese Maßnahme nur regional wirkt, kann eine größere Treibhausgasreduktion als mit den Maßnahmen 9 – CO<sub>2</sub>-Maut und 10 – CO<sub>2</sub>-Steuer, die auf Gesamtdeutschland wirken, realisiert werden.
- Währenddessen bedeuten die Maßnahmen 1 – Dieserverbot gesamt, 2 – Dieserverbot Innenstadt, 3 – Dieserverbot Stadtgebiet München, 4 – Dieserverbot ohne Autobahn und 7 – Umweltzone Kiel jeweils zusätzliche Emissionen im Standardmodell.
- Es ist deutlich zu erkennen, dass, selbst wenn alternative Kraftstoffe im Betrieb keinerlei Emissionen aufweisen würden, trotzdem noch wesentlich mehr Treibhausgase in die Atmosphäre emittiert würden, als wenn die Fahrzeugflotte reduziert und die Fahrzeuge gar nicht erst produziert würden. Die Reduktion der Fahrzeuge im Verkehr ist somit in jedem Fall die umweltschonendere Variante.
- Da die Maßnahmen 3, 5 und 11 sich ausschließlich mit der Stadt München beschäftigen, ist an dieser Stelle zu erkennen, dass die City-Maut (Maßnahme 11) die größtmögliche THG-Einsparung bedeuten würde, während die Umweltspur (Maßnahme 5) die insgesamt effizienteste Maßnahme für München darstellt.

- Betrachtet man die Maßnahmen 9 und 11, so ist zu erkennen, dass eine regionenspezifische Maßnahme wie eine City-Maut je nach Ausgestaltung höhere THG-Einsparungen bewirken kann als beispielsweise eine CO<sub>2</sub>-Maut.

### **Kosten-Nutzen-Wirkung der Maßnahmen**

Alle zwölf Maßnahmen wurden in einer Einzelbetrachtung hinsichtlich ihrer Kostenwirkung im Einklang mit den THG-Einsparungs-Kalkulationen bewertet. Hinsichtlich der Betrachtung direkter Kosten-Nutzen-Wirkungen ergeben sich folgende Kernaussagen:

- Die Maßnahme 12 – Ausweis der CO<sub>2</sub>-Belastung liefert nicht nur die höchste THG-Einsparung, sondern auch die höchsten Kosten. Während die Maßnahmen 5, 6 und 8 mit höheren Kosteneinsparungen als Kostenanstiegen eine positive Bilanz aufweisen, liegt die Maßnahme 12 bei Gesamtkosten von rund 1077 Mrd. Euro über die Lebensdauer.
- Unter den regionenspezifischen Maßnahmen ist die Maßnahme 11 bezüglich des Kostenniveaus besonders auffällig. Aufgrund der Reduktion der Fahrzeugflotte haben neben dem Staat auch die Fahrzeughersteller sowie das Ausland sehr hohe Kosten. Dies sind hauptsächlich die verlorenen Fahrzeugumsätze sowie die daraus entstehenden niedrigeren Mehrwertsteuereinnahmen.
- Betrachtet man die kumulierten Kosten über die gesamte Lebensdauer pro Maßnahme je Akteur, so ist zu erkennen, dass die Logistikunternehmen besonders bei Maßnahme 1 und 4 hohe Kosten haben. Dies ist auf den hohen Neukaufzwang sowie den Zwang zum Austausch der Bestandsfahrzeuge zurückzuführen.
- Dagegen muss die Energiewirtschaft besonders bei Maßnahme 12 zahlen. Dies sind eingesparte Energiekosten, die für einen Absatzeinbruch der Rohstoffe und Kraftstoffe sorgen.
- Die Fahrzeughersteller profitieren besonders von den Maßnahmen 6 und 8, da dort die Nachfrage zugunsten der alternativen Antriebstechnologien, die für höhere Deckungsbeiträge sorgen, geändert wird. Hohe Kosten haben die Fahrzeughersteller durch einen Absatzrückgang von Fahrzeugen in Maßnahme 12.
- Die Infrastrukturhersteller profitieren von fast allen Maßnahmen, da ein Ausbau der alternativen Antriebe prinzipiell mit jeder der Maßnahmen erreicht wird und somit für jede Maßnahme auch ein Nachfrageanstieg für Infrastruktur generiert wird. Jedoch wird mit den Maßnahmen, die auch eine Nachfrageverschiebung generieren, langfristig mehr Umsatz für die Infrastrukturhersteller erwirtschaftet.

- Auch der Staat hat die höchsten Einbußen aufgrund der Maßnahme 12. Dies ist mit den geringeren Steuereinnahmen aus Kraftstoffen und Fahrzeuge sowie geringeren sonstigen Einnahmen wie der Lkw-Maut zu begründen. Somit ist klar zu erkennen, dass der Staat aus wirtschaftlicher Sicht einer geringeren Neukaufquote eher negativ gegenübersteht, auch wenn diese die vielversprechendste Maßnahme für die Reduktion von Treibhausgasemissionen wäre. Mit der Maßnahme 9 kann der Staat die höchsten Einnahmen generieren.
- Auch im Ausland entstehen durch die Maßnahme 12 die höchsten Kosten, gefolgt von Maßnahme 1, während ähnlich wie bei den deutschen Fahrzeugherstellern die größten Einnahmen durch die Maßnahmen 6 und 8 generiert werden.

### **Effizienz-Wirkung der Maßnahmen**

Vergleicht man die Effektivität der Maßnahmen hinsichtlich ihrer Treibhausgaswirkung mit ihrer Kostenwirkung, so kann die Effizienz der einzelnen Maßnahmen bewertet werden. Hinsichtlich der Betrachtung direkter Kosten-Nutzen-Wirkungen ergeben sich folgende Kernaussagen:

- Die Maßnahmen 5 – Umweltspur innerorts und 8 – Bonus-Malus-System haben das effizienteste Kosten-Nutzen-Verhältnis. Die Maßnahme 6 – Umweltspur außerorts ist ebenfalls effizient.
- Es ist darüber hinaus zu erkennen, dass die Maßnahmen 9, 10, 11 und 12 zwar effektiv bei der Senkung von Treibhausgasemissionen, allerdings nicht effizient sind.
- Obwohl die Maßnahme 11 eine absolut höhere THG-Einsparung als Maßnahme 5 aufweist, ist ersichtlich, dass die Maßnahme 5 die einzige regionenspezifische Maßnahme ist, die effizient ist. Diese Maßnahme könnte bei einer Ausweitung auf weitere Städte demnach auch wesentlich höhere Einsparungen sowie Einnahmen bewirken.
- Insgesamt würden bei der Umsetzung der effektivsten Maßnahme, also des CO<sub>2</sub>-Ausweises, dennoch lediglich rund 4,9 % der Treibhausgasemissionen im Straßengüterverkehr eingespart. Bei der Maßnahme 8 wären es nur 0,15 % und bei Maßnahme 6 nur 0,06 %. Die Maßnahmen könnten somit lediglich einen Bruchteil der hohen Treibhausgasemissionen einsparen. Die Anforderung der deutschen Politik, dass die durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen von Lkw von 2019 bis 2030

um 30 % sinken sollen (siehe Kapitel 1) sind somit allein mit diesen Maßnahmen kaum realistisch.

### **Sensitivitätsanalyse des Maßnahmenkonzeptes**

In einer Sensitivitätsanalyse in Kapitel 6.16 werden generelle, für die Modellierung notwendige Grundannahmen wie die Herstellungsemissionen bei der Fahrzeugproduktion, die Lebensdauer von Fahrzeugen oder die Fahrleistung variiert, sodass die Qualität der Aussagen einem Robustheitstest unterzogen werden kann.

Hinsichtlich der 1. Sensitivität – Validierung von Allgemeinen Annahmen ergeben sich die folgenden Kernaussagen:

- **Variation des Produktionsstandorts:** Im Standardmodell liegt der Produktionsanteil für Fahrzeuge bei 56 % im Inland und 44 % im Ausland. Wird dieser Anteil auf 100 % im Ausland verschoben, ist zu erkennen, dass prozentual besonders bei den Maßnahmen 1, 3, 5 und 7 Änderungen stattfinden. Prinzipiell ist zu erwähnen, dass bei der Variation des Produktionsstandortes global gesehen keine weiteren Einsparungen bzw. THG-Anstiege stattfinden, sondern lediglich eine Umverteilung. Hierbei ist Kritik an der allgemeinen und geläufigen Berechnung der länderspezifischen Treibhausgasemissionen notwendig, denn es würde eine wesentlich transparentere Übersicht über die bewirkten globalen Treibhausgasemissionen ermöglichen, wenn diese dem Land der Nachfrage statt dem Land, in dem sie produziert werden, zugeordnet würden. Während die Auslagerung der Produktionsemissionen für die deutsche THG-Bilanz generell vorteilhaft ist, ist sie aus wirtschaftlichen Gründen weniger positiv. Relativ empfindlich auf diese Veränderung reagiert die Maßnahme 5, die Umweltspur innerorts. Vergleicht man die prozentualen Abweichungen des Standardmodells mit der Variante Produktion im Ausland, so ist zu erkennen, dass diese bei der Maßnahme 5, der Umweltspur innerorts, zu rund 25 % weniger Einnahmen führt, während die Veränderung bei der Reduktion der THG-Emissionen mit rund 8 % eher gering ausfällt.
- **Austausch der aktuellen Kraftstoffe durch eine emissionsärmere Alternative:** Im Standardmodell wird angenommen, dass der Strom für die Elektrofahrzeuge nicht aus erneuerbaren Energien gewonnen wird, sondern aus dem aktuellen Strommix. Je nach Investitionsstrategie hinsichtlich alternativer Kraftstoffe können die politischen Instrumente sehr unterschiedliche Ergebnisse bewirken. Die Politik sollte demnach die Fahrzeughalter nur dann zu einem Austausch des Dieselfahrzeugs

zwingen oder motivieren, wenn sicher ist, dass synthetischer Diesel (Syndiesel) in der Zukunft nicht relevant sein wird. Während Die Maßnahmen 11 und 12 eine generelle Reduktion der Fahrzeuge bewirken, was in jedem Fall zu einer THG-Reduktion führt, würde bei allen anderen Maßnahmen die Wirkung durch das Szenario „Synfuels“ im Vergleich zum Standardmodell umgekehrt. Die Maßnahmen 5, 6, 8, 11 und 12 sind besonders sinnvoll, wenn der Fokus auf Strom aus erneuerbaren Energien gelegt wird. Die Maßnahmen 1, 2, 3, 4 und 7, also die Maßnahmen, die nicht auf einem Anreiz, sondern einem Zwang basieren, wie ein Dieserverbot bzw. die Umweltzone, bewirken die höchste Reduktion durch das Szenario „GesamtAlternativ“, dicht gefolgt vom Szenario „Synfuels“. Das Szenario „Biogas“ ist besonders wirkungsvoll, wenn die Maßnahmen 9 oder 10, also eine CO<sub>2</sub>-Steuer oder eine CO<sub>2</sub>-Maut, eingeführt werden.

- Variation der Fahrleistung um +50 %: Betrachtet man die THG-Reduktion bei einer 50 % höheren Fahrleistung als im Standardmodell, so hat relativ gesehen die Maßnahme 5 die höchste Sensibilität bezüglich der Veränderung aufzuweisen. Währenddessen schwanken die Maßnahmen mit Fahrverboten um 0 % und die anderen Maßnahmen bei rund 50 %, also bei einem prozentualen Zuwachs, der proportional mit dem Zuwachs der Fahrleistung übereinstimmt. Daraus lässt sich schließen, dass die Fahrleistung bei den Maßnahmen des Dieserverbotes und der Umweltzone von eher geringer Bedeutung ist, während die Maßnahme 5 einen dreimal so hohen Effekt erzielt. Betrachtet man die Kosten bei einer 50 % höheren Fahrleistung als im Standardmodell, so hat relativ gesehen die Maßnahme 10 die höchste Sensibilität bezüglich der Veränderung aufzuweisen.
- Variation der Lebensdauer um –33 %: Da die Lebensdauer eine Verschiebung der zukünftigen Nachfrage bedeutet, ist es sinnvoll, dass dort auch die größten Änderungen zu spüren sind. Vor allem die Maßnahme 5 – Umweltspur innerorts und die Maßnahme 12 – CO<sub>2</sub>-Ausweis reagieren sensibel auf die Veränderung. Dort ist die Abweichung prozentual größer als die relative Veränderung der Lebensdauer. Bei den Maßnahmen mit einer Nachfrageverschiebung resultieren auch bei den Kosten deutliche Veränderungen. Die insgesamt größte Reaktion ist bei der Maßnahme 5 zu erkennen.
- Variation des Kalkulationszinsfußes: An dieser Stelle wird der Kalkulationszins innerhalb der Annuitätenmethode variiert. Im Gegensatz zum Basisfall wird dieser sowohl von 1,5 % auf 3 % angehoben als auch auf 0 % gesenkt. Die Maßnahme

5 – Umweltzone innerorts reagiert am sensibelsten auf die Variation. Die übrigen Maßnahmen reagieren mit prozentualen Abweichungen von knapp 0 % bis rund 11 % Abweichung. Die Variation des Kalkulationszinsfußes hat keinen Einfluss auf die Effizienz der Maßnahmen im Vergleich zum Standardmodell.

- Variation der Herstellungsemissionen: Es wurde beispielhaft der Fall berechnet, dass die Herstellungsemissionen für Elektro-, Hybrid- und Wasserstoff-Lkw, denen eines Diesel-Lkw entsprechen, sodass hier keinerlei Vorteil für die fossilen Kraftstoffe mehr existiert. Die Maßnahme 5 reagiert am stärksten auf die Variation. Auch die Maßnahmen 6 und 8 reagieren sensibel auf die Senkung der Herstellungsemissionen der alternativen Antriebstechnologien. Dies bedeutet, dass im Standardmodell eine konservative Berechnung der Emissionseinsparung stattgefunden hat und ein Technologiefortschritt bei der emissionsärmeren Herstellung von Fahrzeugen bedeuten würde, dass der positive Effekt der Maßnahmen weiter verstärkt wird.
- Insgesamt ist zu erkennen, dass die Maßnahme 5 – Umweltspur innerorts in der generellen Sensitivitätsanalyse im Durchschnitt über die Maßnahmen am volatilsten auf Veränderungen der Grundannahmen reagiert.

Hinsichtlich der 2. Sensitivität – Validierung von spezifischen Annahmen innerhalb der Maßnahmen ergeben sich die folgenden Kernaussagen:

- Variation der Anzahl der benötigten Mikrodepots in Maßnahme 3: Die Variation der Mikrodepot-Reichweite sorgt für eine Kostendifferenz gegenüber dem Standardmodell bei den Akteuren Staat und Logistikunternehmen. Dies ist jedoch für die Gesamtkosten der Maßnahme nur von geringer Bedeutung.
- Variation der Anzahl an benötigten Verteilzentren in Maßnahme 4: Die Variation der Anzahl an benötigten Verteilzentren sorgt für eine Kostendifferenz gegenüber dem Standardmodell bei den Akteuren Staat und Logistikunternehmen. Diese Veränderung bewirkt eine Reduktion der Gesamtkosten von mehr als 16 %. Die Variation bewirkt aufgrund der hohen Produktionsemissionen von Verteilzentren eine Reduktion der THG-Emissionen um 29 % gegenüber dem Standardmodell. Diese Maßnahme reagiert somit sehr empfindlich auf eine Variation der benötigten Anzahl der Verteilzentren.
- Variation des Zeitverlustes pro Kilometer Umweltspur in Maßnahme 5: Die Variation des Zeitverlustes pro Kilometer Umweltspur sorgt für eine Kostendifferenz gegenüber dem Standardmodell bei Logistikunternehmen, Fahrzeugherstellern,

Staat und Ausland. Diese Maßnahme reagiert mit einer Reduktion der Gesamtkosten um 37 % sehr empfindlich auf eine Variation des Zeitverlustes pro Kilometer Umweltspur.

- Variation der Länge des Überholverbotes in Maßnahme 6: Die Variation der Länge des Überholverbotes sorgt für eine Kostendifferenz gegenüber dem Standardmodell bei Logistikunternehmen, Fahrzeugherstellern, Staat und Ausland. Diese Veränderung bewirkt eine eher geringe Reduktion der Gesamtkosten von rund 1,3 %.
- Variation der Kosten der Umweltzone in Maßnahme 7: Die Variation der Kosten der Umweltzone bewirkt lediglich eine Kostendifferenz gegenüber dem Standardmodell beim Staat. Diese Maßnahme reagiert mit einer Veränderung der Gesamtkosten um -2,14 % nicht empfindlich auf eine Variation der Kosten der Umweltzone.
- Variation der Höhe der Bonus-Malus-Zahlungen in Maßnahme 8: Die Variation der Höhe der Bonus-Malus-Zahlungen sorgt für eine Kostendifferenz gegenüber dem Standardmodell bei Logistikunternehmen und Staat. Diese Veränderung bewirkt jedoch keine Veränderung der Gesamtkosten, da sich diese Effekte gegenseitig aufheben.
- Variation der Höhe der CO<sub>2</sub>-Maut in Maßnahme 9: Die Variation der Höhe der CO<sub>2</sub>-Maut sorgt für eine Kostendifferenz gegenüber dem Standardmodell bei Logistikunternehmen und Staat. Diese Veränderung bewirkt jedoch keine Veränderung der Gesamtkosten, da sich diese Effekte gegenseitig aufheben.
- Variation der Höhe der CO<sub>2</sub>-Steuer in Maßnahme 10: Die Variation der Höhe des CO<sub>2</sub>-Steuersatzes sorgt für eine Kostendifferenz gegenüber dem Standardmodell bei Logistikunternehmen, Energiewirtschaft und Staat. Diese Veränderung bewirkt jedoch keine Veränderung der Gesamtkosten, da sich diese Effekte gegenseitig aufheben.
- Variation der Staukostensparnis in Maßnahme 11: Die Verdopplung der Staukostensparnis sorgt lediglich für eine Kostendifferenz gegenüber dem Standardmodell bei den Logistikunternehmen. Diese Variation bewirkt eine Veränderung der Gesamtkosten dieser Maßnahme um -5 %.
- Variation der Neukaufquote in Maßnahme 12: Die Variation der Neukaufquote bewirkt Konsequenzen für alle Akteure, sowohl hinsichtlich der Kosten als auch der THG-Einsparung. Insgesamt reduzieren sich die THG-Einsparungen dieser

Maßnahme um 59 % gegenüber dem Standardmodell. Die Berechnung der THG-Einsparungen reagiert somit sehr empfindlich auf eine Veränderung dieser Annahme. Diese Variation bewirkt ebenfalls eine erhebliche Veränderung der Gesamtkosten dieser Maßnahme um knapp –59 %. Die Berechnung der Kosten reagiert somit ebenso empfindlich auf eine Veränderung dieser Annahme.

### **Makroökonomische Wirkung des Maßnahmenkonzeptes**

Makroökonomisch kann die Umsetzung der Maßnahmen weitere positive Impulse für die Volkswirtschaft leisten. Hinsichtlich der Analyse makroökonomischer Wirkungen ergeben sich die folgenden Kernaussagen:

- **Output-Effekt:** Der indirekte Einfluss der Maßnahmen auf den Produktionsoutput ist bei den Maßnahmen mit einer zukünftigen Nachfrageverschiebung (Gruppe NV) über die Lebensdauer jeweils ansteigend. Das Jahr 2021 spielt dabei kaum eine Rolle und es ist gut zu erkennen, dass lediglich bei den Maßnahmen 6 – Umweltspur außerorts und 9 – CO<sub>2</sub>-Maut in dem Jahr ein signifikanter Einfluss zu sehen ist. Die Maßnahme 9 hat auch indirekt den größten Einfluss auf den Produktionsoutput. Dagegen ist der Einfluss der Maßnahmen ohne eine Nachfrageverschiebung (Gruppe KNV) im Jahr 2021 hauptsächlich punktuell. Der resultierende Produktionsschub im Jahr 2021 ist bei den Maßnahmen 1 – Dieserverbot gesamt und 4 – Dieserverbot ohne Autobahn deutlich höher als bei den übrigen zehn Maßnahmen. Für die Maßnahmenumsetzung sind vor allem Güter bzw. Dienstleistungen aus den Sektoren „C47 – Forschungs- und Entwicklungsleistungen“ und „C51 – Öffentliche Verwaltung und Verteidigung; Sozialversicherung“ notwendig.
- **Beschäftigungs-Effekt:** Die Maßnahmen, die mit einer Nachfrageverschiebung einhergehen, führen zu einem generell höheren Niveau langfristiger Beschäftigung als die Maßnahmen ohne Nachfrageverschiebung. Die Maßnahme 12 – CO<sub>2</sub>-Ausweis liefert dabei den höchsten Beschäftigungszuwachs mit zusätzlich knapp 27 Mio. Erwerbstätigen. Am meisten profitieren weibliche Arbeitskräfte von den Maßnahmen.
- **Wertschöpfungs-Effekt:** Die Maßnahme 9 – CO<sub>2</sub>-Maut liefert mit 962 Mrd. Euro den höchsten Mehrwert über die Lebensdauer von 10 Jahren. Insgesamt führen die Maßnahmen der Gruppe NV zu einem höheren Niveau der Bruttowertschöpfung, kumuliert über die Betrachtungsdauer. Genau wie beim Produktionsoutput

und den Erwerbstätigen konzentriert sich der Zuwachs bei den Maßnahmen der Gruppe KNV auf das Jahr 2021 und es gibt dort somit nur einen starken Ausschlag in diesem Jahr. Dagegen ist der Einfluss der übrigen Maßnahmen im Jahr 2021 sehr gering. Die Maßnahme 9 – CO<sub>2</sub>-Maut hat von den Maßnahmen der Gruppe NV den stärksten Einfluss im ersten Jahr. Bei den Maßnahmen dieser Gruppe steigt der Einfluss jedes Jahr an. Der direkte Einfluss ist dort wesentlich größer als der indirekte.

- BIP-Effekt: Insgesamt lässt sich mit der Maßnahme 9 die höchste BIP-Steigerung über die Lebensdauer verzeichnen. Den höchsten Anstieg in einem Jahr würde die Maßnahme 1 im Jahr 2021 verursachen. Dies würde eine Steigerung des BIP in Deutschland um rund 8 % im Jahr 2021 bedeuten. Während die Maßnahmen der Gruppe KNV lediglich eine kurzzeitige BIP-Steigerung zur Folge haben, könnte die Maßnahme 8 das BIP beispielsweise jedes Jahr erhöhen, mit steigender Tendenz. Im Jahr 2021 würde dabei die Erhöhung lediglich bei 0,1 % liegen, im Jahr 2030 jedoch bereits bei 5,0 %. Daher muss die Gesamterhöhung der Maßnahmen über die Lebensdauer von 10 Jahren betrachtet werden. Die Maßnahme 9 – CO<sub>2</sub>-Maut liefert insgesamt die höchste Steigerung mit 3,2 % über 10 Jahre.

### **Priorisierung der Maßnahmen**

Mittels eines Scoring-Ansatzes wurden die einzelnen Maßnahmen hinsichtlich der fünf Dimensionen „Treibhausgaseinsparung“, „Einnahmen/negative Kosten“, „Output-Effekt“, „Beschäftigungseffekt“ und „BIP-Effekt“ einem Ranking unterzogen. Anschließend wurde eine Rangfolge der Maßnahmen erstellt und ihnen einen Rang von 1 bis 12 zugewiesen. Die Maßnahmen mit dem kleinsten Rang sind im Sinne des Drei-Säulen-Modells der nachhaltigen Entwicklung (siehe Kapitel 8) zu priorisieren.

Hinsichtlich der Priorisierung ergeben sich folgende Kernaussagen:

- Den größten Beitrag zum Klimaschutz leistet die Maßnahme 12 – CO<sub>2</sub>-Ausweis. Indikator ist bei dieser Dimension die THG-Einsparung.
- Den größten wirtschaftlichen Anreiz verspricht die Maßnahme 8 – Bonus-Malus-System. Als Indikator wurden bei dieser Dimension die Einnahmen bzw. negativen Kosten verwendet.
- Der höchste monetäre Wert an Vorleistungen resultiert aus der Maßnahme 9 – CO<sub>2</sub>-Maut.

- Die Maßnahme 12 führt im Durchschnitt zu den meisten hinzukommenden Erwerbstätigen über die Lebensdauer.
- Der höchste BIP-Zuwachs resultiert aus der Maßnahme 9, aufgrund einer Erhöhung der erwirtschafteten Arbeits- und Kapitaleinkommen sowie der Steuern.
- Anhand der Einzelbetrachtungen ist zu erkennen, dass die Maßnahme 8 die beste Zielerreichung hinsichtlich des Drei-Säulen-Modells der nachhaltigen Entwicklung liefern würde. Bei dieser Maßnahme wird zwar nicht hinsichtlich jeder Dimension das volle Potential ausgeschöpft, jedoch die beste Vereinbarkeit erreicht. Während die Maßnahme 12 deutlich schwächer hinsichtlich des ökonomischen Ziels ist, ist die Maßnahme 9 beim ökologischen Ziel weniger überzeugend.
- Die Maßnahme 9 verdeutlicht ebenfalls, dass eine Maßnahme zwar wirtschaftlich nicht sinnvoll erscheinen kann, wenn man lediglich die direkten Auswirkungen betrachtet, jedoch gesamtwirtschaftlich zu deutlichen positiven ökonomischen Effekten führen kann. Umgekehrt zeigt die Maßnahme 6, dass, nur weil eine Maßnahme wirtschaftlich sinnvoll für die Akteure erscheint und einen positiven Effekt auf die Treibhausgasbilanz hat, sie nicht zwangsläufig positive Effekte auf die Gesamtwirtschaft auslöst.
- Grundsätzlich ist gut zu erkennen, dass, egal ob eine Maßnahme nur regional oder in Gesamtdeutschland wirkt, die Maßnahmen prinzipiell hinsichtlich aller Dimensionen effektiver sind, wenn sie mit einer Nachfrageverschiebung einhergehen.

### **Ausblick und Grenzen der Betrachtung**

Darüber hinaus kann davon ausgegangen werden, dass die vorliegenden Maßnahmen weitere positive Impulse auf die Volkswirtschaft bewirken. Zum Beispiel ist anzunehmen, dass das Image der Bundesrepublik Deutschland aufgrund der gesunkenen THG-Emissionen gesteigert werden könnte. Auch die Entlastung des Staatshaushalts sowie die gesteigerten Investitionen in Forschung und Entwicklung können zu mehr Liquidität und Fortschritt führen.

Die Kalkulationen wurden mit öffentlichen und unabhängigen Daten sowie anhand auf historischen Daten basierender Prognosen verfasst, sodass Abweichungen gegenüber den tatsächlichen Werten bestehen können. Die Modellierung der Bottom-up-Kalkulationen der Kosten-Nutzen-Analyse sowie der makroökonomischen Wirkungen basieren auf

Schätzungen und Annahmen, sodass diese Ergebnisse lediglich als Annäherungen zu verstehen sind. Eine Änderung der Annahmen kann unter Umständen die Ergebnisse und Aussagen der Arbeit gravierend verändern.

Gemäß aktuellem Stand (03. November 2022) führt die Situation in der Ukraine aufgrund des Angriffskriegs Russlands zu einer erhöhten Unsicherheit bezüglich der Ergebnisse dieser Arbeit und der Gesamtsituation für alternative Kraftstoffe. Innerhalb dieser Arbeit wurde der negative Aspekt einer Abhängigkeit bezüglich mancher Kraftstoffe von ausländischen Staaten nicht wesentlich einbezogen. Besonders öl- und gasbasierte Kraftstoffe steigen zurzeit preislich stark an, was auf die angedrohte Verknappung zurückzuführen ist (Witsch, 2022).

Es ist anzunehmen, dass sich bei einem Versorgungsstopp russischen Öls und Gases in Deutschland die Kraftstoffe Elektro und Wasserstoff als beste Alternativen für schwere Nutzfahrzeuge anbieten. Trotz der derzeit relativ hohen Ineffizienz bei der Herstellung von Wasserstoff in Deutschland (siehe Kapitel 3) ist anzunehmen, dass dieser Schritt mangels Alternativen im Ernstfall zum Tragen kommen würde. Notwendig dafür wäre nach den Erkenntnissen dieser Arbeit der schnelle Ausbau von erneuerbaren Energien sowie die Bereitstellung von Kohlekraftwerken als Reserve. Auch Biogasanlagen wären, wie in Kapitel 6.16.1 beschrieben, derzeit eine sinnvolle Alternative für die bereits existierenden Erdgasfahrzeuge. Allerdings müsste auch hier die Produktion stark ansteigen. In jedem Fall hat der Übergriff Russlands auf die Ukraine den Wunsch nach Autarkie für die deutsche Energieversorgung verstärkt, sodass an dieser Stelle die Akzeptanz der Bundesbürger\*innen hinsichtlich Energiesparmaßnahmen und Einschränkungen deutlich erhöht wurde. Dies könnte die Umstellung auf klimaschonende Antriebsstränge in hohem Maße beschleunigen.

## 10. Literaturverzeichnis

Abel, M., A. Knie, W. Canzler, R. Tech, H. G. Prodoehl und S. Bustamante (2020), City-Maut Berlin 2021 - Non-Paper zur Einführung einer City-Maut. Online verfügbar unter: [https://www.verkehrswendebuero.de/wp-content/uploads/2020/10/CityMaut\\_Berlin\\_2021.pdf](https://www.verkehrswendebuero.de/wp-content/uploads/2020/10/CityMaut_Berlin_2021.pdf) [Zugriff am 27.02.2021].

ADAC (2021a), Benzin- und Dieselpreis: So entstehen die Spritpreise. Online verfügbar unter: <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/tipps-zum-tanken/7-fragen-zum-benzinpreis/> [Zugriff am 10.06.2022].

ADAC (2021b), So viele Tankstellen gibt es in Deutschland. Online verfügbar unter: <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/deutschland/tankstellen-in-deutschland/> [Zugriff am 06.04.2021].

ADFC (2019), ADFC testet dritte Umweltspur in Düsseldorf. Online verfügbar unter: <https://kreisverbaende.adfc-nrw.de/kv-muenster/willkommen-beim-adfcnbspim-muensterland/aktuelles-aus-muenstermuensterland/article/adfc-testet-dritte-umweltspur-in-duesseldorf.html> [Zugriff am 21.04.2021].

Adler, M. D. und E. A. Posner (1999), Rethinking cost-benefit analysis, *Working Paper No. 72*, 2nd Series, s.l.: John M. Olin, Law & Economics, University of Chicago.

Adolf, J., C. Balzer, F. Haase, B. Lenz, A. Lischke und G. Knitschky (2016), Shell Nutzfahrzeug-Studie: Diesel oder alternative Antriebe - womit fahren Lkw und Bus morgen, Shell Deutschland, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR).

Ahrens, G.-A., H. Baum, K. Beckmann, W. Brilon, A. Eisenkopf, H. Fricke, I. Göpfert, C. von Hirschhausen, G. Knieps, S. Oeter, F.-J. Radermacher, W. Rothengatter, V. Schindler, B. Schlag, J. Siegmann und W. Stölzle (2007), Verkehrspolitische Handlungsfelder für eine effiziente Logistik, *Stellungnahme des Wissenschaftlichen Beirats* beim Bundesminister für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung.

aktivmobil-bw (2017), Lückenschluss in Mannheim - Die neue Umweltspur in der Bismarckstraße. Online verfügbar unter: <https://www.aktivmobil-bw.de/gute-beispiele/radvorrang-umwidmung/mannheim-umweltspur/> [Zugriff am 30.06.2021].

Ambel, C., T. Earl, L. Mathieu, S. Cornelis, S. Kenny und J. Nix (2018), Analysis of long haul battery electric trucks in EU Marketplace and technology, economic, environmental, and policy perspectives, *Amended paper (.08. 2018) originally presented in: 8th Commercial Vehicle Workshop, Graz, 17-18 May 2018*, European Federation for Transport and Environment (T&E).

Aslam, W., M. Konorova und G. Perkins (2022), Fischer-Tropsch synthesis to hydrocarbon biofuels: Present status and challenges involved, *Hydrocarbon Biorefinery*, Chapter 3, S. 77-96, Elsevier.

Authried, N., A. Pumberger und T. Fessl (2011), Lkw-Geschwindigkeitsverhalten auf Autobahnen - Erhebung und Analyse der Lkw-Geschwindigkeiten auf ausgewählten Streckenabschnitten österreichischer Autobahnen, Kammer für Arbeiter und Angestellte, Wien.

BAFA (2020), Energieberatung & Energieaudit - Bundesförderung für Energieberatung im Mittelstand, Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA). Online verfügbar unter: [https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieberatung/Energieberatung\\_Mittelstand/energieberatung\\_mittelstand\\_node.html](https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieberatung/Energieberatung_Mittelstand/energieberatung_mittelstand_node.html) [Zugriff am 30.07.2021].

BAG (2018), Leitfaden zur Ermittlung der Schadstoffklassen von Nutzfahrzeugen, Bundesamt für Güterverkehr (BAG). Online verfügbar unter: [https://www.bag.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Lkw-Maut/Leitfaden\\_Schadstoffklassen.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bag.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Lkw-Maut/Leitfaden_Schadstoffklassen.pdf?__blob=publicationFile) [Zugriff am 26.02.2021].

BAG (2021), Lkw-Maut, Bundesamt für Güterverkehr (BAG). Online verfügbar unter: [https://www.bag.bund.de/DE/Navigation/Verkehrsaufgaben/Lkw-Maut/lkw-maut\\_node.html](https://www.bag.bund.de/DE/Navigation/Verkehrsaufgaben/Lkw-Maut/lkw-maut_node.html) [Zugriff am 26.02.2021].

Bahadori & Zendejboudi (2017), Shale Gas: Introduction, Basics, and Definitions, *Shale Oil and Gas Handbook: Theory, Technologies and Challenges*, pages 1-26.

BaSt (2021), Baustelleninformationssystem des Bundes und der Länder, Bundesanstalt für Straßenwesen (BaSt). Online verfügbar unter: [https://www.bast.de/DE/Fahrzeugtechnik/Fachthemen/Baustelleninformation/baustelleninformation\\_hidden\\_node.html](https://www.bast.de/DE/Fahrzeugtechnik/Fachthemen/Baustelleninformation/baustelleninformation_hidden_node.html) [Zugriff am 23.07.2021].

Bauer, U., T. Stein und V. Langer (2018), Neue Konzepte des (E-) Lieferverkehrs in den Städten - Ergebnisse aus dem Städtetzwerk des Forschungsprojektes "City2Share", *Empfehlungspapier für Kommunen*, Deutsches Institut für Urbanistik gGmbH.

Bayer, M., R. Bogdanski und M. Seidenkranz (2018), Pilotprojekt zur Nachhaltigen Stadtlogistik durch KEP-Dienste mit dem Mikro-Depot-Konzept auf dem Gebiet der Stadt Nürnberg, Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr, IHK Nürnberg für Mittelfranken, Stadt Nürnberg, Wirtschaftsreferat.

BAYSIS (2021), StMB - BAYSIS - Straßennetz - Straßenkarten - Abschnittsnummernkarten - München Stadt - 2021. Online verfügbar unter: <https://www.baysis.bayern.de/web/content/strassennetz/strassenkarten/nummernkarten.aspx?land-kreis=162&bauamt=000> [Zugriff am 11.03.2022].

BBC (2007), Why the zone decided to go west. Online verfügbar unter: [http://news.bbc.co.uk/2/hi/uk\\_news/england/london/6364631.stm](http://news.bbc.co.uk/2/hi/uk_news/england/london/6364631.stm) [Zugriff am 27.02.2021].

BBC (2021), Congestion Charge: In London. Online verfügbar unter: [http://news.bbc.co.uk/2/shared/spl/hi/uk/03/congestion\\_charge/exemptions\\_guide/html/what.stm](http://news.bbc.co.uk/2/shared/spl/hi/uk/03/congestion_charge/exemptions_guide/html/what.stm) [Zugriff am 27.07.2021].

BBH (2021), Fehlinvestitionen vermeiden–Eine Untersuchung zu den rechtlichen Möglichkeiten und Grenzen zur Defossilisierung der deutschen Volkswirtschaft bis 2045. Gutachten, 2021.

BDEW (2020), Verkehr: Und immer lockt der Wasserstoff - Lkw und Busse künftig mit weniger CO2-Emissionen - so will es Brüssel. Aber wie weit ist die Branche – und was macht eigentlich Tesla. Online verfügbar unter: <https://www.bdew.de/verband/magazin->

2050/bringt-die-wasserstofftechnologie-den-emissionsfreien-busverkehr-in-die-staedte/ [Zugriff am 06.04.2021].

BdF (2021), Kfz-Steuer-Rechner, Bundesministerium der Finanzen (BdF). Online verfügbar unter: [https://www.bundesfinanzministerium.de/Web/DE/Service/Apps\\_Rechner/KfzRechner/KfzRechner.html](https://www.bundesfinanzministerium.de/Web/DE/Service/Apps_Rechner/KfzRechner/KfzRechner.html) [Zugriff am 20.01.2022].

Behrning, S. (2020), TCO: Antriebskonzepte für den Fernlastverkehr in Deutschland, TÜV Rheinland, ADAC.

Bernecker, T., W. Röhling, R. Burg und J. Boysen (2016), Status quo des Güterverkehrssystems in Deutschland - eine Metastudie unter besonderer Betrachtung der Vernetzung des Verkehrs. Online verfügbar unter: <https://www.bmvi.de/Shared-Docs/DE/Anlage/G/metastudie-status-quo.pdf?blob=publicationFile> [Zugriff am 20.01.2022].

Bett, A., P. Stecherle, J. Brandes, J. Heilig, D. Wrede, C. Kost, T. Schlegl und H.-M. Henning (2020), Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem - Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg.

Bezirksregierung Düsseldorf (2019), Luftreinhalteplan Düsseldorf 2019, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen.

BfJ (2013), Straßenverkehrs-Ordnung, Bundesministerium für Justiz und für Verbraucherschutz (BfJ). Online verfügbar unter: [https://www.gesetze-im-internet.de/stvo\\_2013/](https://www.gesetze-im-internet.de/stvo_2013/) [Zugriff am 26.02.2021].

BfJ (2019), Gesetz über einen nationalen Zertifikathandel für Brennstoffemissionen, Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG), Bundesministerium für Justiz und für Verbraucherschutz (BfJ). Online verfügbar unter: <http://www.gesetze-im-internet.de/behg/BJNR272800019.html> [Zugriff am 26.02.2021].

BfJ (2020a), Energiesteuergesetz (EnergieStG), Bundesministerium für Justiz und für Verbraucherschutz (BfJ). Online verfügbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/energiestg/BJNR153410006.html#BJNR153410006BJNG000100000> [Zugriff am 25.02.2021].

BfJ (2020b), Bundesfernstraßenmautgesetz (BFStrMG), Bundesministerium für Justiz und für Verbraucherschutz (BfJ). Online verfügbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/bfstrmg/> [Zugriff am 28.02.2021].

BfJ (2021), Stromsteuergesetz, Bundesministerium für Justiz und für Verbraucherschutz (BfJ). Online verfügbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/stromstg/> [Zugriff am 20.01.2022].

BGL (2019), Emissionsklassen von Nutzfahrzeugen, Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung (BGL) e.V. Online verfügbar unter: [https://www.bgl-ev.de/web/mensch\\_umwelt\\_verkehr/umwelt2/emissionsklassen.htm](https://www.bgl-ev.de/web/mensch_umwelt_verkehr/umwelt2/emissionsklassen.htm) [Zugriff am 24.02.2019].

Bjelle, E.L., K.S. Wiebe und J. Többen (2018), Implementing exogenous scenarios in a global MRIO model for the estimation of future environmental footprints, *Economic Structures*.

Blair, P. und R. Miller (2009), *Input-Output Analysis - Foundations and Extensions*, Second Edition, Cambridge University Press.

BMF (2020), Reform der Kfz-Steuer - Klare Anreize für eine klimafreundlichere Mobilität, Bundesministerium der Finanzen (BMF). Online verfügbar unter: <https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Pressemitteilungen/Finanzpolitik/2020/06/2020-06-12-Kfz-Steuer-Reform.html> [Zugriff am 25.02.2021].

BMU (2019), Brennstoffemissionshandelsgesetz, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU). Online verfügbar unter: <https://www.bmu.de/gesetz/brennstoffemissionshandelsgesetz/> [Zugriff am 26.02.2021].

BMVBS (2013), Die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung (MKS) - Energie auf neuen Wegen, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), Referat UI 40 Grundsatzfragen Energie, Klima- und Umweltschutz.

BMVI (2016), Programm zur Förderung der Sicherheit und Umwelt in Unternehmen des Güterkraftverkehrs (De-Minimis), Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Online verfügbar unter: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/StV/Strassenverkehr/lkw-maut-foerderung-programm-sicherheit-und-umwelt.html> [Zugriff am 27.02.2021].

BMVI (2018), Sofortprogramm Saubere Luft 2017 – 2020, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Online verfügbar unter: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/sofortprogramm-saubere-luft-2017-2020.html> [Zugriff am 27.02.2021].

BMVI (2019), Mautsätze für mautpflichtige Lkw ab 1. .01. 2019, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Online verfügbar unter: [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/StV/lkw-mautgebuehren.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/StV/lkw-mautgebuehren.pdf?__blob=publicationFile) [Zugriff am 26.02.2021].

BMVI (2020a), Lkw-Maut, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Online verfügbar unter: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/StV/Strassenverkehr/lkw-maut.html> [Zugriff am 26.02.2021].

BMVI (2020b), Richtlinie über die Förderung von energieeffizienten und/oder CO<sub>2</sub>-armen schweren Nutzfahrzeugen in Unternehmen des Güterkraftverkehrs, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Online verfügbar unter: [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/StV/lkw-maut-harmonisierung.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/StV/lkw-maut-harmonisierung.pdf?__blob=publicationFile) [Zugriff am 27.02.2021].

BMWI (2015), Rohöl: Transport, Lagerung und Verarbeitung, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWI). Online verfügbar unter: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/mineraloel-transport-lagerung-verarbeitung.html> [Zugriff am 27.02.2021].

BMWI (2021), Förderdatenbank, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWI). Online verfügbar unter: <https://www.foerderdatenbank.de/FDB/DE/Home/home.html> [Zugriff am 27.02.2021].

BMWI (2022), Biokraftstoffe und alternative Kraftstoffe, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWI). Online verfügbar unter: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/mineraloel-biokraftstoffe-und-alternative-kraftstoffe.html> [Zugriff am 12.03.2022].

Boardman, A. E., D. H. Greenberg, A. R. Vining und D. L. Weimer (2018), *Cost-Benefit Analysis: Concepts and Practice*, 5th Edition, Cambridge University Press.

Bodenbenner, P., N. Bubner, J. Noronha, M. Kückelhaus, M. Heutger, G. Chung und D. Virag (2019), Logistics Trend Radar, DHL Customer Solutions & Innovation, Deutsche Post DHL Group.

Bogdanski et. al. (2017), Nürnberger Mikro-Depot-Konzept in der KEP-Branche: Übertragbarkeit auf andere Städte und Integration von innovativen Same-Day-Delivery-Konzepten, Schriftenreihe Vorlaufforschung der Technischen Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm.

Boltze, M., W. Jiang, S. Groer und D. Scheuven (2014), Analyse der Wirksamkeit von Umweltzonen hinsichtlich Feinstaub und Stickstoffkonzentrationen, Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Umweltmineralogie.

Borisut P. und A. Nuchitprasittichai (2019), Methanol Production via CO<sub>2</sub> Hydrogenation: Sensitivity Analysis and Simulation—Based Optimization, Department of Chemical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima.

Buchhold, F. (2021), Zahlen und Daten - Das Autobahnnetz der Bundesrepublik Deutschland. Online verfügbar unter: [http://www.eautobahn.de/html/zahlen\\_und\\_daten.html](http://www.eautobahn.de/html/zahlen_und_daten.html) [Zugriff am 16.04.2021].

Bundesregierung (2019), Klimaschutzprogramm 2030. Online verfügbar unter: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzprogramm-2030-1673578> [Zugriff am 18.04.2021].

Burger, B. (2022), Öffentliche Nettostromerzeugung in Deutschland im Jahr 2021, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE). Online verfügbar unter: [https://www.energy-charts.info/downloads/Stromerzeugung\\_2021.pdf](https://www.energy-charts.info/downloads/Stromerzeugung_2021.pdf) [Zugriff am 26.01.2022].

BVerwG (2018), Verkehrsverbot (u.a.) für Dieselfahrzeuge in der Umweltzone Stuttgart - Urteil vom 27. .02. 2018 - 7 C 30.17, Bundesverwaltungsgericht (BVerwG). Online verfügbar unter: <https://www.bverwg.de/270218U7C30.17.0> [Zugriff am 06.04.2021].

BVL (2017), Urbane Logistik und alternative Antriebe, 34. Deutscher Logistik-Kongress, Bundesvereinigung Logistik (BVL).

Caroom (2021), Ecotaxe: barème bonus malus 2021 – taxe écologique CO<sub>2</sub>. Online verfügbar unter: <https://www.caroom.fr/guide/administratif/carte-grise/bonus-malus> [Zugriff am 13.07.2021].

- Cartegrise (2021), Malus écologique pour l'immatriculation d'un véhicule neuf (ou importé). Online verfügbar unter: <https://www.cartegrise.com/malus-ecologique> [Zugriff am 13.07.2021].
- Chandel & Williams (2009), Synthetic Natural Gas (SNG): Technology, Environmental implications and economics, Climate Change Policy Partnership, Duke University.
- Collum, B. (2017), Nuclear fuel cycle, *Nuclear Facilities*, pages 1 – 43, Woodhead Publishing.
- Davidson & White (2015), The cost effectiveness of a policy to store carbon in Australian agricultural soils to abate greenhouse gas emissions, *Earth and Environmental Science* 25, IOP Conf. Series.
- Deloitte (2017), Global Truck Study 2016 - LKW Märkte im Umbruch. Online verfügbar unter: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/de/Documents/operations/Deloitte%20Global%20Truck%20Study%202016.pdf> [Zugriff am 07.04.2021].
- Dena (2012), Steigerung der Energieeffizienz mit Hilfe von Energieeffizienz-Verpflichtungssystemen (EnEffV Sys), Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Geschäftsbereich Energiesysteme und Energiedienstleistungen; Frontier Economics Ltd.
- Destatis (2010), Input-Output-Rechnung im Überblick, Statistisches Bundesamt.
- Destatis (2020), Pkw-Dichte in Deutschland in den vergangenen zehn Jahren um 12 % gestiegen. Online verfügbar unter: [https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2020/09/PD20\\_N055\\_461.html](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2020/09/PD20_N055_461.html) [Zugriff am 20.01.2022].
- Deutsche Umwelthilfe (2016), Deutsche Umwelthilfe erwirkt bahnbrechendes Urteil vor dem Verwaltungsgericht Düsseldorf: Diesel-Fahrverbote sind unausweichlich. Online verfügbar unter: <https://www.duh.de/presse/pressemitteilungen/pressemitteilung/deutsche-umwelthilfe-erwirkt-bahnbrechendes-urteil-vor-dem-verwaltungsgericht-duesseldorf-diesel-fa/> [Zugriff am 11.03.2022].
- Deutsche Umwelthilfe (2018), Deutsche Umwelthilfe - Klagen für Saubere Luft, *Hintergrundpapier*. Online verfügbar unter: [https://www.duh.de/fileadmin/user\\_upload/download/Projektinformation/Verkehr/CO2-Minderung/2018-05-29\\_Hintergrundpapier\\_Right-to-Clean-Air\\_D.PDF](https://www.duh.de/fileadmin/user_upload/download/Projektinformation/Verkehr/CO2-Minderung/2018-05-29_Hintergrundpapier_Right-to-Clean-Air_D.PDF) [Zugriff am 11.03.2022].
- Deutscher Bundestag (2020), Grundsätzliche Kritik an geplanter Reform der Kfz-Steuer. Online verfügbar unter: <https://www.bundestag.de/dokumente/textarchiv/2020/kw38-pa-finanzen-kfz-steuer-707208> [Zugriff am 25.02.2021].
- Deutscher Bundestag (2020), Kosten der Produktion von grünem Wasserstoff, Dokumentation, Wissenschaftliche Dienste, WD 5: Wirtschaft und Verkehr, Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. Online verfügbar unter: <https://www.bundestag.de/resource/blob/691748/01a954b2b2d7c70259b19662ae37a575/WD-5-029-20-pdf-data.pdf> [Zugriff am 20.01.2022].
- Dietzenbacher, E., M. Timmer, B. Los, R. Stehrer und de Vries, G.J. (2015), An Illustrated User Guide to the World Input–Output Database: The Case of Global Automotive Production, *Review of International Economics*, 23, S. 575–605.

Distelkamp, M., M. Flaute und C. Lutz (2017), Der Einsatz von MRIO zur Berechnung der Fußabdrücke von Nationen - Eine Anwendung der EXIOBASE-Datenbank, Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforchung mbH.

DLR (2013), CNG und LPG – Potenziale dieser Energieträger auf dem Weg zu einer nachhaltigeren Energieversorgung des Straßenverkehrs, Kurzstudie im Rahmen der Wissenschaftlichen Begleitung, Unterstützung und Beratung des BMVBS in den Bereichen Verkehr und Mobilität, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), AZ Z14/SeV/288.3/1179/UI40, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) Institut für Verkehrsforschung.

Dörfelt, S. (2018), Digitale Logistik - Leerkilometer und Leerfahrten - wie man sie reduziert und vermeidet, MM-Logistik, CEO bei der digitalen Spedition Frachtraum.com. Online verfügbar unter: <https://www.mm-logistik.vogel.de/leerkilometer-und-leerfahrten--wie-man-sie-reduziert-und-vermeidet-a-673353/> [Zugriff am 20.01.2022].

DSLVL (2013), Leitfaden, Berechnung von Treibhausgasemissionen in Spedition und Logistik gemäß DIN EN 16258, Begriffe, Methoden, Beispiele, DSLVL Deutscher Speditions- und Logistikverband e.V., aktualisierte Auflage (Stand: März 2013).

DVFG (2020), Deutscher Verband Flüssiggas: "Flüssiggas: Der besondere Brennstoff". Online verfügbar unter: <https://www.dvfg.de/die-besondere-energie/herkunft-und-entstehung/> [Zugriff am 27.02.2021].

DVZ (2013), Deutsche Verkehrs-Zeitung: Lkw-Nachfrage knickt ein. Online verfügbar unter: <https://www.dvz.de/rubriken/detail/news/lkw-nachfrage-knickt-ein.html> [Zugriff am 24.02.2021].

EAFO (2020), European Alternative Fuels Observatory: "Alternative Fuels Fleet (2020)". Online verfügbar unter: <https://www.eafo.eu/vehicles-and-fleet/n1> [Zugriff am 06.04.2021].

EC (2010), Strategiebericht 2010 – Methodik Scoring – Anhang III, Fondsübergreifende Halbzeitbilanz der EU-Fonds in Sachsen-Anhalt, Europäische Kommission (EC).

Economic Times (2020), Scania revenue up 11%, truck orders decline 9% in 2019. Online verfügbar unter: <https://auto.economictimes.indiatimes.com/news/commercial-vehicle/mhcv/scania-revenue-up-11-truck-orders-decline-9-in-2019/74790143> [Zugriff am 07.04.2021].

Edwards, R., J.F. Larivé, D. Rickeard und W. Weindorf (2013), Well-to-tank Report Version 4.0, JEC Well-to-Wheels Analysis – Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context, *JRC Technical Reports*, European Commission, Concawe, EUCAR, ISBN 978-92-79-31196-3.

Einsiedler, T. (2017), Mars nutzt Frachtausschreibung zur strategischen Neuausrichtung, Transporeon. Online verfügbar unter: <https://www.transporeon.com/de/wissen/blog/artikel/mars-nutzt-frachtausschreibung-zur-strategischen-neuausrichtung/> [Zugriff am 30.07.2021].

Elmer, C.-F. (2019), Wege zu einer klimaverträglicheren Pkw-Flotte - Warum ein Bonus-Malus-System wirkungsvoller und sozial gerechter ist als ein Subventionsfüllhorn, *Agora Verkehrswende Blog*, 02/2019.

Emilsson E. und L. Dahllöf (2019), Lithium-Ion Vehicle Battery Production - Status 2019 on Energy Use, CO2 Emissions, Use of Metals, Products Environmental Footprint, and Recycling, IVL Swedish Environmental Research Institute; Swedish Energy Agency.

European Commission (1997), Guide to cost-benefit analysis of major projects in the context of EC regional policy, *Evaluation and Documents* No.3, European Commission, Directorate-General XVI, Regional Policy and Cohesion.

European Commission (2014), Guide to Cost-Benefit Analysis of Investment Projects, Economic appraisal tool for Cohesion Policy 2014-2020, Directorate-General for Regional and Urban policy.

European Commission (2015), Study on actual GHG data for diesel, petrol, kerosene and natural gas - final report, Work Order: ENER/C2/2013-643; DG ENER.

Eurotransport (2015), Nutzfahrzeug-Markt - Schwere Zeiten für Gebrauchte. Online verfügbar unter: <https://www.eurotransport.de/artikel/nutzfahrzeug-markt-schwere-zeiten-fuer-gebrauchte-6637787.html> [Zugriff am 06.04.2021].

Eurotransport (2018), E-Ladesäulen auf dem Speditionshof - Was bei der Planung zu beachten ist". Online verfügbar unter: <https://www.eurotransport.de/artikel/e-ladesaeulen-es-gibt-ladeloesungen-mit-einem-intelligenten-energiemanagement-10407250.html#:~:text=Die%20Preise%20f%C3%BCr%20die%20reine,etwa%205.000%20Euro%20realisiert%20werden.> [Zugriff am 20.01.2022].

Eurotransport (2019a), Bundesweit 16.100 Ladesäulen - Nur 25 für E-Lkw geeignet. Online verfügbar unter: <https://www.eurotransport.de/artikel/bundesweit-16-500-ladesaeulen-nur-25-fuer-e-lkw-geeignet-10654988.html> [Zugriff am 06.04.2021].

Eurotransport (2019b), Lkw aus Osteuropa stark im Fernverkehr - BAG-Mautstatistik 2018. Online verfügbar unter: <https://www.eurotransport.de/artikel/bag-mautstatistik-2018-lkw-aus-osteuropa-vor-allem-stark-im-fernverkehr-10799059.html> [Zugriff am 23.06.2021].

Eurotransport (2020), Abwrackprämie für alte Diesel-Lkw - Lkw zum Schrottplatz fahren und kassieren. Online verfügbar unter: <https://www.eurotransport.de/artikel/abwrackpraemie-fuer-alte-diesel-lkw-lkw-zum-schrottplatz-fahren-und-kassieren-11175985.html> [Zugriff am 06.04.2021].

Falck, O., A. Fichtl, A. Janko, T. Kluth und A. Wölfl (2020), Verkehrliche Wirkungen einer Anti-Stau-Gebühr in München, *ifo Forschungsberichte*, Nr. 115, ifo Zentrum für Industrieökonomik und neue Technologien, ifo Institut Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung an der Universität München e.V.

FIS (2019), Forschungs-Informationssystem: Well-to-Wheel Betrachtung der Antriebstechnologien. Online verfügbar unter: <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/332825/> [Zugriff am 27.02.2021].

- Förderdatenbank (2021a), Bayerisches Förderprogramm zum Aufbau einer Wasserstofftankstelleninfrastruktur. Online verfügbar unter: <https://www.foerderdatenbank.de/FDB/Content/DE/Foerderprogramm/Land/Bayern/aufbau-wasserstofftankstelleninfrastruktur.html> [Zugriff am 07.04.2021].
- Förderdatenbank (2021b), Bundesförderung für effiziente Gebäude – Einzelmaßnahmen (BEG EM). Online verfügbar unter: <https://www.foerderdatenbank.de/FDB/Content/DE/Foerderprogramm/Bund/BMWi/bundesfoerderung-effiziente-gebaeude.html> [Zugriff am 16.04.2021].
- Förderdatenbank (2021c), Investive Maßnahmen zur klimafreundlichen gewerblichen Nahmobilität (Mikro-Depot-Richtlinie). Online verfügbar unter: <https://www.foerderdatenbank.de/FDB/Content/DE/Foerderprogramm/Bund/BMU/mikro-depot-richtlinie.html> [Zugriff am 07.04.2021].
- Forster K. und D. Hutter (2010), Umweltzone München - Plakettenpflicht killt Gebrauchtwagenmarkt, *Süddeutsche Zeitung*. Online verfügbar unter: <https://www.sueddeutsche.de/muenchen/umweltzone-muenchen-plakettenpflicht-killt-gebrauchtwagenmarkt-1.585356> [Zugriff am 27.03.2022]
- Freis, J., W. A. Günthner, G. Hausladen und P. Vohlidka (2014), Das CO<sub>2</sub>-neutrale Logistikzentrum - Entwicklung von ganzheitlichen Handlungsempfehlungen für energieeffiziente Logistikzentren, Forschungsbericht, Technische Universität München, Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Lehrstuhl für Bauklimatik und Haustechnik.
- Friedrich, H. E. und F. Kleiner (2017), Scenario analyses for the techno-economical evaluation of the market diffusion of future commercial vehicle concepts, EVS30 Symposium Stuttgart, Germany, October 9 - 11, 2017, German Aerospace Center (DLR).
- FuelsEurope (2017), Statistical Report, European Petroleum Refiners Association.
- Gartner (2019), Logistics Outsourcing Trends in 2020. Online verfügbar unter: <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/logistics-outsourcing-trends-in-2020> [Zugriff am 26.01.2022].
- GEB (2020), Gebäude Energieberater: Kabinett beschließt höheren Startpreis für CO<sub>2</sub>. Online verfügbar unter: <https://www.geb-info.de/nachrichten/klimapaket-kabinett-beschliesst-hoeheren-startpreis-fuer-co2> [Zugriff am 26.02.2021].
- Gnann, T., P. Plötz, A. Kühn und M. Wietschel (2017), How to decarbonise heavy road transport, Fraunhofer ISI; European Council for an Energy-Efficient Economy (ECEEE Summer Study).
- Goodman (2020), Goodman stellt neues Amazon-Verteilzentrum in Völklingen für Lieferungen auf der letzten Meile fertig. Online verfügbar unter: <https://de.goodman.com/uber-uns/presseservice/news/20201021-goodman-completes-amazons-new-last-mile-distribution-centre-in-voelklingen> [Zugriff am 16.04.2021].

- Google (2021), Google Maps: München. Online verfügbar unter: <https://www.google.com/maps/place/M%C3%BCnchen/@48.1318472,11.4548868,11.29z/data=!4m5!3m4!1s0x479e75f9a38c5fd9:0x10cb84a7db1987d!8m2!3d48.1351253!4d11.5819805> [Zugriff am 11.05.2021].
- Griffin, R. (1998), The fundamental principles of cost-benefit analysis, *Water Resources Research*, Vol. 34, No. 8, S. 2063-2071, Department of Agricultural Economics, Texas A&M University, College Station.
- Grohs A. und J. Massiani (2015), The choice of Bass model coefficients to forecast diffusion for innovative products: An empirical investigation for new automotive technologies, *Research in Transportation Economics*, Vol. 50, S. 17-28.
- Groth, J. (2009), Folgen der Krise - Transporteure rollen in die Pleitewelle, Handelsblatt. Online verfügbar unter: <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/mittelstand/folgen-der-krise-transporteure-rollen-in-die-pleitewelle/3266562.html> [Zugriff am 26.01.2022].
- H2 Mobility (2021), H2 tanken - Wasserstoffmobilität beginnt jetzt. Online verfügbar unter: <https://h2.live/#:~:text=Wasserstoff%20wird%20in%20Kilo%20abgerechnet,Kraftstoffkosten%20von%209%2C50%E2%82%AC> [Zugriff am 13.07.2021].
- Hacker, F., R. v. Waldenfels und M. Mottschall (2015), Wirtschaftlichkeit von Elektromobilität in gewerblichen Anwendungen - Betrachtung von Gesamtnutzungskosten, ökonomischen Potenzialen und möglicher CO2-Minderung, Abschlussbericht, Öko-Institut e.V., Deutsches Dialog Institut, VDE, i. A. der Begleitforschung zum BMWi Förderschwerpunkt IKT für Elektromobilität II: Smart Car - Smart Grid - Smart Traffic.
- Hailer, T. (2019), Förderstrategie 2030 für energieeffiziente Lkw, Rahmenbedingungen und Handlungsbedarf, Thomas Hailer Consulting.
- Hamje, H., H. Hass, L. Lonza, H. Maas, A. Reid, K. Rose und T. Venderbosch (2014), EU renewable energy targets in 2020: Revised analysis of scenarios for transport fuels, JRC Science and policy reports, JEC Biofuels Programme, European Commission.
- Handelsblatt (2020a), Eurovignetten-Richtlinie - EU einigt sich nach jahrelangen Verhandlungen bei Lkw-Maut. Online verfügbar unter: <https://www.handelsblatt.com/politik/international/eurovignetten-richtlinie-eu-einigt-sich-nach-jahrelangen-verhandlungen-bei-lkw-maut/26697604.html> [Zugriff am 22.07.2021].
- Handelsblatt (2020b), Rechnungshof kritisiert Pläne für Reform der Kfz-Steuer. Online verfügbar unter: <https://www.handelsblatt.com/politik/deutschland/klimaschutz-rechnungshof-kritisiert-plaene-fuer-reform-der-kfz-steuer/25955144.html?ticket=ST-1832448-4nWCsodfhqESWe9MekE-ap1> [Zugriff am 23.06.2021].
- Handelsblatt (2020c), E-Autos für Hersteller und Käufer weiter teuer. Online verfügbar unter: <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/studie-e-autos-fuer-hersteller-und-kaeufer-weiter-teuer/26131704.html?ticket=ST-39573-I91gJDZy0pcIddtPrFfi-ap1> [Zugriff am 07.04.2021].
- Hauke B. und R. Siekers (2011), Ökobilanzieller Vergleich von Hallen unterschiedlicher Bauweisen, Bauforumstahl.

- Henning, H.-M. und A. Palzer (2012), 100 % Erneuerbare Energien für Strom und Wärme in Deutschland, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE.
- Heracleous E. und A. Lappas (2016), Production of biofuels via Fischer–Tropsch synthesis: Biomass-to-liquids, Chapter 18, *Handbook of Biofuels Production* (Second Edition), Woodhead Publishing, S. 549-593, ISBN 9780081004555.
- Herce, C., C. Martini, M. Salvio und C. Toro (2022), Energy Performance of Italian Oil Refineries Based on Mandatory Energy Audits, *Energies*, 15, S. 532, MDPI.
- Hertwich, E. G. und G. P. Peters (2010), Multiregional Input-Output Database - OPEN:EU Technical Document, Industrial Ecology Programme, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway; CICERO, Oslo, Norway.
- Hirschhausen, C., H. Weigt und G. Zachmann (2007), Preisbildung und Marktmacht auf den Elektrizitätsmärkten in Deutschland – Grundlegende Mechanismen und empirische Evidenz. Dresden University of Technology, DREWAG-Chair for Energy Economics, Verband der Industriellen Energie- und Kraftwirtschaft (VIK), Band Trends in German and European Electricity WP-GE-15.
- Holub, F., A. Rohlf, N. Koch und N. Ritter (2020), The effect of clean air on pharmaceutical expenditures, *Economic letters*, 192, Mercator Research Institute for Global Commons and Climate Change, University of Mannheim.
- ICCT (2013), CO2 Reporting of individual transport, Policy Update International Council on Clean Transportation. Online verfügbar unter: [https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCTupdate\\_CO2reporting\\_FR\\_oct2013.pdf](https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCTupdate_CO2reporting_FR_oct2013.pdf) [Zugriff am 27.02.2021].
- ICCT (2018), Effects of battery manufacturing on electric vehicle life-cycle greenhouse gas emissions, The International Council on clean Transportation, ICCT Briefing.
- IEA (2003), Municipal Solid Waste and its role in sustainability, IEA Bioenergy, ExCo 2003:02.
- IEA (2017a), The Future of Trucks - Implications for energy and the environment, Second Edition, International Energy Agency.
- IEA (2017b), Mobility Model - database and simulation model. Online verfügbar unter: [www.iea.org/etp/etpmodel/transport/](http://www.iea.org/etp/etpmodel/transport/) [Zugriff am 23.06.2021].
- IEA (2021), Oil 2021 - Analysis and forecast to 2026. Online verfügbar unter: [https://iea.blob.core.windows.net/assets/1fa45234-bac5-4d89-a532-768960f99d07/Oil\\_2021-PDF.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/1fa45234-bac5-4d89-a532-768960f99d07/Oil_2021-PDF.pdf) [Zugriff am 01.03.2022].
- IHK Mittlerer Niederrhein (2019), Handbuch: Mikro-Depots im interkommunalen Verbund am Beispiel der Kommunen Krefeld, Mönchengladbach und Neuss. Online verfügbar unter: [https://www.ihk-krefeld.de/de/media/pdf/verkehr/final\\_ihk\\_studie\\_cityhubs\\_191104.pdf](https://www.ihk-krefeld.de/de/media/pdf/verkehr/final_ihk_studie_cityhubs_191104.pdf) [Zugriff am 13.04.2021].
- infoRoad (2021), Tankstellen in deiner Umgebung finden. Online verfügbar unter: <https://www.clever-tanken.de/> [Zugriff am 07.04.2021].
- Inomata, S. und A. Owen (2014), Comparative evaluation of MRIO databases, *Economic Systems Research*, Vol. 26, No. 3, S. 239-244, Institute of Developing Economies

- JETRO, Chiba, Japan; School of Earth and Environment - University of Leeds, UK, The International Input-Output Association.

INRIX (2020), INRIX Verkehrsstudie: Stau verursacht Kosten in Milliardenhöhe, Press Releases. Online verfügbar unter: <https://inrix.com/press-releases/2019-traffic-score-card-german/> [Zugriff am 21.04.2021].

IVT (2011), Eignung einer City-Maut als Instrument der Verkehrs- und Umweltpolitik in der Freien und Hansestadt Hamburg, Institut für angewandte Verkehrs- und Tourismusforschung e.V. (IVT). Online verfügbar unter: <https://www.hamburg.de/content-blob/2929662/41878fd9da0dd98c60665cb00eec53ba/data/city-maut.pdf> [Zugriff am 27.02.2021].

Jung, H. (2009), *Allgemeine Betriebswirtschaftslehre*, 11. Auflage, Oldenbourg Verlag München.

KBA (2010), Fahrzeugzulassungen (FZ) – Bestand an Kraftfahrzeugen nach Emissionen und Kraftstoffen FZ13, Kraftfahrt-Bundesamt.

KBA (2019a), Fahrzeugzulassungen (FZ), Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen, FZ13, 2006 - 2019. Online verfügbar unter: [https://www.kba.de/DE/Statistik/Produktkatalog/produkte/produkte\\_kraftverkehr.html](https://www.kba.de/DE/Statistik/Produktkatalog/produkte/produkte_kraftverkehr.html) [Zugriff am 27.02.2021].

KBA (2019b), Fahrzeugzulassungen (FZ14) Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen Jahr 2019, Kraftfahrtbundesamt.

KBA (2019c), Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge, VD1 Verkehrsaufkommen Jahre 2006 - 2019, Kraftfahrt-Bundesamt, Ausgaben 2006 bis 2019.

KBA (2020a), Bestand an Lkw in den Jahren 2010 bis 2019 nach ausgewählten Herstellern. Online verfügbar unter: [https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/MarkenHersteller/fz\\_b\\_markenHersteller\\_archiv/2019/2019\\_b\\_herst\\_lkw\\_zeitreihe.html](https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/MarkenHersteller/fz_b_markenHersteller_archiv/2019/2019_b_herst_lkw_zeitreihe.html) [Zugriff am 07.04.2021].

KBA (2020b), Durchschnittliche Jahresfahrleistung in km nach Fahrzeugarten seit 2015, Kraftfahrtbundesamt. Online verfügbar unter: [https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/VerkehrKilometer/vk\\_inlaenderfahrleistung/vk\\_inlaenderfahrleistung\\_inhalt.html](https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/VerkehrKilometer/vk_inlaenderfahrleistung/vk_inlaenderfahrleistung_inhalt.html) [Zugriff am 21.06.2021].

KBA (2021), Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Zulassungsbezirken, Kraftfahrtbundesamt. Online verfügbar unter: [https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/ZulassungsbezirkeGemeinden/zulassungsbezirke\\_node.html](https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/ZulassungsbezirkeGemeinden/zulassungsbezirke_node.html) [Zugriff am 27.06.2021].

Kehler, T. (2021), Entwicklung einer Tankstelleninfrastruktur für Erdgas und Biometan, Vorstand Erdgas mobil e.V.

Kleine, A. (2009), Die drei Dimensionen einer Nachhaltigen Entwicklung, *Operationalisierung einer Nachhaltigkeitsstrategie*, S. 5-24, Gabler.

Kluth, M. (2019), Nabu fordert Umweltzone in der City, Kieler Nachrichten. Online verfügbar unter: <https://www.kn-online.de/Kiel/Nabu-fordert-Umweltzone-in-der-ganzen-Kieler-Innenstadt> [Zugriff am 26.05.2021].

- Kugler, U. (2011), Straßenverkehrsemissionen in Europa – Emissionsberechnung und Bewertung von Minderungsmaßnahmen, *Forschungsbericht*, Band 107, Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung.
- Kühn, A., T. Gnann, M. Wietschel, A. Thielmann, A. Sauer, P. Plötz und C. Moll (2017), Teilstudie Brennstoffzellen-Lkw: kritische Entwicklungshemmnisse, Forschungsbedarf und Marktpotential, Wissenschaftliche Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie, Fraunhofer ISI, Fraunhofer IML, PTV Transport Consult GmbH.
- Kutschera, U., F. Pötscher, R. Winter, W. Pölz, G. Lichtblau und H. Schreiber (2014), Ökobilanz alternativer Antriebe - Elektrofahrzeuge im Vergleich, Umweltbundesamt Österreich, Wien.
- Laberer C. und M. Niedermeier (2009), Wirksamkeit von Umweltzonen, ADAC e.V.; Interessenvertretung Verkehr.
- Landeshauptstadt Kiel (2008), Verkehrsentwicklungsplan 2008 - Ideen für eine mobile Stadt.
- Laska, R. und M. Szaniawska-Schwabe (2019), Alte Dieselaautos für Polen, Deutschland exportiert Abgasproblem, ZDF. Online verfügbar unter: <https://www.zdf.de/politik/frontal-21/alte-dieselaautos-fuer-polen-100.html> [Zugriff am 27.03.2022]
- Lehtilä, A. und S. Tuhkanen (1999), Integrated cost-effectiveness analysis of greenhouse gas emission abatement - The case of Finland, *VTT Energy Publications*, Nr. 374, Technical Research Center of Finland, ESPOO 1999.
- Leontief, W. und A. Strout (1963), Multiregional Input-Output Analysis, Structural Interdependence and Economic Development. Palgrave Macmillan, London.
- LfULG (2015), Umweltzone Leipzig, Teil 4: Immissionssituation 2010-2014, Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Freistaat Sachsen.
- LNC & Fraunhofer IML (2020), Untersuchung: Veränderung des gewerblichen Lieferverkehrs und dessen Auswirkungen auf die städtische Logistik, Abschlussbericht, Berlin/Dortmund: LNC Logistic Network Consultants GmbH; Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik.
- Los, B., M. Timmer, R. Stehrer und G.J. de Vries (2016), An Anatomy of the Global Trade Slowdown based on the WIOD 2016 Release, *GGDC research memorandum*, Nr. 162, University of Groningen.
- Maier, R. (2020), E-Autos drücken Marge der Hersteller, Automobil-Produktion. Online verfügbar unter: <https://www.automobil-produktion.de/hersteller/wirtschaft/e-autos-druecken-marge-der-hersteller-229.html> [Zugriff am 20.01.2022].
- Martin, S. (2002), *Advanced Industrial Economics*, Second Edition, Blackwell Publishers Inc.
- MCC (2020), Städtische Umweltzonen senken Ausgaben für Herztabletten und Asthma-sprays, Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC).

Online verfügbar unter: <https://www.mcc-berlin.net/news/meldungen/meldungen-detail/article/staedtische-umweltzonen-senken-ausgaben-fuer-herztabletten-und-asthma-sprays.html> [Zugriff am 01.06.2021].

MDR (2020), Elefantenrennen auf der Autobahn - Warum gibt es kein generelles Überholverbot für Lkw, MDR Aktuell. Online verfügbar unter: <https://www.mdr.de/nachrichten/deutschland/panorama/elefantenrennen-kein-ueberholverbot-lkw-auto-bahn100.html> [Zugriff am 19.05.2021].

MELUND (2020), Fortschreibung Luftreinhalteplan Kiel, Ministerium für Energie- wende, Landwirtschaft, Umwelt, Natur und Digitalisierung des Landes Schleswig-Hol- stein (MELUND), Referat Immissionsschutz, Anlagensicherheit, Anlagenbezogene Energieeffizienz, Marktüberwachung.

Meyer, M. und M. Runkel (2018), CO<sub>2</sub>-basierte Lkw-Maut für Klimaschutz im Güter- verkehr, *Policy Brief*, Nr. 11, Forum Ökologisch-Soziale Marktwirtschaft (FÖS).

Ministère de la transition écologique et solidaire (2017), Fiscalité carbone. Online ver- fügbar unter: <https://www.ecologie.gouv.fr/fiscalite-carbone> [Zugriff am 27.02.2021].

Ministère de la transition écologique et solidaire (2021), Prime à la conversion, bonus écologique : toutes les aides en faveur de l'acquisition de véhicules propres, Ministère de la transition écologique et solidaire. Online verfügbar unter: <https://www.ecolo- gie.gouv.fr/prime-conversion-bonus-ecologique-toutes-aides-en-faveur-lacquisition-ve- hicules-propres> [Zugriff am 27.02.2021].

Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer (2017), France's Report Pursu- ant to Article 13.1 of the Regulation No. 525/2013 on a mechanism for monitoring and reporting greenhouse gas emissions, Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer.

Minken, H. (2021), The Pareto criterion and the Kaldor Hicks criterion, Institute of Transport Economics TØI, Working paper 51494, Oslo, Norway.

Motta, M. (2004), *Competition Policy, Theory and Practice*, Cambridge University Press.

Müller, A. und U. Kerkow (2012), Vom Erz zum Auto Abbaubedingungen und Liefer- ketten im Rohstoffsektor und die Verantwortung der deutschen Automobilindustrie.

Nagel, T. und W. Bächlin (2006), Maßnahmen der Landeshauptstadt Stuttgart zur mög- lichen Einhaltung der Luftschadstoffgrenzwerte, Ingenieurbüro Lohmeyer GmbH & Co. KG im Auftrag des Amtes für Umweltschutz des Landeshauptstadt Stuttgart.

NDR (2021), Amazon-Verteilzentrum kommt nach Schwerin. Online verfügbar unter: <https://www.ndr.de/nachrichten/mecklenburg-vorpommern/Amazon-Verteilzentrum- kommt-nach-Schwerin,amazon462.html> [Zugriff am 16.04.2021].

Nordbayern (2021), Bestätigt: Amazon eröffnet neues Verteilzentrum in Nürnberg. On- line verfügbar unter: <https://www.nordbayern.de/region/nuernberg/bestatigt-amazon-er- offnet-neues-verteilzentrum-in-nurnberg-1.10894414> [Zugriff am 16.04.2021].

NOW (2020), Maßnahmen der Bundesländer zur Förderung alternativer Kraftstoffe - Länderatlas, Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW GmbH), Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI).

NPM (2021), Roadmap – Markthochläufe alternativer Antriebe und Kraftstoffe aus technologischer Perspektive, AG2 – Bericht, Nationale Plattform Zukunft der Mobilität (NPM), Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI).

Ober, R. (2018), Maut ab 7,5 t - Ausweitung auf Bundesstraßen, Industrie- und Handelskammer zu Dortmund, 09. .05. 2018, SVG Westfalen-Lippe eG.

Oeko-Institut e.V. und ICCT (2020), Decarbonization of on-road freight transport and the role of LNG from a German perspective, Oeko-Institut e.V.; International Council on Clean Transportation (ICCT).

OFATE (2018), CO<sub>2</sub>-Bepreisung in Frankreich - Europäisches Emissionshandels-system EU-ETS und CO<sub>2</sub>-Steuer, Deutsch-französisches Büro für die Energiewende. Online verfügbar unter: [https://energie-fr-de.eu/files/ofaenr/04-notes-de-synthese/02-access-libre/05-efficacite-et-flexibilite/170626\\_Memo\\_CO2-Bepreisung\\_in\\_Frankreich\\_DFBEW.pdf](https://energie-fr-de.eu/files/ofaenr/04-notes-de-synthese/02-access-libre/05-efficacite-et-flexibilite/170626_Memo_CO2-Bepreisung_in_Frankreich_DFBEW.pdf) [Zugriff am 27.02.2021].

OVID (2015), Die neue Treibhausgasquote im Verkehr, *OVID Brief*, OVID – Verband der ölsaatenverarbeitenden Industrie in Deutschland e. V. Online verfügbar unter: [https://www.ovid-verband.de/fileadmin/user\\_upload/OVID\\_Briefe/2015-10\\_OVID-Brief\\_THG-Quote-im-Verkehr.pdf](https://www.ovid-verband.de/fileadmin/user_upload/OVID_Briefe/2015-10_OVID-Brief_THG-Quote-im-Verkehr.pdf) [Zugriff am 26.02.2021].

Planersocietät und Urbanus (2018), Green City Plan für die Landeshauptstadt Kiel zur Gestaltung nachhaltiger und emissionsfreier Mobilität, Landeshauptstadt Kiel.

Puls, T. (2006), Alternative Antriebe und Kraftstoffe - Was bewegt das Auto von morgen, *Forschungsberichte aus dem Institut der deutschen Wirtschaft Köln*, Nr. 15; Deutscher Instituts-Verlag GmbH.

PwC (2016), Wirtschaftliche Bewertung des Aktionsplan Klimaschutz, Abschlussbericht, PricewaterhouseCoopers GmbH im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit.

Quaschnig, V. (2021), Spezifische Kohlendioxidemissionen verschiedener Brennstoffe. Online verfügbar unter: <https://www.volker-quaschnig.de/datserv/CO2-spez/index.php> [Zugriff am 23.07.2021].

RadioLausitz.de (2018), Sachsen will Elefantenrennen auf Autobahnen eindämmen. Online verfügbar unter: <https://www.radiolausitz.de/beitrag/sachsen-will-elefantenrennen-auf-autobahnen-eindaemmen-528823/> [Zugriff am 19.05.2021].

Ramesohl, S., F. Merten, M. Fishedick und T. vor der Brüggen (2003), Energy system aspects of natural gas as an alternative fuel in transport, A report of the Wuppertal Institute for Climate Environment Energy. Online verfügbar unter: [https://epub.wuppertal-inst.org/frontdoor/deliver/index/docId/1703/file/1703\\_Natural\\_Gas.pdf](https://epub.wuppertal-inst.org/frontdoor/deliver/index/docId/1703/file/1703_Natural_Gas.pdf) [Zugriff am 01.03.2022].

Regierung von Oberbayern (2007), Luftreinhalte-/Aktionsplan für die Stadt München, 1. Fortschreibung, Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz.

Riegel, A. (2019), Mikrodepots zur Entlastung innerstädtischen Lieferverkehrs - Im Kontext einer innerstädtischen Messeansiedlung, htw saar, Hochschule für Technik und Wissenschaft des Saarlandes, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften.

RP-Online (2019), Dritte Umweltpur in Düsseldorf - NRW-Verkehrsminister Wüst prüft Freigabe von Standstreifen für Busse, RP Online. Online verfügbar unter: [https://rp-online.de/nrw/staedte/duesseldorf/umweltpur-duesseldorf-autobahn-standstreifen-koennten-fuer-busse-freigegeben-werden\\_aid-47536153](https://rp-online.de/nrw/staedte/duesseldorf/umweltpur-duesseldorf-autobahn-standstreifen-koennten-fuer-busse-freigegeben-werden_aid-47536153) [Zugriff am 19.05.2021].

Sachsen-Fernsehen.de (2018), Freistaat weitet Lkw-Überholverbote auf sächsischen Autobahnen aus. Online verfügbar unter: <https://www.sachsen-fernsehen.de/freistaat-weitet-lkw-ueberholverbote-auf-saechsischen-autobahnen-aus-458958/#> [Zugriff am 25.05.2021].

Sahu, R. P. (2017), Margin pressures to stay high for truck makers - Aggressive discounting making it difficult to raise prices, Business Standard. Online verfügbar unter: [https://www.business-standard.com/article/companies/margin-pressures-to-stay-high-for-truck-makers-117121300026\\_1.html](https://www.business-standard.com/article/companies/margin-pressures-to-stay-high-for-truck-makers-117121300026_1.html) [Zugriff am 26.01.2022].

Sathaye, J. A., R. Norgaard und W. Makundi (1993), A Conception Framework for the Evaluation of Cost-Effectiveness of Projects to Reduce GHG Emissions and Sequester Carbon, Lawrence Berkeley National Laboratory.

Sats (2021), Was bedeutet der Begriff Hub. Online verfügbar unter: <https://www.sats-logistics.com/glossar/hub/> [Zugriff am 13.04.2021].

Scholwin, F. (2021), Kraftstoffvergleich – Antriebsarten, Institut für Biogas, Kreislaufwirtschaft und Energie. Online verfügbar unter: <https://www.kraftstoffvergleich.de/antriebsarten.html#lpg> [Zugriff am 07.04.2021].

Schröder, A. und K. Zimmermann (2014), Erstellung regionaler Input-Output-Tabellen - Ein Vergleich existierender Ansätze und ihre Anwendung für die deutsche Ostseeküstenregion, *RADOST-Berichtsreihe*, Nr. 33, Institut für ökologische Wirtschaftsforschung, Technische Universität Berlin.

Speight, J. (2015), *Refinery Feedstocks*, Chapter 2, Fouling in Refineries, Gulf Professional Publishing, S. 31-64.

Spiegel (2010), Die flächendeckende Überholverbote sind überflüssig, Lkw-Verkehr. Online verfügbar unter: <https://www.spiegel.de/auto/aktuell/lkw-verkehr-die-flaechendeckende-ueberholverbote-sind-ueberfluessig-a-719010.html> [Zugriff am 11.03.2022].

Spiegel (2019), Umweltpuren in Düsseldorf - Freie Fahrt für Fahrgemeinschaften, Spiegel Mobilität. Online verfügbar unter: <https://www.spiegel.de/auto/aktuell/umweltpuren-in-duesseldorf-freie-fahrt-fuer-fahrgemeinschaften-a-1296334.html> [Zugriff am 27.02.2021].

Spiegel (2020), CO<sub>2</sub>-Steuer: Regierung will Lkw von Spritpreis-Erhöhung befreien. Online verfügbar unter: <https://www.spiegel.de/wirtschaft/soziales/co2-steuer-regierung-will-lkw-von-spritpreis-erhoehung-befreien-a-c1be5598-b947-4077-879e-058a2d3061c5> [Zugriff am 19.07.2021].

Stadt Düsseldorf (2020), Umweltpuren in Düsseldorf. Online verfügbar unter: <https://www.duesseldorf.de/verkehrsmanagement/clever-unterwegs/umweltpuren.html> [Zugriff am 27.02.2021].

Stadt Düsseldorf (2021), Luftreinhaltung: Umweltpuren werden abgelöst. Online verfügbar unter: <https://www.duesseldorf.de/aktuelles/news/detailansicht/newsdetail/luftreinhaltung-umweltpuren-werden-abgeloest-1.html> [Zugriff am 31.08.2021].

Stadt Düsseldorf Umweltamt (2020), Stickstoffdioxid-Belastung der Luft geht zurück, Landeshauptstadt Düsseldorf. Online verfügbar unter: <https://www.duesseldorf.de/umweltamt/aktuell/detailseite/newsdetail/stickstoffdioxid-belastung-der-luft-geht-zurueck-1.html> [Zugriff am 21.04.2021].

Statista (2013), Prognose zur Preisentwicklung von Rohöl, Benzin, Diesel und Erdgas von 2010 bis zum Jahr 2040. Online verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/285608/umfrage/rohoeel-benzin-diesel-und-erdgas-prognose-zur-preisentwicklung/> [Zugriff am 20.01.2022].

Statista (2019a), Anzahl der Kfz-Neuzulassungen in Frankreich in den Jahren 2008 bis 2018 nach Fahrzeugtyp. Online verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/202974/umfrage/kfz-neuzulassungen-in-frankreich-nach-fahrzeugtyp/> [Zugriff am 10.08.2021].

Statista (2019b), Länge der Autobahnen in Deutschland von 1995 bis 2019 (in Kilometern). Online verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/2972/umfrage/entwicklung-der-gesamtlaenge-des-autobahnnetzes/> [Zugriff am 16.04.2021].

Statista (2020), Gesamtes Transportaufkommen von Gütern in Deutschland im Zeitraum von 2000 bis 2019. Online verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/7041/umfrage/gesamtes-gueteraufkommen-in-deutschland/> [Zugriff am 18.05.2021].

Statista (2021a), Anzahl der Speditionen in Deutschland in den Jahren von 2009 bis 2019. Online verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/422098/umfrage/anzahl-der-speditionen/> [Zugriff am 30.07.2021].

Statista (2021b), Bruttoinlandsprodukt (BIP) in Deutschland in jeweiligen Preisen vom 3. Quartal 2017 bis zum 3. Quartal 2021. Online verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/3829/umfrage/entwicklung-des-bruttoinlandsprodukts-in-deutschland-nach-quartalen/> [Zugriff am 23.11.2021].

Statista (2021c), Monatliche Entwicklung des Wechselkurses des Euro gegenüber dem US-Dollar von .10. 2020 bis .10. 2021. Online verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/214878/umfrage/wechselkurs-des-euro-gegenueber-dem-us-dollar-monatliche-entwicklung/> [Zugriff am 23.11.2021].

Statista (2021d), Anteil der Bruttostromerzeugung aus Windkraft an der Gesamterzeugung in Deutschland in den Jahren 1998 bis 2021. Online verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/239528/umfrage/anteil-der-stromerzeugung-aus-windkraft-in-deutschland/> [Zugriff am 20.02.2022].

StBA (2017), Energiesteuerstatistik 2016, Statistisches Bundesamt, Finanzen und Steuern, Fachserie 14, Reihe 9.3.

Stiglitz, J. (2009), Government Failure vs. Market Failure: Principles of Regulation, *Government and Markets: Toward a New Theory of Regulation*, S. 13-51, E. Balleisen & D. Moss, Cambridge University Press.

Stoneman, P. (2002), The Economics of Technological Diffusion, W. B. School, Blackwell Publishers Inc., S. 13 ff.

Strategy& (2020a), Making zero-emission trucking a reality - Truck Study 2020: Routes to decarbonizing commercial vehicles. Online verfügbar unter: <https://www.strategyand.pwc.com/de/en/insights/2020/green-trucking/truck-study-2020.pdf> [Zugriff am 07.04.2021].

Strategy& (2020b), The truck industry in 2020 - How to move in moving markets. Online verfügbar unter: <https://www.strategyand.pwc.com/de/en/industries/transport/truck-industry-2020/the-truck-industry-in-2020.pdf> [Zugriff am 26.01.2022].

Süddeutsche Zeitung (2020), Stauprobem wächst, 4,5 Tage Verlust im Jahr. Online verfügbar unter: <https://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/auto-duesseldorf-studie-stauprobem-waechst-4-5-tage-verlust-im-jahr-dpa.urn-newsml-dpa-com-20090101-200129-99-685785> [Zugriff am 20.01.2022].

Sunarti, S. D. Tarigan und S. Widyaliza (2015), Expansion of Oil Palm Plantations and Forest Cover Changes in Bungo and Merangin Districts, Jambi Province, Indonesia, *Procedia Environmental Sciences*, Vol. 24, S. 199-205.

Swissnuclear (2020), So funktioniert ein Kernkraftwerk, Kernenergie.ch. Online verfügbar unter: <https://www.kernenergie.ch/de/so-funktioniert-ein-kernkraftwerk.html> [Zugriff am 27.02.2021].

T&E (2020), Comparison of hydrogen and battery electric trucks - Methodology and underlying assumptions, Transport & Environment (T&E); European Federation for Transport and Environment AISBL.

t3n (2020), Amazon kündigt neue Verteilzentren in Deutschland an. Online verfügbar unter: <https://t3n.de/news/amazon-kuendigt-neue-deutschland-1287039/> [Zugriff am 16.04.2021].

Tesla (2020), Tesla Q3 2020 Update. Online verfügbar unter: [https://tesla-cdn.thron.com/static/4E7BR9\\_TSLA\\_Q3\\_2020\\_Update\\_P0Q85U.pdf?xseo=&response-content-disposition=inline%3Bfilename%3D%22TSLA-Q3-2020-Update.pdf%22](https://tesla-cdn.thron.com/static/4E7BR9_TSLA_Q3_2020_Update_P0Q85U.pdf?xseo=&response-content-disposition=inline%3Bfilename%3D%22TSLA-Q3-2020-Update.pdf%22) [Zugriff am 07.04.2021].

TfL (2021), Congestion Charge, Transport for London. Online verfügbar unter: <https://tfl.gov.uk/modes/driving/congestion-charge> [Zugriff am 27.02.2021].

Toll Collect (2019), Maut-Tarife. Online verfügbar unter: <https://web.archive.org/web/20130407082337/http://www.toll-collect.de/rund-um-ihre-maut/maut-tarife.html> [Zugriff am 26.02.2021].

Toll-Collect (2021), Mauttarife. Online verfügbar unter: [https://www.toll-collect.de/de/toll\\_collect/bezahlen/maut\\_tarife/maut\\_tarife.html](https://www.toll-collect.de/de/toll_collect/bezahlen/maut_tarife/maut_tarife.html) [Zugriff am 07.04.2021].

UBA & DEHSt (2019), Brennstoffemissionshandelsgesetz in Kraft getreten, Umweltbundesamt, Deutsche Emissionshandelsstelle. Online verfügbar unter: <https://www.dehst.de/SharedDocs/news/DE/BEHG-in-kraft.html> [Zugriff am 26.02.2021].

UBA (2008), Wirtschaftliche Bewertung von Maßnahmen des integrierten Energie- und Klimaprogramms (IEKP) - Wirtschaftlicher Nutzen des Klimaschutzes - Kostenbetrachtung ausgewählter Einzelmaßnahmen der Meseberger Beschlüsse zum Klimaschutz, *Climate Change 14/08*, Umweltbundesamt (UBA).

UBA (2012), Kosten und Nutzen von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel – Analyse von 28 Anpassungsmaßnahmen in Deutschland, *Climate Change 10/2012*, Umweltbundesamt (UBA).

UBA (2013), Treibhausgas-Emissionen durch Infrastruktur und Fahrzeuge des Straßen-, Schienen- und Luftverkehrs sowie der Binnenschifffahrt in Deutschland, *Texte | 96/2013*, Umweltbundesamt (UBA).

UBA (2016), CO<sub>2</sub> Emission Factors for Fossil Fuels, *Climate Change 28/2016*, Umweltbundesamt (UBA).

UBA (2019a), Umweltzonen in Deutschland: Umweltzone Düsseldorf, Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (UBA).

UBA (2019b), Umweltzonen in Deutschland: Umweltzone München, Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (UBA).

UBA (2019c), Entwicklung und Bewertung von Maßnahmen zur Verminderung von CO<sub>2</sub>-Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen, *Texte 12/2019*, Abschlussbericht, Umweltbundesamt (UBA), ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Heidelberg, INFRAS AG Forschung und Beratung, Bern, Forschungsgesellschaft für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik mbH, Graz.

UBA (2019d), Kein Grund zur Lücke - So erreicht Deutschland seine Klimaschutzziele im Verkehrssektor für das Jahr 2030, Umweltbundesamt (UBA).

UBA (2020a), Deutschlandweite Karte zur Lage von Umweltzonen, Durchfahrtsbeschränkungen und Luftreinhalteplänen, Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter: <http://gis.uba.de/website/umweltzonen/index.php?tab=karte> [Zugriff am 26.02.2021].

UBA (2020b), NO<sub>2</sub>-Grenzwertüberschreitungen 2018/2019, Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2546/dokumente/no2-ueberschreitungen\\_staedte\\_2019\\_stand\\_28.05.2020.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2546/dokumente/no2-ueberschreitungen_staedte_2019_stand_28.05.2020.pdf) [Zugriff am 26.02.2021].

UBA (2020c), Umweltzonen in Deutschland, Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe/feinstaub/umweltzonen-in-deutschland#1-wie-ist-der-aktuelle-stand-der-umweltzonen> [Zugriff am 26.02.2021].

UBA (2020d), CO<sub>2</sub>-Fußabdrücke im Alltagsverkehr - Datenauswertung auf Basis der Studie Mobilität in Deutschland, *Texte 224/2020*, Umweltbundesamt (UBA), infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH, Berlin, Bonn.

UBA (2020e), Urbane Logistik - Herausforderungen für Kommunen, Auswertung und Ergebnisbericht einer Online-Befragung, *Texte 236/2020*, Umweltbundesamt (UBA).

UBA (2020f), Emissionsstandards: Pkw und leichte Nutzfahrzeuge, Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/emissionsstandards/pkw-leichte-nutzfahrzeuge#die-europaische-abgas-gesetzgebung> [Zugriff am 23.06.2021].

UBA (2021a), Carbon Capture and Storage, Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/gewaesser/grundwasser/nutzung-belastungen/carbon-capture-storage#grundlegende-informationen> [Zugriff am 28.02.2021].

UBA (2021b), Schwere Nutzfahrzeuge - Die europäische Abgas- Gesetzgebung, Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/emissionsstandards/schwere-nutzfahrzeuge> [Zugriff am 26.02.2021].

UBA (2021c), Treibhausgasminderungsziele Deutschlands, Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-minderungsziele-deutschlands> [Zugriff am 26.02.2021].

UBA (2021d), HBEFA 4.1: Das Handbuch für Emissionsfaktoren (HBEFA) wurde im Auftrag der Umweltbundesämter von Deutschland, der Schweiz und Österreich erstellt. Online verfügbar unter: <https://www.hbefa.net/d/> [Zugriff am 27.06.2021].

UBA (2021e), Emissionskennzahlen Datenbasis 2019, Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter: [https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/themen/mobilitaet/daten/ekz\\_pkm\\_tkm\\_verkehrsmittel.pdf](https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/themen/mobilitaet/daten/ekz_pkm_tkm_verkehrsmittel.pdf) [Zugriff am 20.01.2022].

UBA (2021f), Emissionen des Verkehrs - Minderungsziele der Bundesregierung, Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/emissionen-des-verkehrs#minderungsziele-der-bundesregierung> [Zugriff am 12.03.2022].

UBA (2021g), Klimaschutzinstrumente im Verkehr, Umgestaltung der Kfz-Steuer: Bonus-Malus-System, Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/366/dokumente/uba-kurzpapier\\_bonus-malus-system\\_kliv.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/366/dokumente/uba-kurzpapier_bonus-malus-system_kliv.pdf) [Zugriff am 22.04.2022].

ufop (2021), UFOP Report on Global Market Supply 2019/2020, Union zur Förderung von Öl- und Proteinpflanzen e.V. (UFOP). Online verfügbar unter:

[https://www.ufop.de/files/7215/7953/0161/WEB\\_UFOP\\_Global\\_Supply\\_Report\\_A5\\_EN\\_19\\_20.pdf](https://www.ufop.de/files/7215/7953/0161/WEB_UFOP_Global_Supply_Report_A5_EN_19_20.pdf) [Zugriff am 01.03.2022].

United Nations (1999), Handbook of Input-Output Table Compilation and Analysis, Studies in Methods Series F No. 74, *Handbook of National Accounting*, Department of Economic and Social Affairs - Statistics Division, New York 1999.

UNITI (2020), UNITI informiert: Das kostet Tankstellen-Infrastruktur, UNITI Bundesverband mittelständischer Mineralölunternehmen e.V. Online verfügbar unter: <https://www.uniti.de/images/PDF/publikationen/UNITI%20informiert/ui/Das%20kostet%20Tankstelleninfrastruktur.pdf> [Zugriff am 28.07.2021].

VDB (2015), Klimaschutz-Quote, Verband der Deutschen Biokraftstoffindustrie e.V. Online verfügbar unter: [http://www.biokraftstoffverband.de/tl\\_files/download/Grafiken\\_und\\_Bildmaterial/14-08-22%20THG-Quote%20Info%20Grafik.pdf](http://www.biokraftstoffverband.de/tl_files/download/Grafiken_und_Bildmaterial/14-08-22%20THG-Quote%20Info%20Grafik.pdf) [Zugriff am 26.02.2021].

VDE (2020), Logistik, Energie und Mobilität 2030 - Metastudie im BMWi Technologieprogramm IKT für Elektromobilität, VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.

Verbraucherzentrale (2020), Diesel-Fahrverbote in Deutschland: Fragen und Antworten, Verbraucherzentrale.de. Online verfügbar unter: <https://www.verbraucherzentrale.de/wissen/reise-mobilitaet/unterwegs-sein/dieselfahrverbote-in-deutschland-fragen-und-antworten-26275> [Zugriff am 26.02.2021].

Verkehrsrundschau (2004), Verdi: Höherer Zeitdruck auf LKW-Fahrer ist Schuld an Unfällen. Online verfügbar unter: <https://www.verkehrsrundschau.de/nachrichten/transport-logistik/verdi-hoeherer-zeitdruck-auf-lkw-fahrer-ist-schuld-an-unfaellen-3038945> [Zugriff am 12.03.2022].

Verkehrsrundschau (2011a), DHL bietet CO2-Reporting für Lkw-Transporte - Kunden von DHL Freight können einen CO2-Bericht für ihre Sendungen per Lkw anfordern. Online verfügbar unter: <https://www.verkehrsrundschau.de/nachrichten/dhl-bietet-co2-reporting-fuer-lkw-transporte-1030059.html> [Zugriff am 30.07.2021].

Verkehrsrundschau (2011b), CO2-Berechnung - Das Sonderheft zur Ermittlung von Treibhausgas-Emissionen in der Logistik, Verlag Heinrich Vogel, Springer Fachmedien München GmbH.

Verkehrsrundschau (2016), Staus kosten Fuhrunternehmen rund 214 Millionen Euro pro Jahr. Online verfügbar unter: <https://www.verkehrsrundschau.de/nachrichten/staus-kosten-fuhrunternehmen-rund-214-millionen-euro-pro-jahr-1858146.html> [Zugriff am 20.04.2021].

Verkehrsrundschau (2017), Mautstatistik: Anteil Ausländischer Lkw weiter gestiegen. Online verfügbar unter: <https://www.verkehrsrundschau.de/nachrichten/mautstatistik-anteil-auslaendischer-lkw-weiter-gestiegen-2026879.html#:~:text=Ausl%C3%A4ndischen%20Lkw%20gewinnen%20in%20Deutschland,2017%20bei%2042%2C4%20Prozent.> [Zugriff am 06.04.2021].

Verkehrsrundschau (2018), Auch Hybrid-Lkw werden von der Maut befreit. Online verfügbar unter: <https://www.verkehrsrundschau.de/nachrichten/auch-hybrid-lkw-werden-von-der-maut-befreit-2205971.html> [Zugriff am 07.04.2021].

Verkehrsrundschau (2019a), Studie: Güterverkehr für 22 Prozent der externen Kosten verantwortlich. Online verfügbar unter: <https://www.verkehrsrundschau.de/nachrichten/studie-gueterverkehr-fuer-22-prozent-der-externen-kosten-verantwortlich-2452325.html> [Zugriff am 30.07.2021].

Verkehrsrundschau (2019b), Studie: Mikro-Depots entlasten Infrastruktur in Innenstädten. Online verfügbar unter: <https://www.verkehrsrundschau.de/nachrichten/studie-mikro-depots-entlasten-infrastruktur-in-innenstaedten-2484951.html> [Zugriff am 07.04.2021].

Verkehrsrundschau (2020), Studie: CO<sub>2</sub>-Daten bei 45 Prozent der Logistikunternehmen ein Problem. Online verfügbar unter: <https://www.verkehrsrundschau.de/nachrichten/studie-co2-daten-bei-45-prozent-der-logistikunternehmen-ein-problem-2620418.html> [Zugriff am 30.07.2021].

WELT (2017), Lkw überholen zu lassen, ist unnötiger Anachronismus. Online verfügbar unter: <https://www.welt.de/motor/article160460871/Lkw-ueberholen-zu-lassen-ist-unnoetiger-Anachronismus.html#:~:text=Im%20Jahr%202016%20Lastwagen%20auf,hingegen%20leider%20nur%20die%20Anzahl> [Zugriff am 11.03.2022].

Wietschel, M., C. Moll, S. Oberle, B. Lux, S. Timmerberg, U. Neuling, M. Kaltschmitt, N. Ashley-Belbin (2019), Klimabilanz, Kosten und Potenziale verschiedener Kraftstoffarten und Antriebssysteme für Pkw und Lkw, Endbericht, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Technische Universität Hamburg (TUHH), Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft (IUE), IREES GmbH, Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien.

Wirtschaftsförderung Sachsen (2021), Verkehrsinfrastruktur. Online verfügbar unter: <https://standort-sachsen.de/de/standort/lage-infrastruktur/verkehrsinfrastruktur#:~:text=2%2C77%20km%20%2F%201.000%20Ew,Auto-bahn%20und%205.756%20Kilometer%20Kreisstra%C3%9Fen> [Zugriff am 23.07.2021].

WirtschaftsWoche (2019), Staukosten - Der Stillstand kostet Milliarden. Online verfügbar unter: <https://www.wiwo.de/politik/deutschland/staukosten-der-stillstand-kostet-milliarden/23977168.html> [Zugriff am 20.04.2021].

Witsch, K. (2022), Plus 60 Prozent beim Gas: Russlands Angriff auf Ukraine sorgt für kräftigen Anstieg der Energiepreise, Handelsblatt.

WZ (2019a), Umweltspur: So lief der erste Tag auf der Merowingerstraße, Westdeutsche Zeitung. Online verfügbar unter: [https://www.wz.de/nrw/duesseldorf/umweltspur-auf-merowingerstrasse-in-duesseldorf-wird-angenommen\\_aid-38126109](https://www.wz.de/nrw/duesseldorf/umweltspur-auf-merowingerstrasse-in-duesseldorf-wird-angenommen_aid-38126109) [Zugriff am 13.05.2021].

WZ (2019b), Welche Erfahrungen andere Städte mit Umweltpuren machen, Westdeutsche Zeitung. Online verfügbar unter: [https://www.wz.de/nrw/duesseldorf/welche-erfahrungen-andere-staedte-mit-umweltpuren-machen\\_aid-37943415](https://www.wz.de/nrw/duesseldorf/welche-erfahrungen-andere-staedte-mit-umweltpuren-machen_aid-37943415) [Zugriff am 27.02.2021].

Yadav, K. und A. Sircar (2021), Fundamentals and developments of compressed biogas in city gas distribution network in India: A review, *Petroleum Research*.

Zeit-Online (2019), Das haben früher alles Autos gemacht -Das Paket kommt mit der Tram. Online verfügbar unter: [https://www.zeit.de/mobilitaet/2019-08/logistik-pakete-co2-emissionen-transportfahrzeuge-umweltschutz/seite-2?utm\\_referrer=https%3A%2F%2F%0E2%80%A6](https://www.zeit.de/mobilitaet/2019-08/logistik-pakete-co2-emissionen-transportfahrzeuge-umweltschutz/seite-2?utm_referrer=https%3A%2F%2F%0E2%80%A6) [Zugriff am 07.04.2021].

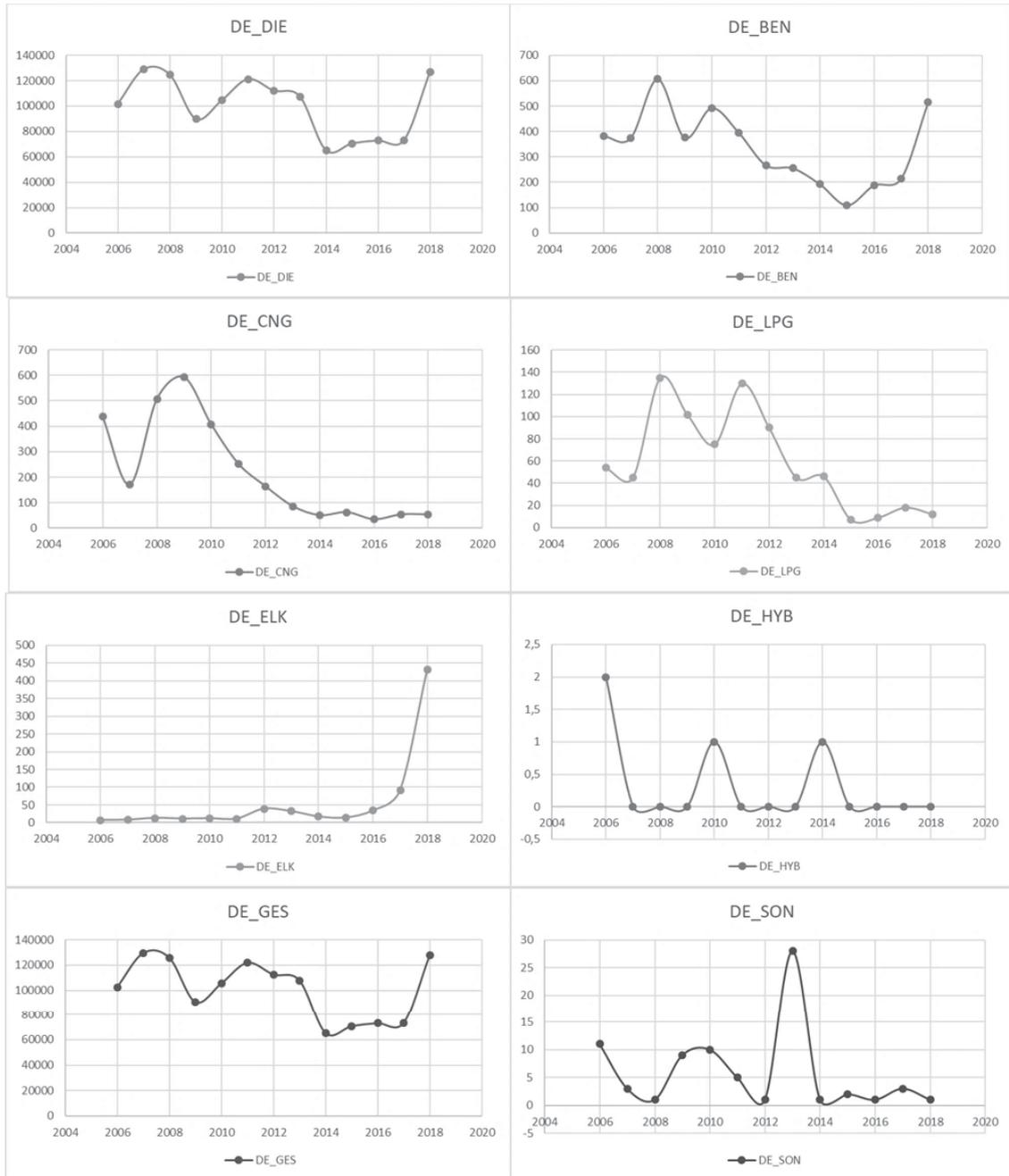
Zimmermann, U. (2021), Neues Amazon-Verteilzentrum bei Aachen in Bau, WDR. Online verfügbar unter: <https://www1.wdr.de/nachrichten/rheinland/neues-amazon-verteilzentrum-gewerbepark-avantis-aachen-heerlen-100.html> [Zugriff am 16.04.2021].

Zoll (2021), Steuervergünstigungen für reine Elektrofahrzeuge. Online verfügbar unter: [https://www.zoll.de/DE/Fachthemen/Steuern/Verkehrsteuern/Kraftfahrzeugsteuer/Steuerverguenstigung/Elektrofahrzeuge/elektrofahrzeuge\\_node.html](https://www.zoll.de/DE/Fachthemen/Steuern/Verkehrsteuern/Kraftfahrzeugsteuer/Steuerverguenstigung/Elektrofahrzeuge/elektrofahrzeuge_node.html) [Zugriff am 07.04.2021].

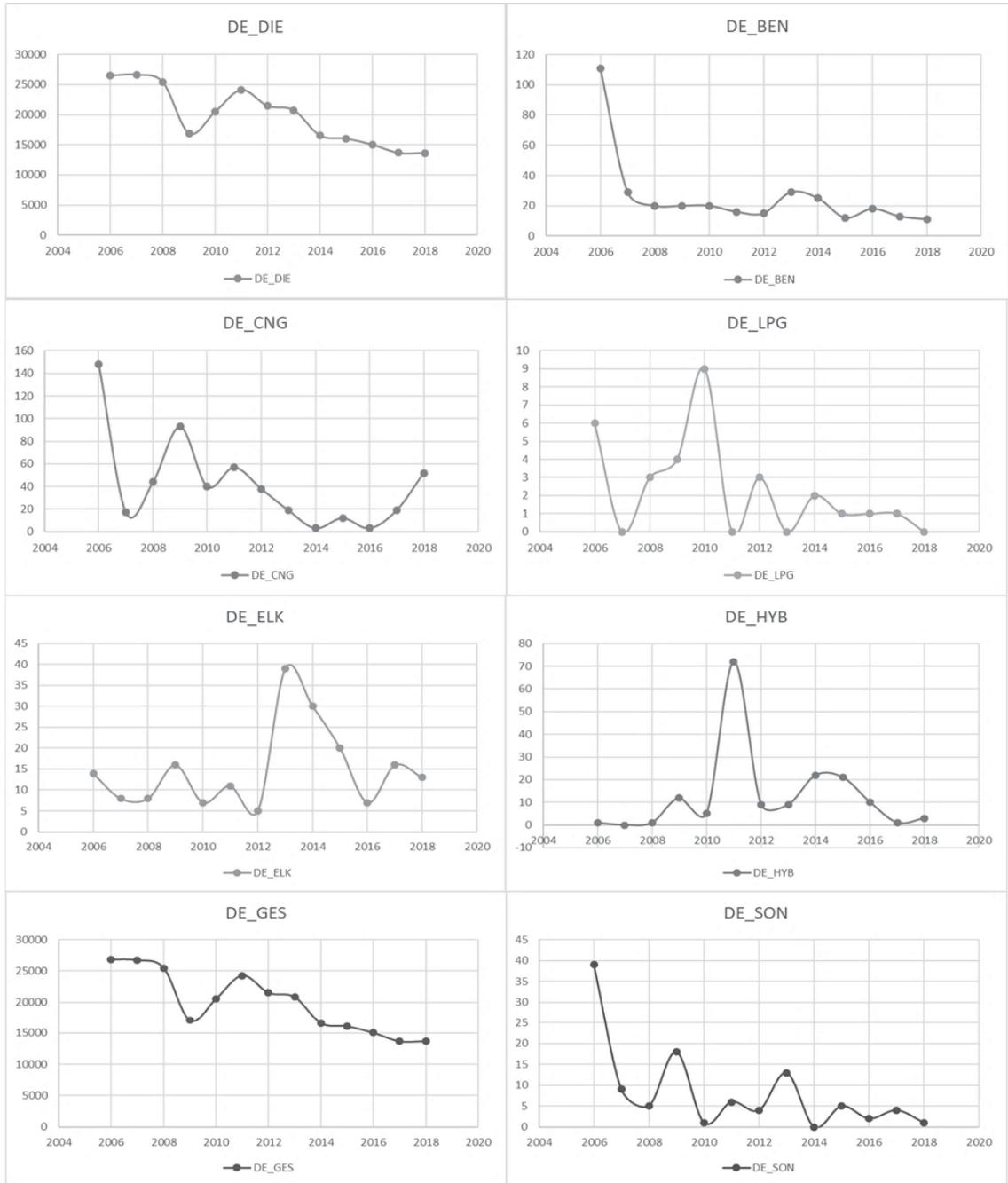
Zukunft Erdgas (2019), Alternative Kraftstoffe - Vergleich CNG und LPG. Online verfügbar unter: <https://www.erdgas.info/erdgas-mobil/alternative-kraftstoffe/vergleich-cng-und-lpg> [Zugriff am 29.04.2021].

# 11. Anhang

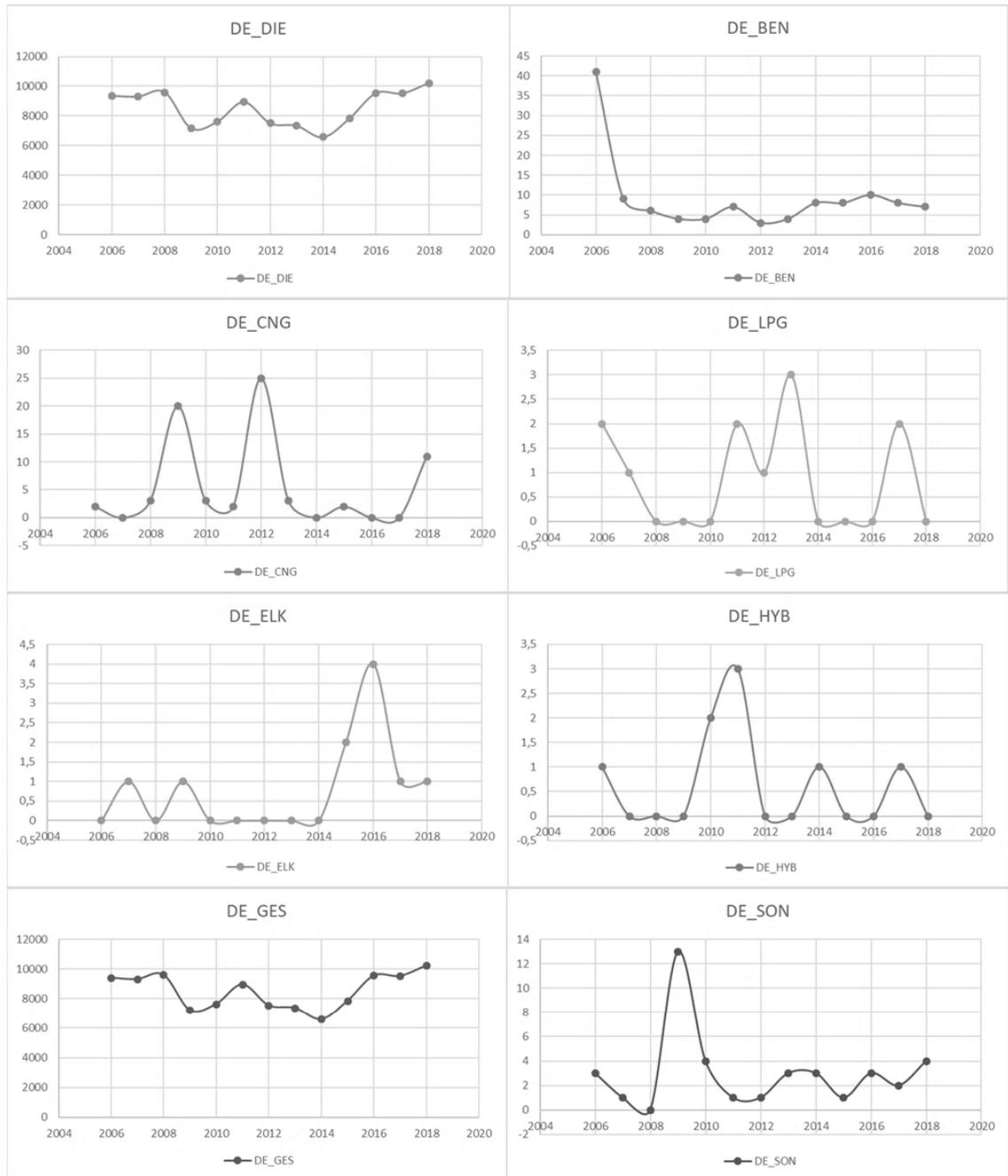
a. Neuzulassungen, Jährliche Daten, nach Kraftstoffen, GK bis 1999, alle Bundesländer



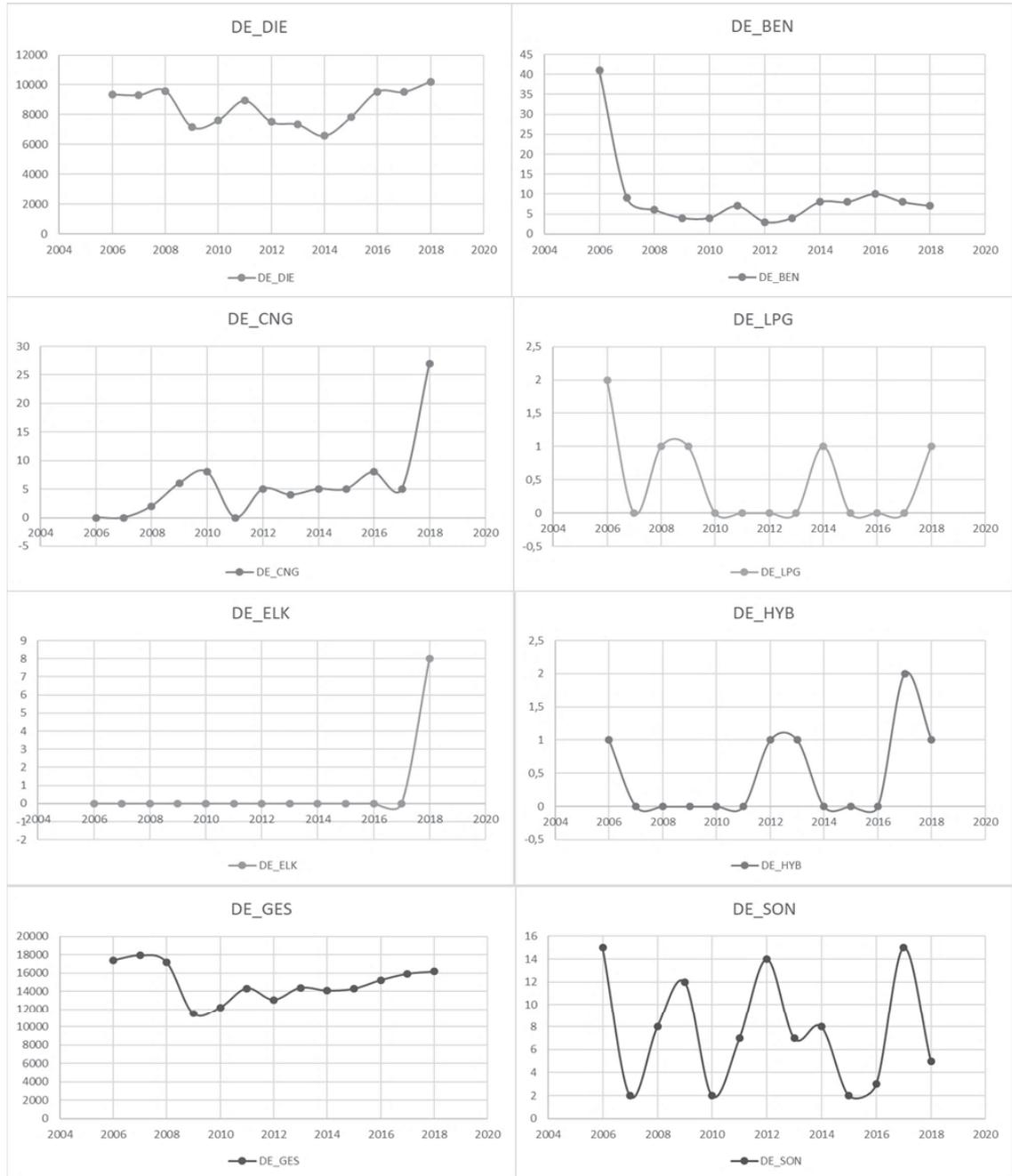
b. Neuzulassungen, Jährliche Daten, nach Kraftstoffen, GK bis 5999, alle Bundesländer



c. Neuzulassungen, Jährliche Daten, nach Kraftstoffen, GK bis 11999, alle Bundesländer



d. Neuzulassungen, Jährliche Daten, nach Kraftstoffen, GK bis mehr, alle Bundesländer



e. Betrachtete Herstellungsverfahren

Energie-träger	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	Kraftstoff	Kodierung
<b>Rohöl</b>	Produktion und Verarbeitung		Verschiffung	Aufbereitung in Raffinerie	Gemischter Transport zum Depot + Straße, 150 km	<b>Benzin</b>	<b>OIGA</b>
<b>Rohöl</b>	Produktion und Verarbeitung		Verschiffung	Aufbereitung in Raffinerie	Gemischter Transport zum Depot + Straße, 150 km	<b>Diesel</b>	<b>OIDI</b>
<b>Erdgas (piped)</b>	Production and conditioning		Pipeline into EU/ Pipelines in EU		NG grid (LP/MP) + on-site compression	<b>CNG</b>	<b>NGCNa</b>
<b>Erdgas (piped)</b>	Production and conditioning		Pipeline into EU/ Pipelines in EU	GTL plant	As for refinery fuels	<b>Syn. Diesel</b>	<b>NGSDb</b>
<b>Erdgas (piped)</b>	Production and conditioning		Pipeline into EU/ Pipelines in EU	CCGT (+ CCS option)	MV grid	<b>Elektrizität</b>	<b>NGELa</b>
<b>Erdgas (piped)</b>	Production and conditioning		Pipeline into EU	CCGT + on-site electrolyser	Compression/ Pipeline, 50 km + comp	<b>Wasserstoff</b>	<b>NGHYa</b>
<b>Erdgas (remote)</b>	Production and conditioning	GTL plant (+ CCS option)	Shipping		As for refinery fuels or mixed land transport, 500 km	<b>Syn. Diesel</b>	<b>NGSDa</b>
<b>Erdgas (remote)</b>	Production and conditioning	Liquefaction (+ CCS option)	Shipping (LNG)	(Vapourisation)	NG grid + on-site comp/ road, 500km + on-site vap/comp	<b>CNG</b>	<b>NGCNb</b>
<b>Erdgas (remote)</b>	Production and conditioning	Liquefaction (+ CCS option)	Shipping (LNG)		Road, 500 km + retail as LNG	<b>LNG</b>	<b>NGLN</b>

<b>Erdgas (remote)</b>	Production and conditioning	Liquefaction (+ CCS option)	Shipping (LNG)	Shipping (LNG)	MV grid	<b>Elektrizität</b>	<b>NGELb</b>
<b>Erdgas (remote)</b>	Production treating & upgrading	Liquefaction	Shipping (LNG)	CCGT + on-site electrolyser	Compression	<b>Wasserstoff</b>	<b>NGHYb</b>
<b>Kohle</b>	Production and conditioning		Typical for EU coal mix	CTL plant (+ CCS option)	As for refinery fuels	<b>Syn. Diesel</b>	<b>COSD</b>
<b>Kohle</b>	Production and conditioning		Typical for EU coal mix	State-of-the-art conv. Techn./IGCC (+CCS option)	MV grid	<b>Elektrizität</b>	<b>COEL</b>
<b>Biomasse (maize)</b>	Growing, harvesting		Road	Biogas plant (CDS)	NG grid + On-site compression	<b>CBG</b>	<b>BICBa</b>
<b>Biomasse (municipal waste)</b>	Production treating & upgrading				NG grid + On-site compression	<b>CBG</b>	<b>BICBb</b>
<b>Biomasse (municipal waste)</b>	Production	Gas engine			MV grid	<b>Electricity</b>	<b>BIELa</b>
<b>Biomasse (municipal waste)</b>	Production treating & upgrading		NG grid	CCGT	MV grid	<b>Electricity</b>	<b>BIELb</b>
<b>Biomasse (waste wood via black liquor)</b>	Collection		Road	BL gasifier + FT plant wate wood boiler	Road, 2x150 km	<b>Syn. Diesel</b>	<b>BISDa</b>
<b>Biomasse (waste wood via black liquor)</b>	Collection		Road	BL gasifier + power wate wood boiler	MV grid	<b>Electricity</b>	<b>BIELc</b>

<b>Biomasse (wood far-med/waste)</b>	Growing, Harvesting, Collection		Road, 50 km	200 MW gasifier FT plant	Road, 2x150 km	<b>Syn. Diesel</b>	<b>BISDb</b>
<b>Biomasse (wood far-med/waste)</b>	Growing, Harvesting, Collection		Road, 50 km	200/10 MW gasifier CCGT/ Boiler + steam turbine/ co-firing in coal power station	MV grid	<b>Electricity</b>	<b>BIELd</b>
<b>Biomasse (wood far-med/waste)</b>	Growing, harvesting, collection		Road, 50 km	200/10 MW gasifier + CO shift/ 200 MW gasifier + CCGT + on-site electrolyser/ Boiler + steam turbine + on-site electrolyser	Pipeline, 10/50 km + compression/ Compression	<b>Hydrogen</b>	<b>BIHY</b>
<b>Wind</b>	Wind turbine On/offshore		Electricity distribution (MV)	Hydrogen via electrolysis + Diesel synthesis via methanol	As for refinery fuels	<b>Syn. Diesel</b>	<b>WISD</b>
<b>Wind</b>	Wind turbine On/offshore		Electricity distribution (MV)	Hydrogen via electrolysis + Methane synthesis	NG grid (LP/MP) + On-site compression	<b>SNG</b>	<b>WISN</b>
<b>Wind</b>				Wind turbine On-/offshore	LV grid	<b>Electricity</b>	<b>WEIL</b>
<b>Wind</b>				Wind turbine Offshore + central electrolyser	Pipeline, 50 km + compression	<b>Hydrogen</b>	<b>WIHY</b>

<b>Schiefergas</b>	Production and conditioning				NG grid (LP/MP) + on-site compression	<b>CNG</b>	<b>SHCN</b>
<b>LPG</b>	Production and conditioning		Shipping (LPG)		Road, 500 km	<b>LPG</b>	<b>LPLP</b>
<b>Kernenergie</b>				Nuclear power plant	LV grid	<b>Elektrizität</b>	<b>NUEL</b>
<b>Elektrizität</b>				On-site electrolyser	Compression	<b>Wasserstoff</b>	<b>ELHY</b>

Quelle: (Edwards et al., 2013)

#### f. Relevante Förderprogramme des Bundes

<b>Förderprogramm</b>	<b>Förderbereich</b>	<b>Förderberechtigte</b>	<b>Kurztext</b>
Städtische Logistik	Infrastruktur, Energieeffizienz & Erneuerbare Energien	Kommune	Landkreise und Kommunen, die optimale Rahmenbedingungen für eine effiziente und nachhaltige städtische Logistik schaffen wollen, können unter bestimmten Voraussetzungen eine finanzielle Förderung erhalten.
IKT für Elektromobilität: intelligente Anwendungen für Mobilität, Logistik und Energie	Energieeffizienz & Erneuerbare Energien, Forschung & Innovation (themenspezifisch)	Unternehmen, Forschungseinrichtung, Hochschule	Wenn Sie Forschungs- und Entwicklungsvorhaben zu IKT-basierten Elektromobilitätslösungen im Anwendungsbereich Mobilität, Verkehr, Logistik und Energienetze planen, können Sie unter bestimmten Voraussetzungen einen Zuschuss erhalten.
Klimaschutzinitiative – Kommunale Klimaschutz-Modellprojekte	Umwelt- & Naturschutz, Smart Cities & Regionen, Corona-Hilfe	Verband/Vereinigung, Öffentliche Einrichtung, Kommune, Hochschule, Forschungseinrichtung, Bildungseinrichtung	Wenn Sie im kommunalen Umfeld wegweisende investive Modellprojekte planen, durch die die Emission von Treibhausgasen verringert wird, können Sie unter bestimmten Voraussetzungen einen Zuschuss von bis zu EUR 10 Millionen erhalten. Im Zuge des Corona-Konjunkturpakets der Bundesregierung stellt das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) für Kommunen in dem Zeitraum vom 1.8.2020 bis zum 31.12.2021 zusätzliche EUR 100 Millionen zur Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen bereit.
BMEL-Exportförderprogramm	Außenwirtschaft, Beratung	Unternehmen, Verband/Vereinigung	Wenn Sie Ihre Exporttätigkeiten verstärken oder ausbauen wollen, dann können Sie unter bestimmten Voraussetzungen einen Zuschuss erhalten.
Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie Phase II (NIP) - Maßnahmen der Marktaktivierung - Schwerpunkt Nachhaltige Mobilität	Energieeffizienz & Erneuerbare Energien	Unternehmen, Forschungseinrichtung, Hochschule, Kommune, Öffentliche Einrichtung, Verband/Vereinigung	Die Maßnahmen des BMVI im Rahmen der Fortsetzung des NIP zielen darauf ab, Mobilität mit Wasserstoff- und Brennstoffzellen in den nächsten zehn Jahren wettbewerbsfähig im Markt zu etablieren. Dies umfasst fahrzeugseitige Technologien und Systeme ebenso wie die jeweils notwendige Kraftstoffinfrastruktur, die auch einen Beitrag zum Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung leisten können.

Digitalisierung kommunaler Verkehrssysteme	Infrastruktur, Smart Cities & Regionen	Verband/Vereinigung, Kommune, Unternehmen	Wenn Sie Vorhaben zur Digitalisierung kommunaler Verkehrssysteme mit dem Ziel der Stickstoffdioxidreduzierung planen, können Sie unter bestimmten Voraussetzungen einen Zuschuss erhalten.
Zukunftswettbewerb nachhaltige Mobilität (#mobilwandel2035)	Forschung & Innovation (themenspezifisch), Umwelt- & Naturschutz	Forschungseinrichtung, Hochschule, Kommune, Öffentliche Einrichtung, Unternehmen, Verband/Vereinigung	Wenn Sie als lokaler Akteur die Zukunft der Mobilität praxisorientiert und partizipativ entwickeln und mit konkreten Maßnahmen umsetzen möchten, können Sie unter bestimmten Voraussetzungen eine Förderung erhalten.
Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie Phase II (NIP) - Maßnahmen der Forschung, Entwicklung und Innovation - Schwerpunkt Nachhaltige Mobilität	Energieeffizienz & Erneuerbare Energien, Forschung & Innovation (themenspezifisch)	Unternehmen, Forschungseinrichtung, Hochschule	Bekanntmachung der Förderrichtlinie für Maßnahmen der Forschung, Entwicklung und Innovation im Rahmen des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie Phase II (Schwerpunkt Nachhaltige Mobilität) als Teil des Regierungsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie 2016 bis 2026 – von der Marktvorbereitung zu wettbewerbsfähigen Produkten
Gemeinsame Technologieinitiative für Brennstoffzellen und Wasserstoff - Gemeinsames Unternehmen FCH 2	Forschung & Innovation (themenspezifisch)	Unternehmen, Forschungseinrichtung, Hochschule	Das Gemeinsame Unternehmen „Brennstoffzellen und Wasserstoff 2“ (FCH 2) wurde zur Umsetzung der Gemeinsamen Technologieinitiative für Brennstoffzellen und Wasserstoff gegründet.
Förderung des Absatzes von elektrisch betriebenen Fahrzeugen (Umweltbonus)	Energieeffizienz & Erneuerbare Energien, Umwelt- & Naturschutz	Unternehmen, Privatperson, Verband/Vereinigung, Öffentliche Einrichtung	Wenn Sie ein elektrisch betriebenes Fahrzeug oder akustische Zusatzeinrichtungen für Elektro-, Hybrid- oder Brennstoffzellenfahrzeuge anschaffen wollen, können Sie unter bestimmten Voraussetzungen einen Zuschuss erhalten.
Horizont 2020 - Spezifisches Programm (2014-2020)	Forschung & Innovation (themenoffen)	Unternehmen, Forschungseinrichtung, Hochschule, Öffentliche Einrichtung, Verband/Vereinigung	Horizont 2020 bildet die Grundlage für die Förderung von Forschung und Innovation durch die Europäische Union in den Jahren 2014 bis 2020. Ziel ist es, unionsweit eine wissens- und innovationsgestützte Gesellschaft und eine weltweit führende Wirtschaft aufzubauen und gleichzeitig zur nachhaltigen Entwicklung beizutragen.
Energieforschungsprogramm - Angewandte nichtnukleare Forschungsförderung	Forschung & Innovation (themenspezifisch), Energieeffizienz & Erneuerbare Energien	Öffentliche Einrichtung, Kommune, Hochschule, Forschungseinrichtung, Unternehmen	Wenn Sie Forschungs-, Entwicklungs- oder Demonstrationsvorhaben zu Energietechnologien im nichtnuklearen Bereich planen, können Sie unter bestimmten Voraussetzungen einen Zuschuss erhalten.
Förderung der Sicherheit und der Umwelt in Unternehmen des Güterkraftverkehrs mit schweren Nutzfahrzeugen (De-minimis)	Beratung, Energieeffizienz & Erneuerbare Energien, Umwelt- & Naturschutz	Unternehmen	Wenn Sie als Unternehmen im Güterkraftverkehr Vorhaben in den Bereichen Sicherheit und Umwelt umsetzen möchten, können Sie unter bestimmten Voraussetzungen einen Zuschuss erhalten.
Nachrüstung von mit Selbstzündungsmotor angetriebenen Nutzfahrzeugen (schwere Kommunalfahrzeuge)	Energieeffizienz & Erneuerbare Energien, Umwelt- & Naturschutz	Kommune, Öffentliche Einrichtung, Unternehmen	Wenn Sie planen, in schweren Kommunalfahrzeugen nachträglich genehmigte Abgasnachbehandlungssysteme zur Reduzierung der Stickoxidemissionen einzubauen, können Sie unter bestimmten Voraussetzungen vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) Zuschüsse zu den System- und externen Einbaukosten erhalten.

Nachrüstung von mit Selbstzündungsmotor angetriebenen gewerblichen schweren Handwerker- und Lieferfahrzeugen mit Stickoxidminderungssystemen	Energieeffizienz & Erneuerbare Energien, Umwelt- & Naturschutz	Unternehmen	Wenn Sie gewerblicher Unternehmer oder Handwerker in einer Stadt oder Gemeinde mit stärkerer Luftverschmutzung sind, können Sie einen Zuschuss für die Nachrüstung Ihrer schweren (Diesel-)Fahrzeuge mit einem Stickoxidminderungssystem erhalten.
Klimaschutzinitiative - Innovative marktreife Klimaschutzprodukte (Kleinserien-Richtlinie)	Umwelt- & Naturschutz, Energieeffizienz & Erneuerbare Energien	Existenzgründer/in, Privatperson, Öffentliche Einrichtung, Kommune, Hochschule, Forschungseinrichtung, Bildungseinrichtung, Unternehmen	Wenn Sie in eine Kleinstwasserkraftanlage, eine Anlage zur Sauerstoffproduktion, Wärmerückgewinnung aus Abwasser in Gebäuden, Bohrgeräte für Erdwärmespeichersonden oder Schwerlastfahräder investieren, können Sie unter bestimmten Voraussetzungen einen Kostenzuschuss erhalten.
Anschaffung energieeffizienter und/oder CO2-arter schwerer Nutzfahrzeuge	Unternehmensfinanzierung, Energieeffizienz & Erneuerbare Energien	Unternehmen	Wenn Sie die Anschaffung von energieeffizienten und/oder kohlendioxidarmen schweren Nutzfahrzeugen ab 7,5 t Gesamtgewicht planen, können Sie unter bestimmten Voraussetzungen einen Zuschuss erhalten.
Bundesförderung für Energieeffizienz in der Wirtschaft – Zuschuss: Modul 1 Querschnittstechnologien	Energieeffizienz & Erneuerbare Energien, Unternehmensfinanzierung	Unternehmen	Für Ihre Investitionen in hocheffiziente Querschnittstechnologien können Sie eine Förderung von 30 % (40 % für KMU) beantragen.

Quelle: (BMWi, 2021)

g. Relevante Förderprogramme der Länder

Bundesland	Förderung	Gegenstand		Alternative Kraftstoffe											Art der Maßnahme										
		Infrastruktur	Kraftstoff	Fahrzeuge: allgemein	Fahrzeuge: Lkw	Synth./paraffinh. Kraftstoffe	Synthetisches Methan	Wasserstoff	Biokraftstoffe	Synthetische Kraftstoffe	Paraffinh. Kraftstoffe	Elektrizität	LNG (Liquefied Natural Gas)	CNG (Compressed Natural Gas)	Alle (i. d. R. außer LPG)	Legislative Maßnahmen	Administrative Maßnahmen	Forschung und Entwicklung	Fahrzeubeschaffung	Aufbau und Ausbau Infrastruktur	Öffentlicher Personennahverkehr	Förderungsproduktionsanlagen	Sonstige politische Maßnahmen		
Niedersachsen	Förderung von Innovation durch Hochschulen und Forschungseinrichtungen	X	X	X				X										X							
Niedersachsen	Forschungs- und Berufungspool, innovative Hochschulprojekte	X	X	X											X			X							
Niedersachsen	Verbesserung der Versorgung mit alternativen Treibstoffen	X					X				X	X								X	X				
Bremen	Landeserlass Ladesäulen	X									X					X									
Hamburg	Anpassung der Beschaffungsrichtlinien für öffentliche Fuhrparks			X			X				X					X									
Hamburg	Ausbau öffentlich zugänglicher Ladeinfrastruktur	X									X									X					

Nordrhein-Westfalen	NRW.BANK.Elektromobilität	X	X		X			X							X	X	X	X		
Nordrhein-Westfalen	Wettbewerb „Modellregion Wasserstoff-Mobilität“	X	X	X				X							X					X
Nordrhein-Westfalen	Programm progres.NRW-Innovation	X	X	X									X		X					
Nordrhein-Westfalen	Förderwettbewerb EnergieUmweltwirtschaft.NRW	X	X	X									X		X					
Nordrhein-Westfalen	Förderwettbewerb MobilitätLogistik.NRW	X		X									X		X					
Nordrhein-Westfalen	NRW.BANK.Effizienzkredit	X	X			X	X	X	X	X	X					X	X			
Nordrhein-Westfalen	Klimaschutzwettbewerb EnergieSystemwandel.NRW	X	X	X			X	X	X	X					X					
Nordrhein-Westfalen	Klimaschutzwettbewerb HydrogenHyWay.NRW		X				X								X					
Nordrhein-Westfalen	Programmbereich „Emissionsarme Mobilität“ im Förderprogramm für „Rationelle Energieverwendung, regenerative Energien und Energiesparen“ (progres.nrw)	X		X			X			X						X	X			
Nordrhein-Westfalen	Initialberatung durch die EnergieAgentur.NRW zum Thema klimagerechte Mobilität	X	X	X									X							X
Hessen	Innovationsförderung – Schwerpunkt Elektromobilität	X		X						X					X					
Hessen	Förderprogramm „Elektromobilität“	X		X						X					X		X			
Hessen	Förderprogramm „Modellhafte F&E-Vorhaben“ (EFRE = Europäischer Fonds für regionale Entwicklung)	X	X	X		X	X			X										
Rheinland-Pfalz	Elektromobilität im ländlichen Raum – Entwicklung einer Pilotregion im Westerwald	X		X						X					X		X			X
Rheinland-Pfalz	Lotsenstelle alternative Antriebe	X		X									X							X
Baden-Württemberg	Innovationsgutschein für kleine und mittlere Unternehmen	X		X									X		X					
Baden-Württemberg	Innovationsallianz BW (in-nBW)	X	X	X			X			X					X					

Baden-Württemberg	Landesinitiative Elektromobilität III	X		X	X										X			X	X	X	X	X	
Baden-Württemberg	Promotionskolleg HYBRID II			X						X								X					X
Baden-Württemberg	Verbundprojekt reFuels – Kraftstoffe neu denken		X			X												X					
Baden-Württemberg	Ressourceneffizienzfinanzierung der L-Bank	X		X	X			X		X	X	X							X	X			
Baden-Württemberg	Leuchtturmprojekt Power-to-Gas Baden-Württemberg		X					X										X					
Baden-Württemberg	Flächendeckendes Sicherheitsladenetz für Elektrofahrzeuge (SAFE) in Baden-Württemberg	X								X										X			
Bayern	„Elektromobilität und innovative Antriebstechnologien für mobile Anwendungen“ (BayEMA)	X		X						X								X					
Bayern	Förderung von Netzwerkaktivitäten zwischen Hochschulen und Unternehmen	X		X											X								X
Bayern	Programm „Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge“	X								X										X			
Thüringen	Förderung von Forschung, Technologie und Innovation (FTI-Richtlinie)	X	X	X											X			X					
Thüringen	Förderprogramm für Elektromobilität in kommunalen Unternehmen „E-Mobil Invest“	X			X					X									X	X			
Thüringen	Förderprogramm für kommunale Klimaschutz- und Klimafolgenanpassungsmaßnahmen „Klima Invest“	X			X					X										X	X		
Thüringen	GREEN invest – Förderung von Greentec-Innovationen (Demonstrationsvorhaben und Studien)	X	X	X											X			X					
Sachsen	Förderung der Speicherung von Energie	X								X											X		
Sachsen	Förderprogramm „Zukunftsfähige Energieversorgung“	X		X						X										X	X		
Sachsen	Förderung der Verkehrsinfrastruktur	X		X											X					X	X	X	
Sachsen-Anhalt	Förderprogramm Ladeinfrastruktur	X								X											X		
Brandenburg	Richtlinie „ProFIT Brandenburg“	X	X	X											X			X					
Brandenburg	Richtlinie „Brandenburgischer Innovationsgutschein (BIG)“	X	X	X											X			X					



167	222	402	484	589	150 €
168	223	403	485	590	€ 170
169	224	404	486	591	190 €
170	225	405	487	592	210 €
171	226	406	488	593	230 €
172	227	407	489	594	240 €
173	228	408	490	595	260 €
174	229	409	491	596	280 €
175	230	410	492	597	310 €
176	231	411	493	598	€ 330
177	232	412	494	599	360 €
178	233	413	495	600	400 €
179	234	414	496	601	450 €
180	235	415	497	602	540 €
181	236	416	498	603	650 €
182	237	417	499	604	€ 740
183	238	418	500	605	818 €
184	239	419	501	606	898 €
185	240	420	502	607	983 €
186	241	421	503	608	1.074 €
187	242	422	504	609	1.172 €
188	243	423	505	610	1.276 €
189	244	424	506	611	1.386 €
190	245	425	507	612	1.504 €
191	246	426	508	613	1.629 €
192	247	427	509	614	1.761 €
193	248	428	510	615	1.901 €
194	249	429	511	616	2.049 €
195	250	430	512	617	2.205 €
196	251	431	513	618	2.370 €
197	252	432	514	619	2.544 €
198	253	433	515	620	2.726 €
199	254	434	516	621	2.918 €
200	255	435	517	622	3.119 €
201	256	436	518	623	3.331 €
202	257	437	519	624	3.552 €
203	258	438	520	625	3.784 €
204	259	439	521	626	4.026 €
205	260	440	522	627	4.279 €
206	261	441	523	628	4.543 €
207	262	442	524	629	4.818 €
208	263	443	525	630	5.105 €
209	264	444	526	631	5.404 €
210	265	445	527	632	5.715 €
211	266	446	528	633	6.039 €
212	267	447	529	634	6.375 €
213	268	448	530	635	6.724 €
214	269	449	531	636	7.086 €
215	270	450	532	637	7.462 €
216	271	451	533	638	7.851 €
217	272	452	534	639	8.254 €
218	273	453	535	640	8.671 €
219	274	454	536	641	9.103 €
220	275	455	537	642	9.550 €
221	276	456	538	643	10.011 €
222	277	457	539	644	10.498 €
223	278	458	540	645	10.980 €
224	279	459	541	646	11.488 €
225	280	460	542	647	12.012 €
226	281	461	543	648	12.552 €
227	282	462	544	649	13.109 €
228	283	463	545	650	13.682 €
229	284	464	546	651	14.273 €
230	285	465	547	652	14.881 €
231	286	466	548	653	15.506 €

232	287	467	549	654	16.149 €
233	288	468	550	655	16.810 €
234	289	469	551	656	17.490 €
235	290	470	552	657	18.188 €
236	291	471	553	658	18.905 €
237	292	472	554	659	19.641 €
238	293	473	555	660	20.393 €
239	294	474	556	661	21.171 €
240	295	475	557	662	21.966 €
241	296	476	558	663	22.781 €
242	297	477	559	664	23.616 €
243	298	478	560	665	24.472 €
244	299	479	561	666	25.349 €
245	300	480	562	667	26.247 €
246	301	481	563	668	27.166 €
247	302	482	564	669	28.107 €
248	303	483	565	670	29.070 €
249	304	484	566	671	30.000 €

Quelle: (Caroom.fr, 2021), (Cartegrise.com, 2021)

**Eidesstattliche Versicherung**

Ich, Frau M.Sc. Michelle Küsters, versichere an Eides statt, dass die vorliegende Dissertation von mir selbstständig und ohne unzulässige fremde Hilfe unter Beachtung der „Grundsätze zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis an der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf“ erstellt worden ist.

Düsseldorf, der 03. November 2022

---

Unterschrift